

Trajectoire(s)



CONFÉRENCES

L'avion à hydrogène et avion
bas carbone
Soleil éclipsé

TABLES RONDES

Newspace
La révolution du quantique

AUTRES COLLOQUES

Newspace à Meudon
les 21 et 22 septembre 2023
Eiffel 2023 à Paris
les 7 et 8 décembre 2023



CAHIER

Colloque Papin
à Saumur
le 26 mai 2023

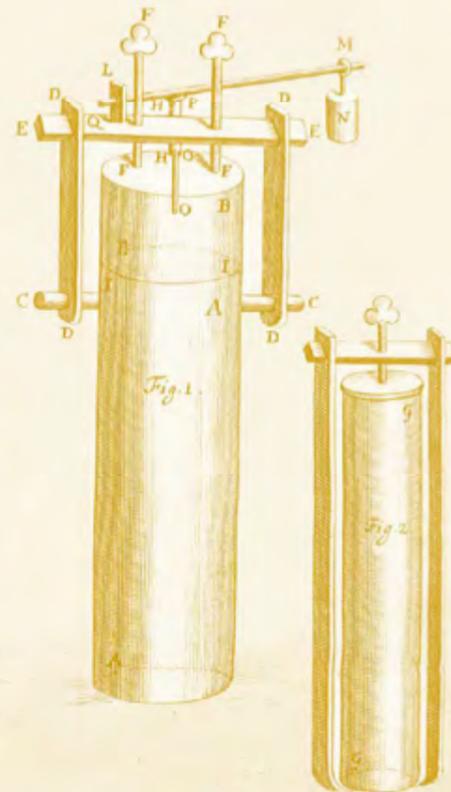
Colloque en hommage à DENIS PAPIN (1647-1713)

Mathématicien, physicien et inventeur

SAUMUR

Vendredi 26 mai 2023
9h00-17h30

Entrée gratuite



ONERA
LUMNI

MEMBRES DU CONSEIL D'ADMINISTRATION

Président
Bruno Chanetz, ONERA - Palaiseau

Secrétaire Général
Alain Durand, Sopra Steria Next -
La Défense

Trésorier
Philippe Castera, Dassault Systèmes
- Vélizy

Vice-Président
Pierre-Elie Weiss, ONERA - Meudon

Alexis Bourgoing, ArianeGroup -
Les Mureaux

Vincent Chabridon, EDF - Chatou

Pierre Cordesse, Air liquide, Grenoble

Carsten Döll, ONERA - Toulouse

Frédéric Feyel, SafranTech -
Châteaufort

Florian Gaudfrin, CEA - Toulouse

Bruno Mangin-Birrer, Dassault Aviation
- Saint-Cloud

Florin Paun, Joint European Disruptive
Initiative, Issy-Les-Moulineaux

Nicolas Rivière, ONERA - Toulouse

Éditeur
Association Alumni-ONERA
6 chemin de la Vauve aux Granges
BP 80100
91123 Palaiseau Cedex

Directeur de la publication
Bruno Chanetz

Création graphique
Arnaud Le Ouëdec, Ici la Lune

4 Mot du président
par Bruno Chanetz

CONFÉRENCES

6 Conférence d'Eric Dautriat
le 12 juin 2023
par Bruno Chanetz

9 Les quatre piliers
de la décarbonation
de l'aviation
par Eric Dautriat

16 Conférence de Pierre
Léna au Sénat le 13 décembre
2023
par Bruno Chanetz

CAHIER

21 Compte-rendu du
colloque en hommage à Denis
Papin à Saumur le 26 mai 2023
par Bruno Chanetz

27 Denis Papin, sa vie, son
œuvre
par Bernard Vivier

30 L'évolution de la
traction Vapeur des Chemins
de Fer Français
par Jean-Pierre Comes

35 La machine à vapeur
dans l'aérostation au
XIX^e siècle
par Jean Molveau

39 Les traces de Denis
Papin dans la poussière de
l'histoire
par Conor Maguire

44 Usage de la vapeur dans
les centrales nucléaires
par Laura Matteo et Nicolas
Taveron

49 Les chaînes de traction
des TGV
par David Goeres

54 Propulsion aéronau-
tique : Etudes expérimentales
de la combustion
par Axel Vincent-Randonnier

57 Le fond plat, avenir
prometteur de l'aérostation
par Christophe Béésau

61 Clôture du Colloque
Denis Papin
par Pierre Léna

TABLE RONDE NEWSPACE DU 20/04/2023

63 KINEIS, opérateur
satellitaire et fournisseur
de connectivité globale
par Sébastien Martignac

66 UNSEENLABS, leader
mondial de données et de solu-
tions de radiofréquences (RF)
pour la surveillance maritime
par Olivier Michel

TABLE RONDE LE QUANTIQUE ET SES APPLICATIONS DANS LE SECTEUR ASD

69 Quantique et New space
par Charles Beigbeder

71 L'ONERA et la deuxième
révolution quantique
par Sylvain Schwartz

COLLOQUES

74 Colloque newspace,
les 21 et 22 septembre 2023,
dans le cadre du festival
STAR's UP à Meudon
par Bruno Chanetz

84 SpaceCon, une autre
façon d'explorer l'Espace
colloque à l'X du 17 au 18
novembre 2023
par Pierre Cordesse

87 Colloque Eiffel 2023
les 7 et 8 décembre 2023
à l'Ecole d'architecture Paris
-Malaquais
par Bruno Chanetz

95 Gustave Eiffel,
une autre carrière
dans l'aérodynamique
et les souffleries
par Bruno Chanetz

99 Inventaire
par Marie-Claire Coët

RECENSIONS

102 Soleils éclipsés
Supersonique Concorde 001,
couronne solaire et
exoplanètes de Pierre Léna
et Serge Koutchmy
par Marie-Claire Coët

103 CONCORDE,
la légende supersonique aux
Editions Privat de Gérard
Maoui et André Rouayroux
par Bruno Chanetz

104 Le Hangar à
dirigeables d'Ecausseville, un
centenaire plein d'avenir sous
la direction de Philippe Pâris
et Dominique Barjot aux
éditions Ouest-France
par Bruno Chanetz

105 Roland Garros,
The cloud kisser de Jean-Bruno
Kerisel
par Bruno Chanetz

106 Gustave Eiffel,
Gabriel Voisin, La Passion de
l'air par Véronique Brunet aux
éditions du Revermont, 2023
par Bruno Chanetz

107 Eiffel par Eiffel,
de Philippe Coupérie-Eiffel
aux éditions Michel Lafon,
2023
par Bruno Chanetz

109 LES AMIS
D'ALUMNI-ONERA
Témoignages

112 HOMMAGE À
GÉRARD LECLERC

114 PUBLICATIONS

ONERA
LUMNI

INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

université
angers



Ce numéro 4 fait le bilan de toutes les manifestations organisées au cours de l'année 2023. Le rythme de nos événements est désormais bien établi avec chaque année :

- un colloque, sous le patronage de l'UNESCO, sur une journée en région, évoquant l'histoire des Sciences, en partenariat avec l'Académie des Sciences ;
- un colloque scientifique sur deux jours, au cours du festival Meudonnais *star's up*, dans le cadre insolite et recherché du Hangar Y ;
- deux tables rondes à Paris, au siège du cabinet de stratégie international Oliver Wyman sur des sujets d'actualités ;
- deux dîners-conférences au restaurant du Sénat grâce au parrainage du sénateur Stéphane Demilly.

