



Association Aéronautique
et Astronautique de France

LETTRE 3AF

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



**MICHEL SCHELLER ÉLEVÉ À LA
DIGNITÉ DE GRAND OFFICIER DANS
L'ORDRE NATIONAL DU MÉRITE**



**VIE 3AF : INTERVIEW DE BRUNO
SAINJON, VICE-PRÉSIDENT DE LA 3AF**



NOUVELLES CONFIGURATIONS D'AÉRONEFS

AVION DRAGON ONERA

DOSSIER AÉRODYNAMIQUE



DOSSIER CYBER-SÉCURITÉ



60 ANS DE L'INSTITUT DE SAINT-LOUIS



**AÉRODYNAMIQUE ET
HYDRODYNAMIQUE DES RECORDS
DE VITESSE À VOILE**

3 ÉDITORIAL

4 MESSAGE DU PRÉSIDENT

4 IN MEMORIAM

POINTS DE VUE

5 SÉCURITÉ NATIONALE, CYBERGUERRE ET CYBER-SPATIAL : GUERRE IMPOSSIBLE, PAIX SPATIALE IMPROBABLE

par Philippe Mueller Feuga

8 CYBERSÉCURITÉ INDUSTRIELLE EN MILIEU MARITIME

par Erwan Maufay

12 LA GESTION DES RISQUES PAR L'IMAGE : LA WEBSÉRIE CYBER VOX.

par Faïz Djellouli et Alexandre Leraître

ACTUALITÉS

12 LA SOUFFLERIE CLIMATIQUE JULES VERNE MODERNISÉE

par Jean-Paul Bouchet

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

14 LA 54^E CONFÉRENCE INTERNATIONALE D'AÉRODYNAMIQUE APPLIQUÉE

par Jean Détery et Patrick Gnemmi

19 SIMULATIONS DE CONDITIONS CLIMATIQUES EXTRÊMES SUR VÉHICULES EN SOUFFLERIE

par Jean-Paul Bouchet

22 POINT SUR L'AVANCEMENT DES RECHERCHES EUROPÉENNES SUR LE TREMBLEMENT

par Éric Coustols

28 NOUVELLES CONFIGURATIONS D'AÉRONEFS

par Ludovic Wiart et Olivier Atinault

33 EXTRÉMITÉS DE VOILURES

par Zdenek Johan et Jean-Luc Hantrais-Gervois

37 L'ASSIMILATION DE DONNÉES EN AÉRODYNAMIQUE : EXEMPLES

par Benjamin Leclair, Hervé Bezar et Olivier Marquet

41 PRIX THÈSE 3AF 2018 : MORPHING ÉLECTROACTIF HYBRIDE À ÉCHELLE RÉDUITE ET RÉELLE. APPLICATION À UNE VOILURE DE TYPE AIRBUS A320

par Gurvan Jodin, Jean-François Rouchon et Marianna Braza

47 AÉRODYNAMIQUE ET HYDRODYNAMIQUE DES RECORDS DE VITESSE À LA VOILE

par Philippe Perrier

52 LA TRANSFORMATION DIGITALE AU SEIN DES OPÉRATIONS AÉRIENNES ET ANTI-MISSILE IAMD : DES CLUSTERS DE SYSTÈMES D'ARMES CAMÉLÉONS

par Luc Dini

56 ISL, 60 ANS DE RECHERCHES POUR LA DÉFENSE ET LA SÉCURITÉ

par Patrick Gnemmi

VIE DE LA 3AF

62 MICHEL SCHELLER ÉLEVÉ À LA DIGNITÉ DE GRAND-OFFICIER DE L'ORDRE NATIONAL DU MÉRITE

par Bruno Chanetz

64 INTERVIEW DE BRUNO SAINJON, PRÉSIDENT DE L'ONERA

par Jean-Pierre Sanfourche

66 TOUS SUR LA LUNE ! #SG[FRANCE] 2019

par Pierre Cordesse

68 LA MAQUETTE DE LA GRANDE SOUFFLERIE S1CH DE CHALAIS-MEUDON EXPOSÉE AU SALON DU BOURGET

par Bruno Chanetz et Gérard Laruelle

NOTE DE LECTURE

71 DOSSIER ABRAHAM DE MOIVRE AUX COMPTES RENDUS DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

par Bruno Chanetz

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

Michel Scheller

RÉDACTEUR EN CHEF

Bruno Chanetz

COMITÉ DE RÉDACTION

Pierre Bescond
Jean Détery
Jean-Yves Guédou
Bertrand de Montluc
Jean-Pierre Sanfourche
Jean Tensi
Pierre Tréfouret
Bernard Vivier

CONCEPTION GRAPHIQUE

ICI LA LUNE
www.icilaLune.com

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



ÉDITORIAL

La cybersécurité est un sujet brûlant, Internet étant le passage obligé de tous les échanges industriels. La transformation digitale s'exerce au sein même des opérations aériennes et anti-missiles, comme nous le rappelle opportunément dans ce numéro Luc Dini (Thales). Aussi le 2 avril 2019, Alumni-ONERA et le cabinet Oliver Wyman organisaient une table ronde sur la cybersécurité à Paris. Les premiers articles de cette Lettre sont le fruit de cette rencontre. Ouvrant le feu, le secrétaire général du club des officiers de sécurité place le débat au niveau de la sécurité nationale en pointant le cyber-spatial. Le titre de son article *guerre impossible, paix improbable* rend compte des enjeux actuels. Le deuxième article, émanant d'un ingénieur sécurité de Naval Group, permet de découvrir la cyber sécurité en milieu maritime. Enfin, Alexandre Leraître avec qui la 3AF entretient des relations suivies depuis notre dossier consacré aux *conséquences de la loi anti-corruption américaine à travers le cas d'Alstom*¹, traite des menaces réelles que le monde digital fait planer sur nos industries.

L'autre dossier de cette Lettre est relatif à l'Aérodynamique. Dans le sillage du congrès 3AF *Aerodynamics at off-design conditions* qui s'est déroulé à Paris fin mars 2019, deux articles reprennent les conférences pilotes de l'ONERA sur le *tremblement aérodynamique* et du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) sur les *simulations de conditions climatiques extrêmes sur véhicules en soufflerie*. La rubrique actualités est consacrée à la modernisation de la soufflerie climatique Jules Verne du CSTB à Nantes. Les souffleries constituent en effet un moyen d'essai commun aux trois grands secteurs industriels aéronautique, espace et défense (ONERA), transport et automobile (CNAM-PSA-Renault) et environnement et bâtiment (CSTB).

En 2013, une exposition *100 ans de souffleries après Eiffel*, rappelée dans ce numéro avec l'article sur la soufflerie S1Ch de Meudon, avait permis de fédérer les aérodynamiciens de ces différents domaines avec le soutien du Centre National de Recherche et de Technologies (CNRT) sur l'Aérodynamique des Véhicules Terrestres (CNRT R2A), dont Jean Délerly préside le Comité scientifique. La Commission Aérodynamique de la 3AF rassemble désormais tous les acteurs de l'aérodynamique en France, bien au-delà du strict domaine aérospatial. En 2017, cette communauté d'aérodynamiciens de tous horizons a publié

chez Cépaduès un livre intitulé *Aérodynamique expérimentale, souffleries et méthodes de mesure*. L'ouvrage, écrit par Jean Délerly (Président de la Commission Aérodynamique), Bruno Chanetz (ONERA), Patrick Gilliéron (Renault), Patrick Gnemmi (ISL) et Philippe Perrier (Dassault Aviation), a été préfacé par Michel Scheller.

Ce dossier aérodynamique s'enrichit également de deux articles sur des thématiques qui ont fait le succès du domaine aérodynamique aux Entretiens de Toulouse en avril 2019 : *Les nouvelles configurations d'aéronefs* (ONERA) et les *extrémités de voilures* (Dassault-Aviation/ONERA). La 3AF apporte en effet son concours à l'Académie de l'Air et de l'Espace, qui organise cette manifestation depuis 12 ans conjointement avec X-Exed². Philippe Perrier est à mes côtés, responsable du domaine aérodynamique au comité de pilotage. L'entretien qu'il animait sur les *hydroptères, ces bateaux qui volent* fut le plus grand succès de la présente session. Ce sujet avait déjà fait l'objet d'un article de sa part dans la Lettre 3AF n°27¹, mais il nous donne ici la primeur de l'entretien qu'il animera en 2020 sur *l'aérodynamique et l'hydrodynamique des records de vitesse à la voile*. Un autre article de cette Lettre porte sur le *morphing électroactif* (Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse et laboratoire Laplace), sujet qui fera également l'objet d'un entretien aérodynamique en 2020. Cette technique, qui consiste en l'optimisation de forme par l'utilisation de matériaux intelligents, avait été primée par la 3AF en 2018 dans le cadre d'un prix de thèse.

Notre dossier comprend également un article de l'ONERA sur *l'Assimilation de données en aérodynamique*. Cette technique issue de la communauté météorologique, est de plus en plus utilisée en aérodynamique. Elle permet un dialogue entre l'expérience et le calcul numérique, profitant aux deux domaines.

Enfin cette Lettre s'achève sur la Vie de la 3AF par un article sur notre président Michel Scheller qui vient d'être élevé à la dignité de Grand Officier dans l'Ordre national du mérite et par une interview par Jean-Pierre Sanfourche d'un des deux vice-présidents de la 3AF, Bruno Sainjon, président de l'ONERA. ■

Bruno Chanetz
rédacteur en chef

¹ <https://www.3af.fr/sites/default/files/lettre3af-n27-septembre-octobre.pdf>

² https://www.3af.fr/sites/default/files/3af_lettre28.pdf

LE MESSAGE DU PRÉSIDENT

Chers Amis,

Le présent numéro reflète pleinement, de mon point de vue, les préoccupations de la Société Savante 3AF.

D'une part, une réflexion profonde, mettant en œuvre des technologies, certes matures, mais relativement récentes ; je pense à tout ce qui a un lien avec le risque cyber, et nos travaux sont enrichis par l'Observatoire du digital, que nous avons mis en place à la satisfaction, en particulier de nos correspondants institutionnels, et qui correspond à des préoccupations qui ont été entre autres exprimées dans le cadre du CORAC.

D'autre part des informations plus techniques dans le secteur de l'aérodynamique, secteur où les progrès s'installent davantage dans la continuité, il suffit pour s'en convaincre, si nécessaire, de procéder à la revue de nos avions, depuis le début du XX^e siècle !

IN MEMORIAM



André Dubresson

Notre ami André nous a quittés le 20 juin 2019, voici déjà plus de deux mois. Que le temps passe vite !!

Avec André, nos parcours dans la vie professionnelle, ont été longtemps assez voisins. Ingénieur de l'Air, devenu Corps de l'Armement, branche aéronautique, André s'est très vite révélé un Ingénieur de grand talent, passionné et très précis, ne laissant aucune ombre subsister dans la conduite de ses responsabilités de ses travaux. Très exigeant envers lui-même, il l'était également de ses collaborateurs. Je puis en attester, j'ai été quelques mois un de ceux là, au SCPM, en 1986.

André n'a pas été épargné, dans sa vie, il a su faire face aux difficultés rencontrées, avec discrétion et élégance. Je l'ai également rencontré lorsque, ses talents appréciés, il a dirigé la DPAC à la Direction Générale de l'Aviation



Voilà donc la revue de votre Société Savante, très riche, et je souhaite à chacun de partager le plaisir qui fut le mien en la parcourant.

Je voudrais aussi vous faire partager la satisfaction qui est la mienne lorsque je reçois de la part de hauts responsables politiques, des lettres de félicitations pour les travaux de la 3AF et en particulier pour cette revue de notre société savante qu'est la Lettre 3AF. Aussi je vous invite à consulter sur notre site la nouvelle rubrique « reconnaissance » qui rassemble déjà quelques témoignages forts.

Je tiens à féliciter chaleureusement le Comité Éditorial qui est à l'origine de nos publications et de nos Lettres. ■

Michel Scheller
Président de la 3AF

Civile et dans cette responsabilité, tous les constructeurs concernés n'ont eu qu'à se louer du rôle que André a joué au meilleur profit de notre Aéronautique Civile.

Depuis quelques années, nous nous retrouvions environ une fois par mois, aux déjeuners du « Charles Club » et tous nous apprécions ses analyses, spécialement lorsqu'elles concernaient le secteur aéronautique. Je me souviens, voici peu de temps, quittant un de ces déjeuners tenu à la Rotonde de l'Ecole Militaire, nous marchions ensemble, lui très difficilement, j'en ai été ému.

À l'occasion de son départ, de nombreux témoignages sont exprimés : en particulier, un témoignage très saisissant de notre ami, Jean-Michel Duc. Nous retrouverons partie de ces témoignages dans nos prochaines lettre et gazette régionale Midi-Pyrénées

Mais je voulais vous dire aujourd'hui toute mon amitié pour ce grand ingénieur qui vient de nous quitter, vous dire toute la reconnaissance empreinte de peine qui est la mienne, et dire à sa famille, à ses proches, qui sont dans la douleur, combien André a été, un modèle exemplaire. ■

Michel Scheller
Président de la 3AF

SÉCURITÉ NATIONALE, CYBERGUERRE ET CYBER-SPATIAL : GUERRE IMPOSSIBLE, PAIX SPATIALE IMPROBABLE

par Philippe Mueller Feuga, Secrétaire général du Club des Officiers de sécurité

Philippe Mueller Feuga est ancien Responsable de la Mission Protection du secret (MPS/HFDS/SGDSN), et Auditeur au Contrôle général économique et financier des Ministères économique et financier, Membre du Groupe de travail sur le rôle des territoires non coopératifs dans la déstabilisation de la finance mondiale. Il est également membre du Comité scientifique de l'EFCSE (European Federation of CyberSecurity Experts)

Accélééré par la disparition de l'URSS (1991) concomitante à la transformation numérique de nos sociétés, le phénomène de mondialisation bouscule les équilibres de « l'ordre mondial ». Faute d'une politique d'innovation volontaire couplée aux attentes des marchés, l'Union européenne (UE) a perdu successivement la bataille des infrastructures de l'Internet, puis celle de ses acteurs maîtres des flux d'informations, captant la rente informationnelle, la *data*. Elle demeure sur la défensive avec les équipementiers comme Nokia Corp. et Ericsson AB dans l'optique d'un déploiement de la 5G, voire de la 6G dont la complexification des enjeux interpelle l'industrie du satellite, ou *Satellite for 5G* - autour de paramètres comme interactivité ou interopérabilité, vitesse, débit et maîtrise de la bande passante, temps de latence, et surtout faisceaux ciblés. L'intégration du satellitaire dans les dispositifs du futur « tout connecté » répond à une demande croissante, de plus en plus mobile mais toujours plus exigeante en termes de confiance et de sécurisation des informations. Question d'indépendance technologique. Question de souveraineté transposée dans le cyber-spatial, ou souveraineté numérique élargie alors que la guerre des codes (*code war*) aura lieu.

Menacée d'une « colonisation numérique », l'UE reste capable d'appréhender les enjeux géostratégiques en tant que puissance assumée : d'une part en raison d'une « territorialisation » croissante de l'Internet terrestre par le retour d'États régulateurs ; d'autre part avec l'affirmation d'une politique spatiale à un moment où, dix ans après la création de l'*US Cyber Command*, celle d'une *Space Force* américaine (2018) - écho du programme *Star Wars* du Président Reagan - transforme l'espace en une *new arena for war*. Dès lors, la « territorialisation » de l'Internet spatial devient réalité malgré le traité de l'Espace (1967), réaffirmé en 2002, « régissant les activités des États en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique ». Mieux, l'Europe intergouvernementale d'Ariane aux 22 États peut partager une vision gaullienne d'indépendance - concrétisée par la création du CNES (1961), puis le lancement du satellite Asterix (1965) par un vecteur national Diamant - dans la défense de ses intérêts autour de la sonde Rosetta/Philae ou de la constellation Galileo : affirmer son autonomie stratégique dans les

technologies de rupture tout en se protégeant du pillage de « secrets régaliens » ou informations « sensibles », hors du champ des données personnelles.

LES BUTS DE GUERRE À L'HEURE DU NUMÉRIQUE SATELLITAIRE

Sur les chemins de la puissance, se pose la question des buts de guerre suite à l'entrée du cyber-spatial comme nouveau lieu de conflictualité. La bataille pour la suprématie digitale est portée par les acteurs *tech giants*, les GAFAM américains et les BATXH chinois dont la capitalisation boursière est sans commune mesure avec les capacités des acteurs européens qui s'annoncent dans l'industrie spatiale du futur.

Les buts de guerre à l'heure du numérique ont été posés durant la première guerre froide (1947-1991). Dans la course à la Lune consécutive au succès de Sputnik (1957), le programme Apollo a été un formidable incitateur en innovations *high tech* grâce à une organisation agile de la recherche. Entre autres, tant dans le *hardware* - miniaturisation et puissance des gros calculateurs, importance de nouveaux matériaux composites en termes de résistances ou de mémoires de forme (nickel, titane), ordinateurs à circuits intégrés -, que dans le *software* avec de nombreuses applications tels les langages de programmation, les systèmes embarqués perfectionnés, mais aussi l'imagerie numérique, les différents capteurs photographiques capables de convertir un rayonnement électromagnétique en valeur numérique ouvrant la voie au traitement de données de masse par la NASA, ou *big data* (1997).

Si la question du prestige reste déterminante tant en interne que pour l'opinion publique mondiale, la logique de puissance oblige à une dynamique de démonstrations radicales dans la conquête de l'espace. La nécessité d'une indépendance stratégique en missiles balistiques s'était jadis traduite par le discours de Kennedy devant le Congrès américain (mai 1961). Aujourd'hui elle s'énonce par la destruction volontaire de la part des Chinois d'un de leurs satellites météorologiques hors service (janvier 2007), le lancement du premier satellite Mozi à commu-

nication quantique (août 2016), l'atterrissage de la sonde Chang'e4 ouvrant l'exploitation robotique (Lapin de jade, ou Yutu 2) de la face cachée de la Lune (janvier 2019), et d'intrusions intempestives dans les systèmes de contrôle et de commande de satellites. Démonstrations de force duales d'une capacité militaire de maîtrise des technologies spatiales, ou est-ce la mise en valeur du cosmos comme « bien commun » au service des citoyens, de l'amélioration de la vie, de la biodiversité ou du climat à l'image de la station internationale, ISS ?

Dominer l'espace annonce une nouvelle course à la Lune et une seconde guerre froide modulée en guerre « hors limites », mais dans un contexte différent. Les agences publiques des deux systèmes américain et chinois auront à résoudre la question des coûts de manière totalement inégale. Les cultures, les structures de pouvoir et les processus de prise de décision s'opposent entre « l'agilité » des *start-up* du *Made in Silicon Valley* et le constat *Huawei's Communist culture limits its global aims* (New York Times, 4-5 mai 2019), teintés de confucianisme, de la pensée du stratège historique Sun Tzu et portés par le *global hub of innovation* de Shenzhen, zone économique spéciale créée en 1984. Le nouvel âge spatial ou *New Space* est né des innovations précédentes, de certains échecs en 1986 et 2003, de la déclinaison du *web 1.0* au *web n.0* avec l'émergence de nombreuses entreprises privées sollicitées par les agences spatiales d'autres États-puissance (Japon, Inde, Corée du Sud, Canada, Australie, Émirats Arabes Unis, Pologne...).

Les objectifs s'affinent. Un écosystème se constitue dans la bataille pour l'hégémonie digitale. Il bouscule le marché spatial partagé entre les agences publiques et les géants du secteur aérospatial comme Boeing, Lockheed Martin ou ArianeSpace - premier opérateur de transport spatial privé, lanceur de satellites pour des tiers capables de maîtriser code et transmission du signal. En Europe, AirbusDS, ThalesAS, SESGlobal ou Eutelsat sont aussi en lien avec une multitude de *start-up* qui indirectement participent à la baisse du coût d'entrée dans l'espace, illustrée par Blue Origin, Orbital ATK, OneWeb ou SpaceX capable de produire des segments réutilisables, mais aussi les licornes présentes dans des niches spatiales tels les nano-satellites, ainsi que dans les services spécialisés de gestion d'infrastructures vitales, de convergence de systèmes IT/OT¹, d'opérateurs de services essentiels, OSE ou OIV, du contrôle des cycles du renseignement numérique ou data devenue cible car nouvelle richesse des nations et déterminant de la sécurité nationale.

AUTONOMIE STRATÉGIQUE CONÇUE EN TERMES DE PUISSANCE

La question de l'autonomie stratégique dépend de la définition retenue en termes d'exercice de la souveraineté et de l'identification de la menace cyber-spatiale. Cette approche par défaut s'impose aux informations sensibles : leur divulgation serait contraire aux intérêts essentiels de la sécurité des États membres dont la somme pourrait correspondre aux intérêts de l'UE. Faute d'une puissance affirmée ou d'une souveraineté de plein exercice, l'autonomie stratégique de défense n'est pas soumise aux règlements européens, et doit en toutes circonstances assurer la sécurité et l'intégrité du territoire, ainsi que la vie de la population aux termes de l'art. 1 de l'ordonnance de 1959 portant organisation de la défense nationale. Et ce, à un moment où la France adopte une doctrine de lutte informatique offensive (LIO) hissant, selon le Chef d'État-Major des armées (CEMA), le numérique au rang des armes classiques (mars 2019). Dès lors, il s'agit d'assurer une pleine autonomie de décision faisant valoir nos intérêts fondamentaux, comme la France a su l'affirmer au sein de l'OTAN.

L'exclusion de la dimension extérieure dans la construction du marché unique y a limité toute réflexion en matière de doctrine de puissance, de buts de guerre économiques, de champions européens à l'inverse de pays animés d'une volonté de puissance ou d'ambitions comme l'Australie, mais aussi la Turquie, l'Iran, la Corée du Nord, etc. Les États-Unis ont su adopter très tôt une législation contraignante face à l'*economic espionage* (1996) ; la Chine ayant institué un capitalisme d'État à parti unique a posé les bases juridiques d'une politique de sécurité nationale - sur les intérêts économiques du pays, et un soutien au PCC - par une loi sur le renseignement national (juin 2017) invitant tout citoyen à collaborer avec les « organes » de renseignement. L'UE peut suivre ce mouvement sécuritaire avec les États membres qui disposent d'outils « souverains » capables d'imposer une préférence européenne dans l'attribution des fréquences, la mutualisation des moyens de la taxation des *tech giants* dédiée aux investissements de la 5G ou par l'autorisation d'investissements étrangers en relation avec le concept de sécurité nationale élargie, comparable au comité pour l'investissement étranger aux États-Unis ou CFIUS.

L'Union européenne (UE), première puissance commerciale du monde dotée de quelques parcelles de souveraineté, est rattrapée par la guerre commerciale ou *unfair competition*, doublée d'une rivalité technologique entre deux grandes puissances. Le dossier Broadcomm Ltd/Qualcomm Inc. porté par le CFIUS (mars 2018) et celui

¹ IT : Information Technology / OT : Operational Technology

SÉCURITÉ NATIONALE, CYBERGUERRE ET CYBER-SPATIAL : GUERRE IMPOSSIBLE, PAIX SPATIALE IMPROBABLE

de Huawei confondu dans un possible détournement des sanctions américaines contre l'Iran (janvier 2019) sous couvert d'influence dominante autour de la 5G illustrent cette rivalité. Celle-ci n'est qu'un aspect de l'approche hybride globale d'une guerre économique tous azimuts (guerre des changes ou des taux, guerre des normes ou standards - via l'UIT ou 3GPP, guerre de l'intelligence artificielle, guerre de l'information, etc.). Bref, une guerre hors limites issue de la réflexion chinoise (1999) sous influence de Sun Tzu transposée à l'ère de la mondialisation et du cyber-spatial où se joue la guerre du futur. Dès 2003, la cyberguerre a commencé, de plus en plus prégnante et graduellement organisée : des *hackers* ou *proxies* interposés pour éviter toute attribution ; une capacité d'une censure interne d'Internet adoptée en Chine entre 1994-1996 et concrétisée par le renforcement du Bouclier doré (*Golden Shield* ou *Great Firewall*) ; une déconnexion de l'Internet mondial aux points d'entrée comme le teste le service de contre-espionnage russe FSB ex-KGB, ou comme le fait l'Iran. Stratégies de fermeture à opposer à celle ouverte des exercices américains Cyber Storm conduits par le département de sécurité (DHS) post 11 septembre 2001 afin de tester la capacité à lutter contre les cyber-menaces sur les infrastructures vitales, comme la production ou le transport d'électricité, facilitée par la convergence IT/OT et économiquement déstabilisatrices.

L'UE n'a aucune stratégie face à une situation conflictuelle due à la contestation de l'hégémonie occidentale composée d'un noyau dur, les États-Unis, et d'un allié, l'Union européenne. Une Union européenne traumatisée par ses expériences du XX^e siècle court et tragique (1917-1991, avec ses totalitarismes), devenue volontairement libre-échangiste, consensuelle et pacifique, voire naïve car actrice du renoncement politique à la volonté de puissance et à la souveraineté numérique. Une forme de politique d'*appeasement* qui conduit à une colonisation numérique rampante. Pourtant, de part et d'autre de l'Atlantique le nombre des cyberattaques, comme les virus Wannacry ou NotPetya (2017) ou celles visant l'organisme international des adresses Internet ICANN (février 2019), et celui des *exploits zero day* sont croissants, pillant les actifs informationnels de nos entreprises, des secteurs entiers, voire de zones géographiques de plus en plus larges, fonction directe de la taille des réseaux et des possibles interconnexions.

L'autonomie stratégique doit être assurée dans l'optique d'attaques éclair, déstabilisatrices. Les champs de bataille se dessinent autour des trois couches de l'Internet présentes dans toute architecture numérique ayant chacune leurs propres vulnérabilités telle la couche physique (celle des équipements, satellites, antennes, supports, câbles et nœuds de connexion se structurant en axes d'importance inégale en bande passante où passe le trafic de données)

pouvant relever d'un contrôle souverain. Cette première couche répond à la suivante, couche logique composée de protocoles et de codes contrôlés par des administrateurs « autorisés » gérant les droits d'accès pour assurer l'interopérabilité sur le *web* ; puis la transmission des informations ou *data* dont le contenu compose la troisième couche, ou couche sémantique, à sensibilités inégales mais créatrices de la rente informationnelle et d'avantages compétitifs. Celle-ci est également porteuse de « secrets » ou de confidentialité le plus souvent cryptés, certains au nom des intérêts fondamentaux de la nation. La fonction sécurité n'étant pas intégrée *by design* chez les éditeurs de logiciels, la sécurisation de chacune de ces trois couches dont la couche logique est donc indispensable pour conserver la souveraineté numérique, et y intégrer une réflexion éthique notamment dans la capacité des réponses à apporter (frappe aérienne ou spatiale ou lutte informatique offensive). C'est aussi la maîtrise de la ressource (bande passante/fréquences/antennes) qui repose sur les moyens techniques, la mise en conformité et une organisation efficace en matière de gestion des « informations sensibles » (IGI 1300, et autres dispositifs de protection tels la PPST, le SAIV ou la procédure IEF) sous l'égide des services étatiques ou par délégation notamment auprès des OIV ou OSE nationaux.

CONCLUSION

Gagner la guerre de la donnée c'est bousculer les systèmes hérités (*legacy*) des premiers *web*, et poursuivre les transformations des champs de la défense et de la sécurité dans le cyber-spatial en assurant notre autonomie stratégique via les deux Internet dans une paix spatiale impossible : préserver nos capacités de décision et d'action de manière autonome, tout particulièrement par la maîtrise de l'information. ■

CYBERSÉCURITÉ INDUSTRIELLE EN MILIEU MARITIME

par Erwan Maufay, Ingénieur Cybersécurité ICS chez Naval Group

Au cours des siècles derniers l'Homme a su exploiter industriellement et stratégiquement le domaine maritime.

Du déploiement de parcs éoliens de plusieurs kilomètres carrés à l'opération militaire Hamilton du 14 avril 2018 où la France a engagé entre autres 5 frégates et un pétrolier ravitailleur, l'usage du domaine maritime est varié.

Actuellement plus de 90 % des échanges physiques commerciaux utilisent le segment maritime civil comme support de transport. Les navires porte-conteneurs les plus imposants peuvent désormais transporter plus de 20 000 conteneurs. Un méthanier peut transporter en un seul voyage l'équivalent de la consommation annuelle en gaz naturel d'une ville comme Lyon. Certains navires de croisière peuvent héberger plus de 6 600 passagers auxquels il faut ajouter plus de 2 000 membres d'équipage. Peu connu du grand public, mais utilisé dans un tout autre objectif, le segment militaire maritime a aussi une place importante dans le paysage maritime international.

Toujours dans le domaine maritime, mais à la frontière et en interface avec le domaine terrestre, les installations portuaires industrielles se sont aussi développées et modernisées au cours des siècles. Les ports utilisés par le segment maritime civil sont les points de passages clefs des marchandises ou des passagers en transit, et les bases navales militaires sont des lieux stratégiques pour la maintenance des navires du segment militaire maritime.

Toutes ces activités industrielles maritimes requièrent, depuis plusieurs dizaines d'années, l'utilisation de systèmes de contrôle industriel (ICS, *Industrial Control Systems*). Ces systèmes n'ont pas toujours été équipés de moyens informatisés. Les automates programmables ont par exemple peu à peu remplacé les systèmes à relais en logique câblée, les interfaces homme-machine ont remplacé les afficheurs analogiques à aiguille. Désormais certains automates sont capables d'effectuer de l'historisation de données sur 10 ans et d'utiliser des protocoles de communication chiffrés.

Les produits sur étagères (COTS, *Commercial Off The Shelf*) sont actuellement très employés dans le monde de l'industrie maritime. L'utilisation de produits sur étagère a pris de l'importance au début des années 90. À cette époque, les vendeurs de solutions COTS promettaient des coûts d'achat, de développement et de maintenance réduits par rapport à des alternatives technologiques spécifiques aux installations industrielles ciblées. Aujourd'hui l'emploi de COTS est, du point de vue de la

cybersécurité, devenu un point de vigilance : certains de ces produits bénéficient de mises à jour de sécurité ponctuelles, mais ces mêmes produits sont utilisés aussi bien dans des installations militaires que dans le domaine public. Acquérir des informations, réaliser des activités de rétro ingénierie et réaliser des tests sont des tâches plus faciles à réaliser sur des produits COTS que sur d'autres types d'équipements. Les attaques Stuxnet ou Petya sont un bon exemple de la problématique de cybersécurité et de l'utilisation des COTS. Dans le premier cas le programme nucléaire Iranien a été ralenti à cause d'une attaque qui a ciblé, entre autres, des automates Siemens S7-300, et dans l'autre cas des chaînes de production de véhicules ont été stoppées à cause d'un « rançongiciel » qui s'attaque à des systèmes d'exploitation de type Windows. L'un de ces produits peut être employé par un particulier afin de gérer l'automatisation de sa porte de garage et l'autre peut permettre à n'importe qui de consulter les résultats des courses hippiques. Ces mêmes produits sont utilisés par des OIV (Opérateur d'Importance Vitale) et pour gérer des installations industrielles d'une grande valeur ou d'un grand intérêt stratégique.



FREMM Languedoc, BPC Mistral, Frégate antiaérienne Chevalier Paul en mer (Large de la Corse)
©Adriant Daste - Naval Group

L'étude d'une solution technologique adaptée à un problème est un élément important à prendre en compte lorsqu'il est question de l'industrie maritime. Ces installations sont souvent utilisées pour des cycles de vie de plusieurs dizaines voire vingtaines d'années. Aucun acteur de l'industrie n'est aujourd'hui capable d'assurer qu'une installation industrielle conçue en 2019 sera du même niveau de cybersécurité en 2029. Les solutions de protection évoluent mais les attaques évoluent également et les vulnérabilités sont de plus en plus nombreuses. La plupart des acteurs de l'industrie maritime ont bien intégré cette problématique et depuis plusieurs années ce

point est pris en compte dans les phases de maintenance et de traitement d'obsolescences. La cybersécurité dans le domaine maritime se doit, tout comme les entreprises qui proposent des services autour de cette problématique, d'être dynamique, évolutive et adaptée.

Les processus industriels maritimes civils et militaires comportent des différences. L'une des plus importantes pour le sujet de la cybersécurité est la phase de maintenance.

En France, dans le domaine militaire maritime, les phases de maintenance réalisées par les industriels sont caractérisées par des contrats dont les délais de réalisation s'étalent sur plusieurs années et couvrent plusieurs escales. Le nombre d'industriels qui interviennent lors de ces phases de maintenance est peu élevé et les chantiers ont lieu sur le territoire national.



FREMM Languedoc (Lorient)
©Adrien Daste - Naval Group

Dans le domaine civil, la maintenance est réalisée à la mer par l'équipage et lors des arrêts techniques par un chantier. L'arrêt technique s'effectue dans un chantier sélectionné par l'armateur. Le plus souvent, le choix du chantier est motivé par la question de l'emplacement géographique du navire, ses futurs voyages, le coût des opérations techniques et de la qualité du travail réalisé par le chantier. Un navire civil n'est donc pas rattaché à un chantier unique et encore moins à un chantier national.

On comprend alors que la problématique de la cybersécurité lors de la phase de maintenance n'est pas la même dans les domaines civils et militaires. Dans le cas du segment militaire, les acteurs de ces phases de maintenance sont bien identifiés, connus à l'avance, et les opérations visant à modifier, réparer ou faire évoluer les installations industrielles cadrées. Dérouler des opérations de cybersécurité de haut niveau sur des bâtiments militaires est plus aisé que sur des navires civils.

La problématique de la cybersécurité prendra une place encore plus importante sur les navires du futur.

Grâce aux avancées dans le domaine des communications satellites et à la baisse des tarifs d'abonnement aux services satellites, les installations industrielles maritimes embarquées sont de plus en plus connectées. Sur certains navires, les pompes envoient des données sur l'état de leurs paliers directement au fabricant afin que ce dernier puisse réaliser de la maintenance prédictive. L'automatisation partielle ou totale de certains navires de commerce est en route. Dans le domaine du transport maritime, les acteurs du maritime viennent de se rendre compte que le ratio risque commercial / automatisation, qui était jusqu'à maintenant le principal frein en matière d'innovation dans l'automatisation des systèmes embarqués, venait de s'inverser. C'est un changement de paradigme. Aller chercher au milieu d'un dispositif de séparation de trafic un navire entièrement automatisé de 300 m de long, qui suite à une avarie moteur n'est plus maître de sa manœuvre, n'est pas plus onéreux que d'aller chercher un navire de 300 m de long avec ses 30 membres d'équipage qu'il faudra évacuer puis rapatrier. La cybersécurité industrielle sera un pilier majeur de l'architecture de ces navires : au même titre qu'un défaut sur le moteur de propulsion, un défaut de cybersécurité pourrait compromettre la mission ou le voyage du navire.



Porte avion Charles de Gaulle lors de son entrée en bassin pour entretien en 2013 (Toulon). ©DCNS

Les industriels du milieu maritime préparent l'avenir dans le domaine de la cybersécurité industrielle : formations, recrutements en hausse, mises en place de structures spécialisées et élaborations de nouvelles prestations permettent et permettront de répondre à la problématique de la cybersécurité des installations industrielles en milieu maritime. ■

LA GESTION DES RISQUES PAR L'IMAGE : LA WEBSÉRIE CYBER VOX

Par Faïz Djellouli, CEO d'Holiseum et créateur de Cyber Vox,
et Alexandre Leraître, réalisateur, co-fondateur de MGS - Média Géo Stratégie.



Cyber Vox est une websérie diffusée sur Youtube et produite par la société de Conseil en cybersécurité Holiseum. Son objectif : vulgariser et sensibiliser aux risques liés aux cyberattaques.

Youtube a longtemps été un espace de streaming dédié au téléchargement, parfois illégal, de films et de musiques consultables librement en ligne.

Cette plateforme a bien évolué et met aujourd'hui en exergue le phénomène des vidéastes : les créateurs de contenu audiovisuels dont le spectre s'étend des musiciens aux blogueurs, des humoristes aux joueurs de jeux vidéos, en passant par les journalistes, les auteurs et les réalisateurs. Les qualités sont variables : amateurs ou professionnels, indépendants ou salariés.

Ce phénomène des vidéastes dénote également la structuration d'un média à part entière, qui concurrence graduellement le monde de la télévision classique. On estime désormais à 25 millions le nombre d'internautes qui, chaque mois, consultent plus de deux heures de programmes vidéo par jour en France. Les vidéastes les plus célèbres disposent par ailleurs d'une base d'abonnés fidélisés à leurs programmes qui dépasse les audiences de certaines émissions de télé aux heures de grande écoute.

C'est d'abord dans cette logique d'adaptation aux nouveaux modes de consommation de programmes audiovisuels des internautes que s'inscrit l'initiative de la websérie Cyber Vox. A ce jour, la gestion des risques et la sensibilisation des salariés, fonctionnaires et des entrepreneurs obéit encore à des schémas plutôt classiques : tables rondes, newsletters, power points.

L'ambition de Cyber Vox est de produire un programme télévisuel sur internet ambitieux et exigeant, que ce soit en terme de narration, de logistique et de graphisme.

Nous voulons que ce programme soit à la fois accessible pour le grand public et pertinent pour les professionnels du milieu de la cybersécurité.

Cette websérie entend donc remplir cette double mission d'offrir une éducation populaire centrée sur la cybersécurité tout en fédérant les professionnels autour d'une vision partagée.

Pourquoi est-il d'autant plus pertinent de figurer les phénomènes cyber par la vidéo ? Nous remarquons que les enjeux autour du data, des objets connectés ou même des vulnérabilités des infrastructures vitales de nos sociétés modernes sont encore des phénomènes mal connus, parce que trop abstraits. Tout cela semble encore relever du domaine du virtuel et de l'intangible. Un effort de vulgarisation considérables reste à faire sur ce sujet, et quoi de mieux que le médium audiovisuel pour accomplir cette tâche ambitieuse ?

Le cabinet de conseil en cybersécurité Holiseum est à l'origine de cette initiative. Le concept consiste à produire des formats vidéos courts et épisodiques, traitant chacun un sujet de cybersécurité faisant écho à l'actualité, tout en promouvant les solutions d'une entreprise française, qui parraine l'épisode.

