



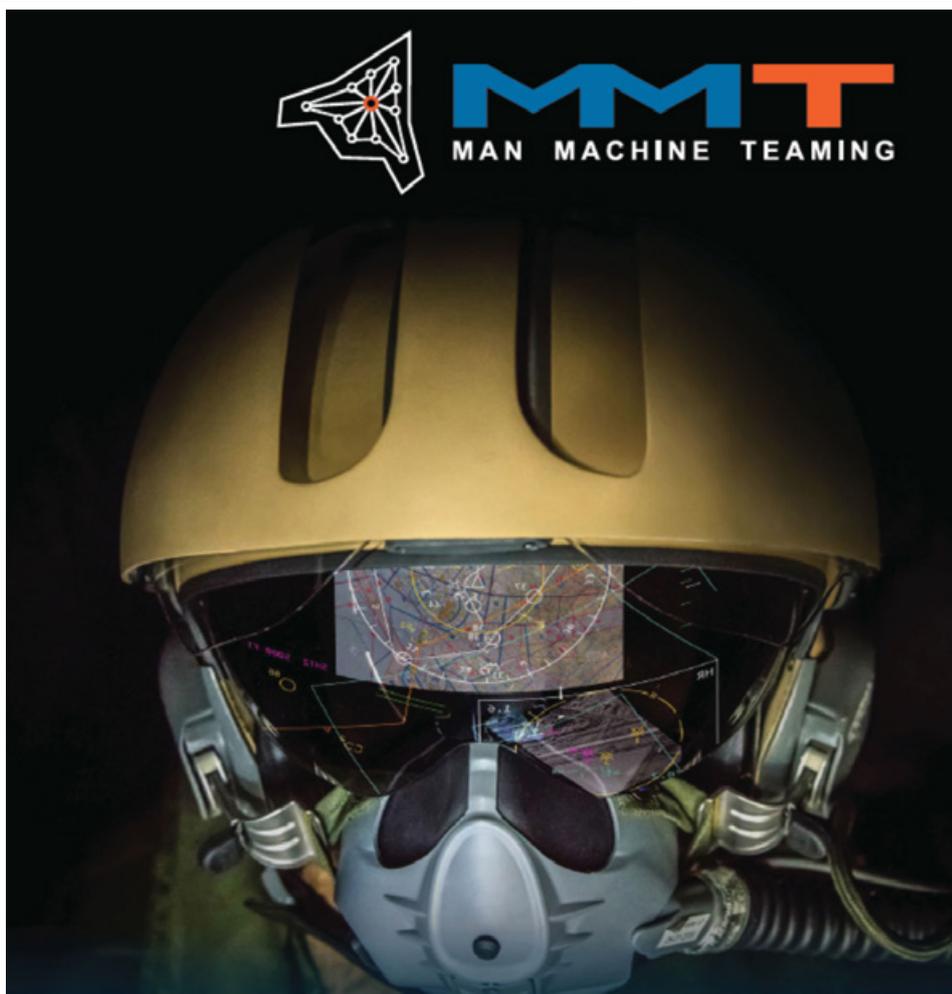
# LETTRE 3AF

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

Association Aéronautique  
et Astronautique de France



SAINT-EXUPÉRY PAR LE SCULPTEUR  
JEAN LETOURNEUR



## DOSSIER INTELLIGENCE ARTIFICIELLE



L'IMAGERIE ACOUSTIQUE :  
UNE TECHNIQUE EN CONSTANTE  
ÉVOLUTION POUR VISUALISER ET  
IDENTIFIER LES SOURCES DE BRUIT



DGA ESSAIS PROPULSEURS, UNE  
EXPERTISE ET DES MOYENS UNIQUES  
AU SERVICE DE L'INDUSTRIE  
AÉRONAUTIQUE



LES ATOMES FROIDS  
PRIX EXCELLENCE SCIENTIFIQUE  
3AF 2018

## 3 ÉDITORIAL

## 4 MESSAGE DU PRÉSIDENT

### POINT DE VUE

#### 5 INTELLIGENCE ARTIFICIELLE, UNE INTELLIGENCE AUGMENTÉE AU SERVICE DES ENTREPRISES ET DES MANAGERS

*Sandrine Macé, Professeur et directeur de la Chaire IoT, ESCP Europe*

#### 8 L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE SYMBOLIQUE CONTRE-ATTAQUE

*Laurent Chaudron, directeur du centre de recherche ONERA de Salon-de-Provence, Governor de l'Association cognitive guild, membre d'Alumni-ONERA*

### SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

#### 11 DEEP LEARNING POUR L'AÉROSPATIALE : LE PROJET DELTA À L'ONERA

*Alexandre Boulch, chef de projet (ONERA), Adrien Chan-Hon-Tong (ONERA), Bertrand Le Saux (ONERA) et Stéphane Herbin (ONERA)*

#### 14 MAN MACHINE TEAMING

*Stéphane Durand, Chef de service Interaction Homme-Système chez Dassault Aviation*

#### 17 RETOUR SUR LE FORUM IES 2018

*Marie-Claire Coët, Directrice de l'Information Scientifique et Technique de l'ONERA et membre de la Commission Intelligence Stratégique et Prospective de la 3AF*

#### 22 LA DIGITALISATION DES ENTREPRISES

*Bertrand de Montluc, membre de la commission Stratégie et Affaires Internationales de la 3AF*

#### 25 DGA ESSAIS PROPULSEURS

*Emilie Jérôme, experte en aérothermique, DGA Essais propulseurs, Commission Aérodynamique de la 3AF*

#### 31 IMAGERIE ACOUSTIQUE

*Denis Gely, Expert technique (ONERA), Renaud Davy, responsable de la thématique Expérimentation et métrologie acoustique (ONERA), Commission Aérodynamique de la 3AF*

#### 34 LES ATOMES FROIDS

*Alexandre Bresson, Yannick Bidet et Nassim Zazham (ONERA), lauréats du prix Excellence scientifique 2018*

### FOMATION ET CARRIÈRES

#### 38 EPF ÉCOLE D'INGÉNIEURS-E-S, LA MAJEURE AÉRONAUTIQUE & ESPACE INTERVIEW D'ODILE TISSIER

*Jean-Pierre Sanfourche, chargé de mission à la 3AF*

### VIE DE LA 3AF

#### 42 CREATION DE L'OBSERVATOIRE DU NUMERIQUE

*Alain Wagner, vice-président de la 3AF*

#### 43 COMPTE-RENDU DE LA REMISE DES PRIX 3AF

#### 46 AÉRO ADOUR 2018 À PAU

*Bernard Vivier, président du groupe Pays de l'Adour*

#### 47 UN NOUVEAU SOUFFLE POUR EOLIA

*François Leproux, ISAE-ENSMA, membre 3AF, groupe Poitou*

### CULTURE

#### 48 JEAN LETOURNEUR, SCULPTEUR DU MOUVEMENT FLUIDE

*Bruno Chanetz, maître de recherche à l'ONERA, président d'Alumni-ONERA*

### NOTE DE LECTURE

#### 54 RÉSEAUX ! LE PARI DE L'INTELLIGENCE COLLECTIVE PAR JACQUES BLAMONT

*Jean-Pierre Sanfourche, chargé de mission à la 3AF*

## 55 PARMIS LES PROCHAINS ÉVÉNEMENTS

#### ÉDITEUR

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

#### DIRECTEUR DE LA

#### PUBLICATION

Michel Scheller

#### RÉDACTEUR EN CHEF

Bruno Chanetz

#### COMITÉ DE RÉDACTION

Pierre Bescond  
Jean Détery  
Jean-Yves Guédou  
Paul Kuentzmann  
Bertrand de Montluc  
Jean-Pierre Sanfourche  
Jean Tensi  
Anne Venables  
Bernard Vivier

#### CONCEPTION GRAPHIQUE

ICI LA LUNE  
www.icilaLune.com

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



## ÉDITORIAL

Cette Lettre est consacrée à l'Intelligence Artificielle (IA), que l'on définit comme *un ensemble de disciplines informatiques qui s'intéressent au raisonnement et à l'imitation de capacités humaines*. C'est un sujet phare qui anime la société et dont s'emparent tous les journaux tant il s'immisce au cœur même de notre humanité. Les politiques des entreprises les plus innovantes s'inscrivent dans son développement avec le double objectif de créer de la valeur et remplacer l'homme à toutes les étapes du processus industriel, y compris dans les phases les plus amont, où cette révolution n'était attendue ni aussi vite, ni avec autant d'intensité.

Depuis le commencement des temps, l'homme a cherché à être suppléé par la machine : tout d'abord par le développement d'outils rustiques, puis de plus en plus élaborés ; ensuite avec l'invention de mécanismes sophistiqués. Ces progrès ont permis aux hommes, et plus particulièrement à certains d'entre eux, d'utiliser leur temps à des occupations moins manuelles. Et ce temps libéré pour la réflexion a lui-même engendré d'autres innovations. Le processus fut lent. Et c'est seulement à partir de 1880 que la part de la population paysanne en France est passée en-dessous du seuil de 50 %. Au vingtième siècle l'accélération de la technique fut telle que désormais des usines fonctionnent presque uniquement avec des robots.

Cependant le développement industriel ne s'est pas toujours réalisé dans l'allégresse. Le secret de Maître Cornille, d'Alphonse Daudet, conte l'histoire émouvante d'un meunier ruiné par les minoteries industrielles. Toujours au XIX<sup>ème</sup> siècle, et plus concret, les canuts lyonnais en révolte détruisent les métiers à tisser de Joseph-Marie Jacquard, qui avait mis au point dès 1801 le premier système mécanique programmable avec cartes perforées !

La robotisation de la société est en marche et nul ne l'arrêtera même si la connivence ou la concurrence entre l'homme et " sa " créature inquiète certains. Blaise Pascal énonce que *L'homme n'est qu'un roseau, le plus faible de la nature ; mais c'est un roseau pensant*. Avec l'avènement de systèmes " trop " intelligents, cette supériorité, jadis incontestée, semble aujourd'hui fragilisée. Y aurait-il un risque que la donne soit un jour bouleversée ? Le sujet passionne autant philosophes, scientifiques que religieux et des espaces propices aux croisements des regards se créent. Ainsi les jésuites ouvriront en 2021 un centre Teilhard de Chardin sur le campus même de Saclay,

lieu emblématique de la recherche française, afin que *convergent recherche en science et recherche de sens*.

La 3AF s'est saisie de la question de l'IA en créant L'Observatoire ouvert du numérique que présente Alain Wagner, l'un des deux vice-présidents de notre association. Bertrand de Montluc revient aussi sur cet observatoire dans un article de fond consacré à La digitalisation des entreprises. En octobre dernier, la Commission Intelligence Stratégique et Prospective de la 3AF a organisé un colloque de deux jours à Paris autour de la question : l'Intelligence Artificielle va-t-elle transformer les métiers de l'Intelligence Economique et Stratégique ? Une synthèse en est donnée par Marie-Claire Coët (ONERA).

Le 18 octobre dernier, l'association Alumni-ONERA des docteurs de l'ONERA a organisé à Paris, une table ronde *Intelligence Artificielle et sciences cognitives* en partenariat avec le cabinet de stratégie Oliver Wyman. À la suite de ces échanges, chacun des quatre orateurs a accepté d'écrire un article pour la présente Lettre. Sandrine Macé, Professeur à l'ESCP-Europe (Ecole Supérieure de Commerce de Paris), traite des enjeux business liés à l'IA. Laurent Chaudron, directeur du centre de recherche ONERA de Salon-de-Provence, nous livre une revue de l'apparition de l'IA au cours des quarante dernières années, avec la sensibilité qu'il incarne au sein de l'association *Intelligence Artificielle symbolique*, dont il est le scientifique governor. Des applications industrielles et de recherche sont données par Stéphane Durand (Dassault Aviation), qui évoque *la (R)évolution cockpit* dans le cadre du PEA MMT\* et par Alexandre Boulch (ONERA), qui traite du projet *Deep learning pour l'aérospatiale*.

S'il nous faut bien reconnaître que l'IA atteint l'ordre de l'intelligence, le second des ordres après celui des corps selon Pascal, elle ne parviendra pas à s'imposer dans celui des cœurs, qui lui restera pour toujours inaccessible. L'homme conservera sa prééminence sur la nature et sur ses créations parce qu'il pense et qu'il est capable de rêver. En cette période de l'Avent, annonciatrice de Noël et à l'orée d'une nouvelle année que je vous souhaite excellente, qu'il nous soit donné de rêver à la suite de Jacques Brel, *car c'est tellement beau tout cela quand on croit que c'est vrai*. ■

Bruno Chanetz  
Rédacteur en Chef

\* Plan d'Études Amont de la Délégation Générale de l'Armement (DGA) Man-Machine-Teaming (MMT). voir page 9 Lettre 3AF n°30 (mars - avril 2018).

## LE MESSAGE DU PRÉSIDENT



Chers Adhérents,

À quelques jours des fêtes de Noël, souvent partagées en famille, et que je vous souhaite les plus joyeuses possibles, et donc à quelques jours de la nouvelle année, je vous adresse à tous, tous mes meilleurs vœux pour que 2019 soit une année de bonheur, de joies, et de réussites.

Les perspectives de notre Société Savante à fin 2018 conduisent à un optimisme raisonné – certes – mais nous ne sommes pas assez nombreux, et je ne reviens pas sur ce que je dis régulièrement, et sur ce que j’ai explicité dans le dernier “ message du président ”. Certes nous n’avons pas assez de bénévoles et ô combien seraient utiles à notre Société Savante les “ apports ” de jeunes retraités, souhaitant poursuivre quelques années, une activité riche de savoirs.

Certes quelques difficultés se font jour, ici ou là, dans relations internes. Je souhaite que ne soient pas oubliés nos objectifs : il s’agit de notre action au profit d’une activité industrielle performante, et qui contribue à la richesse de notre pays. Chacune de ces difficultés est souvent le fait d’une communication insuffisante et nous sommes attentifs à la non-prolifération de “ fake news ”.

À ces considérations, toujours présentes, je souligne une attention particulière concernant 2019 : l’élection d’un nouveau conseil d’administration. Il appartient à chacun, là où il se trouve, de réfléchir à un moment privilégié de notre vie. Je sais pouvoir compter sur les uns et les autres, et je vous remercie par avance de votre implication.

L’avenir est certes complexe, mais nous sommes au service d’activités industrielles très performantes, où notre Pays est “ en pointe ”. Aidons-le de toute notre force à le demeurer. Nous partageons la réussite, parce que nous y contribuons.

À tous, je renouvelle tous mes meilleurs vœux pour 2019, pour vous, votre famille et tous vos proches. ■

Michel Scheller,  
Président de la 3AF

CALL FOR PAPERS  
Submission extended to  
NOVEMBER, 30

3AF  
Association Aéronautique  
et Astronautique de France

54<sup>th</sup> 3AF International Conference  
on Applied Aerodynamics  
Aerodynamics at  
off-design conditions  
Paris, March 25-26-27, 2019

<http://3af-aerodynamics2019.com>

Helicopter close to the ground © ONERA

le cnam ONERA CEAS AIAA ROYAL AERONAUTICAL SOCIETY

# INTELLIGENCE ARTIFICIELLE, UNE INTELLIGENCE AUGMENTÉE AU SERVICE DES ENTREPRISES ET DES MANAGERS

par Sandrine Macé, Professeur et Directeur Scientifique de la Chaire IoT, ESCP Europe

Quels sont les enjeux business portés par l'intelligence artificielle ? A cette question, une première réponse consiste à fournir des estimations chiffrées. Des cabinets renommés calculent les gains de valeur issus de l'adoption de l'intelligence artificielle par les entreprises et fournissent des projections : ce serait beaucoup, des dizaines de milliers de milliards d'euros à l'horizon 2030. De savants calculs tenant compte des gains en termes de productivité, de temps gagné, de vies gagnées (santé, véhicule autonome, etc.), de nouveaux produits et services stimulant la demande évaluent le nombre de points de PIB additionnels générés par l'IA. Si par définition ces projections sont erronées (c'est le drame du prévisionniste, avoir toujours tort !), une chose est certaine : à termes, l'IA sera source de valeur, son utilisation sera massive et banalisée.

Adoptons ici une seconde approche et abordons les enjeux de l'IA au regard de ses potentialités d'usage dans l'activité quotidienne d'une entreprise. L'IA est un outil puissant permettant de comprendre des situations pour ensuite résoudre un problème, traiter une question complexe, proposer des hypothèses, voire prendre des décisions, grâce à diverses techniques d'apprentissage (supervisées, non-supervisées, par renforcement). Nous structurons notre propos autour des trois moteurs de l'IA : les données, les ressources techniques et les applications (cf. schéma 1).



Schéma 1 : les trois moteurs de l'Intelligence Artificielle

## LA DIGITALISATION DES ENTREPRISES À L'ORIGINE D'UNE MASSE D'INFORMATION AUX CARACTÉRISTIQUES INÉDITES

La règle est immuable, quel que soit le domaine : les données sont le carburant de l'intelligence artificielle. De denrées rares, les données sont devenues ressources

abondantes. Le phénomène, porté par la digitalisation des entreprises, est récent et déstabilisant.

Ainsi, les bases de données possédées par les entreprises se sont enrichies de nouvelles données internes : commandes, achats, contacts avec l'entreprise, service après-vente, visites des pages du site, réponses à une sollicitation, etc. De nouvelles informations externes issues des traces laissées par les individus sur Internet sont librement accessibles : contenus de sites, blogs, tweets, commentaires sous forme de texte, photos, vidéos postés sur un réseau social, avis, etc. Enfin, grâce aux capteurs, caméras, microphones, radars, toute information concernant des individus, objets, chaîne de production, machine, pièce d'une machine, etc. est susceptible d'être collectée en temps réel puis tracée.

Les récentes possibilités de collectes automatisées ainsi que les gigantesques capacités de stockage et de traitement de l'information (grâce au cloud par exemple) donnent accès à des données présentant 4 caractéristiques :

1. une granularité d'observation au niveau le plus fin : un individu, un produit, une machine, un courriel, etc. et dans tous les cas, en temps réel ;
2. une variété des formats observés : nombres, texte, image, voix, vidéos, etc. ;
3. un volume important ;
4. et une qualification multi-critères des observations impliquant de nombreuses variables.

Ces 4 caractéristiques sont inédites, il faut les apprivoiser : un terrain de jeu pour l'IA.

## ACQUÉRIR DES RESSOURCES ET COMPÉTENCES EN IA

Quelles sont les entreprises les plus avancées dans l'application de l'IA à des questions managériales ? Tout d'abord, les entreprises ayant acquis une expertise de longue date dans les données (e.g. banques, assurances, télécommunication, services, etc.) possèdent un avantage. Ensuite, les entreprises ayant opéré une transformation digitale rapide en redéfinissant leur business model autour des données s'arment rapidement en compétence IA : par exemple, Valeo a annoncé l'ouverture d'un centre de recherche valeo.ai, IA appliquée à la conduite autonome.

Et actuellement, ce sont les géants américains et chinois du numérique qui possèdent la réflexion la plus aboutie.

Ainsi, les GAFAM (Google, Amazon, Facebook, Apple, Microsoft) et BATX (Baidu, Alibaba, Tencent et Xiaomi) représenteraient 80% des dépenses mondiales en IA. Chez Amazon, plus de 5500 chercheurs et ingénieurs répartis sur 25 centres de développement dans une dizaine de pays travaillent sur l'IA et ses applications. L'IA est tellement moteur qu'un plan stratégique autour de l'IA a été initié. Il est intitulé " Flywheel ", volant d'inertie. Pour rappel, un volant d'inertie permet de stocker puis de restituer de l'énergie grâce à un système rotatif. L'énergie stockée augmente avec la masse, elle est proportionnelle au carré de la vitesse de rotation. Avec Flywheel, Amazon veut que la connaissance dans l'IA ne soit pas stockée dans un seul lieu, les labos de R&D. Au contraire, elle doit être partout, les innovations en IA se diffusant dans les différents domaines d'application. En ne cloisonnant pas ses efforts dans l'intelligence artificielle, Amazon favorise les transversalités et les fertilisations croisées en interne ... et en externe. En effet, avec sa plateforme Maching Learning Amazon SageMaker, le souhait d'Amazon est de capitaliser sur son expérience et de commercialiser des outils d'IA développés à l'origine pour ses besoins propres. Non seulement cette nouvelle activité est lucrative, mais elle est aussi une manière de consolider l'écosystème Amazon en fidélisant des entreprises aux solutions Amazon (cloud, IA etc.) et en s'imposant face à ses concurrents, Microsoft, Google, IBM.

L'IA ne serait-elle réservée qu'aux grosses entreprises possédant les ressources financières pour investir dans des data lakes, des outils et des équipes de data scientists ? C'est plutôt le cas actuellement. Pourtant, quelle que soit la taille de l'entreprise, des solutions pré-packagées (e.g. IA de compréhension de texte, IA d'analyse de sentiment, etc.) sont disponibles en open source ou auprès d'éditeurs de solutions (start-ups et acteurs du numérique, e.g. IBM, Microsoft, Google ou Amazon). Il faut malgré tout avoir des compétences en propre pour adapter la brique au contexte de l'entreprise.

Il faut aussi être capable de tester régulièrement la robustesse des modèles pour éviter trois risques majeurs. La quantité des données dans le jeu d'apprentissage n'implique pas la qualité. Si les modèles sont entraînés sans précaution sur des données biaisées, ils vont inévitablement reproduire les biais du passé, par exemple la représentativité hommes/femmes, les inégalités salariales, etc. Aussi, l'environnement et les observations évoluent avec le temps. Par exemple, les fraudeurs contournent en permanence les modèles d'apprentissage de détection de fraude par la mise en pratique de comportements totalement inédits. Enfin, le sur-apprentissage risque d'aboutir à des résultats non généralisables.

### QUELQUES APPLICATIONS : INTÉGRER LES FONCTIONNALITÉS DE L'IA AFIN D'AMÉLIORER LES PERFORMANCES DE L'ENTREPRISE

Les applications de l'IA dans l'entreprise s'appuient notamment sur les deux grands domaines où l'IA se développe et montre des capacités supérieures à d'autres solutions, à savoir :

- Les fonctionnalités de perception et de communication (IA d'interface) : reconnaissance de langage (parole, texte, langage naturel, etc.), reconnaissance d'image (faciale, spatiale, etc.). L'IA permet d'observer, de détecter et d'interagir de plus en plus naturellement avec l'homme.
- La modélisation : la résolution de problèmes complexes et analyse prédictive. L'IA est alors utilisée pour optimiser des processus existants, automatiser, détecter, ou prédire.

Tous les métiers de l'entreprise sont concernés : production, supply chain, fonctions comptables et administratives, finance, ressources humaines, marketing. Illustrons maintenant par quelques cas récents.

#### L'IA, au cœur de la logistique

En 2012, Amazon déclenche une révolution robotique en rachetant Kiva System, une entreprise spécialisée dans la fabrication de robots dédiés à la logistique d'expédition. Depuis, les entrepôts d'Amazon sont ultra-automatisés et un employé d'Amazon sur 7 est ... un robot, soit 14% des effectifs ! Nous invitons le lecteur à visionner la valse des robots (vidéos disponibles en tapant dans un moteur de recherche : amazon robot kiva), un véritable ballet où la coordination des robots est programmée par de l'IA. Equipé de laser, chacun est guidé par des QR codes placés sur le plancher. Au gré des commandes entrantes et sortantes, les robots se placent sous l'une des étagères chargées en articles aussi variés que des livres, bijoux ou appareils ménagers. Le stockage des produits semble irraisonné (vos placards sont mieux rangés !) et pourtant, des programmes sophistiqués d'optimisation de l'espace de stockage selon la rotation des produits et les prévisions de commandes permettent de résoudre l'équation de minimisation des coûts de stockage sous contrainte de centaines milliers de références et de milliers de commandes quotidiennes.

Les gains sont nombreux : gain de temps lors de la préparation des commandes, gain de productivité grâce au flux des robots, 50% d'espace supplémentaire gagné par rapport à un entrepôt classique. Pour les salariés en charge de la manutention, les pickers, ce sont moins de tâches lourdes et pénibles, une optimisation de leur

parcours dans des entrepôts (qui peuvent atteindre la taille de 14 terrains de football), moins d'erreurs et donc plus de satisfaction pour le client final.

### Détecter la fraude avec justesse

La digitalisation accrue des services bancaires a pour conséquence l'augmentation du nombre d'opérations de fraude. Depuis longtemps, les banques ont développé des modèles prédictifs visant à détecter des fraudes lors d'un paiement par carte bancaire. L'enjeu consiste à détecter les fraudes le plus rapidement possible sans créer de fausses alertes qui conduiraient à informer un client d'une fraude alors que cela serait son usage personnel. Certains clients n'apprécient par cette intrusion abusive dans leur vie privée provoquant une forte insatisfaction et parfois la fermeture de leurs comptes bancaires.

C'est dans ce contexte qu'une banque danoise, Danske Bank, a développé avec succès un modèle d'IA en deux temps : un premier modèle à base d'arbre de décision se concentre sur la détection de fraude par le machine-learning en analysant de manière transparente les transactions entrantes en moins de 300 millisecondes, une seconde étape de deep-learning analyse des dizaines de milliers de caractéristiques afin de fournir des informations concernant aussi bien les vraies que les fausses activités frauduleuses.

### Présélectionner les meilleurs profils

Imaginez le nombre de candidatures reçues par courriel par une entreprise telle que L'Oréal. Environ un million par an ! Certes les équipes RH de L'Oréal sont très efficaces, mais là, un million de candidatures, cela dépasse les capacités humaines ! Alors, comment traiter cette masse de candidatures et ne pas passer à côté de talentueux collaborateurs ? En Septembre 2018, L'Oréal a déployé au Royaume-Uni, aux Etats-Unis, et en France, une plateforme conversationnelle, un chatbot, destiné aux candidats à la recherche de stages ou de postes de conseillers beauté (Source : <https://www.loreal.fr/media/news/2018/october/mya-systems>). Êtes-vous disponible à la date de début du stage et tout au long de la période du stage ? Quel est actuellement votre niveau d'étude et combien de temps dure votre formation ? Avez-vous besoin que nous fassions des aménagements particuliers afin de mener à bien votre candidature ? Avez-vous besoin d'informations plus précises sur le poste ? Avez-vous des questions au sujet de la culture d'entreprise ou du processus de recrutement ? Les réponses à ces questions sont traitées par une solution IA d'analyse de texte permettant de déterminer si le profil du postulant correspond aux attentes du poste. A l'issue de cette première étape, les candidats sélectionnés sont mis en relation avec des recruteurs qui peuvent ainsi se

concentrer sur la dimension humaine et qualitative du recrutement.

### Automatiser une tâche chronophage sans réelle valeur ajoutée

Au Crédit Mutuel, c'est quotidiennement 90 000 courriels envoyés par les clients à destination de leurs chargés de clientèle. Le traitement du courriel (lecture, réponse) prend du temps, il interrompt les tâches en cours, la gestion des urgences n'est pas toujours optimale. Bref, en 2016, il a été décidé d'assister les conseillers dans le traitement des courriels clients, et de développer, à partir de la technologie Natural Language Processing de Watson (IBM), un analyseur de courriels dont la finalité est triple : identifier automatiquement la demande exprimée dans le courriel, détecter l'urgence de la réponse et préparer un contenu de réponse.