Cependant l'année 2023 fut particulièrement riche au niveau « histoire des sciences », puisqu'en plus de notre colloque printanier en mémoire de Denis Papin, qui se déroula à Saumur le 26 mai, accueilli par l'université d'Angers, nous avons également organisé à Paris, les 7 et 8 décembre, un colloque dédié à Gustave Eiffel, avec l'Ecole nationale supérieure d'architecture de Paris-Malaquais. En cette année, où l'UNESCO célébrait le centenaire de la mort d'Eiffel, Alumni-ONERA ne pouvait rester à l'écart de cet hommage international, sachant tout ce qu'avait apporté Gustave Eiffel à l'aérodynamique, aux souffleries et à l'aviation.

Le colloque annuel de Meudon, qui avait pour thématique le *newspace*, a rassemblé un grand nombre d'acteurs de la communauté Française. Le sujet avait été déjà abordé lors de la table ronde du premier semestre chez Oliver Wyman, celle du second semestre ayant été consacrée au quantique et à ses applications pour le secteur aéronautique spatial et défense. Enfin nous avons eu le privilège de deux remarquables conférences dans le cadre du Sénat par Eric Dautriat sur l'avion bas carbone et Pierre Léna sur le suivi d'une éclipse lunaire en Concorde et le monde des exoplanètes.

Cette riche programmation n'aurait pu être réalisée, si nous n'avions bénéficié, comme les années précédentes, de partenariats et d'actes de mécénat. Aussi je voudrais remercier ici quelques amis personnels – et quelquefois plus ! - qui sont devenus des amis d'Alumni-ONERA et qui ont puissamment contribué au développement de notre association¹ par leur contribution intellectuelle et/ou matérielle :

- Marie-Claire Coët, fit partie des conseils scientifiques et d'organisation de nos colloques « Histoire des Sciences », mit en page les flyers et accepta, suite au colloque de Loudun en 2022, d'organiser la soirée dans notre résidence secondaire ;
- Daniela Carneiro-Fuentes, chargée de mission à la tour Eiffel, de nationalité brésilienne, grande amie de la France, initiatrice de l'année Eiffel à l'UNESCO, a offert 1 000 € pour la réalisation du colloque Eiffel à Paris-Malaquais. C'est également grâce à elle que Rémi Capoulade et Mériem Belazouz, enregistrent nos événements et les diffusent sur Coworking channel (CC) ;
- Martin Peter, conservateur et ancien propriétaire de la soufflerie Eiffel, nous reçut au laboratoire Aérodynamique Eiffel dès 2016, est intervenu au cours de nos événements et y contribua financièrement au nom de l'association

AERO-EIFFEL 100² qu'il préside (500 € pour le colloque Boulliau, 500 € pour le colloque Eiffel) ;

• Philippe Tixier, président de DIRISOLAR, membre incontournable du conseil scientifique du colloque « le Futur de l'Aérostation et des dirigeables », qui eut lieu à Meudon en 2021. En tant que président de l'association pour un centre européen des ballons et dirigeables³, il a aidé au financement des colloques de Loudun (500 €) et de Saumur (500 €). Grâce à lui, Christophe Béésau a également rejoint notre cercle ;

• Conor Maguire, Irlandais, un autre grand ami de la France, a organisé le premier colloque « histoire des Sciences » à Saumur en 2017 en hommage à Abraham de Moivre. C'est le créateur du concept et depuis il est fidèle à nos événements, intervenant à Hendaye sur Antoine d'Abbadie, à Loudun sur Ismaël Boulliau, et dernièrement de nouveau à Saumur sur Denis Papin, nous recevant généreusement, avec son épouse Mary, au château de Beaulieu à l'issue de ce colloque pour une soirée musicale dans un cadre enchanteur ;

• Jean et Florence Letourneur, qui nous invitèrent dans leur propriété de Fontenay-aux-Roses en 2019, pour une soirée culturelle dédiée à la sculpture. Nos amis Rémi et Mériem ont réalisé cette année une émission sur ces lieux, leur histoire et leurs occupants actuels que je vous recommande. C'est également grâce à Jean Letourneur que le regretté Denis Beaudouin avait collaboré au colloque d'Hendaye ;

• Bernard Vivier, ancien Secrétaire général de la 3AF, compagnon de longue date au sein du comité de rédaction de la Lettre 3AF, fut un partenaire essentiel, via l'association Pau Wright Aviation qu'il préside, du colloque d'Hendaye,

• Jean-Bruno Kerisel, petit-fils d'Albert Caquot, Pierre Muller, Denis Quenôt et Jean Molveau, collectionneurs de l'aérostation, avec qui nous avons

organisé l'exposition sur « Albert Caquot et l'aérostation militaire à Meudon » en 2021 ;

• Elsa Merle, professeure des universités, ma cousine qui m'a mis en relation avec Nicolas Rey-Tornero et Laura Matteo pour les applications nucléaires de la vapeur ;

• Serge et Nicole Bellon, mes cousins qui m'ont fait connaître l'académicienne Claire Mathieu⁴, auteure d'une intéressante conférence sur les algorithmes au sénat ;

• Alain Weil, ingénieur chimiste et expert numismate, chez qui j'ai rencontré Michel Virlojeux, ingénieur des ponts de Normandie et de Millau, qui nous donna une belle conférence au sénat et participa cette année à notre colloque Eiffel ;

• Philippe Perrier, ancien directeur technique de Dassault Aviation, co-auteur de notre livre 3AF sur les souffleries, nous a gratifié d'une remarquable conférence au sénat sur « les bateaux qui volent » ;

• Eric Dautriat, vice-président de l'Académie de l'air et de l'espace, est magistralement intervenu au sénat sur l'avion bas carbone et le présent numéro débute par son article, qui ne cèle pas les difficultés auquel s'affronte le secteur aéronautique ;

• Paolo Vannucci, professeur à l'université de Versailles, responsable du master où j'enseigne l'aérodynamique en tant que professeur associé, a passionné l'auditoire avec une conférence au restaurant du sénat sur « La Mécanique des cathédrales gothiques », qu'il refit l'année suivante à l'ONERA ;

• Nicolas Marescaux, cette année encore, contribue à l'équilibre de nos comptes, grâce à une publicité MACIF.

Je n'oublie pas non plus ce qu'Alumni-ONERA, doit aux membres du bureau :

• Alain Durand, secrétaire général, a mis en place le partenariat fructueux avec Oliver Wyman, a participé au conseil scientifique et à l'animation des deux derniers colloques de Meudon et en 2023, comme en 2022, a contribué

à l'équilibre de nos comptes, via une publicité de Sopra Steria Next ;

• Philippe Castera, trésorier, a eu l'initiative du colloque d'Hendaye, a participé, au titre de Dassault Systèmes, au conseil scientifique et à l'animation des deux derniers colloques Meudonnais, et grâce à lui, nous avons été fort bien reçus, le 26 mai dernier, par la maison Langlois-Chateau de Saumur ;

• Pierre-Elie Weiss, vice-président, qui a la charge de notre site WEB.

Des membres du conseil d'administration se sont aussi impliqués dans des actions, contribuant à leur succès :

• Bruno Mangin-Birrer (Dassault Aviation) nous a offert en 2019 la possibilité de visiter le FALCON 7X, lors de l'AG Alumni-ONERA, organisée au salon du Bourget ;

• Carsten Döll nous a donné une conférence sur l'avion électrique ;

• Florin Paun, a assuré avec brio l'animation de notre table ronde « Espace » à l'hôtel de l'industrie, en janvier 2020, puis lors de la journée de colloque de Meudon sur « Le futur de l'Aérostation » en 2021 ;

• Pierre Cordesse, participa également, au titre d'Air Liquide, au conseil scientifique du colloque « Le futur de l'aérostation ». En tant que co-fondateur de l'événement SpaceCon, il permit aussi d'associer Alumni-ONERA à cette manifestation de grande ampleur, dont la troisième édition eut lieu en novembre dernier à l'Ecole Polytechnique ;

• Alexis Bourgoing, Vincent Chabridon, Nicolas Rivière, Elinirina Robinson, Guilherme Cunha, qui ont régulièrement pris part aux réunions du CA.

