



Association Aéronautique
Astronautique de France

LA SOCIÉTÉ SAVANTE DE L'AÉRONAUTIQUE ET DE L'ESPACE

A decorative graphic on the left side of the page features several concentric, semi-circular arcs in shades of gray, emanating from a central point. A stylized human figure is partially visible on the far left, with its head and neck area overlapping the arcs.

90^e ANNIVERSAIRE DU CENTRE ONERA DE LILLE

Recueil d'articles parus dans la Lettre 3AF

DÉCEMBRE 2021

SOMMAIRE

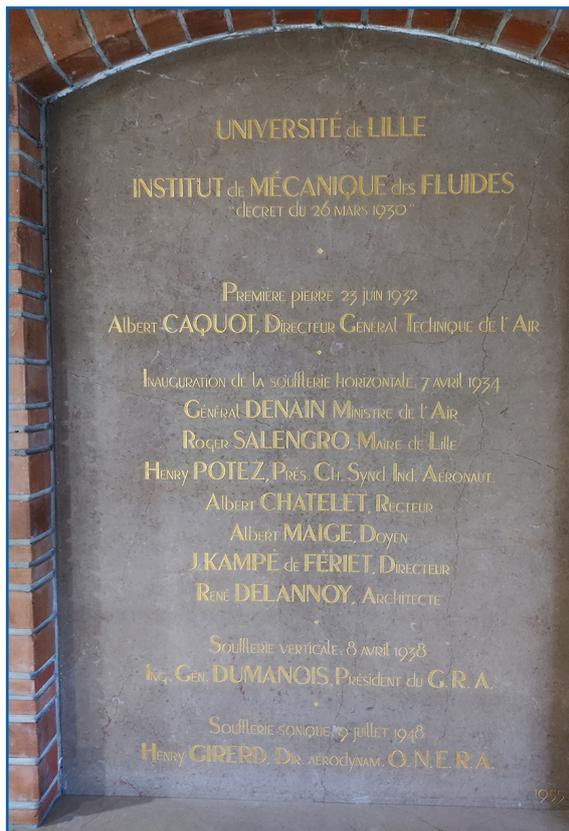
Préface <i>Bruno Chanetz, président du Haut conseil scientifique</i>	3
■ AÉRONAUTIQUE	
DRONES @ONERA : VERS UNE MAÎTRISE DU RISQUE ET DES NUISANCES SONORES <i>par Laurent Planckaert et Quentin Gallas</i>	6 - 14
LA TOUR DE CRASH DU CENTRE ONERA DE LILLE <i>par Jacky Fabis, Julien Berthe et Gérald Portemont</i>	15 - 18
LA PLATE-FORME CONTRAERO <i>par Bruno Mialon</i>	19 - 22
UNE EXPERTISE DU CENTRE ONERA DE LILLE : CONCEVOIR ET RÉALISER DES MAQUETTES AÉRODYNAMIQUES DE HAUTE TECHNICITÉ <i>par Frédéric Ternoy, Gilles Outtier et Emmanuel Eglinger</i>	23 - 30
CONTRÔLE D'ÉCOULEMENTS EN AÉRODYNAMIQUE <i>par Bruno Mialon</i>	31 - 38
■ HISTOIRE	
LE CENTRE DE LILLE DE L'ONERA - INSTITUT DE MÉCANIQUE DES FLUIDES DE LILLE. 90 ANS AU SERVICE DE L'AÉRONAUTIQUE <i>par Eric Deletombe et Jean-Luc Charles</i>	39 - 45
JOSEPH KAMPÉ DE FÉRIET ET LES DÉBUTS DE L'INSTITUT DE MÉCANIQUE DES FLUIDES DE LILLE (1930-1940) <i>par Bruno Chanetz</i>	46 - 49

PRÉFACE

Ce fascicule est consacré au 90^e anniversaire du centre ONERA de Lille, dont le décret du 26 mars 1930 portant création de l'IMFL (Institut de Mécanique des Fluides de Lille) est le point de départ. Dès l'année suivante en 1931 cet institut débute ses recherches afin de constituer un centre d'enseignement supérieur et de recherches scientifiques dans les domaines de l'aérodynamique et l'hydrodynamique. Et le 23 juin 1932, Albert Caquot, directeur général technique de l'Air, pose la première pierre du bâtiment qui abrite encore aujourd'hui l'essentiel des activités du centre. C'est donc plus précisément cet événement qu'on commémorera en juin 2022, sachant que c'est seulement le 7 avril 1934 que fut inaugurée la soufflerie horizontale en présence du ministre de l'Air le général Denain, du Maire de Lille Roger Salengro, du président de la chambre syndicale de l'industrie aéronautique Henri Potez et du premier directeur Joseph Kampé de Fériet.

Ce recueil présente les diverses études et recherches effectuées actuellement sur le centre ONERA de Lille. Les activités concernant les drones sont décrites sous l'angle de la maîtrise du risque et des nuisances sonores.

La tour de crash, inaugurée en 2002, fait partie des installations phares de l'ONERA à Lille. Son histoire, de sa conception à son utilisation la plus récente, est racontée dans ces pages.



Plaque de marbre figurant dans le hall d'entrée du centre ONERA de Lille - crédit Maxime Ducrocq

Le centre de Lille héberge également l'atelier des maquettes de l'ONERA, qui conçoit et réalise des maquettes de haute technicité. Ces dernières sont testées dans toutes les souffleries de l'ONERA.

Le centre ONERA de Lille possède ses propres souffleries aérodynamiques. Les principales installations du Centre étaient à sa création, une soufflerie horizontale basse vitesse et un bassin hydrodynamique. En 1938 une soufflerie verticale fut édifiée. De nos jours certaines installations font partie de la plateforme CONTRAERO qui rassemble des moyens d'essais appartenant à quatre laboratoires implantés à Lille et à Valenciennes, en vue d'apporter une réponse globale aux problèmes du contrôle des écoulements aérodynamique, thème également abordé dans ce recueil.

Ce fascicule se termine par des articles historiques rappelant les débuts de l'Institut de Mécanique des Fluides de Lille, notamment à travers la personnalité de son directeur-fondateur Joseph Kampé de Fériet.

Comme l'a souligné le président de l'ONERA Bruno Sainjon dans la préface d'une Lettre 3AF¹ parue en 2021 : « *L'ONERA est fier de compter un centre de recherche à Lille dans cette région des Hauts-de-France, si riche de son tissu industriel et académique* ». Cette activité aéronautique s'inscrit dans une tradition historique qui avait été également évoquée en 2020 au cours d'un congrès² organisé à Méaulte en l'honneur d'Henry Potez.

Bruno Chanetz
président du Haut conseil scientifique

-
- 1- Lettre 3AF n° 48 spéciale Hauts-de-France (mai-juin 2021)
 - 2 - Lettre 3AF n° 45 (novembre-décembre 2020)

DRONES @ONERA : VERS UNE MAÎTRISE DU RISQUE ET DES NUISANCES SONORES

par Laurent Planckaert et Quentin Gallas, ONERA

CONTEXTE : USAGE DES DRONES ET DOMAINES SCIENTIFIQUES ASSOCIÉS

L'utilisation de systèmes de drone (Unmanned Aerial System, UAS) est en croissance forte, en particulier dans le domaine professionnel civil. Les cas d'usages de ces aéronefs sont nombreux, il peut être compliqué de s'y retrouver. Dans le cadre d'un travail interne, les équipes de l'ONERA ont cherché à les classer, et ont abouti à la présentation suivante, qui couvre la plupart des domaines d'intérêt :

- observation / surveillance,
- exploration,
- drones pour l'événementiel (chorégraphie, médias, films, tourisme, etc.),
- transport,
- travail aérien,
- relais de communication,
- interception de cibles,
- lutte anti-drones,
- drone de combat.

Afin de rendre possible un développement sûr des utilisations de drones pour ces cas d'usage, des travaux doivent être menés que l'on peut classer dans les domaines scientifiques suivants :

- conception de drones ou de systèmes de drone,
- systèmes embarqués pour la navigation,
- charges utiles pour la mission et traitements associés,
- facteurs humains et interactions homme-système (IHS),
- lutte anti-drone.

Ces problématiques comportent des verrous qu'il faudra pouvoir lever si on veut mener à bien les opérations relatives aux cas d'usage mentionnés plus haut en toute sécurité. Cet aspect de sécurité du vol est un facteur commun à tous les usages et à tous les domaines scientifiques. Il est également au cœur de la préoccupation de la réglementation. Ainsi la France s'est dotée au cours des dernières années d'une réglementation drone novatrice en adéquation avec les progrès techniques réalisés. Depuis, la réglementation est devenue une compétence de l'agence européenne de sûreté aérienne (EASA), et elle se déploie progressivement.

LA STRUCTURATION DE LA RÉGLEMENTATION EUROPÉENNE

En Europe, la nouvelle réglementation est entrée en vigueur en 2020 et remplacera progressivement les réglementations nationales. Cette réglementation s'appliquera à tout type de drones et opérations. Les principes généraux de cette réglementation sont :

- d'assurer la sécurité des personnes, des biens et des autres aéronefs,
- d'être pensée sur la base d'une analyse du risque que fait peser le vecteur considéré, avec son cas d'usage associé et ses mesures éventuelles de réduction du risque, et sur les pré-requis proportionnés à ce niveau de risque,
- de faciliter le respect de la loi, de la vie privée et contribuer à la sûreté,
- de contribuer à la protection de l'environnement (notamment par la réduction du bruit),
- d'intégrer le trafic basse altitude de drone via l'U-Space.

Le règlement 2020/639 du 12 mai 2020 définit trois catégories d'opérations d'UAS illustrées par la figure 1.



Figure 1. Représentation schématique de la réglementation européenne

Ces catégories correspondent aux niveaux de risques évoqués plus haut :

- la catégorie « open » lorsque le drone et son opération considérée ne représentent qu'un risque faible ; les prérequis seront alors limités ;
- à l'autre extrémité, la catégorie « certified » lorsque ce risque est élevé ; les prérequis seront alors analogues à

AÉRONAUTIQUE

DRONES @ONERA : VERS UNE MAÎTRISE DU RISQUE ET DES NUISANCES SONORES

ce qu'est aujourd'hui une certification pour l'aéronautique traditionnelle ;

- entre deux, une zone intermédiaire, le « specific », lorsque le risque est trop élevé pour autoriser des vols avec très peu de pré-requis (open), mais pas assez pour demander une véritable certification et tout ce que cela exige (« certified »).

La réglementation européenne est désormais définie pour la catégorie open, avec une période de transition (2021 et 2022) pour permettre aux parties prenantes de s'adapter.

La méthode SORA (*Specific Operations Risk Assessment*) développée à l'origine par JARUS (un groupe informel international), et repris à son compte par l'EASA, s'applique aux opérations de la catégorie spécifique (voir Figure 2). Cette méthode analyse le risque impliqué par la mise en œuvre d'un drone donné dans une opération donnée, en recensant les types de risque (sol : chute sur personne ou infrastructure, air : rencontre avec un autre aéronef), en évaluant la probabilité, en proposant des mesures pour en limiter l'occurrence ou en atténuer les effets. C'est-à-dire en maîtrisant le risque global associé à l'opération considérée. Pour faciliter l'approbation des opérations, l'EASA a déjà développé deux scénarios standards d'opération et développe des « études de sécurité prédéfinies » (*Pre-defined risk assessment, PDRA*), qui déclinent la SORA pour un type donné d'opération. Plusieurs PDRA ont déjà été ou seront prochainement publiées par l'EASA.

L'évaluation du risque basé sur la SORA concerne donc aussi bien les opérations que les drones opérés. Un des paramètres importants de l'analyse SORA est la robustesse, notion qui prend en compte à la fois le niveau d'intégrité et le niveau d'assurance (méthode de preuve) notamment en ce qui concerne l'apport des mesures de réduction du risque (définition de zones de risque tampon...) sur le niveau de risque initial. Pour ces derniers, il y a donc nécessité de développer des méthodes de preuve relatives aux phénomènes mal connus (notamment au voisinage des limites de l'enveloppe de vol) si on veut pouvoir améliorer la robustesse et permettre l'émergence d'opérations de catégories plus risquées. L'utilisation d'essais en conditions maîtrisées pour quantifier l'impact de ces phénomènes peut alors se montrer pertinente voire indispensable.

Cet effort de formalisation de la réglementation se double d'un travail concomitant pour structurer l'espace aérien de façon à accueillir ces nouveaux usagers que sont les drones, en toute sécurité. Ainsi l'initiative européenne pour la gestion de l'espace aérien intégrant les drones, U-Space, s'appuie sur un ensemble de services futurs avec un haut niveau d'automatisation conçus pour rendre possible l'accès d'un nombre grandissant de drones à l'espace aérien, d'une manière sûre, efficace et sécurisée, et notamment dans des contextes urbains (voir Figure 3).

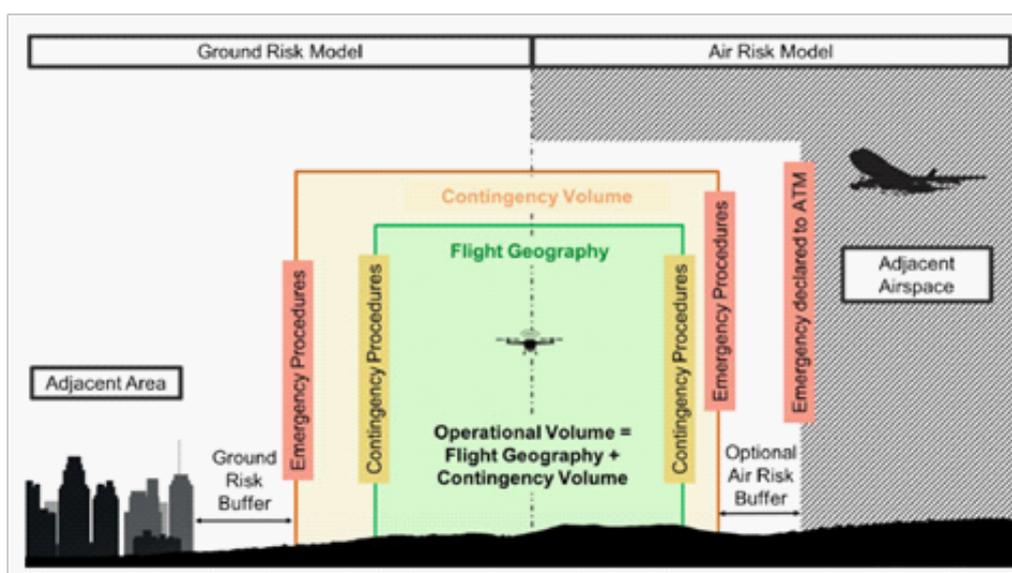


Figure 2. Diagramme sémantique de la SORA (JARUS 2019)

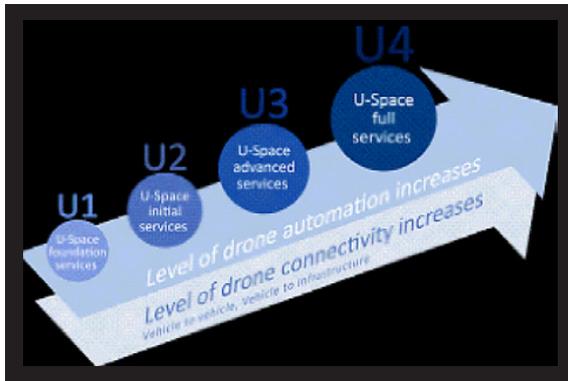


Figure 3. Logique de mise à disposition progressive des services U-space (source SESAR JU 2018)

Ces services seront des auxiliaires des drones leur permettant, grâce à une aide fournie par l'extérieur, de favoriser des trajectoires limitant l'influence d'aléas météorologiques ou réduisant fortement le bruit ressenti par la population environnante.

LE RÔLE DE L'ONERA

Dans ce contexte, comme sur ses autres domaines d'intervention, l'ONERA a une double mission : innover pour l'industrie ; apporter son expertise à l'État. Dans le domaine des drones, il répond à cette double fonction spécifiquement en vue des nouveaux usages des drones et des risques et nuisances associés.

Ainsi, l'ONERA est très présent dans le Conseil pour les drones civils, instance pilotée par la DGAC, au profit de toute la filière. La convention DGAC-ONERA PHYDIAS sur les drones lui permet de développer des travaux de recherche, et d'apporter une expertise à la DGAC. Cette recherche, disséminée à travers la filière, porte sur des thèmes tels que la gestion de l'espace aérien pour les drones et l'effet de l'aérodynamique, les facteurs humains, l'analyse des risques, la certificabilité des systèmes adaptatifs et des systèmes de perception. L'expertise est apportée dans le contexte des nouvelles architectures de drones, et des nouvelles applications plus risquées.

Ces apports peuvent être illustrés dans deux domaines clefs pour les drones civils :

- Sur l'une des briques essentielles pour la sécurité des drones, l'avionique, l'ONERA est présent depuis le début du programme AVOCETTES (AViOnique sûre et séCuriséE pour nouvelles mobiliTés et auTonomiE – Surveillance étendue), avec Safran, Thales et Orange. Le projet développe une avionique certifiable pour les

opérations dites « de grande élancement » des drones (missions de surveillance sur plus de 100 km).

- Pour préparer l'une des applications recherchée mais risquée, la mobilité urbaine aérienne, l'ONERA, aux côtés d'Airbus Helicopters, Thales et Safran, dans le cadre du projet MOSQUITO (« MOBilité et logiStiQue Urbaine – Pré étude vers une future règlementatiOn »), pose les bases sur les grands thèmes que sont la sécurité, l'acoustique, l'environnement, l'électromagnétisme et la cybersécurité. L'ONERA, par exemple, y travaille sur une approche d'estimation rapide pour l'environnement sonore urbain.

LES ACTIVITÉS ET MOYENS D'ESSAIS DRONES EN RÉGION HAUTS-DE-FRANCE À L'ONERA

Les activités de l'ONERA en région Hauts-de-France s'appuient sur le triptyque Expérimentation – Simulation – Modélisation. On y retrouve principalement deux grandes activités : une sur la problématique de la navigation en environnement perturbé ; l'autre sur la problématique de la sécurité des biens et des personnes en cas de crash de drone. Au niveau des moyens d'essais, le centre ONERA de Lille s'appuie principalement sur les souffleries basse vitesse L1, L2 et SV4 (le lecteur pourra se référer à l'article sur la plateforme CONTRAERO pour les caractéristiques techniques), ainsi que sur le bâtiment B20. Ce dernier est un hall d'essai indoor de 90 m x 20 m x 20 m, muni d'un générateur de rafale pouvant simuler des vents traversiers jusqu'à 5 m/s, ainsi que d'une catapulte pour « lancer » des drones et des maquettes d'une vingtaine de kg jusqu'à 40 m/s (voir Figure 4). Un système de trajectographie optique temps réel par multi-caméras synchronisées complète le moyen d'essai.

Concernant la problématique de la navigation en environnement perturbé, l'ONERA mène des recherches sur un principe de navigation autonome depuis plusieurs années, selon le schéma de la figure 5.

L'idée est de fournir au drone une carte de l'aérodynamique, que celui-ci saurait réactualiser en estimant le vent qu'il rencontre. La loi de commande aurait à prendre en charge l'incertitude de prévision des perturbations venteuses tandis que la partie navigation, en utilisant les prédictions fournies par les cartes de vent, aurait pour but d'éviter les zones où le vol serait difficilement contrôlable.

AÉRONAUTIQUE

DRONES @ONERA : VERS UNE MAÎTRISE DU RISQUE ET DES NUISANCES SONORES



Figure 4. Vue extérieure du bâtiment B20, de la catapulte de lancement pour essais d'impact de drones et du générateur de rafale pour essais d'aérodynamique

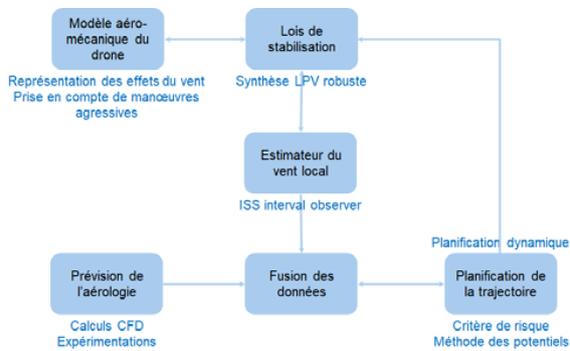


Figure 5. Schéma de principe d'une navigation autonome en environnement venté

Ce schéma repose sur les 3 briques technologiques que sont :

- la modélisation des effets du vent sur le drone,
- le contrôle du drone en présence de vent,
- la prévision de l'aérodynamique ou pour le moins une connaissance de l'aérodynamique.

Une grande partie des drones actuellement utilisés sont mus par plusieurs rotors assurant la sustentation ou la propulsion. La modélisation aérodynamique doit prendre en compte les interactions entre les rotors.

La figure 6 montre l'impact de ces interactions lors d'un vol de drone en avancement. Le graphique de gauche illustre les régimes moteur au cours du vol, tandis que sur celui de droite est présentée une restitution du moment de tangage utilisant un modèle aérodynamique sans prise en compte de l'interaction entre rotors. Des effets de tangage marqués sont ainsi visibles sur la restitution du moment dû à la contribution de portance des rotors alors que le drone est en vol équilibré (moment global mesuré quasiment nul). Ceci résulte de l'effet d'interactions entre les rotors : le rotor en amont de l'écoulement est plus efficace que celui en aval alors que dans un modèle classique cet effet est ignoré.

Ce phénomène a pu être étudié plus finement dans la soufflerie basses vitesses L2 du centre ONERA de Lille (voir Figure 7) et retrouvé à partir de simulations utilisant le code ONERA PUMA (Potential Unsteady Methods for Aerodynamics). On y voit l'impact des rotors entre eux sur le couple de traction lorsque le drone est incliné. Ces résultats mettent en évidence que les interactions rotor-rotor peuvent avoir un impact important sur le comportement en vol en environnement venté du fait des moments produits sur l'engin. Ainsi un coup de vent pourrait provoquer un fort moment de tangage ayant tendance à retourner le drone.