Le projet a été une réussite, pour preuve la généralisation du projet à l'ensemble des 20 000 chargés de clientèle. Une des clés de succès a été l'entraînement initial, au cours duquel la solution est censée apprendre à résoudre le problème à partir d'exemples. Un échantillon de 10 000 courriels anonymisés a servi à nourrir Watson. En parallèle, trois experts métiers ont été chargés de qualifier les 10 000 courriels selon l'objet de la demande parmi les 33 objets principaux identifiés en amont (les 33 objets couvrent 70% des demandes). Les demandes ont été décomposées en s'appuyant sur une description des motifs de langage : environ 1 000 concepts et 4 000 règles correspondant à des motifs de langage ont été fixés. Ce gros travail réalisé "à la main" était indispensable pour initier l'apprentissage de l'IA de Watson et aboutir à un bon taux de reconnaissance sur les intentions du courriel : de 40% au démarrage, le taux reconnaissance est dorénavant supérieur à 90% car l'IA continue à apprendre au fur et à mesure des courriels traités et des ajustements réalisés par les conseillers.

En automatisant une tâche répétitive sans grande valeur ajoutée, l'intelligence artificielle permet au conseiller de dégager du temps commercial et du temps d'écoute, un équivalent de 200 000 jours homme dans le cas présent. L'IA ne remplace pas le conseiller, elle est mise au service du conseiller dont les performances sont augmentées.

### L'IA, mise à disposition d'une expérience client augmentée

Le magasin du 3<sup>ème</sup> type sera bardé d'IA ou ne sera pas ! Reconnaissance du produit au moment où il est pris en main et affichage des informations le concernant (prix, ingrédients, conseils d'utilisation, etc.) ; Chariots

autonomes qui suivent le client et font la queue si besoin ; Promotions ultra-personnalisées (tenant compte de l'historique d'achat du client, ses activités de paiement, opérations financières, etc.) adressées au client en fonction de sa localisation dans le magasin ; Reconnaissance faciale pour le paiement des clients de l'enseigne et référencés dans la base de clients, une application mobile permettant de valider la transaction bancaire ; Livraison par drone ou robot autonome.

Les deux géants du e-commerce, Amazon et Alibaba, sont les plus avancés dans le secteur de la distribution. En s'appuyant sur une technologie nommée " Just Walk Out " ; Amazon, a ouvert un premier magasin test, Amazon Go en janvier 2017 à Seattle. De son côté, Alibaba a beaucoup investi sur le paiement par reconnaissance faciale avec sa filiale Alipay et la technologie " Smile to pay ".

Les performances des sites de e-commerce sont elles aussi dopées à l'IA : traitement du langage naturel appliqué aux requêtes formulés par les clients, facilité dans la recherche d'informations ou de produits, filtre des réponses optimisé, recommandations adaptées car les images des articles ont été analysées par des réseaux de neurones profonds et classées en différentes catégories, etc. Une somme de petits détails qui facilitent la navigation des visiteurs et le passage à l'achat. Facilité, fluidité, sécurité, la technologie est mise à la disposition d'une expérience client enrichie.

### Conclusion

Ces exemples montrent qu'en intégrant des fonctionnalités d'IA, les entreprises améliorent leurs capacités et performances au quotidien, ainsi que celles de leurs collaborateurs, clients et partenaires. C'est en cela que certains préfèrent associer l'acronyme IA à Intelligence Augmentée.

Si les usages se multiplient, de nombreuses entreprises sont encore au stade des premières expérimentations dont il faut tirer les enseignements. Dépasser l'expérimentation et industrialiser l'usage est le point d'attention le plus délicat. Déployer à grande échelle implique de s'assurer que l'architecture technique peut supporter le programme. Cela implique aussi de lancer des projets internes de conduite du changement : démystifier les notions autour de l'IA et la transmission des compétences pour accélérer la compréhension et l'adoption en interne.

### Quelques références pour aller plus loin :

- *Les usages de l'intelligence artificielle*, Olivier Ezratty, Novembre 2018, [www.oezratty.net](http://www.oezratty.net)
- *Intelligence artificielle : l'impact économique réel*, Olivier Passet, Novembre 2018, vidéo disponible sur [www.xerficanal.com](http://www.xerficanal.com)
- *L'intelligence artificielle en entreprise. Stratégies, gouvernances et challenges de l'intelligence artificielle en entreprise*, CIGREF, octobre 2018, [www.cigref.fr](http://www.cigref.fr) ■

## OPINION / POINT DE VUE

# L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE SYMBOLIQUE CONTRE-ATTAQUE

par **Laurent Chaudron**, directeur du centre de recherche ONERA de Salon de Provence, Governor de l'association " cognitive guild ", membre d'Alumni ONERA.

"N'oublie pas qui tu es !" dit un personnage de cinéma d'animation à son enfant... Aurions nous oublié ce que nous sommes, et ce que nous avons fait ? Au moment où déferlent des torrents de notes, de dossiers et de documents sur cette Intelligence Artificielle soudainement révolutionnaire ? Le but de ce résumé est de rappeler quelques étapes essentielles qui se sont curieusement effacées de nos mémoires. Que ce soit pour le monde qui semble avoir oublié les messages pourtant si simples et prometteurs des fondateurs de l'IA, pour la France qui a oublié ses génies et ses pionniers, et aussi pour l'ONERA où tant de beaux projets très innovants se sont endormis dans nos fichiers ...

Pour ne pas alourdir la rédaction, deux textes de référence sont seulement proposés, le lecteur ayant aussi bien en librairie que sous forme libre électronique un immense ensemble de publications. Au premier chef : notre collègue Jean-Gabriel Ganascia a commis un remarquable ouvrage [1] dans lequel, avec la finesse et la puissance intellectuelles qui sont sa marque, il met en perspective à la fois l'histoire et les enjeux humains de cette fascinante discipline. Dans un tout autre espace, il faut mentionner le panorama de vulgarisation compilé par Olivier Ezratty [2].

Récemment, un certain nombre de signaux pas si faibles nous avaient pourtant alertés de ce retour de l'IA notamment en 2016 : rapport de l'administration Obama, de Stanford, du gouvernement britannique et en France le Livre blanc de l'INRIA ... L'accélération - Rapport de Cédric Villani, Initiatives des 3IA, .. - était donc prévisible. Mais en réalité, le feu couvait depuis longtemps ; d'ailleurs, comment tout cela a donc commencé ?..

Les principes fondateurs de l'IA naissent dans l'esprit de plusieurs génies dont John Mc Carthy qui, avec Marvin Minsky, rédige et publie le 31 août 1955 l'annonce d'un colloque en petit comité (environ 6 scientifiques) devant se tenir à l'été 1956. Le terme "intelligence artificielle" y apparaît donc pour la toute première fois : *We propose that a 2 month, 10 man study of artificial intelligence be carried out during the summer of 1956 at Dartmouth College in Hanover, New Hampshire.*

Examinons la phrase, essentielle, fondamentale, de ce texte : *The study is to proceed on the basis of the conjecture that every aspect of learning or any other feature of intelligence can in principle be so precisely described that a machine can be made to simulate it.*

Il y a donc trois étapes très simples et dont on peut affirmer (en tout cas l'auteur de cet article le revendique) qu'elles n'ont rien perdu de leur remarquable pertinence dans leur définition de l'IA :

1. déterminer une activité ou fonction considérée comme **intelligente**;
2. la **décrire** suffisamment précisément;
3. pour faire une **machine** qui la **simule**.

Il n'y a absolument rien de changé aujourd'hui... si ce n'est que l'utilisation linguistique très (trop) fréquente du groupe de mots  $M = \text{"Une intelligence artificielle est capable de ..."}$  occulte l'étape 2. Et nous allons voir qu'elle est pourtant essentielle. L'utilisation textuelle de  $M$  suppose en effet que quelque chose d'intelligent est effectué par la machine ou le programme en question : traduire un texte, reconnaître des visages, prédire des comportements ... toutes choses qui, dans l'esprit de la déclaration de 1955, peuvent effectivement être considérées comme intelligentes. Mais ce biais cognitif que nous observons actuellement ne doit pas se soustraire à la critique : tout programme, toute machine effectuant "quelque-chose de compliqué" n'a pas légitimité à être estampillée " IA ". Plus simplement : la majeure partie des systèmes désignés par une phrase de type  $M$  sont des algorithmes. Des algorithmes et des programmes complexes, sophistiqués et puissants, certes, mais des algorithmes. Or la question clef est : où donc est décrite (étape 2) l'intelligence (étape 1) ?

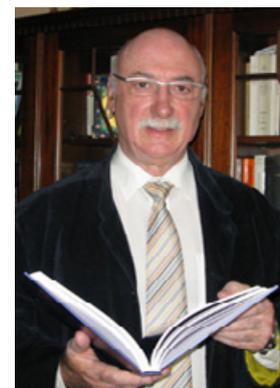
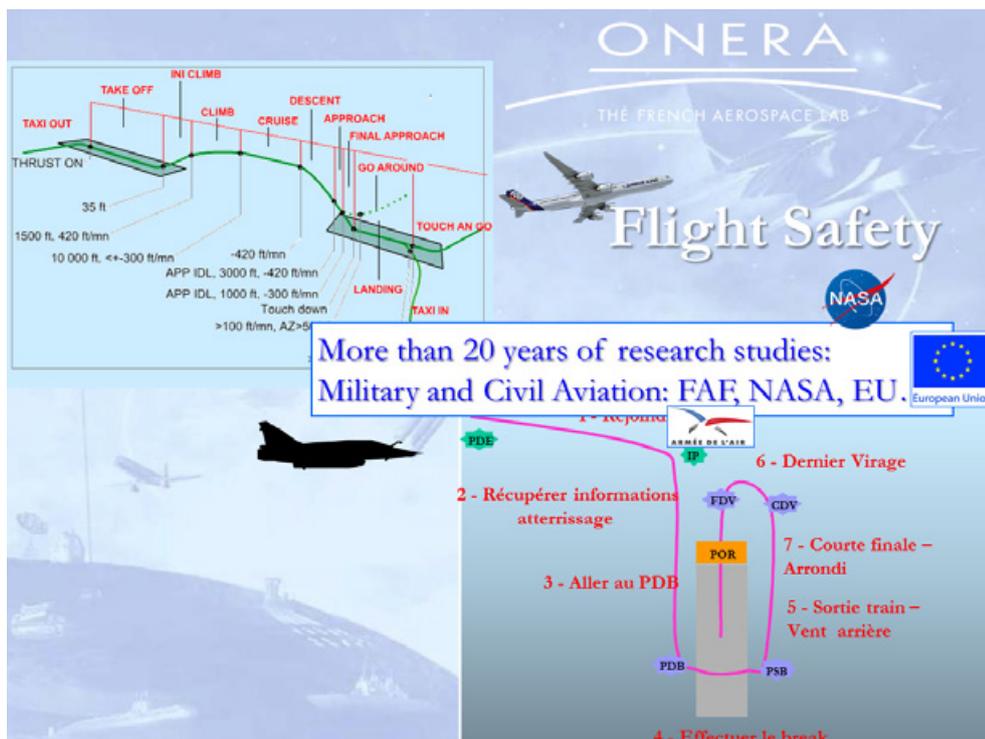
Donc : à la lumière du programme vivant des pères fondateurs ce sont bien des armées d'algorithmes qui émergent dans nos années 2010, le volet " représentation des connaissances " étant occulté et encore en sommeil. Nous verrons en dernière partie qu'il va se réveiller avec force.

Il reste que toutes les questions cruciales avaient été inventoriées notamment par Mc Carthy dont le site internet encore accessible démontre la puissance visionnaire et l'efficacité opérative : car si Turing avait décrit une machine virtuelle, Mc Carthy au travers de Lisp, puis du premier système expert majeur (écrit en Lisp) avait quasiment tout dessiné ou esquissé.

Les années 60, 70 et 80 sont incroyablement fécondes en modélisation du traitement hypothético-déductif des connaissances et la logique mathématique est alors la discipline reine. Or la France doit rendre hommage à trois figures essentielles : **Jacques Herbrand** dont on peut considérer qu'il a dans sa thèse défini la première théorie et méthode de démonstration automatique en logique d'ordre 1 de l'Histoire. Il succombera à un accident de montagne avant d'avoir pu déployer l'étendue de son potentiel scientifique. Dans les années 60, c'est **Jacques Pitrat** qui décrit le modèle théorique de l'unification, véritable carburant des démonstrateurs automatiques. Puis en 1972, c'est **Alain Colmerauer** qui définit le premier interpréteur PROLOG (programmation en logique). Les Japonais ne s'y trompent pas : le gouvernement décide un vaste programme d'ordinateurs de cinquième génération dont le 'chip' est fondé sur prolog ... puis ce sont côté Etats-Unis les 'machines LISP' qui apparaissent, considérées alors comme les Rolls-Royce des laboratoires d'IA. Lisp et Prolog restent au demeurant les seuls langages de programmation qui soient mathématiquement fondés (respectivement lambda-calcul et logique). Mais la force brute et la puissance des ordinateurs "traditionnels" viendront fouler au pied les espoirs d'une efficacité fondée sur l'intelligence simulée.

#### Et à l'ONERA ?

Sous l'impulsion de Jean Erceau, Docteur d'état en physique, et François-Régis Valette, un Groupement d'Intelligence Artificielle est créé à l'Office et durant ces années 80 et 90 il permettra de mener une vingtaine de projets totalement innovants et d'organiser tout autant de conférences, ateliers et séminaires. La fusion de connaissances, la conception distribuée, la décision répartie, les langages multi-agents, les patrimoines de connaissances, etc., tous les sujets fondamentaux de l'IA et des Sciences Cognitives ont été étudiés et parfois créés à l'ONERA. Les coopérations avec nos partenaires internationaux et nationaux, tant universitaires qu'EPST (Enseigne-



Jean Erceau, Docteur d'état en physique

ment public à caractère scientifique) est intense. Ayons également une pensée pour notre collègue Rose Dieng, de l'INRIA, première femme du continent africain diplômée de Polytechnique, pionnière du web sémantique avec laquelle maintes recherches ont été conduites. Tant de projets endormis ou oubliés parfois ...

L'Office a ainsi travaillé pendant plus de 20 ans sur tous les aspects liés à la sécurité aéronautique, s'appuyant massivement sur des modèles de l'IA pour concevoir des méthodes et des systèmes d'assistance à la sécurité mis au point dans le domaine civil avec la NASA, la DGAC, l'Union Européenne et des compagnies et dans le domaine militaire avec l'Armée de l'air et l'IRBA (Institut de recherche biomédicale des armées). Des millions de données ont été traitées et méritent d'ailleurs de nouvelles analyses notamment au travers du principe du "positive mining".

**Et maintenant ?**

Notre Maître Jacques Pitrat l'a rappelé lors d'une conférence il y a quelques semaines. Le propre de l'homo sapiens sapiens est la méta-cognition : l'application de la connaissance à elle même. Jacques Pitrat avait offert à la communauté les bases mathématiques des méta-règles ; il nous incite à poursuivre cette voie du "bootstrap" de l'IA.

Dans un prochain article nous détaillerons les composantes incontournables et prometteuses de cette nouvelle étape de l'Intelligence Artificielle Symbolique : métacognition, auto-organisation, dynamique des connaissances, causalité, décision répartie, confiance, explicabilité, preuve ...

Note : au fait : nous avons dit "symbolique" ?.. Est symbolique ce "qui n'a de valeur que par ce qu'il exprime ou évoque". Cela exclut donc les nombres, les calculs, et donc les algorithmes.

**Références**

Laurent M. Chaudron and Olivier Barthe, *Computational Contexts, Sense and Action : how a Machine can Decide? To appear: Intl AAAI Conference: Artificial Intelligence (AI), Autonomous Machines and Human Awareness: User Interventions, Stanford, 2019.*

Damien L'Haridon, Laurent Chaudron, Anne-Lise Marchand, Yves Gourinat, *Teams Coping with Unknown Failures in Aerospace and Operational Environments, Proceedings the 2018 Europe Chapter of the Human Factors and Ergonomics Society, Berlin, October 8-10 2018.*

Laurent Chaudron, *Metacognition and the Continuous World paradigm, Intl. NATO Conference on Artificial Intelligence, Autonomy, Delegation and Responsibility, 21 June 2017, Bordeaux, France.* ■

# SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

## LE DEEP LEARNING POUR L'AÉROSPATIALE

### LE PROJET DELTA À L'ONERA

par **Alexandre Boulch**, chef du projet " deep learning pour l'Aérospatiale " (ONERA), **Adrien Chan-Hon-Tong**, (ONERA), **Bertrand Le Saux** (ONERA) et **Stéphane Herbin** (ONERA)

De la propulsion à la conception des formes d'avions en passant par le développement de matériaux composites, le domaine aérospatial rassemble de nombreux domaines scientifiques et une grande variété de métiers. Il est aussi caractérisé par des exigences fortes et une certification minutieuse afin d'assurer la sécurité et la pérennité des systèmes volants. Dans ce contexte, de nombreuses données sont générées tout au long de la vie du système par des simulations pendant la phase de conception, ou par des capteurs lors de l'exploitation. Cette culture de la donnée est aujourd'hui une opportunité pour l'utilisation de technologies et de méthodes émergentes telles que les Data Sciences dont l'apprentissage automatique et le Deep Learning.

#### DEEP LEARNING

L'apprentissage automatique (ou statistique) est une branche de l'intelligence artificielle consistant à extraire automatiquement de l'information des données disponibles afin d'adapter un modèle générique, souvent paramétrique, à une tâche particulière. Au cours des dernières décennies, de nombreux modèles d'apprentissage automatique ont été développés, incluant les Machines à Vecteurs Support [1], les arbres de décisions [2] ou encore les réseaux de neurones [3].

Le Deep Learning, ou apprentissage profond, est l'utilisation de réseaux de neurones de très grande taille (jusqu'à plusieurs millions de paramètres). Depuis le début des années 2000, l'accès facilité à de grandes quantités de données, l'évolution des moyens de calculs, notamment les Graphical Processing Units (GPU ou carte graphiques) et le développement d'environnements logiciels spécialisés ont permis l'essor récent de ces méthodes. Dès lors, la recherche théorique très active en optimisation statistique et algorithmie a permis d'étendre l'application du Deep Learning à de nombreux nouveaux domaines, en créant de nouvelles architectures de réseaux et de nouveaux types de neurones.

Historiquement porté par les domaines de la vision par ordinateur (reconnaissance d'image) et le traitement du langage naturel, l'apprentissage profond est aujourd'hui utilisé dans un large spectre de domaines scientifiques et technologiques, incluant la médecine, l'intelligence artificielle pour les jeux (Alpha Go [6]), les assistants virtuels ou les voitures autonomes.

#### LE PROJET DELTA DE L'ONERA

Le domaine aérospatial produit, analyse et capitalise de très grande quantités de données et ce depuis de nombreuses années. Il apparaît alors naturel de transformer ce constat en opportunité et d'étudier comment y exploiter avec profit les technologies d'apprentissage.

Dans ce contexte, l'ONERA a initié le projet de recherche DELTA qui vise à explorer l'utilisation du Deep Learning pour divers domaines de l'aéronautique et de l'espace. Ce projet d'ampleur a pour objectif d'initier une dynamique autour de l'apprentissage basé sur les données. Mené par le département Traitement de l'Information et Système, il associe l'ensemble des départements scientifiques de l'ONERA: mécanique des matériaux, mécanique des fluides, électromagnétisme et optique.

L'objectif de ce projet est autant d'innover par des travaux de recherche amont que d'appliquer l'existant aux problématiques et spécificités du domaine aérospatial, notamment l'adaptation à la grande variété de données, la conception de stratégies de traitement lorsque ces données sont corrompues, incomplètes, en faible quantité, et/ou pauvrement annotées.

#### Résultats

Les premiers résultats ont démontré l'intérêt du *Deep Learning* pour la métrologie par imagerie, la robotique et la télédétection.

La segmentation sémantique pour la robotique ou la télédétection est aujourd'hui performante (voir encadré). Pour la navigation autonome, l'appréhension de l'environnement 3D (voir encadré), c'est-à-dire l'estimation des distances des objets au drone, est aussi accessible, même avec une seule caméra [7]. De même, les travaux en cours sur la détection de fissures pour des matériaux composites tendent à montrer la pertinence de l'apprentissage pour leur localisation et l'extraction de leurs caractéristiques. Enfin, la compréhension de la combustion du propergol solide pourrait s'accélérer par l'application du Deep Learning aux images par ombroscopie [14] (voir encadré), processus d'imagerie permettant de visualiser l'indice de réfraction du milieu observé.

De plus, les questions posées sur le type, le nombre et la qualité des données ont ouvert des travaux sur les architectures de réseaux de neurones proprement dites [8],

SEGMENTATION SÉMANTIQUE

La segmentation sémantique a pour but de donner une classe à chaque élément de la scène : à chaque pixel pour une image ou encore à chaque point dans un nuage de points. Dans le cadre du projet DELTA, des travaux de cartographie sémantique à partir d'images aériennes ou de nuages de points laser sont menés.

La figure 1 montre un exemple de carte produite à partir d'images aériennes [12]. Les classes détectées sont les bâtiments, la végétation haute et basses, les routes et les voitures.



Figure 1 : Segmentation sémantique d'images aérienne, Nicolas Audebert et al.

Un exemple de transfert de connaissance entre deux types de données est montré figure 2. En utilisant le savoir faire acquis sur le traitement d'images, la segmentation de données 3D est accessible en simulant des prises de vue (images) dans une scène 3D [13]. La segmentation est effectuée sur les images virtuelles et reprojétée sur le nuage de points.

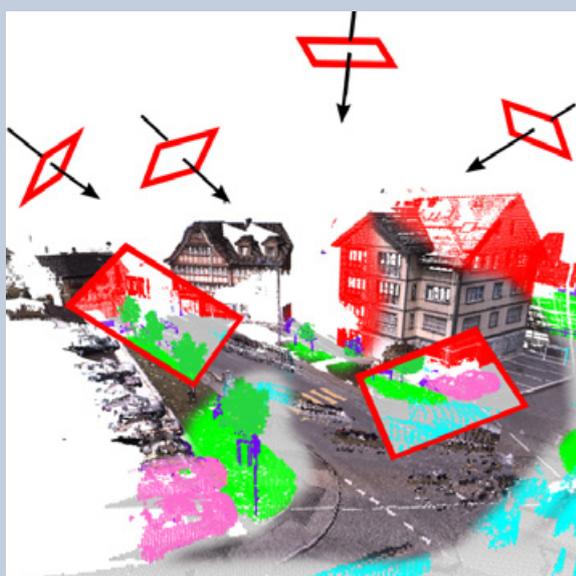
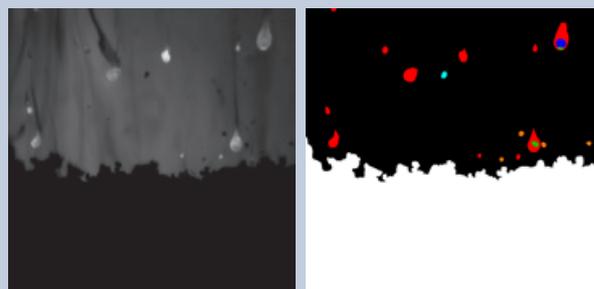
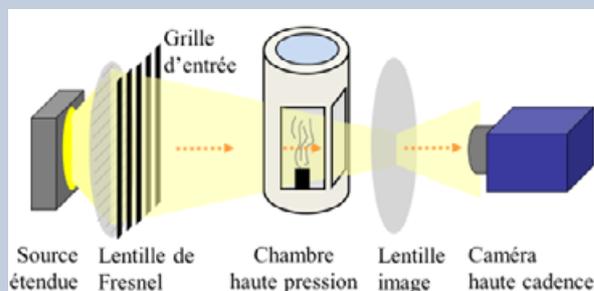


Figure 2 : Segmentation sémantique de nuages de points, Boulch et al.

APPLICATION AUX IMAGES D'OMBROSCOPIES



L'utilisation de réseau de neurones permet de caractériser assez finement les objets observées par ombroscopie lors de la combustion du propergol (90 % sur une base ONERA). Cela permet notamment d'estimer la granulométrie réelle utile pour calibrer les modèles de simulation.

L'utilisation de réseau de neurones permet de caractériser assez finement les objets observées par ombroscopie lors de la combustion du propergol (90 % sur une base ONERA). Cela permet notamment d'estimer la granulométrie réelle utile pour calibrer les modèles de simulation.

leur robustesse à des variations dans les données [9], la génération de données [10], l'apprentissage de nouvelles classes [11] (notamment par zero-shot learning, approche consistant à essayer de reconnaître des classes n'ayant pas été vues à l'apprentissage) ou semi-supervisé (lorsque toutes les données d'entraînement ne sont pas labélisées).

## LE FUTUR EN QUELQUES QUESTIONS

Au-delà de l'application du Deep Learning à de nouvelles problématiques, le futur de DELTA est de fédérer la réflexion sur l'utilisation de modèles physiques dans une chaîne de traitement basée données (c'est-à-dire utilisant les données pour régler ses paramètres) et sur la qualification de réseaux de neurones dans des contextes physiques. Par exemple, la question de savoir utiliser de l'apprentissage au sein d'une simulation physique (pour compenser un modèle incertain ou trop coûteux en temps de calcul) tout en continuant à maîtriser la précision sous-jacente est une attente centrale en mécanique des fluides.

Un autre défi est celui de la faible quantité de données renseignées utilisables pour l'apprentissage automatique, situation courante en raison du coût élevé de la tâche d'annotation. " Quelles quantité et qualité d'annotations sont nécessaires pour apprendre ? Peut-on extraire de l'information des données non annotées ? " sont des interrogations qui animent aujourd'hui les chercheurs de l'ONERA.

Enfin, la conception d'une méthodologie permettant de garantir, voire de certifier, les algorithmes à base d'apprentissage, gage de leur maturité, apparaît nécessaire pour permettre leur utilisation applicative sûre. Une question cruciale est alors celle de l'interprétabilité [15] et de la robustesse des approches de Deep Learning dont le fonctionnement demeure encore très opaque.

Ces récentes avancées de l'intelligence artificielle invitent à un effort du monde académique mais aussi industriel pour propager cette rupture technologique dans le domaine de l'aéronautique et de l'espace. Une voie dans laquelle l'ONERA s'est engagé.

## Bibliographie

- [1] Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine learning*, 20(3), 273-297.
- [2] Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R., & Stone, C. (1984). *Classification and Regression Trees* (Monterey, California: Wadsworth).
- [3] Bishop, C. M. (1995). *Neural networks for pattern recognition*. Oxford university press.
- [4] LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436.
- [5] Schmidhuber, J. (2015). Deep learning in neural networks: An overview. *Neural networks*, 61, 85-117.
- [6] Silver, D., Schrittwieser, J., Simonyan, K., Antonoglou, I., Huang, A., Guez, A., ... & Chen, Y. (2017). Mastering the game of Go without human knowledge. *Nature*, 550(7676), 354.