Et puis il y a aussi les membres d'Alumni-ONERA, qui a un moment ou un autre ont répondu à une sollicitation : conférence et /ou article : Brigitte Attal-Trétout, Laurent Chaudron, Thierry Bourron, Jacques Peter, Pierre Grenson, Thierry Fusco, Axel Vincent-Randonnier,

Laurent Chaudron et Fabrice Cuzieux. Et également les collègues de l'ONERA, qui de la même manière, ont contribué à nos événements : Patricia Cymbalista, Catherine Tessier, Alexandre Bresson, Jean Hermetz, Stéphane Andrieux, Jacques Lafaye, Philippe Benhamou, Jean-Luc Charles, Sébastien Defoort, Eric Deletombe, Alexandre Boulch, Hubert Cantalloube, Pascal Taillandier, Xavier Pucel, Nicolas Guérineau, Manuel Rodrigues, Antoine Miniussi, Jean-Claude Traîneau et Sylvain Schwartz, sans oublier le Président de l'ONERA Bruno Sainjon, qui vint ouvrir la seconde journée de notre colloque *newspace* le 22 septembre dernier. Qu'ils en soient tous remerciés.

Sept années se sont écoulées depuis le 8 décembre 2016, où se déroula à Châtillon la première AG de notre association. Les premières années ont été consacrées à gréer le navire, puis le conduire hors des eaux territoriales de l'ONERA. Il est désormais armé pour affronter la haute mer et il appartiendra au nouveau président et au conseil d'administration renouvelé lors de l'AG 2024, de tenir la barre pour poursuivre le voyage. Et je suis très heureux de rester à bord avec le titre de président d'honneur que l'AG 2023 a d'ores et déjà conféré à son président-fondateur.

À tous je souhaite d'aborder l'année 2024 avec espérance, sans se laisser envahir l'esprit par les prophéties déprimantes. Rappelons-nous les alarmes dont nous avons été inondés durant une grande partie de l'année 2023, concernant le manque d'eau. Et pourtant malgré cette réelle sécheresse, les récoltes se sont maintenues à des sommets. Puis les pluies automnales sont venues combler les nappes phréatiques déficitaires, nous rappelant :

(que) toute onde se puise à la grâce de Dieu. Il la verse à son heure et selon sa mesure⁵.

Bruno Chanetz

directeur de recherche à l'ONERA
président d'Alumni-ONERA

1. Voir l'éditorial du n°3, où étaient déjà remerciés pour l'aide apportée à Alumni-ONERA : Stéphane Demilly, Pierre Léna, Eric Ciampi, Olivier Mousson, Alexandre Navarro, Denis Larghero

2. Aéro Eiffel 100, dont le SG est Gérard Laruelle et le trésorier Bruno Chanetz

3. ACEBD, dont le SG est Bruno Chanetz et le trésorier Denis Parenteau

4. membre depuis le 7 décembre du conseil présidentiel de la science

5. Alphonse de Lamartine, in Jocelyn, 9^e époque

CONFÉRENCE

Avion bas carbone – avion à hydrogène et carburants alternatifs d'Éric Dautriat

PAR BRUNO CHANETZ

Le 12 juin 2023, Eric Dautriat, vice-président de l'Académie de l'Air et de l'Espace, ancien directeur des lanceurs du CNES et ancien directeur exécutif de Cleansky, a donné une conférence au restaurant du Sénat grâce au soutien du sénateur Stéphane Demilly, qui a prononcé le discours d'accueil suivant :

Mesdames, Messieurs, Bonsoir à tous,

Je souhaite remercier Monsieur le président Bruno Chanetz pour l'organisation de cette conférence sur les carburants durables de l'aviation, ainsi que Monsieur Eric Dautriat, vice-président de l'Académie de l'Air et de l'Espace pour sa présence.

L'aviation est un domaine qui me tient particulièrement à cœur, en tant que membre de la Commission de l'Aménagement du territoire et du Développement durable, bien sûr, mais aussi et surtout en tant que Sénateur de la Somme, né à Albert, le berceau de l'industrie aéronautique française.

La question du verdissement de nos mobilités est un enjeu déterminant pour répondre à l'urgence climatique et énergétique. Repenser notre mobilité est un levier efficace de réduction des émissions, mais pour cela nous devons changer nos habitudes.

Les discours « anti-aérien » ou « l'avion-bashing » s'est durci ces dernières années. Pourtant, la réalité de l'impact environnemental de l'avion est inversement proportionnelle à la place qu'il occupe dans le débat public.

Le transport aérien ne représente que 2 % des émissions de gaz à effet de serre. Sur le territoire français uniquement, ce chiffre descend à 1,4 % des émissions carbone, là où le secteur routier en est responsable de 25 % (INSEE).

Le secteur aérien est mobilisé depuis longtemps en faveur de l'amélioration de son bilan carbone, notamment pour parvenir à la neutralité d'ici 2050.

Sur ce point, un accord européen a été conclu en mai dernier entre le Parlement européen et le Conseil sur la proposition « ReFuel-EU Aviation », qui fixe une part minimale de carburants durables pour l'aviation.

À partir de 2025, au moins 2 % des carburants d'aviation seront écologiques. Cette part augmentera tous les cinq ans : 6 % en 2030, 20 % en 2035, 34 % en 2040, 42 % en 2045 et 70 % en 2050.

Les avancées en faveur des carburants alternatifs sont donc notables.

J'ai d'ailleurs, à titre personnel, fait adopter deux amendements à ce sujet lors de l'examen du Projet de loi de finances pour 2023 :

- Le premier vise à inciter à l'achat de biocarburants durables produits en France et au sein de l'Espace Économique Européen, en proposant d'introduire un mécanisme de crédit d'impôt pour atténuer le surcoût que représente l'achat de SAF par rapport au kérosène. Il s'agit ainsi de viabiliser une filière industrielle innovante et d'être à la hauteur des objectifs fixés d'incorporation.
- Mon deuxième amendement visait, quant à lui, à inciter les compagnies aériennes à accélérer le renouvellement de leur flotte en optant pour des avions qui permettent une réduction d'au moins 15 % des émissions de dioxyde de carbone par rapport aux avions qu'ils remplacent, là aussi en proposant d'introduire un mécanisme de suramortissement fiscal pour les investissements réalisés par les compagnies aériennes dans ce domaine.

Si on veut des compagnies aériennes vertueuses et vivantes, il faut accompagner leur transition environnementale. Les scénarios les plus ambitieux évoquent un passage de 600 millions de tonnes mondiales de CO₂ en 2019, à 200 millions en 2050.

Quant au coût de cette révolution, il est estimé à 4000 milliards de dollars sur 30 ans pour les seuls carburants durables... Cette révolution, vous l'avez compris, est très lourde.

Et l'hydrogène dans tout cela ?

Il faut d'abord savoir que le gouvernement est plutôt engagé sur le sujet. En septembre 2020 a été annoncée une stratégie nationale du développement de l'hydrogène décarboné, adossée à un accompagnement financier de 7 milliards d'euros.

Airbus, de son côté, a présenté son projet de construire un avion « zéro émission » à hydrogène d'ici 2035 ; le programme « ZEROe ».