DRONES @ONERA : VERS UNE MAÎTRISE DU RISQUE ET DES NUISANCES SONORES

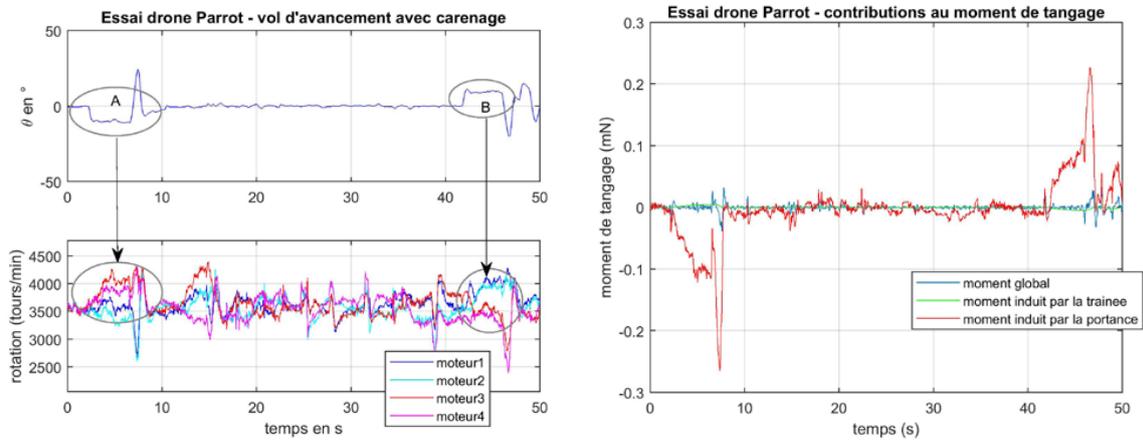


Figure 6. Essai en vol d'un drone Parrot au laboratoire B20

L'intérêt de l'approche duale expérience - simulation que l'ONERA met régulièrement en œuvre est parfaitement illustré ici : à partir d'une base de données expérimentale de validation, l'utilisation d'un code numérique est possible et pourra être utilisée pour interpoler et extrapoler des régimes de fonctionnement non couverts par l'expérience. L'approche numérique permet ensuite de valider et d'utiliser la brique « modélisation des effets du vent sur le drone » illustrée Figure 5.

En plus de permettre d'étudier les qualités de vol et la conception de lois de contrôle efficaces, une modélisation précise des effets de vents peut permettre l'estimation indirecte des composantes de vents et s'avérer être une aide précieuse à la reconnaissance de la situation aérologique dans laquelle se trouve le drone. Ainsi, on peut exploiter ce phénomène d'interaction en utilisant la mesure des puissances des différents rotors afin de

permettre de remonter à la vitesse du drone par rapport au vent dans un domaine de vol assez important (voir Figure 8). Comme on pouvait s'y attendre, sur cette Figure, on remarque qu'à grande vitesse les effets d'interactions sont négligeables ; il en est de même aux grandes incidences et donc que les puissances des rotors sont identiques. Cependant aux faibles vitesses jusqu'à des incidences assez importantes de l'ordre de 40° (hors domaine de Vortex Ring State), une relation univoque existe entre niveaux de puissance rotor et paramètres de vitesse, il en est de même sur une plage plus réduite en incidence pour les vitesses par rapport au vent plus élevées (30 km/h dans ce cas).

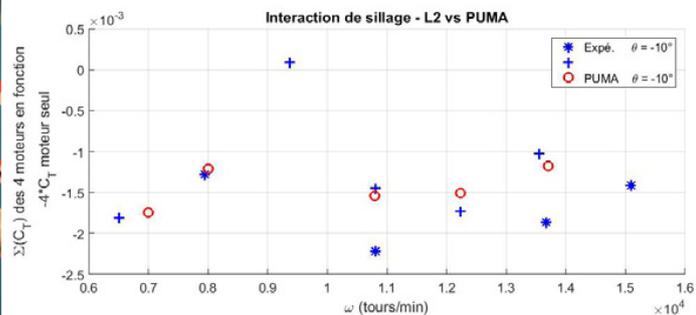


Figure 7. Essai drone dans la soufflerie L2 du centre ONERA de Lille (interaction rotors)

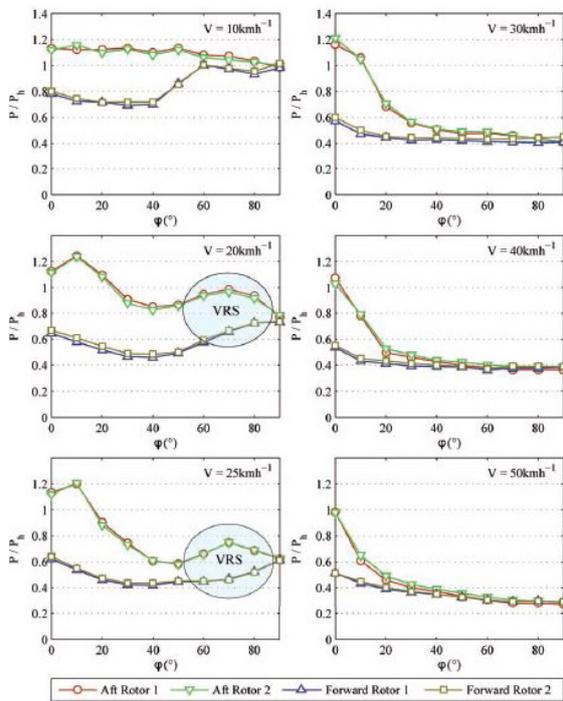


Figure 8. Puissance des rotors en vol d'avancement (travaux de la RMIT University)

Les travaux de thèse de G. Perrozi (bourse ONERA – Région Hauts-de-France), codirigée par l'INRIA et l'ONERA, ont aussi pu montrer en simulation l'intérêt de techniques de commande novatrices par modes glissants. Ces techniques de lois de commandes (voir Figure 9) permettent de prescrire un comportement dynamique désiré pour le drone, tout en assurant la robustesse de la loi par rapport à des perturbations aérologiques bornées et en réduisant significativement le phénomène de chattering (oscillation à haute fréquence de la commande) fréquent avec ce type de techniques. Ces algorithmes de contrôle vont pouvoir être mis en œuvre dans le bâtiment

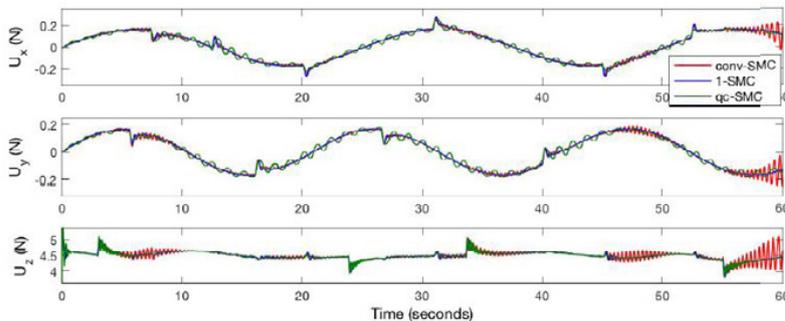


Figure 9. Évolution de la commande et loi de contrôle de tenue en position en Z

$$S_i = \dot{e}_i + \alpha_i e_i, \quad \alpha_i > 0$$

$$U_z = \frac{m}{\cos \theta \cos \phi} (g - \ddot{u}_z - \ddot{z}_{des} + \alpha_z \dot{e}_z)$$

$$\ddot{u}_z = -\beta(X) \text{sign}(S_z)$$

B20 du centre ONERA de Lille, en faisant évoluer le drone hors et à l'intérieur du générateur de rafale. Ces travaux en cours permettent de considérer la brique « contrôle du drone en présence de vent » de la figure 5.

Un autre aspect du problème est celui de la prédiction/modélisation de la scène aérologique. Des études en simulations CFD (en utilisant des méthodes de type LES ou Lattice Boltzmann) sont menées en collaboration notamment avec le LHEEA de Nantes autour d'environnements simples (tour isolée, voir Figure 10) ou plus complexe (village de combat de Caylus, voir Figure 11). L'un des intérêts de ces simulations est de fournir des bases de données pour la conception de lois de commande, la recherche de métriques de risque ou le test de stratégies de navigation.

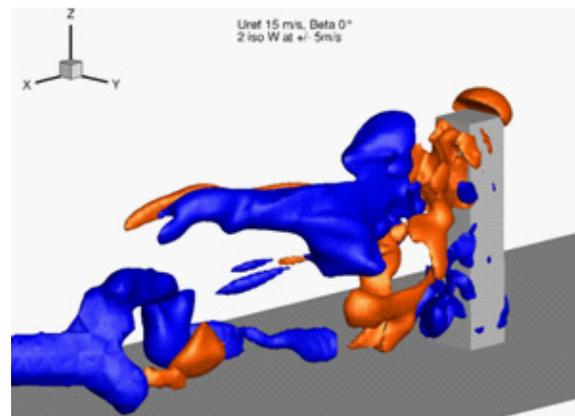


Figure 10. Simulation LES de l'écoulement derrière une tour

L'écoulement derrière la tour montre notamment l'existence de « bouffées » de tourbillons en aval des bâtiments causant des vents verticaux de vitesse importante pouvant se révéler dangereux pour le vol d'engins à voilures tournantes.

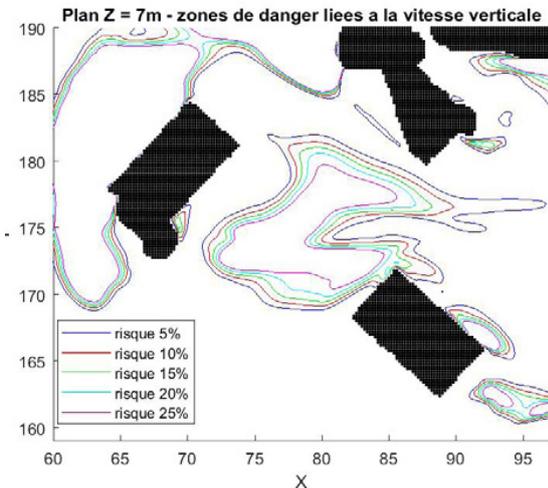
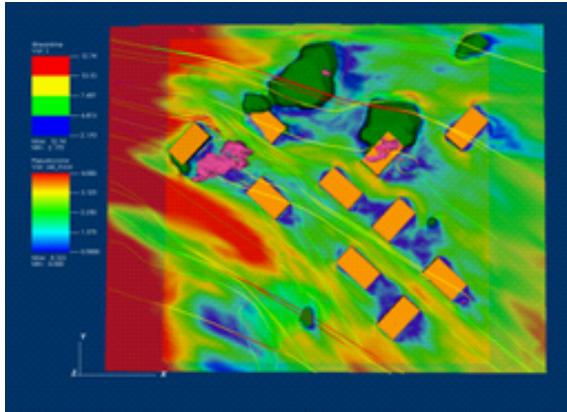


Figure 11. Simulation CFD Lattice Boltzmann de l'aérodynamique dans un village (en haut), évaluation des zones de danger liées aux écoulements ascendants (en bas)

Ainsi, durant un vol de descente, un drone peut traverser des zones à risque, en fonction de sa vitesse de descente par rapport à celle du vent, où il peut faire face au phénomène de Vortex Ring State bien connu dans le domaine des hélicoptères (voir Figure 12). Dans ce cas, on peut assister à une perte de contrôle de l'aéronef avec de fortes variations de la sustentation (voir Figure 13). Si on considère que la probabilité de rencontrer ce phénomène est fonction de la vitesse verticale locale rencontrée par le drone, on remarque que cela conduit à une exclusion d'une zone importante de vol (voir Figure 11).

Ces travaux participent à la brique technologique de prévision de l'aérodynamique, ou à minima une connaissance de celle-ci, tel que montrée sur la figure 5.

Comme l'illustre les exemples précédents, le projet global d'une navigation autonome en environnement

venté est donc bien engagé, avec encore de nombreux défis techniques et scientifiques à relever.

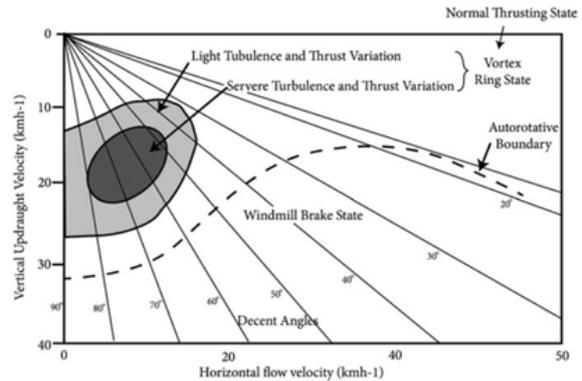


Figure 12. Zone de Vortex Ring State (vol en descente)

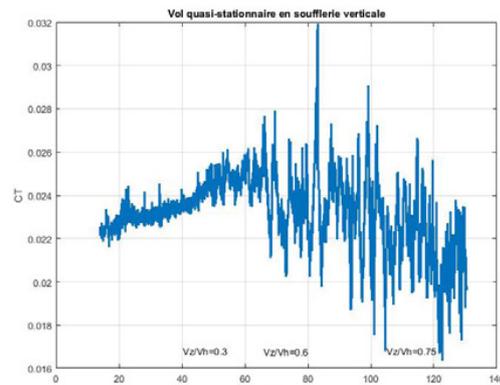


Figure 13. Vol de drone soumis à des rafales de vents verticaux, mesuré dans la soufflerie verticale SV4 du centre ONERA de Lille

En parallèle de l'axe de recherche orienté mécanique des fluides et automatique, d'autres travaux ont lieu portant sur la mécanique des structures. Ainsi des études d'effets d'impact de drone sur les personnes dans le cadre notamment des projets GIS sont aussi menés au centre ONERA de Lille (voir Figure 14). Dans le cadre de la première convention financée par la DGAC, l'ONERA et l'IFSTTAR ont étudié la chute de drones de masse inférieure à 900 g et ses conséquences : dangerosité sur les humains, selon la structure, la masse, la vitesse et la conception de ces drones. Cette étude essentiellement expérimentale a été réalisée à l'aide d'essais d'impacts sur des têtes de mannequin utilisées pour des crash-tests. La suite de ces travaux (menés dans le cadre de la seconde convention GIS II financée par la DGAC) doit maintenant permettre la mise en place de modèles numériques qui permettront une meilleure prise en compte de la variabilité inter-individus pour l'étude des conséquences de l'impact et

AÉRONAUTIQUE

DRONES @ONERA : VERS UNE MAÎTRISE DU RISQUE ET DES NUISANCES SONORES

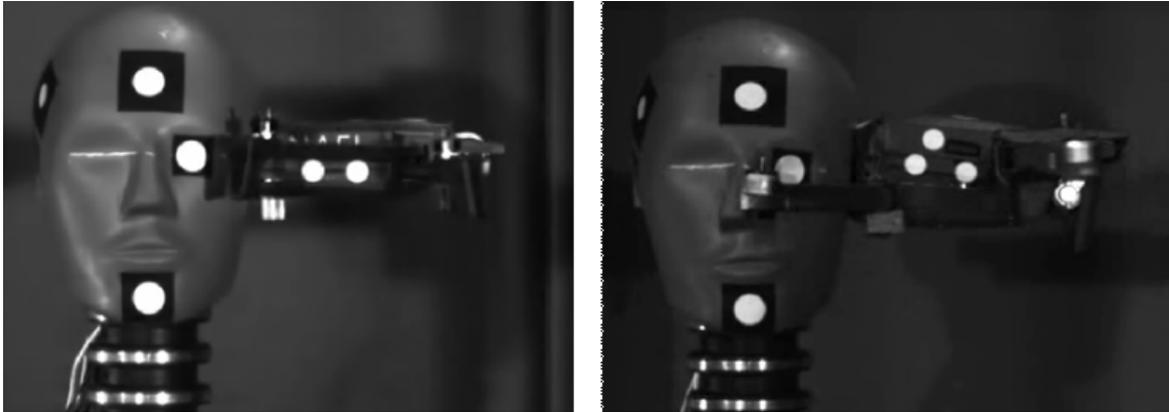


Figure 14. Mesure d'impact de drones sur un mannequin à l'ONERA (à gauche un drone Parrot Anafi de 310 g, à droite un drone DJI Mavic Pro de 730 g)

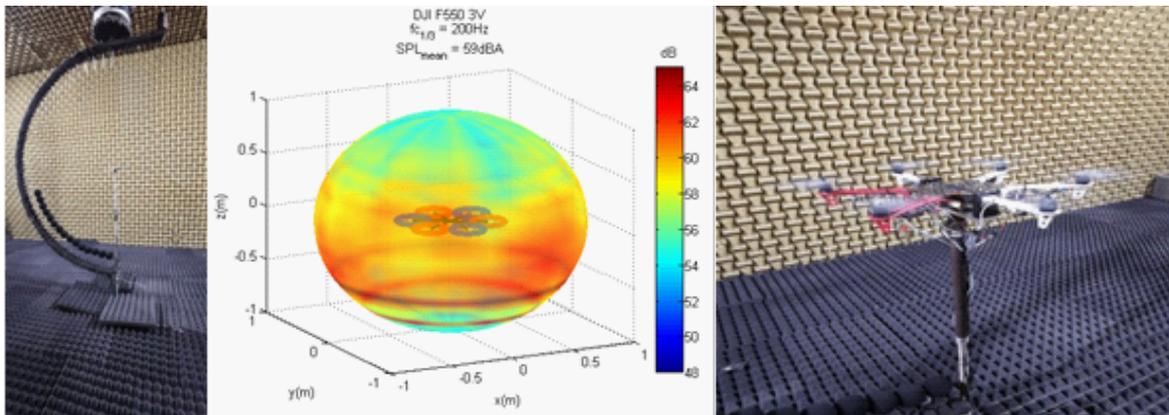


Figure 15. Mesures acoustiques sur drones en chambre anéchoïque au centre ONERA de Châtillon

une meilleure compréhension des transferts d'énergie lors de ces impacts. La gamme de drones étudiés est également plus importante, s'étendant de 250 g à 4 kg. Une nouvelle campagne d'essais sera prochainement menée en utilisant la catapulte du laboratoire B20 du centre ONERA de Lille (voir Figure 4).

A noter que parallèlement aux activités liées à la sécurité du vol de drone, l'ONERA met en œuvre dans ses souffleries du centre de Lille des moyens d'évaluer la signature acoustique des drones en utilisant les compétences acquises en chambre anéchoïque (voir Figure 15).

Pour finir, on peut souligner le lien fort avec la Région Hauts-de-France et les collaborations entre les laboratoires de la Région, qui, à travers différents leviers financiers, permet de soutenir ces activités. On peut noter les cofinancements de bourses doctorales par la Région, ainsi que le recrutement de post-doctorants par

le projet ELSAT2020, cofinancé par l'Union européenne avec le Fonds européen de développement régional, par l'État et la Région Hauts de France.

EXEMPLES DE QUELQUES INITIATIVES EN RÉGION HAUTS-DE-FRANCE

La région Hauts-de-France au travers de sa plate-forme multimodale e-valley située dans le Cambrésis s'intéresse à la complémentarité qu'apporterait le transport par drone entre hubs régionaux notamment pour les produits médicaux ou des pièces pour l'industrie qui nécessitent un transport rapide. En collaboration avec Survey Copter, filiale d'Airbus, des tests de transport de colis y sont réalisés (voir Figure 16).

On peut aussi citer la plate-forme UAV de l'université de technologie de Compiègne qui s'attache à aider à la validation expérimentale des recherches en contrôle commande et en robotique.



Figure 16. Plate-forme quadrimodale du futur e-valley (à gauche), test de transport sur longue distance à e-valley (à droite)

POUR CONCLURE

Les applications de drones se multiplient, tirant profit des promesses d'efficacité, d'économies, ou encore de précision qu'ils recèlent. En parallèle, la réglementation, devenue prérogative européenne, se structure. Cependant, ce foisonnement ne pourra donner lieu à de véritables marchés que si des développements techniques sont menés pour définir et atteindre le niveau de sécurité souhaitable, et maîtriser les nuisances (acoustiques, en particulier). Dans ce contexte, l'ONERA répond à sa double mission d'innovation au profit de l'industrie et d'expertise au service de l'État. Il le fait par son rôle majeur dans les projets structurant du domaine.

Le centre ONERA de Lille apporte son expertise unique, en particulier sur trois volets fondamentaux pour permettre le développement des drones : la modélisation de l'aérodynamique et la maîtrise de son effet sur la trajectoire des drones, l'analyse du risque lié à la chute des drones sur des personnes, l'analyse et la réduction de l'empreinte acoustique des drones.

Remerciements

Sont ici remerciés pour leur contribution à cet article nos collègues de l'ONERA Julien Berthe, Eric Deletombe, Bruno Mialon, Henry de Plinval ■

LA TOUR DE CRASH DU CENTRE ONERA DE LILLE

par Jacky Fabis, Julien Berthe et Gérard Portemont

Cette installation d'essais fait partie des installations emblématiques du Centre ONERA de Lille. Au travers de cet article est retracée l'histoire de cette installation depuis sa phase de développement et de conception, à ses évolutions et utilisations récentes.

LA GENÈSE DE L'INSTALLATION

L'évolution des aéronefs, les exigences de sécurité aérienne et le besoin d'aborder de futures conditions de vol conduisent les chercheurs à développer de nouveaux outils visant à reproduire et étudier des phénomènes de plus en plus complexes.