## Sélection de travaux publiés dans DELTA

- [7] Carvalho, M., Le Saux, B., Trouvé-Peloux, P., Almansa, A., & Champagnat, F. (2018, October). On regression losses for deep depth estimation. In *2018 25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)* (pp. 2915-2919). IEEE.
- [8] Boulch, A. (2018). ShaResNet: reducing residual network parameter number by sharing weights. *Pattern Recognition Letters*, page-53.
- [9] Chan-Hon-Tong A. (2018). An Algorithm for Generating Invisible Data Poisoning Using Adversarial Noise That Breaks Image Classification Deep Learning. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 1(1), 192-204.
- [10] Audebert, N., Saux, B. L., & Lefèvre, S. (2018). Generative Adversarial Networks for Realistic Synthesis of Hyperspectral Samples. *arXiv preprint arXiv:1806.02583*.
- [11] Bucher, M., Herbin, S., & Jurie, F. (2016, October). Improving semantic embedding consistency by metric learning for zero-shot classification. In *European Conference on Computer Vision* (pp. 730-746). Springer, Cham.
- [12] Audebert, N., Le Saux, B., & Lefèvre, S. (2016, November). Semantic segmentation of earth observation data using multimodal and multi-scale deep networks. In *Asian Conference on Computer Vision* (pp. 180-196). Springer, Cham.
- [13] Boulch, A., Guerry, J., Le Saux, B., & Audebert, N. (2018). SnapNet: 3D point cloud semantic labeling with 2D deep segmentation networks. *Computers & Graphics*, 71, 189-198.
- [14] Nogue, M., Devillers, R. W., Tong, A. C. H., Le Besnerais, G., & Pichillou, J. (2017, September). Classification automatique d'images de propergol solide en combustion par utilisation de réseaux de neurones convolutifs. In *GRETSI 2017*.
- [15] Bucher, M., Herbin, S., & Jurie, F. (2018, December). Semantic bottleneck for computer vision tasks. In *Asian Conference on Computer Vision (ACCV)*. ■

# SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

## MAN-MACHINE TEAMING

par Stéphane DURAND, Chef de service Interaction Homme-Système, Dassault Aviation

*Entre l'évolution des missions opérationnelles, du contexte aérien et le développement de nouvelles technologies, les cockpits se trouvent à la croisée des chemins : les années à venir verront sans doute une évolution majeure de la manière d'opérer les avions. Le projet Man Machine Teaming (MMT) développé par Dassault Aviation avec Thales sous l'égide de la DGA est une brique dans cette évolution.*



Les dernières générations de cockpits (Glass Cockpit), outre leur simplification physique, ont permis un haut niveau de synthèse. Ainsi, la fusion de données dans le Rafale permet la présentation d'une situation tactique hautement synthétique, affranchissant le pilote de la mise en correspondance ou de la combinaison des informations provenant de plusieurs sources. L'idée forte reste toujours la même : décharger le pilote de tâches de gestion "subalternes" pour lui permettre de se concentrer sur les éléments fondamentaux de sa mission.

L'évolution du contexte opérationnel amène à repenser la conception des cockpits et la relation homme-machine. Dans le domaine civil, où une grande majorité des accidents est due à l'humain (le taux de 80% est communément avancé), la génération de trajectoires 4D (SERAR, NextGen) sera associée à une numérisation du contrôle aérien, l'augmentation du trafic aérien (faisant craindre un nombre insuffisant de pilotes) étant en outre annoncée. Dans le domaine militaire, les données opérationnelles sont de plus en plus nombreuses (données, images, vidéos) suite à la multitude et aux performances grandissantes des capteurs. Les opérations aériennes sont de plus en plus réalisées en réseau ; la fulgurance et la furtivité doivent permettre de prendre l'avantage.

Dans les deux cas, une autonomie des systèmes associée à un nouveau paradigme d'interaction homme-machine permettrait de prendre en compte cette évolution de contexte.

Dans le même temps, la ré-émergence de techniques d'intelligence artificielle (IA) ouvre des perspectives nouvelles pour les machines en vue d'amplifier leur niveau de synthèse, d'aider à la décision et de prendre à leur charge des activités aujourd'hui dévolues à un équipage.

Pour augmenter l'autonomie des machines militaires, le domaine de l'IA est fortement plébiscité par les grandes puissances, Chine et États-Unis en tête. En octobre 2016, Bob Work, secrétaire adjoint américain à la défense défend

la "Third Offset Strategy" dans laquelle l'autonomie vise à reprendre l'avantage ; ainsi l'IA devient un axe stratégique.

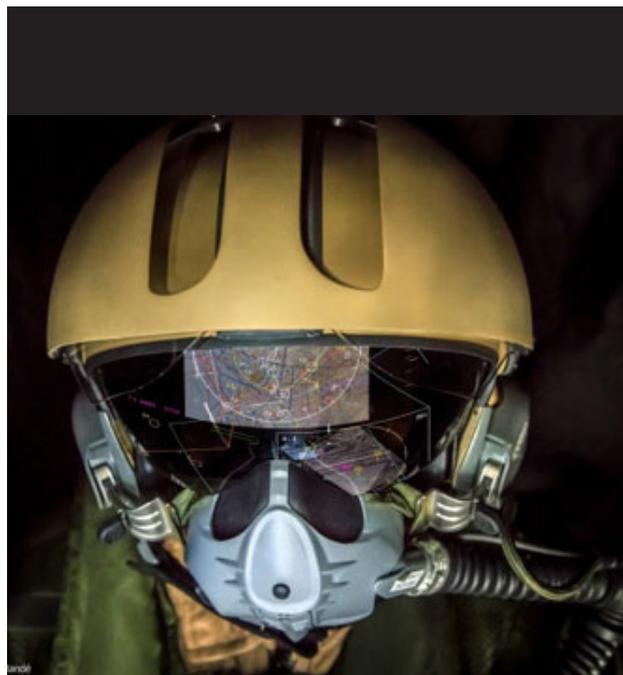
### VERS UN SYSTÈME AÉRIEN COGNITIF

L'évolution du contexte opérationnel nous conduit à imaginer des systèmes capables de percevoir leur environnement au sens très large (situation tactique, éléments du dispositif, équipage, etc.), de placer du sens sur ce qui est perçu (transformer les "pixels" en informations du domaine), d'agir au regard du sens perçu, de la connaissance qu'ils contiennent et des objectifs/performances assignés par l'humain ainsi que, d'apprendre et de s'adapter au regard de leurs actions dans l'environnement.

Ces propriétés faisant écho à des fonctions cognitives, elles font émerger le concept de système aérien cognitif.

Dans ce système, les processus d'analyse, de décision et d'action ne sont plus forcément et uniquement codés sous forme de modèles analytiques mais ils incluent une part de modèles "inférés" des données ou connaissances que l'humain a apportées au système.

L'humain est lui en mesure d'apporter la flexibilité nécessaire à la conduite d'une mission complexe, grâce à ses capacités d'adaptation, d'initiative et d'anticipation. Le système cognitif, auquel l'homme décidera du niveau d'autonomie délégué, lui permettra de les décupler.



*MMT : Humain et machine deviennent des équipiers, l'humain reste au centre des décisions.*

## HOMME ET MACHINE DEVIENDRONT DES ÉQUIPIERS REDÉFINISSANT LES PRINCIPES DES FUTURS COCKPITS

Homme et machine devenant équipiers, les principes des futurs cockpits évolueront selon trois axes.

Tout d'abord, l'interaction multi-modale devra "gommer" la complexité des systèmes et des missions. En quelques sortes, l'IHM (Interaction Homme-Machine) doit "s'effacer" et ne se concentrer que sur le besoin opérationnel mission. Ainsi, les vues de synthèse mission seront privilégiées, tout comme l'usage de la réalité augmentée ou virtuelle pour "connecter" directement l'équipage à sa mission ainsi que l'usage du langage naturel opérationnel afin de limiter les temps d'accès aux informations systèmes et de mission.

Ensuite, afin de conserver une boucle homme-machine opérationnelle avec des systèmes à forte autonomie et des équipages éventuellement réduits, la connaissance du "statut" de l'équipage associée à une boucle de rétroaction adaptée devient nécessaire. Cet axe de "monitoring de l'équipage" recouvre plusieurs aspects physiologiques et cognitifs : endormissement, fatigue, charge de travail, comportement.

Enfin, un assistant virtuel, véritable copilote électronique, matérialisera le système d'aide à la prise de décisions et d'actions. La logique qui prévaut dans la démarche est celle d'une machine plus autonome mais pas complètement autonome : la notion d'assistant virtuel prend ici tout son sens. Cette alternative est soutenue aujourd'hui par rapport à celle d'une aide ou prise de contrôle à distance par l'humain, cette dernière solution répondant vraisemblablement moins aux contraintes militaires.

Au-travers du projet MMT, l'État, Dassault Aviation et Thales amorcent une nouvelle démarche pour l'aéronautique de défense.

Il n'y a donc pas opposition entre l'homme et la machine, mais complémentarité. Optimiser cette complémentarité est le but du projet Man Machine Teaming (MMT, <http://man-machine-teaming.com>). Lancé et financé par la Direction Générale de l'Armement (DGA), ce plan d'études amont (PEA) est piloté par Dassault Aviation et Thales.

Le PEA MMT s'appuie sur un écosystème collaboratif, dans lequel s'investissent différents acteurs de l'entrepreneuriat et de la recherche : PME, laboratoires, start-up, etc. Ces acteurs sont invités à apporter des expertises variées, dans le but de proposer des solutions technologiques en rupture à adapter au monde de l'aéronautique de défense.

Le 16 mars 2018, Dassault Aviation a accueilli à Saint-Cloud l'événement de lancement du PEA MMT. À cette occasion, plus d'une centaine de start-up, PME et organismes de recherche étaient représentés. L'événement a tout particulièrement été marqué par la visite de Madame la Ministre des Armées, Florence Parly.

Précédée par Éric Trappier (PDG de Dassault Aviation), qui a rappelé que Dassault Aviation avait expérimenté des solutions à base d'IA dès les années 1990, Florence Parly s'exprimant devant plus d'une centaine d'entrepreneurs et chercheurs a quant à elle insisté sur l'importance de la diffusion des récentes avancées de l'IA dans l'ensemble des technologies de défense. À cette occasion, elle a souligné la nécessité d'un effort d'investissement et de recherche pour assurer la supériorité de nos armées. À ses yeux, cet effort s'inscrit dans "une course où les intérêts économiques, technologiques et stratégiques se rejoignent et dans laquelle la France ne peut pas rester immobile".



Saint-Cloud, 16 mars 2018. Éric Trappier (PDG de Dassault Aviation) avec Patrice Caine (PDG de Thales) accueille Florence Parly, Ministre des Armées, pour le lancement officiel du PEA MMT

Le programme MMT, d'une durée de trois ans, représente une opportunité essentielle pour les industriels ainsi que pour la constitution de l'écosystème. Il comprend deux grandes phases de consultation dont la première se termine en novembre 2018, la seconde démarrant en mai 2019. Ces consultations ont pour but d'identifier les propositions de l'écosystème dont les technologies sont susceptibles de faire progresser le système aérien cognitif. Les financements associés vont de 100 à 200 000 euros par projet sélectionné, sur une période de 12 à 18 mois.

MMT s'intéresse tout particulièrement aux techniques d'IA. Celles-ci sont popularisées par le machine learning et le deep learning en particulier. Il est indéniable que ce domaine de l'IA a connu une véritable percée via des résultats probants notamment dans le traitement d'image et la reconnaissance de formes. Cette technique n'est

cependant pas la seule d'intérêt dans MMT. En effet, l'IA plus ancienne, dite symbolique, nous paraît aujourd'hui plus adaptée pour certaines tâches cognitives de haut niveau, les missions aériennes répondant en particulier à des règles, des conventions, des tactiques, etc. Ceci constitue un domaine de connaissance qu'il faut pouvoir représenter dans une machine, exploiter notamment par un assistant virtuel et faire évoluer par l'expérience (apprentissage symbolique).

Plus largement, l'intelligence embarquée sera sans doute un mix de ces différentes techniques ; nous pouvons parler ici d'IA hybride.

### **DES ENJEUX TECHNIQUES MAIS PAS UNIQUEMENT...**

Le système aérien cognitif vu au travers de la première brique MMT est un véritable challenge dont les enjeux sont divers.

Ils sont techniques, car même si l'IA a fortement progressé, des questions demeurent : comment rendre

l'IA " explicable " ? Comment imbriquer l'IA numérique à l'IA symbolique ? ...

Ils sont humains, car notre relation à la machine va poser de nouveaux défis : quelle confiance lui accorder ? Quelle empathie avec elle ? Quel état physiologique et cognitif de l'équipage voulons-nous lui fournir ? Toutes sortes de questions relevant des sciences humaines et sociales en découlent.

Ils sont liés à la certification et à la qualification dont on sait le haut niveau requis dans le monde de l'aéronautique et de la défense.

Ils sont organisationnels, la frontière entre industriels/ingénieurs et opérationnels/utilisateurs devenant plus perméable du fait de la nature des techniques d'IA employées : l'IA s'abreuve de données (numériques ou symboliques) opérationnelles.

Ils sont liés aux compétences ; MMT et son mode de fonctionnement avec un écosystème ouvert est à ce titre original. ■



# RETOUR SUR LE FORUM IES 2018

par Marie-Claire Coët, directrice de l'Information Scientifique et Technique de l'ONERA & membre de la Commission Intelligence Stratégique et Prospective de la 3AF

Depuis plus de 25 ans, les forums Intelligence Economique et Stratégique (IES) sont organisés tous les deux ans par la Commission Intelligence Stratégique et Prospective (CISP) de la 3AF. Le 14<sup>ème</sup> forum européen IES s'est déroulé à Paris les 3 et 4 octobre 2018 sur le thème " L'IES de demain : artificielle versus humaine " autour de la question : l'Intelligence Artificielle (IA) va-t-elle transformer les métiers de l'Intelligence Economique et Stratégique ? L'Espace Chaptal a offert son cadre agréable et fonctionnel à notre forum qui a rassemblé sur deux jours près de 100 participants, dont nombre d'étudiants. L'endroit s'est révélé parfaitement adapté à cet évènement bisannuel où industrie et monde académique se côtoient. IES revendique avant tout être un lieu d'échanges et de partages d'expériences, avec un concept original où l'interactivité est favorisée à travers certaines sessions organisées sous forme d'ateliers. Comme le veut la coutume et en tant que présidente de la CISP et du forum IES 2018, Laurence Monot (Business Intelligence Manager MBDA) ouvre la manifestation en introduisant Alain Wagner (Vice-Président de la 3AF et Vice-Président, International and Space Institutions chez Airbus Defence and Space). Après avoir accueilli chaleureusement les participants au nom de Michel Scheller (Président de la 3AF), retenu par ailleurs, et après avoir remercié les organisateurs, Alain Wagner nous entraîne sur son terrain de prédilection : l'Espace.



Alain Wagner (Vice-Président de la 3AF) et Laurence Monot (Présidente de la CISP et d'IES2018) ont introduit le forum.

### L'ESPACE, GISEMENT DE DONNÉES POUR L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

L'explosion des données satellitaires, notamment celles liées à l'observation de la Terre engendre un formidable besoin en moyens d'analyse et de traitement. Ce constat est à l'origine de la création des " boosters ". Nés d'une initiative du COSPACE (Comité de concertation Etat-Industrie sur l'espace), ce sont des structures ayant pour mission d'identifier et d'accompagner des projets de services numériques innovants utilisant des données

spatiales et aussi de mettre en relation les acteurs du numérique, du spatial et des usages afin de booster le développement de ces projets. Et de conclure en guise d'introduction à ces journées : " Regardez vers les étoiles ; il pleut des données ; et elles n'attendent que vous ! ". Anne Drapeau (Foresight Analyst chez ArianeGroup) le redit en d'autres termes : " Les satellites sont créateurs de données pour l'IA ". L'intelligence artificielle modifie les usages ; en intégrant l'imagerie satellitaire à de nouveaux services et à toutes sortes d'applications auparavant insoupçonnées, elle ouvre de nouvelles perspectives au secteur spatial. Et pour Anne Drapeau, c'est le développement et l'utilisation couplés de la robotique et de l'IA qui seuls rendront l'exploration spatiale possible pour l'homme et lui ouvriront à terme la voie vers la colonisation de la Lune et de Mars.

### L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET L'HOMME

En abordant les questions d'éthique, Emmanuel Bloch (Directeur développement Ethique et Responsabilité d'Entreprise chez Thales), nous fait prendre une salutaire hauteur de vue sur notre objet d'étude. Un court extrait du film " Her <sup>1</sup> " nous conduit tout droit en 2025, auprès d'un personnage qui, on le devine, va peu à peu tisser une relation amoureuse avec une certaine Samantha, qui n'est autre que l'IA système d'exploitation de son ordinateur. Fiction ? Les algorithmes ont-ils une âme ? Plus prosaïquement, il ressort d'un sondage publié en début d'année 2018 par l'institut CSA sur le rapport des Français à l'intelligence artificielle que 80% d'entre eux sentent que l'IA est déjà présente dans leur quotidien ou en passe de le devenir ; 47% considèrent que l'IA constitue plutôt une menace pour la démocratie et 70% pour la protection de la vie privée. L'éthique est au cœur de leurs préoccupations ; l'éthique est la condition première d'une IA acceptable. Ce constat est à l'origine de l'écriture d'une charte " Ethique et transformation numérique " actuellement en phase finale de mise en place chez Thales, groupe industriel dont l'activité soulève de graves questions. Fera-t-on un jour des robots tueurs ? Quelle " loyauté " de décision d'une IA ? Quelles parts respectives pour l'homme et la machine dans la décision et quelles responsabilités en cas d'accidents ?

Mais au fait, qu'entend-on par IA ? Pour le Larousse, l'IA est un ensemble de théories et de techniques mises en œuvre en vue de réaliser des machines capables de simuler l'intelligence humaine. Pour Anne Krupicka (Maître de conférences en sciences de gestion à l'institut d'administration des entreprises de Poitiers), l'IA est un

<sup>1</sup> Her (Elle) est un film de 2014, réalisé par Spike Jonze et qui fut récompensé par l'Oscar du meilleur scénario original

ensemble de programmes informatiques qui résolvent des problèmes habituellement résolus par des intelligences humaines de haut niveau. Il est intéressant de noter que dans les deux cas, on se réfère à l'intelligence humaine. Anne Krupicka est spécialiste du comportement des individus ; elle retrace pour nous les évolutions parallèles de la psychologie cognitive et de l'IA. Le cerveau humain est complexe et s'adapte en permanence au contexte, ceci à chaque étape d'un processus décisionnel. Le modèle de décision humaine est éloigné des modèles purement rationnels. " L'émotion participe à la raison, et elle peut assister le processus de raisonnement au lieu de nécessairement le déranger comme on le supposait couramment " ou encore " L'émotion confère aux êtres vivants la possibilité d'agir intelligemment sans penser intelligemment " dit le neurobiologiste Jean-Pierre Changeux. En psychologie cognitive on a d'abord cru que l'homme raisonnait comme une machine ; aujourd'hui, avec l'IA on cherche à faire ressembler la machine à l'homme. Ce qui manque encore à l'IA, c'est l'intégration et la génération des émotions dans la prise de décision. L'homme est capable d'agir et de décider sans donnée, alors que la machine, qui n'est dotée ni d'intuition, ni d'intime conviction, ne l'est pas. Cependant, l'apport incontesté de l'IA à la décision est la rapidité de traitement d'un grand nombre d'informations. La " lenteur " du raisonnement humain a obligé le pilote du vol 1549 d'US Airways à amerrir sur l'Hudson le 15 janvier 2009, après que les moteurs de son avion avaient perdu la quasi-totalité de leur puissance suite à l'ingestion d'oiseaux. Une IA aurait pu analyser plus vite la masse de données à prendre en compte pour prendre une décision plus tôt, ce qui aurait certainement laissé à l'avion le temps de rejoindre un aéroport. Mais une IA serait-elle parvenue à poser un avion avec une propulsion si dégradée ?

### **LES GRANDS TÉMOINS D'IES 2018**

Thomas Gomart est directeur de l'Institut français des relations internationales (IFRI), le think tank français de référence sur les questions internationales. Créé en 1979 sur le modèle anglo-saxon, l'IFRI est le principal institut français de recherche et de débat indépendant, consacré à l'analyse des questions internationales et de gouvernance mondiale. Sa recherche a pour mission d'éclairer et de mettre en perspective les grands événements internationaux. Elle s'adresse prioritairement aux décideurs politiques et économiques, aux milieux académiques, aux leaders d'opinion ainsi qu'aux représentants des sociétés civiles. Historien et expert des relations internationales, Thomas Gomart a brossé un panorama complet et formidablement documenté de la situation de l'Union Européenne face au triangle formé par les trois grandes puissances que sont les Etats-Unis, la Chine et la Russie (Cf. " L'Union européenne face au triangle Etats-Unis/Chine/Russie " ; Annales des Mines-Réalités industrielles

- Fév.2018, p. 12-15). En tant que puissances nucléaires et membres permanents du Conseil de sécurité des Nations Unies ces trois pays jouent un rôle politique direct dans la plupart des grands dossiers internationaux ; ils sont au cœur du processus passé et à venir de mondialisation. Contrairement à l'Union Européenne qui peine à se penser comme une puissance, ces trois pays pratiquent et assument des politiques quasi idéologiques s'appuyant sur la maîtrise des domaines militaire, financier, énergétique et numérique : unilatéralisme pour les Etats-Unis, nationalisme pour la Russie, marxisme léninisme doublé d'une forte ambition économique et stratégique pour la Chine. La Chine, qui brigue le rang de première puissance mondiale, pour le centenaire de la proclamation par Mao Zedong de l'avènement de la République populaire en octobre 1949. Si elle veut être en mesure de peser sur l'orientation du cours de la mondialisation, plutôt que de la subir, l'Union Européenne doit être vigilante face aux diverses stratégies des Etats-Unis, de la Chine et de la Russie. Il lui faut les suivre, chacune séparément, et parvenir à tirer parti des convergences ainsi que des intérêts et points communs qu'elle a avec chacun de ces trois pays. Ses atouts pour cela : un système universitaire de grande qualité ainsi que le poids et la force de ses entreprises.

Alain Juillet est président de l'Académie de l'Intelligence Economique. Fondée en 1993, l'Académie de l'Intelligence Economique a pour mission de valoriser, promouvoir et diffuser un savoir-faire professionnel en Intelligence Economique, adapté aux besoins concrets de l'entreprise. Elle compte plusieurs centaines de membres dont un Collège composé de permanents : entrepreneurs, dirigeants, journalistes, consultants et universitaires, etc. C'est la troisième fois en 15 ans, qu'Alain Juillet - ancien officier parachutiste ayant ensuite œuvré au sein du Secrétariat Général de la Défense Nationale - honore le forum IES de sa présence. Pour lui, le moment présent d'une rupture dans les pratiques de l'IE est propice au questionnement. Il s'est ainsi tout d'abord attaché à susciter la réflexion autour de plusieurs constats, factuels, voire inquiétants pour certains : le Big Data révolutionne nos principes de pensée ; le processus actuellement en marche nous enlève tranche par tranche des pans entiers de nos libertés et nous vivons dans un régime que les révolutionnaires de 1789 n'auraient pas même oser imaginer ; on ne mesure pas encore complètement le rôle et l'importance qu'aura l'IA dans le futur mais celle-ci bouleverse d'ores et déjà nos approches et la Chine se positionne pour battre d'ici 20 ans les Etats-Unis sur ce terrain. Se référant ensuite à l'invraisemblable affaire de l'assassinat d'Alstom (Cf. " Conséquences de la loi anti-corruption américaine à travers le cas d'Alstom " -Lettre 3AF n° 27 ; sept.-oct. 2017) ainsi qu'aux inévitables déboires du même acabit qui vont frapper Areva sous peu et tant d'autres ensuite, Alain Juillet prédit que les grandes entreprises françaises vont, à court terme, être

tiraillées entre les USA et la Chine et qu'il leur faudra savoir réagir et faire des choix stratégiques. L'IE aura là un rôle majeur à jouer pour éclairer les décisions, pourvu qu'on veuille bien entendre les alertes et recommandations que les analystes, spécialistes d'IE, ne manqueront pas de formuler...

### COMMENT VULGARISER L'IE ?

Alexandre Leraître et David Gendreau (Cofondateurs de l'agence de communication stratégique Média Géo Stratégie) ont été invités à présenter à IES 2018 la démarche à travers laquelle ils ont réalisé le documentaire "Guerre fantôme : la vente d'Alstom à General Electric", un parfait exemple de communication grand public en IE. Coproduit par Along Production et LCP-Assemblée Nationale, ce film de 52 minutes traite magistralement de l'application extraterritoriale de la loi anti-corruption américaine et de ses conséquences pour l'industrie européenne, à travers l'analyse détaillée rigoureuse et pédagogique du cas dramatique de la vente d'Alstom Energie à General Electric. On regrette que seul le teaser de cet excellent documentaire, disponible en intégralité sur dailymotion (<https://www.dailymotion.com/video/x68yqm9>), ait été diffusé pendant le forum. Selon le ressenti a posteriori de ses auteurs, c'est seulement après avoir visionné leur film qu'Arnaud Montebourg a véritablement bien pris conscience de tous les ressorts de l'affaire Alstom : dommage et édifiant !

### IE ET IA : EXPÉRIENCES ET PERSPECTIVES

Présidée par Alain Sève (Responsable veille de l'ONERA), la session du forum consacrée aux rapports entre IE et IA fut l'occasion d'inviter les nombreux spécialistes de l'intelligence économique et stratégique présents à croiser leur vision avec celle d'Emmanuel Ledinet (Responsable des études scientifiques amont chez Dassault Aviation). En levant le voile sur les techniques mathématiques classiques (extrapolation, interpolations, etc.) qui fondent le "Machine Learning"<sup>2</sup> et les processus décisionnels associés, ce dernier nous livre le point de vue complémentaire et riche d'enseignements, d'un ingénieur R&T non familier de l'IE, mais doté d'une expérience avérée de l'IA et du Big Data, liée à la maintenance prédictive des avions. Emmanuel Ledinet incite à la réserve et à la prudence quant à l'application des techniques d'IA à l'IES en alertant, exemples concrets à l'appui, sur les difficultés

qu'il entrevoit et en soulignant les points de vigilance qui, selon lui, rendront sans doute encore plus difficile, qu'elle n'est en maintenance prédictive des avions, la mise en pratique de l'IA sur le volet décisionnel de l'IES : robustesse, qualification des sources, des métriques, des tailles d'échantillon, etc.

Avec les témoignages de l'IRSTEA (Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture) et du CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives), ce sont deux expériences vécues au sein d'organismes de recherches français qui sont racontées.

En duo, Emmanuelle Jannès-Ober (Directrice adjointe à la direction de la prospective, de la veille et de la valorisation de l'information scientifique d'IRSTEA) et Floriane Giovannini (Chargée de veille à l'IRSTEA) présentent le dispositif d'intelligence économique et stratégique qui a été déployé, au service de la recherche et de l'ambition de leur institut. C'est stratégiquement que l'IRSTEA s'est impliqué dans une démarche d'IES : avec l'objectif d'anticiper les évolutions des secteurs économiques en lien avec lesquels il travaille, de mieux se positionner par rapport à la concurrence, et de construire une politique de partenariat permettant une valorisation optimale de ses travaux de recherche. Un dispositif cohérent avec les autres politiques de l'institut (science ouverte, gestion des données de recherche, démarche qualité, etc.) et qui commence à être fructueux, a ainsi été mis en place en portant une attention particulière à la sensibilisation du personnel aux enjeux associés.

En tant que directeur des programmes et de la Stratégie du CEA-LIST<sup>3</sup>, l'institut du CEA spécialisé dans le numérique et la robotique où plus de 200 personnes travaillent sur l'IA, Julien Chiaroni est familier des enjeux mêlés de souveraineté nationale et d'innovation. Il se réfère à l'ancien ministre de la défense Jean-Yves Le Drian selon qui : "L'intelligence artificielle est un élément de notre souveraineté nationale... La France doit donc elle aussi investir... pour être au rendez-vous des défis qui s'annoncent...". C'est précisément ce qu'a fait le CEA-LIST aujourd'hui au meilleur niveau mondial en traitement d'images et par ailleurs partie prenante des projets DATAIA et DIGIHALL, portés par l'Université Paris-Saclay. Sélectionné par l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre des programmes d'"Investissements d'Avenir",

<sup>2</sup> Wikipédia définit l'apprentissage automatique, "Machine Learning" en anglais ou encore apprentissage statistique comme un champ d'étude de l'intelligence artificielle, se basant sur des approches statistiques pour doter les ordinateurs de la capacité d'apprendre à partir de données : c'est-à-dire améliorer leurs performances à résoudre certaines tâches sans être explicitement programmés pour cela.

<sup>3</sup> Le LIST (Laboratoire d'Intégration des Systèmes et des Technologies) est l'un des trois instituts de recherche technologique spécialisés de la division Recherche technologique du CEA ; il est spécialisé dans les systèmes numériques intelligents.