Dans ce programme, trois modèles d'aéronefs sont à l'étude :

- un turboréacteur d'un rayon de 3500 kms pouvant transporter 120 à 200 passagers,
- un turbopropulseur d'un rayon de 1800 kms avec une centaine de passagers,
- un aéronef à fuselage intégré avec un rayon de 3500 kms transportant 200 passagers.

Alors oui, on peut dire que l'avion à hydrogène est lancé, sous réserve que la production d'hydrogène le soit aussi...

Nous avons la chance d'avoir un leader mondial sur le sujet : Air Liquide. Mais de nombreuses difficultés techniques restent à surmonter, à commencer évidemment par la question du stockage de l'hydrogène à bord.

C'est un grand challenge qui nous attend, mais de nombreux acteurs sont associés à ces travaux. Parmi eux : le CNRS, Airbus, Safran, et l'ONERA !

Nul doute que nous allons avancer vite sur cette solution porteuse d'espoir.

Je vous souhaite un excellent colloque, et remercie à nouveau les intervenants pour leur présence.

Bonne soirée à tous !



Le général Sabéné et Mériem Belazouz (coworking channel)

Discours de Bruno Chanetz, président d'Alumni-ONERA

Monsieur Le Sénateur, mon général, Monsieur l'Académicien, chers Amis,

Tout d'abord merci à Stéphane Demilly pour son sympathique mot d'accueil. Avant de présenter notre conférencier, je vais rappeler les événements de notre association au cours du semestre qui s'achève et évoquer ceux qui se préparent.

Le 20 avril nous étions chez Oliver Wyman pour une table ronde sur le newspace et je salue la présence d'Eric Ciampi, Partner de ce

cabinet de stratégie international avec lequel notre partenariat est constant depuis 5 ans. Nous en sommes à la dixième table ronde. La prochaine, la onzième, se tiendra le 17 octobre 2023 et nous aborderons la révolution quantique.

Le sujet évoqué le 20 avril dernier chez Oliver Wyman : le newspace préparait notre prochain colloque des 21 et 22 septembre à Meudon, dont vous avez le flyer sous les yeux. Comme l'année dernière ce colloque au Hangar Y est conçu dans le cadre du festival Meudonnais de l'Aérospatiale STAR's UP, dont le vice-président Jean-Philippe Régnault est ici ce soir. Le contenu sera très riche,

les présentations rythmées et une large place sera faite aux tables rondes. Aussi n'hésitez pas à vous inscrire dès maintenant à ces journées. Pour l'ouverture de ce colloque, parmi les invités d'honneur le sénateur Stéphane Demilly et le général Julien Sabéné, chef d'état-major du commandement des forces aériennes, que je remercie d'être présent ce soir.

Le 26 mai dernier nous étions à Saumur, pour un colloque historico-scientifique en l'honneur de Denis Papin. Ce colloque fut ouvert par Jackie Goulet, maire de Saumur, Laetitia Saint-Paul, députée de Saumur, Jacques Rao de la Commission nationale Française pour l'UNESCO. Il fut magnifiquement conclu par Pierre Léna, membre de l'Académie des Sciences, comme le fut celui d'Hendaye en 2021 et celui de Loudun en 2022. Vous trouverez d'ailleurs le CR de ce colloque de Loudun dans le n°3 de TRAJECTOIRE(S).

Pierre Léna n'est pas ici ce soir mais nous avons l'honneur d'accueillir, son confrère à l'Académie des Sciences, Patrick Flandrin, professeur à l'Ecole Normale supérieure de Lyon, avec qui nous organiserons à Lyon en 2025 un colloque sur André-Marie Ampère, à l'occasion des 250 ans de sa naissance.

Ces colloques historico-scientifiques, en partenariat avec l'Académie des Sciences, permettent la publication des actes dans les comptes rendus de Mécanique. Le premier livret paru concernait le mathématicien Abraham de Moivre. Et je suis en train de finaliser celui relatif à Ismaël Boulliau.

Je reviens sur le n°3 de TRAJECTOIRE(S) pour vous signaler le premier article de la revue. Il est écrit par Stéphane Demilly, suite à la double conférence qu'il donna en 2022 à l'hôtel de l'industrie, dans le cadre d'un partenariat avec la société d'encouragement pour l'industrie nationale, présidée par Olivier Mousson,

conseiller-maître à la cour des comptes. Merci cher Olivier d'être venu ce soir.

C'est aussi en partenariat avec la société d'encouragement que nous organisons le colloque des 7 et 8 décembre sur Gustave Eiffel. En effet l'année 2023 a été déclarée par l'UNESCO année Eiffel à l'occasion des 100 ans de sa naissance. Son excellence l'ambassadeur Yves Saint-Geours, président de la commission Française pour l'UNESCO, nous a accordé le parrainage de l'UNESCO pour cette manifestation qui se déroulera dans le bel amphi classé de l'Ecole des Beaux-Arts de Paris, avec une finale au Musée d'Orsay. Je signale qu'au cours de ce colloque interviendra Stéphane Demilly lors d'une table ronde consacrée aux multiples facettes du talent de Gustave Eiffel, ingénieur, entrepreneur, savant, mais aussi pionnier de la science ouverte, thème qui sera abordée par Marie-Claire Coët, directrice de l'information scientifique à l'ONERA.



(de g. à d.) J. Ph. Régnauld, E. Dautriat, S. Demilly, S. Pouillart, J. Sabéné, B. Chanetz, P. Flandrin

Je rappelle que la première manifestation, organisée conjointement avec la société d'encouragement, fut un colloque sur Henry Potez en 2020, à Albert-Méaulte, dans un lieu cher à Stéphane Demilly. À son invitation j'y suis retourné en 2022 pour une journée exceptionnelle de visites, à laquelle étaient également conviés Eric Maïni, directeur général d'EUROSAE et Sophie Pouillart, secrétaire générale du pôle de compétitivité ALTYTUD, tous les deux ici ce soir. Et nous avons été tellement enthousiastes de la visite du Musée privé de l'aéronautique de Marc Bétrancourt et du Musée municipal de la première guerre mondiale, que je recommanderais volontiers, lors du prochain bureau, d'organiser une journée Alumni-ONERA à Albert.

Il me revient maintenant le plaisir et l'honneur de vous présenter notre conférencier : Eric Dautriat est diplômé de l'Ecole Centrale de Lyon (promotion 1977). Il a fait toute sa carrière dans l'aéronautique et le spatial. Il débute chez SNECMA comme responsable avant-projet moteurs civils, puis poursuit sa carrière à la Direction des Lanceurs du CNES. Il en était le directeur au moment du développement de la fusée Ariane 5, laquelle fera son dernier vol dans 4 jours, le 16 juin prochain. Puis il revint chez SNECMA, devenue Safran Aero Engines, en tant que directeur qualité. Il fut ensuite directeur qualité du groupe SAFRAN, avant de rejoindre le programme européen Clean Sky en tant que directeur exécutif. Il est maintenant vice-président de l'Académie de l'air et de l'espace, l'AAE, et participe assidûment aux travaux de la commission énergie et environnement qui rassemble une cinquantaine d'experts.

Ce brillant cursus lui donne une incontestable légitimité pour aborder la thématique très actuelle de l'avion bas carbone et de l'avion à hydrogène. Je vous recommande également son plaisant billet d'humeur sur le voyage que j'ai découvert sur le site de l'AAE, en prenant connaissance des réflexions collectives de la Commission énergie et environnement. **Éric à toi la parole.** ■

CONFÉRENCE

Les quatre piliers de la décarbonation de l'aviation

Efficacité énergétique, carburants alternatifs, compensations légitimes et sobriété choisie

PAR ERIC DAUTRIAT, VICE-PRÉSIDENT DE L'ACADÉMIE DE L'AIR ET DE L'ESPACE

L'auteur de ces lignes tient à préciser que cet article n'engage que lui, mais aussi combien il est redevable à la Commission Énergie et Environnement de l'Académie de l'Air et de l'Espace de ses travaux approfondis, qui l'ont fortement inspiré... et qui se poursuivent.