Le premier est sorti début juin, et propose de survoler un certain nombre de menaces qui tendent à se généraliser dans nos sociétés digitales, comme les failles de sécurité des objets connectés, le piratage d'infrastructures industrielles vitales et l'impact économique sur le commerce international.

Ce premier épisode pose aussi des intentions narratives claires et assumées. En travaillant sur ce pilote, nous avons constaté que les vidéos existantes sur la cybersécurité et produites par des entreprises à l'aide d'agences de communication sont toutes sensiblement les mêmes : des animations en motion design 2D, aux couleurs pastel rose bonbon très enfantines, le tout soutenu par une musique de ukelele. Tout semble être fait pour qu'un sujet sérieux soit systématiquement dédramatisé, au risque de brouiller le message qui est d'alerter sur l'acuité des menaces qui pèsent sur nos sociétés de plus en plus digitalisées.

Pour Cyber Vox, nous choisissons à l'inverse de privilégier et d'assumer une ambiance sombre et anxiogène pour dépeindre des menaces réelles qui ne doivent pas être minimisées.

En somme, notre message est orienté vers l'exposition de la cybermenace telle qu'elle existe réellement. Nous voulons encourager les prises d'initiatives de sécurisation permettant de gérer les risques cyber de manière éclairée, et de préférence dès les premières phases des projets (by design) et non pas une fois seulement le projet achevé comme nous l'observons hélas bien trop souvent. Nous soulignons le fait qu'il n'y a pas de fatalité en la matière et que la cybersécurité est une alliée et non un frein à la transformation numérique, pour peu que les organisations prennent conscience du sérieux à donner à ce sujet, et c'est là que la websérie « Cyber Vox » entend bien apporter sa pierre à l'édifice.



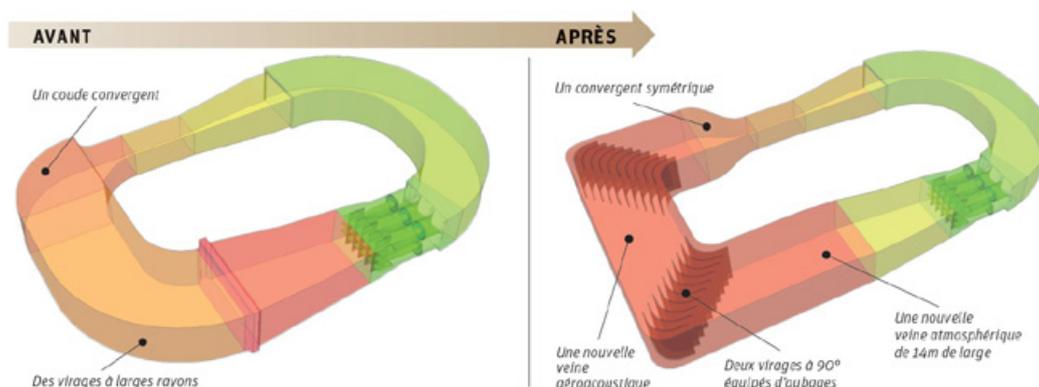
L'essentiel des épisodes est illustré sous forme de modélisations 3D originales, et mobilise des références visuelles propres à la culture populaire. Séries TV, films, jeux vidéo, bande dessinée...Autant de médiums qui se croisent et se répondent à travers une narration combinant images de synthèse, dessin animé et prises de vues réelles. La Science Fiction est une référence majeure, en cela qu'elle a toujours eu beaucoup d'avance lorsqu'il s'agit de représenter visuellement des espaces immatériels tels que les réseaux informatiques et Internet.

Du point de vue de la gestion des risques, le premier épisode est d'ores et déjà diffusé en interne de nombreuses entreprises du secteur pour sensibiliser les employés aux bonnes pratiques, ce qui contribuera à terme à la notoriété de la démarche.

Nous souhaiterions tenir une cadence d'au moins un épisode tous les deux à trois mois pour des durées de 2 minutes 30 par vidéo. A ce stade, nous envisageons de produire une quinzaine d'épisodes, avec un budget prévisionnel total tutoyant le demi million d'euros sur 2019-2021, financés sur fonds propres d'Holiseum et grâce aux apports de sponsors dont nous mettons en avant les solutions au fil des épisodes. L'œuvre suivra un fil conducteur pour aborder in fine l'ensemble des préoccupations majeures du monde cyber, en faisant apparaître en filigrane les notions de cyber-souveraineté, d'indépendance stratégique et de géopolitique du « numérique ». ■

LA SOUFFLERIE CLIMATIQUE JULES VERNE MODERNISÉE

par Jean-Paul Bouchet, CSTB, membre de la Commission technique Aérodynamique de la 3AF



Évolution de la géométrie de la soufflerie principale (crédit CSTB)

C'est une actualité déjà ancienne ...puisque l'inauguration de cette évolution de la soufflerie Jules Verne date du 29 mars 2019 ...

Modernisée et agrandie pour répondre aux enjeux émergents, la soufflerie Jules Verne du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) est une infrastructure scientifique et technique de pointe, unique par ses équipements innovants et son offre pluridisciplinaire. Elle est la seule au monde à pouvoir soumettre divers ouvrages et systèmes, dans les domaines de la construction, des transports et des énergies nouvelles, aux phénomènes climatiques, des plus simples aux plus extrêmes. Cette infrastructure de recherche internationale permet ainsi de tester, en un seul lieu, tout équipement à différentes échelles, jusqu'à l'échelle 1, en reproduisant toutes les conditions climatiques, et en couplant démarche numérique et expérimentale pour obtenir les résultats les plus performants.

Nés d'une réflexion engagée en 2009, les travaux de modernisation se sont concrétisés par un chantier de 12 mois entre janvier 2018 et janvier 2019. Le budget global de 8,5 millions d'euros est financé à hauteur de 50 % par la Région des Pays de la Loire et le FEDER et 50% par les fonds propres du CSTB.

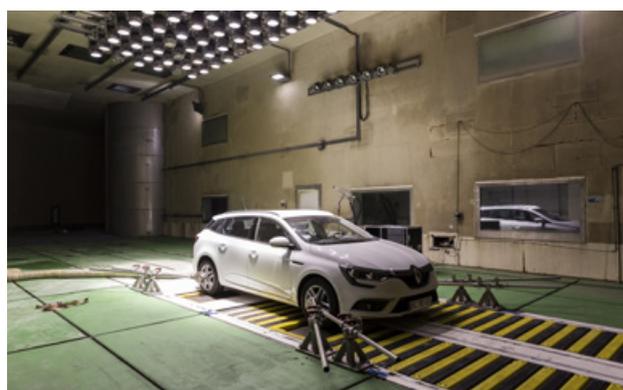
Les travaux de modernisation ont principalement concerné :

- La géométrie de la soufflerie principale (anneau externe) pour accroître les performances des veines d'essais (qualité des écoulements et dimensions des veines) et créer une nouvelle veine dédiée aux études aéro-acoustiques;
- La mise en place d'un nouveau banc dynamométrique double essieu dans la veine thermique pour répondre à l'évolution des véhicules;
- Un programme d'équipement en moyens de mesure,

de calcul et de réalité virtuelle pour développer des approches originales couplant expérimentations et simulations numériques;

- L'agrandissement des accès aux souffleries, l'amélioration de l'accueil et du confort des équipes et de la confidentialité des études.

La modification de la géométrie de la soufflerie a été longuement étudiée à partir de simulations numériques et d'expérimentations à échelles réduites. Les caractérisations d'écoulement réalisées après réception des travaux confirment la pertinence de l'approche entreprise et valident en tous points la géométrie retenue.



Banc dynamométrique 4 roues tournantes en veine thermique (crédit Florence Joubert)

Inaugurée en mars 2019 en présence de François de Rugy, Ministre d'Etat, et de nombreux officiels et partenaires du CSTB, la nouvelle soufflerie Jules Verne est à nouveau totalement opérationnelle pour accompagner les acteurs de très nombreux secteurs industriels dans leurs projets et innovations.

ACTUALITÉS

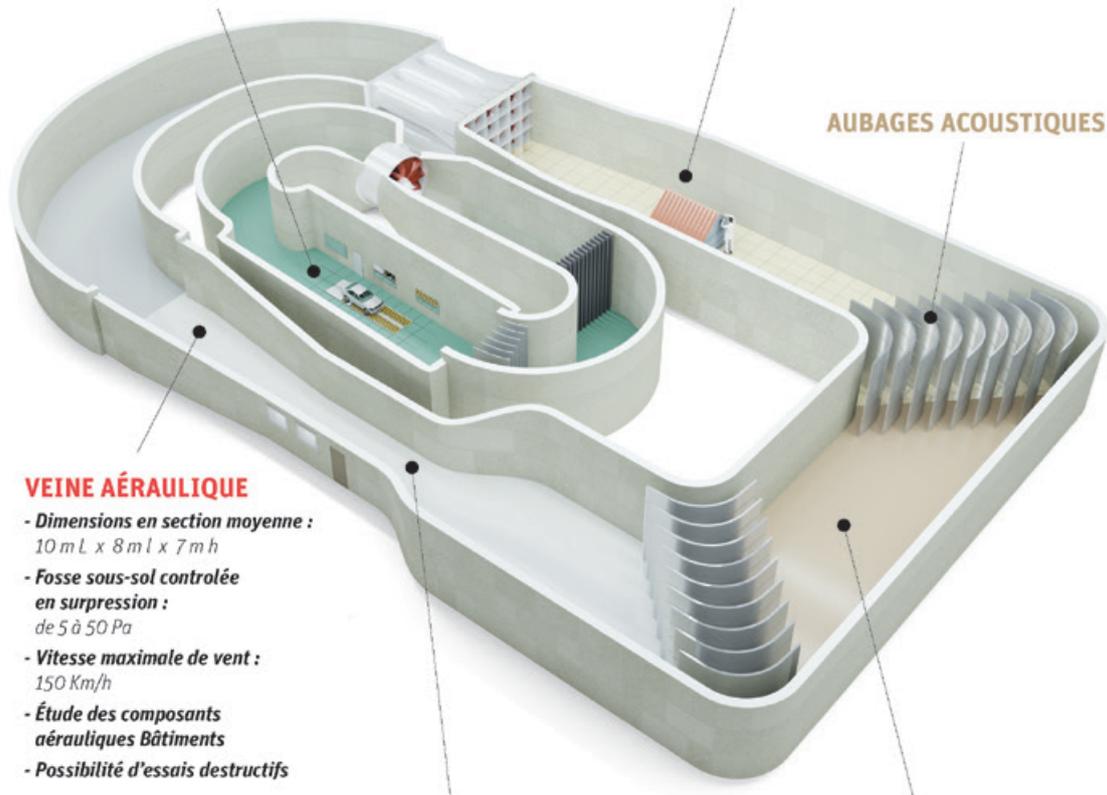
LA SOUFFLERIE CLIMATIQUE JULES VERNE MODERNISÉE

VEINE THERMIQUE

- **Dimensions :**
25 m L x 10 m l x 7 m h
- **Reproduction de toutes les précipitations :**
pluie, brouillard, neige, givre, grêle
- **Vitesse maximale de vent :**
140 Km/h
- **Température :**
-32°C à 55°C
- **Vitesse maximale de roulage :**
250 Km/h

VEINE ATMOSPHÉRIQUE

- **Dimensions :**
25 m L x 14 m l x 8,3 m h
- **Simulation :**
vent, pluie battante, tempête de sable et poussière, turbulences atmosphériques
- **Buses amovibles pour adapter les sections de soufflage :**
14 m l x 4 m h
7 m l x 8,30 m h
- **Vitesse maximale de vent :**
90 Km/h



VEINE AÉRAULIQUE

- **Dimensions en section moyenne :**
10 m L x 8 m l x 7 m h
- **Fosse sous-sol contrôlée en surpression :**
de 5 à 50 Pa
- **Vitesse maximale de vent :**
150 Km/h
- **Étude des composants aérauliques Bâtiments**
- **Possibilité d'essais destructifs**

VEINE AÉRODYNAMIQUE

- **Dimensions :**
12 m L x 6 m l x 5 m h
- **Reproduction de vents cycloniques**
- **Simulation de vent relatif à faible turbulence (< à 2%)**
- **Vitesse maximale de vent :**
280 Km/h

VEINE AÉROACOUSTIQUE

- **Dimensions :**
20 m L x 14 m l x 8,30 m h
Possibilité de réduire la section de soufflage à 7 m l x 8,30 m h
- **Étude des bruits émergents de plus de 70 dBA**
(au dessus du fond sonore de la ville)
- **Vitesse maximale de vent :**
90 Km/h

SOUFFLERIE
JULES VERNE

Un équipement du

CSTB
le futur en construction

Vue d'ensemble des deux souffleries et des différentes veines d'essais (crédit CSTB)

LA 54^E CONFÉRENCE INTERNATIONALE D'AÉRODYNAMIQUE APPLIQUÉE

par Jean Délery et Patrick Gnemmi, Commission technique Aérodynamique de la 3AF

La 54^e Conférence Internationale d'Aérodynamique Appliquée de la 3AF (54th 3AF International Conference on Applied Aerodynamics) qui s'est tenue du 25 au 27 mars 2019 au Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM) à Paris était co-sponsorisée par l'AIAA, la Royal Aeronautical Society, le CEAS et a bénéficié du soutien du CNAM et de l'ONERA. Le comité scientifique était composé des membres de la commission technique Aérodynamique de la 3AF. Les allocutions de bienvenue ont été prononcées par Michel Scheller, président de la 3AF, et par le professeur Olivier Faron, administrateur général du CNAM.

Cette année, la conférence a attiré une bonne participation avec la présentation de 58 communications et de 5 conférences pilotes données par des experts dans les domaines de l'aérodynamique théorique, expérimentale et appliquée.



La 54^{ème} Conférence Internationale d'Aérodynamique Appliquée - AERO2019 au CNAM - Paris

La conférence était organisée en 5 sessions, chacune introduite par un conférencier pilote, et divisées en 2 ou 3 sous-sessions compte tenu du nombre de communications. Les travaux présentés peuvent être globalement qualifiés comme étant de très bon niveau. Il n'est ici proposé qu'un très bref résumé de la conférence faisant surtout état d'une impression générale, les points retenus l'étant de manière très subjective. Les exposés ont couvert une large gamme de sujets. Le détail des communications est contenu dans les papiers disponibles sur le site de la 3AF.

SESSION 1, LUNDI 25 MARS, MATIN.

La conférence pilote prononcée par Jean-Paul Bouchet, responsable de l'unité aérodynamique et actions climatiques dans le secteur des transports terrestres au CSTB, avait pour titre : *Wind tunnel simulations of vehicles in severe climatic conditions: related techniques and issues*. Cette conférence très intéressante portait sur les conditions hors conception rencontrées dans l'industrie automobile, en particulier dans des configurations pluvieuses et neigeuses. Les essais sont exécutés dans la grande soufflerie Jules Verne de l'établissement du CSTB de Nantes qui comporte une soufflerie à grande vitesse pour simuler les effets de la pluie, du vent et du sable et un circuit thermique pour la simulation des effets du soleil, de la température ou de la neige.



Exemples d'études effectuées dans les souffleries du CSTB

Session 1a Icing and wakes (givrage et sillages). Le givrage reste un phénomène préoccupant pour la sécurité des aéronefs et de ce fait continue de susciter des efforts de recherche importants tant dans le domaine de la prévision théorique que de la simulation expérimentale (voir l'inauguration récente d'une soufflerie givrante au centre ONERA de Toulouse). Deux communications, à caractère théorique, étaient consacrées à ce sujet.

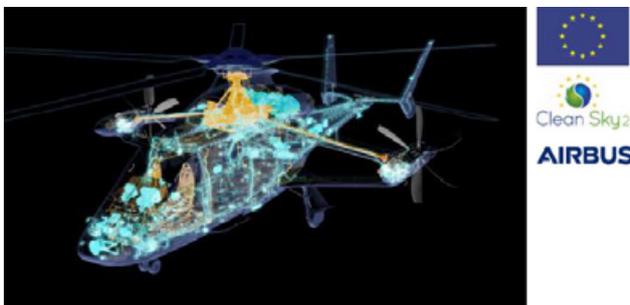
SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES LA 54^E CONFÉRENCE INTERNATIONALE D'AÉRODYNAMIQUE APPLIQUÉE

Session 1b CFD Methodology. Dans toutes les conférences, les développements nouveaux en matière de méthodes numériques donnent lieu à des présentations, le domaine étant toujours en constante évolution. Nous mentionnerons ici, une présentation portant sur l'approche numérique dite Lattice-Boltzmann Method (LBM), ou Boltzmann sur réseau, très utilisée dans le domaine des véhicules terrestres, qui permet de traiter des conditions d'écoulement au-delà du domaine de confiance de la CFD classique basée sur la résolution des équations de Navier-Stokes, en particulier des situations au-delà de la portance maximum.

Session 1c Spinning bodies (corps tournants). Trois interventions de l'ISL étaient consacrées à l'aérodynamique des projectiles gyrostabilisés, domaine intéressant surtout les munitions.

SESSION 2, LUNDI 25 MARS, APRÈS MIDI

La conférence pilote de cette session a été donnée par David Alfano, Airbus Helicopters, responsable du programme européen de recherche et innovation et chef du programme de démonstrateur d'hélicoptère à grande vitesse RACER. Elle avait pour titre : *The RACER high speed helicopter demonstrator: some challenges in aeromechanics*



*Importance de la forme pour minimiser la traînée
Le projet d'hélicoptère à grande vitesse RACER*

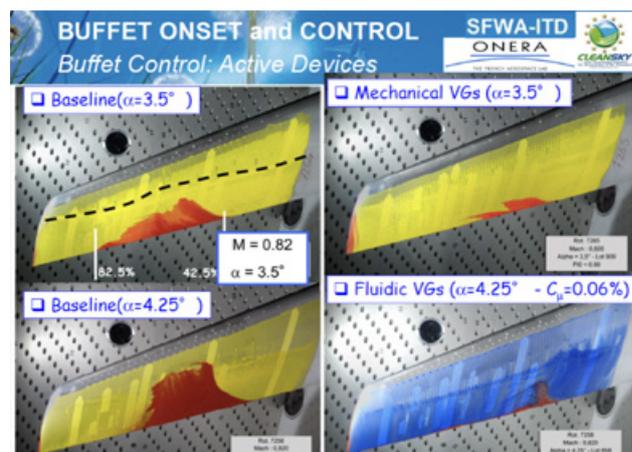
Session 2a Helicopters. On mentionnera une présentation ayant pour sujet l'évaluation du brownout (perte de visibilité par nuage de sable) d'un hélicoptère avec effet de sol par méthode CFD. Les méthodes Actuator disk,

Multiple reference frames et *Dynamic mesh* sont utilisées pour modéliser l'écoulement engendré par le rotor, les résultats étant analysés pour déterminer la meilleure façon de simuler l'interaction complexe entre le rotor et le fuselage.

Session 2b Stall (décrochage). Une communication était consacrée aux simulations numériques instationnaires 2,5D et aux analyses de stabilité globale dans des configurations de tremblement transsonique et de décollement subsonique sur une aile. Retenons aussi une communication présentant l'avion XRF1 d'Airbus en tant que plateforme facilitant la recherche collaborative entre les différents partenaires de l'aéronautique. Ainsi, une riche base de mesures aux limites de l'enveloppe de vol de cet avion a été construite à partir des essais dans la soufflerie ETW (*European Transonic Windtunnel*).

SESSION 3, MARDI 26 MARS, MATIN

La conférence pilote *Overview of European activities on buffet onset and control*, présentée par Eric Coustols, directeur avion de transport et Clean Sky 2 à l'ONERA, était focalisée sur une vue d'ensemble des activités européennes relatives au déclenchement du tremblement et de son contrôle. Cette action s'inscrit majoritairement dans le programme européen Clean Sky. Une première partie était consacrée aux méthodes expérimentales pour détecter le début du tremblement. La seconde partie était orientée vers les moyens de le contrôler avec des actionneurs (générateurs de tourbillons, bosse à la paroi, jets synthétiques) si possible en boucle fermée.



Résultats extraits de la conférence pilote d'Eric Coustols

Session 3a Buffet (tremblement). Retenons une présentation qui portait sur une étude explorant la capacité de prédiction des écoulements à grand nombre de Mach et grand angle d'incidence selon une méthode CFD/CSM (*Computational Structural Mechanics*) ainsi qu'une communication ayant pour objet la simulation du tremblement transsonique selon une approche automatisée *Zonal*

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES LA 54^E CONFÉRENCE INTERNATIONALE D'AÉRODYNAMIQUE APPLIQUÉE

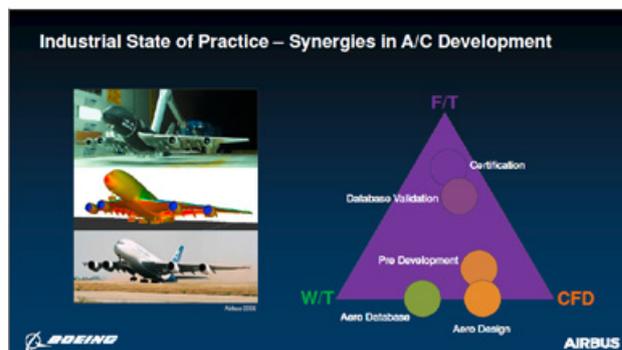
Detached Eddy Simulation. L'approche zonale hybride RANS/LES détermine automatiquement la définition de l'interface RANS/LES en se basant sur une échelle de longueur définie par une précédente simulation URANS. L'objectif de cette méthode est de capturer le tremblement transsonique et le décollement par onde de choc, ce qui est un défi pour les approches du type DES classiques. Il est aussi à noter une étude portant sur le contrôle passif du tremblement transsonique au moyen d'un volet en forme de bosse de Gurney (*Upper Gurney Flap*) monté au bord de fuite d'un profil afin de provoquer une déflexion verticale. L'objectif de tels volets est de briser le mécanisme de couplage en réduisant la propagation vers l'amont des ondes acoustiques qui se propagent depuis le bord de fuite jusqu'au choc.

Session 3b Wind turbines (éoliennes). La première présentation portait sur l'évaluation d'une simulation dite Stress Blended Eddy Simulation (SBES) et d'une topologie de maillage pour la prédiction précise des performances d'une éolienne à trois pales d'axe vertical. La deuxième communication retenue avait pour objet l'étude d'une petite éolienne pour zone urbaine équipée de pales avec winglet destinée à prévenir un écoulement indésirable dans la direction radiale perpendiculaire à la force agissant sur le profil.

Session 3c Hypersonic flow. Seuls deux communications étaient consacrées aux écoulements hypersoniques. La première abordait le problème de la stabilité d'une couche limite hypersonique refroidie. Un cône de demi-angle au sommet de 7° et de longueur 1100 mm est testé dans la soufflerie à choc à haute enthalpie (HIEST) du JAXA. L'analyse bi-spectrale a permis d'identifier un fort couplage de phase non linéaire entre les ondes de basse et haute fréquence. La deuxième présentation avait pour objet une étude expérimentale de l'effet de la raréfaction sur les coefficients aérodynamiques de véhicules de rentrée minces et émoussés à grand angle d'incidence.

SESSION 4, MARDI 26 MARS, APRÈS-MIDI

La session était introduite par conférence pilote conjointe tout à fait remarquable Boeing-Airbus, présentée par Jeffrey Slotnick, actuellement *Technical Fellow* à Boeing Company et Gerd Heller, *Senior Aerodynamics Expert* à Airbus Operations. Elle s'intitulait *Emerging opportunities for predictive CFD for off-design commercial airplane flight characteristics*. Son sujet portait sur les opportunités émergentes pour la prévision par la simulation numérique aérodynamique (CFD) des caractéristiques de vol off design d'un avion commercial. La présentation montre que de plus en plus de simulations sont nécessaires jusqu'à la certification d'un avion. Elle met aussi l'accent sur l'importance des essais en soufflerie pour la validation des calculs et des modélisations.



CFD et essais en soufflerie dans le processus de certification.
Conférence Boeing-Airbus

Session 4a Low speed, high lift configuration (Basse vitesse, configuration grande portance). Une présentation portait sur le contrôle actif du décollement, se produisant au niveau de la coupure du bec de bord d'attaque dans la région d'attache du moteur, au moyen d'une aspiration continue appliquée au travers d'une série de trous près du bord d'attaque. Les distributions de pression, le coefficient de portance et les visualisations de l'écoulement confirment le bénéfice de performance prédit aussi par CFD. L'étape suivante implique la mise en œuvre d'un soufflage pulsé en aval des orifices d'aspiration.

Une des études présentées (projet européen ADEC, partie de Clean Sky) avait pour objet une tuyère double flux installée sous une aile en condition haute portance où on examine l'interaction entre le jet et un volet. L'examen du champ aérodynamique donne des indications sur les conséquences d'un impact du jet sur le volet et sur l'effet de masquage de l'aile sur le bruit rayonné. Retenons aussi une communication consacrée à une étude expérimentale, dans les conditions d'atterrissage et de décollage, de l'effet de sol sur les caractéristiques aérodynamiques d'un avion de transport bimoteur à décollage et atterrissage court (STOL) équipé d'un système de volets soufflés (RBF).

Session 4b Supersonic flows (Écoulements supersoniques). La première communication portait sur une analyse expérimentale très détaillée de l'écoulement de coin dans une veine d'essai supersonique. Ces écoulements peuvent avoir un effet important sur l'écoulement au sein de la veine, notamment dans l'étude des interactions onde de choc - couche limite, surtout en cas de décollement. Les écoulements de coin jouent aussi un rôle important dans les prises d'air.

Notons aussi une présentation sur une étude numérique des aspects instationnaires des croisements - ou interférences de chocs - dans le cas d'une configuration de type I selon la classification d'Edney (croisement de deux chocs obliques l'un montant, l'autre descendant).

Session 4c Flow control on wing (Contrôle de l'écoulement sur une aile). La première présentation s'articulait autour du contrôle actif des forces transitoires agissant sur le bord de fuite d'une aile NACA0015 en situation de décrochage. Ce contrôle est réalisé par des jets pulsés générateurs de tourbillons, implantés sur une aile testée dans la soufflerie subsonique S620 de l'ISAE-ENSM.

Le contrôle par jets sur une aile transsonique est aussi envisagé dans le but de retarder le début du tremblement et ainsi augmenter la charge sur l'aile d'un avion pour en diminuer sa surface. L'optimisation s'effectue par des simulations numériques RANS 2D. Notons une autre conférence proposant une investigation numérique et expérimentale du morphing appliqué à une aile en configuration d'un ou deux élément(s) à grand nombre de Reynolds. Cette étude est une première étape du projet *Smart Morphing & Sensing* d'un programme Horizon 2020. Le morphing était aussi considéré dans une étude numérique de la réponse de l'écoulement à une déflexion rapide d'un bord de fuite déformé par morphing pour des angles d'incidence proches du décrochage.

SESSION 5, MERCREDI 27 MARS, MATIN

La conférence générale de cette session, donnée par Nicolas de Cacqueray, responsable de l'équipe aéroélasticité et expert aéroélasticité à Safran Aircraft Engines, avait pour titre *Fan blade aeroelasticity: future challenges for engine manufacturers*.

Session 5a Turbomachinery (Turbomachines). On retiendra trois présentations, l'une portant sur l'atténuation des ondes de choc dans un compresseur centrifuge par utilisation de profils perforés. L'autre présentait une technique d'optimisation numérique appliquée à la conception d'une cavité de carter dans le but d'améliorer la marge de pompage d'un compresseur transsonique. La troisième portait sur l'effet de 2, 3 puis 4 chevrons placés au bord de fuite et près de l'extrémité d'un rotor axial fortement chargé.

Session 5b Shock wave/boundary-layer interaction (Interaction onde de choc – couche limite). Ce phénomène est toujours d'actualité et a suscité des études très intéressantes, surtout consacrées au contrôle du phénomène. L'assistance à ces présentations était aussi particulièrement nombreuse. Parmi les présentations retenons : une étude axée sur des résultats de simulations numériques 2,5D LES de l'interaction d'une onde de choc avec une couche limite en transition au-dessus d'une marche descendante ; une étude expérimentale de l'interaction d'une onde de choc avec une couche limite formée au-dessus d'une bosse allongée placée sur la paroi de la veine d'essai d'une soufflerie transsonique ; une étude sur l'optimisation du contrôle fluidique 3D dans un canal

transsonique représentant une entrée d'air d'avion super-sonique.

L'ensemble des présentations à cette conférence a une nouvelle fois permis de constater les avancées rapides de tous les domaines aérodynamiques dans les configurations les plus complexes que sont celles *off-design*, aussi bien pour la CFD que pour les techniques d'essais et la synthèse entre les moyens d'étude. Comme d'habitude, les conférences pilotes ont été d'un haut niveau et on a pu assister, en particulier, à une remarquable présentation conjointe de Boeing et Airbus sur les perspectives de la CFD. Des problèmes aussi difficiles à modéliser que l'accrétion du givre ou l'interaction entre onde de choc et couche limite ont été abordés sous des angles très différents et complémentaires avec des comparaisons instructives entre modélisation et expérimentation aussi bien sur le plan fondamental que sur les impacts au niveau des aéronaves. Plusieurs communications ont mis en évidence le rôle capital des expériences à caractère fondamental pour l'établissement des modèles physiques et leur rôle dans la découverte de concepts nouveaux, notamment dans le domaine du contrôle des écoulements.

VISITE TECHNIQUE

A l'issue de la cinquième session, mercredi après-midi, 37 congressistes ont participé à la visite de l'Institut Aérotechnique (IAT) à Saint-Cyr-l'École. Ils ont pu visiter les souffleries subsoniques S4 (essais sur un véhicule automobile PSA), S10 (mesures d'effort sur maquette étalon de Dassault Aviation) et S6 (moyen d'essai pour étude climatique).

Cette conférence annuelle s'est déroulée dans de très bonnes conditions grâce à l'excellence de l'accueil offert par le CNAM. Le nombre de participants officiellement inscrits était de 118 en provenance de 17 institutions de nationalité différente (Algérie, Allemagne, Brésil, Canada, Chine, Espagne, Etats-Unis, France, Israël, Italie, Japon, Pays-Bas, Pologne, République Tchèque, Roumanie, Royaume-Uni, Russie) confirmant l'intérêt international pour la conférence d'aérodynamique appliquée, dont un atout particulièrement apprécié est son format « limité » permettant de nombreux échanges entre les participants.

La majorité des congressistes étaient des chercheurs (laboratoires universitaires ou instituts de recherche). La participation des industriels demeure minoritaire mais substantielle : 33 inscrits représentaient une entreprise (Airbus Commercial Aircraft, Airbus Helicopters, Airbus Operations, Dassault Aviation, Dassault Systèmes, GDTEch, MBDA, Safran Tech, Safran Aircraft Engines).

Comme les années précédentes, le comité de programme encourage les auteurs à proposer la version écrite de leur

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES LA 54^E CONFÉRENCE INTERNATIONALE D'AÉRODYNAMIQUE APPLIQUÉE AU CNAM À PARIS



Essais d'une maquette étalon dans la soufflerie S10 de l'IAT-CNAM

communication sous forme d'article dans l'*International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow (IJNMHFF)* qui va consacrer un numéro spécial à la publication d'une sélection des meilleures communications, après la procédure d'évaluation habituelle par des experts, initiative qui permettra de valoriser ces travaux.

AUTRES MANIFESTATIONS

Le banquet traditionnel dans le très beau cadre de la brasserie Bofinger a été l'occasion de remettre le prix 3AF de la meilleure communication présentée à la dernière conférence (AERO2018 à l'École de l'air de Salon-de-Provence sur le thème *Multiphysics approach in Aerodynamics*).

Les lauréats étaient Nicolaos Simiriotis, Gurvan Jodin, Abderahmane Marouf, Yannick Hoarau, Jean-François Rouchon et Marianna Braza de l'IFMT, Institut ICUBE et Laboratoire Laplace. La journée du mardi 26 s'est terminée par une visite guidée du magnifique Musée des Arts et Métiers.



Remise du prix de la meilleure communication à AERO2018 à Salon-de-Provence

Pour conclure, nous remercions Olivier Faron, Administrateur général du CNAM, pour nous avoir reçus dans son prestigieux établissement, ainsi qu'à son personnel pour l'aide apportée à la préparation et au déroulement de la conférence. Nos remerciements plus particuliers vont à Francesco Grasso, professeur au CNAM, directeur de l'IAT et membre de la Commission technique Aérodynamique, initiateur et coorganisateur local de cette conférence.

Grand merci aux présidents de session, aux conférenciers et participants, à notre Secrétaire exécutive Anne Venables et à Aude Lurbe, Chargée de projet événementiel, pour leur efficacité et amabilité unanimement reconnues. ■

SIMULATIONS DE CONDITIONS CLIMATIQUES EXTRÊMES SUR VÉHICULES EN SOUFFLERIE

par Jean-Paul Bouchet, CSTB, membre de la Commission technique Aérodynamique de la 3AF

INTRODUCTION

Tous les usagers de la route ont été, un jour ou l'autre, confrontés à la perte de visibilité occasionnée lors d'une circulation par temps de pluie. Qu'il s'agisse des écoulements d'eau sur les vitres latérales, gênant notamment la vision par le rétroviseur, ou encore des nuages de projections issus des véhicules lourds (voir Figure 1); c'est bien évidemment la sécurité et le confort de conduite qui se trouvent engagés. Les tests en conditions climatiques extrêmes, telles que les conditions de roulage par temps de pluie ou de neige, sont donc naturellement intégrés dans les processus de développement de tous les véhicules, comme c'est la règle également pour les aéronefs. Les équipes de la soufflerie climatique Jules Verne, opérée par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) à Nantes, ont ainsi développé depuis plus de 20 ans, différentes techniques expérimentales et des protocoles d'essais pour tester les véhicules dans ces situations de vie bien particulières.



Figure 1. Illustrations de circulation par temps de pluie.

© CSTB

LES ENJEUX DE CES SIMULATIONS EN SOUFFLERIE

Au-delà du confort visuel du conducteur et des aspects de sécurité routière associés, les conditions de roulage par temps de pluie ou de neige peuvent conduire à différents dysfonctionnements sévères du véhicule. Concernant le roulage par temps de pluie, les études en soufflerie s'intéressent notamment aux questions suivantes :

- fonctionnement des systèmes d'essuyage pare-brise et visibilité latérale;
- ingestion d'eau dans la ligne d'air moteur;
- étanchéité habitacle et boîtiers électroniques;
- performances des systèmes de freinage;
- mouillage de zones critiques (capteurs) et esthétique véhicule (salissures);
- climatisation habitacle et gestion de l'embuage.

La neige et les conditions givrantes engagent également le confort et la sécurité des automobilistes au travers des questions suivantes :

- performances du système d'essuyage pare-brise;
- givrage et ou blocage des systèmes de refroidissement moteur et turbo;
- ingestion de neige dans la ligne d'air moteur;
- accumulation et/ou accrétions de neige sur zones sensibles (optiques, capteurs, climatisation, système de freinage).

COMMENT REPRODUIRE DES CONDITIONS DE PLUIE RÉALISTES ?

Pour réaliser en soufflerie une simulation dynamique d'un véhicule circulant par temps de pluie, il est nécessaire d'ensemencer l'écoulement d'air avec des systèmes de pulvérisation d'eau. Les paramètres principaux de la simulation sont alors la vitesse du véhicule, reproduite par la vitesse d'air en soufflerie et le roulage sur banc dynamométrique, et l'intensité de pluie exprimée habituellement en mm/h. Pour mesurer cette intensité en soufflerie, étape indispensable de calibration de la simulation, et compte tenu de la présence de vent, les pluviomètres météorologiques classiques ne peuvent être utilisés et il faut avoir recours à des capteurs spécifiques. C'est en effet une pluie battante qui doit être mesurée (flux à travers une surface verticale) et non une pluie tombant au sol. Selon la précision requise et la taille des gouttes à collecter, on fera appel à de simples pièges en forme de cavités exposées au vent ou à des systèmes plus complexes composés d'éléments filtrants, de chicanes, en gardant à l'esprit que le dispositif doit être le plus « isocinétique » possible et le moins intrusif dans l'écoulement. Ces équipements permettent également d'acquérir des données lors de campagnes d'essais en situations réelles. En collaboration avec le groupe PSA Peugeot-Citroën, le CSTB a ainsi réalisé des mesures pour caractériser les intensités de pluie perçues par un véhicule roulant derrière un autre véhicule (situation de suivi de file) et ce, en fonction de la vitesse de roulage, de la distance entre les véhicules ou encore du type de véhicule amont (Figure 2). Ces données terrain sont cruciales pour définir la sévérité des simulations à reproduire en soufflerie, car un véhicule est rarement seul sur la route et l'intensité de pluie liée aux projections des autres véhicules peut dans certains cas être prépondérante.

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

SIMULATIONS DE CONDITIONS CLIMATIQUES EXTRÊMES SUR VÉHICULES EN SOUFFLERIE



Figure 2. Campagne de mesure sur site pour évaluation des quantités d'eau perçues derrière un véhicule © CSTB

Les protocoles de simulation mis en œuvre en soufflerie font varier l'intensité de pluie reproduite en fonction du sujet étudié (Figure 3). Pour qualifier les performances d'essuyage pare-brise, on pourra ainsi reproduire une intensité équivalente de l'ordre de 10 mm/h (en sachant qu'on parle de pluie intense pour des intensités supérieures à 7 mm/h en climatologie), alors que pour les questions de fiabilité moteur, on pourra reproduire des intensités bien plus fortes (30 mm/h ou plus). L'ensemencement en gouttes de pluie est réalisé à partir d'une grille de pulvérisation disposée en travers de l'écoulement avec un maillage favorisant l'homogénéité du flux de gouttes en amont du véhicule. Le choix des buses de pulvérisation permettra d'adapter la taille des gouttes et l'intensité de pluie recherchée.