L'institut DATAIA a pour vocation de regrouper et de structurer des expertises pluridisciplinaires (mathématiques, informatique, sciences juridiques, économiques et sociales) pour répondre aux enjeux majeurs des sciences des données, de l'intelligence artificielle et de leurs applications. Quant au futur pôle du numérique DIGIHALL, il vise à consolider sur le plateau de Saclay un espace majeur d'activités de recherche scientifique et technologique dans le domaine du digital.



*Valoriser l'information déjà présente dans l'entreprise est capital : échanges sur le sujet dans le cadre d'un atelier participatif animé par Pierre-Yves Debliquy (Conseiller en intelligence stratégique à l'agence de développement pour la province de Liège).*

### **RETOUR SUR LES MOOC À TRAVERS UN ATELIER PARTICIPATIF**

Le principe des MOOC (Massive On line Open Course), des cours en ligne dont la forme reste finalement assez traditionnelle, avait été présenté lors d'IES 2016. Le forum de cette année fut l'occasion d'approfondir le sujet avec Jacques Loigerot (Ingénieur veille au CETIM) animateur d'un atelier participatif illustrant ce concept à travers un cas pratique mis en œuvre sur la plateforme Fun développée en 2013 à l'initiative du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Forts de leur expérience conjointe de développement de modules de formations, les pôles " veille " et " formation & gestion des compétences " du CETIM se sont lancés ensemble dans l'aventure du MOOC. Leur objectif était de former à la veille autonome des responsables innovation ou des personnels opérationnels d'entreprises industrielles de la mécanique. C'est ainsi qu'est né le MOOC "Les bonnes pratiques de veille technologique". Structuré en plusieurs étapes (Introduction à la veille et présentation du processus dans sa globalité ; définition des axes et des livrables de veille ; organisation de la veille ; identification et définition des sources ; collecte de l'information ; analyse et synthèse ; partage et diffusion des résultats de veille), ce cours en ligne, qui s'est déroulé sur 8 semaines entre les mois de mai et juillet 2018, a connu un succès considérable : 7500 inscrits issus de 82 pays ont généré près de 200 fils de discussions. Les supports de formation restent accessibles en ligne aux participants et il est

maintenant envisagé de proposer une nouvelle session de ce MOOC en 2019 et d'en faire une version en anglais. Investissement, disponibilité et agilité sont les conditions nécessaires au développement réussi et à l'animation réactive d'un MOOC.

### **LA CISP, UN CREUSET OÙ LE TRAVAIL COLLABORATIF DÉMULTIPLIE L'EFFICACITÉ DE L'IES**

La CISP est le réseau 3AF des professionnels des métiers de l'IES : veille, analyse, propriété intellectuelle, prospective, stratégie, etc. Ses membres, qui entretiennent des relations de confiance sont tous en poste et n'exercent pas d'activité de conseil. Ils se réunissent périodiquement, en sessions plénières, ou en groupes de travail (GT) plus restreints. Afin d'élargir et d'enrichir les débats, la CISP invite à sa table de multiples secteurs d'activités : assurance, automobile, chimie, électronique, énergie, finances, mécanique, santé, services, transports, etc.

Retours sur les groupes " livrables " et " sources " de la commission, parangons du genre dont les acquis furent respectivement présentés par deux binômes : Laurent Couvé (Responsable veille technologique & stratégique au CETIM) associé à Marie-Ange Delemotte (Chargée de veille chez Dassault Aviation) et Nathalie Nogueira (chargée de veille à la Direction Stratégie Produits et Marché de la Division Moteurs Civils chez Safran Aircraft Engines) aux côtés d'Isabelle Langlois (analyste au sein du Service d'Analyse Concurrentielle et d'Information Technologique de la Direction Générale Technique de Dassault-Aviation).

Pratiques et usages de veille évoluent. Le métier du veilleur bouge. Les livrables doivent donc suivre et pourquoi pas même devancer et anticiper les changements. Un groupe de travail a été mis en place en 2016 au sein de la CISP avec l'objectif de répondre à un besoin fort des participants d'adapter leur offre de livrables de veille aux besoins de leurs clients. Ces derniers attendent désormais du veilleur qu'il leur apporte davantage de services et d'accompagnement tout en s'adaptant à leurs usages. S'ils ont de moins en moins le temps ou l'envie de lire, ils apprécieront des résultats visuels et personnalisés (infographies, cartographies) qui auront avantage à leur être présentés lors de journées ou de séminaires en ligne dédiés. Autre piste : le livrable du futur ne sera peut-être plus réalisé par l'équipe de veille, mais pourra être conçu directement par le client-utilisateur avec l'accompagnement du veilleur, garant de fiabilité en tant que spécialiste des outils et des sources et avec son aide pour la mise en valeur des informations essentielles. Le livrable pourra aussi être augmenté de liens vers d'autres livrables ou de commentaires et d'avis d'experts. Ira-t-on jusqu'à la

“Veille as a Service” (VaaS<sup>4</sup>), où le livrable ne serait plus seulement un produit, mais deviendrait un service à part entière ?

Du bon choix des sources dépend la fiabilité d’une veille. Un groupe de travail a été mis en place en 2012 au sein de la CISP avec l’objectif d’échanger entre participants sur la pertinence, la fiabilité et l’utilisation des sources d’information ouverte utilisées par leurs secteurs, de capitaliser ces sources et de les partager. Ainsi, c’est plus de six cents sources relatives à près de vingt nations et dix thématiques qui ont été passées au peigne fin de l’expertise commune.

Lieux de formation continue, d’échanges de pratiques et de partages d’expériences, les groupes de travail de la CISP permettent à chacun de leurs membres d’accroître la robustesse de ses pratiques et d’innover dans ses modes de fonctionnement, cela dans un climat de complète réciprocité, clef de voute de leur succès.

### RENDEZ-VOUS EN 2020 !

Il faut, dans un monde aujourd’hui envahi par le numérique, le digital et l’intelligence artificielle, s’attendre à des ruptures, sociologiques, techniques et systémiques. Le domaine aérospatial n’en sera pas exempt : gestion du trafic aérien, apparition de nouveaux usages de l’Espace, etc. Dans ce contexte bouillonnant, un observatoire ouvert du numérique a été mis en place mi-2018 au sein de la 3AF (Cf. pages 42 de la présente Lettre). Sous la houlette d’Alain Wagner, cette instance a pour objectif d’instruire les multiples volets du développement des technologies de l’information à l’aune du domaine aérospatial et à terme de dégager des recommandations pour le secteur...

L’ensemble des communications faites lors du forum IES2018 montre que l’intelligence artificielle est présente au sein des démarches d’intelligence économique et stratégique des uns et des autres et interagit avec leurs pratiques. L’IA accompagne donc déjà les professionnels de l’IES, en étant au service de leurs intelligences humaines. Car le rôle de l’homme dans le dispositif d’IES reste capital et incontournable. Resurgit donc encore et toujours “ la primauté de l’humain sur la technologie ” qui rappelons-le nous était le leitmotiv d’IES 2016. L’intelligence artificielle va continuer de révolutionner notre monde ; l’intelligence économique et stratégique va poursuivre sa voie et en tirer le meilleur parti...

Deux bonnes raisons de se donner rendez-vous en 2020 pour le prochain forum IES qui se tiendra sous l’égide de la CISP de la 3AF !



*Les échanges se sont poursuivis, sur un mode plus informel, mais non moins fructueux, en soirée le mercredi soir 3 octobre, à l’occasion du diner croisière organisé sur “ Le Capitaine Fracasse ” ; délicieux et agréable moment de convivialité où la clémence de l’arrière-saison nous a permis de profiter pleinement de Paris by Night, depuis le pont supérieur de la péniche.*



 Palantir

IA et IE intègrent toutes deux la notion de prédiction, à l’instar du palantir ou “ pierre de vision ” l’objet de légende du Seigneur des anneaux par J. R. R. Tolkien, qui permet de tout voir dans l’espace et dans le temps. Palantir est aussi le nom d’une start up américaine des plus prometteuses, même si elle est parfois décriée. Spécialisée dans le traitement du Big Data, elle travaille pour le renseignement américain et la sécurité intérieure française, mais aussi pour Airbus. Fabrice Brégier, l’ex numéro deux d’Airbus vient de prendre la tête de la filiale française de Palantir, ce qui montre le formidable pouvoir d’attraction du monde numérique. ■

<sup>4</sup> Allusion à SaaS (pour Software as a Service ou logiciel en tant que service), un modèle d’exploitation commerciale des logiciels qui s’est développé depuis le début des années 2000 et dans lequel ceux-ci sont installés sur des serveurs distants plutôt que sur la machine de l’utilisateur.

# SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

## À PROPOS DE L'INITIATIVE " OBSERVATOIRE DU NUMÉRIQUE " DE LA 3AF, LA DIGITALISATION DES ENTREPRISES

par Bertrand de Montluc, membre de la commission Stratégie et Affaires internationales de la 3AF

Le président de la 3AF a lancé un " Manifeste de l'Observatoire ouvert du numérique " dont il a confié le pilotage à M I. Garcia-Brotons. Cet observatoire est ouvert à des acteurs experts n'appartenant pas à la communauté aéronautique et spatiale. Son champ d'études est très vaste puisqu'il vise à traiter des différentes modalités de la transformation numérique (I.A., neurones artificiels, Deep Learning <sup>1</sup>, projets agiles, Big Data). Celle-ci joue en tant que rupture technologique, sans aucun doute majeure, un rôle croissant dans le domaine économique et industriel ainsi qu'en atteste la publication de nombreux travaux d'économistes, d'universitaires et de chercheurs sur ce sujet <sup>2</sup>.

De quoi s'agit-il ? De la mise en oeuvre de systèmes capables d'exécuter des processus neurologiques de haut niveau tels que l'apprentissage, la mémoire ou le raisonnement critique grâce à la maîtrise d'une masse considérable d'informations obtenues par interconnexion permanente en tout lieu et pratiquement pour tous usages, phénomène inédit à ce niveau.

Comment cela se traduit-il concrètement ? Une réponse évidente est que ces innovations " capacitanes " imposent aux entreprises industrielles et commerciales (y compris dans les domaines dits régaliens) de réinventer leur modèle économique, la chaîne de production et la chaîne de fonctionnement interne, au total un bouleversement des méthodes de travail. A partir de là, apparaît pour les acteurs un *modus operandi* nouveau : le renversement du poids respectif des grandes fonctions " immatérielles " (relations humaines, fonction commerciale, relations publiques (toutes fonctions au contact du client) dans la prise de décision, par rapport aux fonctions " matérielles " jusqu'à présent prépondérantes dans nos industries du secteur aérospatial et de défense du fait de la technicité des produits. En somme les usages plutôt que les performances ! La vie des entreprises industrielles - surtout celle des très grands groupes - s'en trouvera sérieusement modifiée : information en temps

réel et partagé, travail collaboratif en circuit court (méthodes dites agiles <sup>3</sup>). Soit le modèle Space X de Musk plutôt que le modèle de l'arsenal ou du CNPF classique. Il est clair que compte tenu de la masse effarante d'informations et de données à dispatcher et à traiter, le mot d'ordre va être "Partager". Ne pas chercher à tout contrôler. Être transparent, fluide, pour être efficace.

Il a été demandé à la CSAI/3AF de contribuer aux travaux du groupe 3AF " Observatoire du digital " par une réflexion, interne et préliminaire à ce stade, sur les enjeux de ces travaux, de façon à parvenir à identifier quelques fils conducteurs intéressant la communauté de la société savante pour l'essentiel composée d'ingénieurs de l'industrie et des agences.

La présente note a pour objet de présenter, à partir des observations d'un petit nombre de collègues <sup>4</sup>, quelques remarques de méthode ou visant à clarifier une réflexion dont le champ est extrêmement diffus, en cherchant à contribuer modestement à dédramatiser les enjeux de l'IA et à mieux comprendre ce qui est possible et ce qui ne l'est pas.

Dans un premier temps, on fera deux remarques liminaires concernant la dynamique du groupe Observatoire, et dans deuxième temps on formulera quelques observations générales dans le champ de la réflexion.

\* \* \*

1/ Une première remarque concernant l'Observatoire 3AF concerne l'objectif de la démarche. Il ne s'agit pas, à notre sens, d'un exercice visant seulement à étendre notre culture, même si un tel acquis est nécessaire aujourd'hui. La finalité devrait être, selon nous, d'identifier ce dont disposent, dans la " boîte à outils " IA <sup>5</sup>, les entreprises qui souhaitent expérimenter des approches IA et, après un investissement dans les connaissances de ces nouvelles

<sup>1</sup> L'IA est un ensemble de disciplines informatiques qui s'intéresse au raisonnement et à l'imitation de capacités humaines. Les progrès de l'IA ont franchi une étape majeure suite aux découvertes qui ont permis d'imiter les structures de réseaux neuronaux à couches multiples du cerveau (Deep Learning). Il s'agit donc pour l'essentiel d'imaginer des architectures de réseaux assez similaires aux grands faisceaux de connexions structurés comme ceux du cerveau humain. Pour les définitions et les concepts de base, voir les publications de l'Académie des Technologies (Rapport sur l'industrie du futur, 2017, et Renouveau de l'IA, 2018).

<sup>2</sup> Notamment, D. Cohen " Il faut dire que les temps changent " (2018, Albin Michel), Y. Le Cun, Leçon inaugurale au Collège de France, Y N Harari " Homo deus " (2018, Albin Michel), S Dehaene, Y Le Cun, J Girardon, " La plus belle histoire de l'intelligence - Des origines aux neurones artificiels " (2018, Robert Laffont). C.Villani, " Donner un sens à l'intelligence artificielle - Pour une stratégie nationale et européenne ", rapport de mission parlementaire, mars 2018. J. Blamont, " Réseaux ! Le pari de l'intelligence collective " CNRS Editions, novembre 2018 (notamment chapitre 2). La révolution Big Data, Y Echenne, JC Cointot, éd. Dunod.

<sup>3</sup> Voir les travaux récents de l'économiste D. Cohen dans l'ouvrage précité.

<sup>4</sup> B. de Montluc, Ph. Charruyer, V. Bonniot, et P. Hummel.

<sup>5</sup> Pour des détails sur la boîte à outil, voir un résumé dans le chapitre 2 du Rapport précité de l'Académie des Technologies, 2018, pp. 47-51.

disciplines, de comprendre :

- d'abord, en quoi les ruptures techniques introduites peuvent changer la méthode de production des " objets technologiques " (dont ceux qui nous sont familiers, systèmes de systèmes, développements industriels aérospatiaux ou de défense et sécurité), ce qu'on appelait la chaîne de production ?

- et, en second lieu, concernant les ruptures d'usage des équipements, de comprendre en quoi elles peuvent dans un avenir pas forcément très lointain bouleverser la conduite d'opérations (dont la définition reste à préciser). Saurons-nous nous montrer à l'avant-garde de l'utilisation massive de l'information et du retour sur information ; jusqu'à quel point, au-delà des tabous professionnels, la machine va-t-elle remplacer l'homme y compris dans les opérations militaires ?<sup>6</sup> Sur ce point, le texte récent de J-C. Noel, précité en note, intitulé " Vers une nouvelle révolution militaire ? " (IFRI, 2018) donne des éclairages assez précis sur le fait que les technologies IA capables de brasser une quantité énorme d'informations, de les relier, d'établir de meilleures connexions entre elles et de tester finalement les options favorables vont conduire à un bond en avant des capacités d'anticipation des forces et relancer la fameuse problématique EBO (Effect-Based Operations) en vogue depuis la guerre du Golfe de 1991 et un peu passée de mode depuis. A ce stade, on parle de complémentarité homme/machine, mais il paraît d'ores et déjà que la machine, de plus en plus autonome pour pallier les effets de communications possiblement peu sûres, produira des progrès étonnants en matière de fiabilité et de sécurité (résistance aux cyberattaques par exemple). La multiplication de machines artificielles au sein des armées pourrait même à terme si l'on en croit des experts militaires favoriser des affrontements tactiques entre unités automatisées conduites par des algorithmes. L'automatisation en ce sens est clairement un facteur significatif de l'amélioration des performances des systèmes de combat, quand bien même elle ne serait pas pour autant un facteur de réduction des coûts d'acquisition. Pour tempérer l'euphorie, rappelons que l'expérience a aussi montré que, jusqu'à présent, que les systèmes les plus sophistiqués peuvent être leurrés. Au plan international global, il est théoriquement envisageable que les doctrines d'emploi de l'IA des différentes

armées des grandes puissances puissent converger. En ce sens, on pourrait aller jusqu'à dire que l'IA deviendra au plan stratégique une arme politique redoutable (USA/Chine). D'ores et déjà une course aux armements à base d'IA est en cours avec des projets de recherche dotés de budgets considérables<sup>7</sup>.

- enfin il serait utile de progresser sur le fait de savoir in fine en quoi ou dans quels domaines ces technologies innovantes peuvent apporter des solutions vraiment utiles (aux industriels, aux opérateurs et usagers) éthiquement compatibles. La perspective de développer des machines capables non seulement de produire un comportement intelligent, mais aussi d'éprouver un sentiment de conscience de soi ou même d'une forme d'émotion, doit nous interroger.

2/ Une seconde remarque tient à la définition du champ de l'étude puisqu'il est susceptible de couvrir la numérisation des fonctions de conduites des systèmes techniques (leur usage, leur " command and control " ; C2 comme disent les américains), des aides à la décision opérationnelle, la mise en réseaux de systèmes (modélisation et anticipation d'effets), la transformation des process des donneurs d'ordre et industriels, etc.

*Quelques observations plus générales pourraient par ailleurs contribuer à la clarification des enjeux dans le champ de l'étude:*

• Concernant la numérisation ou digitalisation de fonctions de pilotage de systèmes complexes (dans la défense, par exemple, conduite de tir en mer) comme on le fait depuis les années 70, il s'agit désormais d'intégrer encore plus le progrès monumental des ordinateurs, des composants électroniques et des logiciels (la fameuse loi de Moore, les avancées des GAFAs, algorithmes nouveaux). L'évolution se fera en fonction des progrès rapides de l'offre numérique<sup>8</sup>. En revanche, ne perdons pas de vue que la rupture peut être freinée ou accélérée par le facteur économique ou sociologique, par des raisons de coût ou de rigidité du facteur travail.

<sup>6</sup> Voir l'article *Le Monde* par N Guibert " Les défis militaires de l'IA ", 19 octobre 2018 et le récent rapport de l'IFRI, " IA : vers une nouvelle révolution militaire ? " par Jean Christophe Noel, 2018. Pour les conséquences du remplacement de l'homme par la machine dans les domaines sensibles tels que la santé ou les transports, voir l'ouvrage collectif précité de S Dehaene, Y Le Cun, J Girardon, " La plus belle histoire de l'intelligence ".

<sup>7</sup> Les Etats-Unis consacraient 18 milliards USD pour des recherches (DARPA, ARPA-E) dans les trois prochaines années dans les domaines requis à l'automatisation de l'armement de défense et de sécurité. Les budgets globaux y compris dual et commerciaux seraient également importants en Chine, via un plan d'investissement étatique de 22 milliards USD à 2020 et des fonds privés massifs venant des Gafas chinois les BATX (Baidu, Alibaba, Tencent, Xiaomi) ; en Europe, la CE a publié le 6 juin 2018 un plan " Digital Europe " de 9,2 milliards d'€ dont 2,5 milliards pour l'IA. Voir " La guerre de l'Intelligence artificielle aura-t-elle lieu ? " M. Guillaume, B. Pajot, *Les Carnets du CAPS, Ministère de l'Europe et des Affaires étrangères N°26, Automne 2018*.

<sup>8</sup> Voir pour des explications et des exemples notamment l'ouvrage du professeur J Blamont, *Réseaux, éditions de CNRS, Paris 2018*.

Dans le domaine spatial, autre exemple, on peut imaginer d'embarquer sur ce qui vole ou se met en orbite des choses qu'on ne savait faire qu'à terre et qu'il fallait ensuite transporter. Les matériels proposés par le " New Space " ; consommables, flexibles, sont grosso modo ceux du commerce des composants électroniques digitaux et peuvent être produits en série, à un cout a priori abordable. Reste que l'environnement spatial est contraignant et ne se prête pas systématiquement à l'amortissement d'investissements qui n'intéressent pas toujours le marché à court terme.

• Le domaine très important du C3I (command, control, communication, information) militaire ou civil est en évolution également depuis les années 70 avec des fortunes diverses en fonction de certains choix contractuels (systèmes propriétaires fermés, difficultés à élaborer les spécifications des logiciels faute de labos technico-opérationnels). Les " systèmes experts " d'aide à la décision (ancêtres du Deep Learning ?) ont voilà dix ou quinze ans représenté une avancée ; mais ils étaient basés avant tout sur l'action initiale de l'homme. Aujourd'hui dans le Deep Learning la machine absorbe les données et l'expérience puis détermine elle-même la conduite. La mise en réseau de systèmes, qu'on appelait au début des années 2000 dans les milieux de la défense " Network Centric Warfare " (NCW), est par conséquent un domaine en plein renouvellement où l'homme ne joue plus le rôle qu'on lui assignait traditionnellement. Là est sans doute une place évidente pour l'IA si des problèmes de standards (nationaux et internationaux), de fréquences et de robustesse peuvent être surmontés.

• Enfin, et surtout, les questions liées à la remise en cause via le progrès technologique IA du mode de fonctionnement et de production des organisations et des entreprises, non spécifique en soi au secteur aérospatial, sont nous semble-t-il capitales, sachant que dans le domaine industriel qui nous concerne certains paramètres peuvent (ou non ?) être différents de ceux du " business as usual ". Dans le commercial de grande consommation, on a plutôt du " push " (l'entreprise analyse et intuite comme elle peut le besoin, trouve des solutions et voit si le marché aval répond et comment). Dans les domaines qui nous sont proches, on a le plus souvent à faire à des solutions " pull " pour des problèmes à court ou moyen terme formulés par des donneurs d'ordre pour le compte d'une famille d'utilisateurs, en tenant compte du retour d'expérience dans un milieu donné (espace, air, mer, terre). Force est de constater que dorénavant nous sommes face à un marché dominé par un pull nouvelle version – c'est-à-dire une démarche centrée essentiellement sur l'expérience des utilisateurs pour lequel le produit ou le service est individualisé le plus possible. Cela correspond au concept majeur de retour d'expérience au sens informatique du terme et à la notion de systèmes modulaires, flexibles et réversibles. L'impact des innovations numériques /IA sera à situer dans la relation " client " ou spécificateur et fournisseur industriel. ■

# SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

## DGA ESSAIS PROPULSEURS, UNE EXPERTISE ET DES MOYENS UNIQUES AU SERVICE DE L'INDUSTRIE AÉRONAUTIQUE

par **Émilie JÉRÔME**, experte en aérothermodynamique, DGA Essais propulseurs, Commission aérodynamique de la 3AF

### 1. EN QUELQUES MOTS

Installé depuis 1946 sur le plateau de Saclay, DGA Essais propulseurs (anciennement CEPr - Centre d'Essais des Propulseurs) est un acteur incontournable de l'industrie aéronautique. Etablissement relevant de la Direction Générale de l'Armement (DGA) au sein du Ministère des armées, DGA Essais propulseurs fournit à ses clients étatiques (les forces armées) et industriels civils une panoplie complète de prestations d'essais et d'expertise des matériels aéronautiques, de la phase de développement jusqu'au suivi en service. Sa spécialité est de réaliser des essais de propulseurs en condition d'altitude simulée, grâce à des installations uniques en Europe.

### 2. ZOOM SUR L'ALTITUDE SIMULÉE

#### 2.1. Effet de l'altitude

Les souffleries permettent d'étudier les phénomènes aérodynamiques à pression atmosphérique, c'est-à-dire au sol. Or, l'altitude peut avoir une influence non négligeable, notamment sur le fonctionnement des moteurs aérobies aéronautiques et sur les risques de givrage.

La catégorie des moteurs aérobies comprend les turbo-réacteurs et les turbopropulseurs d'avions et de drones, les turbomoteurs d'hélicoptères et les turboréacteurs de missiles. Lorsqu'un aéronef est en vol, son moteur est soumis aux conditions atmosphériques en altitude. Plus l'altitude est élevée, plus la pression statique et la température statique ambiantes sont faibles. Cela a un impact sur le fonctionnement des turbomachines. Par exemple, le débit traversant le moteur est plus faible en

altitude qu'au sol ; le redémarrage est plus difficile en altitude qu'au sol, etc.

L'altitude a également une influence déterminante sur le risque de givrage. Quand un aéronef traverse un nuage givrant, il risque de se former une accréation de glace au niveau des sondes de mesure (sondes Pitot ou autre), du bord d'attaque des ailes et/ou de l'entrée d'air du moteur. C'est un risque d'incident ou d'accident. En effet, l'accréation de glace sur une sonde fausse les mesures, ce qui peut induire des erreurs de pilotage. L'accréation de glace au niveau des ailes d'avion modifie l'aérodynamique autour des ailes : elle favorise le décrochage, augmente la traînée et diminue la manœuvrabilité. Au niveau d'une entrée moteur, la couche de glace formée modifie l'écoulement de l'air entrant dans le moteur et donc les performances du moteur. De plus, des blocs de glace risquent de se détacher et d'aller heurter les aubes du compresseur, ce qui peut l'endommager et entraîner l'extinction du moteur.

Les bancs d'essais en altitude simulée permettent de réaliser des essais dans des conditions identiques à celles d'une altitude donnée, y compris les conditions givrantes.

#### 2.2. Principe de fonctionnement d'un caisson en altitude simulée

Le spécimen à tester est placé dans un caisson. Ce caisson a une forme cylindrique et est relié en amont et en aval à un réseau de collecteurs (tuyaux), de vannes et de moyens d'alimentation et d'extraction, comme le montre la Figure 1.

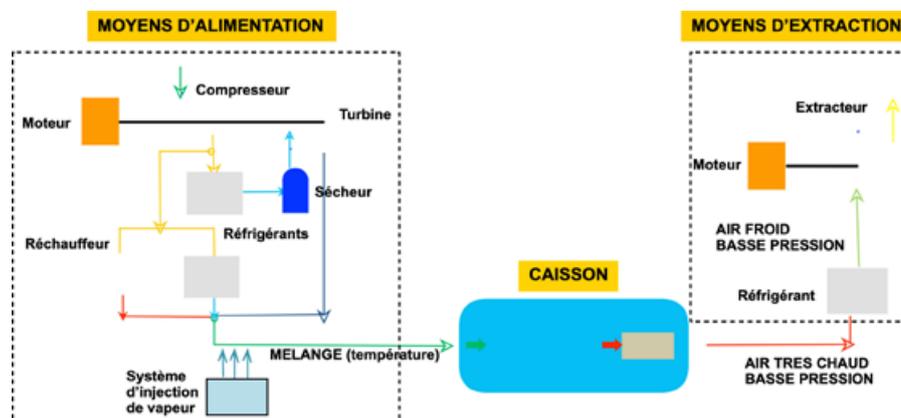


Figure 1 : Principe de fonctionnement d'un caisson d'altitude simulée



Figure 2 : BU1 - Unité de conditionnement d'air en alimentation



Figure 3 : Jonction des collecteurs d'extraction nord CN1 et CN2

L'ensemble de ce réseau (environ 2 km de long, jusqu'à 3,2 m de diamètre) permet de contrôler finement les conditions à l'intérieur du caisson. En effet, en amont :

- des compresseurs et turbines permettent de contrôler la pression,
- des réfrigérants et réchauffeurs permettent de contrôler la température,
- un sécheur et un système d'injection vapeur permettent de contrôler l'hygrométrie, le sécheur servant aussi et principalement à sécher l'air en amont de la turbine pour éviter l'endommagement des aubes.