Les propos qui suivent portent sur les moyens techniques de décarbonation du transport aérien, leurs conditions énergétiques et le contexte sociétal. Ils sont consacrés essentiellement au périmètre de l'Union européenne, sans oublier que par nature, l'aviation est mondiale et que les solutions dans la mesure du possible, doivent l'être aussi ; mais qui trop embrasse, mal étreint, et l'UE a le mérite de constituer un cadre politique cohérent.

Cependant, gardons cette idée à l'esprit en permanence : toute solution européenne devrait comporter également la façon dont elle s'articulera au reste du monde, soit pour entraîner celui-ci, soit l'inverse, soit comme brique européenne dans un ensemble qui en comportera d'autres, nécessairement diverses.

J'ometts volontairement la discussion des effets climatiques non-CO₂, le contexte réglementaire (l'OACI et CORSIA, les ETS européens, les taxes éventuelles), les comparaisons entre modes de transport, et d'autres choses encore, très importantes mais qui nous auraient entraînés trop loin. Que le lecteur veuille bien m'en absoudre.

L'INTENDANCE SUIVRA...

La question du changement climatique en général et des solutions à apporter donne lieu à des débats qui, d'un point de vue scientifique et technique, sont souvent décevants, insoucieux des ordres de grandeur et même faisant très peu appel aux données quantitatives. Deux tendances aussi peu étayées l'une que l'autre s'affrontent de façon plus ou moins explicite : le « techno-solutionnisme », qui combine optimisme béat et déni sous-jacent, et

une croyance en l'effondrement opposée à toute solution technique et enfermée dans un « no future » pour lequel toute solution réaliste au problème est à combattre, puisque... identifiant un futur et mettant ainsi en cause le fonds de commerce idéologique.

L'une des racines de cette misère du débat public est le triste sort réservé aujourd'hui à la science et à la technique. On se souvient de la formule attribuée au général de Gaulle (qui niera plus tard l'avoir jamais prononcée) : « L'intendance suivra »¹. Elle visait à l'époque les conditions financières de réalisation d'un projet politique. Réelle ou apocryphe, cette vision des choses n'a pas interdit la réalisation de grands programmes comme Ariane, Concorde, Airbus ou le nucléaire (à moins qu'elle ne l'ait, justement, permise... mais nous n'irons pas jusque-là).

Aujourd'hui, le champ de « l'intendance », ainsi conçue comme ce qui suit sans discuter, s'est déplacé. Transféré de la sphère comptable, qui est devenue au contraire valeur suprême, vers la sphère techno-scientifique. La décision politique ou la « gouvernance » précèdent, la technique est priée de suivre. Des initiatives innombrables et débridées s'engouffrent dans cette faille, laissant espérer aux plus optimistes qu'il sortira bien quelque chose de ce foisonnement.

À cela s'ajoute l'habituelle langue de bois, qui, elle, n'est pas une nouveauté mais empêche de percevoir les véritables enjeux (c'est même son rôle).

Il nous semble que la défiance d'une partie de la société envers « la science » et la « high-tech » est – entre autres causes – le miroir de cette superficialité. Avec la traduction de cette défiance dans les critiques disproportionnées dont le transport aérien fait l'objet.

Quoi qu'il en soit, il est bien évidemment indispensable que le transport aérien se décarbone, à l'instar des autres activités

1. Cf E. Dautriat, <https://academieairespace.com/documents-et-medias/lintendance-suivra>

humaines. Et aussi, qu'il élimine les autres effets « non-CO₂ » comme celui, à l'ampleur encore incertaine, des traînées de condensation. D'autant plus qu'il affiche des prévisions de croissance mondiale très fortes, qui ont pour conséquence une forte augmentation de son potentiel d'émissions, au moment même où d'autres secteurs prévoient une décarbonation rapide – promesses probablement illusoire, mais c'est une autre question.

Le problème est que le transport aérien est sans doute le secteur où la décarbonation est, techniquement, la moins aisée, du fait notamment des impératifs de masse qui sont au cœur de la définition des avions. (Mais n'est-ce pas là une vision trop aérocentrée, que contesteraient, parmi d'autres, les éleveurs confrontés aux émissions de méthane de leurs vaches ?)

L'horizon de « neutralité carbone » (concept critiquable lorsqu'il est pensé en silo, pour un secteur d'activité, mais que nous ne discuterons pas ici) est celui de 2050. C'est une convention. Toutes les raisons du monde existent, dans l'aviation comme ailleurs, pour que cette date ne soit pas respectée, il est probable que tous les décideurs le savent, mais l'urgence climatique, visible, n'incite pas à différer les choses – bien au contraire. Conservons donc cette convention sans en être totalement dupe.

ÊTRE (VRAIMENT !) CONSCIENTS DE L'URGENCE

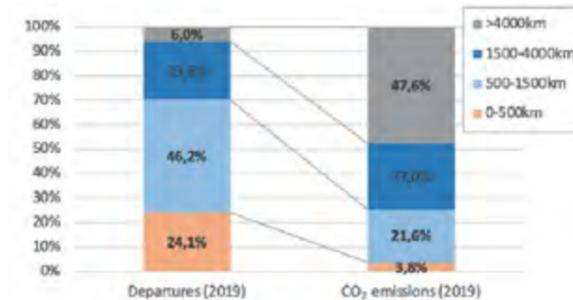
Nous sommes confrontés à la fameuse « urgence climatique ». Accorder la priorité aux solutions les moins lentes à déboucher sur un début de décarbonation devrait relever du bon sens. Toutes les solutions décrites seront longues à mettre en place, progressives. Mais plus ou moins ! Cette difficulté incontournable n'est pas propre à l'aviation : elle concerne tous les projets de décarbonation, dont la mise en application s'étend sur des décennies. Pour tous, c'est une course contre la montre. À oublier ce « facteur temps », le transport aérien ferait le lit des positions extrêmes, préconisant d'arrêter de voler « en attendant »...

S'ATTACHER À CE QUI COMPTE VRAIMENT

La décarbonation du transport aérien est chose difficile. Si ce n'était pas le cas, cela se saurait. C'est pourquoi il paraît nécessaire de se concentrer sur l'essentiel, sur **ce qui compte vraiment**.

C'est ainsi qu'on peut laisser de côté les avions électriques à batterie, inapplicables dans un avenir prévisible au-delà de quelques places et quelques centaines de kilomètres ; mais aussi les avions à piles à combustible, au périmètre d'application d'un ordre de grandeur plus large mais tout de même limités à des avions de taille « commuter » qui ne sont pour presque rien dans les émissions de CO₂ du transport aérien. Entendons-nous bien : il ne s'agit pas ici de critiquer le bien-fondé de ces projets, qui visent à la décarbonation d'une « niche » ; il suffit de ne pas se tromper d'échelle et de ne pas entretenir d'illusions sur leur impact. En outre les petits avions innovants ne préparent pas nécessairement l'avenir des gros.

2. Cf la réflexion collective de plusieurs membres de l'AAE, <https://academieairespace.com/documents-et-medias/lhydrogene-liquide-comme-carburant-des-avions-est-ce-une-bonne-piste-pour-reduire-les-emissions-de-co2>



Source: Eurocontrol think Paper #10

AMÉLIORER (ENCORE) LES PERFORMANCES, UNE OBLIGATION CONSTANTE

Venons-en donc à la catégorie des avions commerciaux, à partir donc de 100 places. Un premier sujet, qui est si incontournable, si évident que nous y consacrerons peu de lignes : la première chose à faire, quelles que soient les autres solutions à mettre en œuvre, est de poursuivre et d'accélérer l'amélioration de la performance des avions futurs, autrement dit la réduction de leur consommation grâce à des concepts évolués, qu'il s'agisse du moteur (par exemple le concept de soufflante non carénée) ou de la cellule (par exemple des ailes à grand allongement).