La sécurité est une composante clé des transports et un axe structurant pour la recherche aéronautique ; c'est ce qu'avait parfaitement intégré Francis Dupriez dans l'orientation des activités du centre ONERA de Lille, qu'il a dirigé de 1995 à 2001. Les premières recherches numériques menées dans sa Division de mécanique des structures » remontent aux années 80. Elles avaient rapidement mis en évidence le manque criant de données expérimentales fiables pour alimenter les simulations numériques permettant l'étude des situations d'impacts ou de crash des structures aéronautiques. C'est en commençant par développer en interne des moyens expérimentaux d'impacts structuraux et de caractérisation du comportement dynamique des matériaux et

des assemblages (sur vérin rapide, barre d'Hopkinson, lanceur à gaz, etc.) que de premières données dans un domaine de vitesses de déformation intéressant le crash (couvrant six décades) purent être mises à la disposition des équipes numériques. Ces données constituent les paramètres d'entrée indispensables au fonctionnement de tous les codes de simulation.

C'est en associant intimement, au sein d'une même équipe les compétences expérimentales et numériques, que les scientifiques du centre ont pu affiner au cours des décennies leurs connaissances des mécanismes non linéaires complexes d'endommagement et de ruine de sous structures. Sous l'impulsion de Pascal Geoffroy puis d'Eric Deletombe, dès le début des années 90, des collaborations régionales furent mises en place et renforcées notamment en 2003 au travers de la création d'un laboratoire commun avec le CNRS et l'université de Valenciennes, pour s'atteler à l'ampleur de la tâche sur un sujet gagnant chaque jour de l'importance. Rapidement, des résultats de niveau international, nombreux et stimulants, furent obtenus, grâce à un soutien financier constant de la région Nord-Pas-de-Calais, à la hauteur des engagements de l'ONERA (accueil de doctorants, enseignement, collaborations avec les industriels régionaux des secteurs automobile et ferroviaire sur cette thématique).



Figure 1. Construction de l'installation avec à gauche les fondations pour l'installation de la masse sismique et à droite l'ossature qui accueillera les 4 colonnes de la Tour.

A la même époque, le développement exponentiel des puissances de calcul permit d'envisager des simulations numériques de structures entières, pour lesquelles un moyen de tests permettant la validation des modèles restait à créer. Saisissant l'opportunité de pouvoir disposer de fonds structurels européens (FEDER), en appont des financements de la Région (Nord-Pas-de-Calais à l'époque, Hauts-de-France aujourd'hui) et de l'ONERA, que le projet de Tour de crash put voir le jour.



Figure 2. Vue en élévation de la zone d'impact de la Tour de crash

La prise en compte des limitations des moyens existants de l'époque, et l'anticipation des besoins à venir, permirent de définir les capacités de l'installation en accord avec le budget disponible. La conception s'orienta vers une tour constituée de 4 piliers en béton, de 15 m de hauteur, solidarités par des traverses horizontales (voir Figure 1). Chaque pilier fut équipé de 4 vérins horizontaux motorisés dont le rôle était de positionner les rails de guidage situés en leurs extrémités, afin de s'adapter à la taille du chariot d'impact ou de la structure à tester. L'installation dispose donc de chariots de tailles différentes, dont la masse peut être ajustée de 200 kilos à 1 tonne, pour accorder l'énergie nécessaire à chaque essai. En partie basse, la plateforme d'essais de 2m x 2m

est couverte de tables dynamométriques permettant la mesure des efforts appliqués à la structure testée. Cette plateforme d'essais est pré-chargée sur une masse sismique de 80 tonnes montée sur des amortisseurs situés en sous-sol et dont le but est de filtrer les réflexions parasites de l'impact, et autre bruit vibratoire parasite de l'environnement (la Tour de crash n'est en effet pas le seul moyen d'essai de dimension importante sur le Centre). Trois configurations d'essai sont possibles : largage libre, guidé ou écrasement par chariot lesté avec dans les deux derniers cas, possibilité de propulsion additionnelle par sandows. Dans la première phase d'exploitation les limites d'utilisation furent fixées à 15 m/s et 100 kJ.

Une fois précisées les caractéristiques principales du moyen d'essais, il est nécessaire de rappeler que l'objectif des essais de crash ou d'impact sur structures est de recueillir un maximum de mesures pertinentes et fiables, pour des conditions aux limites du chargement parfaitement maîtrisées, tout en gardant en tête les difficultés expérimentales suivantes :

- Les éprouvettes structurales sont onéreuses et les essais par définition destructifs, donc quasi-unique ne laissant pas le droit à l'erreur ou à l'à peu près.
- Les résultats de ces essais permettent de valider ou de recalculer des outils et méthodes de simulation numériques destinés à la conception des futures structures. Ils impactent donc indirectement leurs coûts de conception.
- Le fait de s'intéresser à la ruine des structures implique de traiter le comportement des matériaux au-delà de l'élasticité habituelle, en considérant leur domaine de non-linéarité : plasticité, endommagement (avec ses phases d'initiation, de propagation et de rupture), qui sont les plus gourmandes en termes de modélisation et de calcul.
- Les structures testées sont tridimensionnelles, multi matériaux (métaux, polymères, composites dont le comportement orthotrope ne simplifie pas la tâche) et aussi discontinues, avec de très nombreuses et diverses liaisons (rivetées, soudées, collées) apportant chacune ses propres problématiques et difficultés.
- Les chargements étudiés peuvent aussi être « multi-physiques » : couplage fluide/structure, notamment pour les problématiques d'amerrissage, de tenue des réservoirs au crash et aux sollicitations de type "coup de bélier hydrodynamique" consécutives aux agressions balistiques.
- Lors d'un même essai, les mesurandes sont variés : force, déplacement, déformation, pression, accélération, vitesse, température, etc. et relevés en tout point

AÉRONAUTIQUE

LA TOUR DE CRASH DU CENTRE ONERA DE LILLE

jugé pertinent de la structure. Les étendues de mesures peuvent s'étaler sur plusieurs décades, souvent trois, ce qui impose généralement une duplication de l'instrumentation pour couvrir tout le domaine de mesure avec la précision requise.

- En fonction de la vitesse d'essai, une attention particulière doit être apportée à la maîtrise des artefacts de mesure liés aux forces d'inertie, à la résonance des capteurs et à l'équilibre des forces.
- Les réponses étudiées sont par nature furtives et complexes, de quelques millisecondes à quelques centaines de millisecondes, imposant d'utiliser des technologies d'instrumentation présentant des bandes passantes très élevées, en complément de moyens de cinématographies rapides (voire ultra-rapide : 400,000 images/s pour la balistique, la détonique ou la fissuration), ceci afin d'être en mesure d'observer et de comprendre la phénoménologie et la physique des processus d'endommagement et de ruine.
- La nature tridimensionnelle des structures et la distribution spatiale hétérogène des déformations favorisent la généralisation du recours aux mesures de champ par stéréo-corrélation d'images à haute cadence, jusqu'à 20,000 images/s voire plus. Malgré les contraintes que cela induit sur les coûts, la synchronisation, l'éclairage, etc., cette technique permet en effet une comparaison calcul/essais plus riche, en confrontant les résultats d'essais et de simulation sur des surfaces entières.

Il n'en reste pas moins que la résolution de l'ensemble de ces spécificités expérimentales doit toujours être assujettie aux exigences prioritaires de sécurité tant pour le personnel, les équipements onéreux mis en place au plus près de la structure, que pour l'intégrité de la Tour de crash elle-même.

On comprend bien au vu de la complexité et la diversité des essais, que la faisabilité des essais sera traitée au cas par cas. Pour cela, le laboratoire a développé un modèle numérique de l'installation permettant d'identifier les points durs. Cette conception originale permet (théoriquement avec toutes les réserves liées aux limitations des capacités de calcul dynamique), lors d'un essai destructif, d'affiner préalablement par la simulation la configuration de l'essai en prenant en compte les éléments constitutifs de la Tour de crash et l'instrumentation mise en œuvre.

Cette installation inaugurée le 11 décembre 2002 dans le centre ONERA de Lille en impose par sa stature (voir Figures 1 et 2). Mais c'est essentiellement sa modularité, la

qualité de ses équipements et surtout l'expérience de ses équipes qui en font un moyen de recherche d'exception, d'envergure internationale.

Les résultats numériques validés par cette installation innovante fournissent - après transfert de compétences aux bureaux d'études concernés - données et modèles, permettant d'améliorer la conception, d'augmenter la confiance et d'optimiser les performances des appareils. Très vite reconnue, dès 2004, le commissaire européen à la recherche Philippe Busquin (voir Figure 3) vint, à ses pieds, souligner l'exemplarité des travaux réalisés par le tandem ONERA-DLR sur les nouveaux moyens du centre (voir la revue *Envergure* du 22 février 2004).



Figure 3. En 2004, présentation avant essai des spécificités de la tour de crash par son concepteur Jacky Fabis. À gauche Philippe Busquin (commissaire européen), au centre Denis Maugars (président de l'ONERA).

Depuis, l'installation a été mise à contribution dans de nombreux programmes principalement européens ou nationaux dont les plus notables sont : CRASURV (*Crash and Survivability*), CRAVHI (*CRashworthiness of Aircraft for High Velocity Impact*), CISIT (Campus international sur la sécurité et l'intermodalité dans les transports), SMAES (Smart Aircraft in Emergency Situation) du seventh framework programme, ADO (AIRBUS -DLR - ONERA), etc. (voir Figure 4). Ces recherches contribuent à faire progresser les connaissances dans le domaine dynamique, du crash, de l'impact ou même de l'explosion qui restent aujourd'hui au cœur des préoccupations de la communauté scientifique internationale.

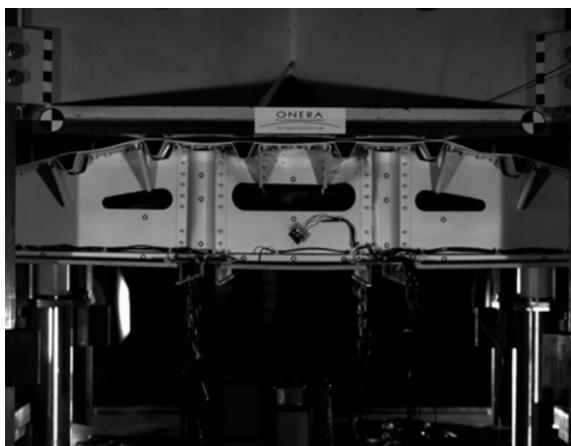


Figure 4. Essai de crash d'un tronçon de fuselage à la Tour de crash dans le cadre du projet ADO

Cette installation continue d'évoluer au cours du temps. Mentionnons ainsi les améliorations récemment réalisées dans le cadre des essais pour le projet FUI BALLOO. Pour cette étude, il était nécessaire d'accroître les capacités du moyen d'essais afin de réaliser des essais de crash de réservoirs souples d'hélicoptères avec des vitesses d'impacts plus proches des exigences de la certification (voir Figure 5). Pour cela, des sandows (élastiques) furent installés afin de pouvoir porter – en propulsant le chariot – la vitesse maximale de crash à 20 m/s. Pour la première fois aussi, les 150 kJ à l'impact furent atteints, ce qui augmente encore le potentiel de la Tour de crash de l'ONERA-Lille.

Aujourd'hui, l'installation – opérée par l'unité de Conception et Résistance Dynamique de l'ONERA/DMAS – reste une installation unique en Europe. Ses capacités et sa conception originale lui permettent aussi bien de réaliser des essais de crash sur des structures de taille importante que de permettre la réalisation d'essais de caractérisation sur des configurations de nouveaux matériaux nécessitant une énergie assez importante pour aboutir à la ruine de l'éprouvette. De plus, avec l'amélioration des caméras visibles rapides, il est maintenant possible d'instrumenter ces essais avec de la corrélation d'images numériques, ce qui permet d'obtenir des champs de déplacement sur la structure et donc d'accroître les capacités de dialogue essai-calcul. La Tour de crash continuera donc dans les années à venir à fournir des résultats permettant de valider et d'accroître les capacités de prédiction des simulations numériques pour le crash de structures, avec pour objectif de permettre à terme une réduction du cycle de développement des nouvelles structures. ■



Figure 5. Essais de crash de réservoirs souples d'hélicoptères avant impact à gauche et au cours de l'impact à droite.

LA PLATE-FORME CONTRAERO

par Bruno Mialon, ONERA

GENÈSE

Le transport et la mobilité sont l'une des priorités stratégiques de la région Hauts de France. C'est donc logiquement que les CPER (Contrat de projets état-région) soutiennent de grands projets régionaux structurants dans cette priorité :

- 2007-2014 : CISIT (Campus international pour la sécurité et l'intermodalité dans les transports),
- 2015-2020 : ELSAT 2020 (Écomobilité, logistique, sécurité et adaptabilité dans les transports à l'horizon 2020),
- et bientôt (2021-2027) RITMEA (Recherche et innovation en transports et mobilité eco-responsables et autonomes).

Pour fixer les idées, ce dernier projet s'appuiera sur un effectif de l'ordre de 350 chercheurs pour un total d'un peu moins de 100 équivalent-temps-plein, tous domaines confondus.

Ces projets CPER ont été l'occasion de définir une vision commune des orientations scientifiques pour chaque communauté de scientifiques concernée. Pour la mécanique des fluides, cette définition d'une perspective partagée a été orientée vers le contrôle d'écoulements dès

le projet CISIT. Ce choix tenait d'une part aux antécédents des chercheurs, d'autre part à la complémentarité des sujets traités et enfin à la nature des infrastructures d'essais disponibles au sein des quatre laboratoires concernés à Valenciennes (TEMPO intégré depuis dans le LAMIH) et Lille (ONERA et LML aujourd'hui regroupés dans le LMFL, IEMN).

Après de premières collaborations fructueuses dans le cadre du CISIT, l'idée de créer une plateforme de moyens techniques autour du CONTRÔLE AÉRODYNAMIQUE (CONTRAERO) s'est imposée assez naturellement vers fin 2013. CONTRAERO est un partenariat (accord signé début 2015) qui renforce les liens des établissements parties prenantes, par la mutualisation de compétences et de moyens complémentaires appliqués au secteur du transport. L'objectif poursuivi est une plus grande capacité d'impact et de valorisation des travaux et une plus grande synergie sur les sujets relatifs au contrôle d'écoulement.

MOYENS TECHNIQUES ACTUELS

Le périmètre des moyens expérimentaux est constitué de cinq composantes.

1. SOUFFLERIE DE COUCHE LIMITE « GRAND REYNOLDS » (LMFL)



Objectifs principaux

- Étude de la couche limite turbulente à grand nombre de Reynolds.
- Contrôle d'écoulement sur des maquettes 2D.

Dimensions

- Veine d'essais : 1 m×2 m, longueur 20 m transparente.
- Épaisseur de couche limite ~ 30 cm.

Configuration

- Circuit fermé.
- Circuit ouvert (visualisation par fumée).
- Mesure précise (HWA, PIV).

Vitesse d'écoulement de 0 à 10 m/s.

Température régulée à mieux que $\pm 0,2^\circ$.

Intensité de turbulence $< 0,3\%$.

2. SOUFFLERIE L1 (LMFL)



Objectifs principaux

- Étude de l'aérodynamique 2D ou 3D.
- Contrôle d'écoulement sur des maquettes .
- Application transport aéronautique.

Dimensions

- Veine d'essais : diamètre 2,4 m, longueur 2,4 m.

Configuration

- Type Eiffel, veine ouverte ou fermée.
- Nombreux montages en mâts, dard ou parois pour maquettes 2D et 3D.

Vitesse d'écoulement de 0 à 70 m/s.

Intensité de turbulence ~ 0,3%.

3. SOUFFLERIE L2 (LMFL)



Objectifs principaux

- Caractérisation et contrôle d'écoulement sur des maquettes 3D.
- Application transport terrestre, maritime, bâtiments.

Dimensions

- Veine d'essais : 6 m×2,4 m, longueur 12,5 m.

Configuration

- Type Eiffel, veine fermée.
- Couche limite atmosphérique.
- Montages en paroi (plateau tournant de 6 m de diamètre), en mâts ou en dard.

Vitesse d'écoulement 0 à 20,m/s.

Intensité de turbulence ~ 0,6%.

4. SOUFFLERIE VEINE LONGUE (LAMIH)



Objectifs principaux

- Application transport terrestre et maritime.
- Caractérisation d'écoulement 2D et 3D.
- Contrôle d'écoulement (actif et réactif).

Dimensions

- Veine d'essais : 2 m×2 m, longueur 10 m.

Configuration

- Circuit fermé.
- Veine optique (transparente).
- Plateau tournant (+- 45°).
- Balance aérodynamique 6 composantes.

Vitesse d'écoulement de 0 à 60 m/s.

Intensité de turbulence <0,6%.

5. PLATE-FORME TECHNOLOGIQUE (IEMN)



Objectifs principaux

- Conception et élaboration de MEMS/NEMS fluidiques.
- Centrale de micro/nano fabrication 1600 m²**
 - Ressources de lithographie, dépôts et gravures.
 - Ressources de visualisations.
- Centrale de micro/nano caractérisation 800 m²**
 - Caractérisations thermique, électrique et électro-mécanique.
- Laboratoire de micro-fluidique 50 m²**
 - Bancs de visualisation optique ultrarapide de micro-écoulements.
 - Bancs d'étalonnage et de caractérisation de micro capteurs et actionneurs.

Cet ensemble de moyens et les équipes associées sont doublement complémentaires :

- compétences : du développement multiphysique de systèmes micro-technologiques (capteurs et actionneurs) à la phénoménologie des écoulements, en passant par la mise en œuvre d'expérimentations complexes ;
- installations : de la turbulence de paroi aux écoulements autour de géométries complexes 3D.

PROJETS SCIENTIFIQUES

Adossé à la plateforme de moyens expérimentaux, un projet scientifique appelé CONTRATECH a été défini, dont l'objectif principal est de contrôler les écoulements de manière à optimiser et mieux maîtriser les forces aérodynamiques s'exerçant sur les véhicules terrestres, maritimes et aériens. Les acteurs de CONTRATECH s'appuient sur un triptyque disciplinaire :

- la mécanique des fluides pour la modélisation et l'analyse fine de la physique des écoulements, et pour le développement de moyens expérimentaux représentatifs de conditions réelles d'utilisation et la métrologie fine associée ;
- les micro/nanotechnologies pour la conception, la réalisation et la caractérisation d'actionneurs et de capteurs dédiés, capables d'être produits à grande échelle à des conditions commerciales compétitives ;
- les sciences du numérique (contrôle, information) pour concevoir des algorithmes d'identification, d'estimation et de contrôle en boucle fermée (donc en temps réel), basés sur les deux items précédents.

Ce projet scientifique s'est inscrit dans le cadre du CPER ELSAT2020 et a été mis en œuvre par des collaborations entre les laboratoires parties prenantes de la plateforme CONTRAERO, auxquelles ont été associés d'autres laboratoires (Laboratoire CRISTAL équipe « non A » d'INRIA Lille-Nord Europe et ponctuellement institut Pprime) : le caractère ouvert de la plateforme est une caractéristique importante qui contribue à en faire une entité fédératrice.

Dans le CPER RITMEA, qui démarrera en 2021, la suite de CONTRATECH a été définie avec le projet OCTAVE (Optimisation de l'aérodynamique et ConTrôle d'écoulement Appliqués aux Véhicules), qui en reprend les objectifs en les élargissant à la dynamique et au contrôle du vol. S'y ajoute une contribution au projet PROBUS-ESC (Planification et commande ROBuste et Sûre de véhicules en Environnements et Situations Complexes) pour ce qui concerne l'aérodynamique et la dynamique du vol des drones ; ce projet vise à accroître la sûreté de fonctionnement des véhicules intelligents. Ces deux projets OCTAVE et PROBUS-ESC s'appuieront massivement sur la plateforme CONTRAERO.

BILAN DE L'ACTIVITÉ

Tous les besoins en contrôle aérodynamique pour les transports sont considérés, sur des niveaux de maturité technologiques (TRL) allant de 1 à 4 voire 5 :

- analyse d'écoulement,
- conception et fabrication d'actionneurs,
- caractérisation d'actionneurs,
- intégration sur maquettes,
- essais en souffleries, métrologie avancée.

Il serait trop long de lister les nombreuses actions qui ont bénéficié de la plateforme CONTRAERO, dans une quinzaine de projets collaboratifs. Quelques exemples de réalisations mettant en œuvre les moyens de la plateforme sont détaillés dans l'article Contrôle d'écoulements en aérodynamique publié dans ce numéro de la lettre 3AF.

Au total, ce ne sont pas moins de 18 thèses de doctorat qui auront bénéficié de la plateforme CONTRAERO sur la période 2014-2020. Il convient d'y ajouter 18 post doctorats et environ 25 publications en revue à comité de lecture ou chapitres d'ouvrages. Ce bilan résulte d'actions inscrites dans le CPER, mais également de 13 projets contractuels collaboratifs, français ou européens, auxquels ont participé plusieurs PME françaises. Cette plateforme a également permis la mutualisation d'équipements, notamment en métrologie optique, offrant un effet de levier important sur la capacité des membres de la plateforme à proposer des expérimentations à forte valeur ajoutée.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La plateforme CONTRAERO adossée à un projet scientifique partagé permet de mutualiser des moyens techniques pour en faire un ensemble permettant d'étudier de manière efficace les nombreux verrous existants en contrôle des écoulements aérodynamiques. Ce partenariat de trois laboratoires est très interdisciplinaire et localisé sur un périmètre géographique concentré (Lille et Valenciennes), ce qui en fait une entité unique à l'échelle nationale. La mutualisation des moyens et compétences sous-jacente à la plateforme dynamise l'activité de recherche et l'activité collaborative, y compris avec les entreprises : cette plateforme se veut ouverte à tous les acteurs engagés dans le contrôle d'écoulements et plus largement désormais dans l'optimisation aérodynamique jusqu'à la dynamique du vol.

Après sept années d'existence qui ont permis de réaliser de nombreuses avancées et démonstrations, facilitées par le soutien des financements du CPER, la plateforme va entrer dans une nouvelle phase d'investissements et va être élargie à d'autres moyens techniques originaux, notamment la soufflerie verticale et le laboratoire de vol libre du centre ONERA de Lille, en cohérence avec deux projets scientifiques du nouveau CPER en cours de démarrage.