DES EXEMPLES D'ÉTUDES RÉALISÉES AU CSTB

Pour qualifier les écoulements d'eau sur les vitrages latéraux lors du roulage par temps de pluie, une méthode originale de visualisation sous éclairage ultra-violet a été développée (Figure 4). Cette technique basée sur la fluorescence d'un additif en faible concentration dans l'eau de pluie permet, par traitement d'image et calibration préalable, de mesurer finement les épaisseurs submillimétriques des films liquides ruisselant sur les vitrages. Ces données permettent ainsi de comparer quantitativement les équipements du véhicule limitant ces ruissellements et les problèmes de visibilité associés. Ils permettent en outre d'obtenir des données utiles pour recaler les modèles numériques diphasiques de ces phénomènes complexes.

La reproduction des projections d'eau issues des roues tournantes est réalisée dans la soufflerie en reproduisant un film d'eau sur le banc dynamométrique en amont des roues (Figure 5). Ces simulations permettent ainsi de recréer l'ensemencement des écoulements de sillage qui sont responsables des dépôts de gouttes sur la face arrière des véhicules. L'identification des zones impactées (par traitement d'image), la taille des gouttes concernées

(mesures granulométriques) et leur origine (pluie ou projections) sont autant d'éléments importants pour les constructeurs automobiles ou équipementiers pour optimiser par exemple la position d'un capteur à l'arrière d'un véhicule. À l'heure du développement des véhicules autonomes, ces études expérimentales sont indispensables.



Figure 3. Simulation de pluie avec visualisation UV. © CSTB

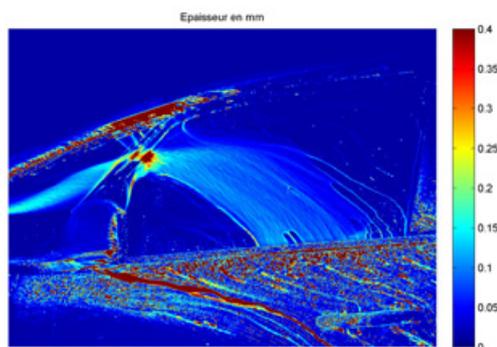


Figure 4. Mesure d'épaisseur de film liquide par traitement d'images. © CSTB



Figure 5. Mesure de taille de gouttes dans le sillage d'un véhicule. © CSTB

LES SIMULATIONS DE NEIGE

Concernant la circulation par temps de neige, les projections issues des autres véhicules sont également très importantes. L'une des situations de vie les plus critiques concerne en effet les très fines particules de neige soulevées depuis la route enneigée par le passage d'un véhicule et captées ensuite par le véhicule suiveur. Ces fines particules de neige (diamètre moyen de l'ordre de 0,1 mm) peuvent dans certains cas « colmater » complètement le filtre à air du véhicule et conduire à un dysfonctionnement du moteur.

Ces conditions très particulières peuvent être reproduites dans la soufflerie du CSTB au moyen de canons à neige et dans des conditions nettement plus reproductibles que sur sites réels (les lacs gelés en Suède ou Norvège restent des terrains d'essais fréquemment utilisés par les constructeurs automobiles). Pour ces simulations, la neige est produite à une température soufflerie de -10°C et les gouttelettes d'eau issues du canon réalisent un tour complet de l'anneau soufflerie (passant ainsi au travers du ventilateur et des échangeurs thermiques) avant de venir impacter le véhicule (Figure 6). La qualité de neige obtenue est alors parfaitement sèche (teneur en eau liquide de la particule presque nulle), ce qui correspond parfaitement aux conditions critiques rencontrées dans certains pays froids.

Pour certaines études, une qualité de neige plus humide est requise lorsqu'on souhaite, par exemple, reproduire des accrétions de neige sur la carrosserie du véhicule ou pour tester la performance des systèmes d'essuyage pare-brise. Il faut alors pouvoir contrôler le degré de congélation des particules de neige en adaptant les paramètres du canon à neige (température et ratio air/eau du mélange sous pression dans le canon), la température et la vitesse d'air en

soufflerie, mais aussi la position respective du canon et du véhicule. Il faut donc fréquemment faire des compromis sur certains paramètres (température soufflerie ou vitesse d'air principalement) pour reproduire la qualité de neige recherchée et donc le phénomène à étudier.

Pour ces simulations de roulage par temps de neige, les concentrations massiques de neige dans l'écoulement (l'équivalent du Liquid Water Content pour les études aéronautiques) sont usuellement comprises entre 5 à 10 g/m³. Avec des sectionsensemencées supérieures à 10 m² (la buse de soufflage de la soufflerie est ajustable entre 18 et 30 m²) et des vitesses d'air jusqu'à 30 m/s en conditions froides, ces simulations conduisent à la production, et l'accumulation dans la soufflerie, de quantités très importantes de neige au cours d'une journée d'essais (parfois plus de 15 m³ !). Les challenges techniques pour garantir la stabilité de la concentration de neige lors d'un essai et au cours d'une même journée (d'un essai à l'autre) ou encore pour retrouver rapidement des conditions propices à la réalisation d'un test différent sont donc le quotidien des équipes du CSTB, aguerries à ces conditions climatiques extrêmes !

Au-delà des conditions de pluie ou neige, d'autres protocoles expérimentaux viennent compléter ces travaux de R&D sur les conditions climatiques extrêmes subies par les véhicules. Les conditions de vent latéral sur les rames ferroviaires, les pluies verglaçantes, le brouillard, les températures extrêmes ou encore les simulations de tempête de sable ou de poussière sont également reproduites et étudiées dans l'enceinte de la soufflerie climatique Jules Verne. Récemment modernisé, ce simulateur de climat unique au monde est un formidable outil pour contribuer à relever les défis scientifiques de demain dans le domaine du bâtiment, des équipements industriels et des transports. ■



Figure 6. Simulation de neige sur un véhicule. © Florence-Joubert

POINT SUR L'AVANCEMENT DES RECHERCHES EUROPÉENNES SUR LE TREMBLEMENT

par **Éric Coustols**, Directeur du Programme Clean Sky 2, ONERA

Le terme de tremblement est apparu pour la première fois dans la littérature aérodynamique en 1930 après l'accident d'un Junkers monoplane [10]. L'empennage horizontal aurait subi une excitation provoquée par le sillage tourbillonnaire de la voilure, entraînant la rupture prématurée de l'empennage, la turbulence n'ayant fait qu'accroître le niveau de fluctuations. Le tremblement correspond à la réponse d'une structure à une excitation d'origine aérodynamique d'un écoulement fortement instationnaire, qui induit de fortes fluctuations de pression engendrant des efforts surfaciques importants. En anglais, le tremblement est désigné par *buffeting* et l'excitation par *buffet*. Ce phénomène peut apparaître sur des structures très variées : les fusées, les entrées d'air, les étages de compresseur, les tuyères d'échappement, les voilures, etc.

Pour l'aérodynamique externe, plusieurs types de tremblement existent :

- le tremblement dit «classique» d'extrados de voilure observé pour des conditions de vol à portance ou nombre de Mach élevés, ou bien lors de manœuvres. Les instabilités sont provoquées par une forte interaction entre l'onde de choc et la couche limite, initiant une zone décollée qui peut s'étendre du pied de choc au bord de fuite de la voilure;
- le tremblement «en limite de décrochage» rencontré pour des conditions de vol à faible portance et forte incidence. Le caractère instable provient d'importants niveaux de fluctuations de pression dans les zones de décollement situées sur la partie arrière de la voilure;
- le tremblement de «configuration» produit quand les surfaces portantes de l'avion induisent des sillages turbulents très instables qui agissent en tant qu'excitateur sur d'autres surfaces portantes (par exemple, dérive ou empennage);
- enfin, le tremblement de «géométrie» causé par des instabilités aérodynamiques plus localisées, dans les cavités ou bien à proximité de parois à fort rayon de courbure géométrique.

La présente synthèse se limite au tremblement d'extrados de voilure en conditions de vol transsonique. L'apparition du tremblement provient de l'interaction entre l'onde de choc qui se forme sur l'extrados et le décollement instationnaire qu'elle induit, pouvant alors générer de fortes fluctuations de pression dans la zone décollée, et en conséquence la vibration de la structure. Pour ce type de configuration, les fluctuations de pression induites par le mouvement à large amplitude et faible fréquence du choc sont indésirables du point de vue de l'intégrité de la structure et de la manœuvrabilité de l'avion.

Ce type de tremblement n'est pas dangereux car il est non destructif : il peut cependant être gênant de par la fatigue prématurée des structures qu'il provoque, le manque de maniabilité de l'avion qu'il induit ou la sensation d'inconfort qu'il génère pour les passagers. Le tremblement conditionne les limites opérationnelles de vol d'un avion (nombre de Mach, coefficient de portance C_z) car une marge de 30% doit être prise entre le C_z en conditions de vol de croisière et celui à l'apparition du tremblement. Sa prévision, dès la phase de conception, prend de plus en plus d'importance dans l'objectif d'optimiser les performances de l'avion en augmentant le nombre de Mach de croisière au meilleur coût opérationnel. D'autre part, avec l'apparition de nouveaux matériaux pour l'aéronautique, les avions sont plus souples et les vibrations induites par le tremblement peuvent accrocher des modes propres de la structure et entraîner le phénomène de flottement.

Ainsi, l'industrie aéronautique a besoin de disposer de méthodes de prévision aussi bien expérimentales que numériques fiables et de pouvoir contrôler l'apparition du tremblement à l'aide de dispositifs passifs ou actifs. À partir de données industrielles une réduction de traînée globale de 4% serait obtenue avec des dispositifs actifs multifonctionnels très performants agissant sur le tremblement, la traînée d'onde et la répartition des charges sur la voilure.

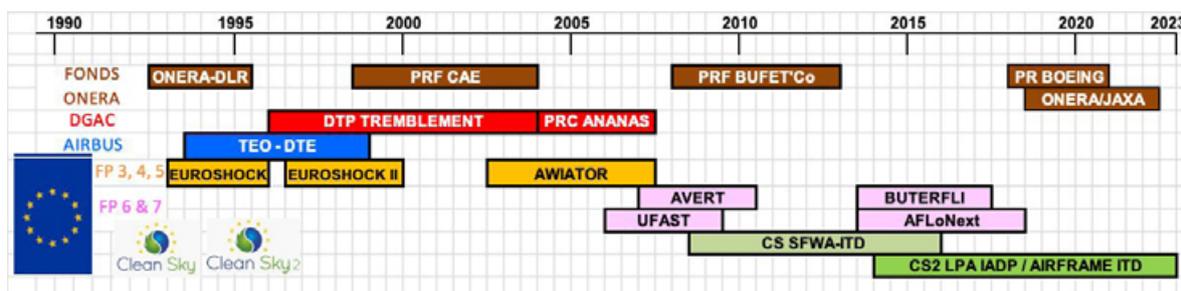


Figure 1. Principaux projets de recherches sur la thématique tremblement en Europe.

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POINT SUR L'AVANCEMENT DES RECHERCHES EUROPÉENNES SUR LE TREMBLEMENT

La figure 1 illustre l'importance de cette thématique au travers de nombreux projets réalisés depuis 1990, sur fonds propres, financements nationaux, industriels voire européens. Dans le cadre du projet européen JTI Clean Sky Smart Fixed Wing Aircraft, Integrated Technology Demonstrator (SFWA-ITD), l'ONERA assurait la coordination des études menées conjointement sur la thématique *Buffet Control* par Airbus Commercial Aircraft, Airbus Defence & Space, l'ARA, Dassault-Aviation, le DLR, l'INCAS, QinetiQ, SAAB, les Universités de Cambridge, Liverpool et Stuttgart, et l'ONERA. À ce titre, certaines figures ainsi que les références fournies à la fin de cet article sont le fruit de ces études.

PRÉVISION ET DÉTECTION EXPÉRIMENTALES DU TREMBLEMENT

Sur le plan expérimental, les essais effectués en régime transsonique sur des profils ou voilures en régimes laminaire et/ou turbulent ont tous nécessité des maquettes fortement instrumentées équipées de plusieurs types de capteurs placés à des endroits « stratégiques » : prises de pression statique, accéléromètres, jauges de frottement, capteurs de pressions instationnaires, afin de déterminer soit la position du choc soit le niveau d'instabilité (valeurs r.m.s de pression dans les zones décollées, par exemple).

Différentes maquettes ont été utilisées : profils turbulents à l'université de Cambridge, dans la soufflerie S3Ch de l'ONERA, profils laminaires LSBJ (Low Sweep Business Jet concept) dans la soufflerie S2MA de l'ONERA, voilures turbulentes dans S3Ch & S2MA, dans les souffleries de l'ARA et de l'INCAS, enfin voilure laminaire (maquette LSBJ) dans la soufflerie ETW.

Dans les années 80 et 90s, beaucoup de travaux ont été réalisés sur la caractérisation du tremblement sur un profil bidimensionnel turbulent mettant en évidence une forte oscillation de l'onde de choc sur environ 20-25% de la corde, générant des zones décollées très étendues et un spectre caractéristique mono-fréquentiel (voir Figure 2a). Pour une voilure tridimensionnelle, d'une part l'oscillation du choc est beaucoup plus restreinte (quelques % de corde) et, d'autre part, les instabilités proviennent de plusieurs fréquences pouvant couvrir une plus large bande (Figure 2b).

La prévision expérimentale de l'apparition du tremblement repose sur des critères globaux : accéléromètres, divergence de la portance en fonction de l'angle d'incidence du profil ou de la voilure, etc., ou locaux : position de l'onde de choc, pression au niveau du bord de fuite, niveaux de pressions instationnaires fournis par les capteurs Kulites. Les essais effectués dans le cadre du projet FP6 AVERT et de JTI Clean Sky SFWA-ITD ont fourni des bases de données de très bonne qualité permettant non seulement de mieux comprendre la physique du tremblement tridimensionnel, mais aussi de tester des moyens de prévision innovants tels que la technique DPSP (*Dynamic Pressure Sensitive Paint*). Par exemple, sur la maquette de la voilure turbulente RBC 12 testée dans la soufflerie transsonique de l'ARA pour un nombre de Mach variant de 0,7 à 0,84 (Figure 3b), la DPSP fournit l'évolution de la position du choc et met en évidence le développement de structures à différentes vitesses de convection dans les directions longitudinale et transversale [9], et confirme de fait la phénoménologie complexe détaillée précédemment par l'ONERA sur une voilure turbulente dans les souffleries S3Ch et S2MA pour un nombre de Mach de 0,82 (Figure 3a) [5,6].

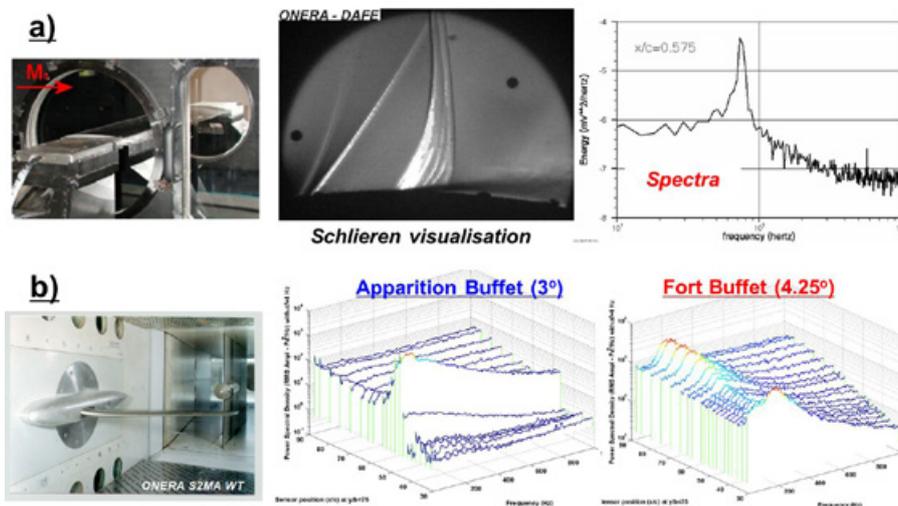


Figure 2. a) Profil 2D Turbulent testé dans la soufflerie ONERA S3Ch [8] : onde de choc et spectre de pression à la position moyenne du choc ; b) Voilure Turbulente dans la soufflerie ONERA S2MA [5,6] : spectres de pression sur la voilure pour l'apparition du tremblement et du tremblement établi.

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

POINT SUR L'AVANCEMENT DES RECHERCHES EUROPÉENNES SUR LE TREMBLEMENT

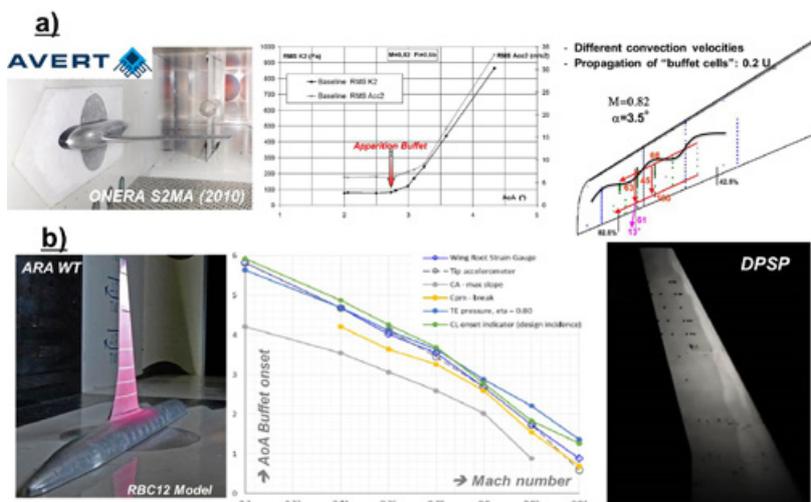


Figure 3. Détection de l'apparition du tremblement et compréhensions de la physique complexe associée pour 2 voilures turbulentes : a) Essais dans la soufflerie ONERA S2MA [5,6] ; b) Modèle RBC 12 dans la soufflerie de l'ARA [9].

Dans le cadre du projet JTI Clean Sky SFWA-ITD, Dassault Aviation et l'ONERA ont déterminé l'apparition du tremblement pour plusieurs profils laminaires testés dans la soufflerie ONERA S2MA ; puis, Dassault-Aviation a poursuivi avec une caractérisation de quelques points en régime de tremblement lors d'une campagne d'essais, dans la soufflerie ETW, de la maquette LSBJ équipée d'une voilure laminaire. En règle générale, le choc est plus intense que pour un profil turbulent avec des instabilités beaucoup plus importantes, couvrant une bande de fréquence bien plus large (Figure 4).

PRÉVISION NUMÉRIQUE DU TREMBLEMENT

L'industrie aéronautique européenne a besoin de disposer de méthodes numériques fiables de prédiction de l'entrée en tremblement d'une voilure moderne qu'elle soit classique ou innovante. Dès les années 80s, le tremblement était essentiellement prévu à l'aide de méthodes semi-empiriques, basées sur des critères soit aérodynamiques (divergence de pression, etc), soit structuraux (divergence de contraintes structurales, calculs aéroélastiques simplifiés, etc.). Cependant, du fait de la nature visqueuse de l'interaction entre le choc et la zone décollée instationnaire, des codes de calcul résolvant

les équations de Navier-Stokes compressibles instationnaires ont été ensuite appliqués avec des modèles de turbulence appropriés pour estimer l'excitation aérodynamique. De nos jours, l'augmentation de la puissance des calculateurs permet d'envisager ce type d'approche dans la phase de conception d'une voilure par utilisation de calculs URANS (*Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes*) ou ZDES (*Zonal Detached Eddy Simulations*), combinant une approche de type RANS proche de la paroi et de type LES (*Large Eddy Simulations*) dans les régions d'écoulements décollés. Il n'est pas envisageable, aujourd'hui, de calculs complets LES d'un avion de transport pour les conditions de vol.

La validation de cette approche est nécessaire à l'aide de bases de données expérimentales bien documentées pour s'assurer de la précision de la prévision. Un exemple d'une telle prévision, par application du logiciel elsA, est fournie sur la figure 5, en faisant appel à un raffinement conséquent du nombre de points de maillages [2].

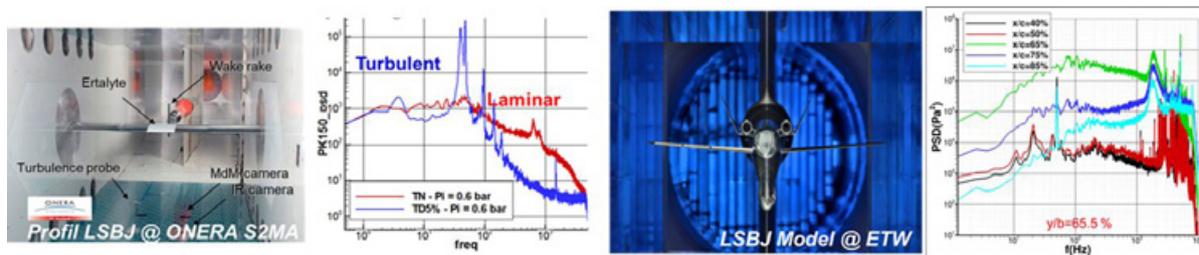


Figure 4. Spectres fréquentiels de pression obtenus sur un profil laminaire et une voilure laminaire testés dans 2 souffleries transsoniques (ONERA S2MA et ETW).

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POINT SUR L'AVANCEMENT DES RECHERCHES EUROPÉENNES SUR LE TREMBLEMENT

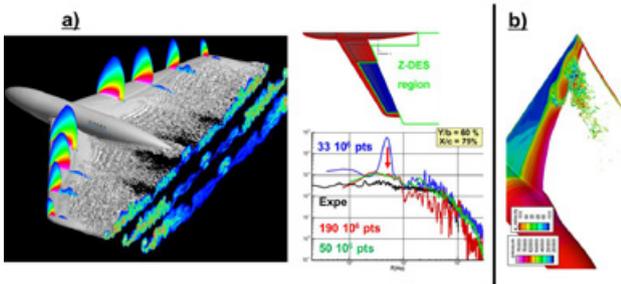


Figure 5. Prévisions numériques des écoulements turbulents en régime de tremblement établi. a) Calculs ZDES ONERA (logiciel elsA) et comparaisons à la base de données FP6 AVERT obtenue dans la soufflerie ONERA S2MA [2]; b) Calculs DES (code TAU) effectués par l'Université de Liverpool (JTI Clean Sky SFWA-ITD, projet BUCOLIC) [12].

LE CONTRÔLE DU TREMBLEMENT

Entre 1990 et 2008, dans le cadre de différents projets de recherches, de nombreuses études avaient été menées par plusieurs partenaires européens pour effectuer les premières tentatives de contrôle du tremblement (Figure 1). Ainsi, par le biais d'études expérimentales, on a pu appréhender le contrôle sur des profils turbulents 2D à l'aide de différents actionneurs passifs tels que les parois poreuses, les générateurs de tourbillons mécaniques, ou *Vortex Generators* (VGs) mécaniques, les bosses ou *Shock Control Bumps* (SCBs), les épingles/pointes ou *spikes*, les déflecteurs de bords de fuite de type *Trailing Edge Devices* (TEDs). Ces études étaient essentiellement réalisées en contrôlant le tremblement en boucle ouverte, c'est-à-dire que pour une action donnée via un actionneur placé à un endroit stratégique du profil, la répercussion sur l'écoulement turbulent était retranscrite par un capteur, judicieusement placé pour pouvoir capturer les modifications de l'écoulement.

L'orientation est, maintenant, de chercher à contrôler le tremblement en boucle fermée. Il s'agit alors d'enregistrer en temps réel la détection fournie par le capteur, et de « piloter » l'action à délivrer par l'actionneur à partir d'un compensateur (estimateur plus contrôleur) via une fonction de commande. Un tel contrôle avait même été effectué par l'ONERA sur un profil turbulent 2D en mettant en relation un capteur de pression instationnaire et le braquage du déflecteur de bord de fuite [3]. Pour une voilure turbulente, des premiers résultats avaient révélé la faisabilité du contrôle du tremblement en boucle fermée par un actionneur de type TED [3]. Mentionnons que dans le cadre du projet EU-FP5 AWIATOR, Airbus Commercial Aircraft a testé dans la soufflerie ONERA S1MA une maquette d'A340 équipée de volets de bord de fuite de type TED sur les parties interne et externe de la voilure, puis en vol sur l'avion prototype A340 N°1. La finalité de ces essais était de prouver la possibilité de reculer l'entrée en tremblement, d'augmenter les perfor-

mances de l'avion et de modifier la répartition de la charge selon l'envergure ; elle n'était pas de réaliser vraiment le contrôle du tremblement [7].

Depuis 2008, par le biais du *Technology Stream Buffet Control*, plusieurs partenaires Européens [Airbus Commercial Aircraft, Airbus Defence & Space, l'ARA, Dassault-Aviation, le DLR, l'INCAS, QinetiQ, SAAB, les Universités de Cambridge, Liverpool et Stuttgart, et l'ONERA] ont poursuivi leurs recherches sur le contrôle en boucle ouverte par le biais de dispositifs passifs ou actifs. Ces derniers sont recensés sur la Figure 6. L'objectif principal des études expérimentales et numériques menées était de gagner en niveau de maturité, visant un TRL de 4.

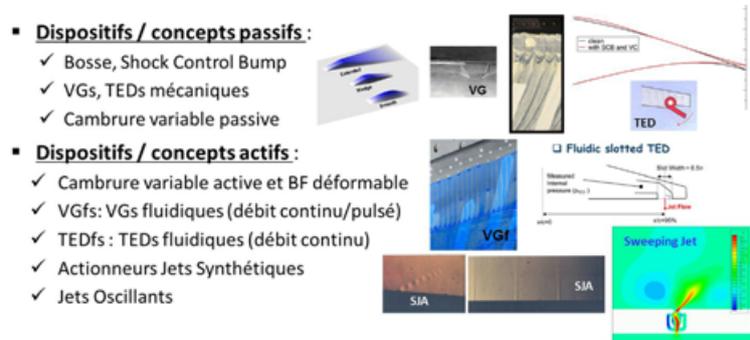


Figure 6. Actionneurs passifs et actifs utilisés pour le contrôle du tremblement en boucle ouverte dans le cadre du projet JTI Clean Sky SFWA-ITD.

Considérant les dispositifs passifs, les VGs mécaniques co-rotatifs testés par le consortium BUCOLIC (ARA et Université de Liverpool) ont confirmé les résultats obtenus précédemment dans le cadre du projet FP6 AVERT par l'ONERA, à savoir un gain net sur le coefficient de portance à des angles d'incidence plus élevés ($\sim +0.5^\circ$), accompagné d'une diminution des instabilités sans induire une augmentation de traînée [9,11].

Le consortium NextWing (Universités de Cambridge et de Stuttgart) a approfondi la connaissance de la modification de la physique provoquée par une bosse de type SCB. Une étude paramétrique a conduit à une optimisation de la géométrie en lien avec une diminution de la traînée de choc, et le contrôle de l'interaction choc-couche limite turbulente. Une application d'une SCB sur une voilure laminaire d'un avion de transport de type SRA (*Short Range Aircraft*) a conduit à une polaire plus lisse, sans pénalité aux conditions de croisière, et à une amélioration significative pour des conditions *off design* à portance élevée (Figure 7) [1,4].

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES
POINT SUR L'AVANCEMENT DES RECHERCHES EUROPÉENNES
sur le TREMBLEMENT

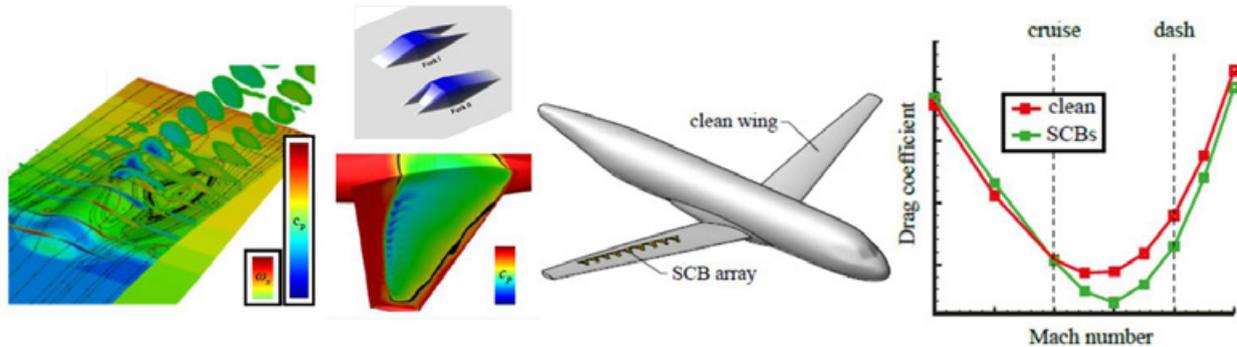


Figure 7. Application du dispositif passif SCB (Shock Control Bump). (Clean Sky SFWA-ITD, projet NextWing) [1,4].

Dans un même registre, le DLR a évalué numériquement le bénéfice associé en combinant une SCB avec un volet de cambrure variable au niveau du bord de fuite pour réduire l'intensité du choc. La SCB diminue la traînée d'onde à portance élevée pour des conditions off-design, la prise en compte d'un volet de cambrure variable permettant une amélioration et un bénéfice à faible portance dans une région où la traînée visqueuse est dominante [13].

De son côté, l'ONERA a consolidé les premières démonstrations effectuées, dans le cadre du projet FP6 AVERT, en lien avec Airbus Commercial Aircraft, Dassault-Aviation et Leonardo, par utilisation de VGs mécaniques, VGs fluidiques et TEDs fluidiques à coefficients de débit continu sensiblement constants (3 et 4 g/s respective-

ment). Dans un diagramme nombre de Mach / portance, des effets comparables sont obtenus, même si une saturation sur la portance est obtenue au-delà de 6 g/s, associée cependant à une efficacité encore présente des instabilités. L'ONERA a ensuite testé des VGs fluidiques à débit pulsés suivant différentes fréquences variables de 100 Hz à 300 Hz, avec un effet comparable à celui obtenu avec un débit continu aussi bien sur le recul du choc que sur la diminution des instabilités au niveau du bord de fuite (Figure 8a) [5,6]. Ce résultat positif a permis de mettre en œuvre ensuite un contrôle en boucle fermée basé sur un dialogue entre un actionneur VG fluidique à débit pulsé et un capteur de pression instationnaire situé à 85% de corde et 75% de l'emplanture d'une voilure turbulente d'une demi-maquette montée à la paroi de la soufflerie S2MA de l'ONERA (Figure 8b).

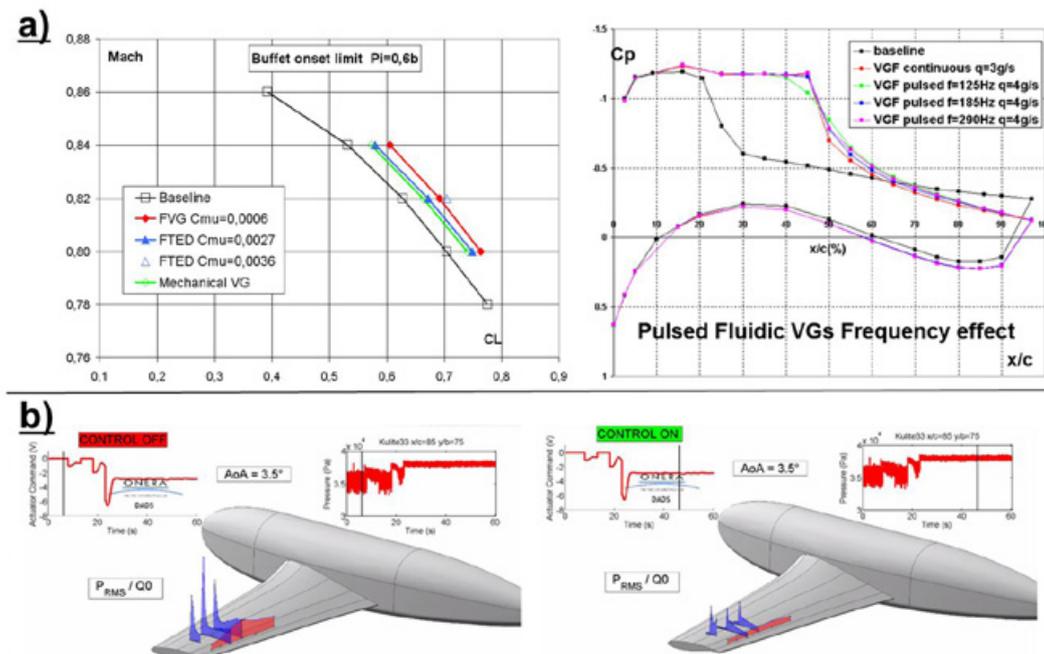


Figure 8. Contrôle du tremblement en boucle ouverte avec des dispositifs passifs sur une voilure turbulente testée dans la soufflerie S2MA de l'ONERA : a) VG mécanique, VG fluidique (débits continu et pulsé) et TED fluidique (débit continu) ; b) contrôle en boucle fermée [5,6].

En conclusion, au cours de la dernière décennie de nombreuses recherches expérimentales et numériques ont conduit à l'amélioration de la prévision du tremblement et de son contrôle en boucle ouverte. Une première tentative en boucle fermée avec des dispositifs actifs a été concluante. Plusieurs bases de données de grande qualité ont été générées en Europe permettant la validation de calculs avec des outils de Haute-Fidélité pour la prévision du tremblement dès la phase de conception d'une voilure d'avion moderne. La preuve de repousser l'entrée en tremblement a été clairement démontrée, ce qui a permis à la communauté industrielle de valider le niveau TRL 3 dans le cadre du projet JTI Clean Sky SFWA-ITD.

Améliorer le niveau de maturité (TRL 4) nécessitera une implication plus importante de l'industrie aéronautique pour définir les conditions aux limites sur non seulement la localisation du dispositif de contrôle mais aussi sa dimension, plus les contraintes pour son intégration d'un point de vue système.

RÉFÉRENCES :

- [1] Bogdanski S., Nübler K., Lutz T., Kramer E., *New Results in Numerical & Experimental Fluid Mechanics Vol. IX*, 124, pp.23-32, 2014. https://doi.org/10.1007/978-3-319-03158-3_3
- [2] Brunet V., Deck S., *AIAA Paper 2008-4152*, <https://doi.org/10.2514/6.2008-4152>
- [3] Caruana D., Mignosi A., Robitaille C., Correge M., in *Flow, Aerospace Science & Technology*, Vol. 9, pp. 605-616, Oct. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2004.12.005>
- [4] Colliss S.P., Babinsky H., Nübler K., Lutz T., *AIAA Journal*, Vol. 54 (8), pp. 2338-2350, 2016, <https://doi.org/10.2514/1.J054669>
- [5] Dandois J., *AIP Physics of Fluids*, Vol. 28, Jan. 2016. <https://doi.org/10.1063/1.4937426>
- [6] Dandois J., Molton P., Lepage A., Geeraert A., Brunet V., Dor JB, Coustols E., *Aerospace Lab Issue 6*, June 2013, <http://www.aerospacelab-journal.org/al6>
- [7] Hansen H., in *Proc. KATnet Flow Control Workshop, Poitiers, 12-13 Oct. 2004*.
- [8] Jacquin L., Molton P., Deck S., Maury B., Soulevant D., in *Proc. 35th AIAA Fluid Dynamics Conf., Toronto, Canada, June 2005, AIAA Paper 2005-4902*. <https://doi.org/10.2514/6.2005-4902>
- [9] Lawson S., Greenwell D., Quinn M.K., *54th AIAA Aerospace Science Meeting, Jan. 2016*, <https://doi.org/10.2514/6.2016-1309>
- [10] Mabey D.G., *Buffet definition and criteria*, AGARD AR 82, 1975.
- [11] Masini L., Timme S., Ciarella A., Peace A., in *52nd 3AF Int. Conf. on Applied Aerodynamics. Lyon, France, 2017*.
- [12] Sartor F., Timme S., *AIAA Journal*, Vol. 55, No. 4, pp. 1230-1240, 2017, <https://doi.org/10.2514/1.J055186>.
- [13] Werner M., *AIAA SciTech 2018, 8-13 Jan. 2018, Kissimmee, USA, AIAA 2018-0789*, <https://doi.org/10.2514/6.2018-0789>. ■

NOUVELLES CONFIGURATIONS D'AÉRONEFS

par Ludovic Wiart et Olivier Atinault, ONERA

Les aspects traités dans cet article ont fait l'objet de l'un des Entretiens de Toulouse (le 11 avril 2019). Plus de quarante personnes ont participé aux échanges qui ont suivi l'exposé de Ludovic Wiart.

À l'heure où l'aéronautique est pointée du doigt comme source de pollution et compte-tenu de la hausse annoncée du trafic aérien, les réductions de consommation obtenues ces dernières années sont parfois considérées comme insuffisantes. Voici donc un état des lieux des technologies d'avenir à l'étude dans les domaines de l'aérodynamique, de la structure et de la propulsion, qui permettraient d'atteindre les ambitieux objectifs de réduction de l'empreinte environnemental du transport aérien.

QUELLES PISTES D'AMÉLIORATION ?

Une bonne manière d'identifier les points d'amélioration pour un aéronef est de se référer à la formule de Breguet Leduc. Elle offre l'avantage de faire apparaître les disciplines en jeu : aérodynamique, propulsion et structure.

$$Finesse = \frac{Portance}{Trainée}$$

$$Distance franchissable = \frac{Vitesse}{Consommation} \cdot Finesse \cdot \ln\left(\frac{Masse départ}{Masse arrivée}\right)$$

Aérodynamique Structure
Propulsion

Aérodynamique : en croisière la finesse est le paramètre clé. Mais il faut également décoller et atterrir, ce qui nécessite un compromis. À basse vitesse, il faut de la surface voilure (on l'augmente avec les hypersustentateurs) et le moins de flèche possible. En croisière, on veut de l'allongement (envergure au carré/surface de la voilure) et de la flèche. Ce compromis devient de plus en plus compliqué lorsque la vitesse visée en croisière augmente.

Propulsion : il est plus efficace énergétiquement d'accélérer peu une grande quantité d'air que d'accélérer fortement une faible quantité d'air pour générer de la poussée. D'où le passage du réacteur mono flux au double flux, puis l'augmentation du taux de dilution.

Structure : traduit le fait que pour aller loin, il faut que la masse de carburant soit grande devant la masse à vide.

COMMENT AMÉLIORER LA FINESSE ?