Le projet OpenFan de Safran et GE

Les opérations, de leur côté, peuvent aussi connaître des améliorations, notamment par une rationalisation du contrôle aérien. Tout compris, un objectif de 30% est ambitieux mais atteignable. C'est ce qu'on appelle l'efficacité énergétique. Les constructeurs aéronautiques sont donc en première ligne de cette décarbonation.

SUR L'AVION À HYDROGÈNE LIQUIDE, RESTER FROID ²

À la fois nouveau concept et nouveau carburant, il est une proposition qu'il faut aborder ici puisqu'elle occupe les esprits depuis trois ans : l'avion à hydrogène. Il s'agit ici de l'hydrogène liquide propulsif, c'est-à-dire utilisé directement comme carburant – car nous verrons qu'il existe une autre utilisation, essentielle, de cette molécule.

L'hydrogène présente deux avantages principaux : son caractère décarboné, à la condition non négligeable d'être produit à partir de sources d'énergie qui le soient elles-mêmes ; et un pouvoir calorifique rapporté à sa masse, trois fois supérieur à celui du kérosène. (Notons qu'il existe des incertitudes quant à son effet sur les traînées de condensation : effet incertain sur un phénomène mal quantifié...)

Dans ce contexte enthousiaste qui entoure l'avenir de l'hydrogène en général, pour de nombreuses applications « possibles », l'avion à hydrogène propulsif est d'abord apparu au public sous la forme d'une exigence gouvernementale française, lors de l'annonce des aides post-COVID apportées à l'aviation. Trois ans auparavant, dans la liste des applications possibles, le Conseil de l'Hydrogène, organisation internationale de lobbying, ne mentionnait même pas l'utilisation propulsive et considérait comme improbables les piles à combustible pour l'aviation. Sans doute le gouvernement n'a-t-il pas inventé cette idée tout seul – mais peu importe.

Le premier enjeu de ce concept porte donc sur les crédits publics qu'il attire, au plan national (en France notamment mais aussi en Allemagne et au Royaume-Uni) et au plan européen, avec l'initiative Clean Aviation. Crédits publics, et aussi privés. L'argent qui va dans cette R&T ne va pas ailleurs. C'est un choix, et l'idée souvent entendue selon laquelle il faut suivre toutes les pistes possibles à la fois, en parallèle, n'est valable qu'à faible niveau de maturité technologique et corrélativement, budget modeste.

Pour des raisons assez évidentes de taille des réservoirs, l'hydrogène est exclu pour longtemps des avions longs courriers – sauf à ressortir une nouvelle fois des tiroirs confortables où ils dorment les concepts d'aile volante, qui sont plus exactement des serpents de mer. Ces missions représentent pourtant la moitié des émissions de CO₂ du transport aérien (>4000 km).

Le cœur d'application possible et significative concernerait donc, si l'on veut vraiment agir sur les émissions, les courts-moyens courriers, représentés aujourd'hui par les familles A320 et B737.

L'hydrogène propulsif ne peut raisonnablement être employé sur un avion de cette taille autrement que sous forme liquide. L'hydrogène gazeux, pressurisé (généralement à 700 bar) induit des réservoirs d'une masse inapplicable. Or l'hydrogène liquide (LH₂), cryotechnique, connaît aujourd'hui peu d'applications. Il en existe aujourd'hui une seule qui puisse servir de point de référence pour un usage aéronautique : les lanceurs spatiaux, avec notamment, pour nous Européens, l'expérience d'Ariane.

Celle-ci nous apprend que, dans le système pourtant complexe d'un lanceur (c'est du spatial que vient cette notion de « système »), la cryotechnique constitue la discipline la plus critique, la plus exigeante, la plus sophistiquée et la plus coûteuse : c'est une culture globale bord/sol qu'il a fallu développer pas à pas. Or, la transposition de ce savoir-faire à l'aéronautique va, dans presque tous les cas, dans le sens d'une complexité accrue. (On notera au passage que de son côté, le secteur des lanceurs européens

envisage de réduire la place de l'hydrogène en remplaçant celui-ci par le méthane pour les premiers étages du futur, réutilisables).



Ariane 5 : étage central et étage supérieur à hydrogène liquide

Rappelons les principales caractéristiques de l'hydrogène. Liquide, il faut le maintenir à une température de 20 K : à cette température, tout est solide, sauf l'hélium. Sa densité n'est que de 70 kg/m³, ce qui conduit, à iso-énergie, à des stockages d'une taille quatre fois plus grande que pour le kérosène. La petitesse extrême de la molécule conduit à une forte tendance à fuir par le moindre défaut d'étanchéité, induisant d'importants risques d'explosion.

Avant de prétendre utiliser l'hydrogène à bord d'un avion, il faut évidemment le produire, et évidemment de manière décarbonée. Comme cette question est commune aux carburants synthétiques dont nous parlerons plus loin, nous n'en dirons pas plus ici.

Cet hydrogène ainsi produit est sous forme gazeuse. Il va falloir le liquéfier, à 20 Kelvin. Il est très peu plausible que l'hydrogène soit transporté de façon massive vers les aéroports sous cette forme liquide, compte tenu des caractéristiques citées plus haut. L'idée est donc de le liquéfier sur place, à proximité immédiate des aéroports. C'est le cas à Kourou ; l'usine d'hydrogène y est classée « Seveso seuil haut ».

Il convient ensuite d'avitailler les avions. Un réseau d'avitaillement spécifique devra donc être créé, parallèle à celui du kérosène, à cause d'une part d'une incontournable transition, d'autre part de la cohabitation avec d'autres catégories d'avion. Cet avitaillement est lui-même une opération délicate ; les inévitables incidents que créeront parfois les péripéties de la thermique, ou autres, sont à prendre en compte ; l'expérience d'Ariane apprend notamment l'importance dimensionnante des « cas dégradés ».

À Kourou, pour des raisons de sécurité, la zone de lancement est totalement évacuée pendant (et après) les opérations de remplissage. Il est tout à fait permis de postuler que ces exigences de sécurité y sont trop élevées et seront allégées pour l'aviation commerciale. Mais mieux vaudra y regarder à deux fois.

Ce carburant va maintenant remplir un ou des réservoirs. Leur taille oblige à oublier le stockage dans les ailes, pourtant bien pratique. Le réservoir doit être placé dans le fuselage, on pense aujourd'hui à l'arrière de celui-ci (des avant-projets antérieurs l'avaient situé au-dessus de la cabine), au prix d'un allongement significatif. Cette taille requise crée naturellement un problème de masse. S'y ajoute la nécessité d'une isolation très efficace puisque le carburant doit pouvoir rester à bord 24 heures sur 24 à la différence d'un lanceur, dont la protection thermique est relativement simple et légère. Un rapport établi par Mc Kinsey en 2020 pour le programme européen Clean Aviation concluait, alors même que les conditions de cette étude rendaient celle-ci peu suspecte d'un a priori négatif, à la nécessité de diviser par deux la masse de ce réservoir équipé par rapport au savoir-faire existant. En somme, l'un des enjeux sera d'éviter de voir le réservoir prendre la place des passagers.