Remerciements

L'auteur remercie Quentin Gallas et Jean-Marc Foucaut pour leurs contributions à cet article. Sont aussi remerciés la Fédération de recherche transports terrestres et mobilité (FR3733) et les financeurs (région Hauts-de-France, DRARI Hauts-de-France, tutelles des laboratoires, parties prenantes contractuelles). ■

UNE EXPERTISE DU CENTRE ONERA DE LILLE : CONCEVOIR ET RÉALISER DES MAQUETTES AÉRODYNAMIQUES DE HAUTE TECHNICITÉ

par Frédéric Ternoy, Gilles Outtier et Emmanuel Eglinger

ORIGINE DE L'ACTIVITÉ MAQUETTE À LILLE

La simulation numérique en aérodynamique connaît depuis plusieurs décennies un progrès considérable du fait non seulement de l'augmentation de la puissance des processeurs informatiques bien sûr, mais également grâce à l'amélioration des modèles utilisés. Si ces outils permettent aujourd'hui de prédire de manière très précise le comportement d'un fluide en interaction avec un solide, nombre de phénomènes sont encore difficiles à modéliser, comme ceux rencontrés aux limites de l'enveloppe de vol (décrochage, tremblement), et nécessitent le recours à l'expérimentation pour les étudier.

Dans le domaine de l'aéronautique, compte tenu de la dimension des phénomènes à reproduire, on comprend assez aisément que la validation expérimentale passe par l'utilisation de maquettes à échelle réduite testées, dans la grande majorité des cas, dans des moyens d'essais dédiés que sont les souffleries aérodynamiques.

L'activité maquette à l'Institut de Mécanique des Fluides de Lille, qui sera rattaché à l'ONERA en 1983, a débuté à la fin de la Seconde Guerre Mondiale. La création d'un atelier sur ce site (voir Figure 1) s'est avérée indispensable pour disposer des compétences nécessaires à la réalisation de maquettes destinées à être testées dans ses installations d'essais de vol libre : soufflerie verticale, bassin d'amerrissage et catapulte.



Figure 1. L'atelier de réalisation de maquettes à ses débuts

Les maquettes ont progressivement gagné en complexité. Dans les années 1970, ce service est notamment reconnu comme étant un acteur incontournable pour les essais de flottement, dont l'objectif est d'analyser le couplage entre la structure de l'aéronef et l'écoulement, et pour lesquels la conception et la réalisation de la maquette sont particulièrement délicates. Celle-ci doit en effet respecter des règles de similitude très contraignantes telles que la conservation du rapport des masses volumiques du fluide et de la structure, la répartition des rigidités et la répartition des masses (voir Figure 2).

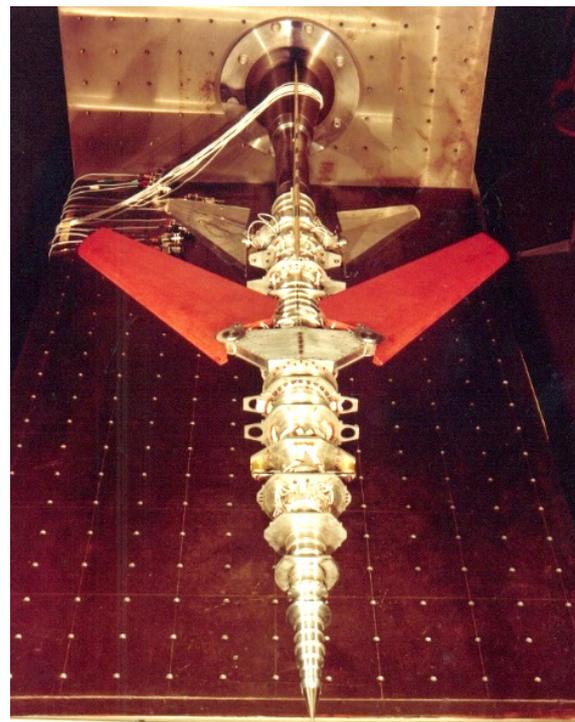


Figure 2. Structure interne d'une maquette de flottement (Mirage G8)

Suite au rattachement à l'ONERA, l'activité se diversifie encore pour répondre aux besoins des Directions de l'Aérodynamique et des Structures. On peut notamment citer durant cette période les travaux menés sur les

UNE EXPERTISE DU CENTRE ONERA DE LILLE : CONCEVOIR ET RÉALISER DES MAQUETTES AÉRODYNAMIQUES DE HAUTE TECHNICITÉ

techniques d'aspiration de couche limite qui feront l'objet de nombreux essais dans la soufflerie F2 du Fauga-Mauzac, ou encore les études liées à la compréhension du phénomène du tremblement avec, notamment, le recours à une maquette élastiquement semblable à S1MA. C'est à la fin des années 1990, que l'entité est intégrée à la Direction des Souffleries, avec pour mission d'étudier et de réaliser, ou faire réaliser, des maquettes complexes ou exigeant une technicité particulière pour les clients internes ou externes à l'ONERA.

Aujourd'hui appelé DMS pour « Dispositifs et Maquettes Spécifiques », ce service fait partie du Département Soufflerie Ingénierie et Maquettes (DSIM). Son équipe est composée de six ingénieurs et quatorze techniciens, et comprend :

- un bureau d'études et des méthodes ;
- un atelier d'usinage (fraisage, tournage, électroérosion) ;
- un atelier de mise en œuvre des composites ;
- un atelier de finition et d'intégration ;
- un laboratoire d'électronique (instrumentation, motorisations).

LA MAQUETTE : UN INSTRUMENT DE MESURE

Une maquette est un outil permettant de simuler à une échelle donnée un phénomène physique qu'il serait trop difficile d'analyser à l'échelle 1.

Dans le domaine de l'aérodynamique, les maquettes sont notamment utilisées pour reproduire et quantifier les interactions entre un objet en mouvement et le milieu fluide dans lequel il évolue. Pour ces applications, le gain que représente le recours aux essais à l'échelle réduite, et plus particulièrement en soufflerie, est évident en comparaison aux essais en vols, non seulement en ce qui concerne les coûts, mais aussi au niveau de la gestion des risques.

Comme l'ensemble des moyens expérimentaux qui sont mis en œuvre dans ce type d'essai, qu'il s'agisse des bancs, des souffleries ou encore des chaînes de mesures, la maquette se caractérise par sa grande précision et par son instrumentation.

La précision géométrique d'une maquette est typiquement de l'ordre du dixième de millimètre par rapport à une forme de référence théorique, et du dixième de degré par rapport à un angle de calage visé de cette

forme. En ce qui concerne son instrumentation, elle se compose généralement de prises de pression, permettant de déterminer le champ de pression autour de l'objet, et d'une balance destinée à mesurer les composantes du torseur des efforts aérodynamiques. À cela peuvent s'ajouter des capteurs de tous types : pression instationnaire, température, accélération, etc.

Il est facile de comprendre la nécessité de respecter de manière précise la géométrie de l'objet que l'on souhaite étudier, mais la similitude en aérodynamique fait intervenir d'autres grandeurs qu'il convient de « mettre à l'échelle » également pour garantir que les résultats de l'essai soient transposables à l'échelle 1.

Sans entrer dans le détail, on peut citer deux exemples de ces mises à l'échelle. La similitude de Froude, qui permet de conserver le rapport entre les forces d'inertie et les forces aérodynamiques, est notamment appliquée aux essais de vol libre pour lesquels elle peut être considérée comme prépondérante pour assurer la précision de la trajectoire de l'aéronef étudié. Dans ce cas, l'équipement est évidemment embarqué dans la maquette et la complexité réside dans le fait que celle-ci doit être légère tout en respectant les centrage et inerties du modèle (voir Figure 3).



Figure 3. Maquette de vol libre VELA 1 réalisée en composite, bois, mousse et aluminium, et testée sur la catapulte du laboratoire B20 du centre ONERA de Lille. On peut noter la trappe centrale d'accès au rack d'équipement embarqué.

Dans une soufflerie horizontale, c'est le fluide que l'on met en mouvement par rapport à la maquette qui, dans ce cas, est maintenue par un support. Lorsqu'il est notamment question de véhicules dont la vitesse est élevée, on applique à l'écoulement les règles des similitudes de nombre de Mach et de Reynolds, qui assurent respectivement la représentativité des

AÉRONAUTIQUE

UNE EXPERTISE DU CENTRE ONERA DE LILLE : CONCEVOIR ET RÉALISER DES MAQUETTES AÉRODYNAMIQUES DE HAUTE TECHNICITÉ

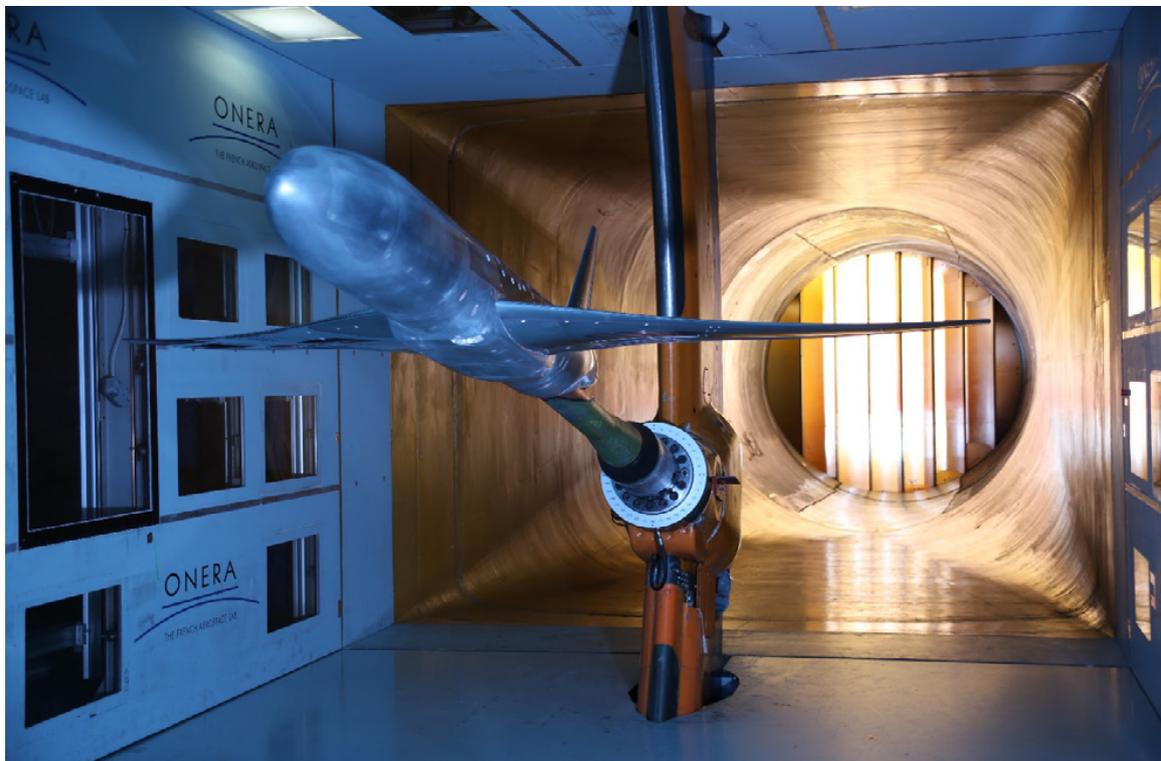


Figure 4. LRMF1 - maquette de référence ONERA dans la soufflerie F1 du centre ONERA du Fauga-Mauzac

phénomènes liés à la compressibilité et à la viscosité de l'air. Pour y parvenir, certaines souffleries ont la possibilité d'augmenter la pression dans la veine d'essai, on parle de soufflerie pressurisée (soufflerie F1 du Fauga-Mauzac, soufflerie S2M du centre ONERA de Modane-Avrieux). Pour la maquette, cela se traduit alors par des efforts aérodynamiques particulièrement importants (voir Figure 4). Pour agir indépendamment sur les nombres de Mach et de Reynolds, il est possible de recourir aux souffleries cryogéniques. Dans ce cas, en plus des sollicitations mécaniques liées à ces efforts, la maquette et ses équipements doivent être conçus pour supporter des températures qui peuvent descendre jusque 150K.

Ces deux règles de similitude sont probablement les plus utilisées dans ce domaine d'activité. Cela dit, d'autres similitudes peuvent être appliquées pour des essais plus spécifiques, comme, par exemple, la conservation du rapport entre déformation et coefficient de pression pour les maquettes élastiquement semblables, ou encore la conservation du coefficient de quantité de mouvement pour l'efficacité de jets dans le domaine du contrôle des écoulements.

LES MAQUETTES COMPLEXES À L'ONERA

S'il existe en France et ailleurs de nombreux acteurs capables de concevoir et/ou de fabriquer des maquettes de soufflerie, l'ONERA fait partie des rares organismes qui ont su se spécialiser dans l'étude, la réalisation et la mise au point de maquettes complexes.

Qu'il s'agisse de modéliser un phénomène physique particulièrement difficile à simuler de manière précise, ou de proposer des solutions permettant d'accroître la productivité des essais en soufflerie, les techniques à mettre en œuvre nécessitent d'être innovant à chaque niveau de l'élaboration d'une maquette, de la conception à l'intégration, en passant par les techniques de fabrication et d'équipement.

Ces dernières années, le service DMS a démontré notamment cette capacité à innover dans les deux domaines de pointe que sont les motorisations de gouvernes et les actionneurs fluidiques.

**UNE EXPERTISE DU CENTRE ONERA DE LILLE :
CONCEVOIR ET RÉALISER DES MAQUETTES AÉRODYNAMIQUES DE HAUTE TECHNICITÉ**

La motorisation de gouvernes : un gain en productivité

Dans le cadre du développement d'un aéronef par exemple, l'industriel souhaite tirer un maximum d'informations des mesures réalisées en soufflerie. Cela se traduit non seulement par l'implantation d'un nombre important de capteurs dans la maquette, mais aussi, dans la grande majorité des cas, par une grande variété des configurations testées au cours de la campagne d'essai, et notamment en ce qui concerne le calage des gouvernes de la maquette.

La solution standard pour modifier l'angle de braquage de ces surfaces de contrôle consiste à intervenir directement et manuellement sur la maquette pour remplacer les éléments mécaniques concernés, typiquement des pattes de calage ou les gouvernes elles-mêmes (voir Figure 5). Les temps nécessaires à ces changements sont assez variables et dépendent non seulement de la complexité des opérations de démontage et de remontage des pièces, mais aussi de l'accessibilité de la maquette. Pour donner un ordre d'idée, ce genre d'opération peut représenter un arrêt des essais qui varie entre quelques minutes, pour une soufflerie atmosphérique à veine ouverte, jusqu'à plus d'une demi-journée pour une soufflerie pressurisée cryogénique. Dans certains cas, le recours à la motorisation de ces gouvernes présente donc un réel intérêt pour les clients.

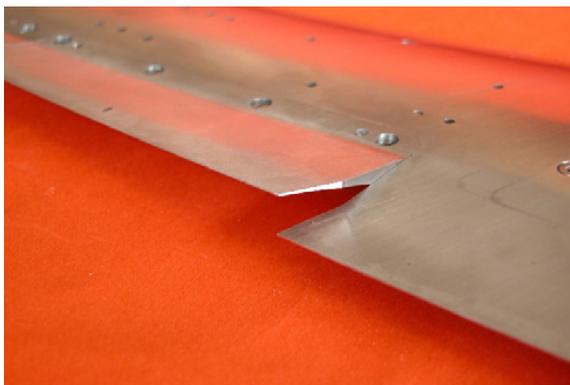


Figure 5. Exemple d'une solution standard de changement de calage : à chaque calage correspond une gouverne démontable

La complexité des solutions à mettre en œuvre ne réside pas uniquement dans l'intégration du moteur lui-même et de la chaîne cinématique qui permettra le fonctionnement du mécanisme. Elle est surtout liée à la manière dont seront agencés et utilisés ces éléments

pour parvenir à un résultat équivalent, du point de vue de la précision géométrique et de la tenue aux efforts aérodynamiques, à celui obtenu grâce à des méthodes non motorisées. Cela est d'autant plus vrai, lorsque les volumes disponibles sont faibles et les efforts considérés importants.

Pour répondre à ce besoin, des solutions techniques de motorisations sont développées et mises en œuvre par DMS de manière à :

- limiter les efforts aérodynamiques auxquels les moteurs sont exposés afin de les rendre compatibles avec les faibles volumes disponibles,
- garantir la précision du calage lors du verrouillage de la position de la gouverne, c'est-à-dire via un système très rigide, avec un minimum de jeu,
- pouvoir contrôler géométriquement la position de chaque calage une fois verrouillé avec des moyens conventionnels, avant d'effectuer la livraison de la maquette, ce qui permet de fournir au client une valeur très précise des braquages qui seront testés en soufflerie (voir Figure 6).



Figure 6. Motorisation d'empennage pour essais en conditions cryogéniques sur maquette de Falcon Générique – sur la photo, le dispositif est en cours de contrôle sur machine à mesurer tridimensionnelle – chaque calage, une fois verrouillé, est mesuré avant intégration du sous-ensemble dans le fuselage de la maquette

AÉRONAUTIQUE

UNE EXPERTISE DU CENTRE ONERA DE LILLE : CONCEVOIR ET RÉALISER DES MAQUETTES AÉRODYNAMIQUES DE HAUTE TECHNICITÉ

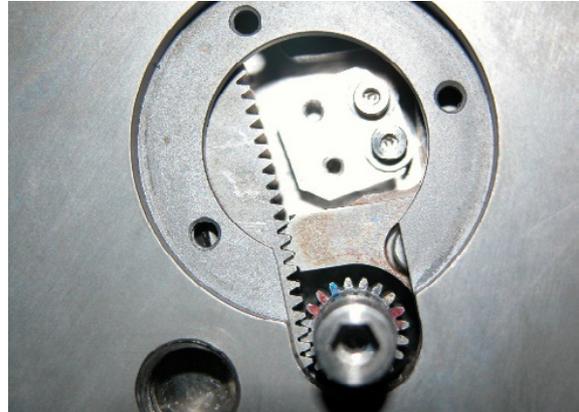
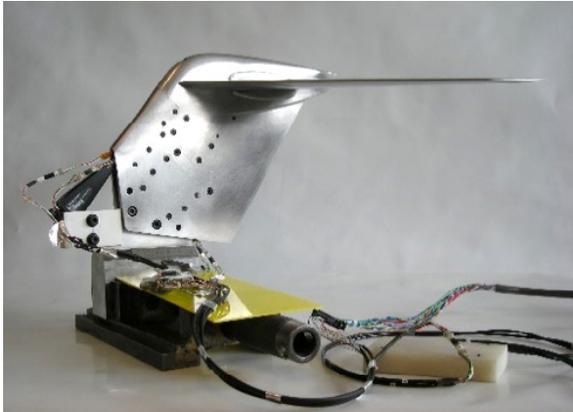


Figure 7. Motorisation d'empennage en T sur avion d'affaire, testée dans la soufflerie S2 du centre ONERA de Modane-Avrieux ; détail d'une solution d'entraînement et de verrouillage réalisée par engrainement

Outre la complexité de conception de tels dispositifs, leur mise au point nécessite une excellente maîtrise des techniques d'ajustage des mécanismes qui les composent (voir Figure 7).

Si les volumes sont très contraints pour les moteurs et les cinématiques associées, un effort de miniaturisation est indispensable également pour les capteurs de copie nécessaires à leur pilotage.

Un point important concerne la commande de ces systèmes complexes. Pour toute motorisation, une interface de pilotage gérée par ordinateur (voir Figure 8) permet non seulement d'améliorer la visibilité pour l'ingénieur d'essai des informations et des commandes associées au système (affichages des consignes, des

mesures capteurs, d'indicateurs de surveillance du système, etc.), mais aussi d'intégrer une communication directe avec le système de commande des installations d'essais. On peut ainsi automatiser l'envoi des consignes de changement de configuration. La maquette, y compris ses gouvernes, se trouvant alors entièrement pilotée depuis la salle de contrôle de la soufflerie, on augmente encore la productivité des essais.

Le contrôle fluide des écoulements intégré aux maquettes

Depuis le début des années 2000, de nombreux travaux sont menés par les acteurs de la recherche aéronautique dans le domaine du contrôle fluide des écoulements. L'objectif est d'améliorer les performances

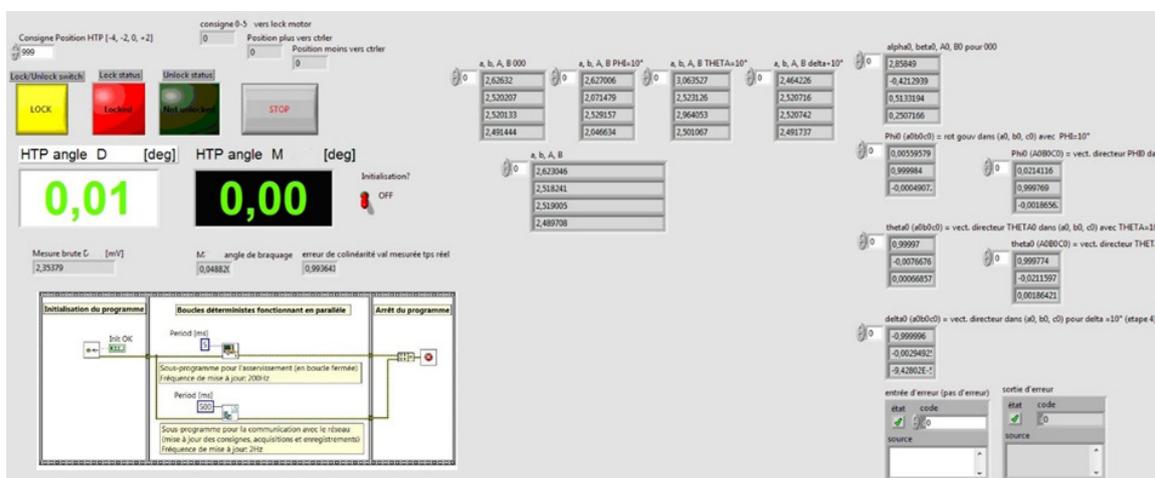


Figure 8. Exemple d'IHM développé pour le système de pilotage d'une motorisation

UNE EXPERTISE DU CENTRE ONERA DE LILLE : CONCEVOIR ET RÉALISER DES MAQUETTES AÉRODYNAMIQUES DE HAUTE TECHNICITÉ

aérodynamiques d'un véhicule non pas en modifiant sa géométrie, mais grâce à l'action sur l'écoulement environnant de jets fluidiques judicieusement positionnés et orientés à la surface de l'objet testé. Les phénomènes physiques étudiés nécessitent d'être validés expérimentalement en soufflerie, ce qui a conduit à un besoin nouveau en ce qui concerne les maquettes, qui doivent aujourd'hui intégrer des actionneurs fluidiques permettant de réaliser ces simulations à l'échelle réduite.