En aval, des systèmes de refroidissement (réfrigérants, systèmes d'injection d'eau, chemisage des collecteurs, chenaux dans lesquels sont immergés les collecteurs) permettent de refroidir les gaz. Des compresseurs (extracteurs) permettent de réguler la pression et ainsi d'aspirer l'air avant de le rejeter dans l'atmosphère.

Ces moyens de conditionnement d'air en alimentation et extraction permettent donc de recréer les valeurs

de température, de pression, d'hygrométrie et de débit d'air identiques à celles d'une altitude et d'une vitesse de l'aéronef demandées par le client. Ils permettent de fournir :

- un débit d'air allant jusqu'à 150 kg/s,
- une pression allant du quasi vide jusqu'à 22 bars,
- une température allant de -70 °C à 520°C<sup>1</sup>.

Cela permet de représenter une altitude de -610 m à 20 000 m et un nombre de Mach de vol allant jusqu'à 2.



Figure 4 : Supervision d'essais en cabine de pilotage de l'ensemble des réseaux d'atmosphérisation alimentant les bancs d'essais. C'est la "tour de contrôle" pour la coordination des essais

### 2.3. Intérêt de réaliser des essais en altitude simulée...

Il y a plusieurs avantages à réaliser des essais en caissons d'altitude simulée plutôt que des essais en vol :

- la diminution des risques,
- le moindre coût,
- la maîtrise de l'altitude et des conditions atmosphériques testées, notamment en cas d'essais de givrage (en vol, les essais sont tributaires des conditions météorologiques),
- la répétabilité des points d'essais,
- le nombre plus élevé de mesures (de l'ordre de 1000),
- la possibilité de reproduire les conditions dans lesquelles ont eu lieu un incident ou accident.

### 2.4. ... et aussi des essais au sol

En plus des essais en altitude simulée, DGA Essais propulseurs réalise aussi des essais au sol.

D'une part, les bancs d'essais d'altitude simulée peuvent simuler également l'altitude 0 m, voire même -610 m, pour représenter certaines zones terrestres

<sup>1</sup> La gamme des valeurs indiquées ci-dessus correspond à l'ensemble des moyens du centre, qui comprennent les bancs d'essais de chambres de combustion. En amont de la chambre de combustion testée sont recréées les conditions en sortie du compresseur. C'est pourquoi les pressions peuvent atteindre jusqu'à 22 bars et les températures jusqu'à 520°C.

situées en dessous du niveau de la mer. Un intérêt est de pouvoir réaliser les essais au sol et en altitude dans un même banc d'essai. Ainsi, les essais sont optimisés (un seul banc au lieu de deux) et cela évite les disparités de résultats dues à la différence de configuration entre un banc sol et un banc altitude différents.

D'autre part, DGA Essais propulseurs possède des bancs sol. Le banc To permet de réaliser des essais de vieillissement moteur. Le PAG (Petit Anneau Givrant) est une soufflerie pour les essais de givrage de sondes et de petits équipements et permet d'effectuer des essais moins coûteux qu'en utilisant un caisson d'altitude simulée en condition sol (S1 ou R6). Le banc GIV permet de réaliser des essais de givrage de circuit carburant. Le banc K9 sert à tester les chambres de combustion. Ces types d'essais seront détaillés par la suite.

### 3. LES ESSAIS RÉALISÉS À DGA ESSAIS PROPULSEURS

#### 3.1. Types de spécimens testés

DGA Essais propulseurs offre la possibilité de tester une large gamme de propulseurs, comme son nom l'indique, mais également d'autres sortes de matériels aéronautiques. En effet, les différents types de spécimens testés sont :

- des moteurs complets :
  - turboréacteurs (avions de chasse, jets d'affaires, drones, missiles),
  - turbopropulseurs (avions de transport militaire),
  - turbomoteurs (hélicoptères),
- des sous-ensembles de moteurs :
  - chambres de combustion,
  - systèmes carburant (circuit complet et composants),
  - entrées d'air moteur,
- des équipements (sondes Pitot, groupes auxiliaires de puissance...),
- des profils d'aile d'avions / de pales d'hélicoptères.

#### 3.2. Types d'essais réalisés

Différents types d'essais peuvent être réalisés sur ces spécimens, représentatifs de différents cas de vol :

- Performance (bancs R3, R4, R6, M1)

Les essais de performance se font à différents régimes moteurs et différentes conditions de vol.

Pour les turboréacteurs (R3, R4 et R6), des balances de poussée permettent d'en mesurer la poussée.

Pour les turbomoteurs (M1), la puissance sur l'arbre est calculée à partir des mesures du couple et de la vitesse de rotation.

Dans tous les cas, au niveau modulaire sont mesurées les températures et les rapports de pression dans certains plans. On regarde le rapport de pression d'un module entier grâce aux mesures ou grâce à un modèle en l'absence de mesures. Les mesures du débit d'air et du débit carburant donnent également de précieuses indications quant à la performance.



Figure 5 : Montage d'essais de turbomachine au banc R4

- Démarrage avec imprégnation à froid (bancs R3, R4, R6, M1)

Ces essais permettent de représenter un démarrage du moteur en vue d'un décollage dans des conditions hivernales, après une nuit dans des zones arctiques par exemple, ou en altitude (montagne). Dans le banc d'essais, un débit d'air froid (jusqu'à 30 kg/s, -65 °C) circule pendant plusieurs heures afin de refroidir le moteur à la température voulue. C'est ce qu'on appelle l'imprégnation à froid. Une fois le moteur imprégné, il est démarré. Le but est d'identifier d'éventuels problèmes au démarrage.



Figure 6 : Cabine de pilotage du banc M1 lors d'un essai de turbomoteur

- Redémarrage en vol (banc R3, R6, M1) / rallumage en vol de chambre de combustion (AO6)

Ces essais représentent un incident. Il s'agit du cas d'une extinction d'un moteur en vol. Lorsque de tels incidents se produisent, il est nécessaire que le moteur puisse être redémarré ou rallumé.

- Interruption au décollage (banc R3)

Les essais sont réalisés dans des conditions au sol en faisant passer le régime moteur du plein gaz au ralenti. Ils représentent un avion au sol en train d'accélérer en vue d'un décollage et qui est obligé d'interrompre sa manœuvre pour des raisons de sécurité (objet sur la piste, panne d'un équipement avion etc.).

- Endurance (banc To)

Ces essais sont réalisés dans le banc sol To. Le moteur est installé en aval d'une préchauffe avec des brûleurs fonctionnant au gaz. L'air est ainsi chauffé avant d'être ingéré par le moteur. Cela provoque un vieillissement accéléré du moteur. Ce type d'essai permet de voir l'évolution de l'endommagement d'un moteur au cours de son utilisation sur toute sa durée de vie, et ainsi de planifier au juste besoin les contrôles et opérations de maintenance nécessaires pour garantir les performances et la fiabilité attendues.

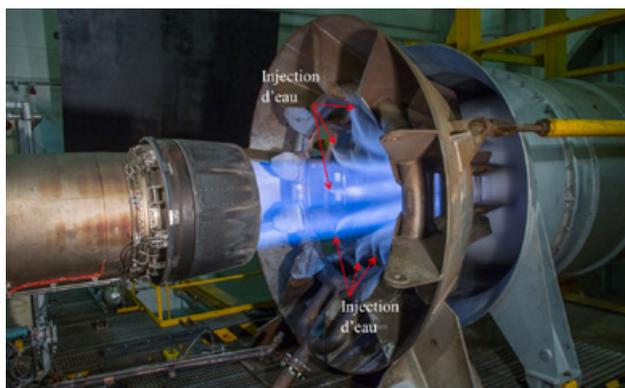


Figure 7 : Essais d'endurance d'un M88 (moteur du Rafale) - Régime plein gaz avec post-combustion - Refroidissement des gaz brûlés par injection d'eau

- Givrage (bancs R6, S1, PAG, GIV, A06)

Pour les bancs R6, S1 et PAG, un nuage givrant est généré grâce à une grille de givrage constituée d'injecteurs d'eau avec pulvérisation pneumatique. Les régulations du débit d'air de pulvérisation et du débit d'eau permettent d'obtenir la teneur en eau liquide (LWC) et le diamètre volumétrique médian (DVM) souhaités. Les injecteurs sont répartis de manière à assurer l'homogénéité du nuage. Sont testés des entrées d'air (voir Figure 8), des sondes, des profils d'aile d'avion et de pale d'hélicoptère.

L'adaptation du banc A06 est en cours pour pouvoir réaliser des essais de givrage avec des cristaux (au lieu de gouttes d'eau surfondues pour les autres bancs), afin de pouvoir répondre aux nouvelles réglementations dans le domaine du givrage.

Le banc GIV permet de tester les circuits carburants. La pression et la température du carburant sont réglées de manière à avoir des valeurs identiques à celles correspondant à un fonctionnement à une altitude donnée. Concernant l'air extérieur au circuit carburant, une enceinte climatique permet de recréer la température correspondant à l'altitude souhaitée, la pression de l'air restant quant à elle à la valeur au sol (1 bar). A ces conditions, l'eau contenue dans le carburant peut geler. Ces essais permettent de vérifier que les différents constituants du circuit carburant restent alors fonctionnels.



Figure 8 : Essai de givrage sur une entrée d'air d'hélicoptère au banc R6

- Qualité de la combustion (bancs K8, K9, A06)

Les chambres de combustion sont testées à taille réelle. Elles sont soumises à de fortes température et pression en entrée pour être représentatif de l'écoulement en sortie compresseur. Des tests de développement et de performance sont réalisés au sol et en altitude simulée : caractérisation aérodynamique de la chambre, perte de charge, efficacité de combustion, stabilité de la flamme, limites d'allumage, essais et optimisation de différents systèmes d'allumage, etc.

Un anneau tournant, placé à la sortie de la chambre, permet d'obtenir une cartographie sur un tour complet (360°) de la température et de la composition des gaz. Le Smoke number (indicateur de la quantité de suie) est également mesuré. Les mesures sont effectuées en respectant les normes de l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale) et de SAE International.

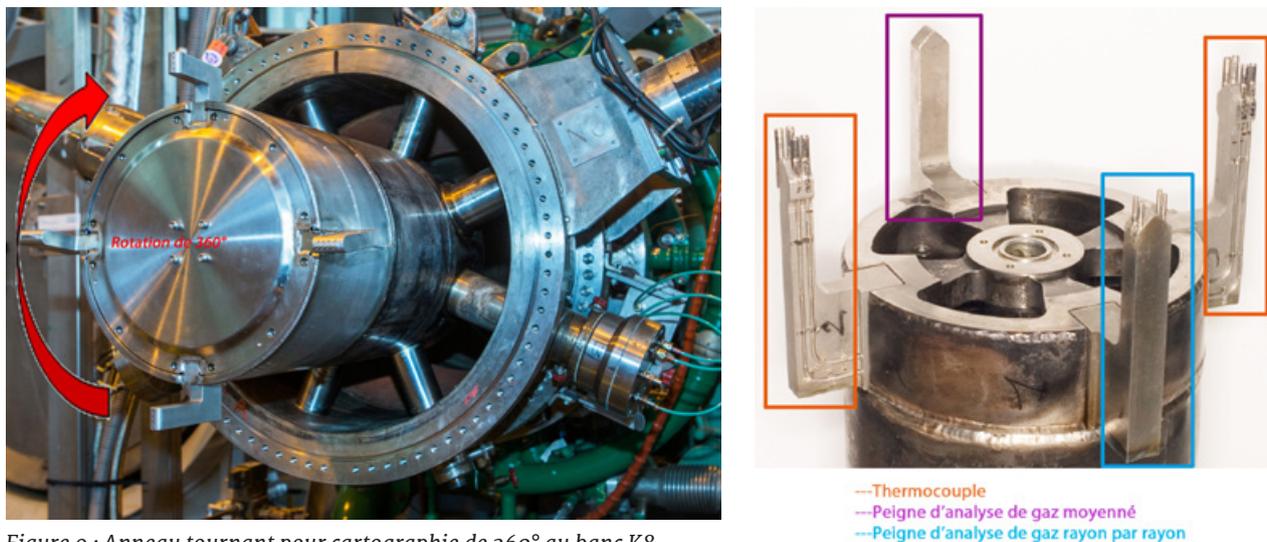


Figure 9 : Anneau tournant pour cartographie de 360° au banc K8

### 3.3. De nombreuses compétences nécessaires

La réalisation des essais nécessite du personnel hautement qualifié dans de nombreux métiers : ouvriers de fabrication (chaudronniers, soudeurs, etc.), mécaniciens aéronautiques, personnel de mesures (dont ceux des laboratoires d'étalonnage accrédités COFRAC), électriciens, automaticiens, informaticiens, directeurs d'essai, managers d'affaires, responsables de la maintenance, personnel du bureau d'études mécaniques (projeteurs, concepteurs, ingénieurs calculs de structures, etc.), experts (aérothermodynamique, combustion, givrage, endommagement, etc.), sans compter les métiers du soutien et du fonctionnement général. Environ 450 personnes sont présentes sur le site de Saclay.

### 3.4. DGA Essais propulseurs présent à chaque étape d'un programme

Les différents essais réalisés à DGA Essais propulseurs permettent d'accompagner les études amont, le développement, la mise au point, la qualification ou certification, et le suivi en service de ces matériels aéronautiques.

Prenons l'exemple du M88, moteur du Rafale. DGA Essais propulseurs a joué un rôle indispensable dans son processus de qualification, comme le montre la Figure 10.

Une fois le moteur qualifié, DGA Essais propulseurs continue d'intervenir dans le cadre du suivi en service. En effet, le moteur est amené à évoluer. Des modifications sont faites pour améliorer ses caractéristiques (durée de vie, performances, maintenabilité, etc.). Il y a également les obsolescences à traiter, ainsi que les dérogations et variations de production. Des essais réguliers de M88 ont donc lieu à DGA Essais propulseurs.

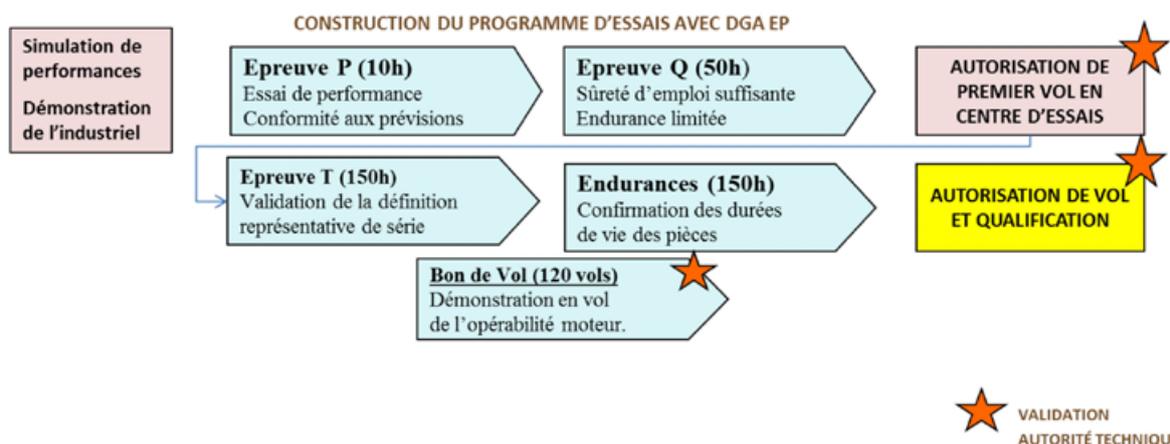


Figure 10 : Rôle de DGA Essais propulseurs dans la qualification du moteur M88

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

### DGA ESSAIS PROPULSEURS, UNE EXPERTISE ET DES MOYENS UNIQUES AU SERVICE DE L'INDUSTRIE AÉRONAUTIQUE

Ils participent :

- au développement de nouvelles versions (optimisation des coûts de soutien),
- à l'évaluation suite à des faits techniques,
- à la validation de solutions de réparation.

DGA Essais propulseurs réalise également des expertises et des investigations sur le M88 (analyse d'incident, suivi d'endommagement).

DGA Essais propulseurs permet ainsi de garantir en toute indépendance la conformité, la cohérence et l'efficacité des matériels présents dans les flottes appartenant à l'état. Sa participation à l'amélioration de la sécurité aérienne et au respect des normes environnementales est essentielle.

#### 4. LES EXPERTS À SACLAY

Une activité complémentaire aux essais est celle des analyses et investigations réalisées après accidents ou incidents aériens, suite aux sollicitations du BEA-É (Bureau Enquêtes Accidents pour la sécurité aéronautique d'Etat) ou des directions de programme, mais également de son équivalent civil le BEA (Bureau Enquêtes Analyse), de la justice, des industriels.

Les systèmes aéropulsifs (moteurs, hélices, boîtes de transmission, etc.) arrivent à la salle de démontage où ils sont démontés. Une première investigation d'ensemble

est menée : suivant les déformations observées, il est possible par exemple de déduire si le moteur était en fonctionnement ou non au moment de l'impact. Des investigations complémentaires sont ensuite réalisées par les laboratoires d'analyse (métallurgique, spectrométrie, physico-chimique). Ces laboratoires contribuent également à la réalisation des prestations d'essais de DGA Essais propulseurs.

Les enregistreurs de vol ("boîtes noires" dans le langage courant) sont dépouillés par le service RESEDA (pour "REStitution des Enregistreurs D'Accidents"). Des moyens informatiques permettent d'extraire des enregistreurs endommagés, les données nécessaires à l'enquête. Ces données sont ensuite analysées.

Le service RESEDA est également habilité à effectuer le contrôle périodique obligatoire des boîtes noires des flottes étatiques.

#### 5. CONCLUSION

L'ensemble de ces moyens et de ces activités font de DGA Essais propulseurs le leader européen pour l'évaluation et l'expertise des systèmes aéropulsifs. Selon Patrick Aufort, directeur de DGA Essais propulseurs de 2015 à 2018 : "DGA Essais propulseurs est bien plus qu'un centre d'essais, c'est la conjugaison de moyens uniques et de compétences exceptionnelles". ■

*Crédits photos : DGA EP*



Figure 11 : Investigations sur un enregistreur de vol

# SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

## L'IMAGERIE ACOUSTIQUE : UNE TECHNIQUE EN CONSTANTE ÉVOLUTION POUR VISUALISER ET IDENTIFIER LES SOURCES DE BRUIT

par Denis Gély, Expert Technique Acoustique (ONERA), Chair of the Aeroacoustics Specialists Committee of the CEAS, membre de la commission Aérodynamique et Renaud Davy, Responsable de la thématique "Expérimentation et métrologie acoustique" (ONERA)

### COMMENT VOIR CE QU'ON ENTEND ?

Depuis les années 60, le bruit émis par les avions a été considérablement réduit grâce aux technologies de plus en plus silencieuses développées pour les moteurs mais aussi pour la cellule, le train d'atterrissage et les voilures hyper-sustentées. Depuis le début des années 2000, la réduction des nuisances sonores autour des aéroports portent également sur les procédures à moindre bruit et les restrictions horaires du trafic mais les avionneurs et les motoristes poursuivent les efforts pour réduire le bruit à la source. Naturellement, la localisation, la caractérisation et la hiérarchisation des sources de bruit les plus bruyantes au niveau de l'avion sont des axes de travail indispensables pour lesquels l'imagerie acoustique apporte de précieuses informations.

Une des premières techniques utilisées consiste à focaliser les ondes acoustiques à l'aide d'un miroir acoustique de forme ellipsoïdale qui agit comme une lentille convergente en optique. La mesure s'effectue alors avec un microphone placé au foyer du miroir mobile qui est orienté mécaniquement vers la zone de bruit. La focalisation améliore le rapport signal sur bruit et le balayage permet d'identifier une direction privilégiée mais cette technique n'est pas très discriminante ni très précise. La méthode à deux capteurs permet, par l'analyse du retard de propagation entre les deux capteurs, de déterminer une direction privilégiée. Ce principe d'analyse "stéréoscopique" est équivalent à celui que notre cerveau utilise pour nous orienter vers une source de bruit que l'on veut localiser avec nos deux oreilles, le pavillon jouant le rôle focalisateur. C'est cet écart de quelques millisecondes perçu par nos tympanes que notre cerveau analyse pour repérer un bruit dans l'espace. Certains animaux, comme le chat, ont des pavillons très focalisant et mobiles de surcroît, ce qui leur permet d'utiliser de manière efficace le principe du miroir précité.

Dans les années 80, les progrès en traitement numérique du signal ont permis de faire émerger les techniques de localisation telle que l'intensimétrie acoustique mais aussi et surtout les réseaux de capteurs. L'intensimétrie est basée sur la mesure de la pression acoustique en deux points. Les équations de l'acoustique linéaire permettent facilement d'obtenir la vitesse acoustique par

calcul à partir de ces deux valeurs de pression. Le produit de ces deux grandeurs pression-vitesse, l'une mesurée et l'autre calculée, conduit à l'intensité acoustique qui est la grandeur vectorielle portant intrinsèquement une direction de propagation et un sens. De nombreux intensimètres ont vu le jour. Ils sont encore commercialisés et utilisés dans certaines branches de l'industrie mais ce sont les techniques de localisation par des antennes multicapteurs focalisées qui sont désormais les plus employées dans le domaine de la recherche aéronautique.

En général, ces réseaux de microphones sont implantés dans une atmosphère au repos. Quand il s'agit de caractériser des sources en présence d'écoulement en soufflerie anéchoïque, les maquettes sont placées dans la veine ouverte alors que l'antenne est située en dehors de l'écoulement. La propagation des ondes se fait donc en champ libre mais à travers une zone de mélange dont les effets sont pris en compte. Des techniques de localisation de sources peuvent également être appliquées dans des souffleries aérodynamiques à veine fermée, pour lesquelles la propagation n'est pas en champ libre. Afin de s'affranchir de la réverbération du son sur les parois, on utilise le pouvoir de séparation de l'antenne qui permet de discriminer les sources réelles et les sources images résultant des échos. Une approche plus précise consiste à intégrer dans le modèle de propagation les effets de réverbération, avec cependant comme inconvénient d'alourdir la charge de calcul pour la localisation des sources acoustiques. En extérieur, les antennes sont déployées au sol ou embarquées à bord des aéronefs. Suivant la situation, un traitement du signal spécifique est développé pour chaque configuration nouvelle. Ainsi, une antenne peut être installée en position fixe pour caractériser des sources elles-mêmes fixes ou mobiles. Elle peut être aussi embarquée à bord des aéronefs qu'il s'agisse d'avions et d'hélicoptères ou même à bord d'un lanceur spatial au décollage, cette "première" ayant été réalisée par l'ONERA lors du vol V503 Ariane 5 au début des années 2000. Pour terminer ce panorama, on peut citer aussi les méthodes holographiques qui consistent à caractériser, par méthode inverse, les propriétés des mécanismes générateurs en utilisant des techniques de rétro-propagation à partir d'un réseau de capteurs entourant une source de bruit.

**CHAQUE TECHNIQUE D'IMAGERIE ASSOCIE UN RESEAU DE CAPTEURS ET UNE METHODE DE TRAITEMENT DES SIGNAUX**

La technique de localisation des sources de bruit à l'aide de réseau de microphones s'est développée à partir du début des années 80 et repose sur un enregistrement synchrone de ces signaux. L'augmentation des capacités d'enregistrement et de numérisation des signaux a permis de mettre en œuvre des réseaux de plusieurs dizaines de capteurs. Cela a permis d'accroître les performances de la localisation et d'autoriser le développement de cette technique pour les essais en vol. Bien entendu, le développement des méthodes de traitement du signal et celui des moyens matériel s'est fait dans le même temps. Aujourd'hui on est capable de traiter des antennes avec plusieurs centaines de microphones.

La méthode la plus couramment employée pour la localisation des sources de bruit est appelée " formation de voies " (BeamForming en anglais). Cette méthode robuste consiste à corriger chaque signal microphonique du temps de propagation estimé à partir d'un point source supposé. La sommation de ces signaux atteint un maximum lorsque ceux-ci sont en phase, ce qui est obtenu pour la position réelle de la source. Cette méthode largement utilisée est applicable en temporel ou dans le domaine fréquentiel pour des sources stationnaires. Sa limitation vient principalement de sa résolution spatiale limitée notamment en basses fréquences et de la présence de lobes secondaires élevés due à la fonction de réponse du réseau à un point source. En hautes fréquences, la limitation est liée à l'espacement entre les microphones qui conditionne le repliement spatial. Comme dans le domaine temporel, il faut respecter un critère de Shannon spatial. Ces deux paramètres, ouverture angulaire et espacement entre microphones, permettent de dimensionner les caractéristiques de l'antenne suivant la nature des sources acoustiques à étudier.

Depuis les années 90, de nouvelles méthodes ont vu le jour pour améliorer les performances du traitement par formation de voies en termes de résolution et de dynamique. Pour caractériser et discriminer les sources avec précision, il s'agit non seulement d'avoir leurs positions mais aussi leurs amplitudes. L'hypothèse couramment employée consiste à représenter les sources par des monopoles décorrélés et spatialement séparés au sens de la réponse du réseau. On peut également citer les travaux de Georges Elias à l'ONERA relatifs à une méthode pour le traitement de réseau en croix (2 axes d'une surface) qui permet d'obtenir des performances équivalentes à celles obtenues avec un réseau maillant toute la surface. Le gain en terme de capteurs est considérable (2n microphones au lieu de  $n^2$ ).

Pour résoudre ce problème inverse (déconvolution) en améliorant la dynamique et la résolution spatiale, les acousticiens ont développé des méthodes avancées de traitement du signal. Ainsi, la méthode CLEAN, mise en place par le NLR, consiste à déterminer la source principale par formation de voies puis à retrancher de la matrice interspectrale des signaux mesurés sa contribution convoluée à la réponse de l'antenne. L'application itérative de ce procédé permet d'estimer l'amplitude des sources de bruit. Une autre approche, entreprise à l'ONERA (SEM) et à la NASA (DAMAS), ne consiste plus à traiter le problème source par source mais à le traiter en tenant compte globalement de toutes les sources possibles, supposées monopolaires. Le problème inverse est alors résolu en minimisant l'écart entre la matrice interspectrale mesurée grâce à l'antenne et celle modélisée en considérant un maillage de sources possibles et en intégrant la fonction de propagation du milieu entre ces sources supposées et la position des microphones. Le système comporte généralement beaucoup plus d'inconnues que d'équations (nombre de microphones) et n'a donc pas une solution unique. Des contraintes sont donc ajoutées pour converger vers la solution physique. Une alternative à ces deux modèles a été proposée par le DLR avec la méthode SODIX dont la résolution est proche de la SEM et qui suppose des sources décorrélées avec une directivité attribuée à chacune d'entre elles. D'autres méthodes ou variantes de celles-ci existent, le lecteur pourra se reporter à la référence [1] pour approfondir le sujet.

Pour accompagner les méthodes et optimiser leur précision, plusieurs géométries d'antenne sont étudiées. Les plus répandues aujourd'hui sont de plusieurs natures : distribution des microphones aléatoire et optimisée en fonction de la configuration à étudier, antennes multibras droits ou courbés comprenant des microphones régulièrement espacés ou espacés suivant une loi géométrique. Sur le plan matériel, il est important de veiller à ce que les différences de phases entre les voies soient très faibles ou parfaitement calibrées. Pour estimer avec précision l'amplitude des sources, le montage des microphones dans la structure de l'antenne doit être particulièrement soigné et les éventuels effets de réflexion et de diffraction sur les supports doivent être traités. Pour les mesures en veine fermée, l'implantation des microphones en ras de paroi fait l'objet d'une attention particulière. Les microphones sont soumis aux fluctuations de pression de la couche limite turbulente qui se développe sur les parois. Par traitement du signal, on peut réduire l'influence de ces composantes hydrodynamiques parasites en ne prenant pas en compte les autospectres de la matrice interspectrale des signaux recueillis. Cette technique, connue sous le nom Diagonal Removal (DR), utilise le fait que ces fluctuations convectives ont des échelles de corrélation

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES L'IMAGERIE ACOUSTIQUE : UNE TECHNIQUE EN CONSTANTE ÉVOLUTION POUR VISUALISER ET IDENTIFIER LES SOURCES DE BRUIT

bien plus petites que celles d'origine acoustique et sont donc filtrées par les interspectres. Pour réduire les fluctuations convectives hydrodynamiques avant l'acquisition des signaux, on peut aussi agir en montant les microphones en retrait d'une membrane acoustiquement transparente mais aérodynamiquement rigide.