L'adaptation du système propulsif, malgré un certain nombre de problématiques inédites, ne constitue pas, à première vue, la difficulté la plus grande, nous n'y insisterons pas, bien que celui-ci constitue l'un des thèmes de projets de R&T en cours, démonstration incluse.

On l'aura compris : un avion à LH2 constitue un concept radicalement nouveau, pour l'aéronef et pour l'ensemble du système associé. S'il voit le jour sur le plan opérationnel, il devra cohabiter, dans les flottes commerciales, avec des avions classiques, durablement ou définitivement. Or on sait combien celles-ci tendent autant qu'elles peuvent à limiter le nombre de modèles en service, pour des raisons économiques, même lorsqu'il s'agit, finalement, de choisir entre des concepts fondamentalement voisins les uns des autres, fussent-ils concurrents.

La sécurité demeure l'objectif n°1 de l'ensemble du secteur aérien. Elle passe par des exigences de certification complexes et strictes, fondées en partie sur l'expérience, une expérience qu'il faudra donc réacquérir en partant de loin ; et aussi par des dispositions opérationnelles. Assurer à l'avion LH2 un niveau de sécurité équivalent à celui du kérosène (bénéficiant de décennies d'expérience) n'est pas impossible en soi mais constitue un challenge considérable.

Enfin, l'avion LH2 est un projet essentiellement européen, le Ministre de l'Economie promettant même, en 2020, de donner ainsi une longueur d'avance à la France ou plus sérieusement à l'Europe dans le transport aérien mondial. Or il va de soi qu'un avion court-moyen courrier destiné uniquement à des lignes internes européennes n'aurait aucun sens... On sait à quel point le trafic d'une part, le marché aéronautique d'autre part, sont mondiaux. Il faut donc postuler qu'Américains, Chinois et autres se feront un plaisir d'équiper leurs centaines d'aéroports en installations de production et d'avitaillement LH2 afin d'accueillir les avions européens et leur offrir l'avantage concurrentiel visé. De même pour les processus de certification. On a vu plus haut, quoique rapidement, ce que ces infrastructures représentaient. On peut rêver... et au fond, n'est-ce pas le but même de ce concept ?

Il est tout à fait vrai qu'il est nécessaire, dans le domaine technique comme ailleurs, de savoir rêver. Mais il faut aussi éviter de promettre ce qu'on ne pourra tenir, car le risque est une perte de confiance qui viendrait aggraver encore la crise d'image que traverse le transport aérien et plus largement, l'industrie. Et ne pas détourner l'attention des décideurs des solutions plus « applicables » et disponibles à plus court terme, pour revenir au « facteur temps » cité au début de cet article.

Aujourd'hui, l'application annoncée d'un tel concept avant 2050 a tendance à se replier sur les avions de moins de 100 places, avec un rayon d'action réduit. Mais une telle application est marginale relativement à la décarbonation du secteur. Aujourd'hui, non seulement ce segment est peu émetteur compte tenu de son faible niveau de passagers-kilomètres transportés, mais de plus, il offre un faible retour sur investissement.

De plus, il faut prendre avec beaucoup de précautions la notion, souvent implicite dans la presse, d'apprentissage à faible taille et d'extrapolation à plus grande taille. Les concepteurs le savent bien : elle est souvent trompeuse, notamment lorsque des questions de volume et d'architecture sont en cause.

L'HYDROGÈNE, OUI ! MAIS INCORPORÉ DANS LES CARBURANTS « DROP-IN »

Il nous faudrait cependant croire coûte en coûte en l'avion LH2, le faire advenir par tous les moyens, s'il était la seule solution de décarbonation. Mais ce n'est pas le cas ; nous avons déjà indiqué que de toute manière, les longs courriers ne pourraient s'adapter à une telle solution avant très longtemps ; or ceux-ci contribuent pour moitié aux émissions du transport aérien, et constituent même, si l'on peut dire, son cœur de métier, le voyage au loin, où l'avion est non substituable (ce qui ne signifie pas qu'il le soit aisément pour de plus courtes distances ! mais c'est une autre histoire). Il faut donc, ne serait-ce que pour eux, chercher autre chose, à savoir : les carburants durables (ou SAF). Inutile de dire que ceux-ci s'appliquent également fort bien aux avions courts et moyens courriers.

En bon français, on les qualifie de « drop-in », à savoir qu'ils se substituent au kérosène classique sans modification du matériel ; ce n'est pas tout à fait vrai, mais presque.

Ces carburants se décomposent en deux familles, dont nous allons donner un aperçu sans entrer dans les détails de leur chimie : les biocarburants, qui incorporent le CO₂ provenant de la biomasse, et les carburants synthétiques, dont le CO₂ constitutif provient d'un captage atmosphérique ; les premiers étant en avance sur les seconds. Ces deux familles bénéficient aux Etats-Unis d'un très important soutien public, dans le cadre du programme IRA lancé par Joe Biden. De son côté, l'Union européenne vient d'adopter la directive Refuel EU, qui vise à instaurer une part minimale de carburants alternatifs, progressive, dans l'avitaillement des avions en Europe : partant évidemment d'assez bas, et suivant une trajectoire exponentielle, le niveau requis est de 70% en 2050, dont au moins 35% de carburants synthétiques.

Cependant, les biocarburants suscitent beaucoup de discussions quant au volume qu'ils pourront assurer en général, et en particulier dans l'aérien, d'autant plus que les besoins sont affichés comme en croissance permanente. Nous passerons sur les caractéristiques de ceux-ci, même ceux, les seuls à considérer aujourd'hui, dits de « seconde génération ». Une littérature abondante existe sur le sujet.

Nous noterons seulement, parce qu'on en parle trop peu, que l'efficacité de ces biocarburants est améliorée significativement si on fait intervenir... l'hydrogène dans leur élaboration. Ainsi, l'ajout de 1 tonne d'H₂ permet théoriquement d'économiser 16 t de biomasse ; dit autrement, l'ajout de 18% d'H₂ permet de diviser par 2 la quantité de biomasse nécessaire par unité de carburant produite.

Quoi qu'il en soit, l'analyse de l'Académie des Technologies publiée dans un rapport de mars 2023³ limite la prévision de capacité pour le transport aérien à environ 20% des besoins 2050 de celui-ci (soit 8 Mt/an). On a vu plus haut que l'Union européenne, de son côté, poussait jusqu'à 35% « au maximum » (puisque les carburants synthétiques sont censés couvrir « au moins 35% » d'un total de 70%) ; toutefois cette incertitude ne change pas fondamentalement la donne globale des SAF.

Le reste du chemin à parcourir, quel qu'il soit – et il est considérable dans tous les cas – repose donc sur les carburants de synthèse. Ceux-ci sont issus de la combinaison d'H₂ issu en principe de l'électrolyse, et de CO₂ capturé dans l'atmosphère (procédé Fischer-Tropsch, avec quelques variantes intéressantes). La capture CO₂ et la synthèse du carburant nécessitent une dépense d'énergie voisine de celle de la liquéfaction LH₂. La plus grande part du besoin, dans les deux cas, provient de l'électrolyse produisant l'H₂. Cette réalisation de « e-fuels » est techniquement au point, reste à en répandre l'industrialisation et à en réduire le coût. À terme, les estimations varient mais le carburant synthétique risque d'être plusieurs fois plus cher que le kérosène fossile actuel (ce dernier ayant vocation à augmenter à mesure que l'extraction se fera plus difficile, sans parler des taxes éventuelles).