Compte tenu des caractéristiques des actionneurs en question, il est en général nécessaire de concevoir entièrement les dispositifs pour que ceux-ci soient compatibles avec la précision attendue dans la simulation de ces jets. Le service DMS a notamment été amené à développer deux types d'actionneurs pour répondre aux demandes des chercheurs dans ce domaine : les jets pulsés et les jets synthétiques.

Les générateurs de jets pulsés se présentent sous la forme de micro-vannes alimentées par de l'air comprimé et dont la fréquence et le rapport cyclique sont pilotables. Le cahier des charges spécifie généralement trois principales caractéristiques : la fréquence, la vitesse et la géométrie des orifices d'éjection du fluide (forme, dimension, orientation, localisation).

La fréquence dépend du phénomène à contrôler et peut varier entre quelques dizaines et quelques centaines de Hz, voire jusqu'au kHz. En fonction de la bande passante, on optera pour l'élément actif adapté (typiquement piézoélectrique ou électromagnétique).

La vitesse du fluide au moment de son éjection est un paramètre prépondérant dans le calcul de l'efficacité du jet. En première approximation, on peut considérer que celle-ci doit être au minimum égale à deux fois la vitesse locale de l'écoulement pour que le contrôle fluidique ait un effet significatif. Cette règle impose donc notamment une vitesse supersonique du jet au niveau de l'orifice, lorsqu'il est question de contrôle en conditions transsoniques. Il s'avère dans ce cas nécessaire de recourir à l'utilisation de tuyères miniatures associées à des niveaux de pression élevés dans le corps de vanne.

La géométrie des orifices va quant à elle imposer le mode d'intégration de l'actionneur dans la maquette. Dans la plupart des cas, la forme des conduits (de type « trous » ou « fentes ») qui définit la forme des jets, est trop complexe pour que ceux-ci soient facilement

intégrés dans le corps de vanne. On les déporte alors, lorsque le volume disponible le permet, dans des capots rapportés sur la maquette (voir Figure 9).

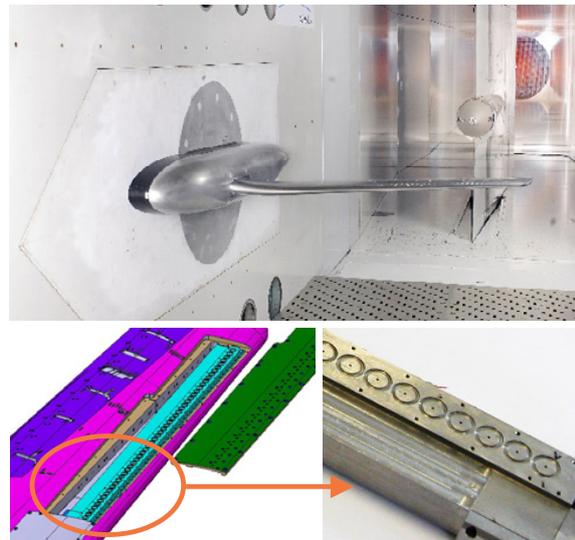


Figure 9. Maquette BUFET[®]N CO testée à S2MA et équipée de jets pulsés ; 50 orifices de diamètre 1 mm avec tuyères inclinées par rapport à la forme maquette ; pilotables indépendamment jusqu'à 1 kHz ; ouverture progressive des vannes qui permet de contrôler la vitesse des jets entre 0 ms^{-1} et 680 ms^{-1} (Mach 2) ; les micro tuyères inclinées sont intégrées dans un capot dédié (en vert sur l'image en bas à gauche)

Les générateurs de jets synthétiques diffèrent des jets pulsés par le fait qu'ils sont à débit massique moyen nul, et ne nécessitent donc pas d'alimentation en air comprimé, ce qui simplifierait notablement leur intégration dans le cas d'une application à l'échelle 1. Leur fonctionnement est basé sur le principe de la seringue : un piston en mouvement dans une cavité aspire et éjecte alternativement une petite quantité de gaz prélevé dans l'écoulement environnant le véhicule (voir Figure 10).

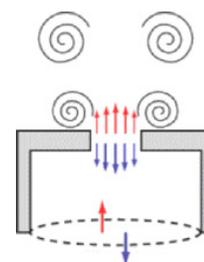


Figure 10. Schéma de principe de l'actionneur à jets synthétiques

AÉRONAUTIQUE

UNE EXPERTISE DU CENTRE ONERA DE LILLE : CONCEVOIR ET RÉALISER DES MAQUETTES AÉRODYNAMIQUES DE HAUTE TECHNICITÉ

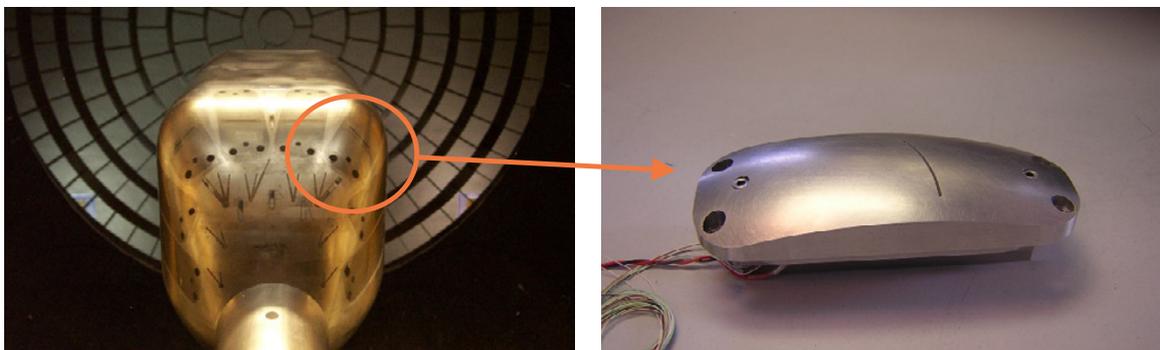


Figure 11. Maquette de fuselage d'hélicoptère GRC2 testée dans la soufflerie L1 du centre ONERA de Lille et équipée de 8 jets synthétiques ; 8 fentes de dimensions 0,67 mm x 30 mm inclinées par rapport à la forme maquette ; pilotables indépendamment jusqu'à 200 Hz ; vitesse maximale du jet 80 m.s⁻¹. À droite une vue de l'actionneur avant son intégration dans la maquette

Le dispositif est constitué d'un actionneur piézoélectrique mécaniquement amplifié qui assure la mise en translation du piston de manière étanche dans une chambre. Ce mouvement fait varier le volume de la cavité qui est munie d'un orifice permettant l'aspiration et l'éjection du gaz. L'avantage de cette architecture est qu'elle n'impose pas de fonctionner à la fréquence de résonance du système pour obtenir un jet efficace : il est dans ce cas envisageable d'obtenir une vitesse de jet indépendante de la fréquence d'utilisation.

Les contraintes sont comparables à celles imposées aux jets pulsés (encombrement, respect de la géométrie, vitesse et forme du jet, etc.). Il s'agit cependant d'actionneurs dont le niveau de maturité technologique est bien inférieur à celui des micro-vannes : ils ont fait l'objet de développements spécifiques qui ont abouti au dépôt d'un brevet par le service DMS (voir Figure 11).

Quel que soit le type d'actionneur fluide considéré, la précision reste une priorité et l'ONERA Lille a développé un banc de caractérisation dédié à ces activités. Au même titre qu'un contrôle géométrique valide la forme d'une maquette, ce banc permet de vérifier notamment la vitesse, la forme et la fréquence de ces jets (voir Figure 12).

PERSPECTIVES

Les travaux présentés dans cet article ont permis au centre ONERA de Lille d'acquérir une grande expérience dans le domaine des maquettes complexes. Les développements en cours aujourd'hui sur ces sujets ont pour ambition de pousser encore plus loin les capacités des maquettes en y intégrant des dispositifs plus performants. Dans le domaine de la motorisation des gouvernes, l'objectif à moyen terme est de proposer

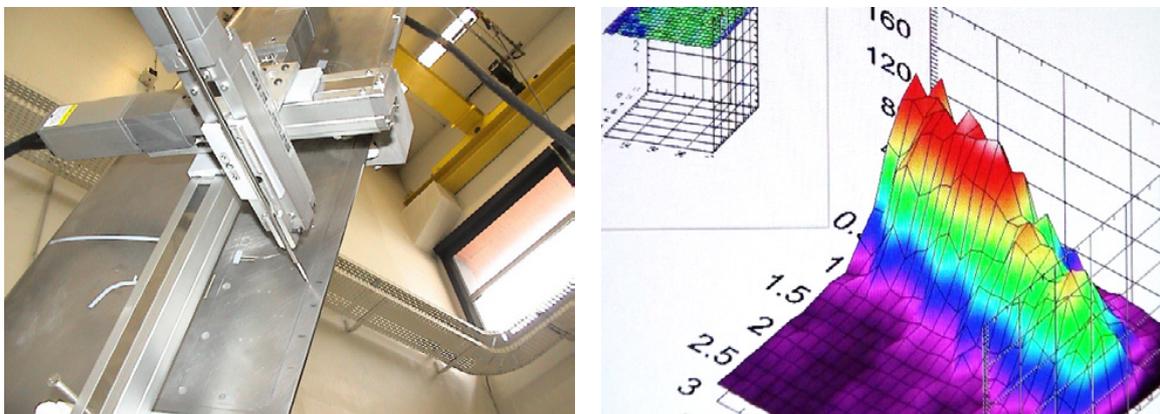


Figure 12. Caractérisation d'une fente pulsée, le dispositif de mesure est ici monté sur la maquette. À droite : exemple de restitution du profil de vitesse instantanée à la sortie de la fente

UNE EXPERTISE DU CENTRE ONERA DE LILLE :
CONCEVOIR ET RÉALISER DES MAQUETTES AÉRODYNAMIQUES DE HAUTE TECHNICITÉ

des solutions permettant de piloter simultanément et de manière continue, sous efforts aérodynamiques, toutes les surfaces de contrôle d'un aéronef. L'intégration dans ces dispositifs de balances locales capables de mesurer les efforts appliqués aux gouvernes est également considérée. Pour ce qui concerne le contrôle des écoulements, l'accent est aujourd'hui porté sur l'amélioration des actionneurs à jets synthétiques, en s'appuyant sur de nouveaux outils qui permettent à présent d'anticiper de manière précise leurs caractéristiques et donc d'en optimiser la conception.

D'autres actions sont menées avec pour objectif une meilleure qualité des prestations et l'anticipation des besoins des clients. L'instrumentation fait notamment l'objet de développements, par la validation de nouveaux capteurs plus compacts et plus précis, ou par la mise en œuvre de modes d'installation spécifiques permettant d'améliorer la discrétion de ces capteurs par rapport aux phénomènes à simuler. Les techniques de fabrications évoluent également avec notamment le recours à la fabrication additive métallique qui se généralise aujourd'hui, ouvrant la voie à d'autres architectures pour les maquettes de demain (voir Figure 13). Les nouveaux thèmes de recherche, enfin, comme l'avion électrique et la propulsion distribuée, sont autant d'opportunités pour continuer à innover.



Figure 13. Aile d'envergure 600 mm, réalisée par fabrication additive métallique dans le cadre du projet MATRIS3D – l'équipement en prises de pression est ici intégré à la matière

Remerciements

Les auteurs remercient Julien Dandois (ONERA) pour sa contribution à cet article.

Le projet VELA1 a été financé par le 5^{ème} Programme Cadre Européen.

Les projets BUFET'N CO et MATRIS3D ont été financés sur fonds propres ONERA.

Les travaux sur les actionneurs à jets synthétiques et sur la caractérisation des actionneurs fluidiques ont été menés dans le cadre du projet européen JTI CleanSky SFWA.

Site internet de la Direction des Souffleries de l'ONERA : <https://www.onera.fr/fr/souffleries> ■

CONTRÔLE D'ÉCOULEMENTS EN AÉRODYNAMIQUE

par Bruno Mialon, ONERA

Le contrôle d'écoulements est une approche qui consiste à modifier ou manipuler des écoulements de fluides en vue d'un objectif donné. Les applications potentielles sont nombreuses et variées, en particulier dans le domaine des transports terrestres et aériens.

Dès les années 1880, les premiers golfeurs s'étaient aperçus que certaines balles abîmées avaient une meilleure portée. Ce constat fût étudié de manière plus scientifique dans les années 1930 par William Taylor, industriel et golfeur, qui mit au point le concept de balle alvéolée. Les alvéoles permettent de déclencher la transition du régime laminaire au régime turbulent, ce qui a pour effet de retarder le décollement de la couche limite autour de la balle en rotation, et qui se traduit par une traînée aérodynamique réduite et donc une portée plus grande. Il s'agit d'un contrôle dit passif, car il ne joue que sur la forme de l'objet et sur la physique naturelle de l'écoulement.

Les premières expériences de contrôle actif des écoulements datent du début du 20^{ème} siècle (« actif » signifie qu'il y a un apport d'énergie extérieur à l'écou-

lement initial) : dès 1904, Prandtl démontrait qu'une aspiration de couche limite sur un cylindre soumis à un écoulement pouvait générer de la portance. En France, Philippe Poisson-Quinton théorisa dans les années 1950 la distinction entre contrôle de circulation et contrôle de la couche limite ; ces travaux lancèrent la dynamique autour du contrôle d'écoulements dans l'hexagone.

Le contrôle d'écoulement est donc né voilà plus d'un siècle et malgré cela, il est très loin d'être généralisé. L'exemple le plus connu de dispositifs de contrôle concerne les générateurs de vortex que l'on trouve notamment sur les ailes de la plupart des avions Boeing (voir Figure 1).

Pourquoi le contrôle « actif » des écoulements n'est-il toujours pas utilisé sur nos véhicules aériens ? Ceci tient à un ensemble de facteurs comme le gain d'efficacité globale (à l'échelle du système, prenant en compte les bilans énergétiques, masse, impact sur les opérations, etc.), la complexité technologique et la certificabilité (taux de panne). La conception et l'évaluation globale de solutions de contrôle d'écoulement font appel à



Figure 1. Exemple de générateur de vortex sur B737-800

<https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/aerodynamics/vortex-generators/> 03/12/2020

de nombreuses disciplines, quel que soit le niveau de maturité considéré : les travaux de nature académique à bas TRL (*Technology Readiness Level*) requièrent le plus souvent des spécialistes de l'aérodynamique, de la simulation numérique, de l'automatique, du traitement du signal et des expérimentateurs. Leur montée en TRL jusqu'à l'industrialisation requiert en plus des spécialistes de conception et d'évaluation globales, de systèmes ou de certification. Il s'agit donc d'un terrain intrinsèquement transdisciplinaire.

Le degré de mobilisation de la communauté scientifique et industrielle sur ces sujets a été variable depuis les années 1950. Aujourd'hui, les enjeux et ambitions dans les domaines aéronautiques civils (décarbonation) et défense (Système de combat aérien du futur ou SCAF, hypersonique) ravivent l'intérêt pour le contrôle d'écoulement. Une session transdisciplinaire « *flow control for aerospace* » était d'ailleurs au programme du congrès EUCASS-3AF 2021 initialement prévu du 4 au 9 juillet à Lille, pour réunir la communauté et faire le point sur l'état de l'art et les perspectives.

Le présent article propose un tour d'horizon du contrôle actif d'écoulements. Les grands principes d'application et de fonctionnement seront décrits succinctement, ainsi que les technologies associées. Le propos sera illustré par quelques exemples de travaux et d'applications, pour la plupart conduits en région Hauts-de-France, ainsi que quelques perspectives.

PRINCIPES ET TECHNOLOGIES

Le contrôle d'écoulements consiste à perturber localement un écoulement en vue d'un objectif donné, sous tendu par une physique spécifique. Le tableau 1 présente les principaux exemples sur lesquels des efforts de recherche significatifs ont été consentis ces dernières décennies dans le domaine aéronautique et défense, pour ce qui concerne l'aérodynamique.

Le contrôle d'écoulements a aussi potentiellement de nombreuses applications multidisciplinaires non abordées ici, en aérostructure (réduction de chargements dynamiques sur voilures), acoustique, aérothermique, combustion, etc.

	Phénomène contrôlé	Effet recherché / objectif
Ecoulements pariétaux	Circulation aérodynamique	Augmentation de la portance
	Effet Coandă	Vectorisation
	Décollement de couche limite	Augmentation de l'efficacité des volets, de la portance maximale, réduction de traînée
	Interaction onde de choc / couche limite	Réduction de traînée d'onde
	Transition laminaire/turbulent	Réduction de traînée visqueuse
	Frottement turbulent	Réduction de traînée de frottement
Ecoulements libres	Tourbillons de sillage	Sécurité du vol, traînées de condensation
	Tourbillons issus d'une surface (apex, cassure de flèche, etc.)	Augmentation de portance, linéarité accrue des coefficients aérodynamiques sur le domaine de vol, etc.
	Tourbillons issus d'une surface (avant-corps ou pointe avant)	Manœuvrabilité
	Ecoulements de cavité	Réduction de l'intensité turbulente, réduction de bruit
	Ecoulements de culot	Réduction de traînée
Ecoulements tournants	Ecoulements de jeu d'extrémité d'aubes	Augmentation de rendement
	Décrochage tournant	Réduction de la marge au pompage
Ecoulements internes	Décollement en diffuseur de compresseur centrifuge	Augmentation de rendement
	Décollement en entrée d'air supersonique	Augmentation de rendement, réduction marge au pompage (buzz)

Tableau 1. Exemples de phénomènes contrôlés et objectifs de solutions de contrôle

AÉRONAUTIQUE CONTRÔLE D'ÉCOULEMENTS EN AÉRODYNAMIQUE

Pour chaque couple (objectif, phénomène physique en jeu), il est nécessaire de définir le mode d'action du contrôle, appelé actionneur. En contrôle actif, l'actionnement peut être opéré en boucle ouverte ou en boucle fermée, c'est-à-dire avec rétroaction de l'état du système sur la commande de l'actionneur. Dans ce dernier cas, il est nécessaire de disposer d'une mesure de l'état du système ou plus précisément du phénomène à contrôler, et également, d'un système permettant de transformer l'information en commande de l'actionneur, le plus souvent en s'appuyant sur une représentation théorique et simplifiée du système (modèle réduit).

ACTIONNEURS

Les actionneurs passifs jouent sur la forme de l'objet. Un exemple répandu est le « générateur de tourbillons » que l'on dispose sur les ailes de certains avions (voir Figure 1). Dès lors que l'on veut rendre le contrôle « actif », on peut imaginer des actionneurs mécaniques, qui consistent à mettre un composant mécanique en mouvement. C'est par exemple le cas des petits déflecteurs à calage motorisé, que l'on vient implanter au bord de fuite d'une voilure pour réaliser du contrôle de charge.

Une grande majorité des études utilise des actionneurs fluidiques, qui sont des dispositifs généralement de petite taille, permettant de mettre de l'air en mouvement, pour générer un jet (soufflage) ou une aspiration. La géométrie des orifices d'actionnement est variée : on trouve des trous ronds, des fentes de rapports d'aspects très variables ou des tôles perforées. Ces orifices peuvent générer des soufflages ou aspirations d'inclinaison normale par rapport à la paroi locale, tangentielle ou

avec une inclinaison intermédiaire. Sur un plan aérodynamique, le fait de souffler (aspirer respectivement) vient introduire (retirer respectivement) de la quantité de mouvement dans l'écoulement à contrôler. L'ajout de quantité de mouvement permet ensuite de retarder l'apparition des décollements de la couche limite qui sont néfastes aux performances aérodynamiques. Physiquement, cette quantité de mouvement peut également être ajoutée à l'écoulement par la génération de tourbillons dont la forme et l'intensité (vorticité) dépendent de la géométrie de l'orifice. La littérature scientifique a largement comparé l'impact des géométries d'orifice sur différents types de phénomènes à contrôler.

Au-delà de la géométrie de l'orifice, une autre grande caractéristique de l'actionneur est le caractère temporel de l'actionnement : ce dernier peut avoir lieu de manière continue permanente, de manière continue sur déclenchement (manuel ou par commande) ou de manière variable ou instationnaire, suivant un signal pouvant être harmonique, carré ou plus complexe. Ce dernier type d'actionneur permet d'introduire une perturbation dynamique (instationnaire) à laquelle l'écoulement et le phénomène à contrôler peuvent être sensibles : la fréquence (ou le contenu harmonique) de l'actionnement devient alors un paramètre direct du contrôle, au même titre que le débit ou la vitesse du soufflage ou de l'aspiration.