### DE NOUVEAUX DÉVELOPPEMENTS POUR MIEUX VOIR CE QU'ON ÉCOUTE

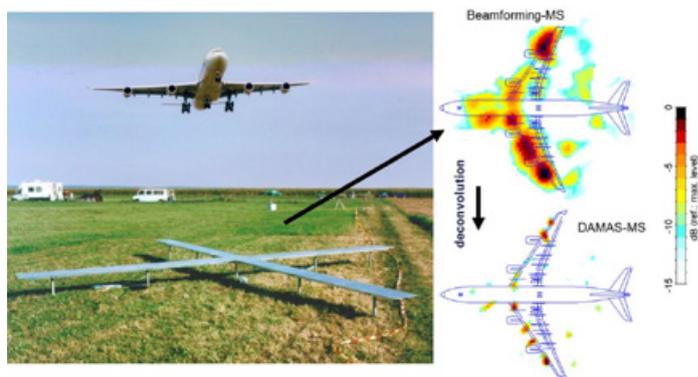
Depuis les années 90, les techniques d'imagerie se sont considérablement développées, tant sur la partie expérimentale mettant en œuvre des dizaines de microphones voire quelques centaines, que sur les méthodes avancées de traitement des signaux. Ces méthodes d'identification de sources acoustiques sont de plus en plus utilisées, que ce soit dans le cadre de recherche amont ou dans un cadre industriel. Ces techniques sont parfois mises en œuvre dans des environnements de propagation très complexes ce qui conduit à développer des méthodes d'analyse novatrices. Elles ne permettent pas une compréhension complète des mécanismes générateurs mais les progrès réalisés depuis une décennie confèrent à ces outils de diagnostic un rôle de plus en plus prépondérant dans les approches expérimentales utilisées par les aéroacousticiens. A l'avenir, les progrès porteront certainement sur les modèles de sources et sur les modèles de propagation des ondes associées. La partie instrumentation de l'antenne elle-même verra probablement de nouvelles formes de réseaux de capteurs, ces derniers faisant l'objet aussi de développements adaptés à la configuration d'utilisation, surtout en présence d'écoulement. On peut aussi s'attendre à des gains importants en termes de temps de restitution grâce à la performance croissante des algorithmes de résolution. Ainsi, la prochaine décennie verra certainement l'avènement d'antennes plus résolutes spatialement et adaptées à la caractérisation de sources acoustiques complexes dans un domaine à trois dimensions.

[1] A Review of Acoustic Imaging Methods Using Phased Microphone Arrays. Part of the "Aircraft Noise Generation and Assessment" CEAS Aeronautical Journal, Special Issue (To be published)

Les auteurs remercient Georges Elias et Sandrine Fauqueux pour leurs remarques. ■



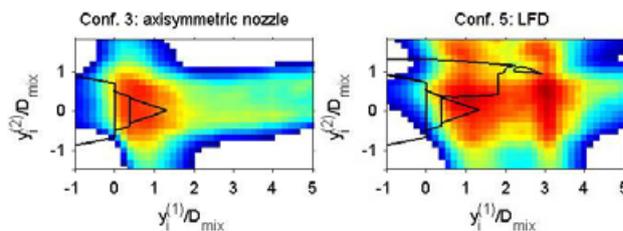
Antenne 2D composée de 10 bras et de 115 microphones, installée dans la soufflerie anéchoïque CEPRA19 de l'ONERA



Antenne 2D en croix équipée de 120 microphones pour la localisation des sources de bruit d'un avion en vol



Exemple de localisation de sources acoustiques d'un moteur installé sous aile.



Comparaison moteur isolé et moteur installé

# SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

## PRIX 3AF " EXCELLENCE SCIENTIFIQUE " 2018 : LES ATOMES FROIDS

par Alexandre BRESSON, Yannick BIDEL, Nassim ZAHZAM (ONERA)

*L'ONERA s'est engagé intensément, depuis maintenant une quinzaine d'années, dans le développement de senseurs inertiels atomiques permettant d'exploiter le grand potentiel métrologique issu de l'utilisation de l'interférométrie atomique et des atomes refroidis par lasers. Depuis 2016, plusieurs pas très importants ont été franchis, en démontrant le caractère opérationnel de cette technologie dans des environnements représentatifs d'applications aéronautiques et spatiales.*

*Ces recherches ont été récompensées par la 3AF qui a décerné à l'équipe de l'ONERA le prix " Excellence scientifique " 2018. Le dossier était soutenu par Bruno Chanetz, membre émérite 3AF.*

*Gravimétrie et Inertie atomique : ...  
Une girafe se jette à l'eau et puis s'envole !...*

### INTRODUCTION

Depuis les années 1980 et les premières démonstrations de refroidissement atomique à l'aide de laser, de nombreuses expériences scientifiques ont permis de jeter les bases de l'optique atomique et d'explorer son fort potentiel tant pour la physique fondamentale, que pour les applications métrologiques. Cette technologie est dite quantique car elle exploite le caractère ondulatoire de la matière et repose sur des concepts scientifiques récents (prix Nobel de 1997 de C. Cohen-Tannoudji, W. Phillips et S. Chu). Elle devrait surtout conduire à une rupture majeure dans le domaine de l'inertie aéronautique et spatiale avec des capteurs inertiels 'absolus' ayant une exactitude excellente et une absence totale de dérive. Ces propriétés sont d'une énorme importance pour la réalisation de systèmes de navigation autonomes de très haute performance, pour la mise au point de charges utiles spécifiques (gravimètre, gradiomètre, magnétomètre, horloge, etc.), mais également pour tester toujours plus précisément les lois de la physique fondamentale.

### DE L'HORLOGE À L'INERTIE, IL N'Y A QU'UN PAS

Les horloges atomiques sont bien connues pour être 'les' références ultimes et stables du temps. En effet, on arrive dans ces dispositifs à accorder la fréquence d'un oscillateur micro-onde (comme le quartz de nos montres) avec la vibration interne d'un groupe d'atomes alcalins (Césium ou Rubidium), d'un atome unique (Strontium), d'atomes piégés (Ytterbium) ou même d'un ion (Calcium). Aujourd'hui, la définition primaire de la seconde est liée depuis 1967 à la fréquence d'une transition particulière du Césium. Après des perfectionnements incessants depuis

les années 1970, pour les Global Navigation Satellite System (GNSS) et le positionnement notamment, ou les besoins industriels en datation, on est capable de concevoir et construire des horloges extrêmement précises et stables (1 s sur 15 milliards d'années) et de prévoir même leurs utilisations dans l'espace pour réaliser des tests fins de physique fondamentale (PHARAO et ACES par exemple). Mais l'histoire de l'utilisation des atomes pour la métrologie ne s'arrête pas là, bien au contraire, les atomes grâce à leur masse (par opposition au photon qui en est dénué) sont également d'excellents candidats pour servir d'étalons dans des instruments inertiels (c'est à dire accéléromètre ou gyromètre). Beaucoup plus précis que ceux de nos téléphones portables, ces capteurs permettent de se positionner, de naviguer ou d'étudier la terre dans sa structure interne et son évolution dans le temps (par exemple mission spatiale de géodésie GRACE FO, GOCE). Des domaines aussi variés que la défense, la géophysique ou la prospection minière et pétrolière sont également très friands de ces senseurs. Dans tous ces domaines, les industriels français (Thales, Safran, iXblue, etc.) ont d'ailleurs toujours tenu la distance face à la concurrence quant à la qualité de leurs innovations et de leurs produits en la matière.

### JOUER AVEC LES ONDES DE MATIÈRE, UN PEU D'HISTOIRE ....

Les interférences lumineuses sont aujourd'hui bien connues et peuvent s'expliquer simplement par le fait que la lumière est une onde (les expériences des fentes d'Young datent de 1801). Deux ondes (lumineuses) se mélangeant, s'additionnent et peuvent donner naissance à des figures d'interférence qui présentent des zones sombres (lumière + lumière = pas de lumière !), comme deux systèmes de ride qui se combinent à la surface d'un lac. Après plus de 200 ans, l'interférométrie optique est aujourd'hui une technique largement connue, comprise, diffusée et utilisée dans les laboratoires mais également dans des systèmes industriels (mesure de distance, de déformation, etc.). Réaliser la même chose avec la matière heurte davantage le sens commun, même si cette notion remonte à Louis de Broglie (1924) qui propose une conception ondulatoire de la matière (cette approche servira à construire la mécanique quantique au début du 20ème siècle). Les démonstrations expérimentales tombent ensuite à un rythme régulier : diffraction d'électrons sur du Nickel (1927), le premier interféromètre à électrons dans les années cinquante, puis avec des neutrons (1974). D'ailleurs un premier 'gravimètre' à neutrons est testé dès 1975 (expérience COW=Colella, Overhauser, Werner). L'idée a été ensuite de faire la même

chose avec des atomes, plus simples à manipuler et qui bénéficient, par rapport aux électrons, d'une neutralité électrique. Mais pour maîtriser cela expérimentalement, il a été nécessaire d'attendre les progrès dans les lasers et la manipulation d'atomes par laser. Tout est enfin réuni à la fin des années 80 pour assister aux premières propositions simultanées de Christian Bordé [1] et de John Clauser [2], et ensuite aux prémices de réalisations expérimentales durant les années 1990.

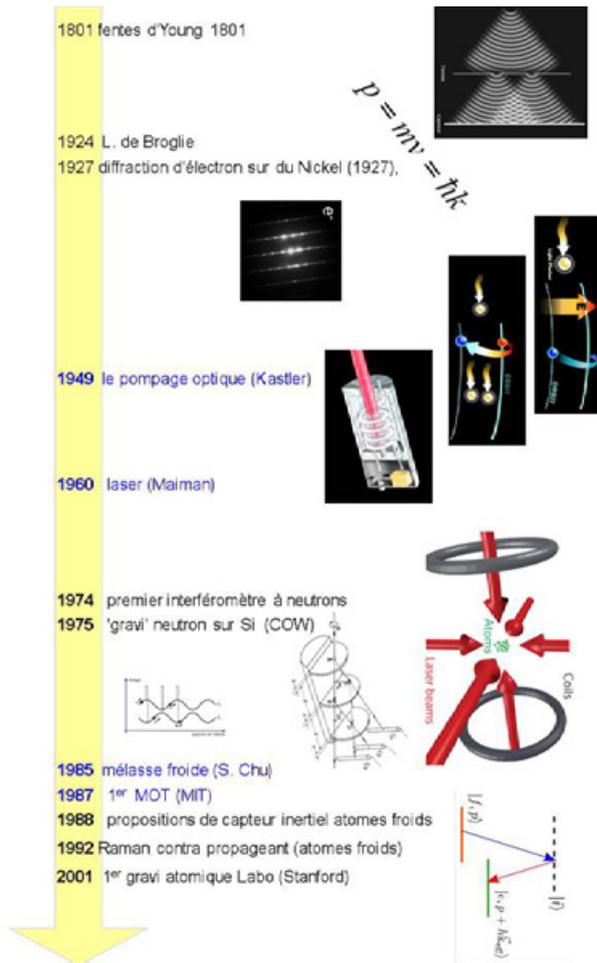


Figure 1 : Illustration représentant l'histoire des avancées scientifiques majeures ayant mené à la réalisation d'un gravimètre atomique.

### REFROIDIR DES ATOMES AVEC DES LASERS

Avant de réaliser des interférences entre atomes, il convient de réunir un échantillon de matière suffisamment uniforme (cohérent) et observable sur un temps suffisamment long. Pour cela, il est nécessaire de refroidir les atomes à des températures de l'ordre du micro-Kelvin. L'effet de pression de radiation est utilisé : il s'agit de la force exercée par un faisceau lumineux éclairant un atome et accordé sur une transition atomique. L'atome éclairé est alors " poussé " dans la direction de propagation de la lumière. Grâce à l'effet Doppler, on peut s'arranger

pour que seuls des faisceaux lasers se propageant en direction opposée à celle des atomes entrent en résonance et subissent alors la pression de radiation qui les force à ralentir. En plaçant des faisceaux dans toutes les directions de l'espace, il est alors possible de diminuer la dispersion en vitesse des atomes, c'est-à-dire de les refroidir d'après la théorie cinétique des gaz. En plus de refroidir les atomes, il est possible de les confiner au centre du dispositif, en rajoutant des bobines de champ magnétique (par effet Zeeman, les atomes qui ne sont pas au centre du piège se trouvent en résonance avec le faisceau laser ce qui les ramène au centre du piège, toujours par pression de radiation).

Le dispositif global, imaginé dans les années 1980 [3] et comprenant les faisceaux lasers ainsi que les bobines de champ magnétique, est appelé piège magnéto-optique (PMO) et est représenté sur la figure 2. Il permet typiquement de confiner 1 milliard d'atomes à 10  $\mu$ K. La source atomique a alors la cohérence nécessaire à la réalisation de l'interféromètre.

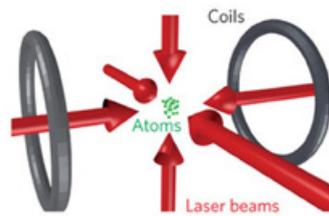


Figure 2 : Schéma illustrant le principe d'un piège magnéto-optique.

### INTERFÉROMÈTRES ATOMIQUES

Un interféromètre atomique simple est l'équivalent en optique d'un interféromètre de Mach-Zehnder, c'est-à-dire composé d'une lame séparatrice, de deux miroirs, et d'une seconde lame séparatrice. Mais ici le rôle des différentes lames n'est pas assuré par des éléments solides mais par trois impulsions laser qui permettent successivement de séparer spatialement les atomes, de défléchir leur trajectoire afin qu'ils se rapprochent, et enfin de les recombiner pour qu'ils interfèrent.

Tout comme en optique, le déphasage en sortie de l'interféromètre atomique est proportionnel à la différence entre les chemins possibles des atomes (chemin n°1 et n°2 sur la figure 3). Dans le cas d'une géométrie parfaite, c'est-à-dire pour des atomes qui évoluent en chute libre après la phase de PMO, on peut montrer que le déphasage est alors proportionnel à l'accélération des atomes par rapport à la base de l'instrument. Ainsi, la mesure du déphasage en sortie de l'interféromètre va permettre de remonter à la mesure accélérométrique. Pour une configuration verticale, on obtient par exemple un instrument sensible également à la pesanteur terrestre : c'est-à-dire un gravimètre.

Pour en faire un gyromètre, il suffit de conférer aux atomes une vitesse initiale très bien connue et l'accélération de Coriolis est alors mesurable pour remonter à la vitesse de rotation.

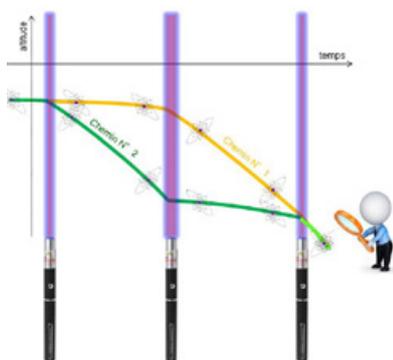


Figure 3 : Schéma interférométrique du gravimètre atomique.

### DU LABORATOIRE AU GRAVIMÈTRE EMBARQUABLE

Les laboratoires travaillant principalement dans le domaine de la physique fondamentale se sont alors lancés à l'assaut de cette méthode de mesure et ont su relever les premiers défis pour démontrer que l'idée un peu folle de départ fonctionne... mais au prix d'un système expérimental très complexe et trop volumineux pour être utilisé dans un contexte opérationnel. Les perspectives restent néanmoins intéressantes et les premiers résultats en laboratoire dans les années 2000 sont déjà très compétitifs [4] avec les meilleurs technologies de l'époque. L'ONERA se focalise alors sur l'emploi de ces dispositifs pour répondre à des besoins embarqués pour des domaines applicatifs marins, aéronautiques et spatiaux. Plusieurs prototypes de gravimètres sont développés et perfectionnés avec l'aide de la DGA et du CNES :

GIRAFON (Gravimètre Interférométrique de Recherche à Atomes Froids de l'ONERA), puis

GIRAFE 1 (Gravimètre Interférométrique de Recherche à Atomes Froids Embarquable) et enfin sa version 2.

Le but n'est pas de rivaliser avec les meilleures expérimentations de laboratoire, mais bien de faire un prototype pouvant être embarqué en n'utilisant que des technologies compatibles avec un environnement opérationnel tout en conservant de très bonnes performances pour les applications ciblées. L'objectif est bien de pouvoir mesurer la pesanteur terrestre avec des niveaux de précision de  $10^{-8}$ , c'est-à-dire 7 chiffres derrière la virgule du  $9,8... m/s^2$ .



Figure 4 : prototypes développés à l'ONERA (à gauche GIRAFON, au centre GIRAFE, et à droite GIRAFE 2)

### DES CAMPAGNES DE TESTS À L'OPÉRATIONNEL

Le projet GIRAFE 2 a été réalisé en collaboration étroite avec le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine), et il a permis de franchir une étape très importante pour valider le potentiel de l'interférométrie atomique pour les applications embarquées. Nous avons pu en effet réaliser la première démonstration mondiale de mesure de gravité à bord d'un porteur mobile (BHO Beautemps-Beaupré) qui a conduit à la réalisation de cartes de pesanteur. Les mesures obtenues avec GIRAFE 2 ont été comparées à celles du gravimètre marin du SHOM et ont démontré de meilleures performances [5]. Et surtout, le caractère absolu des mesures obtenues avec l'instrument atomique permet également de simplifier le protocole de mesure établi aujourd'hui et de réduire significativement la durée d'une campagne de cartographie en s'affranchissant des périodes de calibration. L'utilisation d'un capteur absolu permet d'éliminer les erreurs liées aux incertitudes de calibration des gravimètres relatifs embarqués jusqu'à présent. Cette démonstration a clairement ouvert la voie à la gravimétrie absolue marine.

Toujours dans ce contexte de gravimétrie embarquée, l'ONERA collabore depuis peu avec l'Université Technique du Danemark (DTU) dans le but de tester le gravimètre GIRAFE 2 à bord d'un avion. La première campagne de mesure a été effectuée en avril 2017 pour le compte

de l'ESA dans le but de cartographier le volcan-glacier Vatnajökull islandais. Il s'agit en effet d'une zone particulièrement intéressante pour l'étude de la fonte des glaces, du réchauffement climatique et des activités volcaniques. La validation du prototype en mode aéroporté constitue en soi une première pour un instrument quantique de ce type. De plus, les résultats obtenus ont été de grande qualité et permettent d'envisager d'autres applications telles que la prospection minière et pétrolière, l'étude du sous-sol, l'archéologie, le suivi de nappes phréatiques, etc.



Figure 5-1 : BHO Beautemps-Beaupré du SHOM



Figure 5-2 : Monoplan DHC-6 Twin Otter de Norlandair

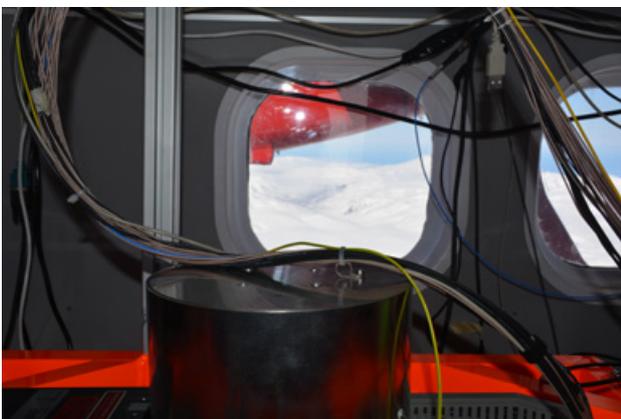


Figure 5-3 : GIRAPE 2 à bord de cet avion survolant le Vatnajökull.

## CONCLUSIONS

Très récemment, un pas important vient d'être franchi à l'ONERA en démontrant le caractère opérationnel de la technologie atomique dans des environnements marins et aéronautiques. Le prototype GIRAPE2 s'est illustré au niveau international en démontrant avec succès l'utilisation d'un gravimètre atomique lors de deux campagnes d'essais : l'une marine en Atlantique, en partenariat avec le SHOM (2016), et l'autre aéroportée en Islande en partenariat avec DTU et pour le compte de l'ESA (2017). Cette double démonstration a ouvert clairement la voie aux réelles applications utilisant des atomes refroidis par laser, et surprend quant à la rapidité avec laquelle aujourd'hui des concepts aussi fondamentaux s'appliquent en un temps record pour des mesures appliquées. La performance a été au rendez-vous avec l'obtention de cartes de pesanteur d'une exactitude et d'une sensibilité jamais obtenues en conditions opérationnelles. Et de plus, le potentiel de performance est encore immense.

L'obtention de ces résultats scientifiques et techniques remarquables alliant concepts quantiques fondamentaux et applications métrologiques opérationnelles place ainsi la France en très bonne position pour répondre aux enjeux de demain à l'aide de cette technologie de rupture.

Dans l'avenir, l'ONERA a en ligne de mire des capteurs spatiaux pour des applications plus sociétales reposant sur les futures missions de géodésie spatiale qui permettraient d'accroître la connaissance de la Terre et de son évolution dans un contexte climatique changeant.

## Remerciements :

- SHOM, DGA, CNES, ESA, ...
- 3AF pour la remise récente du prix 'Excellence scientifique' 2018

## Références :

- [1] Ch.J.Bordé, *Atomic interferometry with internal state labelling*, *Physics Letters*, A140, 10-12 (1989)
- [2] J. F. Clauser, *Ultra-high sensitivity accelerometers and gyroscopes using neutral atom matter-wave interferometry*, *Physica B*, 151, 262 (1988)
- [3] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1997/summary/>
- [4] Peters, A., Yeow Chung, K. & Chu, S. *Measurement of gravitational acceleration by dropping atoms*, *Nature* 400, 849-852 (1999).
- [5] Y. Bidel, N. Zahzam, C. Blanchard, A. Bonnin, M. Cadoret, A. Bresson, D. Rouxel & M.F. Lequentrec-Lalancette, *Nature Communications* 9 :627 (2018). ■



Odile Tissier est Directrice Adjointe des Etudes, en charge du cycle Master de l'EPF et Responsable de la Majeure "Aéronautique & Espace"

## FORMATION ET CARRIÈRES

# EPF ÉCOLE D'INGÉNIEURS-E-S

## LA MAJEURE AÉRONAUTIQUE & ESPACE

### INTERVIEW D'ODILE TISSIER

par Jean-Pierre Sanfourche, Chargé de Mission à l'Association Aéronautique et Astronautique de France

#### L'EPF, LA GRANDE ECOLE D'INGÉNIEURS GENERALISTES

Depuis 1925, l'EPF (ex - École Polytechnique Féminine) forme des ingénieurs généralistes. Actuellement ses 2000 étudiants (dont 35% de filles) suivent le même cursus pendant 3 ans sur l'un de ses 3 campus à Sceaux, Troyes et Montpellier. Avant de choisir une spécialisation parmi les 7 " MAJEURES " qu'elle offre : Aéronautique & Espace, Structures & Matériaux, Ingénierie & Numérique, Engineering & Management, Ingénierie & Santé, Energie & Environnement, Bâtiment & Eco-Cités.

Chacune des MAJEURES est un Cycle Master " 2 ans " qui intervient après le Cycle Licence " 3 ans " le tronçon commun destiné à l'acquisition d'un solide socle scientifique, polytechnique et technologique. La 1<sup>ère</sup> année de la Majeure est la 4<sup>ème</sup> année d'EPF (4A), la 2<sup>ème</sup> année de la Majeure est la 5<sup>ème</sup> année d'EPF (5A).

#### CAMPUS PARISIEN À SCEAUX

3 bis rue Lakanal  
92330 Sceaux  
Tél.: 01 41 13 01 51

#### CAMPUS DE TROYES

2 rue F. Sastre  
10430 Rosières-près-Troyes  
Tél. : 03 25 70 77 19

#### CAMPUS DE MONTPELLIER

21 boulevard Berthelot  
34000 Montpellier  
Tél.: 04 99 65 41 81

**Jean-Pierre Sanfourche : Quels sont les critères de sélection en fin de 3<sup>ème</sup> année d'EPF pour être admis dans la Majeure " AERONAUTIQUE & ESPACE " ?**

Odile Tissier - Je précise tout de suite que la Majeure AERONAUTIQUE & ESPACE n'est organisée que sur le site EPF de Sceaux. L'objectif pédagogique de la Majeure A&E est de former des ingénieurs généralistes aux solides compétences dans l'aéronautique et le spatial, associées à une compétence forte en ingénierie " système ". Avec une approche " système " en fil conducteur, je fais en sorte de favoriser l'acquisition de compétences larges sur l'ensemble des problématiques liées à la conception d'un véhicule aérien ou spatial.

Les étudiants sélectionnés pour la Majeure A&E sont issus de deux filières :

- Les élèves EPF qui ont réussi les épreuves de fin de troisième année entrent en 1<sup>re</sup> année de Majeure AE (4<sup>ème</sup> année EPF) ;
- Les étudiants ayant intégré l'EPF en 4<sup>ème</sup> année à l'issue d'un diplôme de bachelor ou d'une première année de maîtrise scientifique.

**JPS : Quelle est la tendance d'évolution du ratio filles/garçons dans l'EPF, et plus particulièrement dans la Majeure A&E ?**

OT - Ce ratio se situe de façon assez stable à 35% pour l'EPF Ecole d'Ingénieurs, à comparer au ratio de la moyenne nationale qui est de l'ordre de 25% en école d'ingénieurs. En ce qui concerne plus précisément la Majeure A&E les pourcentages de filles sont de 29,5% (P2018), de 18% (P2019) et de 30% pour la P2020 (promotion entrante en Aéronautique & Espace).

**JPS : Tous les élèves de la Majeure A&E suivent-ils le même cursus ou bien existe-t-il des options différentes en fonction des spécialisations souhaitées in fine ?**

OT - La Majeure AERONAUTIQUE & ESPACE s'étend sur deux années universitaires et s'articule autour de deux semestres académiques, encadrés par deux semestres de stage : un stage " élève-ingénieur en première année A&E, et un stage " projet de fin d'étude " en deuxième année A&E.



#### **Campus de Sceaux**

Situé à 20 min du cœur de Paris, en direction du sud, le campus de Sceaux, qui accueille près de 1 200 élèves, bénéficie d'un environnement verdoyant privilégié à 100 mètres du Parc de Sceaux. Facile d'accès (RER B - Bourg la reine), il se compose de 3 sites à proximité les uns des autres. Une partie des activités d'enseignement sont dispensées à l'École Normale Supérieure de Cachan.

En 1<sup>ère</sup> année A&E, tous les élèves suivent le même tronc commun. [ voir Encadré 1 : UE OBLIGATOIRES – 4<sup>ème</sup> année page 41]

En 2<sup>ème</sup> année A&E, outre un tronc commun, le choix est offert entre 3 " Parcours Métier " :

- Etude/ Conception ;
- Production/Industrialisation ;
- Exploitation/Maintenance.