La finesse est définie comme le rapport entre les forces de portance et de traînée et c'est sur cette dernière que la géométrie de l'avion peut avoir le plus d'impact. La traînée visqueuse (frottement) représente plus de 50% de la traînée totale lorsque l'écoulement est turbulent et est quasiment proportionnelle à la surface mouillée de l'aéronef. En revanche, si l'on parvient à maintenir un

régime d'écoulement laminaire sur une grande partie de la peau, une réduction de moitié de sa contribution est envisageable. Ce chiffre important explique pourquoi la laminarité, naturelle ou forcée, reste une thématique très étudiée depuis des décennies. La zone la plus à même de fournir de réels gains en vol transsonique est l'extrados voilure. Pour cela, il faut protéger les bords d'attaque de salissures (insectes) au cours de la montée à l'aide de dispositifs hypersustentateurs du type becs Krueger. Cependant, ces derniers sont moins performants que les traditionnels becs à fente. Un autre ennemi connu de la laminarité est la flèche de la voilure ou des empennages. En effet, l'écoulement turbulent à la paroi du fuselage pourrait dans ce cas contaminer toutes les surfaces portantes. Les parades peuvent inclure des dispositifs anti-contamination en pied d'élément, combinés ou non avec de l'aspiration de couche limite - on parle alors de laminarité hybride - voire une flèche inverse. De plus en plus d'avions sont conçus avec des éléments dits laminaires (winglets, nacelles, empennages) même si le gain reste très dépendant de l'état de surface. Dans la pratique, les compagnies aériennes ne peuvent pas prendre en compte cet avantage lié à la laminarité pour le calcul du volume de carburant nécessaire à la mission, ce qui ne permet pas aujourd'hui de tirer le plein potentiel de cette technologie.



Démonstrateur Airbus A340 BLADE avec extrémités de voilure laminaires

Une autre source de traînée est la traînée induite par la portance de l'appareil. Celle-ci peut représenter 40% de la traînée totale en croisière. Là encore, la parade est bien connue d'un point de vue aérodynamique : pour réduire la traînée induite, il faut augmenter l'allongement de la voilure. Les planeurs tirent partie de ce principe, avec des allongements pouvant dépasser 40. Sur un avion commercial monoplan, de telles valeurs ne sont pas atteignables d'un point de vue structure. De plus, les infrastructures aéroportuaires limitent l'envergure des appareils au sol. C'est pourquoi des constructeurs ont commencé à introduire des extrémités de voilure repliables sur des longs courriers (par exemple sur le B777-X) pour pouvoir bénéficier de la réduction de traînée induite en vol sans dépasser les dimensions maximales au sol. Le concept AlbatrossOne d'Airbus profite par ailleurs de la partie mobile en extrémité de voilure pour soulager

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES NOUVELLES CONFIGURATIONS D'AÉRONEFS

celle-ci en cas de réponse à des rafales. Par ailleurs, de nombreux projets étudient des configurations alternatives avec ce même objectif de réduire la composante de traînée induite. L'aile haubanée permettrait d'atteindre de plus grands allongements en rigidifiant la structure à l'aide d'un renfort (hauban). Ces configurations à faible flèche/faible corde sont par ailleurs propices à la laminarité. L'aile rhomboïdale qui, à envergure constante, permettrait de diminuer la corde locale, en plus de réduire fortement l'intensité du tourbillon marginal en bout d'aile. Ou encore l'aile volante, pour laquelle fuselage et voilure sont confondus et participent tous deux à la portance, ce qui permettrait donc d'atteindre une finesse optimale.



Extrémité de voilure repliable du Boeing B777X



Concept d'avion à aile haubanée



Concept PARSIFAL à aile rhomboïdale

COMMENT AMÉLIORER LE RENDEMENT PROPULSIF ?

Depuis plusieurs dizaines d'années cependant, la formule aérodynamique des avions de transport a très peu évolué. Et la segmentation est quasi inexistante pour la majorité des missions commerciales. Cette formule est celle du Boeing 707 : une voilure basse en flèche, des turboréacteurs montés en nacelles sous voilure. Le moins que l'on puisse dire c'est que la formule a fait ses preuves, puisque le B707 est entré en service en 1958. Il

existe certes un peu plus de diversité sur les missions plus courtes : des avions à voilure haute et à turbopropulseur, des turboréacteurs placés à l'arrière sur certains avions d'affaires ou régionaux.

L'évolution majeure des 60 dernières années est à chercher du côté des moteurs. Premièrement, leur nombre est passé, pour la très grande majorité des avions, de quatre à deux. Cela est la conséquence logique d'un changement de réglementation (certification ETOPS) lié à une meilleure fiabilité. Ensuite, ils ont gagné en masse et en diamètre. Non que les besoins en puissance aient explosé, mais parce qu'il s'agit d'une conséquence directe de la baisse du taux de compression de la soufflante. En effet, en comprimant moins fort de plus grands volumes d'air, le rendement propulsif augmente, la consommation spécifique diminue fortement, ainsi que le bruit de jet, ce qui est une conséquence heureuse. Mais qui dit un plus grand débit d'air dit un plus grand diamètre, à tel point que la garde au sol peut devenir critique en cas de remotorisation, à l'image du Boeing 737 MAX. Par ailleurs, une grande soufflante doit tourner moins vite pour conserver un bon rendement, ce qui est difficilement compatible avec les besoins des turbines, qui elles ont besoin de tourner rapidement pour extraire l'énergie du flux primaire. Il faut alors, soit multiplier le nombre d'étages de turbines basses pression, au prix d'une masse conséquente, soit avoir recours à un réducteur pour découpler les deux. Toutefois, même avec réducteur, il n'est pas certain que le taux de dilution optimal (issu d'un compromis masse, surface mouillée sur l'avion complet) des turboréacteurs continue à augmenter au même rythme que ces dernières années. Pour aller chercher des gains de consommation supplémentaires, plusieurs pistes existent.

La première option pourrait consister à se libérer de la contrainte de garde au sol : soit en augmentant le dièdre voilure à l'emplanture, soit en plaçant les moteurs au-dessus de la voilure. Cette dernière option peut être avantageuse d'un point de vue acoustique - masquage par la voilure du bruit fan - mais elle compliquerait probablement la maintenance des moteurs.



Projet d'avion de transport, Lockheed-Martin

Pour atteindre un rendement propulsif encore meilleur, une autre option est de ne pas caréner la soufflante. On

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES NOUVELLES CONFIGURATIONS D'AÉRONEFS

parle alors d'*Open Rotor* (avec deux hélices contrarotatives, ou bien avec une seule hélice et un redresseur fixe), voire d'hélices rapides simples. Cela permet de diminuer encore le taux de compression et de brasser un débit d'air inatteignable pour des turboréacteurs. Cependant leur adoption nécessiterait de réduire de 10 à 15% la vitesse de croisière. De plus, sans nacelle, il devient plus difficile de réguler le niveau sonore et de contenir une perte de pale. Enfin, leur installation sur avion n'est pas aisée du fait de forts diamètres. Des inconvénients certains donc, mais une forte hausse du prix du baril pourrait rendre à terme ces solutions plus attractives.



Essai en vol du Douglas MD80 avec moteur GE UDF (1988)



Démonstrateur d'*Open Rotor*, Safran (2018)

Enfin, une autre option permettant d'atteindre des gains de consommation sans changer radicalement de système propulsif est l'ingestion de couche limite. La couche limite est la couche d'air ralenti à la surface de l'aéronef par effets de viscosité. C'est une source de traînée mais aussi une opportunité pour rendre plus efficace la propulsion. En effet, la couche limite correspond à un déficit de vitesse tandis qu'un moteur produit de la poussée par le biais d'un jet rapide. D'un point de vue énergétique, il serait plus efficace de simplement combler le déficit de vitesse par le jet moteur.

Dans la pratique, il est difficile de faire ingérer 100% de la couche limite d'un avion par ses moteurs car celle-ci se développe sur chacune de ses surfaces. Mais comme la couche limite s'épaissit d'environ 1 cm par mètre, la zone où placer les moteurs qui présente le plus fort potentiel est l'arrière du fuselage. Plusieurs configurations ont été proposées afin de tirer le meilleur parti de cette opportunité.

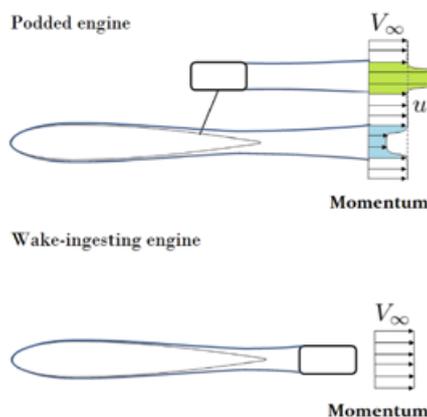


Illustration de l'ingestion de couche limite (ou de sillage) par un moteur (Arntz, 2014)



Concept D8, MIT/Aurora



Concept NOVA, ONERA



Concept Starc-ABL, NASA



Concept Nautilus, Airbus

A noter que l'ingestion de couche limite n'est pas dépourvue d'inconvénients également, la tenue mécanique d'une soufflante fonctionnant sous distorsion étant notamment un point délicat. L'ONERA étudie cette problématique dans le cadre de la convention DGAC SUBLIME notamment.

ET LA MASSE ?

Le dernier levier de l'équation de Breguet est bien entendu la masse. C'est ce qui explique le recours de plus en plus massif aux matériaux composites dans la structure des aéronefs. L'amélioration des méthodes de prévision conduit à déterminer plus précisément les quantités de matière nécessaires tout en respectant les mêmes critères de certification. L'amélioration des processus de fabrication permet de ne mettre de la matière que là où elle est vraiment nécessaire (par exemple par fabrication additive). Les technologies envisageables pour l'avenir font appel aux matériaux composites de toutes catégories (agencement 3D, RTM, CMO, CMC, etc.), ainsi qu'au graphène et ses dérivés à un horizon plus lointain.

C'est la masse encore qui explique que le kérosène (ou autres carburants alternatifs) risque de rester pour longtemps encore la source d'énergie principale pour les avions. En effet, celui-ci étant consommé au cours de la mission, l'avion est de plus en plus léger, ce qui permet d'atteindre des rayons d'action très grands. Au contraire, une batterie électrique conserve la même masse, chargée ou non. L'hydrogène quand à lui reste pénalisant en terme de volume, donc de pénalité aérodynamique, à moins de le stocker sous forme liquide (LH2) dans des réservoirs cryogéniques pressurisés, ce qui pose de nombreux problèmes de sécurité et de masse.

UN ENVIRONNEMENT CONTRAINT

Un certain nombre de contraintes, règlementaires ou non, influencent et influenceront l'architecture des aéronefs. Les nuisances sonores en sont un bon exemple. Le développement des moteurs à fort taux de dilution a permis de réduire fortement le bruit de jet, si bien que d'autres bruits sont désormais prédominants (soufflante, hypersustentateurs, etc.). Un durcissement des normes pourrait obliger les constructeurs à recourir à des solutions du type masquage acoustique par les surfaces portantes. Le bruit sera également l'obstacle principal à l'acceptation de services de taxis aériens en milieu urbain, ou au retour du supersonique civil.

Parmi les autres contraintes, on peut citer pêle-mêle les émissions polluantes, la sécurité, la maintenance, etc.

Un exemple intéressant, impactant l'ensemble de ces domaines, est le développement de la propulsion

distribuée. Ce n'est pas une idée récente mais qui était jusque là limitée par le vecteur énergétique à disposition (énergie mécanique, hydraulique, etc.). L'électrification croissante des appareils a redonné des perspectives à ce domaine. En effet, distribuer l'énergie électrique est plus simple et ouvre considérablement l'espace de design. La propulsion électrique distribuée offre des avantages en terme de sécurité (redondance, maniabilité) de simplicité et de coût (des petits moteurs électriques coûtent moins cher qu'un puissant moteur thermique, ils peuvent remplacer des gouvernes) ainsi que des gains potentiels de performance.



Volocopter



Cora, Kitty Hawk



Concept N3X, NASA

Cependant la distribution électrique de fortes puissances demeure un défi, car cela fait appel à de fortes tensions (risque d'arc électriques, interférences) ou intensités (échauffement). La gestion thermique d'une propulsion hybride est un point crucial à lever pour permettre l'émergence de la propulsion distribuée sur de gros aéronefs (avions de transport ou multi-rotor lourds). Ces concepts sont étudiés par l'ONERA dans le projet européen CS2 sous forme de la configuration DRAGON.



Concept DRAGON, ONERA



Démonstrateur « low boom » X-59 QueSST, NASA

Concernant le retour du supersonique civil, les progrès réalisés outre-Atlantique sur la maîtrise du bang sonique au sol laisse entrevoir une révision de l'interdiction du survol des terres à vitesse supersonique, et ainsi la possible émergence d'avions d'affaire supersoniques. À cette fin, la NASA va tester prochainement le démonstrateur X-59 (réalisé par Lockheed Martin), qui vise à produire un bang sonique suffisamment faible pour le rendre acceptable aux populations environnantes. Au-delà de la géométrie avion qui impacte directement le bang perçu, la maîtrise des trajectoires ainsi que la connaissance des conditions météo environnantes seront des éléments déterminants pour rendre acceptable ces engins.

CONCLUSION

Il est possible de gagner aussi sur l'aspect opérations. Aujourd'hui, les compagnies qui exploitent les lignes commerciales ont tendance à ne pas utiliser les appareils en conditions optimales. Les avions court courrier volent globalement trop vite et pas assez haut. Réduire la vitesse de vol, même avec les avions existants, est d'ailleurs le moyen le plus direct de réduire la consommation. Mais est-ce compatible avec les attentes des exploitants et des passagers ?

Même dans une hypothèse de changement de source d'énergie, il sera toujours nécessaire de travailler sur les architectures avion afin de réduire la consommation de ces carburants « propres » mais bien plus onéreux et d'atteindre les rayons d'actions souhaités. ■

EXTRÉMITÉS DE VOILURES

par Zdenek Johan, Dassault Aviation et Jean-Luc Hantrais-Gervois, ONERA

Les problématiques liées aux extrémités de voilures dans l'aviation commerciale ont fait l'objet de l'un des débats des Entretiens de Toulouse (le 11 avril 2019). Une quinzaine de personnes ont activement participé à ce débat provenant d'horizons divers (industriels, étatiques, doctorants, etc.). Nous les remercions pour ces échanges.

INTRODUCTION

Winglets, sharklets, tip fences, spiroids, saumons repliables... Tous les avions récents affichent des extrémités de voilure dépassant la simple forme en plan de la voilure. Au-delà des aspects marketing, les extrémités de voilure jouent un rôle dans la consommation de carburant (notamment par la réduction de la traînée induite) et sont le lieu d'écoulements tridimensionnels complexes.

Les extrémités de voilure conduisent à un compromis aéro-structure qu'il faut identifier pour tous les régimes aérodynamiques (croisière, basses vitesses, *off-design*).

L'objet de cet article est de mettre en évidence les problématiques aboutissant aux nombreuses formes mises en œuvre par les industriels. Chacune correspond à un compromis spécifique. Aussi, aucune forme ultime n'est mise en avant. Au-delà de la configuration figée des avions actuels (de type *tube and wing*), les extrémités de voilure sont le lieu d'une innovation toujours renouvelée.

HISTOIRE ET ÉVOLUTION DES TECHNOLOGIES

De très nombreux dispositifs d'extrémité de voilure ont vu le jour en un siècle d'aéronautique. Les travaux de

Withcomb en 1976 sont une référence pour les winglets, mais on peut trouver une centaine de brevets sur ce sujet technologique (Figure 1). Les premiers brevets voient le jour dès 1910 et la bataille s'intensifie depuis avec les principaux acteurs Airbus et Boeing ;chacun proposant plusieurs versions de *winglet* plus ou moins intégrées ou bien de *split winglets*.

Les premiers winglets de série ont fait leur apparition sur avions d'affaires avant 1980 avant d'être installés sur les avions de ligne dix ans plus tard. Aujourd'hui, les nouveaux avions arborent tous leur extrémité de voilure. Certains dispositifs plus originaux que les *winglets* ont aussi été montés sur des avions.

PROBLÉMATIQUES LIÉES AUX EXTRÉMITÉS DE VOILURE

L'objectif des avions commerciaux est de remplir une mission : transporter un certain nombre de passagers sur une certaine distance en un certain temps, pour un certain coût. La mission est définie pour répondre à un besoin commercial.

D'un point de vue technique, la formule de Breguet-Leduc synthétise le compromis entre les domaines de la propulsion (consommation spécifique C_s), de l'aérodynamique (finesse ou rapport du coefficient de portance C_L sur le coefficient de traînée C_D) et de la structure par rapport à la distance à parcourir.

$$range = \frac{1}{C_s} Mach \frac{C_L}{C_D} \log\left(1 + \frac{masse_{pétrole}}{masse_{vide}}\right)$$

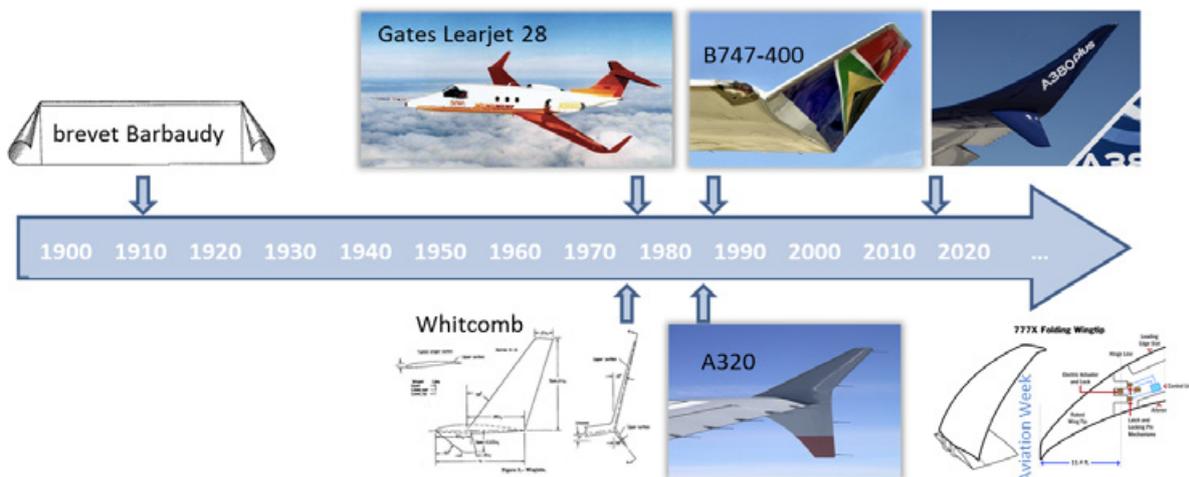


Figure 1. Historique des extrémités de voilure

Les extrémités de voilure interviennent dans la contribution aérodynamique et dans la contribution structure.

CROISIÈRE

C'est dans le terme de finesse C_L / C_D que les extrémités de voilure interviennent dans le bilan de Bréguet-Leduc. Le terme de traînée se décompose à son tour en traînée visqueuse liée au développement de la couche limite le long des surfaces mouillées des avions, en traînée induite par la portance (downwash) et en traînée d'onde (en régime transsonique). En croisière, les contributions respectives sont d'environ 55%, 45% et <1%.

Les extrémités de voilure agissent principalement sur le terme de traînée induite. Les travaux de Prandtl (1918) montrent que, pour une aile plane, le chargement elliptique de l'aile conduit à la traînée induite minimale. Celle-ci est calculée par $C_{D, \text{induite elliptique}} = C_L^2 / \pi \lambda$, où λ est l'allongement de l'aile (rapport envergure au carré sur surface). Les planeurs diminuent donc leur traînée en exploitant au maximum l'allongement de leurs ailes (jusqu'à 40 !).

En aviation commerciale, les ailes ne sont pas aussi allongées (allongements de 8 à 10). En effet, la charge elliptique sur une aile allongée implique des charges importantes en extrémité de voilure. À cela s'ajoute les contraintes aéroportuaires d'encombrement sur les pistes classant les avions en fonction de leur envergure et de l'écartement de leur train d'atterrissage (codes ICAO de A à F, Figure 2).

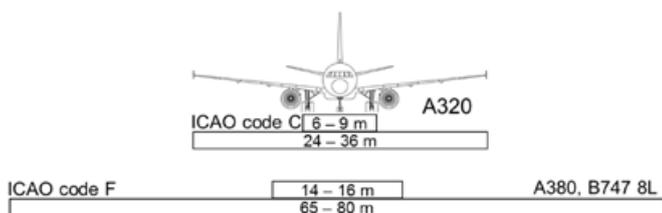


Figure 2. Codes ICAO pour l'encombrement des avions

L'effort doit donc être mis sur les formes sortant du plan de la voilure pour améliorer la traînée induite. Du point de vue des performances aérodynamiques, l'intégration d'un appendice de type winglet/wingtip en extrémité de voilure conduit aux variations suivantes, que ce soit en basse vitesse ou en grande vitesse :

- diminution de la traînée induite par augmentation de l'allongement effectif de la voilure ;
- augmentation de la traînée visqueuse (frottement et forme) due à l'ajout de surface mouillée supplémentaire ;
- dans le cas d'une voilure avec flèche, génération d'un moment supplémentaire à piquer conduisant à une augmentation de la traînée d'équilibrage (déportance supplémentaire du plan horizontal induisant une

sur-portance de la voilure pour rester à iso-portance avion).

BASSE VITESSE

Si le design d'une extrémité de voilure répond classiquement à la réduction de la traînée en croisière, le comportement aérodynamique en basse vitesse dans la configuration décollage doit être pris en compte avec le même niveau d'importance.

D'un point de vue local, l'extrémité de voilure est le siège d'une aérodynamique complexe. L'écoulement y est fortement tridimensionnel (enroulement tourbillonnaire de l'intrados de l'aile vers l'extrados). L'efficacité en croisière des dispositifs d'extrémité de voilure provient en général de leur chargement aérodynamique. Aux basses vitesses, le chargement est encore plus important et cette portion de la voilure n'est pas protégée par des dispositifs d'augmentation de la cambrure de bord d'attaque de type becs ce qui rend cette zone propice aux décollements (Figure 3). La capacité à repousser en incidence le décrochage de l'extrémité (au-delà de l'incidence à la vitesse de décollage) permet :

- de tirer bénéfice du gain de finesse apporté par l'extrémité de voilure sur les performances au décollage (diminution de la distance de décollage et/ou augmentation de la masse maximale au décollage si le dimensionnement structural le permet) ;
- d'éviter des phénomènes de buffeting (tremblement) d'extrémité de voilure liés à son décrochage lors de manœuvres à la vitesse minimale de décollage. Dans des cas extrêmes, ces phénomènes peuvent conduire à un besoin d'augmentation des vitesses de décollage.

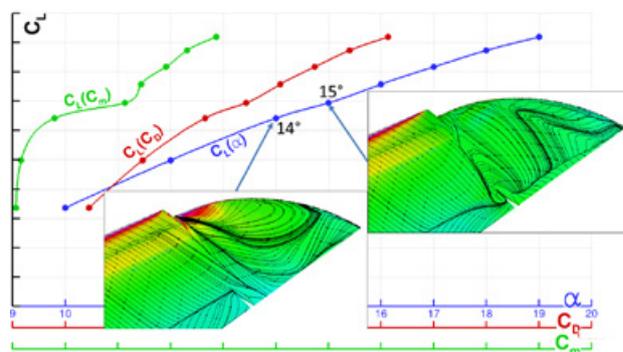


Figure 3. Topologies d'écoulement sur une extrémité de voilure à forte incidence aux basses vitesses, d'après [1].

SILLAGE

Au-delà des performances en finesse, l'enroulement tourbillonnaire au niveau de l'extrémité de voilure génère des tourbillons en aval des avions (Figure 4). L'intensité et la persistance de ces tourbillons pouvant être dangereuses pour les avions suiveurs, des normes d'espacements sont établies à l'atterrissage, au décollage et en vol. L'intensité de ces tourbillons est directement proportionnelle à la masse de l'appareil émetteur. Cette problématique est donc d'autant plus marquée pour les gros porteurs. Par ailleurs, dans certaines conditions de croisière, des contrails (traînées de condensation) peuvent se former par l'interaction entre les tourbillons et la vapeur d'eau émise par les moteurs. L'impact sur le bilan énergétique de la planète est à considérer.

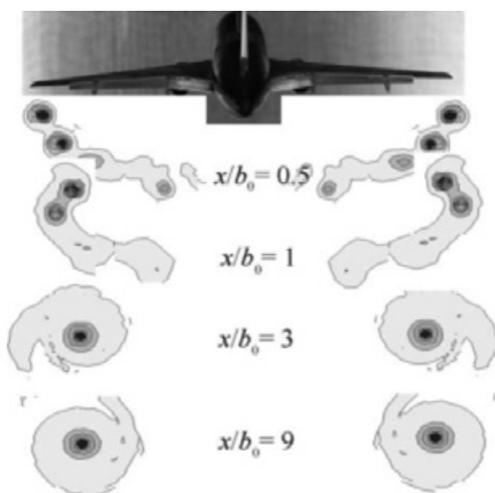


Figure 4. Sillage en aval d'un avion d'après [2].

Les dispositifs d'extrémité de voilure ont un effet sur la formation de ces tourbillons et donc leur évolution en aval de l'avion. La manipulation du tourbillon d'extrémité de voilure pourrait devenir un objectif de conception (au-delà de la traînée).

MÉTHODES DE CONCEPTION

Les outils de conception aérodynamique permettent d'aborder ces problématiques reposent sur la simulation numérique et sur l'expérimentation (en soufflerie et en vol). Les calculs interviennent dès la conception. Ceux-ci sont relativement peu coûteux et valides pour la croisière. En revanche, leur validité physique est discutable aux fortes charges notamment vis-à-vis de la prédiction des décollements. Les efforts de recherche sur ces outils sont donc à poursuivre.

Les essais en soufflerie sont plus coûteux et nécessitent des cycles plus longs que la simulation. Ils s'intercalent entre les boucles de conception par calcul durant le

processus de développement. Enfin, les essais en vol sont le juge de paix, mais interviennent à la toute fin du développement.

COMPROMIS AÉRO-STRUCTURE ET AÉRO-ÉLASTIQUE

Les extrémités de voilure peuvent induire des variations de chargements aérodynamiques sur la voilure qui peuvent amener à des renforts voilure (dans le cas d'un rétrofit) ou à un redimensionnement de la voilure (dans le cas d'un design global de la voilure munie de son extrémité).

Au-delà de l'aérodynamique réalisant un compromis entre la croisière et la basse vitesse, c'est un compromis aéro-structure qu'il faut trouver lors de la conception d'une aile équipée d'un dispositif d'extrémité de voilure. Ce compromis vise un optimum global entre gain de finesse et impact masse structure.

Comme décrit dans [4] et présenté sur la figure 5, l'optimisation structurale de voilure (essentiellement les panneaux extradors et intrados) nécessite la prise en compte de :

- charges aéroélastiques provenant de manœuvres ou de turbulences conduisant à un dimensionnement sur la base de critères en traction, flambage et fatigue dans le cas de voilures métalliques et traction / compression après impact pour les voilures composite [5] ;
- contraintes aéroélastiques permettant d'éviter des instabilités dynamiques (*flutter*).

La complexité de l'optimisation structurale (nombreux cas de charges à prendre en compte) amène naturellement à considérer cette dernière comme la composante pilotant le processus d'optimisation aéro-structurale global. Ainsi, dans le cas d'une voilure équipée de *wingtips* définis suivant un certain nombre de paramètres macroscopiques que l'on cherche à optimiser (hauteur, flèche, dièdre, etc.), le processus d'optimisation structurale peut générer la surface de réponse en masse voilure suivant ces évolutions de formes en utilisant en entrée pour les charges les champs aérodynamiques obtenus pour différentes variantes de formes. Par ailleurs, des analyses aérodynamiques permettent de déterminer la variation de la traînée avion en fonction de ces mêmes paramètres macroscopiques. Un rebouclage sur le rayon d'action via une approche simple type Breguet-Leduc permet d'identifier les bénéfices des évolutions de formes de *wingtips*. Il faut noter l'importance de considérer l'ensemble des charges et contraintes aéroélastiques de premier ordre dans le processus d'optimisation structural et réaliser ce dernier à chaque évolution de forme afin d'obtenir des variations de masse voilure suffisamment précises pour ne pas biaiser le choix d'une forme d'extrémité de voilure

par rapport à une autre.

Bien entendu, ce processus repose sur la capacité à prévoir les chargements aérodynamiques et les déformations associées de manière suffisamment précise (voir Figure 6). Les méthodes numériques en aérodynamique et en structure sont déjà de bon niveau, notamment aux conditions de croisière. En revanche, leur validité est moindre aux fortes charges.

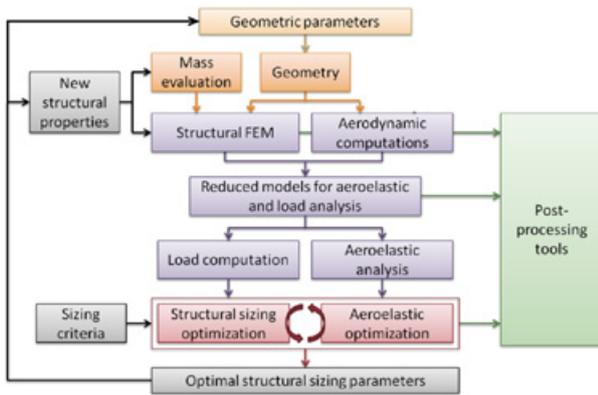


Figure 5 : Processus d'optimisation structurale, d'après [4].

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cet article souligne les défis auxquels le design des extrémités est confronté sur les avions actuels. La conception de ces dispositifs est multiphysique (aérodynamique et structure) et est le résultat d'un compromis entre les diverses phases de vol.

La foison de brevets et de formes diverses montées sur les avions souligne à la fois l'aspect stratégique de cette conception, mais peut-être aussi le manque de maturité dans la conception des dispositifs.

Ces défis seront au cœur des configurations d'avenir, comme l'avion souple à très grand allongement ou les configurations de rupture (aile jointive par exemple) ou encore les dispositifs actifs suivant les conditions de vol.

RÉFÉRENCES

[1] J.-P. Rosenblum, P. Vrchota, S. Wallin, P. Elliasson, P. Ianelli, V. Ciobaca, J. Wild, J.-L. Hantrais-Gervois, M. Costes, Numerical Sizing of Active, Flow CControl Concepts on the Outer Wing, 52nd 3AF International Conference on Applied Aerodynamics, mars 2017.

[2] J. Crouch, L. Jacquin (Eds.), Aircraft Trailing Vortices, C.R. Physique, 6 (4-5) (2005).

[3] J.-L. Hantrais-Gervois, R. Grenon, A. Mann, A. Buscher, Downward Pointing Winglet Design and Assessment within the M-DAW Research Project, Aeronautical Journal, Vol. 113, Num. 1142, April 2009.

[4] S. Meldrum, P. Hardy, G. Broux, E. Garrigues, A DASSAULT Industrial Approach to Aero-Structural Optimization, International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics, Saint-Petersbourg, Russie, papier IFASD-2015-121, 2015.

[5] S. Meldrum, L. Colo, G. Broux, E. Garrigues, A New DASSAULT Industrial Approach for Aero-Structural Optimization of Composite Structures with Stacking Table Constraints, International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics, Como, Italie, papier IFASD-2017-130, 2017.

[6] J.-L. Hantrais-Gervois, M. Rapin, Aerodynamic and structural behaviour of a wing equipped with a winglet at cruise, 44th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, papier AIAA-2006-1489, Reno, janvier 2006. ■

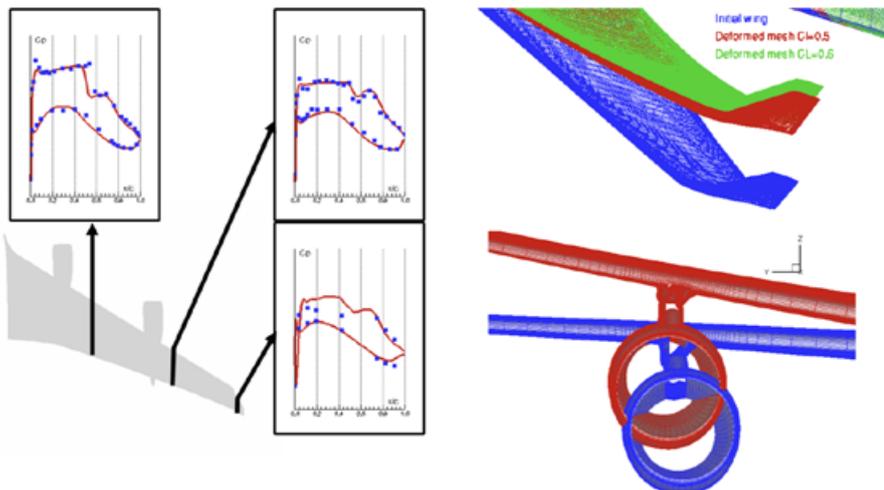


Figure 6 : Prédiction du chargement aérodynamique par rapport à des essais en vol (voilure souple), d'après [6].

L'ASSIMILATION DE DONNÉES EN AÉRODYNAMIQUE : EXEMPLES

par Benjamin Leclaire, Hervé Bezard et Olivier Marquet, ONERA

L'assimilation de données est un ensemble de techniques permettant de coupler des données et des résultats de modèles d'origines différentes, pour reconstruire au mieux l'état d'un système à estimer. Ce domaine de recherches a été principalement développé par la communauté météorologique, où les simulations numériques utilisent des modèles très approchés en regard de la complexité du système fluide atmosphérique, et qui peuvent rapidement perdre en fiabilité de prévision. L'assimilation de données y a consisté à utiliser des mesures ponctuelles (par exemple des relevés de sondes sur le terrain) pour estimer certains des paramètres incertains des simulations, permettant de les recalibrer régulièrement et mener à une prévision plus fiable. L'utilisation de ces techniques en aérodynamique est récente, mais en pleine expansion car très prometteuse. L'aérodynamicien aborde en effet la conception des systèmes également par une approche duale entre expérimentation et simulation numérique, la conciliation entre les deux pour traduire la réalité du système ayant toujours été un exercice difficile. L'assimilation de données offre alors la perspective de pouvoir réaliser ce couplage de façon optimale et automatisée, ce pourquoi l'ONERA mène depuis plusieurs années des recherches sur ces sujets. Nous en présentons ici deux exemples récents, l'un avec un objectif tourné vers l'expérimental, d'amélioration des capacités de mesure, et l'autre avec un objectif numérique, d'amélioration d'un modèle de turbulence. Ces deux exemples ont également pour caractéristique d'employer chacun l'une des grandes familles d'algorithmes utilisés en pratique.

ASSIMILATION DE DONNÉES POUR ÉTENDRE LES CAPACITÉS DE LA MESURE

La PIV (Particle Image Velocimetry ou Vélométrie par Images de Particules) est actuellement une technique très employée pour caractériser les champs de vitesse des écoulements, que ce soit en recherche amont ou, de plus en plus fréquemment, pour des applications. Cette méthode optique, donc non intrusive, consiste à mesurer le déplacement entre deux instants très rapprochés de très fines particules injectées dans l'écoulement. Bien que fournissant une grande richesse d'information, la PIV souffre d'un certain nombre de biais et sources de bruits bien connus. Par exemple, sa résolution spatiale est plus limitée que d'autres méthodes, ce qui l'amène fréquemment à filtrer les échelles turbulentes les plus fines. De même, il est fréquent que le rapport signal sur bruit des images (niveau d'intensité des images des particules par rapport au bruit de fond) soit de qualité réduite, ceci étant d'autant plus vrai quand on cherche à

obtenir des champs de vitesse à haute cadence temporelle (fréquences de l'ordre du kHz).

Nous présentons ici des résultats d'assimilation considérant ce type de mesure en entrée, pour le cas du champ proche d'un écoulement de jet plan, à nombre de Reynolds modéré. Le dispositif expérimental, présenté Figure 1 (gauche), se compose d'un laser équipé d'un générateur de nappe, qui permet de réaliser un plan de lumière dans le plan de symétrie du jet. Une caméra rapide est placée de sorte à observer les particules illuminées, perpendiculairement au plan d'intérêt. La Figure 1 (droite) présente un extrait d'une image, où la quantité de particules injectée dans le jet a été volontairement augmentée de façon drastique, afin de visualiser des structures tourbillonnaires instantanées. L'apparence de l'image dans la zone extérieure au jet est quant à elle plus typique de celle d'une image PIV haute cadence ensuite traitée par les algorithmes. Afin de mesurer le potentiel de l'assimilation de données dans des conditions difficiles, l'essai a été effectué en considérant une densité d'ensemencement en particules plus faible que la norme. De telles situations sont couramment obtenues dans des installations plus contraintes, ou dans certaines zones d'écoulements particulières. La Figure 2 (colonne de gauche, « measurement ») représente la composante de vitesse perpendiculaire à la direction principale du jet, pour deux instants différents. En raison du faible nombre de particules et du faible rapport signal sur bruit typique de la PIV haute cadence, ces champs, issus d'un traitement par un algorithme de PIV classique, apparaissent très bruités.