Si la manière de générer un jet ou une aspiration continue est assez conventionnelle, la génération de signaux variables dans le temps fait l'objet de nombreuses technologies, qui peuvent être classées en trois grandes catégories (voir Figure 2) :

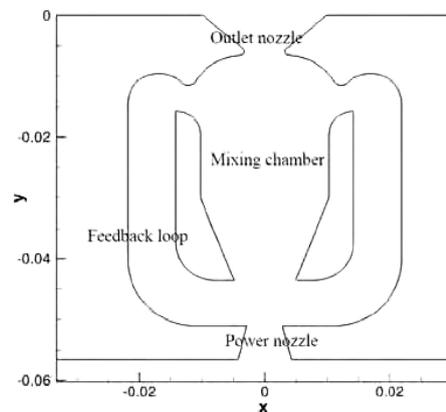
Figure 2. Exemples d'actionneurs



a - Jets pulsés (extrait de [1]-03)



b - Jets synthétiques (extrait de [1]-03)



c - Principe du jet balayant (extrait du dossier HDR de J. Dandois)

- Actionneurs à jets pulsés : ils disposent d'une alimentation en air sous pression et contiennent une ou des valves de formes et actionnements divers : valves à actionnement mécanique (par un moteur électrique), électromagnétique, MEMS, etc. L'alimentation en air comprimé provient généralement d'un prélèvement sur un moteur de l'avion.
- Actionneurs à jets synthétiques : ces dispositifs puisent l'air qu'ils mettent en mouvement dans le milieu à contrôler, grâce à une phase d'aspiration suivie d'une phase de soufflage. Ainsi, on évite le recours à un prélèvement moteur et une simple alimentation électrique suffit au fonctionnement de l'actionneur.
- Actionneurs à jets balayants : cette technologie permet de générer un jet continu en intensité mais d'orientation variable dans le temps, à partir d'une alimentation en air comprimé. Ceci est obtenu en exploitant l'instabilité qui se forme pour certaines formes de conduits.

Le développement d'actionneurs est un champ d'activité à part entière, qui est à lui seul fortement multidisciplinaire. Il en est de même de la mesure des caractéristiques, qui est une étape indispensable pour évaluer leur comportement dynamique (e.g. fréquences de coupure) et identifier leur performance (e.g. cartographie de vitesses de soufflage ou d'aspiration en fonction du débit d'entrée). Des méthodologies spécifiques de mesure sont nécessaires compte tenu des tailles souvent très petites de jets (par exemple fente de 0,5 mm de large) : ce domaine spécifique de la métrologie est par exemple illustré dans la référence [1]. La caractérisation des actionneurs s'opère en général en laboratoire avant intégration dans la maquette ou l'avion.

Le contrôle d'écoulements étant une technologie complexe, souvent difficilement calculable avec précision et sur une large plage de paramètres, les expérimentations à échelle réduite en soufflerie sont un passage obligé pour la maturation d'une technologie donnée. Ceci nécessite des actionneurs capables de générer des effets en similitude avec les, ou extrapolables aux, conditions de vol réelles. Pour les essais en soufflerie, il faut concevoir des dispositifs ultra-compacts, respectant des spécifications aérauliques exigeantes. Chaque technologie d'actionneurs a ses avantages et ses limitations, notamment en termes de vitesse et fréquences d'éjection. Une différence importante entre les applications aéronautiques et les applications automobiles est souvent la vitesse de l'écoulement à contrôler et bon nombre de technologies d'actionneurs envisageables pour l'automobile ne le sont pas nécessai-

rement pour l'aéronautique (notamment les MEMS qui présentent pourtant des avantages importants en terme de compacité, de consommation énergétique faible et sans doute de coût de fabrication à grande échelle, mais qui ont des vitesses de soufflage limitées).

Avec l'intégration dans l'avion échelle 1 et le vol réel, d'autres contraintes très opérationnelles apparaissent, comme la fiabilité, la résistance à l'encrassement et à l'usure, la redondance, la certification, etc. Ces aspects laissent encore de beaux jours aux ingénieurs pour porter des solutions à un niveau de maturité permettant l'industrialisation !

SENSEURS

Les senseurs permettent de fournir un état du système à contrôler. En général, il s'agit de capteurs de vitesse, pression ou frottement dont l'information va être utilisée pour élaborer la commande de l'actionneur. Si des solutions existent sur le marché, des développements spécifiques en cours ont pour objectifs une intégration plus aisée sur avion et/ou une compacité accrue (par exemple pour aller chercher une information localisée dans un endroit inaccessible aux technologies conventionnelles) et/ou la restitution d'informations élaborées (par exemple multi-grandeurs, multi-composantes, vitesse et direction de l'écoulement, niveau de vitesse et son gradient, niveau de pression et de corrélations spatio-temporelles, etc.). Ce champ d'activité est illustré dans l'exemple de la figure 3.

STRATÉGIES DE CONTRÔLE COMMANDE POUR LE CONTRÔLE

La stratégie de contrôle s'entend comme la transformation de l'information fournie par le(s) senseur(s) en commande pour l'actionneur. Une des difficultés en aérodynamique est que les phénomènes à contrôler sont en général non linéaires et souvent instationnaires. De nombreux travaux ont exploré et explorent encore différentes techniques pour « fermer la boucle », offrant l'opportunité aux communautés « automatique » et « mécanique des fluides » de se rejoindre pour relever ce défi. L'exemple de la figure 3 a vu la collaboration entre les aérodynamiciens des centres ONERA de Lille et Meudon et les automaticiens du centre INRIA Lille – Nord Europe.

Au-delà de l'automatique, les avancées théoriques réalisées en aérodynamique fondamentale ont permis de

faire émerger un nouveau concept de contrôle : la mise au point de la théorie de la stabilité et les outils de simulation associés permettent d'identifier les zones les plus sensibles de l'écoulement à contrôler (« réceptivité ») et d'envisager un contrôle efficace par une perturbation très localisée de l'écoulement, avec la possibilité d'optimiser les caractéristiques de celle-ci (emplacement, amplitude, fréquence, direction de soufflage ou aspiration, etc.).

Le contrôle est aussi un champ d'application pour certaines techniques d'intelligence artificielle.

QUELQUES EXEMPLES

Quelques applications du contrôle sont montrées ci-après. L'ensemble s'appuie sur des résultats d'études précédentes sur des configurations très académiques, ne ressemblant en rien à une aile. Parmi ces études, on peut noter celles réalisées à l'Université de Lille dans les années 2000, qui ont permis d'asseoir les fondamentaux des générateurs de tourbillons mécaniques et fluidiques.

1 - Contrôle sur volet

Le contrôle peut être utilisé pour améliorer l'efficacité d'une surface de contrôle de l'avion (aileron, gouverne de dérive). Le premier exemple concerne le contrôle de l'écoulement sur un volet sans fente braqué, au moyen d'un soufflage au voisinage de l'axe de rotation du volet. L'expérimentation a été menée initialement dans la soufflerie S2L du centre ONERA de Meudon puis dans la soufflerie L1 du centre ONERA de Lille (voir Figure 3). Il s'agit ici de contrôler le décollement de couche limite se produisant sur le volet à partir d'un certain angle de braquage, dans des conditions dites « basses vitesses » (vitesse voisine de 40 m/s). Les études successives réalisées autour de cette expérimentation ont concerné la comparaison de l'efficacité de plusieurs types d'actionneurs (jets continus, pulsés, balayants), le développement d'actionneurs MEMS, de micro capteurs MEMS et de leur électronique, le développement de stratégies de boucles fermées. Il s'agit donc d'une véritable plateforme expérimentale qui a permis de tirer de nombreuses leçons et autour de laquelle sont intervenus des chercheurs des centres ONERA de Meudon, Lille et Toulouse, de l'IEMN (Institut d'électronique, de micro-électronique et de nanotechnologies), du centre INRIA Lille-Nord Europe ainsi que de la PME Thurmelec.

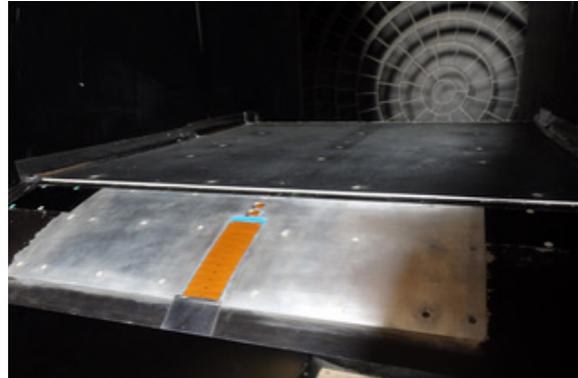


Figure 3. Maquette plaque plane et volet braqué dans la soufflerie L1 du centre ONERA de Lille. Le volet est équipé d'une série de micro-capteurs MEMS



Figure 4. Maquette de dérive d'avion dans la soufflerie L1 du centre ONERA de Lille. On distingue les 8 jets balayants positionnés en amont de la gouverne

Un second exemple concerne la gouverne de direction sur une dérive d'avion, également testé à basse vitesse dans la soufflerie L1 (voir Figure 4). Cette maquette de 1,5 m de hauteur a permis de loger des actionneurs à jets synthétiques compatibles avec une échelle avion réel, conçus et fabriqués par l'ONERA en collaboration avec la PME CEDRAT Technologies. Le contrôle s'effectue sur toute la hauteur de la dérive juste en amont de la gouverne ; des gains d'efficacité de gouverne de l'ordre de 10% ont été mis en évidence. La performance des jets synthétiques doit encore être améliorée, notamment la vitesse d'éjection, pour avoir des performances accrues et compatibles avec les conditions de vol. Des jets balayants ont aussi été essayés et ont montré des gains d'efficacité de la dérive de l'ordre de 80%. À l'échelle de l'avion, le contrôle sur gouverne de direction pourrait permettre de réduire non seulement la taille de la gouverne mais aussi la taille de la dérive (plus ou moins selon le type d'avion) et donc sa traînée, donc de réaliser des économies de

carburants à iso-qualités de vol. À noter que ce type de contrôle a déjà été essayé en vol par Boeing (*EcoDemonstrator*).

2 - Contrôle des configurations hypersustentées

Les dispositifs hypersustentateurs doivent être déployés au décollage et à l'atterrissage pour augmenter la portance des voilures. Ce sont des combinaisons de becs et volets à fente, qui ont chacun un comportement spécifique (voir Figure 5), et qui sont complexes et lourds (cinématiques, actionneurs, etc.). Le contrôle d'écoulement pourrait permettre de simplifier ces dispositifs, voire d'en supprimer certains.

Volets à fente

Il a été montré que des générateurs de vortex mécaniques ou fluidiques montés sur un volet à fente permettaient d'en augmenter l'efficacité.

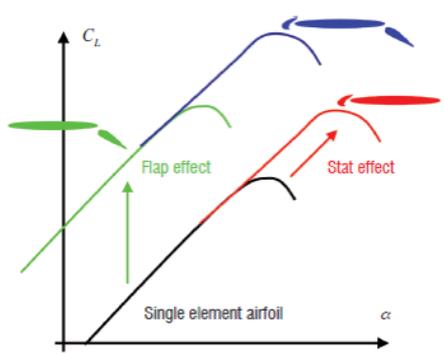


Figure 5. Impact du volet (flap) et du bec (slat) sur la portance et l'incidence

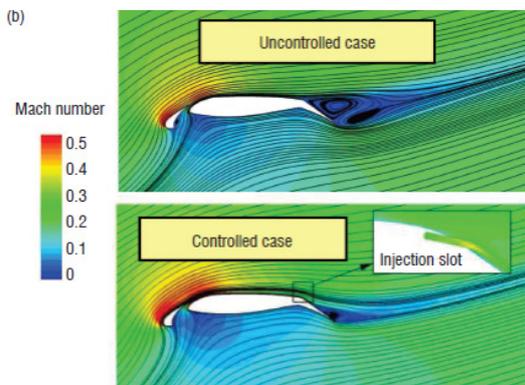


Figure 6. Effet d'un soufflage continu sur volet sans fente

Le contrôle par soufflage a aussi été appliqué dans le but de supprimer la fente, ce qui permet de simplifier et alléger considérablement la cinématique. Les

travaux numériques et expérimentaux ont montré que les générateurs de vortex mécaniques n'étaient pas efficaces, et qu'un soufflage continu par une fente située au voisinage de l'axe de rotation du volet permettait de retrouver l'efficacité du volet à fente (voir Figure 6). Néanmoins, le débit d'air nécessaire est prohibitif. Le soufflage pulsé permet de diviser ce débit d'un facteur d'environ deux et est encore plus efficace que le soufflage continu ; néanmoins, le débit nécessaire reste rédhibitoire à l'échelle avion. La mise au point d'actionneurs à jets synthétiques efficaces pourrait rendre cette application viable à moyen terme.

Becs

Le remplacement du bec par un bord d'attaque basculant permet des gains de masse et de bruit importants, mais au prix d'un décrochage prématuré. De nombreuses positions et conditions de soufflage ont été testées numériquement et expérimentalement (voir Figure 7), avec des actionneurs pulsés spécifiquement développés à l'ONERA, pouvant atteindre des vitesses d'éjection élevées jusqu'à une fréquence de 1000 Hz. Le contrôle d'écoulements par soufflage permet ici aussi de récupérer les performances aérodynamiques d'un bec classique (voir Figure 8), mais au prix d'un débit de soufflage prohibitif à l'échelle avion.

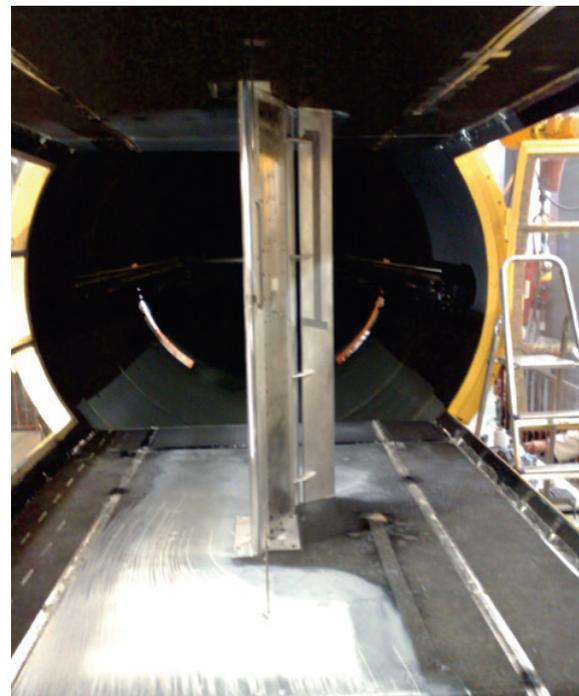


Figure 7. Maquette avec volet à fente et nez basculant dans la soufflerie L1 du centre ONERA de Lille. Envergure 1,5 m

AÉRONAUTIQUE CONTRÔLE D'ÉCOULEMENTS EN AÉRODYNAMIQUE

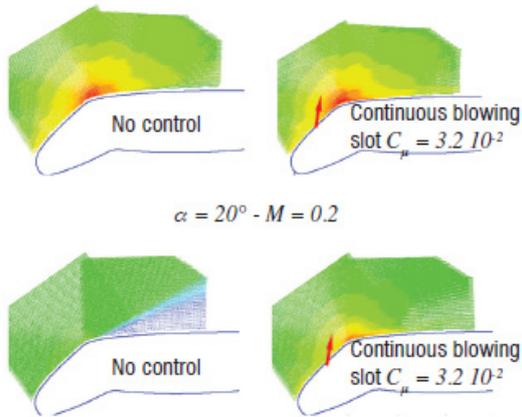


Figure 8. Visualisations PIV (vitesse) avant (haut) et après (bas) décrochage : le cas contrôlé supprime le décollement massif qui apparaît sans contrôle

Le cas encore plus ambitieux de l'utilisation du contrôle pour retrouver les performances d'un bec à fentes avec un profil classique a aussi été étudié, avec des conclusions similaires. Il ressort de ces études la nécessité de poursuivre l'effort sur des actionneurs efficaces mais consommant moins de débit.

3 - Contrôle du tremblement transsonique

Le tremblement transsonique est un phénomène de couplage aéroélastique qui intervient à grande vitesse (présence d'onde de choc). La marge au phénomène de tremblement est un paramètre de la certification de l'avion, c'est pourquoi il est nécessaire d'une part de bien prédire les conditions d'entrée en tremblement, d'autre part de contrôler le phénomène pour en repousser l'apparition. Depuis les années 1990, des études ont d'abord permis de comprendre le phénomène (interaction entre deux phénomènes hautement non linéaires : onde de choc et décollement de couche limite), puis de le prédire numériquement, en 2D puis en 3D. Des études consacrées à son contrôle ont ensuite été effectuées, d'abord en 2D, puis en soufflerie de recherche (S3Ch du centre ONERA de Meudon, voir Figure 9) sur géométrie 3D simplifiée et enfin en soufflerie industrielle (S2MA du centre ONERA de Modane-Avrieux, voir Figure 10).

Il a été montré (voir Figures 11 et 12) que des générateurs de vortex mécaniques, des jets pulsés (FVG) et un soufflage au bord de fuite (FTED) étaient efficaces pour repousser l'apparition du tremblement en boucle ouverte. Une démonstration de faisabilité du contrôle en boucle fermée de ce phénomène complexe a aussi été effectuée (soufflerie S3Ch).



Figure 9. Voilure+demi fuselage monté en paroi de la soufflerie S3Ch du centre ONERA de Meudon. Demi-envergure 0,7 m (extrait de [1]-01)

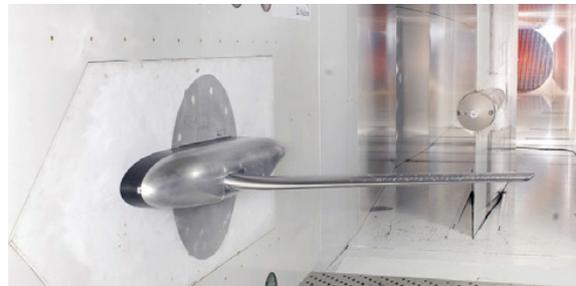


Figure 10. Maquette dans la soufflerie S2 du centre ONERA de Modane-Avrieux; Demi envergure 1,225 m (extrait de [1]-01)

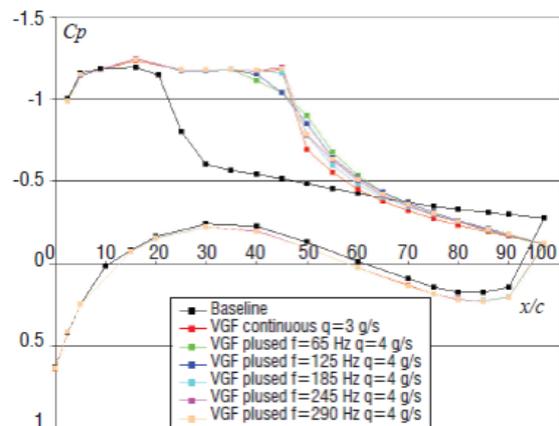


Figure 11. Répartitions de pression comparées pour la référence (Baseline), le soufflage continu et le soufflage pulsé pour différentes fréquences de soufflage (extrait de [1]-01)

A noter que ces résultats sur le contrôle du tremblement transsonique ont été utilisés dans le cadre d'un benchmark de méthodes numériques à l'échelle européenne (projet européen AFLoNext - FP7). Davantage de détails sur le phénomène de tremblement et son contrôle sont donnés dans la référence [2].

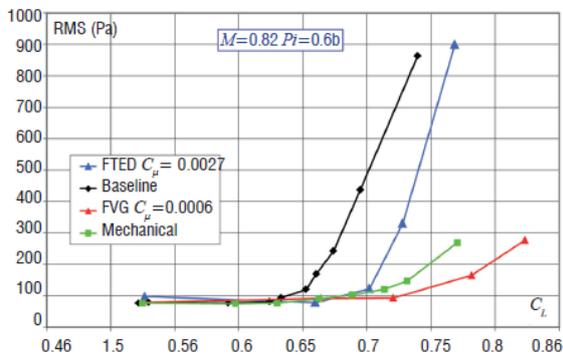


Figure 12. Entrée en tremblement pour la référence (Baseline), avec des actionneurs mécaniques et fluidiques (FVG, FTED) – boucle ouverte (extrait de [1]-01)

PERSPECTIVES

L'optimisation des performances et la montée en maturité de solutions de contrôle d'écoulements ont beaucoup progressé ces vingt dernières années, mais requièrent encore des efforts de recherche et développement. Sur les aspects méthodes, la théorie de la stabilité (notamment globale) et l'intelligence artificielle laissent présager de progrès importants dans un avenir proche. Sur les aspects technologiques, il est important de consolider la communauté française, travaillant tant sur les actionneurs que sur les senseurs. Signalons ici l'initiative « CONTRAERO » mise en place dans les Hauts-de-France (voir article dédié dans le même numéro) qui permet de fédérer les différents acteurs à l'échelle régionale.

Jusqu'à présent, le contrôle d'écoulements a été vu comme un axe d'amélioration de systèmes existants. Un des axes des travaux à venir sera d'intégrer le potentiel du contrôle d'écoulements dès le début du processus de conception de l'objet : ainsi, nous pouvons espérer élargir l'espace de design et aboutir à des formes encore plus optimisées. Ceci est particulièrement important dans le contexte actuel de développement de nouvelles technologies de propulsion (électrique, hybride, distribuée, etc.) et configurations d'avions (ingestion de couche limite, aile haubanée, aile volante, etc.).

Références

- [1] Revue Aerospace Lab Journal, Issue 6, juin 2013 (ISSN: 2107-6596) <https://aerospacelab.onera.fr/>
- [2] Point sur l'avancement des recherches européennes sur le tremblement, Eric Coustols, lettre 3AF n°39 (septembre-octobre 2019)

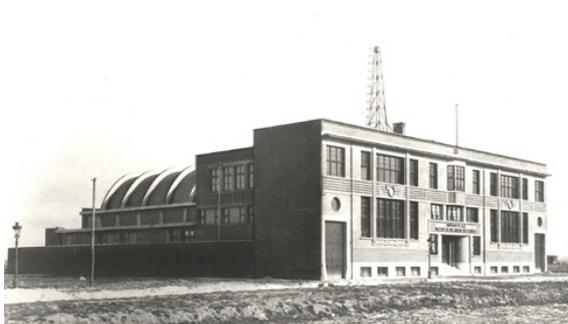
Remerciements

L'auteur tient à remercier Q. Gallas, J. Dandois, E. Deletombe, E. Garnier, F. Ternoy, E. Coustols de l'ONERA, P. Joseph d'Arts et Métiers ParisTech et J. Détery 3AF, pour leur relecture attentive de l'article. ■

HISTOIRE

LE CENTRE DE LILLE DE L'ONERA - INSTITUT DE MÉCANIQUE DES FLUIDES DE LILLE. 90 ANS AU SERVICE DE L'AÉRONAUTIQUE

par Eric Deletombe, ONERA et Jean-Luc Charles, retraité ONERA



L'Institut de mécanique des fluides de Lille en 1934, après son inauguration.