Le parcours " Métier " se déroule sur le semestre de la 2<sup>ème</sup> année A&E. [voir Encadré 2 : UE OBLIGATOIRES – 5<sup>ème</sup> année, page 41]

*Nota : ECTS : European Credits Transfer System*

**JPS : Innovation est aujourd'hui un mot-clé !  
Comment développez-vous l'esprit d'innovation chez vos élèves ?**

OT - C'est dans la conduite de projets – une partie capitale de notre enseignement – que nous développons cet esprit d'innovation. Au début d'un projet, nous demandons aux étudiants de passer par une étape d'architecture fonctionnelle avant de définir une architecture physique. Cette phase fait intervenir une véritable démarche d'innovation et permet de comparer différentes solutions d'architecture.

Dès la 1<sup>ère</sup> année A&E, les élèves conduisent un projet de conception, non seulement au plan technique, mais aussi au plan financier. Un budget leur est alloué, qu'ils

doivent gérer avec rigueur.

En 2<sup>ème</sup> année A&E, les élèves sont organisés en équipes " projet ". Pour illustrer mon propos, voici quelques exemples de sujets : Avant-projet d'un avion d'affaires; Avant-Projet d'un lanceur spatial ; Avant-projet de création d'une Compagnie Aérienne. Ces projets sont managés dans un esprit de compétition : pour ce faire 5 équipes concourent sur un même thème. A la fin ces projets donnent lieu à une revue de recette.

Une initiative importante au niveau de l'EPF : le Challenge Innovation Handicap (24H'Innov Handicap) " ACTION ". Il s'agit d'innover au service du handicap quel qu'il soit : handicapés moteurs, handicapés mentaux,.... Les élèves sont répartis en groupes de travail et sont astreints à travailler sans interruption pendant 24 heures d'affilée (sans dormir) pour in fine être en mesure de proposer une solution INNOVANTE : c'est effectivement un véritable challenge !

Et puis il n'y a pas que l'esprit d'innovation scientifique et technique, il y a aussi l'esprit d'innovation entrepreneuriale. Les élèves ayant le goût de la création d'entreprise ont la possibilité de suivre en 2<sup>ème</sup> année de Majeure un Master of Science " Innovation Création Entrepreneuriat " sur le site EPF de Troyes. Par ailleurs, certains de nos étudiants peuvent bénéficier du statut d'Etudiant-Entrepreneur s'ils sont déjà en cours de création d'entreprise.

**JPS : Quid des drones, dont les développements sont exponentiels ?**

OT - Le drone est à l'évidence le véhicule aérien idéal pour l'enseignement aérospatial. Votre question tombe à point nommé parce que nous avons mis en place depuis cinq ans un projet drone. Ce projet permet d'illustrer et de mettre en pratique d'ingénierie systèmes. Celui-ci se déroule sur deux ans :

- en 1<sup>ère</sup> année A&E : démarche d'Etude et de Conception ;
- en 2<sup>ème</sup> année A&E : démarche d'Intégration, Fabrication et Vol.

Le projet est conçu de telle sorte qu'il place l'élève en situation de concurrence " client ".

**JPS : Comment votre enseignement prend-il en compte les différents aspects de la révolution numérique, de l'Intelligence Artificielle (IA) ?**

OT - Tous ces aspects sont de mieux en mieux pris en compte au fur et à mesure de l'évolution de nos cours, qui, dispensés par des ingénieurs en activité dans l'industrie, traitent forcément des avancées engendrées par la digita-

lisation. Par ailleurs nous introduisons pour l'ensemble des élèves un E-Portfolio, conçu comme un outil de capitalisation de ce qu'ils ont appris durant leur parcours élève ingénieur. L'IA est de plus en plus intégrée dans l'ensemble du cursus EPF.

**JPS : Quelle est la proportion de cours dispensés en langue anglaise ?**

OT – En première année de la Majeure A&E, plus de 50% des cours sont donnés en Anglais. Deux groupes sont constitués : l'un pour lequel les cours sont dispensés en Français, l'autre pour les cours dispensés en Anglais. Certaines majeures de l'EPF offrent des cursus entièrement en Anglais.

Cette évolution vers le tout Anglais est-elle facile ? Certainement pas, car si l'aptitude de nos ingénieurs à s'exprimer en Anglais s'améliore de plus en plus, elle est encore loin d'être tout à fait satisfaisante ... Mais il est bien évident que nous devons poursuivre cette évolution avec détermination.

**JPS : Concernant les relations avec les autres écoles aéronautiques et spatiales, prévoyez-vous d'entrer dans le Groupe ISAE (SUPAERO, ENSMA, ESTACA, École de l'air) ?**

OT – Non, du moins pas pour l'instant.

**JPS : Comment votre corps professoral est-il composé ?**

OT – Nous avons très peu de professeurs exerçant à plein temps à l'EPF au niveau du cycle Master. Notre enseignement est dispensé essentiellement par des ingénieurs vacataires recrutés au sein des sociétés industrielles. L'accélération des progrès technologiques d'une part et d'autre part notre souhait de délivrer un enseignement pratique préparant à l'entrée dans la vie active, imposent cette disposition.

Le recrutement de ces professeurs est une tâche délicate à laquelle je consacre une grande partie de mon temps. Ma méthode est fondée sur le développement de relations personnelles, de contacts directs avec les experts du monde industriel. Le maintien de relations de confiance est évidemment de la plus haute importance. Ces ingénieurs que je choisis ayant le goût – voire la passion – de la pédagogie, les choses se passent très bien en général. Et les stages de nos élèves en entreprise me donnent l'occasion d'enrichir régulièrement mon réseau de relations.

**JPS : Dans la promotion sortie en juin 2018, quel était le ratio Espace/Aéronautique d'une part, et d'autre part le ratio Recherche amont/ activité industrielle (manufacturing – exploitation) ?**

OT – L'EPF est une école généraliste, et la majeure Espace/Aéronautique est l'une des sept majeures proposées aux étudiants. Parmi les derniers diplômés, 14% avaient suivi la formation Aéronautique/Espace – Activité industrielle en très grande majorité.

**JPS : Pouvez-vous nous dire quelques mots sur les activités extra scolaires ?**

OT – La plus importante d'entre elles est la formation au pilotage : les élèves de la Majeure " Aéronautique & Espace " peuvent accéder s'ils le souhaitent à une formation adaptée aux 14 certificats théoriques de l'ATPL (Airline Transport Pilot Licence). Ceci se fait dans le cadre d'un partenariat que nous avons conclu avec AéroPyrénées.

Je dois aussi mentionner l'activité Aéromodélisme et l'activité Astronomie, et bien sûr l'ensemble des autres associations de l'EPF.

**JPS : Puis-je pour conclure notre entretien vous poser la question suivante : quels sont vos trois axes d'effort prioritaires pour l'année 2019 ?**

OT – J'ai beaucoup de projets en chantier, mais les trois axes d'effort que je considère comme prioritaires sont relatifs à une meilleure prise en compte de :

1. La transition électrique : développer l'enseignement relatif à la thématique " vers l'avion plus électrique " ;
2. La transition digitale : développer l'enseignement de toutes les évolutions et ruptures technologiques issues de la révolution numérique : les IoT, l'impression 3D : l'Additive Layer Manufacturing (ALM), la révolution digitale et l'usine du futur, la révolution digitale et la maintenance, etc.
3. L'évolution du transport aérien : développer l'enseignement relatif à la gestion du trafic aérien, à la sécurité et la sûreté, aux aéroports, aux compagnies aériennes, à l'évolution des usages, etc.

Cela nécessite d'être en contact permanent avec les instituts de recherche et les sociétés industrielles pour conduire l'évolution de notre enseignement au rythme effréné des progrès technologiques. C'est ce souci que je place au cœur de mon action.

## UE OBLIGATOIRES - 4ÈME ANNÉE

UNITÉS D'ENSEIGNEMENT	
Connaissances générales   64 h   5 ECTS	
Droit du travail Business Game Statistiques pour l'ingénieur Anglais	Connaître et savoir utiliser à bon escient les outils de base indispensables aux responsabilités de l'ingénieur.
Approche Système   64 h   5 ECTS	
Management de Projet Ingénierie systèmes complexes Ingénierie systèmes appliquée Analyse de Cycle de Vie (PLM) Sûreté de Fonctionnement	Maîtriser et savoir mettre en œuvre une approche système. Comprendre la démarche de conception d'un avion ou d'un lanceur.
Systèmes aéronautiques et spatiaux   64 h   5 ECTS	
Initiation à l'aéronautique Initiation au spatial Système hélicoptère Système satellite	Connaître et comprendre les enjeux de l'aéronautique et du spatial.
Mécanique appliquée   64 h   5 ECTS	
Mécanique spatiale Mécanique du vol Aérodynamique fondamentale	Savoir appréhender les performances d'un avion ou d'un lanceur.
Modélisation Structures & Matériaux   64 h   5 ECTS	
Dimensionnement de structures par la MEF Dynamique des structures Matériaux composites	Savoir analyser le comportement d'une structure en statique et en dynamique en vue de la dimensionner. Savoir pré-dimensionner une structure en matériau composite.
Projet ingénierie système (drone)   150 h   5 ECTS	

## UE OBLIGATOIRES - 5ÈME ANNÉE

UNITÉS D'ENSEIGNEMENT	
Conception Systèmes I   64 h   5 ECTS	
Assurance/Financement projets spatiaux et aéronautiques Servitudes de bord Commandes de vol (CdV) Compléments de commande Avionique Guidage-Navigation-Contrôle (GNC)	Connaître les systèmes de commande, les systèmes de servitudes.
Energie à bord   64 h   5 ECTS	
Système Electrique avion - lanceur - satellite Propulsion électrique - spatiale - aéronautique	Savoir analyser et définir les systèmes d'énergie à bord.
Projet ingénierie système (drone)   64 h   5 ECTS	
Projet   150 h   5 ECTS	

# L'OBSERVATOIRE OUVERT DU NUMÉRIQUE DE LA 3AF

par Alain Wagner, Vice-Président de la 3AF

Nous vivons tous les jours les effets du numérique sur la conception, la production et l'exploitation des systèmes aéronautiques et spatiaux ainsi que sur l'offre de services. De ce fait, clients, fournisseurs, et modèles d'affaires se transforment en profondeur.

Le développement des technologies de l'information poursuit son accélération et foisonne comme en témoignent les mots big data, cloud, analytics, intelligence artificielle, deep learning, blockchains, Internet of things qui n'ont guère d'équivalent trivial en français. Le rapport Villani « donner un sens à l'intelligence artificielle » rendu public en mars 2018 a été plébiscité. Il pousse la France à prendre ce sujet à bras le corps.

L'industrie aéronautique et spatiale s'est mobilisée et elle doit à la fois bénéficier de la transversalité en profitant de la recherche amont et de ce qui est mis en œuvre dans d'autres secteurs. Elle doit aussi développer des solutions répondant à ses problèmes spécifiques de sécurité et d'embarquabilité. Pour n'en citer que quelques-uns :

- Le deep learning (apprentissage en profondeur) produit des résultats impressionnants qui accroissent la productivité des entreprises. Toutefois, les outils employés sont généralement des boîtes noires (réseaux de neurones, algorithmes génétiques, etc.). Pour des applications pouvant mettre des vies en péril, ces boîtes noires ne sont pas satisfaisantes car elles ne peuvent être certifiées au sens aéronautique du terme. L'intelligence artificielle explicable constitue la prochaine étape : elle doit permettre à un humain de comprendre comment elle fonctionne ce qui permettrait de répondre à des problématiques de sécurité et de confiance spécifiques au secteur aérospatial. En la matière, la DARPA a lancé en 2017 un ambitieux programme baptisé XAI (Explainable Artificial Intelligence).

- Des clouds stockent les données issues des avions et des satellites (par exemple, avec les seuls satellites Sentinelle ; vous avez avec accès à quelques 10 pétaoctets (pétaoctets) de données par an). Ces données ne peuvent pas être traitées par des analystes humains. Il est donc nécessaire d'en traiter une grande partie grâce à des analytics qui fonctionnent sur le cloud au plus près de la donnée. Cela pose évidemment la question des clouds souverains et de clouds privés sécurisés afin d'assurer la confidentialité et l'intégrité des données et des informations échangées.
- Les blockchains, qui sont connues grâce au crypto monnaies, permettent de sécuriser des transactions sans tiers de confiance. Elles pourraient révolutionner la gestion des échanges au sein de la filière et, par exemple, permettre de streamer des plans pour produire des pièces sur des imprimantes 3D certifiées dans des centres de maintenance.

La 3AF sous l'impulsion de son président a créé l'Observatoire Ouvert du Numérique avec les objectifs suivants :

- Partager l'état de l'art avec d'autres acteurs et ouvrir ainsi le secteur aérospatial à tous ces nouveaux.
- Identifier les meilleures pratiques .
- Proposer des recommandations pertinentes pour le secteur.
- Attirer de jeunes professionnels sur ces sujets d'avenir.

L'Observatoire Ouvert du Numérique se réunit depuis juin 2018 ; ses travaux permettent d'explorer tous les sujets soulevés dans cet article et à terme de dégager des recommandations pour mieux positionner notre secteur. ■

## VIE DE LA 3AF

# COMPTE-RENDU DE LA REMISE DES PRIX 3AF

Le 29 octobre 2018 dans les salons de l'Aéroclub de France a eu lieu la remise des Prix 3AF 2018 et l'attribution des palmes 2017. Un partenariat avec REDOC SPI a également été signé ce même jour.

CÉRÉMONIE OFFICIELLE  
DE REMISE DES PRIX 3AF 2018  
ET DES PALMES 2017  
LUNDI 29 OCTOBRE 2018

## Grand Prix Special



*Sandra MAGNUS*

Le Grand Prix Spécial a été remis par

**Monsieur Bruno Sainjon**  
Président Directeur Général de l'ONERA

à **Madame Sandra Magnus** - Astronaute de la NASA



*Bruno SAINJON - Michel SCHELLER - Sandra MAGNUS - Christian MARI - Alain WAGNER*



François BOBO



Charles DOUGUET  
représenté par Michel DESAULTY



Vincent POINSIGNON

# Prix



Projet Open Rotor

*Grand Prix*  
*Prix d'Aéronautique*  
*Prix d'Astronautique*  
*Prix Réussite*

*Prix Opérations*  
*Prix Jeunes Actifs*

*Prix Excellence scientifique*

*Prix de Thèse*

Les Prix 3AF 2018 ont été remis par

**Monsieur Christian Mari**  
Président du Haut Conseil Scientifique  
et du Comité des Prix

- Monsieur François Bobo** - MBDA
  - Monsieur Charles Douguet** - SAE
  - Monsieur Vincent Poinignon** - Airbus D&S
  - Projet Open Rotor** - SAE
  - ÉquipEx PHARE** - ECL
  - Monsieur Sébastien Barde** - CNES
  - Madame Aurélie Gouby** - SAE
  - Madame Marie Vinay** - MBDA
  - Monsieur Yannick Bidel**
  - Monsieur Alexandre Bresson**
  - Monsieur Nassim Zahzam**
- } ONERA
- Monsieur Gurvan Jodin** - ENSEEIHT
  - Monsieur Michel Libsig** - ISL



EquipEx PHARE



Sébastien BARDE



Aurélien GOUBY



Marie VINAY



Yannick BIDEL - Alexandre BRESSON - Nassim ZAHZAM



Michel LIBSIG

# Palmes

5 récipiendaires des Palmes 3AF 2017 ont reçu leur distinction par le Président 3AF :

**Monsieur Klass Dijkstra** Midi-Pyrénées  
**Monsieur Jean-Pierre Grisval** Ile de France  
**Monsieur Patrick Gillieron** Ile de France  
**Madame Annette Sanchez** Aquitaine  
**Monsieur Guy Schaeffer** Ile de France

Les autres Palmes 3AF 2017 ont été ou seront remises lors de cérémonies régionales :

**Madame Catherine Goetz** Aquitaine  
**Monsieur Jean Lizon-Tati** Côte d'Azur  
**Monsieur Bernard Mansuy** Côte d'Azur  
**Madame Manola Romero** Midi-Pyrénées  
**Monsieur Jean-Louis Roch** Aquitaine  
**Monsieur Alain Vuillet** Provence



Michel SCHELLER - Klass DIJKSTRA - Jean-Pierre GRISVAL - Patrick GILLIERON représenté par Paul KUENTZMAN  
Annette SANCHEZ - Guy SCHAEFFER

## 29 octobre 2018, lors de la cérémonie des Prix et des Palmes :

**Signature du Partenariat entre 3AF et REDOC SPI** (*Réseau National des Ecoles Doctorales Sciences pour l'Ingénieur*)



Alain BAMBERGER, Président REDOC SPI et Michel SCHELLER, Président 3AF

### Objectif

- Promouvoir l'apport des Docteurs à l'industrie aéronautique et astronautique de France
- Renforcer la visibilité de 3AF et REDOC SPI auprès de la communauté des Docteurs SPI.

### Première réalisation en commun

Un site Web « Trouver ma thèse en Aéronautique » avec ONERA Alumni.

### Et en 2019

- Conception et début de réalisation d'une cartographie des Docteurs dans l'industrie aéronautique et astronautique de France.
- Sélection de ressources en ligne pour les communautés 3AF et Docteurs SPI. Focus sur deux thématiques.

## VIE DE LA 3AF

# AEROADOUR 2018 À PAU

par Bernard Vivier, membre émérite 3AF, président du groupe Pays de l'Adour

Le Groupe régional 3AF Pays de l'Adour a co-organisé le 3 octobre dernier, avec ses partenaires habituels, l'association Pau Wright Aviation et l'UIMM Adour, le cinquième événement Aéroadour depuis 2009.

Cette année était particulière à plus d'un titre. En effet, il avait été décidé de consacrer cette édition, resserrée en une journée, à un forum sur les métiers de l'aéronautique et de l'espace, en mettant l'accent sur les besoins futurs. Par ailleurs, dans un souci de situer cet événement dans une ambiance aéronautique, un accord avec la direction de l'aéroport de Pau-Pyrénées (Air'py) mettait une grande partie du hall passagers à notre disposition.

Enfin, la volonté d'être très concrets, notamment pour les jeunes, auxquels ce forum était dédié, conduisait à mettre les visiteurs au contact direct des entreprises et institutions, soit sur les stands dédiés, soit à l'occasion de " flash info métier " petites conférences de quinze minutes, destinées à des présentations métiers faites par des professionnels.

Ces derniers n'étaient pas oubliés, puisque quatre conférences leur étaient consacrées, concernant toutes des sujets d'avenir.

Trois de ces conférences ont été présentées avec succès par des responsables de commissions techniques de la 3AF : " Nouvelles techniques d'assemblage structural " par Eric Deletombe, " L'avenir des matériaux métalliques en aéronautique " par Gilles Surdon et " Anticiper sur la transformation des métiers " par Philippe Boulan.

Quarante entreprises et institutions d'enseignement avaient accepté de tenir un emplacement pendant ce forum. Ce fut une réussite, puisque plus de 500 jeunes (ce qui représente une vingtaine de classes !) sont venus se renseigner auprès des professionnels à l'occasion des 16 " flash info métiers " répartis tout au long de la journée.

Une contribution visible à un réel besoin d'information, très bien relayée par la presse régionale. ■



Affiche Aéroadour 2018



Vue du hall



Conférence "Flash info métier"



Conférence professionnelle

## VIE DE LA 3AF

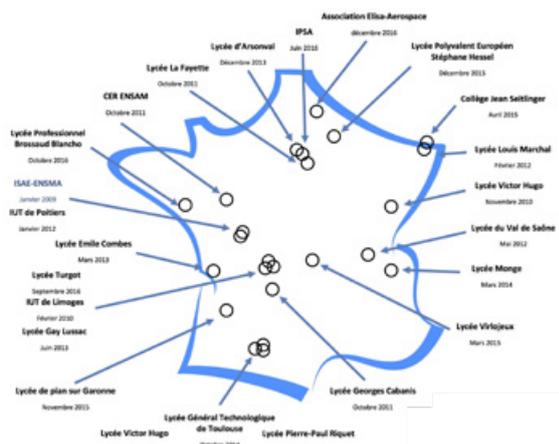
# UN NOUVEAU SOUFFLE POUR EOLIA

par François Leproux, ISAE-ENSMA, membre 3AF, groupe Poitou



La soufflerie EOLIA constitue un des arguments pédagogiques de la 3AF. Son concept a été initié il y a plus d'une dizaine d'années, par Gérard Laruelle (en charge des jeunes) et Jean Tensi (président du groupe 3AF Poitou). La première soufflerie EOLIA a été construite à l'Ensm. Sous l'impulsion d'un groupe d'élèves du groupe 3AF Poitou, l'idée de rédiger une charte et une convention de reproduction d'EOLIA à destination des établissements d'enseignement à pris corps. Le projet s'est développé et il est désormais présent dans l'ensemble de l'hexagone (collèges, lycées, IUT, écoles d'ingénieurs...).

EOLIA constitue l'un des projets étudiants les plus aboutis de l'ISAE-ENSMA de ces dernières années ainsi qu'une activité récurrente du groupe 3AF Poitou. L'attractivité d'EOLIA auprès des établissements scolaires n'est plus à démontrer. Les nombreuses demandes formulées auprès de la 3AF, sans qu'aucune véritable publicité n'ait été orchestrée en ce sens, en sont la preuve. Aujourd'hui, 25 établissements en France sont équipés d'une soufflerie EOLIA.



EOLIA est historiquement liée à l'ISAE-ENSMA et le groupe 3AF Poitou s'occupe de dynamiser les activités autour de la soufflerie partout en France. Notre Président Jean Tensi est habilité à signer les conventions entre la 3AF et les établissements intéressés.

En décembre 2016, le groupe 3AF Poitou jeunes s'est donné un nouvel objectif nommé " un nouvel souffle pour EOLIA " pour impulser une nouvelle dynamique à EOLIA autour de trois objectifs :

- développer le potentiel scientifique et pédagogique d'EOLIA ;
- développer l'attractivité d'EOLIA ;
- pérenniser EOLIA à l'ISAE-ENSMA.

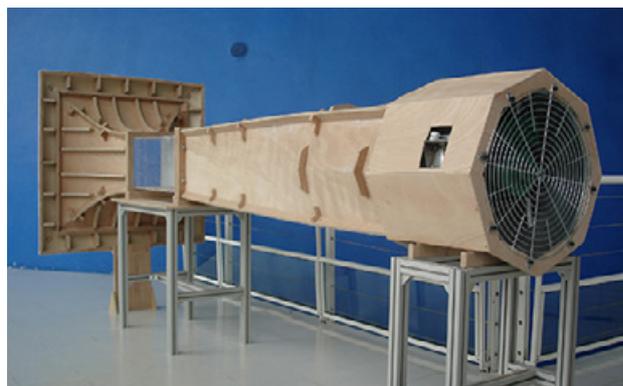
Pour réaliser ces objectifs, l'annuaire EOLIA a été remis à jour, la soufflerie s'est dotée d'un nouveau logo, la soufflerie EOLIA de l'ISAE-Ensma a été remise en état de marche et est exposée en permanence dans le hall de l'école. En 2017, deux étudiants de l'ISAE-ENSMA, Thomas Gourmellon et Thibaut Fanget ont réalisé un site internet pour la soufflerie sous la supervision de François Leproux et de Jean Tensi.

[3AF-eolia.ensma.fr](http://3AF-eolia.ensma.fr)

Le site propose des informations sur la manière d'obtenir une soufflerie EOLIA, de nouveaux documents ainsi que des ressources pédagogiques adaptées à différents publics.

La page " Réseau EOLIA " permet de structurer le groupe des souffleries EOLIA avec une carte interactive qui permet de localiser chaque établissement et d'obtenir des informations et un contact. Environ un tiers des établissements a joué le jeu et fourni des informations et photos de leur appareil pour enrichir le site. A l'automne 2018, une mise à jour apportera plus d'informations scientifiques, avec des pages consacrées aux moyens de mesures ou de visualisation d'écoulements.

Pour l'année à venir, EOLIA continuera d'être une des priorités du groupe 3AF Poitou avec son exposition aux 70 ans de l'ENSMA (13 octobre 2018), la réalisation de petits films pédagogiques sur l'aérodynamique ainsi que de nouveaux membres de la famille Eolia. ■



Le premier prototype d'EOLIA en 2006 à l'Ensm de Poitiers

## CULTURE

# JEAN LETOURNEUR, SCULPTEUR DU MOUVEMENT FLUIDE

par Bruno Chanetz, maître de recherche à l'ONERA, président d'Alumni-ONERA

*Dans la Lettre n°11 d'octobre 2014, un article était consacré à deux artistes épris d'aérodynamique et d'aéronautique Jean Letourneur et Marc Newson : <https://www.3af.fr/sites/default/files/lettre3af-n11-preview-141022.pdf>*

*Revenons sur Jean Letourneur à l'occasion de la publication de deux livres en 2018 et 2019. Ce sculpteur, vivant dans les Hauts-de-Seine à Fontenay-aux-Roses, a créé un art empreint de science et de technique. Agrégé de l'Université, professeur de sculpture à l'École Nationale Supérieure des Arts Appliqués et des Métiers d'Art (ENSAAMA), c'est un passionné d'aérodynamique.*

Jean Letourneur habite toujours la propriété familiale de Fontenay-aux-Roses, où il vécut ses années de formation et où il exerce toujours son art dans l'atelier paternel. Au sein de l'élite culturelle, où il vécut son enfance et son adolescence, il découvrit l'art avec Jacques Zwobada et René Letourneur, tous deux grands prix de Rome de sculpture, la science avec son grand-père Henri Gondet, un temps directeur de la Physique à l'ONERA, la littérature et la philosophie avec André Malraux, un ami de la famille.



Figure 1 : Taille directe du "Miroir" par Jean Letourneur dans un marbre rose du Portugal (2014), 100 x 45 x 45 cm

Jean Letourneur, représenté ci-dessous (Figure 1) en train de tailler un marbre rose du Portugal, est fasciné par l'aérodynamique, science à laquelle il apporte sa vision d'artiste en lui consacrant depuis quarante ans des œuvres sculptées et dessinées. Un autre avant lui, à la charnière du XIX<sup>ème</sup> et du XX<sup>ème</sup> siècle, fut tout autant passionné : le médecin Etienne-Jules Marey, le premier à avoir réalisé des visualisations du mouvement fluide avec une machine à fumée. Mais si Jean Letourneur n'a pu connaître Marey, il a rencontré un autre grand réalisateur de visualisations fluides, un contemporain, Henri Werlé, maître de recherche à l'ONERA. Ses films sont à l'origine de la carrière de Jean Letourneur à la confluence de l'art et de la science. Les œuvres inspirées par les photos et les films d'Henri Werlé sont nombreuses et pour ne citer que deux d'entre elles :

- Le Miroir (1994) est une œuvre, présentant un ellipsoïde. Elle évoque les miroirs en bronze poli de l'antiquité, dont elle revêt la matière. Le socle, constitué de filaments fluides entrelacés exprime avec vigueur les enroulements tourbillonnaires qui prennent naissance à l'extrados de l'ellipsoïde en incidence. Magnifique alliance du passé et du présent et symbiose entre l'art et la science (Figures 2 a,b,c).

- L'Air et l'Eau (1992), deux bronzes inspirées par les célèbres allées tourbillonnaires de Bénard-Von Kàrmàn (voir Figures 3 a,b,c).