L'amélioration de ces mesures par assimilation de données a été menée dans le cadre d'une thèse récente [1], par une méthode dite variationnelle, proche de l'optimisation numérique et du contrôle optimal, et inspirée de [2]. Celle-ci consiste à trouver les valeurs de certains paramètres d'une simulation numérique, permettant de faire en sorte que celle-ci soit la plus proche possible des mesures disponibles. Plus techniquement, ceci s'obtient par la construction d'une fonctionnelle objectif qu'il s'agit de minimiser, en jouant sur des variables de contrôle qui sont ces paramètres incertains. Un premier point important est de bien connaître la caractéristique de cette mesure. Dans la fonctionnelle, celle-ci est transcrite par ce que l'on appelle un « opérateur de mesure », qui traduit des propriétés comme par exemple l'emplacement dans l'espace des points de mesures disponibles, et la résolution spatiale de chacun d'entre eux. Dans le cas de la PIV, ceci permet de modéliser par exemple la résolution spatiale limitée menant au filtrage. Par ailleurs,

il est également nécessaire de choisir les paramètres de contrôle qui vont être estimés au cours de l'optimisation. Ici, il s'agit de l'évolution temporelle de la condition de vitesse à l'amont du domaine (situé du côté gauche sur les illustrations), et plus précisément du profil de vitesse à la sortie du jet. Il est en effet connu que la fidélité de restitution du développement d'un jet par une simulation numérique dépend de façon cruciale de la connaissance de cette condition à la limite. Comme le montre la Figure 2 (colonne du milieu), l'assimilation de données produit des résultats instantanés semblant en effet très proches des mesures brutes (colonne de gauche), mais évidemment sans aucun bruit spatial. Par ailleurs, la simulation étant réalisée sur un domaine plus grand que celui des mesures, une capacité d'extrapolation a par ailleurs été acquise. La bonne performance de la méthode a été vérifiée par comparaison avec une référence, figurant dans la colonne de droite. Celle-ci a été obtenue par un traitement plus haute-fidélité des images PIV, issues d'un développement métrologique récent, ayant prouvé une grande robustesse à des faibles rapports signal sur bruit. La proximité de ces champs avec ceux fournis par l'assimilation montre bien que cette reconstruction débruitée est tout à fait cohérente avec la physique. Par ailleurs, il est à noter que cette méthode a également permis de compléter l'information temporelle de cet écoulement : en effet, la donnée de mesure n'était disponible qu'à quelques instants, décorrélés en temps. La simulation numérique finale de l'assimilation, donnant l'état reconstruit, est quant à elle menée à des pas de temps beaucoup plus fins, restituant donc tout le contenu spatio-temporel de l'écoulement sur la séquence.

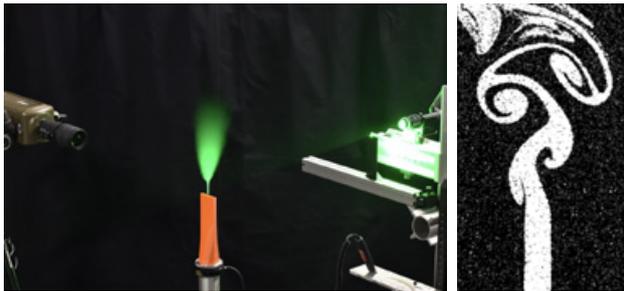


Figure 1. Expérience de jet plan (section de sortie consistant en un rectangle allongé), nombre de Reynolds 1100, mesuré par vélocimétrie par images de particules (PIV) haute cadence. La figure de gauche montre le jet, l'illumination par la nappe laser et la visualisation par caméra. La figure de droite est une image de particules acquise par la caméra, où la densité d'ensemencement a été fortement augmentée dans le jet pour visualiser les structures tourbillonnaires.

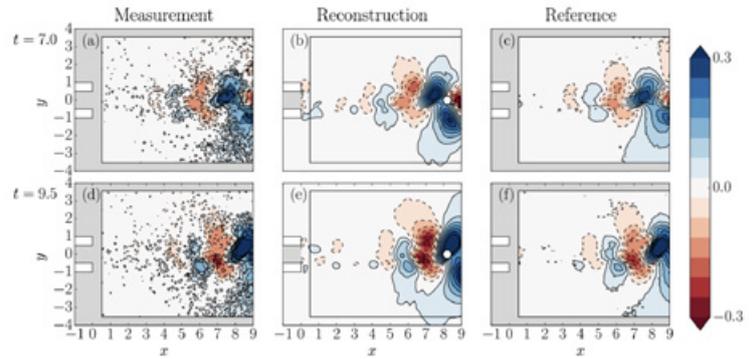


Figure 2. Champs de vitesse, composante perpendiculaire à la direction principale du jet, à deux instants différents.

Comparaison entre la mesure utilisée comme donnée d'entrée de l'assimilation, bruitée car obtenue par dépouillement PIV classique (colonne de gauche), la reconstruction issue de l'assimilation (colonne du milieu) et la référence à retrouver, obtenue par dépouillement PIV haute fidélité (colonne de droite). Les vitesses sont adimensionnées par la vitesse d'éjection du jet [1].

ASSIMILATION DE DONNÉES POUR REPOUSSER LES LIMITES DES MODÈLES DE TURBULENCE

Ce second exemple, à dimension plus applicative, s'intéresse à la simulation numérique de l'écoulement turbulent moyen autour d'un profil d'aile en régime transsonique. La particularité du cas considéré est la présence d'un spoiler, braqué à forte incidence, qui crée une zone de décollement massif à l'aval. Cette situation est ici choisie en raison de la difficulté connue des modèles de turbulence RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) à restituer fidèlement ces zones de décollement. Ceci est illustré sur la Figure 3, qui compare les champs de vitesse autour du profil obtenus par une simulation haute fidélité par ZDES (*Zonal Detached Eddy Simulation*) tri-dimensionnelle, qui sera prise comme référence, à deux simulations plus basse fidélité par le modèle RANS de Spalart-Allmaras (RANS-SA), à la fois en deux et trois dimensions. Comme le montre cette figure, la zone de décollement créée par le volet est plus étendue dans le cas des calculs RANS-SA, et caractérisée par des nombres de Mach pouvant être différents localement. De façon similaire, les coefficients de pression à la paroi déterminés par les différentes simulations présentent également des écarts, comme le montre la figure 4. Ceci est particulièrement visible, dans la zone du décollement, sur la valeur des plateaux de pression, ainsi que sur la position du choc, qui se traduit ici par une brusque augmentation du coefficient de pression C_p aux alentours de $x/c = 0,4$. Bien que pouvant apparaître minimes sur ces figures, ces écarts peuvent mener à des différences d'estimation des efforts sur l'aile significatives pour les besoins de la conception aérodynamique.

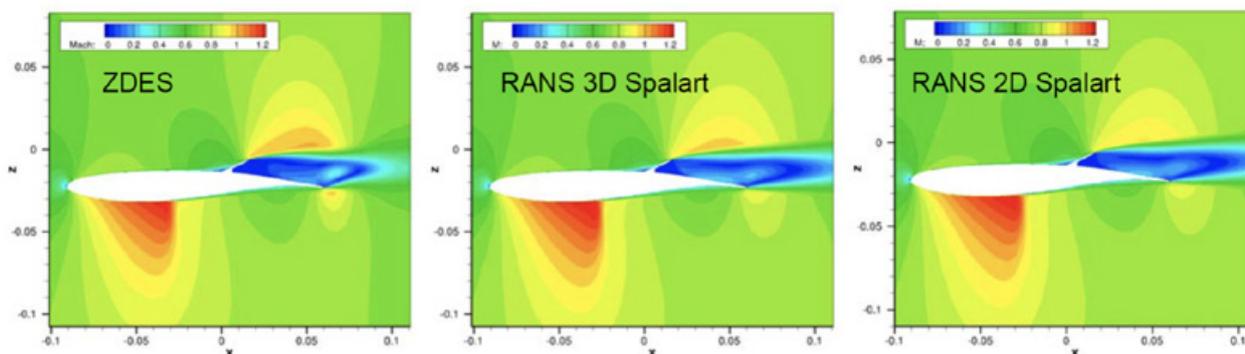


Figure 3. Comparaison de champs de nombre de Mach moyen autour d'un profil d'aile OAT15A avec spoiler braqué en conditions transsoniques. Simulation haute-fidélité par ZDES (gauche), qui sera prise comme référence pour l'évaluation de performance. Simulations moins coûteuses par approches RANS avec modèle de Spalart-Allmaras, en trois dimensions (milieu) et deux dimensions (droite).

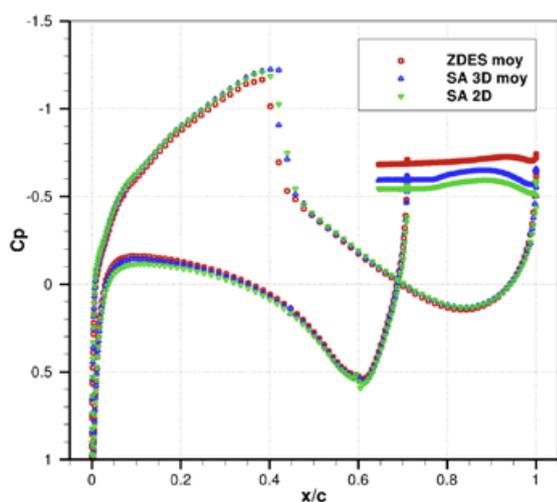


Figure 4. Comparaison du coefficient de pression pariétal autour du profil obtenu pour les calculs présentés Figure 3.

Afin de tester le potentiel de l'assimilation de données pour améliorer la prévision de l'écoulement par le modèle de RANS-SA en deux dimensions, on s'est appuyé ici non pas sur des données expérimentales, mais sur les données issues de la ZDES, préalablement vérifiées comme étant en très bon accord avec les essais de cette configuration en soufflerie. Ce cas a été choisi afin de pouvoir tester cette assimilation avec différents types de données, ainsi que pour pouvoir comparer la qualité de cette reconstruction sur l'ensemble du champ. La méthode d'assimilation utilisée ici, le filtre de Kalman d'ensemble [4], s'inscrit dans une deuxième grande famille de méthodes, à caractère stochastique. Celle-ci a pour particularité de raisonner sur un ensemble de simulations, obtenues initialement pour différentes combinaisons des paramètres incertains du modèle, et que l'on cherche à optimiser.

On considère ici le même jeu de paramètres du modèle que dans [5]. Ces simulations permettent d'évaluer dans un premier temps l'incertitude liée à ces paramètres. Puis, un processus itératif permet ensuite de faire converger cet ensemble vers une solution unique, la plus proche des données. Celles-ci sont échantillonnées à partir de la ZDES comme le serait une mesure, puisque l'on considère un ensemble de valeurs du coefficient de pression pariétal, et un profil de vitesse dans le sillage. Un point fort de cette méthode est qu'elle fournit également l'incertitude associée à la solution convergée.

La figure 5 compare les champs de coefficient de pression dans la zone du spoiler, correspondant à la ZDES (gauche), à un calcul RANS-SA classique (milieu), ainsi qu'au résultat du filtre de Kalman d'ensemble (droite). La Figure 6 compare la répartition de ce coefficient à la paroi de l'aile avec les points simulants la mesure extraits de la ZDES, et avec les résultats obtenus avec la simulation RANS-SA classique à la figure 4. Sur ces deux figures, on constate que la solution du filtre de Kalman d'ensemble se rapproche beaucoup plus de la référence ZDES que la solution RANS-SA initiale dans la zone de décollement. Ceci est à la fois vrai en termes de valeurs minimales dans le champ, et pour la valeur du plateau observé à la paroi, et illustre donc le succès de l'approche d'assimilation pour corriger le modèle.

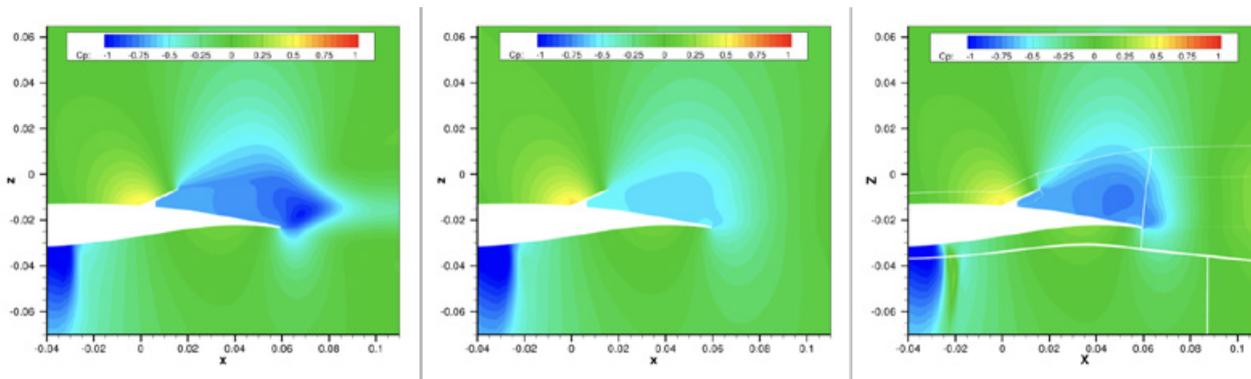


Figure 5. Champs de coefficients de pression sur la partie aval du profil. Gauche : issu de la référence par ZDES, milieu : issu du calcul brut RANS 2D Spallart-Allmaras, droite : issu de l'assimilation de données par filtre de Kalman d'ensemble.

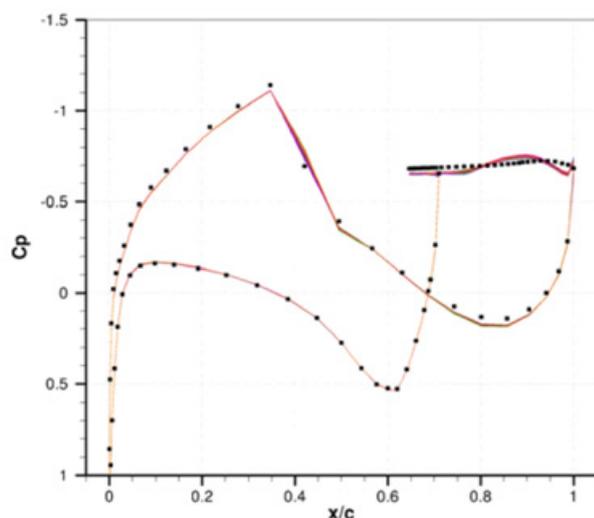


Figure 6. Comparaison du coefficient de pression autour du profil obtenu pour le filtre de Kalman d'ensemble (courbes) et les données issues de la simulation de référence ZDES (points).

En conclusion, ces exemples démontrent le fort potentiel de l'assimilation de données, qui propose une grande variété de méthodes pour coupler mesures et simulations d'écoulements aérodynamiques, et en proposer une estimation hybride et optimale. Néanmoins, elles nécessitent tout de même une bonne connaissance des systèmes physiques et modèles en jeu, car leur succès peut dépendre grandement du choix des paramètres incertains que l'on cherche à optimiser. Par ailleurs, les plus précises d'entre elles peuvent être très coûteuses en temps de calcul. À l'heure actuelle, le projet ARENE (Assimilation pour la Reconstruction d'Écoulements Numériques et Expérimentaux) de l'ONERA poursuit des recherches

sur ces méthodes, dans le but de proposer des approches robustes, accessibles et adaptées aux écoulements aérodynamiques, autour de trois cas tests d'essais typiques. Des couplages avec le deep learning sont aussi à l'étude dans le cadre du projet DELTA¹, avec pour perspective la construction de nouveaux modèles de turbulence, plus performants car issus des données (approche data driven), l'assimilation permettant, pour chaque donnée, de reconstruire les quantités turbulentes les plus adaptées.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] R. Yegavian, *Model-based approaches for flow estimation using Particle Image Velocimetry*, Thèse de l'Université Paris-Saclay, 2017.
- [2] Gronskis A., Heitz D., Mémin E., *Inflow and initial conditions for direct numerical simulation based on adjoint data assimilation*, *Journal of Computational Physics*, 242, pp. 480-497, 2013.
- [3] H. Bézard, J-L. Hantrais-Gervois, *Projet C2S « Convergence Calcul Soufflerie ». Tâche 1 - Assimilation de données dans le modèle de turbulence - Travaux 2015, Rapport Technique ONERA RT 4/23359 DSFM/DMAE, Février 2016.*
- [4] Evensen G., *The ensemble Kalman filter: theoretical formulation and practical implementation*, *Ocean Dynamics*, 53, pp. 343-367, 2003.
- [5] Kato H., Yoshizawa G., Ueno G., Obayashi S., *A data assimilation methodology for reconstructing turbulent flows around aircraft*. *Journal of Computational Physics*, 283, pp. 559-581, 2015. ■

¹ Voir Lettre 3AF n° 34 - <https://www.3af.fr/sites/default/files/lettre-3af-bat-preview.pdf>

PRIX THÈSE 3AF 2018 : MORPHING ÉLECTROACTIF HYBRIDE À ÉCHELLE RÉDUITE ET RÉELLE, APPLICATION À UNE VOILURE DE TYPE AIRBUS A320

par **Gurvan Jodin**, École Nationale Supérieure de Rennes, **Jean-François Rouchon**, Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie, Toulouse et **Marianna Braza**, Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse

CONTEXTE GÉNÉRAL

Nos études sur la thématique du *morphing*, qui consistent en l'optimisation de forme et du comportement vibratoire d'aéronefs en utilisant des matériaux électroactifs intelligents et des concepts d'aérodynamisme avancés, ont permis de prouver l'efficacité de nouveaux designs des ailes d'avion du futur. Il s'agit d'un axe de recherche multidisciplinaire, associant les Unités Mixtes de Recherche CNRS-INPT-UT3 : IMFT, Instituts de Mécanique des Fluides de Toulouse et LAPLACE, Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie. Cette thématique a été soutenue par la Fondation STAE (<http://www.fondation-stae.net/>), la DGA et Airbus lors de la dernière décennie. Depuis 2017, en collaboration avec neuf partenaires européens dont l'ONERA, nous réalisons le passage en échelle réelle de ces concepts, dans le cadre du projet Européen du H2020 N° 723402, Smart Morphing and Sensing for aeronautical configurations, www.smartwing.org/SMS/EU. La thèse de Gurvan Jodin, financée par l'ENS Rennes, ayant reçu le prix de thèse de la 3AF, s'inscrit dans le cadre de l'ensemble de ces travaux qui ont fait l'objet d'une présentation distinguée par le prix de la meilleure communication à la 53^e Conférence internationale d'aérodynamique appliquée - AERO2018 - de la 3AF.

AVANCÉES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

S'inspirant du caractère multi-échelle de la turbulence entourant l'aile d'un avion et des mouvements de l'aile, ailerons et plumes des grands oiseaux prédateurs, nous avons développé le *morphing* hybride électroactif. Ce concept associe simultanément des actionneurs électroactifs d'alliages à mémoire de forme, capables de déformer considérablement l'aile à de basses fréquences (de l'ordre de 1 Hz), et d'actionneurs piézoélectriques en mesure de faire vibrer des parties stratégiques de celle-ci à de plus hautes fréquences (de l'ordre de 500 Hz), mais avec de faibles déformations. Comme le montre la figure 1, on peut de cette façon manipuler les mouvements turbulents entourant l'aile d'un avion en faisant éclater de gros tourbillons cohérents en de plus petits et en amincissant ainsi la région tourbillonnaire contournant l'aile et son sillage. Ainsi la résistance au vent est diminuée de 3 à 5% et les sources du bruit aérodynamique produit par le bord de fuite d'environ 8%. Nous obtenons par ailleurs le renforcement de plus petits tourbillons capables d'augmenter la

portance d'environ 5%. Ces concepts du *morphing* hybride sont en partie inspirés par le mouvement des ailes de grands oiseaux prédateurs qui sont capables de cambrer leurs ailes et de les déformer considérablement tout en faisant vibrer leurs plumes et plumettes afin de détruire les turbulences nocives et de renforcer les tourbillons bénéfiques.

Nos études sont menées selon une triple approche, théorique, numérique et expérimentale. S'inspirant en partie de la nature, des prototypes d'ailes d'avion utilisant ces nouveaux matériaux ont été conçus et testés en soufflerie en utilisant des moyens de mesure très performants, tels que la *Time-Resolved PIV* ou TRPIV, après avoir optimisé les mécanismes du *morphing* par simulation numérique de Haute-Fidélité [1]. Les oiseaux n'étant pas capables de voler à des vitesses de vol de croisière où les effets de compressibilité prennent le dessus, avec l'incidence des ondes de choc sur les coefficients aérodynamiques, les approches numérique et théorique sont utilisées pour étudier le *morphing* pour le vol de croisière. On montre ainsi que le *morphing* est capable de réduire la traînée de 3 à 5% et d'augmenter la finesse aérodynamique de 5%.

Les maquettes d'aile pour le *morphing* électroactif hybride ont été étudiées pour des configurations de type A320. Il convient de différencier deux configurations, la première à échelle réduite avec une corde de 70 cm, (le *Reduced Scale RS* prototype), adaptée à des expériences en soufflerie permettant de caractériser finement l'écoulement à l'aide de la TRPIV, (Figure 1), [2, 3]. La seconde à une échelle proche de 1, (le *Large Scale LS* prototype) de corde 2,40 m, est munie d'un volet hypersustentateur de 1 m, permettant de se confronter aux problèmes des forces réelles et du dimensionnement d'actionneurs à base de matériaux novateurs capables de supporter ces forces et de les rendre optimales.

Le choix de matériaux électroactifs est également justifié par l'électrification grandissante de l'avion. L'actionnement devant répondre à deux échelles spatio-temporelles, la maquette utilise deux types de matériaux : les Alliages à Mémoire de Forme (AMF) (ou SMA, *Shape Memory Alloys*) et les céramiques piézoélectriques de type MFC (*Macro-Fiber Composites*).

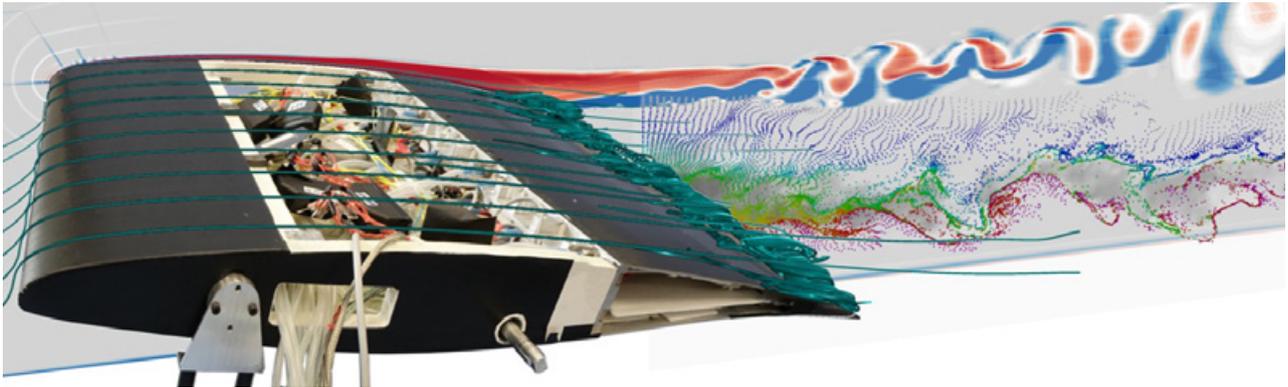


Figure 1. Maquette d'une aile de type A320 - RS prototype - ouverte pour montrer son instrumentation. Visualisation des structures tourbillonnaires turbulentes par simulation numérique et expériences TRPIV en soufflerie.

Les AMF sont caractérisés par un comportement thermomécanique. Majoritairement composés d'un alliage de Nickel et de Titane, un courant électrique qui les traverse les chauffe par effet Joule. Ce changement de température induit des changements cristallographiques entre différentes phases solides de l'alliage, ce qui se traduit par des propriétés différentes en fonction de la température, rendant le matériau capable de se déformer de quelques pourcents de sa longueur tout en générant de grands efforts [4]. Pour le prototype RS, des déformations de 10% de la longueur activée sont réalisées dans chaque sens, en cambrant ou en dé-cambrant l'aile (Figure 2a) [2,3] En revanche, les matériaux piézoélectriques sont beaucoup plus rapides, fréquence de l'ordre de 500 Hz, avec des amplitudes inférieures au millimètre. Pour cette maquette, ces parties sont sous forme de patches composites intégrant électrodes et fibres de céramique piézoélectriques, répartis le long de la région du bord de fuite (Figure 2b). Nous verrons dans la suite que ces petites vibrations ont un grand effet sur les performances aérodynamiques.

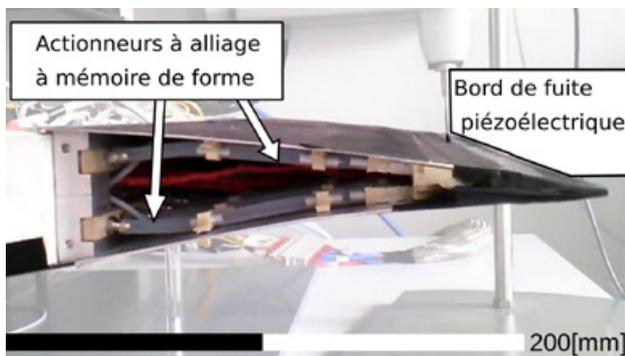


Figure 2a. Actionneur hybride électroactif du modèle réduit.

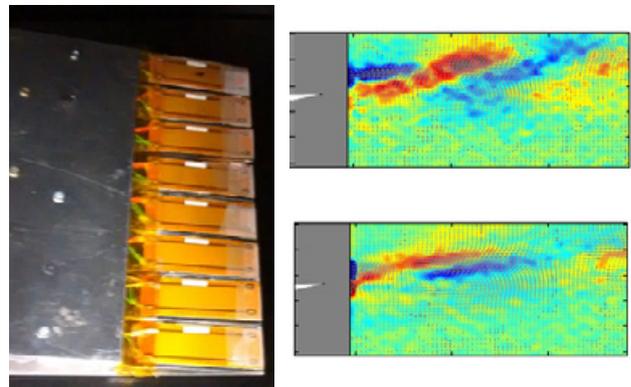


Figure 2b. Actionneurs piézoélectriques de type MFC dans la région du bord de fuite de l'aile (à gauche), Eclatement des structures tourbillonnaires cohérentes à l'aide du morphing (à droite)

Le prototype de 70 cm de corde, désigné RS, est monté dans la soufflerie S4 de l'IMFT et est instrumenté par une balance aérodynamique, des capteurs de pression et une chaîne d'acquisition TRPIV à haute cadence (6 000 Hz). Des capteurs de déformation et de température permettent d'analyser la modification de la turbulence et le contrôle du morphing électroactif hybride. La combinaison de systèmes d'actionneurs AMF et piézoélectriques dans le contexte du morphing hybride conduit à des résultats marquants. La figure 3 présente l'effet de la cambrure sur la portance (actionneurs AMF), couplé à celui de la fréquence de vibration et de la légère déformation (actionneurs piézoélectriques placés au voisinage du bord de fuite). Quand un actionnement lent augmente la cambrure de 1%, la portance augmente de 20%. Si le bord de fuite est actionné à une fréquence optimale, ces très petites vibrations et légères déformations de la région du bord de fuite améliorent la portance de 4% supplémentaires [5,2]. Les effets des vibrations sans changement de cambrure produisent par ailleurs un gain de l'ordre de 3% de portance sans modifier la traînée par morphing hybride et un gain de 2% si les actionneurs piézoélectriques seuls sont actionnés (Figures 3 et 4).

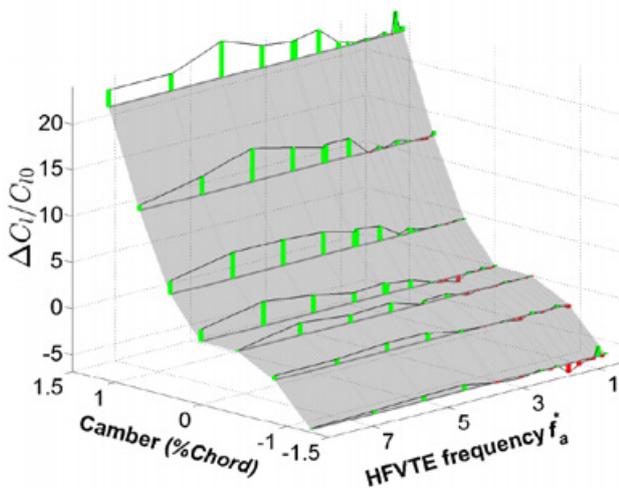


Figure 3. Evolution de la portance en fonction de la cambrure et de la fréquence de vibration, en pourcentage par rapport à une aile sans morphing. La surface grise présente l'effet uniquement de la cambrure (une grande cambrure augmente la portance). Les barres verticales vertes ou rouges représentent l'apport de la vibration du bord de fuite à cambrure donnée

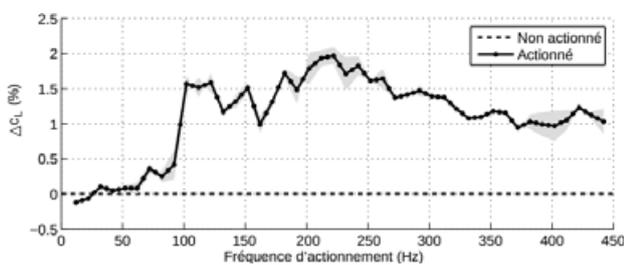


Figure 4. Effet des vibrations de l'actionneur piézoélectrique à amplitude maximale sur la portance en fonction de la fréquence.

Les mesures autour du prototype RS par TRPIV permettent d'étudier finement l'évolution de la dynamique tourbillonnaire autour de l'aile et dans son sillage. La turbulence présente différentes échelles de longueur et de temps avec, en particulier, de grands tourbillons cohérents interagissant avec des tourbillons plus petits et plus rapides. Le *morphing* produit des éclatements des tourbillons cohérents de grande taille (Figure 2b), tout en favorisant d'autres tourbillons plus chaotiques et plus petits qui minimisent l'impact de l'aile sur l'écoulement. Il en résulte un sillage moins épais en raison d'un effet de constriction des zones cisailées par blocage tourbillonnaire. Ce mécanisme de diminution de la largeur du sillage par l'effet *eddy-blocking*, [5,2] et du concept de *shear sheltering*, mis en évidence par simulation numérique [6], est associé à la diminution de la traînée de forme et par feedback de la traînée totale. Ce mécanisme a été matérialisé expérimentalement par l'actionnement piézoélectrique et analysé par simulations numériques, (Figures 5 à 7). Par

ailleurs le changement de la dynamique tourbillonnaire modifie les pics des fréquences dominantes, sources de bruit aérodynamique, ce qui a un impact potentiel sur le bruit de l'avion. Les figures 6 et 7 illustrent la diminution de l'énergie spectrale due au morphing et l'atténuation considérable des pics et les *bumps* des fréquences dominantes associés aux tourbillons cohérents, origine du bruit produit par le bord de fuite.

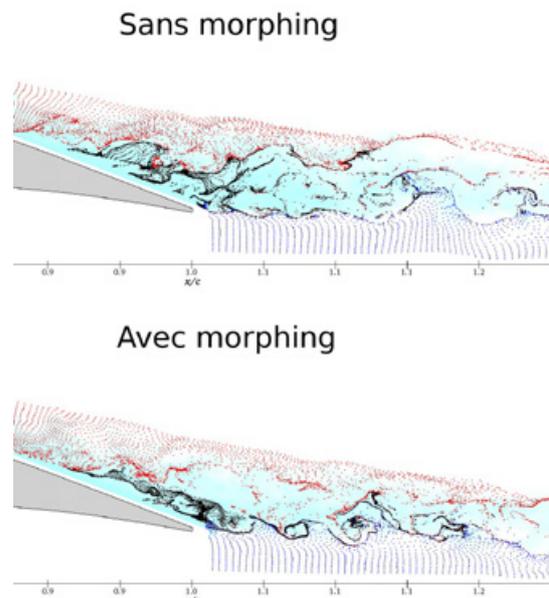


Figure 5. Instantanés de l'écoulement dans le sillage de l'aile obtenus par TRPIV. Des lignes d'émission (particules rouges, noires et bleues) tracent l'écoulement entre les deux zones cisailées.

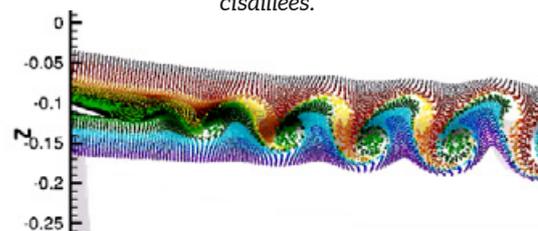


Figure 6. Structure tourbillonnaire autour de la partie arrière de l'aile et du sillage avec vibration à 200 Hz par simulation numérique au nombre de Reynolds de 106, RS prototype.

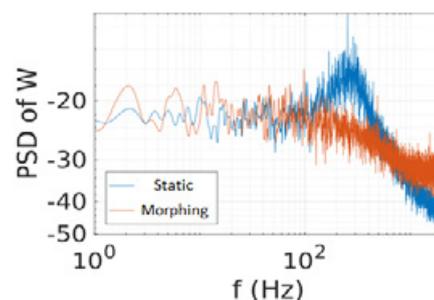


Figure 7. Structure tourbillonnaire avec morphing par vibrations de 300 Hz et réduction des sources du bruit aérodynamique

L'amélioration des performances aérodynamiques est associée par ailleurs à la capacité du morphing à atténuer l'instabilité secondaire le long de l'envergure de l'aile, se manifestant par des ondulations de grande longueur d'onde (voir Figure 8). Celles-ci sont pratiquement supprimées à l'aide de la vibration piézoélectrique de 300 Hz. Ce qui conduit à une suppression des 'jonctions' des allées tourbillonnaires (vue de gauche), appelées dislocations [7], produisant une augmentation des fluctuations de la traînée, avec comme conséquence du morphing une diminution notable de la variance des coefficients aérodynamiques.

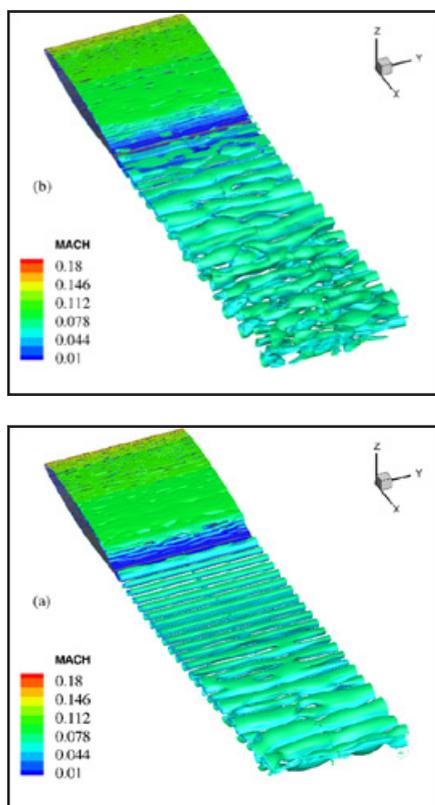


Figure 8. Bi-dimensionnalisation du sillage à l'aide du morphing par actionnements piézoélectrique à 300 Hz

Le passage à l'échelle proche de 1, ciblant une configuration d'aile de type A320 de 2,40 m de corde avec son volet hypersustentateur déformable d'un mètre de corde, a été effectué en levant les verrous associés au changement d'échelle (dimensions, énergie, puissance et efforts aérodynamiques augmentés) (voir Figure 9). En se concentrant d'abord sur le contrôle de cambrure (grandes déformations lentes), un algorithme d'optimisation du dimensionnement a été développé [8], associé à la conception d'une structure de plumes et de peau adéquates pour les articulations mécaniques, (voir Figure 10). La meilleure solution a été choisie et un prototype est en cours d'étude dans le

cadre du projet européen SMS. En ce qui concerne ce LS prototype au sein du projet SMS, le même effet est produit par la vibration et légère déformation des actionneurs vibrants placés en bord de fuite, comme indiqué sur les figures 11 et 12.

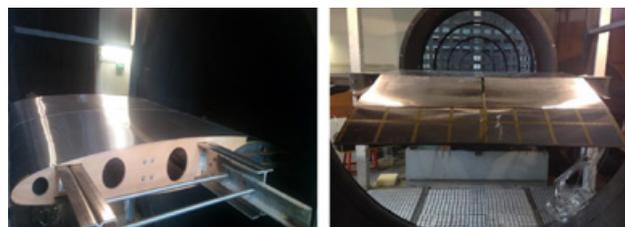


Figure 9. Aile de type A320 (« LS prototype ») et son volet hypersustentateur de corde de 1 m dans la soufflerie S1 de l'IMFT



Figure 10. Zoom de la partie du volet en morphing LS prototype à l'aide des AMF

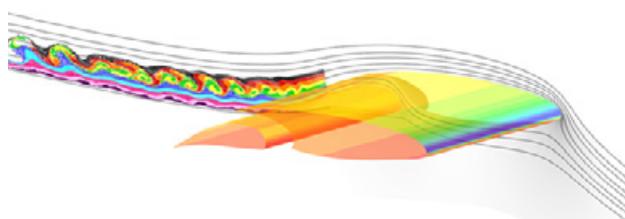


Figure 11. Ecoulement autour de la configuration de l'aile et volet du LS prototype par simulation numérique au nombre de Reynolds de $2,2 \times 10^6$

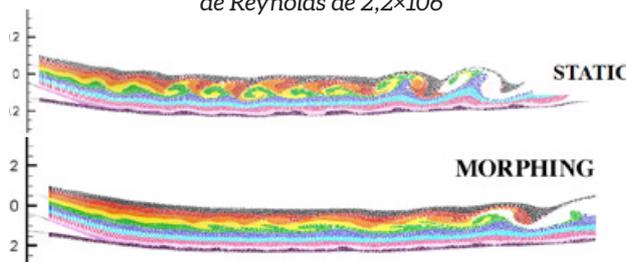


Figure 12. Effets du morphing par vibration optimale des piézoactuateurs à 300 Hz et réduction des sources du bruit aérodynamique - maquette « LS prototype » au nombre de Reynolds de $2,2 \times 10^6$.

En régime de croisière, au nombre de Mach de 0,78, un prototype de taille réduite a été créé, (Figure 13) suite à l'étude numérique autour de l'aile de type A320 avec une région de bord de fuite légèrement déformable et vibrante. Cette étude a permis de déceler des fréquences optimales ainsi que l'augmentation de la finesse aérodynamique (Tableau 1) par une légère déflexion de 2° vers le haut du bord de fuite, associée à l'atténuation considérable du tremblement en régime transsonique [11].