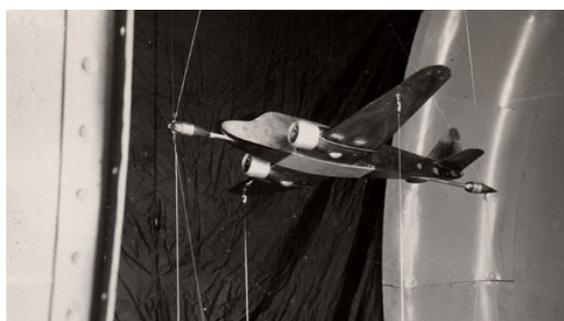
C'est en 1930 que l'Institut de mécanique des fluides de Lille a pris son envol et s'est mis au service de l'industrie aéronautique française sous l'impulsion du directeur général technique de l'air, Albert Caquot, et sur l'initiative du doyen de la faculté des sciences de Lille, A. Maige.

Créé au sein de l'université, l'institut, sous la direction du professeur Kampé de Fériet, éminent mathématicien et spécialiste du calcul vectoriel et de ses applications, a été doté dès 1934 d'une soufflerie horizontale basse vitesse de 2,2 m de diamètre, équipée d'une balance à 5 composantes et d'un bassin hydrodynamique de 22 m de long, tous deux encore en activité à ce jour. Les études sont orientées dès la création vers l'analyse des phénomènes de turbulence et la mécanique du vol notamment dans ses aspects instationnaires. C'est ainsi qu'en 1938 est inauguré par l'ingénieur général Paul Dumanois, président du Groupement de recherches aéronautiques (GRA), une soufflerie verticale de 2 m de diamètre destinée à l'étude de la vrille des avions.

Les principales études en soufflerie sont alors effectuées au profit des industriels français de l'aéronautique, Potez, dont le bureau d'études et les ateliers de fabrication se trouvaient à Méaulte, Dewoitine, Latécoère, CAMS. Dès cette période, Figurent déjà parmi les clients de l'institut des firmes étrangères (AVIA de Prague).

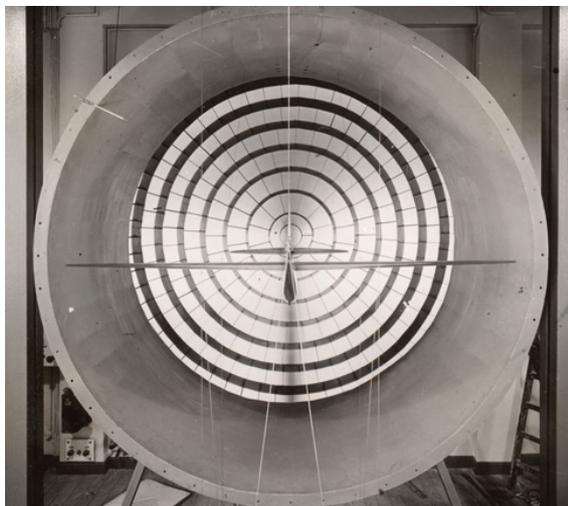


Visite de la soufflerie horizontale dans les années 1937-1938. Maquette du Potez 63 sur girouette Lapresle. De gauche à droite : Kampé de Fériet, directeur ; Martinot-Lagarde, son adjoint ; très probablement M. Bonifet, des Établissements Potez et M. Guienne, responsable de la soufflerie.



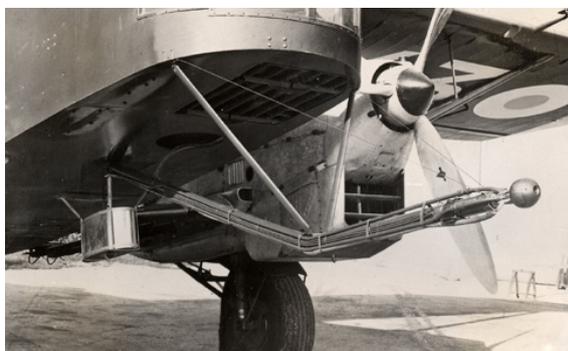
Montage pour l'étude de la stabilité transversale de l'avion POTEZ 56

LE CENTRE DE LILLE DE L'ONERA - INSTITUT DE MÉCANIQUE DES FLUIDES DE LILLE. 90 ANS AU SERVICE DE L'AÉRONAUTIQUE



Maquette d'un planeur AVIA-France dans la veine de la soufflerie horizontale de 2,2 m de diamètre

L'institut possédait également un service de météorologie, faisant partie du réseau général de l'ONM, indicatif 916, qui assurait la couverture météorologique des lignes commerciales partant de Lille ou passant à proximité et qui disposait d'un poste émetteur de radiotélégraphie lui permettant des liaisons rapides avec les avions en vol et le contact continu avec les postes du Bourget, de Londres, de Cologne et de Bruxelles. Une annexe de ce service fonctionnait au Centre de vol sans moteur de la Banne d'Ordanche avec pour mission de conduire des recherches aérodynamiques sous les directives de la Commission de la turbulence atmosphérique. C'est autant pour les besoins météorologiques (mesure de la vitesse, du site et de l'azimut du vent) que pour la mesure du vecteur « vitesse relative » de l'avion en vol (vitesse, incidence et dérapage) que l'anémoclinomètre IMFL a été développé et mis en œuvre.



Anémoclinomètre IMFL monté en avant du fuselage de l'avion laboratoire POTEZ 54.

A l'invasion allemande de 1940, l'IMFL reçoit l'ordre de se replier à Toulouse, accueilli dans les locaux de l'Institut de mécanique de Toulouse par le professeur Léopold Escande. C'est pendant cette période que l'institut poursuit ses travaux sur la couche limite et sur la turbulence atmosphérique. Il conduit également des essais en vol à Aire-sur-Adour et sur les lignes postales partant de Toulouse. Fort de cette expérience et conscient de la nécessité de mener des recherches approfondies en mécanique du vol, l'IMFL conçoit une soufflerie de vol libre et en commence la construction à Toulouse ; construction qui sera arrêtée à la fin de l'occupation allemande en 1944. Ce n'est qu'en 1961, sur le site de Lille, qu'une telle soufflerie verra le jour.

Le GRA ayant été dissous début 1946, l'Office national d'études et recherches aérospatiales (ONERA), créé par décret du 12 juin 1946, reprend le contrat de gestion de l'IMFL liant le GRA à l'Université de Lille, tout en mutant la presque totalité des ingénieurs, formés par le professeur Kampé de Fériet, dans ses laboratoires de la région parisienne. L'ONERA résilie ce contrat le 21 septembre 1950. Pendant cette période de rattachement, sous l'impulsion de la direction de l'aérodynamique de l'ONERA., le centre de Lille devient un centre de formation de techniciens de l'ONERA dans la maîtrise des techniques d'essais et des mesures en soufflerie. Une soufflerie transsonique de petites dimensions, à parois haute et basse continûment déformables, est alors construite en 1948 pour l'étude des écoulements dans ce domaine de nombre de Mach particulièrement mal connu. C'est ainsi que de nombreux liens se sont instaurés dès cette époque entre les équipes du centre de Lille et les équipes de l'ONERA de Modane, Chalais-Meudon et Châtillon.



La soufflerie transsonique en 1948

HISTOIRE

LE CENTRE DE LILLE DE L'ONERA - INSTITUT DE MÉCANIQUE DES FLUIDES DE LILLE. 90 ANS AU SERVICE DE L'AÉRONAUTIQUE

Il revient au professeur André Martinot-Lagarde, directeur de l'institut depuis 1945, le grand mérite d'avoir résolument orienté les activités de l'IMFL vers les problèmes liés à la sécurité du vol des avions et, dans le domaine des recherches fondamentales, vers l'étude expérimentale des écoulements transsoniques. Bien avant d'assumer la direction de l'institut, le professeur Martinot-Lagarde s'était attaché à préciser les notions d'analyse dimensionnelle et de similitude en mécanique des fluides, à en développer les méthodes, à en étudier les limites d'application et à les utiliser pour mener des recherches sur maquettes. C'est ainsi qu'il prévoyait l'essor important que prendrait l'étude du vol de l'avion sur maquettes libres.

Sous sa direction, de 1950 à 1968, l'IMFL s'enrichit d'un atelier de fabrication de maquettes, d'un bassin d'amerrissage, d'une piste pour l'étude de l'atterrissage des avions sur maquettes, d'une soufflerie de vol libre pour l'étude de la réponse des avions aux rafales atmosphériques, d'une nouvelle soufflerie verticale de 4 m de diamètre (SV4) et dans le domaine des mesures dans les écoulements transsoniques d'un dispositif non intrusif de mesure de la vitesse par interférométrie mis au point par le professeur Gérard Gontier.

L'Institut, soutenu de façon constante par la Direction technique des constructions aéronautiques (DTCA) et avec l'appui du STAé, a poursuivi son effort de recherche au plus grand profit des industriels français de l'aéronautique. Les installations mises en place à l'IMFL par la DTCA représentent un équipement important qui, pour l'étude des phénomènes aérodynamiques instationnaires tels que la vrille des avions, l'influence des rafales atmosphériques, l'atterrissage et l'amerrissage, n'a pas d'équivalent en Europe. Ces installations sont utilisées de façon permanente non seulement par les industriels français mais aussi par les industries aéronautiques étrangères notamment italiennes, allemandes, britanniques, suisses, indiens, suédois, brésiliens, etc.



Maquette d'un avion suisse, le C3605 (C3603 avec turbopropulseur).



Amerrissage d'une maquette d'Airbus.



Avion italien, le SM211 (Siai-Marchetti).



Maquette du Concorde en atterrissage



Maquette d'un avion allemand, le VFW 614.

LE CENTRE DE LILLE DE L'ONERA - INSTITUT DE MÉCANIQUE DES FLUIDES DE LILLE.
90 ANS AU SERVICE DE L'AÉRONAUTIQUE



Le Harrier avec sa panoplie de charges.

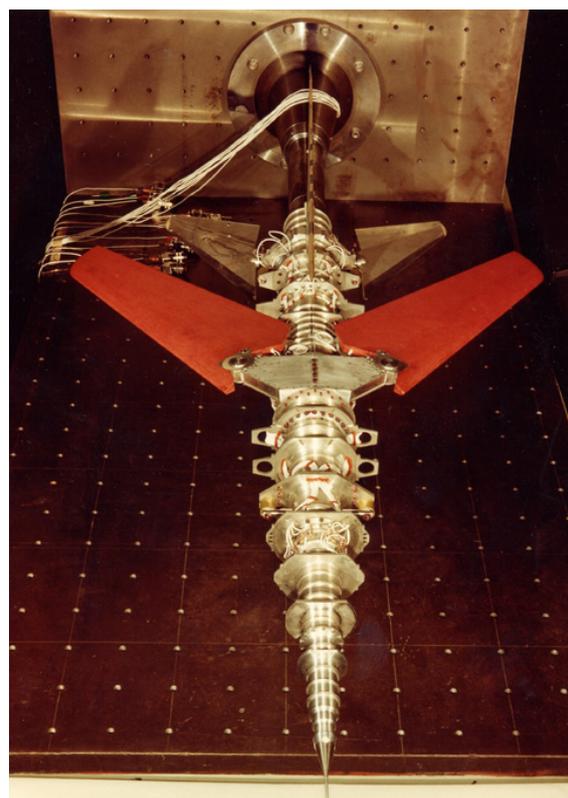


Essai de vrille libre d'une maquette d'Alpha-Jet, en soufflerie verticale de 4 m de diamètre

De 1968 à 1983, sous les directions respectives du professeur Gérard Gontier et de Monsieur J. Gobeltz, l'Institut de mécanique des fluides de Lille poursuit son développement. Notamment, aux études de mécanique du vol et d'aérodynamique, viennent s'ajouter des études et recherches en mécanique des structures avec la conception et la réalisation de maquettes de flottement au profit des Avions Marcel Dassault – Breguet Aviation et de l'Aérospatiale, les études générales de conception des techniques de construction de maquettes pour souffleries cryogéniques, l'étude du crash des structures aéronautiques sur maquettes en similitude structurale et le démarrage des recherches en calcul des structures en grandes déformations et en grands déplacements.

Les recherches sur les structures s'appuyant sur les capacités des ateliers à réaliser des maquettes représentatives en similitude structurale, un très fort développement des ateliers intervient avec notamment la création d'un atelier de mise en œuvre des matériaux composites

à base de fibres de verre, de carbone et de kevlar ainsi que l'implantation de machines à commande numérique performantes et bien adaptées à la fabrication des maquettes.



Structure de fuselage d'une maquette de flottement.

La montée en puissance de la Direction des recherches et études techniques (DRET), au détriment du Service technique aéronautique dès 1974 (?) dans la passation des contrats avec l'IMFL, modifie en douceur mais profondément et durablement la structure des recherches et études menées en les faisant passer de l'expérimentation à l'analyse et à la simulation numérique tout en restant fortement appuyées sur l'expérience en laboratoire. Cette mutation a entraîné une modification de la structure des personnels avec l'arrivée d'une forte population d'ingénieurs et d'une baisse relative du nombre des techniciens comme l'indique le graphique ci-dessous.

En 1983, pour la seconde fois dans son histoire, l'Institut de mécanique des fluides de Lille est rattaché, après une longue période d'incertitude, à l'ONERA – premier acteur français de la recherche aéronautique et spatiale – tout en conservant son autonomie de gestion.

HISTOIRE

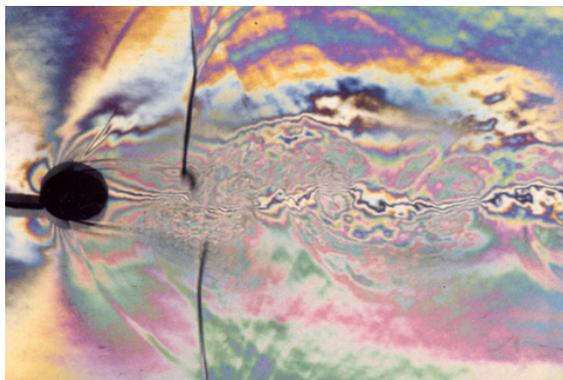
LE CENTRE DE LILLE DE L'ONERA - INSTITUT DE MÉCANIQUE DES FLUIDES DE LILLE. 90 ANS AU SERVICE DE L'AÉRONAUTIQUE

C'est immédiatement l'ouverture à une communauté scientifique importante, une collaboration fructueuse avec les Directions scientifiques de l'office, notamment la Direction de l'aérodynamique, la Direction des Structures et la Direction des études de synthèse. Sur le plan des équipements, l'effort financier de l'ONERA est important et est resté conséquent jusqu'à ce jour. L'institut se voit doté d'équipements de calcul et de laboratoire lui permettant une recherche de tout premier plan bien intégrée dans celle de l'ONERA et conservant son originalité et sa spécificité dans le domaine de la sécurité du vol des avions auquel viennent s'ajouter, avec le développement des recherches en mécanique des structures, les recherches sur la sécurité des cellules.

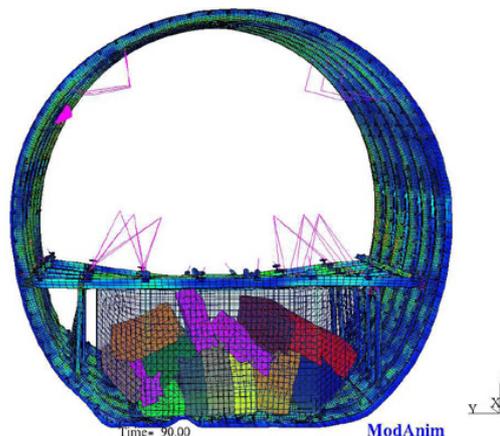
Sous la direction de Daniel Bahurel, directeur de 1988 à 1995, un effort particulier est porté à l'extension des réserves foncières de l'établissement par l'achat de terrains avoisinants. L'Institut porte alors sa surface au sol à 17 000 m². Sous son impulsion, les liens avec la Région Nord - Pas-de-Calais, l'Université des sciences de Lille et l'Université de Valenciennes, qui s'étaient distendus lors de l'intégration de l'institut dans l'ONERA, sont renoués. S'appuyant sur l'aide financière de la Région, un ambitieux programme de construction de laboratoires et d'installations destinées aux études industrielles est lancé.

Un nouveau bâtiment consacré à l'aérodynamique est construit. Il accueille de nouvelles activités, dont celles consacrées au développement de méthodes non intrusives de mesure des vitesses dans les écoulements fluides, interférométrie, interférométrie holographique, PIV (mesure de la vitesse par images de particules), fluorescence induite par laser.

En mécanique des structures, les recherches sur le crash des avions commerciaux, les explosions, la pénétration de projectiles dans les réservoirs en association avec la recherche expérimentale et numérique de nouvelles lois de comportement des matériaux dans le domaine des vitesses moyennes de déformation s'intensifient avec l'aide de l'Aérospatiale, d'Eurocopter et la participation à de nombreux contrats européens. Des recherches sur de nouveaux concepts de rotors d'hélicoptères optimisés à déformations structurales programmées sont engagées avec la Direction de l'aérodynamique conduisant à la réalisation de maquettes souples de rotors et à leurs essais en soufflerie.

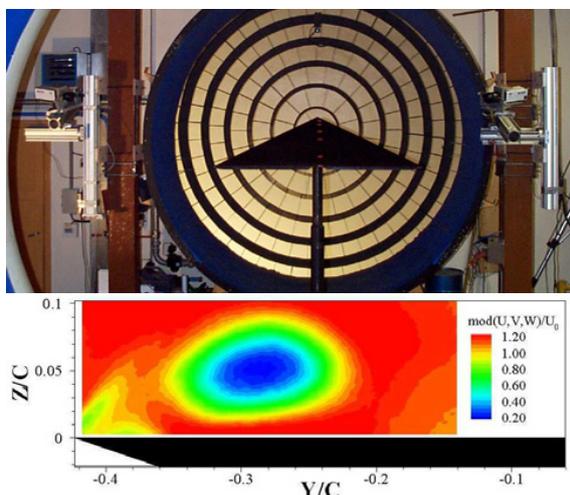


Écoulement autour d'un cylindre à Mach 0,8. Visualisation par interférométrie différentielle.



Tronçon 6 cadres d'Airbus A321 avant crash (DGA TA) et simulation numérique ONERA associée (avec conteneur à bagages).

LE CENTRE DE LILLE DE L'ONERA - INSTITUT DE MÉCANIQUE DES FLUIDES DE LILLE. 90 ANS AU SERVICE DE L'AÉRONAUTIQUE

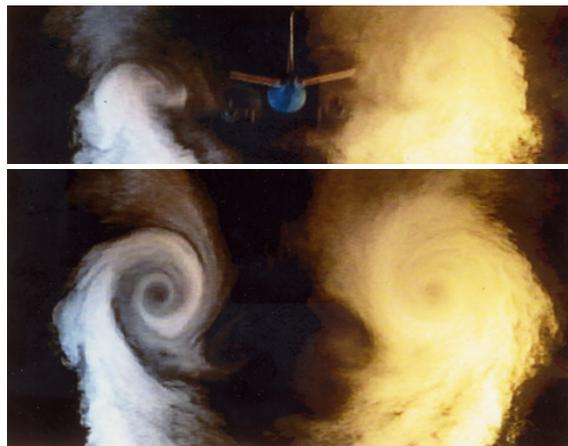


Carte de vitesse obtenue par PIV à l'extrados d'une voilure.

De 1996 à 2001, l'Institut poursuit son intégration européenne notamment dans les domaines de la mécanique des structures et de l'aérodynamique. Ses équipes acquièrent une dimension internationale et une collaboration très étroite s'instaure avec Aérospatiale dans le domaine de la sécurité des cellules et du vol de l'avion. L'ouverture vers l'Europe s'accompagne de l'arrivée importante de fonds européens de développement régional (FEDER) qui, en s'appuyant sur les investissements de l'ONERA, permettent un développement accru des moyens d'essais et de calcul.

C'est au cours de cette période, en 1997 plus précisément, que l'ONERA, sous l'impulsion du Président Michel Scheller (depuis et jusqu'à très récemment encore, Président de 3AF), entreprend une profonde réorganisation dans laquelle un institut modernisé prend définitivement place, en échange de la perte de son autonomie de gestion, mais au profit d'une unification administrative et scientifique. L'Institut de mécanique des fluides de Lille s'efface pour devenir le centre de Lille de l'ONERA. Il est alors dirigé par Francis Dupriez. Quatre départements de l'ONERA, multisites, accueillent désormais les quatre unités de recherches lilloises, et c'est dans cette configuration nationale que les nouvelles installations entrent en activité, avec des essais en vol libre opérés dans un nouveau bâtiment d'une centaine de mètres de longueur sur vingt de large (B20), visant à étudier les phénomènes instationnaires liés entre autres aux écoulements décollés et aux mouvements amples et rapides de l'avion en vol). Le hall d'essais mécaniques et la « Tour de crash » entrent également en action : ils sont

dédiés à l'étude de la réponse dynamique des matériaux et des structures aéronautiques, et visent à l'amélioration des générations futures d'aéronefs en termes de sécurité passive, à l'instar de ce qui se fait en parallèle en région dans les secteurs automobile et ferroviaire.