Figure 2a : Version bronze du "Miroir" (1994), 28x8x8 cm, inspirée par une vue d'ellipsoïde au tunnel hydrodynamique de l'ONERA à Châtillon (Figure 2b)

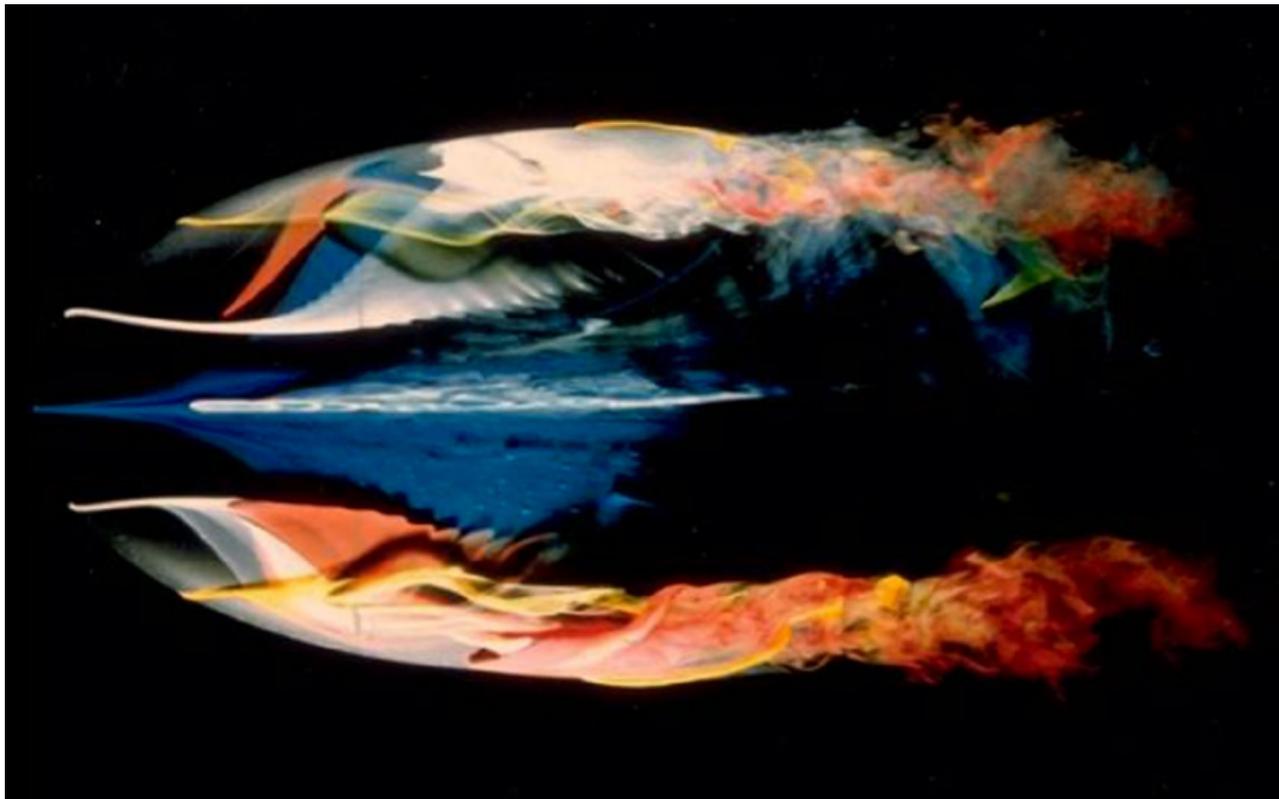


Figure 2b : Vue d'ellipsoïde au tunnel hydrodynamique de l'ONERA à Châtillon (Henri Werlé)



Figures 3a et 3b : " l'Air et l'Eau " (1992), Deux bronzes (40x20x1,5 cm) inspirés par les allées tourbillonnaires de Bénard-Von Kàrmàn, visualisées au tunnel hydrodynamique de l'ONERA à Châtillon (Figure 3c)

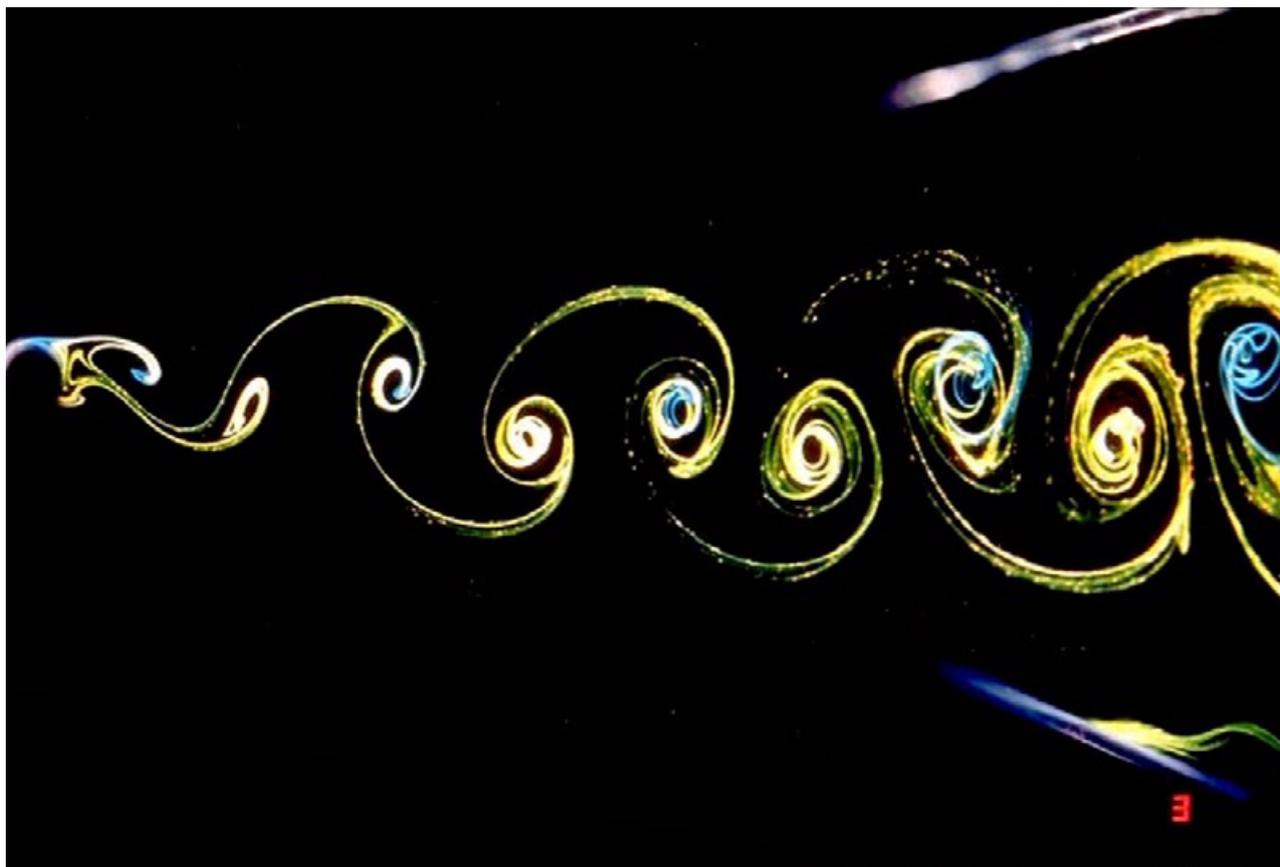
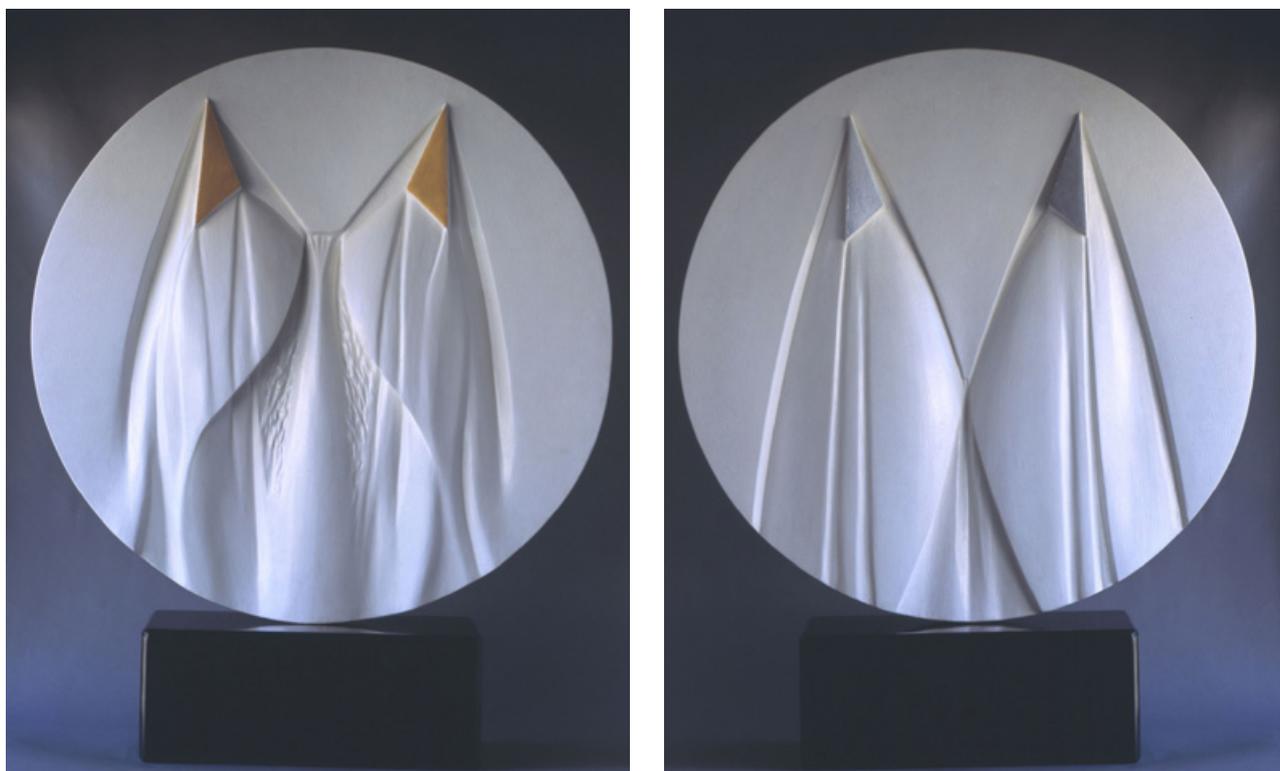
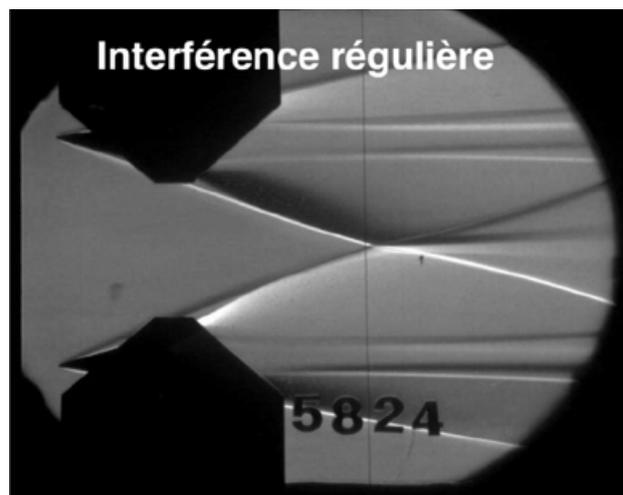
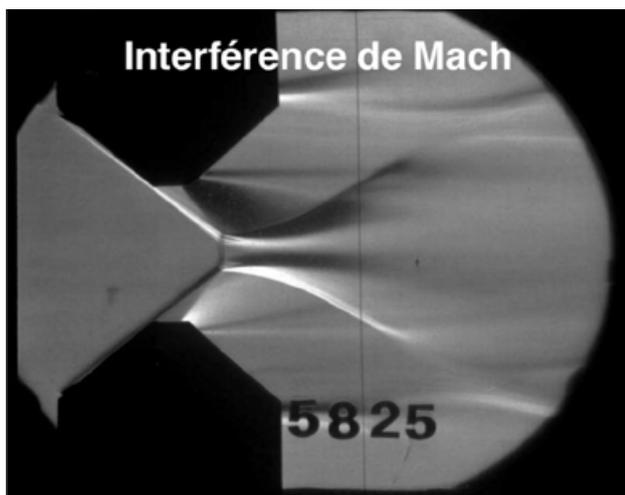


Figure 3c : Allées tourbillonnaires de Bénard-Von Kàrmàn, visualisées au tunnel hydrodynamique de l'ONERA à Châtillon



Figures 4a et 4b : Interférences de chocs, œuvre conçue pour l'Année Internationale de la Physique, en partenariat avec l'ONERA. Stuc (2005), 61x7 cm, inspiré par des visualisations strioscopiques à Mach 10 dans la soufflerie R3Ch de l'ONERA à Meudon (Figures 4c et 4d)



Figures 4c et 4d : visualisations strioscopiques à Mach 10 dans la soufflerie R3Ch de l'ONERA à Meudon

En 2005, dans le cadre de l'année internationale de la physique, Jean Letourneur décida de monter en vitesse ! Il a frappé de nouveau à la porte de l'ONERA. Henri Werlé n'était plus là, j'ai eu le plaisir de faire la connaissance de Jean Letourneur et de guider ses pas vers les très hautes vitesses. Il est venu plusieurs fois au centre ONERA de Meudon pour découvrir les souffleries et s'intéresser aux écoulements hypersoniques dans les souffleries à rafales où des vitesses de 1,5 km/s sont atteintes.

Le résultat de cette découverte du domaine des très hautes vitesses fut la création d'une grande médaille pivotante Interférences de chocs (Figures 4 a,b,c,d), représentant sur une face un croisement de chocs du premier type, ou interférence régulière, et sur l'autre face un croisement du second type, ou phénomène de Mach [3].

La présentation de l'œuvre de Jean Letourneur ne saurait être complète sans l'admirable buste stèle de Saint-Exupéry. Accrochée sur une lame métallique profilée comme l'extrados d'une aile d'avion, la tête de l'écrivain dialogue avec des turbulences évoquant le manteau du Petit Prince, effleurant le sol de son épée. Commandée pour l'aéroport Lyon-Saint-Exupéry, cette œuvre, coulée dans le bronze, figure dans le salon d'honneur de l'aérogare (voir Fig.5).

#### Références

Voir le site de Jean Letourneur : <http://www.jeanletourneur.com/>

[1] Werlé H., Principaux types de décollement libre observés sur maquettes ellipsoïdales, Note Technique ONERA 1985-7

[2] Chanetz., Contribution à l'étude du décollement tridimensionnel en écoulement turbulent incompressible, Note Technique ONERA 1988-6

[3] Chanetz B. et Benay R., Hysteresis phenomena associated with shock waves interference in steady flow, Int. J. of Aerodynamics, Vol 2, Nos. 2/3/4, 2012.



Figure 5 : Saint Exupéry, Salon d'honneur de l'aéroport Lyon-Saint-Exupéry, Bronze, 190x53,5x42 cm

**TRAITÉ DE PERSPECTIVE. GÉOMÉTRIE DE LA FORME (JANVIER 2019) AUX ÉDITIONS EYROLLES**

Préface de Caroline Lecourtois (ENSAPLV<sup>1</sup>)

Ce traité est entièrement dessiné en situation de cours théoriques et pratiques, avec plus de 400 dessins à la craie improvisés à main levée, sans aucune des béquilles que sont règles, équerres, compas.

A l'interface entre de nombreuses disciplines – géométrie, cristallographie, sculpture, design, architecture, statique graphique, topologie, tenségrité<sup>2</sup> – et en établissant des ponts avec l'histoire de l'art, ce traité a pour ambition de poser les jalons d'un langage commun les réunissant toutes, entre sciences et arts, par une analyse structurelle éclairante et non des recettes de rendus.

Le dessin n'est autre qu'un mode d'expression artistique, même si la nécessité l'aura ici nappé d'un peu de science. En prenant le risque de se poser très souvent un problème nouveau et d'en improviser la solution, Jean Letourneur aura passé trois ans à peaufiner cet ouvrage en s'amusant beaucoup m-a-t-il confié. Etant convaincu que tout cela n'est pas si difficile, il espère que son lecteur puisse en faire autant !

<sup>1</sup> Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris La Villette

<sup>2</sup> en architecture, la faculté d'une structure à se stabiliser par le jeu des forces de tension et de compression qui s'y répartissent et s'y équilibrent.

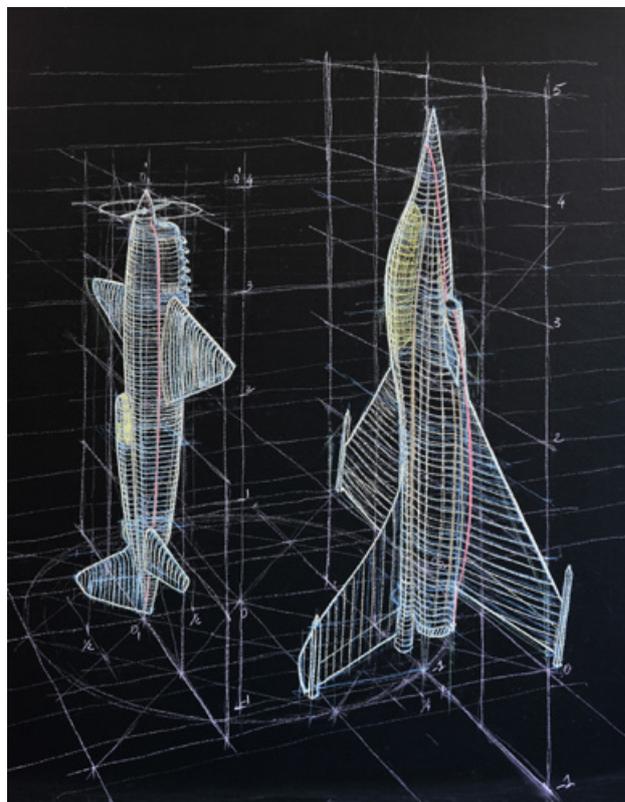


Figure 6 : dessin structuraliste d'un avion de combat à la craie de couleur au tableau noir

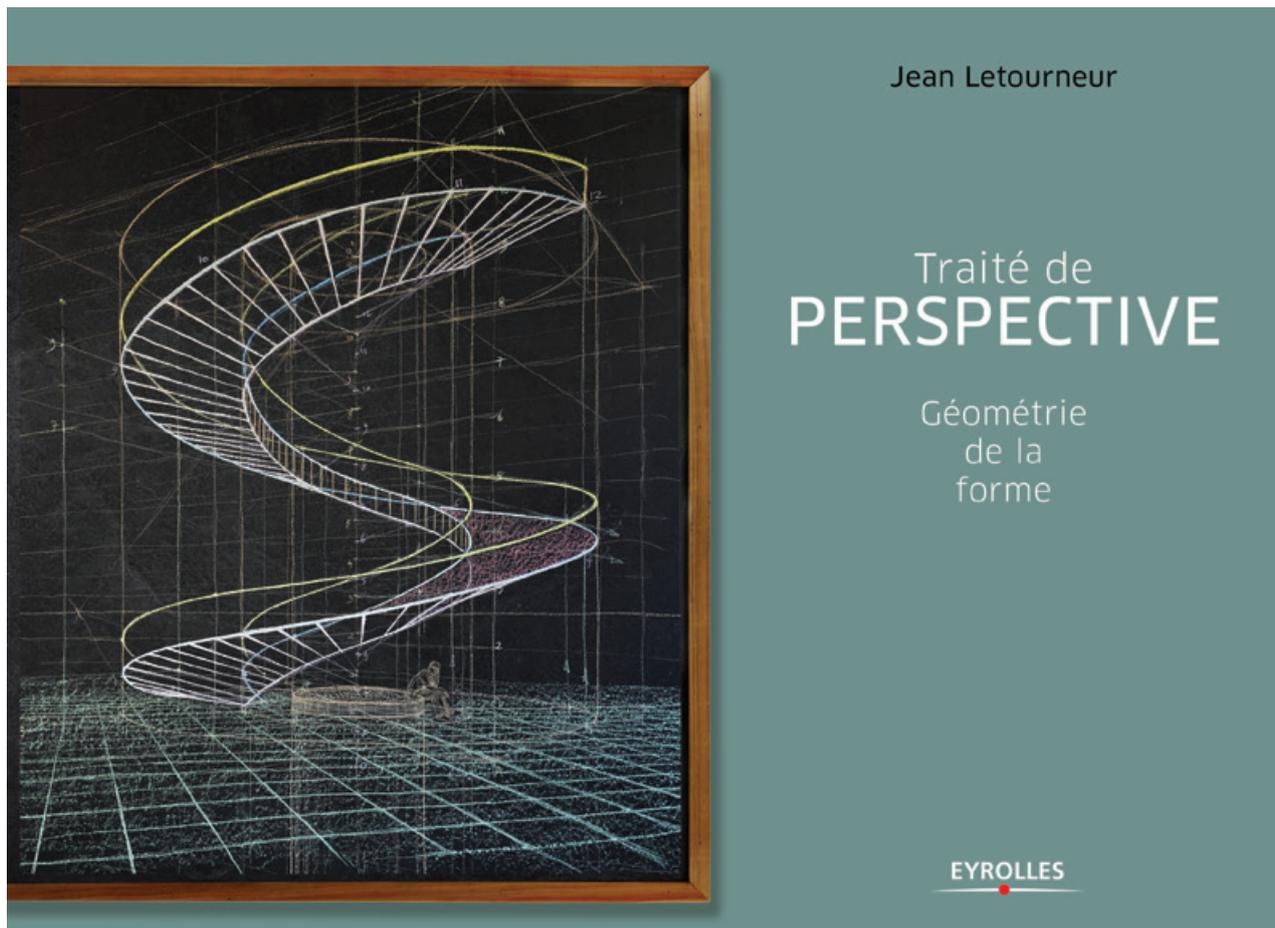
**SCULPTURE ET CHAOS. QUEL HÉRITAGE POUR QUEL FUTUR (JUN 2018) AUX ÉDITIONS CONNAISSANCES ET SAVOIRS**

Préface de Jean Luminet (CNRS) et postface de Bruno Chanetz (ONERA)

Ouvrage publié dans la collection Art et Culture. Arts plastiques et graphiques. Cet essai prend parfois des allures de pamphlet et établit un constat sans concession sur notre époque, où malgré les propos convenus d'ouverture à toutes les formes d'art, de véritables forteresses, impénétrables à qui ne fait pas partie de l'establishment se sont constituées. Ce réquisitoire est émaillé d'anecdotes qui font tout le charme du récit. Mais ces dernières ne sauraient occulter la trame de l'œuvre de Jean Letourneur : sa quête de l'unité, entre art et science.



Figure 7 : Fontaine Werlé



Traité de Perspective. Géométrie de la forme (janvier 2019) aux éditions Eyrolles

## Sculpture et Chaos

Postface de Bruno Chanetz

...sans rien finir trop tôt, nous faisons travailler en permanence notre inconscient qui sait que rien n'est terminé, que l'on a laissé partout des problèmes non résolus en ne finissant pas alors que des solutions se présentaient en foule ; mais un inconscient lucide, capable de terminer à notre place... Ces concepts figurent ensemble ou séparément, à des degrés divers, dans toutes mes sculptures, et je les ai présents à l'esprit. Mais ils ne se montrent pas. Ils sont intégrés au processus de création, étroitement entremêlés comme dans un « art de la fugue » plastique. Le concept, c'est la tonalité. Son incarnation formelle – tel mouvement, tels rapports de formes – c'est le thème. Le gradient, c'est le souffle, la volonté d'expression, le désir.

Ses développements harmoniques et mélodiques constituant le tissu structurel de la composition.

Professeur agrégé à l'ensaama et héritier de la tradition de la Taille Directe apprise auprès d'un Prix de Rome 1926, Jean Letourneur initia dès le début des années 80 un travail de recherche en lien avec les sciences qui le place parmi les précurseurs de l'art fractaliste. Entre les figures de Malraux et de Restany, l'auteur, en ouvrant les portes de son atelier ainsi que celles des laboratoires de recherche qu'il a pu fréquenter, lève un coin du voile de la création artistique.



15,00 €

ISBN  
9 78

CS

Sculpture et Chaos JEAN LETOURNEUR

Connaissances  
et Savoirs



JEAN LETOURNEUR

## Sculpture et Chaos

Quel héritage, pour quel futur ?

Préface de Jean-Pierre Luminet



Art et Culture  
Arts plastiques et graphiques CS

Collection Art, Philosophie, Humanités numériques

Sculpture et Chaos. Quel héritage pour quel futur (juin 2018) aux éditions Connaissances et Savoirs

# RESEAUX ! LE PARI DE L'INTELLIGENCE COLLECTIVE. JACQUES BLAMONT

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



*Figure majeure de l'exploration spatiale, Jacques Blamont a confondu l'Agence Spatiale française, le CNES, dont il a été le premier directeur scientifique et technique.*

Les progrès technologiques dus notamment à la révolution de la communication numérique avancent à une vitesse si grande qu'ils sont presque impossibles à suivre. Il est difficile d'imaginer quels seront nos objets quotidiens à court terme, et a fortiori ceux qui seront à la disposition des générations à venir !

Alors comment maîtriser le progrès ? Que faut-il faire pour ne pas perdre la main ? En utilisant la puissance des réseaux, en faisant le pari de l'intelligence collective en utilisant le Web.

L'auteur a initié la mise en place au sein du Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) d'un projet concret appelé FEDERATION Open Space makers.

De quoi s'agit-il ? D'une nouvelle conception de la wikinomie, qui consiste à faire communiquer entre elles deux catégories de structure : d'une part une structure verticale, composée d'institutions spécialisées – Administration, Agences d'Objectif – douée d'une culture Top Down, d'autre part des groupes participatifs transverses, horizontaux, émettant librement des idées novatrices dans une logique Bottom Up.

L'auteur explique : “ La première apporte ses motivations, sa maturité, son organisation, son amour des règles, ses normes, sa puissance. La seconde sa créativité, sa jeunesse, son enthousiasme, sa haine des règles, bref : la liberté. L'objectif de cette union est de mener à bien des projets concrets à partir des forces spécifiques et antinomiques de chacune. ”

Dans son ouvrage, Jacques Blamont introduit le futur participant à FEDERATION dans l'univers des bytes, des ordinateurs, des réseaux.

Les cinq premiers chapitres – Le moteur de l'histoire aux environs de l'an 2020 – Le monde 4.0 : l'homme et les données – L'espace devient une chose de la foule – New Space – réseaux sociaux et communautés – décrivent la métamorphose que subit le notre mode, son passage à un nouvel âge, celui du silicium.

Le chapitre 6 décrit la Fédération Wikinomique, dont l'objectif au CNES est de contribuer à son adaptation au New Space par la recherche participative faisant intervenir des amateurs dans les idées et réalisations de projets.

“ La Fédération est donc un algorithme social conçu pour transformer les spectateurs en acteurs. Son objectif est de créer un écosystème. ”

L'idée peut être appliquée dans d'autres domaines que le “ spatial ” : l'océanographie, le changement climatique, la santé, l'intégration des migrants, la politique.

En conclusion Jacques Blamont évoque l'idée d'une Fédération universelle. ■

## PARMI LES PROCHAINS ÉVÉNEMENTS



**INTERNATIONAL CONFERENCE ON MORE ELECTRIC AIRCRAFT TOULOUSE**  
6, 7 FÉVRIER 2019 À TOULOUSE  
<http://www.me a2019.eu>



**54<sup>ÈME</sup> CONFÉRENCE INTERNATIONALE SUR L'AÉRODYNAMIQUE APPLIQUÉE**  
25 AU 27 MARS 2019 À PARIS  
<http://3af-aerodynamics2019.com>



**LES ENTRETIENS DE TOULOUSE**  
10, 11 AVRIL 2019 À TOULOUSE  
<http://www.entretienstoulouse.com/>



**13<sup>TH</sup> 3AF INTERNATIONAL CONFERENCE INTEGRATED AIR AND MISSILE DEFENCE**  
14 AU 16 MAI 2019 À ROME  
<http://3af-integratedairmissiledefence.com/>



**CONFÉRENCE EUROPÉENNE DES ESSAIS ET TÉLÉMESURE**  
11 AU 13 JUIN 2019 À TOULOUSE  
<http://www.ettc2019.org>



Association Aéronautique  
et Astronautique de France

[www.3af.fr](http://www.3af.fr)