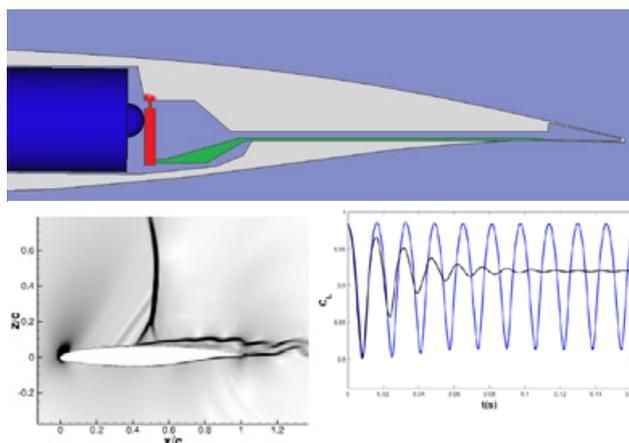


Figure 13. En haut, vue de la région aval du prototype d'aile en régime transsonique. En bas à gauche, Iso-contours de $\text{div}(V)$ illustrant l'interaction choc-couche limite, le tremblement, ainsi que les tourbillons de Kelvin-Helmholz et de Von Kármán ; en bas à droite, coefficient de portance en fonction du temps montrant la suppression de l'instabilité du tremblement à l'aide du morphing. L'ensemble des simulations numériques sont effectuées par le code NSMB, Navier Stokes MultiBlock [12]

Incidence	$\alpha = 1.8$		$\alpha = 5$	
	D	D+F	D	D+F
Type of actuation				
$\frac{(C_l/C_d) - (C_l/C_d)_{\text{static}}}{(C_l/C_d)_{\text{static}}} \times 100$	+10.4%	+4.3%	+2.5%	+0.4%

Tableau 1. Augmentation de la finesse aérodynamique à l'aide du morphing. $Ma = 0,78$, $Re = 2,93 \times 10^6$; D = Déflexion vers le haut de 2° ; F = « Flapping » vibratoire du bord de fuite à la fréquence de 300 Hz.

CONCLUSION

Ces études du morphing électroactif sont prometteuses pour le design des ailes du futur car elles assurent des performances aérodynamiques accrues à toutes les phases de vol et sont économes en énergie tout en allégeant le poids de la structure portante, en comparaison avec les actionnements hydromécaniques utilisés actuellement. Ramenées à l'aile d'un avion, un ordre de grandeur de 500 W serait suffisant pour l'actionnement des piézoactuateurs et environ 4 kW pour l'actionnement des AMF

des volets hypersustentateurs. Les actionnements mis en œuvre sont en accord avec les développements de l'avion plus électrique (<https://www.aerospace-valley.com/agenda/more-electrical-aircraft-mea2019>). Par ailleurs, les concepts du morphing étudiés conduisent simultanément à une réduction considérable des sources du bruit aérodynamique. À l'issue du projet européen SMS, le design d'un volet pour vol réel est envisagé en collaboration entre Airbus Emerging Technologies & Concepts (Toulouse, ETCT) et les deux Instituts partenaires IMFT et LAPLACE.

REMERCIEMENTS

Cette étude est une contribution des : N. Simiriotis, A. Marouf, J.B. Tô, Y. Bmegaptche, Y. Hoarau, J. Scheller, D. Harribey, C. Nadal. Nos remerciements vont aux services de l'IMFT : signaux - images (S. Cazin, M. Marchall) pour les acquisitions PIV, le service COSINUS, (P. Elyakime) pour le post-traitement des données expérimentales sur plateforme parallèle et le service technique (R. Soeparno). Cette thématique a été soutenue par la Fondation STAE, la Commission Européenne pour le financement du projet du H2020 N° 723402 Smart Morphing and Sensing for aeronautical configurations, www.smartwing.org/SMS/EU, la DGA pour l'attribution de deux bourses de thèse, l'ENS - Rennes pour la bourse de G. Jodin. Nos remerciements vont également aux centres de calcul nationaux CINES, CALMIP, IDRIS, TGCC-CEA pour l'attribution des heures de calcul nécessaires aux simulations et au EU-PRACE pour l'allocation des heures du projet « FWING » N° 2017174208.

RÉFÉRENCES

- [1] N. Simiriotis, G. Jodin, A. Marouf, Y. Hoarau, J.F. Rouchon and M. Braza, « Electroactive morphing on a supercritical wing targeting improved aerodynamic performance and flow control in high Reynolds numbers », 53rd International Conference of Applied Aerodynamics, AERO 2018, 26-28 mars, 2018 - Congrès 3AF, Salon de Provence, Prix du meilleur article 3AF.
- [2] G. Jodin, V. Motta, J. Scheller, E. Duhayon, C. Döll, J.F. Rouchon, M. Braza, (2017) « Dynamics of a hybrid morphing wing with active open loop vibrating trailing edge by time-resolved PIV and force measures », Journal of Fluids and Structures, 74, pp. 263-290.
- [3] G. Jodin « Optimisation des performances aérodynamiques d'un volet hypersustentateur de type Airbus A320 par morphing électroactif », thèse de doctorat INPT, oct. 2017. Thèse ayant reçu le Prix de thèse Léopold Escande, INPT et le Prix de thèse de la 3AF.

- [4] M. Chinaud, J.F. Rouchon, E. Duhayon, J. Scheller, S. Cazin, M. Marchal, M. Braza "Trailing-edge dynamics and morphing of a deformable flat plate at high Reynolds number by time-resolved PIV", *J. Fluids and Structures*, 47, pp. 41-54, (2014).
- [5] J. Scheller « Electroactive morphing for the aerodynamic performance improvement of next generation airvehicles », oct. 2015. Thèse ayant reçu le Prix de thèse Léopold Escande, INPT, le Prix de thèse de l'Ecole Doctorale GEET et le prix de la DGA.
- [6] D. Szubert, F. Grossi, A. Jimenez-Garcia, Y. Hoarau, J. Hunt, M. Braza, "Shock-vortex shear-layer interaction in the transonic flow around a supercritical airfoil at high Reynolds number in buffet conditions", *J. Fluids & Structures*, 55, pp. 276-302, (2015).
- [7] M. Braza, D. Faghani, H. Persillon (2001) «The role of natural vortex dislocations in three-dimensional wake transition», *J. Fluid Mechanics*, 439, pp. 1-41.
- [8] G. Jodin, Y. Bmegaptche - Tekap, J.M. Saucray, J.F. Rouchon, M. Triantafyllou, M. Braza, "Optimized design of real-scale A320 morphing high-lift flap with shape memory alloys and innovative skin", *Smart Materials and Structures*, 27, N° 11, 2018.
- [9] J. Scheller, M. Chinaud, J.F. Rouchon, E. Duhayon, S. Cazin, M. Marchal, M. Braza "Trailing-edge dynamics of a morphing NACA0012 aileron at high Reynolds number by time-resolved PIV", *J. Fluids & Structures*, 55, pp. 42-51, (2015).
- [10] J. Scheller, G. Jodin, K.J. Rizzo, E. Duhayon, J.F. Rouchon, M. Triantafyllou, M. Braza, "A Combined Smart-Materials Approach for Next-Generation Airfoils", *Solid-State Phenomena*, 251, pp. 106-112, 2016.
- [11] J.-B. Tô, N. Simiriotis, A. Marouf, D. Szubert, I. Asproulias, D. M. Zilli, Y. Hoarau, J.C.R. Hunt, M. Braza « Effects of vibrating and deformed trailing edge of a morphing supercritical airfoil in transonic regime by numerical simulation at high Reynolds number », *Journal of Fluids & Structures*, 2019, in print, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0889974619300271>
- [12] Y. Hoarau, D. Pena, J. B. Vos, D. Charbonnier, A. Gehri, M. Braza, T. Deloze, E. Laurendeau, « Recent Developments of the Navier Stokes Multi Block (NSMB) CFD solver », in: 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, American Institute of Aeronautics and Astronautics, doi:10.2514/6.2016-2056, <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2016-2056>. ■

AÉRODYNAMIQUE ET HYDRODYNAMIQUE DES RECORDS DE VITESSE À LA VOILE

par Philippe Perrier, membre de la Commission technique Aérodynamique

Une feuille morte tombée sur l'eau est entraînée par le moindre souffle de vent. Il y a presque 10 millénaires que les hommes ont exploité ce phénomène pour imaginer les bateaux à voile. Mais, contrairement à la feuille morte qui ne va que dans le sens du vent, les premiers marins se sont rapidement aperçu qu'avec une voile orientable et une coque allongée, ils pouvaient choisir, dans une certaine mesure, leur direction par rapport au vent. La recherche de la vitesse maximale s'en est rapidement suivie, poussée en particulier par le besoin militaire et la navigation commerciale pour laquelle les délais de transport étaient l'objet d'une compétition féroce. Avec la naissance de la voile sportive, des voiliers se sont spécialisés dans la recherche de vitesse et, en 1972, le WSSRC (*World Sailing Speed Record Council*) a été créé et a défini des règles pour disputer et homologuer un certain nombre de records de vitesse. Le record le plus rapide correspond à une vitesse moyenne sur 500 m. Le premier a été homologué en 1972 par Crossbow à la vitesse moyenne de 26,3kt¹. Les marins utilisent généralement le nœud (kt) comme unité de vitesse : 1 kt = 1,852 km/h. Entre 1986 et 2010 le record a été essentiellement détenu par des planches à voile ou des kitesurf qui lui ont fait franchir le seuil des 50 kt. L'Hydroptère a porté le record à 51kt en 2009 jusqu'à ce qu'il soit pulvérisé par Vestas Sailrocket homologué à 65,45 kt (121 km/h) en 2012 soit un facteur d'environ 2,5 en 40 ans !

Un voilier est essentiellement soumis à 3 forces : son poids et les efforts aérodynamiques et hydrodynamiques (voir Figure 1). Par principe, les efforts aéro et hydrodynamiques ont des points d'application éloignés verticalement. Pour que le bateau soit en équilibre, il est donc nécessaire que les 3 forces convergent et s'équilibrent en un même point, que l'on appellera centre d'efforts.

La plupart des voiliers monocoques sont équilibrés par une quille lestée permettant de créer un couple de redressement entre le poids et la poussée d'Archimède lorsque le bateau gîte (voir Figure 1 à gauche). Mais, dans cette configuration, le rapport entre la force vélique et le poids reste faible, ce qui limite forcément la performance. Les voiliers de vitesse ont donc recherché des architectures qui permettent d'augmenter ce rapport, en commençant par se débarrasser du lest.

Un fort excentrement du centre de gravité par rapport aux efforts hydrodynamiques permet de supprimer le lest et de développer une force vélique bien plus importante par rapport au poids (voir Crossbow sur la figure 1). Pour des planches à voile et des kitesurfs l'essentiel du poids est celui du marin et il se positionne de façon à ce que les efforts aéro et hydrodynamiques convergent pratiquement en son centre de gravité.

L'Hydroptère s'affranchit totalement de la poussée d'Archimède avec un foil sous le vent incliné qui permet de reprendre une poussée vélique du même ordre de grandeur que le poids (voir Figure 2). Vestas Sailrocket a une configuration très particulière : la portance du foil est orientée vers le bas et pratiquement opposée à la force vélique. Cette configuration autorise une force vélique bien plus grande que le poids mais ne peut être stable en enfoncement qu'avec des surfaces portantes en contact avec la surface de l'eau. Ceci le rend très sensible au clapot. Les vibrations étaient telles pendant le record que Paul Larsen, le barreur, n'arrivait pratiquement plus à lire ses instruments de pilotage.

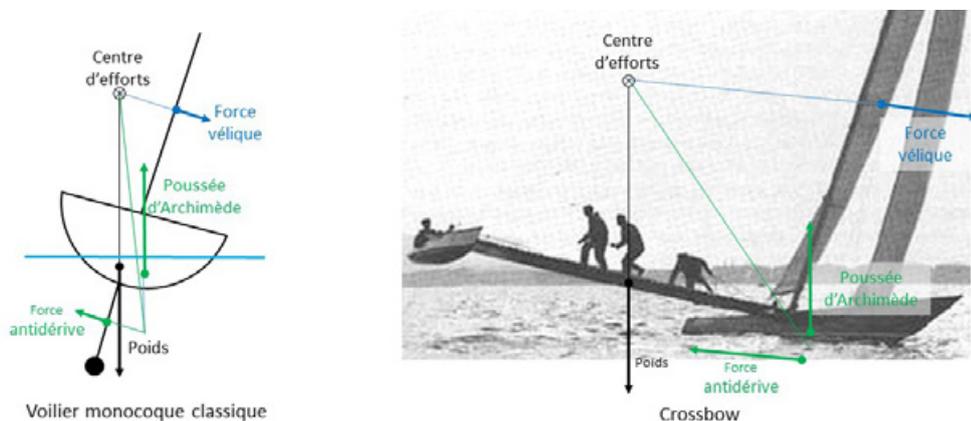


Figure 1. Equilibre en roulis d'un voilier

¹ Le nœud (nd ou kt) est une mesure de vitesse : 1 kt = 1 mille marin/h soit 0,154 m/s

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

AÉRODYNAMIQUE ET HYDRODYNAMIQUE DES RECORDS DE VITESSE À LA VOILE

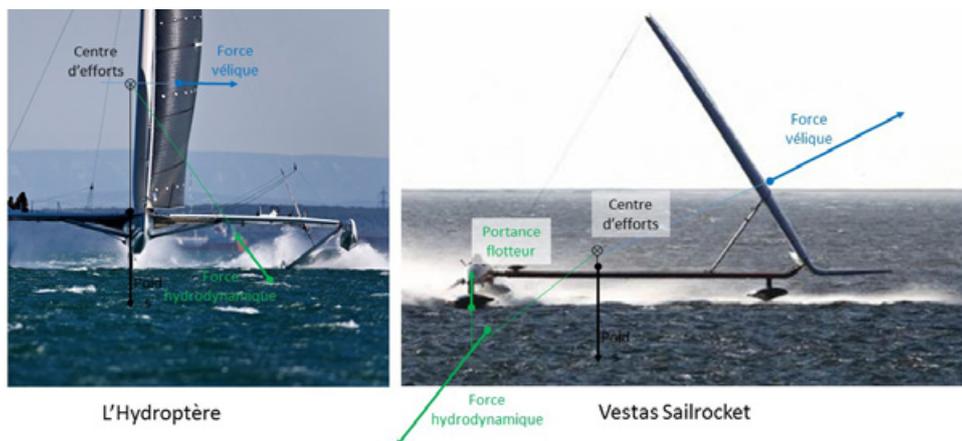


Figure 2. Hydroptère et Vestas Sailrocket

On peut remarquer que l'inclinaison par rapport à la verticale de la résultante des forces hydrodynamiques (flottaison et antidérive) définit directement le rapport entre la poussée aérodynamique et le poids. Les planches à voile, kitesurfs et Vestas Sailrocket profitent également d'une voile inclinée au vent dont la composante verticale de poussée soulage d'autant le poids du bateau avec une faible pénalité sur la composante propulsive horizontale.

Il est aussi intéressant de noter que les records ont été battus dans des conditions de vent très différentes résumées dans le tableau ci-après :

Records de vitesse	Planches et kitesurfs	Hydroptère	Vestas Sailrocket
Vitesse maximale (kt)	55	51	65
Vent réel (kt)	45	30	25
Finesse bateau = Vitesse/Vent réel	1,2	1,7	2,6

Les planches à voile et kitesurfs vont légèrement plus vite que le vent. L'Hydroptère pouvait aller à presque 2 fois la vitesse du vent malgré une voile conçue pour les traversées océaniques et non pour un record de vitesse absolue. Vestas Sailrocket n'avait que 25 kt de vent pour son record à 65 kt ; ce qui lui a permis de profiter d'un état de la mer (clapot) encore compatible avec la vitesse de l'engin.

On constate donc que la force de vent nécessaire pour le record est un paramètre critique principalement par l'état de mer associé. Les petits engins comme les planches à voile et les kitesurf ont pu détenir les records de vitesse pendant plus de 20 ans en navigant sur des canaux étroits bien orientés par rapport à un vent dominant régulier pouvant atteindre 40 ou 50 kt sans lever de clapot. Le premier canal a été creusé spécialement aux Saintes-Maries-de-la-Mer, mais c'est maintenant sur la côte namibienne (Luderitz) que se déroulent la plupart des

tentatives de record. Au-delà de 50 kt, le problème n'est plus l'engin mais la capacité du marin à tenir debout sur la plage ! L'Hydroptère, par la grande profondeur de ses foils pouvait supporter un clapot beaucoup plus important et Vestas Sailrocket était à la limite du clapot supportable malgré un vent très modéré. Une voie d'amélioration du record consiste donc à améliorer la vitesse du bateau sans augmenter, et si possible en réduisant, la force de vent nécessaire.

La figure 3 illustre les composantes horizontales des efforts qui équilibrent le déplacement d'un voilier.

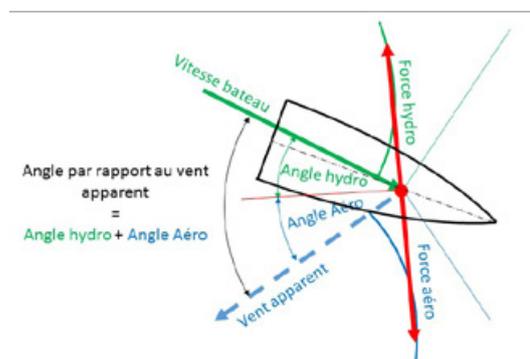


Figure 3. Efforts équilibrant le déplacement d'un voilier

Les deux flèches rouges opposées représentent respectivement les efforts aérodynamiques et hydrodynamiques qui sont égaux et de sens opposés lorsque le bateau est en navigation à vitesse et cap constants. La courbe bleue représente la polaire aérodynamique et l'« angle aéro » représente l'angle entre la perpendiculaire à l'effort aéro et le vent apparent. En analogie aéronautique, cet angle serait la pente de descente d'un planeur qui aurait la même polaire aérodynamique. La courbe verte est l'équivalent pour la partie hydrodynamique. On voit sur la figure 3 que l'angle que fait la direction de déplacement du bateau avec la direction du vent apparent est la somme exacte des angles aéro et hydro. Mais il est important de noter

que le vent que reçoivent les voiles est le vent « apparent » c'est-à-dire la combinaison des vitesses du vent réel (par rapport à l'eau immobile) et du bateau. Cette combinaison est illustrée sur le schéma de la figure 4.

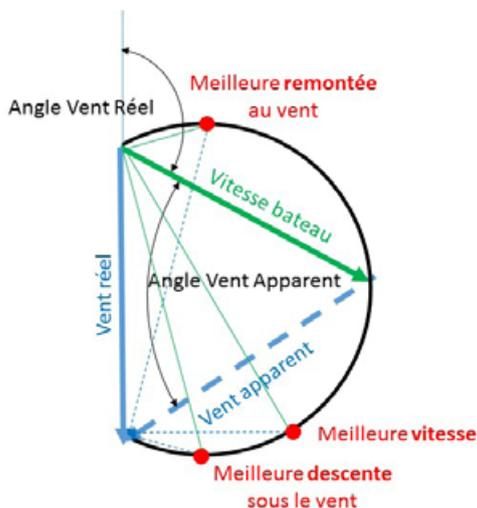


Figure 4. Combinaison des vitesses du vent réel (par rapport à l'eau immobile) et du bateau.

On peut voir que le vent apparent peut être très différent du vent réel et que l'angle par rapport au vent réel est toujours supérieur à l'angle de vent apparent. Sur ce schéma, l'angle de vent apparent est nettement inférieur à 90° alors que l'angle de vent réel est nettement supérieur. On peut aussi voir que, dans cette configuration, la vitesse du bateau est presque égale à celle du vent réel. L'arc noir passant par les extrémités des vecteurs vent réel et vitesse bateau est l'arc capable correspondant à toutes les combinaisons de vitesses pour lesquelles l'angle de vent apparent reste constant. Ce type de schéma représentant l'ensemble des vecteurs-vitesse du bateau par rapport au vent réel est appelé « polaire du voilier ». Le schéma présente quelques points remarquables (points rouges) très importants pour la navigation à voile avec les vecteurs-vitesse et vent apparent représentés en traits fins :

- Le point de meilleure remontée au vent (dit « près serré ») est celui pour lequel la composante de la vitesse du bateau sur le vent réel est la plus négative. Il est facile de comprendre que si l'angle de vent apparent est supérieur à 90°, le bateau ne peut pas remonter au vent. Ainsi, même avec une voile de très bonne finesse (angle aéro très faible), si la coque n'a aucune composante de portance (angle hydro = 90°), le bateau ne peut jamais remonter au vent. C'était pratiquement le cas pour les premiers voiliers jusqu'à ce que les marins inventent la « dérive », véritable aile sous-marine profonde qui améliore considérablement la finesse hydrodynamique. On peut aussi noter, pour ce point de fonctionnement, que la vitesse du bateau est très faible par rapport à celle du vent apparent et du vent réel.

- Le point de meilleure vitesse (dit « au largue ») est obtenu lorsque la vitesse est un diamètre de l'arc capable. Dans ce cas les trois vecteurs forment un triangle rectangle dont la vitesse du bateau est l'hypoténuse. Cependant, sur un voilier classique, la résistance à l'avancement augmente très fortement avec la vitesse et, avec elle, l'angle hydro. Associé à la diminution du vent apparent, donc de la puissance propulsive, ceci fait qu'aucun voilier « archimédien » classique ne peut atteindre cette situation. Mais c'est exactement le point qui nous intéresse pour les records de vitesse. Nous y reviendrons donc en détail.
- Le point de meilleure descente au vent (dit « grand largue ») est exactement l'opposé du point de meilleure remontée et permet, théoriquement, de descendre sous le vent plus vite que le vent lui-même. Pour les mêmes raisons qu'au « largue », les bateaux classiques ne peuvent pas atteindre cette performance. Mais tous les multicoques et même certains monocoques modernes ont des finesesses hydros suffisantes, même à grande vitesse, et « tirent des bords » au « portant », ce qui leur permet de descendre plus vite que s'ils étaient plein vent arrière et même plus vite que le vent !

Si l'on se concentre sur le point de vitesse maximale, on peut voir sur le schéma de la figure 4 que le rapport entre la vitesse du bateau et celle du vent réel, rapport que l'on peut appeler « finesse bateau », ne dépend que de l'angle de vent apparent :

$$\frac{\text{Vent Réel}}{\text{Vitesse bateau}} = \sin(\text{Angle Vent Apparent}) = \sin(\text{Angle Aéro} + \text{Angle Hydro})$$

Lorsque l'angle de vent apparent devient assez faible la « finesse bateau » peut aussi s'écrire sous la forme :

$$\frac{1}{\text{Finesse bateau}} = \frac{1}{\text{Finesse Aéro}} + \frac{1}{\text{Finesse Hydro}}$$

Par exemple, un bateau qui aurait des finesesses aéro et hydro de 4 peut aller à 2 fois la vitesse du vent réel. Il est donc évident que c'est l'augmentation des finesesses aéro et hydro qui permet d'augmenter la vitesse du bateau pour une même force de vent. Un gros avantage de cette approche est que si l'on peut aller vite avec moins de vent, il est beaucoup plus facile de trouver des lieux et des périodes présentant les meilleures conditions pour le record. On peut aussi noter que, dans ces conditions, le bateau crée son propre vent :

$$\text{Vent apparent} = \frac{\text{Vent Réel}}{\tan(\text{Angle Vent Apparent})}$$

Pour une finesse bateau de 2, le vent apparent est 1.7 fois supérieur au vent réel.

De ce point de vue, il est intéressant de comparer les finesesses des différents engins de record sur les graphiques de la figure 5. À noter cependant que seules les vitesses

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES AÉRODYNAMIQUE ET HYDRODYNAMIQUE DES RECORDS DE VITESSE À LA VOILE

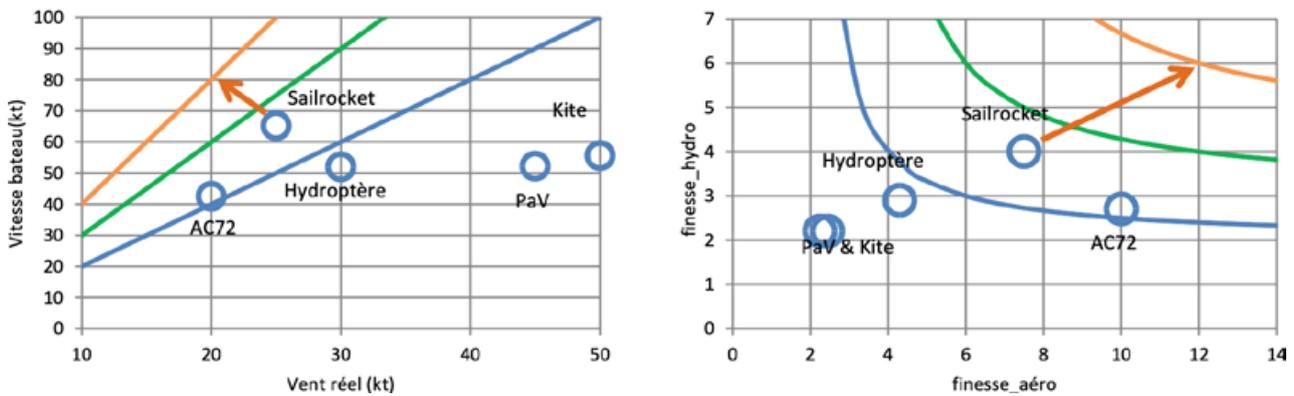


Figure 5. Comparaison des finesses des différents engins de record

des bateaux sont « officielles ». Les vitesses de vent réel et les finesses aéro et hydro sont des estimations de l'auteur à partir des conditions du record et de l'architecture des bateaux.

Les courbes bleu, verte et orange sur les deux graphiques de la figure 5 représentent des iso-finesse bateau avec des valeurs respectives de 2, 3 et 4. Les planches à voile et les kitesurf ont des finesses aéro et hydro assez faibles mais ont détenu le record en étant capables de faire des tentatives par vent très fort sur des canaux sans aucun clapot. L'Hydroptère a pu battre ce record, pour lequel il n'avait pas été conçu, grâce à ses foils ayant une bonne finesse et une voile meilleure que celle d'une planche mais cependant peu optimisée pour ce type de record. La grande taille des foils de l'Hydroptère lui a permis d'atteindre 51 kt sur un plan d'eau peu abrité avec 30 kt de vent et presque 1 mètre de clapot. Vestas Sailrocket a considérablement amélioré les finesses aussi bien aéro que hydro pour atteindre 2,5 fois la vitesse du vent. On a aussi porté sur ces graphiques un AC72, jauge des multicoques à foils qui ont disputé la Coupe de l'America en 2013 et 2017. Grâce à un gréement et des foils très sophistiqués, ces catamarans sont capables de « voler » à 2 fois la vitesse du vent.

La flèche orange indique une voie de conception d'un nouvel engin qui pourrait porter le record jusqu'à 80 kt avec un vent de seulement 20 kt. Dans ces conditions, les voiles reçoivent un vent apparent de 77 kt. Cette voie consiste à améliorer les finesses aéro et hydro pour atteindre une finesse du bateau de 4.

L'amélioration de la finesse aéro par rapport à celles de Sailrocket ou d'un AC72 semble tout à fait accessible avec une aile rigide de grand allongement et un profil optimisé pour les conditions du bord choisi. La plupart des avions commerciaux ont des finesses de l'ordre de 20 et certains planeurs ont des finesses de 60 !

Cependant certains éléments de l'engin (haubans) peuvent avoir un fardage qui n'existe pas sur ces aéronefs. Une finesse de 12 est donc certainement accessible. Dans ces conditions il suffit d'obtenir une finesse hydro au moins égale à 6 ($1/4 = 1/12 + 1/6$) pour pouvoir naviguer à 4 fois la vitesse du vent. L'angle du vent apparent est alors seulement de 15°.

En fait l'hydrodynamique pour des vitesses supérieures à 50 kt est soumise aux phénomènes de cavitation (l'eau se vaporise sur toutes les parties en dépression) et de ventilation (l'air envahit les parties en dépression). Dans ces conditions, les caractéristiques d'un profil d'aile sont très fortement affectées : la courbe de portance chute dans un rapport jusqu'à 2 (il n'y a plus que l'intrados qui permet d'augmenter la portance) et la traînée augmente du fait du culot de vapeur d'eau qui se crée. On doit alors utiliser des profils de type « supercavitant » comme illustré Figure 6.

Même en bidimensionnel, les finesses maximales de tels profils sont généralement inférieures à 10 et sont obtenues pour de faibles coefficients de portance. Compte tenu du fait qu'il faut aussi assurer une composante verticale de portance hydrodynamique, une finesse globale de 6 est sans doute accessible mais reste ambitieuse.

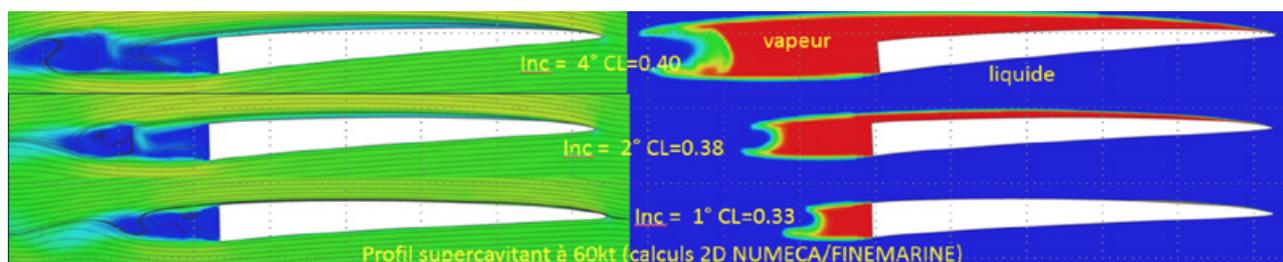


Figure 6. Profils supercavitants

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

AÉRODYNAMIQUE ET HYDRODYNAMIQUE DES RECORDS DE VITESSE À LA VOILE

Pour réduire la sensibilité au clapot et préserver la finesse hydro, il est souhaitable d'éliminer toute surface hydrodynamique autre que le foil lui-même dans les conditions du record. Ceci exclue une configuration du type de Sailrocket qui implique au moins une surface planante pour assurer la stabilité d'enfoncement. Le foil doit donc être porteur. Ceci conduit à une architecture du type de la figure 7.

Connaissant les polaires du foil et de l'aile, il est facile de calculer leurs dimensions en fonction des vitesses du bateau (80 kt) et du vent apparent (77 kt). Le choix de leurs inclinaisons respectives définit la position du centre de gravité et le dimensionnement général de l'engin. Il reste cependant au moins deux problèmes capitaux à traiter : l'engin doit pouvoir accélérer par lui-même depuis l'arrêt et il doit être pilotable par un humain.

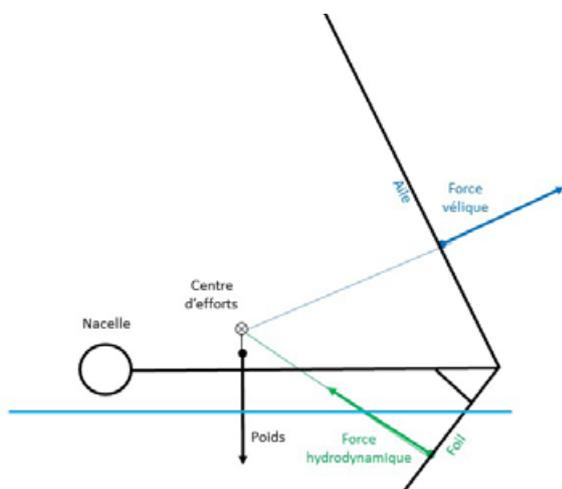


Figure 7. Architecture avec foil porteur

La flottabilité de l'engin à l'arrêt ne peut être assurée que par la poussée d'Archimède, ce qui suppose les volumes de flottaison correspondants. Or, lors de l'accélération, ces volumes créent une traînée importante avant que les efforts conjugués du foil et de l'aile ne leur permettent d'être totalement émergés. Heureusement, au début de l'accélération, l'angle de vent apparent peut être important et l'aile peut être orientée pour fonctionner à une incidence proche de sa portance maximale. Même si la vitesse du vent apparent n'est pas aussi forte qu'à la vitesse du record, il est ainsi possible de passer la bosse de traînée correspondant aux volumes de flottaison.

La stabilité et la pilotabilité de l'engin sont aussi des aspects critiques comme le montre la fin de la première tentative de record de Sailrocket (voir Figure 8).



Figure 8. Fin de la première tentative de record de Sailrocket

En roulis on considère que l'équilibre doit pouvoir être assuré par le barreur, comme c'est le cas sur de nombreux voiliers de compétition. Pour cela il doit avoir à sa disposition une gouverne qui peut être, par exemple, un aileron de bord de fuite placé en extrémité de l'aile. Cette gouverne doit lui permettre de maintenir la nacelle émergée pendant le run du record. L'axe de tangage doit avoir une stabilité naturelle, ce qui implique d'en déterminer le foyer (de même que pour le lacet) et de placer le centre de gravité en avant de celui-ci, comme pour un avion ! Cependant l'accélération au départ crée un fort moment à piquer qui impose une limite avant au centre de gravité. Ceci dimensionne donc un plan horizontal stabilisateur. Le contrôle en lacet nécessite une surface de contrôle verticale comme une dérive. Celle-ci pourrait être aérodynamique ou hydrodynamique. Comme on a vu que la finesse hydro est la plus difficile à obtenir, on préférera une dérive aérienne qui a, de plus, l'avantage d'être efficace même lorsque l'engin est à l'arrêt, avec le seul vent réel.

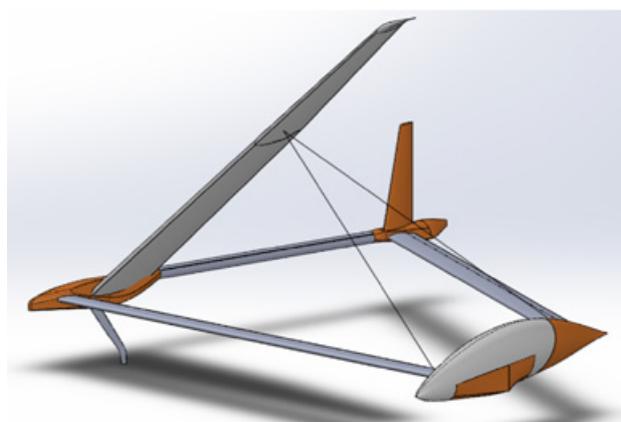


Figure 9. Projet pour un nouvel engin de record

La figure 9 illustre ce que pourrait être un tel engin avec une aile solide à grand allongement, une nacelle fermée et carénée pour l'équipage et des bras de liaison et haubans créant une structure triangulée, rigide et bien carénée. Cet engin aurait des dimensions comparables à celles de Sailrocket mais un poids plus faible puisque les efforts sont moins importants. La portance hydrodynamique assurée par le seul foil lui assure une bonne tolérance au clapot qui sera d'autant moins marqué que le vent nécessaire sera faible. ■

LA TRANSFORMATION DIGITALE AU SEIN DES OPÉRATIONS AÉRIENNES ET ANTI-MISSILE IAMD : DES CLUSTERS DE SYSTÈMES D'ARMES CAMÉLÉONS

par Luc Dini, Directeur IAMD, Responsable Ligne Produit AMDS chez THALES, Co chair Conférence IAMD 3AF

Présent depuis 50 ans dans la défense aérienne, Thales conduit une transformation digitale en profondeur, dans sa culture et pour ses clients, afin de faire face aux défis tels que les menaces nouvelles et l'intégration des technologies de rupture.

L'un des défis majeurs pour les nations est de garantir l'intégrité et la sécurité de l'espace aérien, pilier de souveraineté, dont l'activité évolue rapidement tout comme les menaces (drones, missiles balistiques, hypersoniques...).

Fortes de leur expertise en sécurité de l'espace aérien, des opérations aériennes pour la protection du territoire et les OPEX, les équipes de Thales travaillent étroitement avec les forces armées. Elles partagent les doctrines, les concepts et la transformation numérique pour définir, fournir et soutenir les systèmes les plus efficaces et intégrés contre les menaces aériennes.

Thales a été précurseur pour passer de la coordination des engagements anti aériens en phonie, à la coordination en temps réel par liaison de données tactiques et réseau

radio, substituant aussi aux modes radar ou infrarouge séparés, la fusion de données multimodes avec des réseaux neuronaux.

Présent depuis 50 ans dans la défense aérienne, Thales conduit une transformation digitale en profondeur, dans sa culture et pour ses clients, afin de faire face aux défis tels que les menaces nouvelles (voir Figure 1) et l'intégration des technologies de rupture.

Les Forces bénéficient de l'accès aux données en temps réel - même dans des zones reculées - pour disposer d'une situation améliorée et de réseaux résilients reliant senseurs, armes, centre et données fusionnées en toutes conditions.

Les chaînes des opérations aériennes de l'OTAN disposent d'équipements dotés d'une plus grande autonomie pour accroître la réactivité de décision tactique au coeur des C4I Air. Thales a un rôle de leader pour livrer des solutions de systèmes datacentric pour la cyber défense et la détection en réseau autour de la planète, en

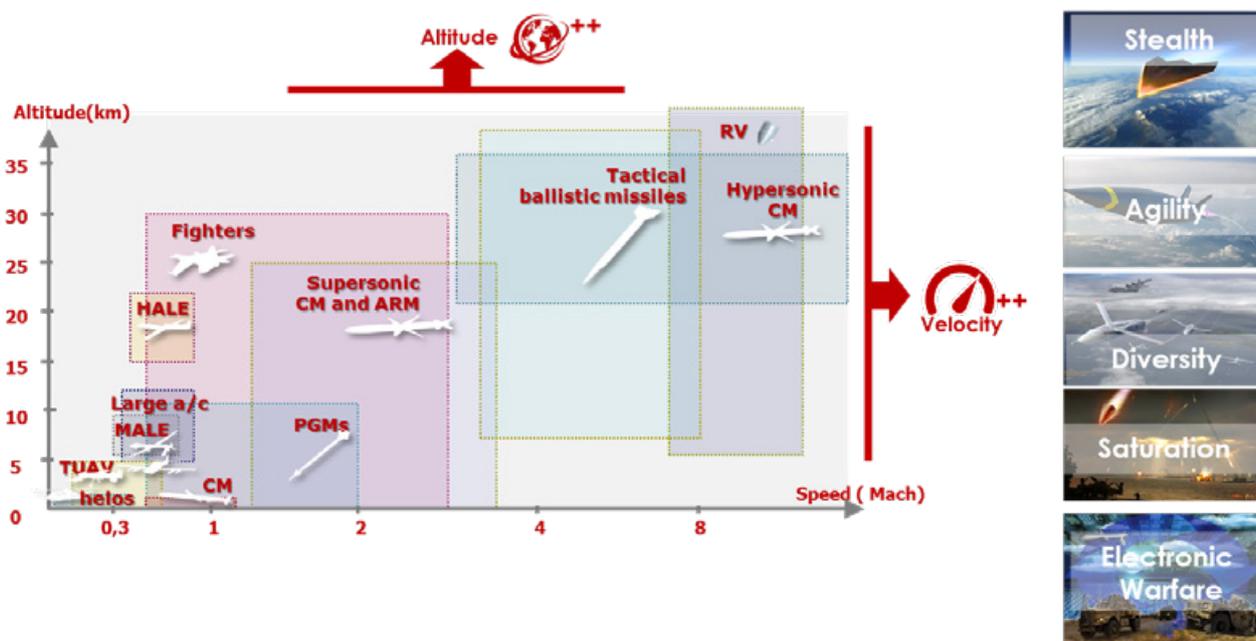


Figure 1. Menaces : les menaces aériennes et missiles évoluent dans le domaine vitesse de la basse vitesse à l'hypersonique, de la très basse altitude en exploitant les masques de terrain jusqu'à la haute altitude au-dessus des défenses classiques. Ces menaces posent des problèmes nouveaux par la conjugaison des effets de diversité (cinématique et type), de furtivité, d'agilité, de saturation et de guerre électronique. Ces effets divers et conjugués nécessitent la recherche de solutions de défense innovantes, très réactives et adaptatives à l'environnement tactique.