Visualisation du sillage tourbillonnaire en laboratoire de vol libre B20

L'intégration dans le tissu scientifique universitaire régional se renforce et de véritables équipes mixtes sont mises en place sur des programmes communs notamment en mécanique des structures et en mécanique des fluides. La reconnaissance régionale de cette intégration conduit à une contractualisation de l'ONERA avec la Région Nord - Pas-de-Calais dans le cadre du contrat de plan 2001-2006. Ainsi des financements régionaux et européens sont mis en place tant pour conforter les programmes scientifiques présentés conjointement par l'ONERA Lille et les équipes universitaires que pour permettre l'extension de ses laboratoires et sa rénovation et ainsi conforter la place de la Région dans les recherches en mécanique.

De 2007 à 2017, les installations du Centre - aujourd'hui dirigé par Bénédicte Cléry, qui a succédé à Pascal Geoffroy et, avant lui, Anne-Marie Mainguy - gagnent encore en notoriété, ses équipes en excellence. Elles se positionnent désormais - avec leurs partenaires régionaux - parmi les leaders nationaux et internationaux dans leurs domaines. La Région et l'Europe (via le Fonds FEDER) continuent d'accompagner le Centre ONERA dans cette nouvelle trajectoire, en lui permettant de se doter d'équipements technologiques de pointe, déterminants pour accompagner la transformation digitale du monde de la recherche en mécanique. Caméras numériques rapides et

HISTOIRE

LE CENTRE DE LILLE DE L'ONERA - INSTITUT DE MÉCANIQUE DES FLUIDES DE LILLE. 90 ANS AU SERVICE DE L'AÉRONAUTIQUE

ultra-rapides, dans les spectres infrarouges et visibles, calculateurs parallèles, outils d'exploitation des données qui augurent du Big Data à venir, et logiciels de simulation pour l'expérimentation virtuelle, précurseur du concept de jumeaux numériques. Et vingt ans après la précédente, dans un monde où tout s'accélère et se globalise, une nouvelle ré-organisation de l'ONERA devient nécessaire, des départements techniques de l'ONERA fusionnent, leur nombre passant de 18, à 7. La conséquence la plus notable pour le Centre ONERA de Lille concerne le regroupement des deux unités de Mécanique des Fluides et de Mécanique du Vol. De nouvelles thématiques émergent au niveau mondial, les installations du Centre s'adaptent, et s'engagent dans une nouvelle mutation pour y répondre.



La tour de Crash (15 m de haut, 200 kJ à l'impact), un investissement unique en Europe, soutenu par l'ONERA, la Région Hauts-de-France et le FEDER (EU), au bénéfice du secteur aéronautique

Les Hauts-de-France font partie des 5 régions de France qui accueillent aujourd'hui l'ONERA sur leur territoire. Depuis sa création en 1930, les installations régionales ont constamment évolué en dimensions et en thèmes d'études, en réponse aux besoins des avionneurs

industriels, et des scientifiques. La soufflerie horizontale originelle, associée à de nouvelles technologies de mesure, était en 2020 la plus utilisée des installations du Centre de Lille. La soufflerie verticale de 2 mètres de diamètre a été remplacée par une soufflerie verticale de 4 mètres de diamètre, toujours aussi unique : elle fait encore l'objet de beaucoup d'attention et de projets d'adaptation. La première station de catapultage (20 mètres de vol libre) a fait place à une installation également unique en son genre, intégrant des générateurs de rafales verticales et latérales, permettant d'atteindre 50 mètres de vol libre, et de s'intéresser à de nouvelles problématiques (drones). La Tour de Crash et une large panoplie de moyens d'essais dynamiques complémentaires, permettent dorénavant d'étudier à l'échelle 1 les problèmes de résistance structurale aux impacts et au crash. Le bureau maquettes est devenu une équipe leader mondiale dans la fabrication de maquettes aéronautiques et spatiales (très) complexes. Toutes ces installations matérielles sont associées à des moyens informatiques permettant de concevoir, préparer, comprendre, et optimiser le nombre d'essais qui continuent de jaloner le chemin critique de développement de tout aéronef futur : ils sont à ce titre, et resteront longtemps encore, incontournables. C'est dans ce cadre et avec ces objectifs que les liens avec l'écosystème universitaire régional ont été renforcés, avec en particulier l'UPHF/LAMIH (laboratoire commun en Dynamique Rapide, avec l'unité CRD), l'ULille/LMFL (laboratoire commun en Mécanique des Fluides avec l'unité ELV) et l'ULille/LaMcube (qui accueille depuis peu plusieurs chercheurs associés de l'unité CRD).



Maquette de drone pour lanceurs aéroportés (Eole) dans la soufflerie L2 (à gauche) – Essais de crash d'un fond de barque de fuselage composite (à droite)

La suite de cette belle histoire, vous sera probablement contée à l'occasion du Centenaire du Centre en 2030, dans un nouveau numéro spécial Hauts-de-France de la Lettre 4AF ? En attendant, soyez convaincus que l'ONERA et son Centre de Lille vous réservent encore bien des surprises. ■

CULTURE

JOSEPH KAMPÉ DE FÉRIET ET LES DÉBUTS DE L'INSTITUT DE MÉCANIQUE DES FLUIDES DE LILLE (1930-1940)

par Bruno Chanetz, Membre émérite 3AF

Le dernier article (pp. 32-35) de la Lettre 3AF n°23 de janvier-février 2017 faisait le point sur "100 ans de mécanique des fluides" en mettant l'accent sur l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT), où avait été organisé fin 2016 un congrès sur cette thématique. Mais l'IMFT n'est pas le seul Institut de Mécanique des Fluides créé par Albert Caquot en 1930. Il y avait en effet trois autres instituts à Paris, Marseille et Lille. Aussi cet article traite des débuts de l'IMFL, désormais intégré à l'ONERA, à travers la personnalité de son directeur-fondateur Joseph Kampé de Fériet. Il repose sur les travaux conduits par Antonietta Demuro dans le cadre de sa thèse de doctorat "La mécanique des fluides en France durant l'entre-deux guerres : J. Kampé de Fériet et l'IMFL", soutenue le 28 mai 2018 à l'université de Lille devant un jury composé de huit examinateurs dont Bruno Chanetz. On pourra également consulter l'article d'Antonietta Demuro, publié aux Comptes Rendus Mécanique de l'Académie des Sciences :

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S163107211730089X>.

LA FORMATION ET LES PREMIERS TRAVAUX DE KAMPÉ DE FÉRIET (1912-1928)

En juillet 1912, Kampé de Fériet obtint une licence de mathématique à la Sorbonne, puis en juillet 1913 un diplôme supérieur de Mécanique Céleste. Il soutint sa thèse sur les fonctions hyper-sphériques en juillet 1915 à la faveur d'un congé de l'armée. Stagiaire à l'Observatoire de Paris en 1914, il avait en effet été affecté, lors de la mobilisation générale, au dépôt du 104^{ème} régiment d'infanterie à Argentan en Normandie. En juin 1916, il est muté à la Commission d'expérience de l'artillerie navale de Gâvre, institution située à Port-Louis face à Lorient, dont la création remonte au règne de Charles X. Elle réunit des scientifiques œuvrant à la réalisation d'expériences utiles à l'armée. Au début de la guerre, du fait des mobilisations, les effectifs étaient réduits à cinq ingénieurs d'artillerie navale. Par la suite les autorités militaires, conscientes que la guerre se joue aussi au niveau scientifique, renforcent le potentiel humain. Kampé de Fériet et son collègue mathématicien Jules Haag utilisent alors les méthodes de la mécanique céleste pour calculer une trajectoire balistique soumise à de petites perturbations. Kampé de Fériet détermine aussi les lois de la résistance de l'air d'un projectile à proximité du sol, en partant d'une étude d'hydrodynamique du mathématicien Henri Villat sur la résistance d'un fluide incompressible à deux dimensions. Kampé de Fériet commence aussi à s'intéresser aux questions de mécanique des fluides expérimentale. Il met ainsi au point, avec le physicien Gabriel

Foex, un appareil photographique destiné à enregistrer les vitesses d'un projectile. La période de la guerre aura eu le mérite d'établir des liens entre les milieux militaire et universitaire. Ses liens se poursuivent après la guerre, la commission de Gâvre accueillant des civils à partir de 1920. Kampé de Fériet, nommé membre assistant, poursuit, avec Foex, la mise au point d'un dispositif capable de mesurer de grandes vitesses. En août 1924, ils réussissent à mesurer en plein jour des vitesses atteignant 750 m/s. La méthode Kampé de Fériet sera appliquée en 1937 avec succès par son étudiant Jean Wagner - qui deviendra chef de la soufflerie verticale de l'IMFL - dans le cadre sa thèse sur l'étude par l'enregistrement photographique du mouvement accéléré d'une sphère tombant en chute libre dans un liquide visqueux.

ÉTAT DE L'AÉRODYNAMIQUE EN FRANCE À LA FIN DES ANNÉES 20

En octobre 1928 lorsqu'Albert Caquot prend ses fonctions de directeur général de la Section Technique de l'Aéronautique (STAé) au tout nouveau Ministère de l'Air, la France a accumulé un retard au niveau aérodynamique par rapport à l'Allemagne et la Grande-Bretagne et ce malgré l'œuvre immense de Gustave Eiffel sur le plan expérimental. Après 1930 les Etats-Unis vont profiter de l'immigration antinazie pour constituer une école de premier plan autour de Theodore Von Kármán. A cette époque, l'enseignement en France souffre d'une priorité accordée à la théorie en raison du manque d'intérêt des universitaires pour la recherche expérimentale. De plus, ce milieu universitaire entretient peu de rapports avec l'industrie et l'armée. L'exemple de la Commission du Gâvre constitue une exception. Les recherches françaises en mécanique des fluides sont également moins connues que celles des pays voisins. Pour remédier à ce problème, Albert Caquot crée cinq chaires de mécanique des fluides à Strasbourg, Nantes, Lyon, Caen et Poitiers et quatre instituts de mécanique des fluides à Paris, Marseille, Lille et Toulouse.

La nomination de Joseph Kampé de Fériet à la direction de l'Institut de Mécanique des Fluides de Lille va être le point de départ de recherches fructueuses théoriques et expérimentales dans le domaine de la théorie statistique de la turbulence et de la turbulence atmosphérique. Les résultats obtenus par Kampé de Fériet et son équipe pendant l'entre-deux-guerres seront jugés remarquables par la communauté scientifique internationale et feront écrire au mathématicien Paul Levy en 1951 : (Kampé de

CULTURE

JOSEPH KAMPÉ DE FÉRIET ET LES DÉBUTS DE L'INSTITUT DE MÉCANIQUE DES FLUIDES DE LILLE (1930-1940)



Vue de l'IMFL à sa création

Férier) est très estimé en Amérique mais je me demande si en France on se rend bien compte de sa valeur.

LES DÉBUTS DE L'IMFL (1930-1940)

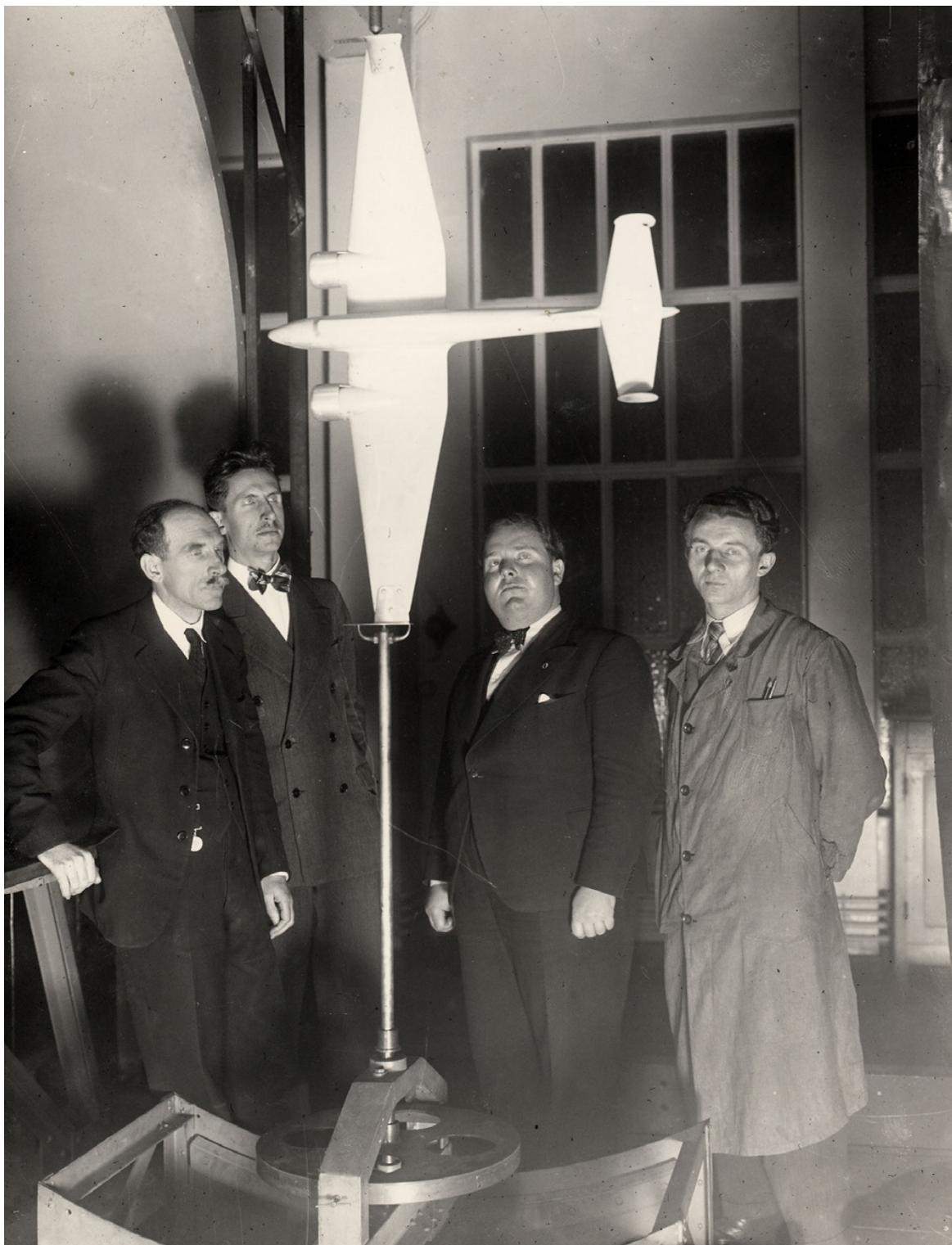
L'Institut de Mécanique des Fluides de Lille fut créé en 1930 par décret présidentiel du 26 mars. Il doit constituer un centre d'enseignement supérieur et de recherches scientifiques dans les domaines de l'aérodynamique et l'hydrodynamique. L'inauguration officielle de l'IMFL eut lieu le 7 avril 1934. Les principales installations du Centre étaient à sa création, une soufflerie horizontale basse vitesse de 2,2 m de diamètre et un bassin hydrodynamique de 22 m de long et d'1 m² de section. En 1938 une soufflerie verticale sera édifiée.

Lorsque Kampé de Fériet est nommé directeur du nouvel Institut de Mécanique des Fluides de Lille, il est déjà maître de conférence à la faculté des sciences de Lille depuis 1919 et à l'Institut Industriel du Nord (IDN), devenu Ecole Centrale de Lille, depuis 1923. Parisien de naissance, il restera à Lille jusqu'à la fin de sa vie, sauf pendant l'occupation allemande durant la seconde guerre mondiale.

Les statuts de l'IMFL rendaient cette structure apte à recevoir des subventions de l'état (université, Ministère de l'Air), mais également à exécuter des contrats au profit de l'industrie. Ainsi, en liaison avec l'industriel aéronautique Potez, l'IMFL développera des recherches en aérodynamique orientées vers la théorie de la turbulence, une thématique très en vogue à Lille depuis Joseph Boussinesq, professeur à l'IDN, qui proposa en 1877 l'hypothèse de viscosité turbulente.

Vers 1935, Kampé de Fériet laissa de côté ses travaux sur la balistique ainsi que ses travaux mathématiques sur l'hydrodynamique. Il commença à s'éloigner de cette mécanique des fluides théorique, chère à Henri Villat afin de se tourner vers un nouveau sujet, plus proche des aspects expérimentaux et plus " international " : la théorie de la turbulence, dans laquelle il excellera. En 1938 Von Kármán écrivait, dans une lettre à Jérôme C. Hunsaker, un des organisateurs du congrès ICAM (International Conference and Annual Meeting) de Cambridge en 1938 : " Je crois vraiment que l'homme qu'il nous faut pour une conférence générale est Kampé de Fériet, Directeur de l'Institut de Mécanique des Fluides de Lille. Au cours des dernières années il a publié deux comptes rendus sur les récents progrès concernant les vagues

CULTURE
**JOSEPH KAMPÉ DE FÉRIET ET LES DÉBUTS DE L'INSTITUT DE MÉCANIQUE
DES FLUIDES DE LILLE (1930-1940)**



Joseph Kampé de Fériet et André Martinot-Lagarde, son adjoint et futur successeur, un ingénieur des établissements Potez de Méaulte et Paul Guienne, ingénieur responsable de la nouvelle soufflerie horizontale de l'IMFL, photographiés devant une maquette de Potez 63 dans les années 1935-1936

CULTURE

JOSEPH KAMPÉ DE FÉRIET ET LES DÉBUTS DE L'INSTITUT DE MÉCANIQUE DES FLUIDES DE LILLE (1930-1940)

et la turbulence. Les deux rapports étaient excellents et juste à la limite entre le point de vue théorique et pratique comme nous voudrions qu'il soit. »

Et Antonietta Demuro de conclure : Les recherches de Kampé de Fériet forment une contribution remarquable à la théorie de la turbulence de l'époque. Elles font partie du même mouvement qui implique les théories de Taylor en Angleterre, de Prandtl en Allemagne et de Von Kármán et Dryden aux États-Unis. Il joue un rôle presque paradoxal : dans ce contexte, il représente la France mais, en même temps, il semble qu'il ne fasse pas partie de la communauté française !

De fait, à son époque la communauté française de l'aérodynamique avait tendance à négliger les travaux de Kampé de Fériet, privilégiant la seule théorie sous l'influence de son chef de file Henri Villat, professeur à la Sorbonne et directeur de l'Institut de Mécanique des Fluides de Paris. C'est pourtant grâce à Henri Villat que Kampé de Fériet avait été désigné comme directeur du nouvel Institut de Mécanique des Fluides de Lille en 1930. En 1971, Kampé de Fériet, se souvenant plus du geste que de leurs divergences postérieures, évoquera avec respect Henri Villat, lors de sa cérémonie de réception dans l'Ordre national du mérite : Henri Villat, Fondateur et Chef de l'École Française de la Mécanique des Fluides, qui attira l'attention du Ministère de l'Air sur les modestes essais que j'avais effectués à la Commission d'Expériences de l'Artillerie Navale de Gâvre.

EN CONCLUSION

En 1940, l'IMFL est transféré à Toulouse dans le château de Péchestier. Ce n'est qu'en décembre 1944 que l'Institut retrouve les murs du boulevard Painlevé à Lille. Dès 1945 Joseph Kampé de Fériet confie à son adjoint André Martinot-Lagarde, maître de conférences, la direction de l'IMFL.

Les discussions qui ont eu lieu, lors des échanges traditionnels, qui ont suivi l'exposé d'Antonietta Demuro, ont permis d'apporter un éclairage plus humain sur la vie de Kampé de Fériet et de l'IMFL. On apprend l'amitié qui le liait au recteur Albert Châtelet, laquelle n'était pas étrangère à sa nomination à la tête de l'IMFL. L'importance d'une "tradition Boussinesq" au sein de l'Institut Industriel du Nord dans lequel il enseignait, a également été mise en avant pour expliquer le choix de le proposer à la direction de ce nouvel institut. Enfin au niveau de l'homme privé, on rappela sa grande piété, au sujet de laquelle son fils prêtre, Lambert de Fériet, écrivit de très belles pages.

Olivier Darrigol, professeur à l'université Paris-Diderot, un des rapporteurs de cette thèse, a noté le dynamisme de l'IMFL et l'importance internationalement reconnue des travaux effectués en son sein, mais aussi une certaine indépendance, voire un manque de communication des divers instituts français de mécanique des fluides malgré la tutelle commune du Ministère de l'Air, et les relations privilégiées qu'entretenaient Kampé de Fériet et son institut avec l'élite internationale de la mécanique des fluides, comme en témoignent les quelques soixante-dix lettres échangées par Kampé de Fériet et Theodore von Kármán. Il poursuit : Il est intéressant de voir que la province française fut dans ce cas plus visible à l'étranger que le centre parisien, dont la principale autorité, Henri Villat, regardait pourtant de haut la concurrence provinciale.

Enfin pour achever ce panorama, rappelons que l'ONERA et l'IMFL ont vécu une histoire d'amour compliquée : un premier "mariage" en 1946, suivi d'un "divorce" en 1950, avant de convoler à nouveau en 1983. Nous y reviendrons en 2020 à l'occasion des 90 ans de la fondation de l'IMFL. ■

Directeur de la publication : Président 3AF : Louis Le Portz

Président du Haut conseil scientifique : Bruno Chanetz

Rédaction :

Laurent Planckaert

Quentin Gallas

Jacky Fabis

Julien Berthe

Gérald Portemont

Bruno Mialon

Frédéric Ternoy

Gilles Outtier

Emmanuel Eglinger

Eric Deletombe

Jean-Luc Charles

Bruno Chanetz

Conception graphique de la Lettre 3AF : ICI LA LUNE

Mise en page : Caroline Saux

Publication - Décembre 2021



Association Aéronautique
Astronautique de France

6, rue Galilée - Paris

Tél. : 01 56 64 12 30

Fax : 01 56 64 12 31

Email : gestionmembres@aaaf.asso.fr

www.3af.fr