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

LA TRANSFORMATION DIGITALE AU SEIN DES OPÉRATIONS AÉRIENNES ET ANTI-MISSILE IAMD : DES CLUSTERS DE SYSTÈMES D'ARMES CAMÉLÉONS

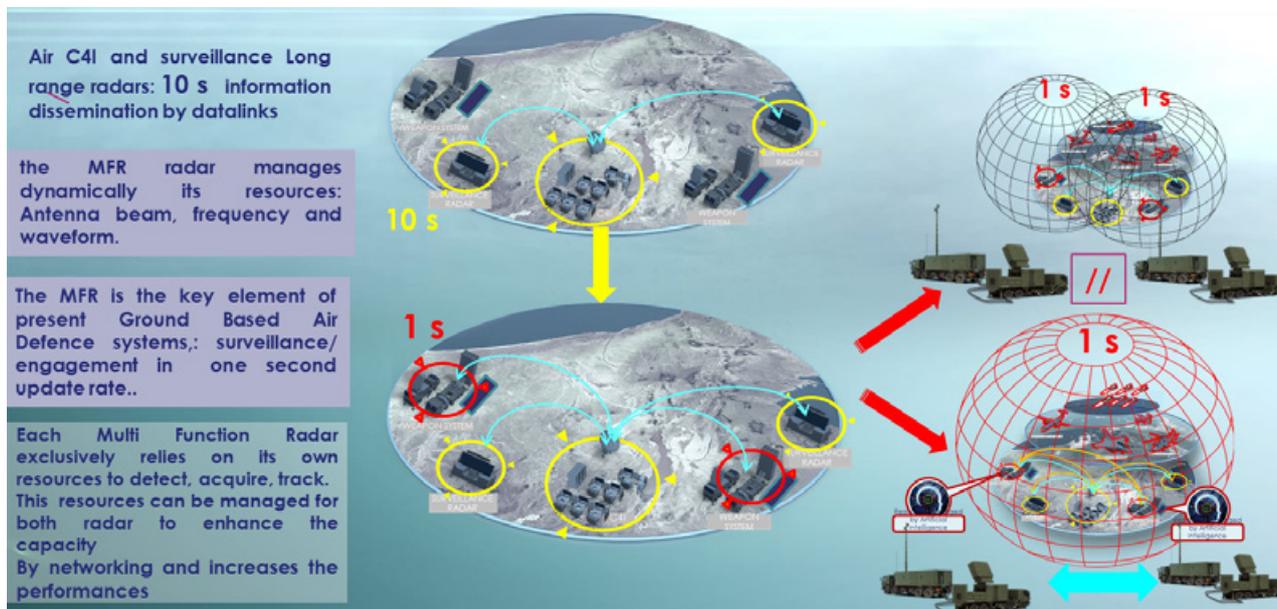


Figure 2. FCNet: Fire Control Network

s'appuyant sur les technologies du big data, de la connectivité, de l'Intelligence Artificielle et de la Cyber-sécurité.

L'un des programmes majeurs est l'ACCS, système de Commandement et de Conduite des opérations aériennes de l'OTAN, développé par Thales et Raytheon. Il couvre les populations et territoires de l'OTAN contre les menaces aériennes et balistiques. Sa version antimissile initiale (TMD1) a été déclarée opérationnelle au sommet de Chicago (2012) puis confirmée à Varsovie en 2016.

Thales, renforcée par l'arrivée de Gemalto, prépare avec ses partenaires, la révolution de la connectivité (smart nodes) avec des systèmes plus nombreux pour créer des situations tactiques beaucoup plus avancées pour le combat collaboratif, en collectant et disséminant les données dans des clouds connectés et cyber résilients. Ce sont les défis futurs de l'AFSC mais aussi du SCAF auxquels nous nous préparons.

Grâce à l'évolution de la connectivité à fort débit et faible latence, de l'IA dans la gestion des systèmes complexes, et des radars numériques¹, Thales développe le FCNet (Fire Control Network), pour l'intégration dynamique en réseau (Figure 2) des systèmes IAMD et surface anti-aériens. Basé sur l'interaction entre les C2 de conduite de tir, les radars multifonctions comme le GF300 de Thales (Figures 3 et 4) applicable au SAMP/T NG, et les systèmes d'armes, le FCNet opère une gestion dynamique et intelligente des données et des ressources partagées sur le réseau, en moins d'une seconde. Les systèmes optimisent en temps réel leur gestion de tâches



Figure 3. Radar GF300 - © Thales

comme un « meta radar » au sein de clusters (Figure 5) qui assurent la détection, la poursuite, l'identification et les engagements en sécurité, face aux menaces multiples. Ces clusters peuvent interagir avec le FCNet et adapter leurs modes tactiques, partager leurs données et ressources en fonction de leur environnement tactique, tout comme les caméléons s'adaptent instantanément à leur environnement en changeant de couleur (Figures 6 et 7). Ils peuvent ainsi anticiper et réagir à la menace en concentrant leurs ressources sur des cibles hautement manoeuvrantes ou hypervéloces, les distribuer pour éviter les effets de saturation, les masques ou le brouillage, en garantissant les engagements multiples dans les conditions les plus difficiles. Ces modes connectés FCnet permettent de re créer le dilemme pour l'attaque et de modifier l'équilibre des Forces.

¹ <https://www.3af.fr/article/ceas/ceas-june-2017>

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES
LA TRANSFORMATION DIGITALE AU SEIN DES OPÉRATIONS AÉRIENNES ET ANTI-MISSILE IAMD : DES CLUSTERS DE SYSTÈMES D'ARMES CAMÉLÉONS

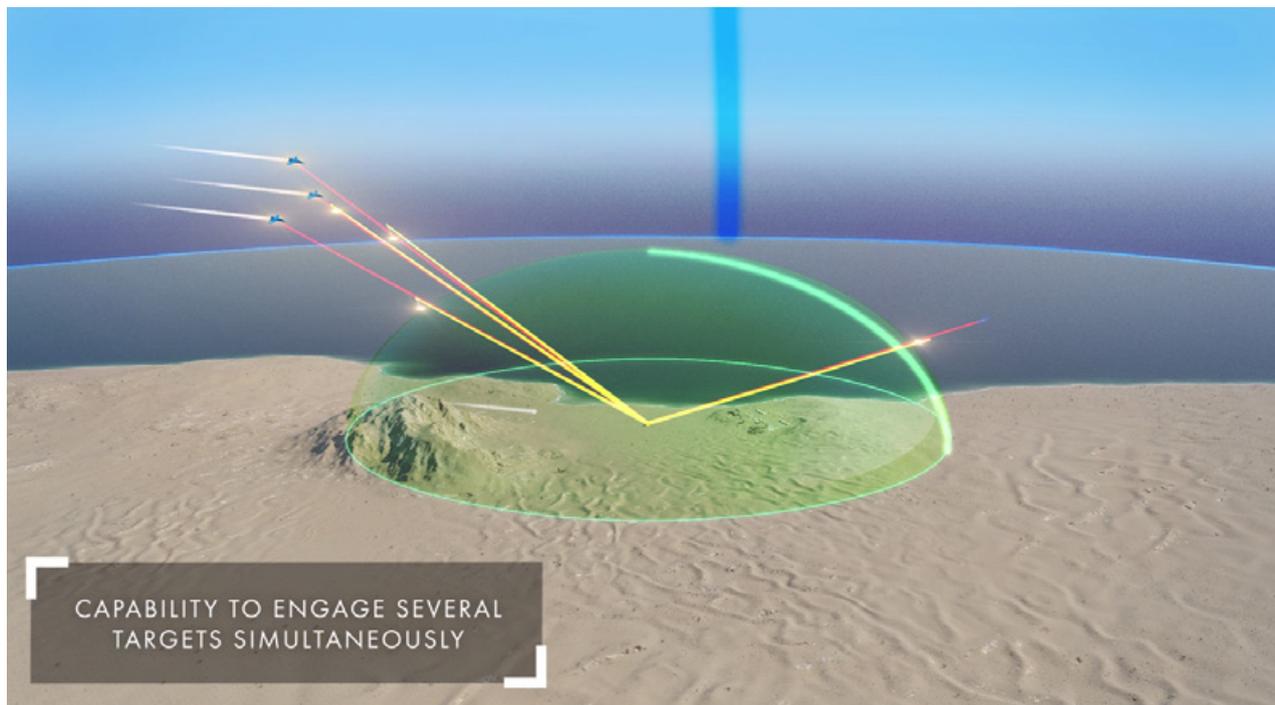


Figure 4. Le Radar GF300 est un radar Multifonction (MFR) IAMD permettant de faire simultanément de la veille à longue distance (ligne bleue), à courte distance (ligne verte) et des engagements multiples sur 360° en azimut et jusqu'à 90° en site.

Le groupe d'étude NIAG SG217 de l'OTAN étudie ces Fire Control Networks IAMD et les standards associés : 11 pays, 25 sociétés transatlantiques y participent, dont 22 européennes incluant cinq françaises. Le SG217 est présidé par Thales et a rendu les conclusions du rapport de phase 2 à l'OTAN qui ont été présentées à la CDNA² récemment.

Le concept des clusters caméléons relié par réseau FCNet ou dynamique peut être ainsi appliqué à des combinaisons de systèmes IAMD européens composites ou à d'autres systèmes européens et transatlantiques. Ils peuvent mettre en commun des moyens partagés et interactifs pour accomplir une mission, dès lors que les mêmes

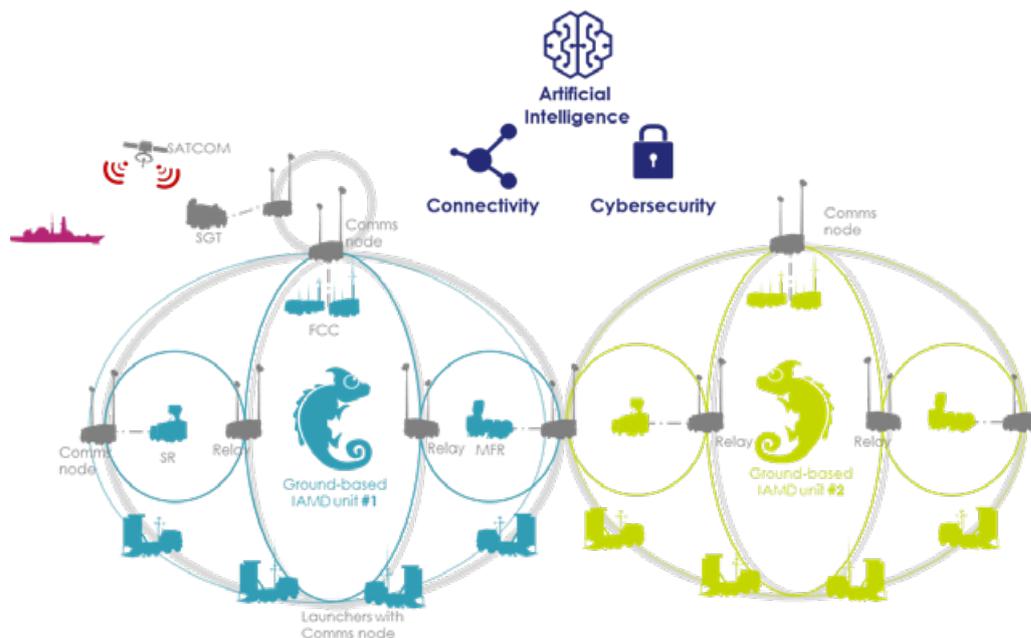


Figure 5. Le FCNet permet d'échanger les données et ressources en temps réel entre les clusters de systèmes d'armes

² CDNA: Conférence des Directeurs Nationaux d'Armement de l'OTAN

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

LA TRANSFORMATION DIGITALE AU SEIN DES OPÉRATIONS AÉRIENNES ET ANTI-MISSILE IAMD : DES CLUSTERS DE SYSTÈMES D'ARMES CAMÉLÉONS

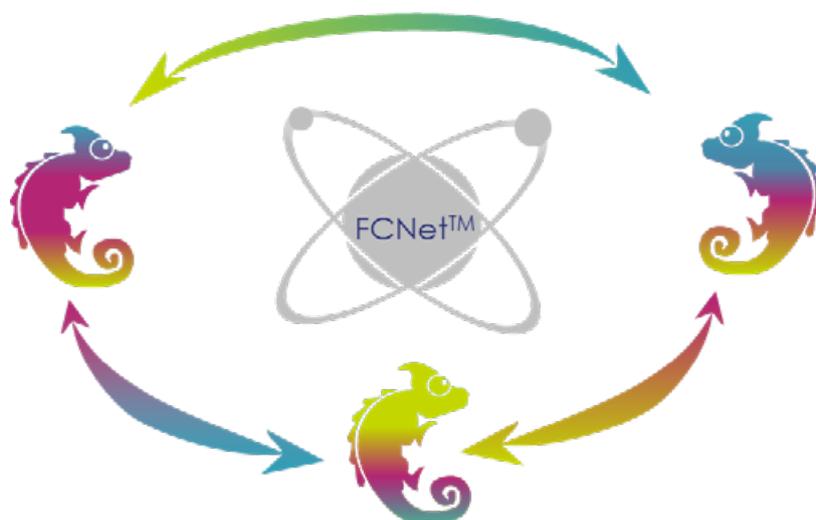


Figure 6. Grâce au FCNet, les clusters échangent leurs données et ressources, harmonisent leurs modes tactiques comme des caméléons pourraient échanger leurs couleurs pour s'adapter à leur environnement en moins de 1s

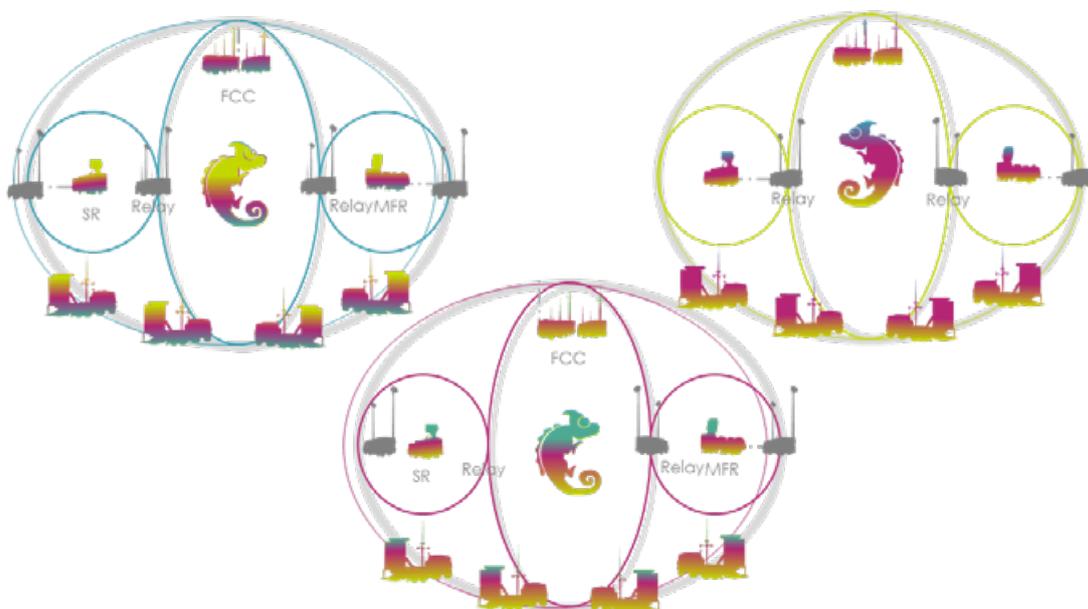


Figure 7. Les clusters de systèmes d'armes IAMD peuvent ainsi jouer entre eux des variations de modes tactiques imprévisibles vues de l'attaque, renforcer leur résilience et leur réactivité, en changeant en moins d'une seconde leurs modes d'actions (effet caméléon) de façon concertée.

standards et types de modes tactiques sont partagés, même si les technologies diffèrent. Le combat connecté par FCNet devient alors un mode de combat en coalition, temps réel, flexible et adaptable aux missions (autonome dans un cas, en mode intégré pour d'autres), extensible à différents domaines, y compris aux plateformes navales

et aériennes participant aux engagements IAMD, où la diversité des systèmes et des technologies, et leur hyper adaptivité en un instant (subseconde), renforceront ainsi les performances, la résilience et la complémentarité des systèmes européens et transatlantiques. ■

ISL, 60 ANS DE RECHERCHES POUR LA DÉFENSE ET LA SÉCURITÉ

par Patrick Gnemmi, ISL, membre de la Commission technique Aérodynamique

À la fin de la Seconde Guerre mondiale, un groupe de chercheurs allemands, sous la direction française, a formé le premier noyau du futur institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis.

DE L'ORIGINE À NOS JOURS

LA « TECHNISCHE AKADEMIE » DE L'ARMÉE DE L'AIR ALLEMANDE

C'est dès la fin de la Seconde Guerre mondiale que des chercheurs ont commencé à travailler à Saint-Louis, très exactement début août 1945.

Ces chercheurs étaient tous de nationalité allemande et étaient, dans leur majorité, affectés auparavant à la Technische Akademie de l'Armée de l'air à Berlin Gatow.

La Technische Akademie avait initialement pour mission de former des officiers de l'Armée de l'air sur le plan technique. Toutefois, pendant la guerre, elle fut aussi chargée de travaux de recherches importants. Un des personnages éminents était notamment le Professeur H. Schardin, directeur de l'Institut de Balistique de la Technische Akademie ; le champ d'activités de cet institut allait au-delà de la balistique proprement dite, en recouvrant également l'ensemble des phénomènes dynamiques de la mécanique et de la chimie des explosifs, y compris les méthodes métrologiques nécessaires pour analyser ces phénomènes.

Le 15 février 1945, la Technische Akademie reçut l'ordre de se replier avec son personnel sur Blankenburg en Thuringe. Par mesure de prudence, le professeur Schardin avait déjà fait préparer en 1943 un lieu de repli provisoire à Schussenried (Wurtemberg) d'abord et, dans un cadre plus élargi, à Biberach (Wurtemberg), où il s'était tout de suite lancé dans la mise en place d'un laboratoire de recherches.

LA FIN DE LA GUERRE ET LES PREMIERS CONTACTS AVEC LES AUTORITÉS FRANÇAISES

Le 23 avril 1945, les troupes françaises occupèrent Schussenried et Biberach sans rencontrer de résistance. Dès le lendemain, le laboratoire reçut une visite qui devait s'avérer importante pour son avenir, en la personne du commandant Lutz, officier de la 1^{ère} Division Blindée. À la suite du compte rendu fait par le commandant Lutz sur la découverte qu'il venait de faire, les services alliés commencèrent à manifester leur intérêt pour le laboratoire. Une nouvelle visite décisive eut lieu le 29 mai 1945, par le

colonel Lhomme (Direction des Études et Fabrications d'Armement) et le capitaine Fayolle (Laboratoire Central de l'Armement).



Colonel Lhomme

Le capitaine Fayolle eut l'idée de placer le laboratoire du professeur Schardin sous le contrôle du Laboratoire Central de l'Armement. Il proposa pour ce faire au professeur Schardin de venir à Paris avec son personnel et son matériel. Le professeur Schardin fut enthousiasmé à l'idée de pouvoir travailler à Paris, mais son enthousiasme ne fut pas partagé par tout le monde : d'une part, une installation à Paris eût entraîné une séparation prolongée des familles, d'autre part, des réticences apparurent peu à peu dans les services français quant à l'installation du laboratoire à Paris si peu de temps après la fin des hostilités.

DE BIBERACH À SAINT-LOUIS

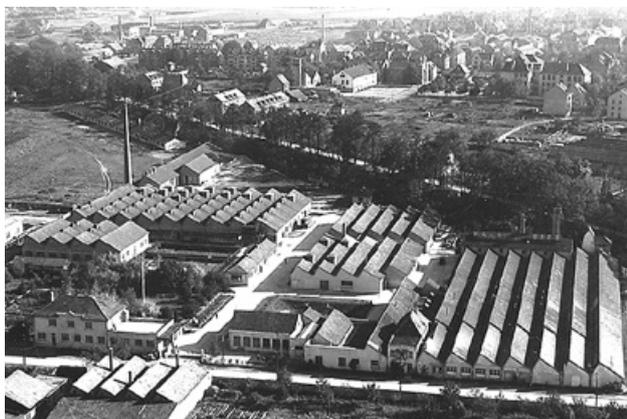
L'idée retenue dès lors début juillet 1945 fut de favoriser une installation sur le sol allemand à proximité de la frontière, afin de concilier les préoccupations familiales des chercheurs et le pilotage par la France des travaux de recherche effectués à son bénéfice exclusif.

Parmi les différents endroits proposés, il y eut entre autres Oberndorf, siège des usines Mauser, avec des installations particulièrement bien adaptées aux études de balistique ; mais c'est finalement la région de Saint-Louis/Weil am Rhein qui retint la préférence, en raison des conditions de vie dans la région des trois frontières et de la disponibilité de locaux à Saint-Louis, avec les bâtiments de l'usine d'alliages légers Gmöhling.

Le professeur Schardin et ses collègues eurent ainsi la possibilité de travailler en France et de résider en Allemagne et constituèrent ainsi le premier noyau

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES ISL, 60 ANS DE RECHERCHES POUR LA DÉFENSE ET LA SÉCURITÉ

allemand du LRSL (Laboratoire de Recherches de Saint-Louis). Au total, 32 personnes prirent leur service à Saint-Louis le 1^{er} août 1945, avec des contrats de travail en bonne et due forme, cosignés par les intéressés et la République Française.



Première photographie du LRSL

DU LRSL À L'ISL

Lors de la création du LRSL, l'Ingénieur Militaire Cave fut nommé directeur. Il exerça ces fonctions pendant deux mois, puis fut remplacé par le chef d'escadron (ultérieurement général) Cassagnou.

Le Laboratoire connut dès les premières années une croissance assez vive. Des personnels français furent recrutés pour les domaines de l'administration et des infrastructures. Par ailleurs, le professeur Schardin qui avait pour ambition scientifique de couvrir tous les aspects de la balistique (non seulement terminale, mais aussi extérieure et intérieure), invita tous les chercheurs allemands, qu'il savait disponibles ou qui sollicitaient un emploi, à venir à Saint-Louis pour y travailler. À la fin de l'année 1946, 87 Français et 77 Allemands travaillaient dans le Laboratoire. Plusieurs années après, les autorités françaises ont également affecté des scientifiques français. Leur intégration s'est faite sans difficulté, grâce en particulier à la bonne compréhension mutuelle qui avait régné dès le début entre les personnels des deux nationalités. Le Laboratoire continuait toujours, cependant, à travailler exclusivement au profit de la République Française.

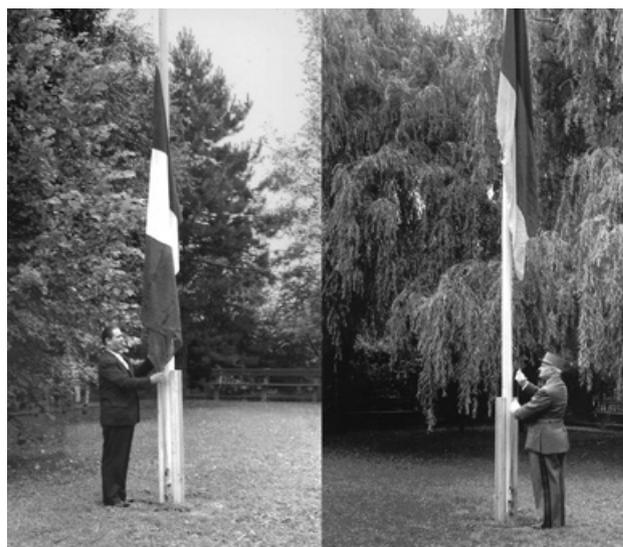
À partir des années 50, le destin du LRSL doit être vu à la lumière de l'évolution politique en Europe. À Strasbourg fut créée une première cellule de la future Communauté Européenne, avec la Communauté Européenne du Charbon et de l'Acier (CECA). L'on examina, dans le même temps, la possibilité d'une défense commune qui devait prendre la forme d'une Communauté Européenne de Défense (CED). Ce projet n'aboutit toutefois pas. Les gouvernements de la France et de la République Fédérale

d'Allemagne souhaitèrent poursuivre l'idée de faire du LRSL un institut supranational. Si la solution à l'échelon européen semblait hors de portée, il restait toujours la possibilité d'une solution binationale.

Il fallut encore un certain temps aux administrations des deux pays afin de trouver pour le nouvel établissement binational un statut compatible avec les deux systèmes nationaux. Ce fut le 31 mars 1958 que la Convention relative à la création de l'ISL (Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis) fut enfin signée sur place par les deux ministres de la Défense, Franz-Joseph Strauss et Jacques Chaban-Delmas. Un geste symbolique se produisit le même jour avec la levée des couleurs, le professeur Schardin hissant le drapeau français et le général Cassagnou le drapeau allemand.



Signature de la convention



Levée de couleurs : Schardin à gauche et Cassagnou à droite.

La Convention fut ensuite ratifiée par les parlements des deux pays le 22 juin 1959, qui peut être considéré comme le jour de naissance officiel de l'ISL.

AUJOURD'HUI « L'INNOVATION AU SERVICE DE LA DÉFENSE ET DE LA SÉCURITÉ »

L'ISL est devenu de nos jours un édifice solide et réputé. Ceci fut possible grâce à un certain nombre de personnes visionnaires, françaises et allemandes, qui surent faire abstraction de la fin du conflit 1939-1945 pour mettre en place immédiatement une des premières pierres de la construction européenne.

Unique par son statut binational, l'ISL, ce centre de recherche de haut niveau dans le domaine de la Défense, a élargi le champ de ses activités aux problématiques de sécurité civile et de la lutte anti-terroriste, en partenariat avec de nombreux industriels et organismes de recherche académique. L'ISL est une institution unique au monde : spécialisé dans les technologies de la Défense, il est donc régi par la convention binationale de 1959 associant la France et l'Allemagne. À ce titre, il est l'un des symboles les plus forts de la réconciliation européenne au lendemain de la seconde guerre mondiale puisqu'il unit deux pays - longtemps rivaux et belligérants - dans la recherche commune de leur sécurité. En partageant au sein de l'ISL une partie significative de leurs travaux de recherche au profit des forces terrestres engagées par leurs deux pays à l'étranger et sur leur territoire national pour la sécurité collective, France et Allemagne se témoignent depuis plus d'un demi-siècle une confiance à toute épreuve.

L'armée de terre met volontiers en avant ses hommes. Pour autant, à côté d'équipements rustiques, indispensables pour disposer d'un parc suffisant en nombre et répondre au meilleur coût à des besoins simples, elle a de plus en plus besoin de technologies, que les programmes de modernisation en cours, mettant en œuvre des innovations mûries au cours des décennies passées, n'épuisent pas.

Le champ des recherches tirées par les besoins des forces terrestres est immense ! C'est la mission de l'ISL. Avec ses 400 personnes, en plein accord avec l'Agence d'Innovation de Défense du côté français et le BAIIINBw du côté allemand, l'ISL incarne une recherche « au contact » (selon la signature de l'Armée de terre française) dans une approche interdisciplinaire en concertation étroite avec les opérationnels : réduire encore la vulnérabilité des hommes et du matériel ; mieux prévoir et contrôler les effets du feu en matière d'intensité et de localisation. Le tout avec une réelle maîtrise des coûts. Les nombreuses disciplines scientifiques nécessaires, rassemblées en un même lieu, bénéficiant de plateformes scientifiques d'exception, se renforcent l'une l'autre. Les travaux s'étendent de la recherche de base, très connectée, à la recherche académique - 40 doctorants -, aux démonstrateurs, pour certains quasi-opérationnels. Nos innovations

- une dizaine brevetées chaque année - sont ensuite reprises par l'industrie de défense.

DÉTECTER, CARACTÉRISER ET SE PROTÉGER, NEUTRALISER LES MENACES

La mission de l'ISL est donc de mener pour le compte de ses deux pays de tutelle (mais également pour des partenaires tiers, publics et privés) des recherches et des pré-développements en matière d'armement - sa vocation initiale - ainsi que dans les domaines de la protection civile et de la lutte contre le terrorisme. Ces recherches s'organisent aujourd'hui en quatre grands secteurs, à la fois complémentaires et connectés.

DÉTECTER, CARACTÉRISER ET SE PROTÉGER

Deux grands secteurs de recherche de l'ISL contribuent à la détection et à la caractérisation de la menace à laquelle les forces armées et les citoyens sont exposés. Dans le domaine de la protection, de nouvelles menaces versatiles sont apparues avec l'apparition de conflits asymétriques tels que la guérilla et les attaques terroristes.



L'ISL met au point des matériaux à la fois légers et résistants

Le premier secteur concerne les « matériaux de protection avancés et énergétiques ». L'ISL met au point des matériaux à la fois légers et résistants utilisés pour protéger les combattants et les véhicules des tirs ennemis. Il s'agit par exemple de composites associant de manière très intime du métal, des céramiques et/ou des polymères, ou encore de matériaux renforcés par la présence de nanoparticules. Actuellement sujet de recherches prometteuses, la réalisation de céramiques transparentes pourrait permettre de révolutionner la fabrication de vitres très résistantes ou blindées. Les réglementations européennes REACH (*Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals*) et RoHS (*Restriction of Hazardous Substances*) limitant l'accès à certaines substances utilisées jusqu'à présent dans les munitions ou les explosifs, l'ISL imagine des matériaux de substitution en recourant aux nanotechnologies. La sécurité des utilisateurs de matières explosives est renforcée par des procédés d'élaboration innovants. L'ISL met aussi au point des systèmes ultrasensibles permettant de détecter des

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES ISL, 60 ANS DE RECHERCHES POUR LA DÉFENSE ET LA SÉCURITÉ

traces infimes d'explosifs, un besoin évident dans la lutte contre le terrorisme.



Matériaux de substitution en recourant aux nanotechnologies.

Un deuxième secteur d'activité - baptisé « Techniques de protection, sécurité, perception de la situation » - a trait aux équipements assurant sur les théâtres d'opération, d'une part la détection des menaces explosives et balistiques qui mettent directement en danger les combattants, et d'autre part leur protection : détection par imagerie dans les conditions les plus difficiles (nuit, nébulosité, fumée), détection acoustique de tireurs embusqués, atténuation des effets des explosions, ou protection physiologique individuelle et des véhicules contre les charges explosives ou les balles. L'ISL a par exemple breveté des bouchons d'oreille à atténuation non linéaire qui ont été adoptés par de nombreuses armées dans le monde, dont l'US Army : ces bouchons préviennent les lésions causées par les bruits d'armes et d'explosions tout en permettant l'audition normale des sons utiles, comme les paroles des camarades de combat.



Détection par imagerie

NEUTRALISER LES MENACES

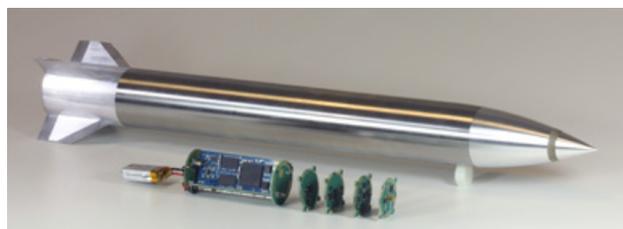
Les deux autres grands secteurs de recherche de l'ISL contribuent au développement de moyens de neutralisation des menaces adverses, d'une part en augmentant leur portée (ce qui permet de les utiliser à distance de sécurité), d'autre part en améliorant leur précision et en permettant

des effets dosables (de manière à limiter les dommages collatéraux) et enfin, en maîtrisant le coût de ces moyens afin qu'ils puissent être largement déployés.



Bouchons d'oreille à atténuation non linéaire

L'un de ces deux secteurs de recherche a pour objet les « techniques de vol des projectiles » qui abordent les aspects aérodynamiques, aérothermodynamiques, de balistique extérieure, de guidage, navigation et contrôle, d'électronique embarquée et de sa miniaturisation. Du point de vue opérationnel, il est indispensable que les forces terrestres utilisent moins de munitions, réduisent les dommages collatéraux et se situent hors de portée des feux adverses. Pour ce faire, l'ISL se préoccupe de réduire la dispersion des munitions existantes à trajectoire balistique pour atteindre la précision métrique à l'impact. L'ISL s'intéresse également à la conception d'architectures innovantes de munitions guidées pour au moins doubler voire tripler la portée actuelle des munitions existantes sans en oublier la précision. D'un autre point de vue opérationnel, il est nécessaire de faire face à la menace aérienne. Pour cela, l'ISL étudie la possibilité de combattre les véhicules aériens hypervéloces et manœuvrants par l'utilisation de projectiles innovants hypersoniques et guidés.

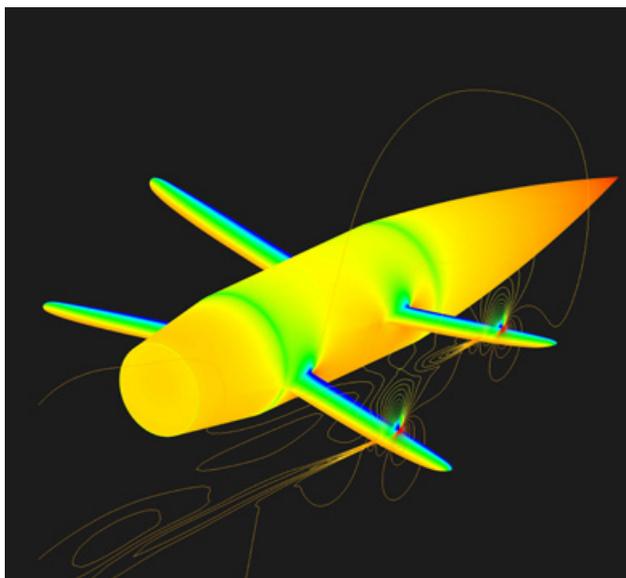


Projectile avec son électronique embarquée et sa miniaturisation

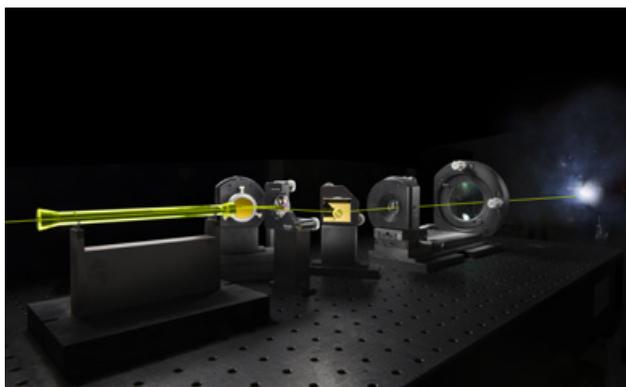
L'autre de ces deux secteurs de recherche se préoccupe des nouvelles armes à base de lasers et de technologies électromagnétiques. Les activités sont focalisées sur le développement de nouvelles sources laser pour les applications militaires en incluant les contre-mesures optroniques et la technologie laser en tant qu'effecteur à

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

ISL, 60 ANS DE RECHERCHES POUR LA DÉFENSE ET LA SÉCURITÉ



Architecture innovante



Sources laser

sécurité oculaire ; sur les sources d'alimentation pour la génération d'ondes électromagnétiques dans le contexte d'énergie dirigée ; sur les composants et les systèmes d'alimentation pulsée et sur les lanceurs électromagnétiques. Ainsi par exemple, l'ISL travaille sur un lanceur électromagnétique permettant des tirs de projectiles hypersoniques guidés pour l'application très longue portée grâce à une vitesse initiale de l'ordre de 3000 mètres par seconde - contre 2000 pour le meilleur des canons classiques - et à la cadence de 50 tirs par minute. Ce moyen presque futuriste présente en outre l'avantage de ne pas utiliser de poudre et donc de supprimer les risques liés à son stockage, qui ont par le passé causé des tragédies sur des bâtiments de marine.

L'EFFORT D'INVESTISSEMENTS SCIENTIFIQUES

L'ISL dispose depuis quelques années de deux nouvelles grandes installations. Une nouvelle soufflerie trisonique (permettant des vitesses d'écoulement du subsonique jusqu'au nombre de Mach de 4,5) est opérationnelle pour mettre au point ses innovations en matière de contrôle du vol de projectiles d'artillerie. Un nouveau laboratoire pyrotechnique sur le terrain d'essais de l'ISL à Baldersheim est conçu pour traiter les matériaux énergétiques et les formulations énergétiques. Ce laboratoire peut proposer des méthodes polyvalentes de traitement et de formulation ainsi que l'usinage de matériaux énergétiques. Une nouvelle salle blanche pour la production d'électronique et un nouveau centre technique ont été construits. Ce dernier a été inauguré en juin pour y loger l'atelier central et tous les services techniques au service de la science. Ces équipements font partie d'un programme



Lanceur électromagnétique

d'investissements qui a mobilisé plus 20 millions d'euros sur la période de ces derniers cinq ans.

Par ailleurs, le terrain d'essais de l'ISL à Baldersheim permet de réaliser des essais en conditions réelles pour la balistique, la détonique, les lasers et l'acoustique.



Soufflerie trisonique

« MOBILISER CE QU'IL Y A DE MEILLEUR DANS LES DEUX PAYS »

« En 60 ans d'existence, la confiance a eu tout le temps de s'établir et de se structurer souligne le directeur français de l'ISL, Christian de Villemagne. Nous travaillons pour les armées de terre et, dans ce domaine, les efforts français et allemands d'investissement de défense sont comparables. Il n'y a donc pas de déséquilibre et le programme de recherche confié à l'ISL par les deux pays est quasiment commun. Le financement de l'ISL est paritaire et le fait que tout l'ISL soit sur un même lieu permet de mutualiser moyens et compétences : chaque euro investi dans l'ISL par l'un des deux pays lui rapporte deux euros de production de recherche sur ses priorités. En outre, l'intégration au quotidien entre Français et Allemands permet de mobiliser ce qu'il y a de meilleur dans les cultures scientifiques des deux pays, un atout décisif pour la qualité des recherches de l'ISL. Tous ces leviers permettent un excellent retour sur investissement ».

L'ISL est placé sous la tutelle du Ministère de la Défense français et du Bundesministerium der Verteidigung allemand. Sa gouvernance est paritaire. En particulier, il dispose d'un directeur français (Christian de Villemagne) et d'un directeur allemand (Dr.-Ing.Thomas Czirwitzky), qui veillent à optimiser le pilotage par les deux tutelles et à favoriser à l'intérieur une interculturelité fructueuse. Aucune autre fonction n'est dupliquée. Toutes les autres fonctions sont attribuées avec un souci d'équilibre et de mélange interculturel, en privilégiant la compétence à la nationalité. Les ministères de tutelle définissent les programmes de recherche élaborés en partenariat avec l'ISL. La plupart sont communs aux deux pays, mais certains sont commandés spécifiquement par l'un ou l'autre. Pour équilibrer son budget, l'institut franco-allemand répond aussi aux appels à projets publics

européens et signe des contrats de prestations de service ou de recherche appliquée avec des partenaires industriels privés. Les partenaires extérieurs de l'ISL financent ou cofinancent directement une trentaine de doctorants ou de chercheurs travaillant au sein de l'ISL.

Les recherches de l'ISL trouvent également des applications hors du champ de la Défense, de la protection civile et de la lutte anti-terroriste, dans les domaines de la santé, de l'environnement, de l'aérospatial, des transports, etc. Par exemple, l'allègement apporté par ses travaux sur les matériaux de protection avancés intéresse à l'évidence l'industrie aéronautique, pour qui chaque kilogramme gagné se traduit en gain économique. L'ISL est lié à de nombreux partenaires académiques, en France, en Allemagne et dans le monde. L'ISL mobilise ses partenaires académiques sur des problématiques de défense et de sécurité et leur apporte ses compétences valorisables sur des applications purement civiles. C'est ainsi qu'il est un membre actif de l'Institut Carnot MICA - un cluster alsacien de centres de recherche, de centres de ressources technologiques et de centres techniques industriels, doté du label très sélectif Carnot - qui met à la disposition des industriels ses compétences en matériaux et interfaces fonctionnels. Plus généralement, l'ISL est partenaire de plusieurs centaines d'organismes et d'entreprises, attirés par la concentration en un même lieu de compétences interdisciplinaires de très haut niveau.

Dans le cadre d'un plan stratégique, l'ISL a conforté son potentiel scientifique tout en abaissant ses coûts et en développant ses ressources externes. « Nous devons avoir la capacité de fournir des prestations de recherche sur toute la palette souhaitée par nos autorités de tutelle, et avec la profondeur d'intervention nécessaire, expose Christian de Villemagne. Nous avons donc engagé un effort résolu de priorisation de nos activités, d'orientation des équipes sur ces priorités, de production de feuilles de route scientifiques pour aboutir aux innovations qui sont souhaitées par nos tutelles et attendues par les combattants sur les lignes de front, et enfin de valorisation directe de nos innovations pour développer nos ressources externes : « L'une de nos missions, insiste le directeur français de l'ISL, est aussi de mobiliser les chercheurs académiques sur les thématiques de la Défense ». Comme Janus, l'ISL présente plusieurs visages - à la fois français et allemand, militaire et civil - qui expriment une identité totalement originale.

L'ISL peut catalyser des coopérations nouvelles. Il a d'ailleurs été chargé d'une étude technico-opérationnelle MGCS (*Main Ground Combat System*), visant à dessiner ce qui remplacerait le système de combat terrestre futur et à terme les chars Leclerc et Leopard 2. ■

MICHEL SCHELLER ÉLEVÉ À LA DIGNITÉ DE GRAND OFFICIER DANS L'ORDRE NATIONAL DU MÉRITE

par Bruno Chanetz, rédacteur en chef



Michel Scheller

Le 21 mai 2019, le général d'Armée Benoît Puga, Grand Chancelier de la Légion d'honneur, a remis à Michel Scheller les insignes de Grand Officier dans l'Ordre national du mérite. La cérémonie s'est déroulée dans les salons du Palais de la légion d'honneur, l'hôtel de Salm, en présence de quelques intimes et de nombreuses personnalités.



médaille d'officier



Plaquette de Grand officier

Cette dignité conférée à notre Président est l'occasion de revenir sur sa brillante carrière et son dévouement à la 3AF depuis 17 ans.

Après ses études au collège Chaptal à Paris, Michel Scheller intègre l'Ecole Polytechnique. Il est diplômé de l'Ecole nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace (SUPAÉRO), titulaire de l'Executive MBA d'HEC et fut auditeur au Centre des hautes études de l'armement (Chéar).

Il débute sa carrière en 1964 au Service technique des transmissions de l'Armée de l'air. En 1983 il est nommé sous-directeur de cette entité devenu le Service technique des télécommunications et équipements aéronautiques. En 1986, il est nommé directeur-adjoint du Service central de la production et de la maintenance. Cette même année, il rejoint le cabinet d'André Giraud, Ministre de la défense, en tant que conseiller technique.

En 1991 il retrouve le Service technique des télécommunications et équipements aéronautiques, dont il devient le directeur en 1991, année où il est promu Ingénieur Général de l'Armement. Puis en 1993, il est appelé au cabinet de François Léotard, Ministre d'Etat, Ministre de la défense, comme conseiller pour les questions d'armement et de recherche industrielle.

Il prend ensuite la Direction générale de l'aviation civile (DGAC) de 1993 à 1995. Il y effectue des réformes avec la mise en place des directions régionales, ainsi que la séparation des services de la gestion des ressources humaines et de la gestion financière.

En 1995, lui est confiée la présidence de l'ONERA. Il réussit une opération d'adaptation des effectifs et d'intégration des équipes en réformant l'organisation existante, créant 17 départements opérationnels non attachés à un site géographique mais relevant d'une compétence métier, cette structure présentant l'avantage de supprimer les doublons dans un organisme comptant 8 centres en France.

En 1999 il quitte l'ONERA pour prendre la direction générale du groupe TEKELEC, spécialisé dans les composants électroniques.

En 2002, il intègre en tant que conseiller le groupe GDF/SUEZ, fonction qu'il continue à assumer au fil des restructurations jusqu'en 2018 au sein de la société Engie/INEO.

Parallèlement, il se consacre à la 3AF depuis 2002, transformant cette association en un des acteurs renommés du secteur aéronautique et spatial. On lui doit le transfert du

MICHEL SCHELLER ÉLEVÉ À LA DIGNITÉ DE GRAND OFFICIER DANS L'ORDRE NATIONAL DU MÉRITE

siège des Mureaux, dans les Yvelines, à la rue Galilée à Paris, dans l'immeuble de l'Aéroclub de France jouxtant celui où est installé le GIFAS. Cette localisation est stratégique et propice aux échanges et aux réunions de ses membres, ainsi qu'au rayonnement de l'association.

Au début de la décennie 2010, Michel Scheller a porté la transformation de la structure de l'association en établissant un conseil d'administration composé de trois collèges : le collège n°1 représentant les adhérents individuels et deux collèges représentant les personnes morales, le collège n°2 représentant les industriels et le collège n°3 représentant les institutions académiques. Deux vice-présidents appuient son action. Il s'agit présentement d'Alain Wagner (Airbus DS) pour le collège industriel et de Bruno Sainjon (ONERA) pour le collège académique. Cette réforme associe plus étroitement les partenaires de l'aéronautique et du spatial à la 3AF. Elle a débouché sur une reconnaissance accrue de la 3AF au sein du paysage aérospatial français.

La haute dignité, qui vient de lui être conférée, consacre son action bénéfique au service de la communauté de l'aéronautique et de l'espace. Elle vient couronner une carrière entièrement au service de la France.

Rappelons que Michel Scheller est commandeur de l'Ordre national du mérite depuis 2001 et commandeur de la Légion d'honneur depuis 2007. Il est également chevalier des palmes académiques depuis 2005. ■

Autres membres de la 3AF honorés en 2018-2019 :

- Bruno Sainjon et Jacques Sauvaget, commandeurs de l'Ordre national du mérite
- Bertrand de Montluc, officier de l'Ordre national du mérite
- Alain Wagner et Franck Lefevre, chevaliers de la Légion d'honneur
- Annie Jacquard a reçu la médaille de l'Aéronautique



Parmi les invités le sénateur Gérard Longuet, ancien ministre (3^e en partant de la droite)

INTERVIEW DE BRUNO SAINJON, PRÉSIDENT DE L'ONERA, VICE-PRÉSIDENT DE LA 3AF

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



Bruno Sainjon

Jean-Pierre Sanfourche : Le nombre d'adhérents à la 3AF est véritablement trop faible (environ 1000), alors que la France est en pointe dans le secteur aérospatial. J'aimerais passer en revue avec vous quelques suggestions.

Bruno Sainjon – Bien volontiers. Comme vous le savez nous avons multiplié les initiatives ces dernières années et malheureusement les résultats ne sont pas au rendez-vous. La France n'est pas un pays qui place au premier rang de ses préoccupations le fonctionnement des associations, notamment les sociétés savantes, et la distance est toujours grande entre la communauté scientifique et la société civile. Cela est vrai dans tous les domaines, le secteur aérospatial n'est pas une exception. Mais passons donc en revue vos suggestions.

JPS : D'une manière générale, la 3AF devrait s'imposer comme une institution fournissant des services à haute valeur ajoutée à l'intention des décideurs, des ingénieurs, des étudiants en fin d'études aéronautiques et spatiales.

- À l'intention des décideurs : des « Position Papers » portant sur les grands dossiers du moment : le New Space et l'après-Ariane 6, le rôle de la France dans le développement du « Future Air Combat System », etc.
- À l'intention des ingénieurs :
 - Des colloques centrés sur les thèmes stratégiques du moment, donnant lieu systématiquement dans un délai de 6 mois à l'édition d'Actes de grande qualité (ex : AIAA) ;
 - Non seulement des colloques mais aussi des

conférences de haut niveau à la manière des « Lectures » de la RAeS, ainsi que des forums permettant à des ingénieurs de même spécialité de se rencontrer.

- À l'intention des étudiants de fin d'études aérospatiales et des jeunes professionnels :
 - l'aide à l'obtention de stages ;
 - conseils et aides pour leur carrière.

BS – Toutes ces suggestions me paraissent en effet tout à fait opportunes. Elles appellent de ma part les commentaires suivants :

- En ce qui concerne les décideurs, il faudrait constituer pour chaque thématique une équipe d'experts de haut niveau en activité, une véritable « think tank » dont les membres se réuniraient à intervalles réguliers. Deux problèmes : d'une part l'adhésion des hauts responsables au principe de ces « Position Papers », à leur utilité et leur pouvoir d'influence, et d'autre part la disponibilité des experts recherchés. Il existe souvent une certaine méfiance des industriels à l'égard des opinions émises par des sociétés savantes. Il faudra donc faire travailler les experts choisis dans le cadre de groupes Ad Hoc parfaitement structurés.
- S'agissant des colloques, la 3AF réalise un excellent travail. Mais il est vrai que désormais, un effort important devra être porté sur l'édition des Actes. Il s'agit là d'un problème d'organisation en amont des colloques mais aussi d'un problème de disponibilité des ingénieurs concernés. Le staff de la 3AF est-il suffisant ? À l'évidence non, mais ses moyens financiers ne permettent pas pour le moment de le renforcer. La structure du COPIL (Comité de Pilotage des Commissions) doit être reconsidérée, c'est l'une des tâches auxquelles la nouvelle équipe de direction devra se consacrer en priorité. Par ailleurs quelques nouvelles commissions pourraient être créées afin de bien couvrir tous les sujets stratégiques actuels : sécurité aérienne, défense, etc.
- Des conférences du soir existent déjà dans le cadre des Groupes Régionaux, le Groupe Île-de-France notamment fait un excellent travail. Peut-être en outre pourrions-nous à l'échelle 3AF nationale organiser une ou deux fois par an un dîner-débat, par exemple au Cercle National des Armées (Saint-Augustin). Là encore se pose la disponibilité des membres permanents de la direction 3AF.
- Quant à l'aide aux étudiants de fin d'étude et aux jeunes professionnels, cette mission est conduite par le GIFAS, qui dispose de moyens bien supérieurs à ceux de la 3AF.

INTERVIEW DE BRUNO SAINJON, PRÉSIDENT DE L'ONERA, VICE-PRÉSIDENT DE LA 3AF

Consacrer une partie des ressources limitées de la 3AF pour dupliquer ce qui se fait bien par ailleurs n'aurait donc aucun sens.

JPS : Précisément il me semble que la 3AF devrait collaborer très étroitement avec le GIFAS.

BS - C'est tout à fait mon avis. Si nous voulons être soutenus fortement par les sociétés industrielles aéropatiales, non seulement sous l'angle des aides financières mais aussi de leur participation à nos « think tank » et à nos colloques, notre rapprochement avec le GIFAS me paraît être un impératif absolu. J'ai d'ailleurs proposé lors du dernier conseil d'administration de la 3AF qu'une fois que la nouvelle équipe de direction, qui sera mise en place à l'issue des prochaines élections, aura arrêté sa stratégie pour la 3AF, elle demande au GIFAS de lui présenter, à l'occasion par exemple d'une séance de leur Bureau, la redéfinition des missions et des enjeux de notre association et les bases sur lesquelles nous proposerions de collaborer à l'avenir.

Et cela devra se faire bien sûr en étroite concertation avec les trois institutions membres de droit de la 3AF, à savoir le CNES, la DGAC et la DGA.

Si la décision est prise d'entamer une telle procédure, il faudra la préparer avec énormément de soin, ce sera un gros travail. Je vous parle d'expérience car c'est l'une des toutes premières démarches que j'avais entreprises aussitôt après ma nomination à la tête de l'ONERA.

Si la 3AF parvenait à établir un réel climat d'entente et de confiance avec le GIFAS, alors pourrions-nous nous placer sur une trajectoire de progression.

Notre staff actuel de permanents est trop réduit, il nous faut absolument l'étoffer, ce qui ne pourra être réalisé que grâce à un soutien fort du GIFAS et des trois tutelles déjà citées.

JPS : Que pensez-vous d'un rapprochement avec l'AAE ?

BS - Le processus est déjà en cours, avec le concours actif de Jean-Paul Perrais. Les bases de ce rapprochement ont fait l'objet d'un accord signé par les deux présidents, Anne-Marie Mainguy et Michel Scheller, qu'il faut maintenant mettre en pratique.

JPS : Et avec l'Académie des Technologies ?

BS - Oui, sur des sujets particuliers, il serait tout à fait opportun d'établir des liens de coopération.

JPS : Aujourd'hui la Lettre 3AF atteint le niveau d'une Revue : le moment ne serait-il pas venu de recréer l'ancienne Revue de l'Aéronautique et de l'Astronautique ?

BS - Vous me donnez l'occasion ici de remercier Bruno Chanetz pour son remarquable travail. Mais pour réaliser ce que vous proposez, il faut d'abord augmenter le nombre de nos membres ! Nous revenons au point de départ de notre interview ...

JPS : Un dernier souhait : faire en sorte que la mention « Membre de l'Association Aéronautique et Astronautique de France » sur la carte de visite soit reconnue comme une marque de distinction importante.

BS - Là encore, cela passe par le soutien du GIFAS. Ce sont les managers de l'industrie qui devraient encourager leurs ingénieurs à adhérer à la 3AF et qui considéreraient cette adhésion comme un critère de qualité. ■

TOUS SUR LA LUNE ! #SG[FRANCE] 2019

par Pierre Cordesse, doctorant ONERA, membre d'Alumni-ONERA et 3AF

Cet événement, le premier d'une longue série n'aurait jamais pu se concrétiser sans le soutien et la contribution de nos sponsors : CNES - IAC 2021, l'Espace Andrée Chédid, ILEWVG, HE Space, 3AF, Airbus, IAF, Bird and Bird, Federation Open Space Makers, GIFAS et Thales Alenia Space, et plus particulièrement des membres actifs d'ALUMNI ONERA dont l'auteur fait partie.

En marge du Paris Air Show 2019, l'auteur a eu le plaisir de faire partie de l'équipe organisatrice du premier rassemblement national proposé aux étudiants et jeunes professionnels passionnés par le spatial, au nom de SGAC*.

*SPACE GENERATION ADVISORY COUNCIL

SGAC est une organisation internationale non-gouvernementale créée en 1989 par l'UNOOSA rassemblant plus de 15 000 Alumni. Elle travaille tant au niveau international, que national et/ou même local afin d'injecter le point de vue de la nouvelle génération aux enjeux politiques spatiales internationales, de réfléchir de manière créative à l'utilisation future de l'espace et de dialoguer avec les dirigeants des agences spatiales, de l'industrie et du monde universitaire.

Pour une première édition, cet événement, #SG[France] 2019, a été un grand succès en regroupant plus de 70 étudiants et jeunes professionnels (18-35 ans) "space enthusiasts" autour du thème *Tous sur La Lune* au travers de workshops, conférences et moments conviviaux le dimanche 16 juin et d'une visite du Salon du Bourget durant les journées professionnelles le lundi 17 juin avec passage privilégié par les stands de nos partenaires.

Une quinzaine d'intervenants sont venus enrichir les débats des trois workshops, venant du CNES, de Fédération - Open Space Makers, du GIFAS, de la 3AF, de Bird & Bird IP Services, de HE Space Operations, de ALUMNI ONERA, de Thales Alenia Space et du groupe de travail international sur l'exploration lunaire (ILEWVG).

Le choix du thème *Tous sur La Lune* pour #SG[France] 2019 relève d'un contexte très particulier : 2019 est à la fois l'anniversaire des 50 ans du premier Homme sur la Lune, des 20 ans de SGAC, et marque le lancement par le CNES de la préparation à l'International Astronautics Conference (IAC) accueillie à Paris en 2021.

Les workshops ont porté sur les trois thèmes suivants :

- L'économie et le droit spatial appliqués à l'exploitation minière lunaire.
- Les projets open-source et commerciaux sur la Lune

appliqués à l'architecture et aux infrastructures.

- La vie, les astronautes, l'art et les cultures sur la Lune. et ont été introduits par des experts, notamment François Spiero (CNES) et Bernard Foing¹ (ILEWVG).

WORKSHOP 1 - EXPLOITATION MINIÈRE LUNAIRE: PROBLÉMATIQUE INDUSTRIELLE ET DROIT SPATIAL

La Lune regorge de minerais rares exploitables commercialement. Or, une telle exploitation nécessite d'importants moyens techniques, ainsi qu'un cadre légal qui à ce jour comporte de nombreuses failles. En effet, le Traité de la Lune de 1979 interdit par exemple l'appropriation de biens extraterrestres par une organisation autre qu'une organisation gouvernementale ou internationale. Toutefois, ce traité n'a à ce jour pas été ratifié par la majorité des puissances spatiales, conduisant ainsi à une insécurité juridique, voire même certains pays, comme les États-Unis d'Amérique et le Luxembourg, à d'autoriser l'exploitation commerciale. Cette thématique a soulevé plusieurs questions, tant sur le plan stratégique, que juridique auxquelles Nicolas Puschman (Bird and Bird) et François Spiero (CNES) ont pu répondre, à savoir :

- les défis industriels à relever pour débiter l'exploitation minière de la Lune tout en la préservant,
 - le cadre légal d'une telle activité,
 - la priorité de cette activité par rapport aux missions scientifiques,
- ou encore la manière dont pourraient être orchestrés les efforts privés et publics pour créer autour de cette exploitation un environnement industriel sain.

THÈME 2 - COHABITATION DES PROJETS OPEN-SOURCE ET COMMERCIAUX SUR LA LUNE, LE CAS DE L'ARCHITECTURE ET DES INFRASTRUCTURES

Quelles sont nos avancées et les techniques à développer pour la construction d'un village lunaire ? Quels sont les enjeux commerciaux ? Ces questions ont été explorées avec Damien Hartmann (Federation Open Space Makers), Emmanuel Dufresnes (École Nationale Supérieure d'Architecture - Université de Strasbourg), Olivier Walter (École Nationale Supérieure d'Architecture - Paris-Val-de-Seine, RSTARCHES) et KIM Kyunghwan (BIB Inno-Collaboration Lab, RSTARCHES). En effet, avec l'expansion de cubesats de plus en plus nombreux en orbite, il est prévisible que la prochaine étape de l'exploration spatiale se déroulera dans l'environnement lunaire et cis-lunaire. Jeff Bezos est même allé plus loin en annonçant que Blue Origin développerait une navette habitable d'ici 2024 - un calendrier similaire aux objectifs de la NASA. Toutefois, comme l'a montré le récent échec de la mission

¹ Voir interview de Bernard Foing dans la Lettre 3AF n°33

première mission financée par des fonds privés Beresheet de SpaceIL, ancien participant du Google Lunar X Prize, des obstacles technologiques et économiques restent à surmonter. Ces difficultés pourraient être maîtrisées en alliant les efforts publics (agences spatiales et laboratoires), privés (sociétés) et des citoyens terrestres sur la base d'initiatives telles que Fédération pour motiver l'aménagement d'une station lunaire permanente. Ce thème au cœur de l'actualité spatiale a soulevé quelques questions concernant l'apparence et le fonctionnement d'une telle station qui serait développée par un partenariat public/privé, les clefs de la réussite commerciale de tels projets lunaires, la place des projets open-source dans l'écosystème lunaire de demain, ou encore comment mobiliser des citoyens aux compétences variées pour qu'ils contribuent à de tels projets lunaires publics et commerciaux.

THÈME 3 - VIE, ASTRONAUTES, ARTS ET CULTURES SUR LA LUNE

Comment sera la vie sur la Lune ? Comment y assurer une vie équilibrée pour tous les astronautes qui y travailleront ? Quels Arts, quelles cultures se développeront sur la Lune ? Les discussions sur ces points ont été enrichies par le témoignage d'Aline Decadi (HE Space, ESA), de Sébastien Drochon (Moon Village Association), d'Yvette Gonzalez (International Institute for Astronautical Science) et d'Anna Sitnikova (Art Moon Gallery). Les discussions ont battu leur plein autour de la préservation des sites Apollo une fois que l'Homme aura pris résidence sur la Lune, du transfert d'une partie de l'Art terrestre sur la Lune, de l'Art uniquement lunaire reposant par exemple sur l'apesanteur. Plusieurs solutions ont été proposées pour s'assurer que les futurs habitants lunaires puissent se divertir lors de leurs missions, notamment l'exploitation de la verticalité pour faire du sport et des réflexions ont été menées pour préserver le bien-être psychologique des habitants de la Lune.

Ces réflexions menées de façon intensive et conviviale vont faire l'objet d'un rapport qui sera remis au Bureau des affaires spatiales des Nations Unies.

VISITE DU SALON DU BOURGET AIR & SPACE SHOW À PARIS, LE LUNDI 17 JUIN 2019

Le lendemain, un programme très riche a permis de prolonger les discussions autour des avancées clefs du spatial : démonstrations de vol, découverte du nouvel avion de combat européen, visite privilégiée des stands de nos partenaires notamment le DLR, Paris Air Lab avec Starburst, Thales Aliena Space, l'ESA, le CNES, ainsi qu'une visite dans le hall *l'Avion des métiers* et l'ONERA. Nous avons eu la chance de pouvoir débattre sur le rôle que peut jouer l'industrie spatiale pour préserver notre environnement avec l'astronaute français Thomas

Pesquet et Pascal Lecomte, directeur Espace et Climat (ESA). D'après Thomas Pesquet, la vision d'ensemble de notre planète bleue depuis la station internationale permet de prendre conscience que nous sommes tous sur un même petit vaisseau, fragile, très fragile ... Il y a urgence à agir de manière macroscopique et plus seulement au niveau local ou national.



Thomas Pesquet



Participants et intervenants du #SG[France] 2019, accueilli gracieusement dans l'Espace Andrée Chédid à Issy-les-Moulineaux, dimanche 16 juin 2019.

#SG[France] 2019 a réussi son pari en mettant en contact étudiants et jeunes professionnels avec des acteurs majeurs de l'industrie et de la recherche spatiales européennes afin de tisser un réseau, renforcer la compréhension des enjeux et la dynamique autour des activités spatiales et engager le dialogue pour trouver des solutions ! ■

LA MAQUETTE DE LA GRANDE SOUFFLERIE S1Ch DE CHALAIS-MEUDON EXPOSÉE AU SALON DU BOURGET

par **Bruno Chanetz**, trésorier d'Aéro-Eiffel 100 et **Gérard Laruelle**, secrétaire général d'Aéro-Eiffel 100 et président du Comité jeunes 3AF

Gérard Laruelle et Bruno Chanetz veillent depuis plusieurs années à la fabrication d'une maquette à l'échelle 1/100^e de la Grande Soufflerie S1Ch de Chalais-Meudon, réalisée par différents lycées techniques de l'académie de Versailles.

Ce projet avait été initié dès 2013, dans le cadre du pôle de compétitivité aéronautique Ile-de-France ASTECH, par Gérard Laruelle, alors Directeur général du pôle ASTECH, en liaison avec un inspecteur de l'académie de Versailles, David Grateau. À cette époque, le pôle était hébergé dans un bâtiment du centre ONERA de Meudon. En 2006, le président de l'ONERA Denis Maugars avait en effet chargé Bruno Chanetz d'organiser l'accueil des membres d'ASTECH et d'en négocier le loyer avec Gérard Laruelle. Avoir ses bureaux au sein du centre ONERA de Meudon était pour Gérard Laruelle un retour aux sources, puisqu'il avait débuté sa carrière d'ingénieur en réalisant des essais de prises d'air les souffleries hypersoniques R1Ch et R2Ch et dans la soufflerie supersonique S5Ch ¹, avant de la poursuivre brillamment au sein d'Aérospatiale, puis d'Astrium.

Les nombreuses personnes participant aux réunions organisées à Meudon dans le cadre du pôle ASTECH étaient, lors de leur première admission sur le site de Meudon, invitées à une visite des souffleries en activité et de la soufflerie historique S1Ch en particulier. Le gigantisme de l'installation impressionnait vivement les visiteurs. La dégradation du bâtiment, hors service depuis 1976, ainsi que les bruits de fermeture du centre ONERA de Meudon, accréditaient l'idée qu'ils faisaient partie des derniers contingents de privilégiés autorisés à pénétrer dans cette soufflerie qui avait constitué un rouage essentiel de la recherche aéronautique française dans les années 1950-1970. Il apparaissait dès lors important, quel que soit le sort dévolu à l'installation ultérieurement, d'en perpétuer le souvenir au moyen d'une maquette opérationnelle avec des ventilateurs mus par moteurs électriques.

Le projet bien parti, puis tombé à l'abandon en 2014-2015, fut opportunément réactivé à la rentrée scolaire 2015-2016, peu avant que le président de l'ONERA Bruno Sainjon, lors de ses vœux au personnel, annonçât officiellement en janvier 2016 la fermeture du centre de Meudon à l'horizon de cinq ans. Cette décision entraine

dans le cadre de la rationalisation des moyens de l'ONERA. La fermeture du centre de Meudon se traduira par la vente du domaine de Meudon pour financer la construction de bâtiments neufs sur le centre de Palaiseau. On ignore quelle sera la destinée de la soufflerie elle-même, mais grâce à cette initiative, un beau modèle réduit en sera conservé en un lieu emblématique : la soufflerie que Gustave Eiffel construisit en 1912 rue Boileau à Auteuil.

La maquette a été réalisée à l'échelle 1/100^e (1,2 m de long pour 120 m de longueur réelle). Elle a été présentée cette année au salon du Bourget dans le hall *L'avion des métiers*, grâce à un emplacement mis à disposition gratuitement par le GIFAS.



Maquette (échelle 1/100^e)



Maquette de la soufflerie S1Ch (échelle 1/100^e) vue de l'amont du convergent.

¹ voir articles sur les prises d'air Concorde dans la Lettre 3AF n°35

LA MAQUETTE DE LA GRANDE SOUFFLERIE S1CH DE CHALAIS-MEUDON EXPOSÉE AU SALON DU BOURGET



Soufflerie vue du côté du collecteur, avant l'adjonction de la chambre de tranquillisation

Il faut également mentionner qu'une subvention de la DGAC a permis de financer, en partie, divers postes de dépense :

- un globe destiné à protéger la maquette ;
- des personnages, des arbres et des petites voitures pour décorer les espaces autour de la maquette ;
- la matière première - métal - destinée à la réalisation des pieds-supports ;
- les transports depuis les différents établissements scolaires jusqu'au Bourget et le transfert à la soufflerie Eiffel à l'issue de la semaine d'exposition au Bourget.

À ce jour, la maquette est rendue dans la mezzanine de la soufflerie Eiffel, rue Boileau à Paris, où elle sera définitivement exposée.

Antonin Lapresle, collaborateur de Gustave Eiffel, fut le concepteur de la Grande Soufflerie de Meudon et premier directeur de la soufflerie d'Auteuil, après Gustave Eiffel. C'est un juste retour que cette maquette soit désormais présentée dans la soufflerie, qui fut en quelque sorte, la soufflerie pilote de S1Ch.

Aéro-Eiffel 100 et 3AF organiseront fin 2019 une cérémonie d'inauguration, permettant de remercier tous les contributeurs.

LA GRANDE SOUFFLERIE S1CH DE CHALAIS-MEUDON

C'est Antonin Lapresle, collaborateur, puis successeur d'Eiffel à la soufflerie d'Auteuil, qui construisit de 1929 à 1935, à la demande du Ministère de l'Air, la Grande Soufflerie de Chalais-Meudon. De type Eiffel, elle est munie d'un convergent de rapport de réduction 3,5, passant d'une embouchure de surface 350 m² à une section de veine d'essai de 100 m², permettant ainsi d'atteindre une vitesse maximale de 180 km/h. Son diffuseur, constitué d'un tube tronconique géant de section elliptique d'axe vertical 10 m et d'axe horizontal 18 m à l'entrée, est réalisé en voile de béton armé mince d'une épaisseur de 7 cm pour 38 m de longueur. En aval du diffuseur, la chambre d'aspiration, dotée de six ventilateurs de 1000 ch chacun permet l'extraction de l'air. Devenue obsolète, l'installation est désaffectée en 1977. Classée Monument historique en 2000, elle reste l'emblème du centre ONERA de Meudon.

Durant vingt ans, de 1950 à 1970, cette installation a été utilisée intensivement. Deux équipes assuraient son fonctionnement de 6 h le matin à 22h le soir. Elle a permis de tester, au cours de nombreux programmes nationaux, l'aérodynamique des avions, mais aussi des automobiles et des bâtiments.

**LA MAQUETTE DE LA GRANDE SOUFFLERIE SICH DE CHALAIS-MEUDON
EXPOSÉE AU SALON DU BOURGET****LES PARTENAIRES DU PROJET**

La réalisation de cette maquette a été rendue possible grâce au concours d'établissements d'enseignements secondaires de l'Académie de Versailles. Elle a été coordonnée par David Grateau, doyen des inspecteurs de l'Education nationale au rectorat de Versailles et avec l'aide de Denis Rouchon, David Coullignon et François Herrault, directeurs délégués aux Formations professionnelles.

La Maquette a été réalisée au lycée Louis Girard à Malakoff par Séverine Marquet, assistée de Sébastien Grech, Marc-François Festin Dos Santos, Yvan Labarre, Léo Bui, sous l'égide d'Olivier Hermann, professeur de maquettes.

La modélisation des plans d'origine en CAO est l'œuvre de Guillaume Dethu au lycée Alexandre Denis à Cerny. Les ventilateurs ont été réalisés au lycée des Frères Moreau à Quincy-sous-Sénart par Loïc Appert. Les tables support ont été réalisées au lycée Jean Pierre Timbaud à Brétigny-sur-Orge.

La présentation au salon du Bourget a été rendue possible grâce à Nabia Pisi, Directrice déléguée à la formation professionnelle et technologique du Lycée Aristide Briand, métiers de l'aérien à Le Blanc-Mesnil.

L'ASSOCIATION AÉRO-EIFFEL 100

Constituée en 2012 à l'occasion du centenaire de la soufflerie Eiffel pour organiser un colloque à la DGAC en association avec la 3AF dans le cadre de la 47^e Conférence internationale d'aérodynamique appliquée, intitulée *Wind tunnel and computation: a joint strategy for flow prediction* et sous-titrée *1912-2012 centenary of the Eiffel wind tunnel* :

https://www.3af.fr/system/files/cahier_01_-_47eme_symposium.pdf

En 2013, Aéro-Eiffel 100 organisa, en partenariat avec l'ONERA, le GIE S2A et le CSTB, une exposition à la mairie du XVI^{ème} arrondissement, intitulée : 100 ans de souffleries depuis Eiffel :

https://www.3af.fr/sites/default/files/events/flyer_version_finale_bd.pdf

Bruno Chanetz, président du comité scientifique de l'exposition, prononça le discours d'inauguration :

<https://www.3af.fr/article/100-ans-de-souffleries-depuis-eiffel-discours-d-ouverture>

Cette exposition qui comprend 45 kakemonos, a été reprise en totalité au musée de l'Air et de l'Espace en 2013-2014, sans les maquettes en 2014 dans le hall de la DGAC et partiellement en maintes occasions : soufflerie Hispano-Suiza de Bois-Colombes, journées académiques Air et Espace de Montpellier, etc.

L'association est présidée par Martin Peter, conservateur de la soufflerie Eiffel. ■

DOSSIER ABRAHAM DE MOIVRE AUX COMPTES RENDUS DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

SÉRIE MÉCANIQUE, VOL. 347 (2019) N°7 CHEZ ELSEVIER MASSON

par Bruno Chanetz



La France est redevable à un Irlandais, le Dr Conor Maguire¹, ancien haut fonctionnaire européen retraité au château de Beaulieu sur les bords de Loire, d'avoir organisé à Saumur le 25 novembre 2017 un colloque commémorant les 350 ans de la naissance du savant Abraham de Moivre. ALUMNI-ONERA était partenaire de ce colloque, Bruno Chanetz assurant la présidence du comité scientifique.

Abraham de Moivre, huguenot, avait étudié au sein de l'Académie protestante de Saumur, avant de se réfugier à Angleterre, à l'âge de 20 ans, lors de la révocation de l'édit de Nantes en octobre 1685.

L'Académie des Sciences vient de publier le présent dossier historique et scientifique relatif à ce mathématicien, né Français en 1667, mais qui fut élu membre étranger de l'Académie des Sciences de Paris le 27 juin 1754, quelques mois seulement avant sa mort survenue à Londres le 27 novembre de la même année. Ce fascicule, dont le portrait d'Abraham de Moivre, dessiné par Sylvie Taugourdeau, maire de Dampierre-sur-Loire, orne la couverture, rend un juste et mérité hommage à ce fameux géomètre que la France a droit de revendiquer sur l'Angleterre, selon Fontenelle, le neveu de Corneille.

La contribution initiale de ce cahier retrace la vie d'Abraham de Moivre. Marie-Claire Coët (ONERA), met l'accent sur son œuvre en rappelant que ses travaux sur les rentes viagères sont à l'origine de la création de la première assurance vie.

Le deuxième article offre un panorama de la vie à Saumur à l'époque où Abraham de Moivre y étudiait au sein de son académie protestante. Il émane de Susi Calvert, pour qui la vie de cette cité n'a pas de secrets.

L'article suivant relate les travaux scientifiques d'Abraham de Moivre. Deux professeurs de mathématiques de l'Université d'Angers, Piotr Graczyk et Jean-Jacques Loeb, rendent à Abraham ce qui lui appartient et uniquement ce qui lui appartient. Ainsi on découvre que « sa » célèbre formule trigonométrique utilisant les nombres complexes fut de fait essentiellement démontrée par Euler, mais qu'en revanche l'équivalence de factoriel $n!$, connue sous le nom de formule de Stirling, est due à Abraham de Moivre. Cet article traite aussi de l'aspect de l'enseignement de la théorie des probabilités grâce à Emmanuelle Guernier, professeure de mathématiques au lycée Duplessis Mornay de Saumur.

L'article de Bruno Chanetz, donne une application des nombres complexes pour le calcul des profils d'aile d'avion. Cette méthode met en valeur l'apport des mathématiques pour l'analyse de problèmes physiques. Abraham de Moivre, qui était un esprit concret, n'aurait pas renié cette belle résolution mathématique, utilisant les nombres complexes, domaine dans lequel il s'était brillamment illustré.

Le dernier article, dû au Dr Conor Maguire, nous fait suivre les empreintes numériques d'Abraham de Moivre dans la poussière de l'histoire grâce à une remarquable analyse bibliométrique, que permet désormais le bon emploi d'internet.

Commande du fascicule, rédigé en Français, au prix de 12 € (frais d'envoi inclus) par courriel auprès de Jean-Michel Blengino, j.blengino@elsevier.com. ■

¹ Ancien délégué national irlandais auprès de la Commission Européenne dans le domaine de la politique de recherche scientifique, et par la suite consultant techno-économique auprès de la Commission et d'autres organisations internationales



Association Aéronautique
et Astronautique de France

www.3af.fr