L'ÉTRANGE SOUHAIT DE « ZÉRO ÉMISSION » EST SANS FONDEMENT

Un argument entendu parfois est que la neutralité du cycle carbone, celle que permettent les SAF (Sustainable Aviation Fuels), c'est bien, mais que « zéro émission », apanage de l'avion électrique et de l'avion à hydrogène propulsif, c'est mieux. « Ne rien émettre » (aucun GES), voilà ce que serait le vertueux objectif final. Étrange désir de pureté ! Outre le fait que cette assertion peut être déstabilisatrice vis-à-vis des investisseurs à venir dans la filière SAF, il faut bien dire qu'elle ne repose sur aucun argument scientifique. Réémettre du CO₂ qu'on vient de capturer et ainsi de suite, a le même résultat qu'un cycle entièrement décarboné. Et même, on peut craindre qu'un tel raisonnement appliqué

étroitement à un utilisateur (« moi, je n'émetts rien ») ne conduise à se désintéresser de l'origine de l'énergie utilisée, laissant à d'autres, en amont, cette responsabilité. Ce qui irait à l'inverse de l'objectif recherché, qui passe par l'analyse du cycle de vie.

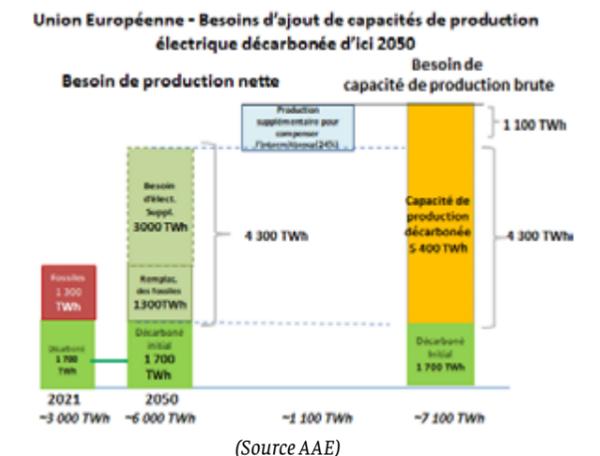
IL FAUT CHOISIR... ET CHOISIR LES SAF, NOTAMMENT LE CARBURANT SYNTHÉTIQUE

Parvenu à ce point, l'honnêteté nous commande de conclure nettement de tout ce qui précède (et qui n'échappe pas à une part d'appréciation personnelle) que la solution qu'il faut développer pour décarboner l'aviation réside dans les SAF. Outre, on l'a dit, l'ardente obligation d'améliorer sans cesse la consommation de carburant par la technologie aéronautique. Et non dans l'hydrogène propulsif. Voilà, c'est dit !

On peut chercher l'œcuménisme en admettant qu'un jour... les obstacles ayant été surmontés, l'hydrogène, tout de même, est une solution élégante... Pourquoi pas, si cela préserve la part de spéculation qui nous est nécessaire à tous sans détourner les forces vives de « ce qui compte vraiment » ?

LA SOCIÉTÉ EST AU PIED DU MUR DE L'ÉNERGIE

S'intéresser au « e-fuel » conduit immédiatement à s'inquiéter de la disponibilité d'énergie verte, que nous avons déjà évoquée à propos de l'hydrogène-carburant. On constate vite que c'est là la question essentielle. D'une part pour la satisfaction des besoins globaux de la société, d'autre part pour la proportion que le Transport Aérien peut espérer en capter.



Au niveau global en effet, si l'on considère les prévisions de l'Agence Internationale de l'Énergie⁴, le besoin européen de nouvelles capacités de production d'électricité décarbonée d'ici 2050 est de plus de 5000 TWh/an, soit le triple des capacités actuelles (n'oublions pas que celles-ci doivent beaucoup à l'hydraulique, qui ne peut plus croître significativement en Europe). Concernant l'emprise résultante, en supposant dans

3. Académie des Technologies, <https://www.academie-technologies.fr/publications/la-decarbonation-du-secteur-aerien-par-la-production-de-carburants-durables-rapport-et-avis>

4. Scénario NZE de l'AIE, qui paraît le plus cohérent avec les besoins de décarbonation de la société européenne, mais qui suppose la réduction d'un quart de la consommation totale d'énergie primaire, tous vecteurs confondus, par l'efficacité énergétique et les évolutions d'usages.

l'Union Européenne 20% de nucléaire, 40% d'éolien offshore et 40% de solaire, il faudra construire plus de 100 tranches EPR, plus de 1000 champs d'éoliennes offshore du type Saint Nazaire et plus de 10 000 km² de champs photovoltaïques. Ressources financières à mobiliser, disponibilité du savoir-faire à l'échelle nécessaire, acceptation sociale, etc, les difficultés ne manqueront pas, c'est le moins qu'on puisse dire.

C'est un véritable « mur de l'énergie » à escalader. Il ne semble pas que dans leur ensemble, les dirigeants politiques et économiques prennent la mesure de cette perspective, ou plutôt, s'ils l'ont prise, qu'ils tentent de la faire partager. Peut-être « notre » problème de la décarbonation du transport aérien, acteur parmi d'autres, mais plus que d'autres sous les feux de la rampe, y contribuera-t-il en jouant le rôle de « canari dans la mine »⁶ !

LA DÉCARBONATION DU TRANSPORT AÉRIEN EST AUSSI AU PIED DE SON PROPRE MUR ET ATTEND LE MAÇON

Reste que, si on parvient à sécuriser la mine, il faut quand même s'occuper du canari, ne serait-ce que par gratitude. Si l'on vise 100% de SAF, dont 20% des biocarburants (eux-mêmes « hydrogénés » comme on l'a vu plus haut) et le reste en e-carburants, on arrive à un besoin de plus de 900 TWh/an soit 16% des besoins totaux de l'économie européenne en 2050. C'est bien plus que la part de l'aviation dans les émissions de CO₂ (même à cette date, progression éventuelle du trafic incluse) et aussi, dans le PIB – même en 2050. Cette proportion élevée est due au fait que la transformation d'électricité en carburant chimique (qu'il s'agisse, du reste, d'hydrogène-carburant ou de SAF) a un rendement énergétique modeste – environ 50% - ce qui désavantage l'avion par rapport à la voiture électrique, par exemple.

Le coût d'investissement correspondant serait de l'ordre de 1,25 milliard d'euros par TWh / an. Ce qui fait un total, dans l'hypothèse ci-dessus, supérieur à 1000 milliards « d'ici 2050 », répartis, donc, sur environ 25 ans.

Naturellement, ce besoin diminue si :

- on est plus optimiste en matière de quantité de biocarburants disponibles,
- on admet d'avoir recours partiellement à des importations de SAF (qui ont le mérite d'être facilement transportables, comme le kérosène), malgré leurs inconvénients prévisibles
- on consent à ne pas décarboner à 100% l'aviation en 2050 : disons à 70% (ReFuel EU)
- on se prépare à un scénario de relative sobriété d'usage.

En additionnant ces différentes possibilités, certes incertaines mais qu'est-ce qui est certain à horizon de trente ans, on peut au moins diviser par deux les 16% précités, selon les hypothèses prises. Et donc, le coût d'investissement correspondant.

Ajoutons un paramètre : la couleur ! On sait que l'hydrogène a la particularité de se colorer... selon la façon dont il est obtenu. Hydrogène gris, hydrogène vert, on connaît. Il pourrait exister

aussi un hydrogène turquoise à base de méthane et un hydrogène blanc dans des gisements naturels. Ceci pourrait changer la donne énergétique et économique des SAF (ou aussi, si l'on y tient, du LH2 propulsif). À suivre !

En attendant, quelles que soient les hypothèses retenues dans la petite liste qui précède, le besoin en valeur absolue de capacités de production d'électricité décarbonée pour l'aviation reste considérable dans tous les cas et ne sera atteint qu'au prix d'une mobilisation financière et industrielle majeure.

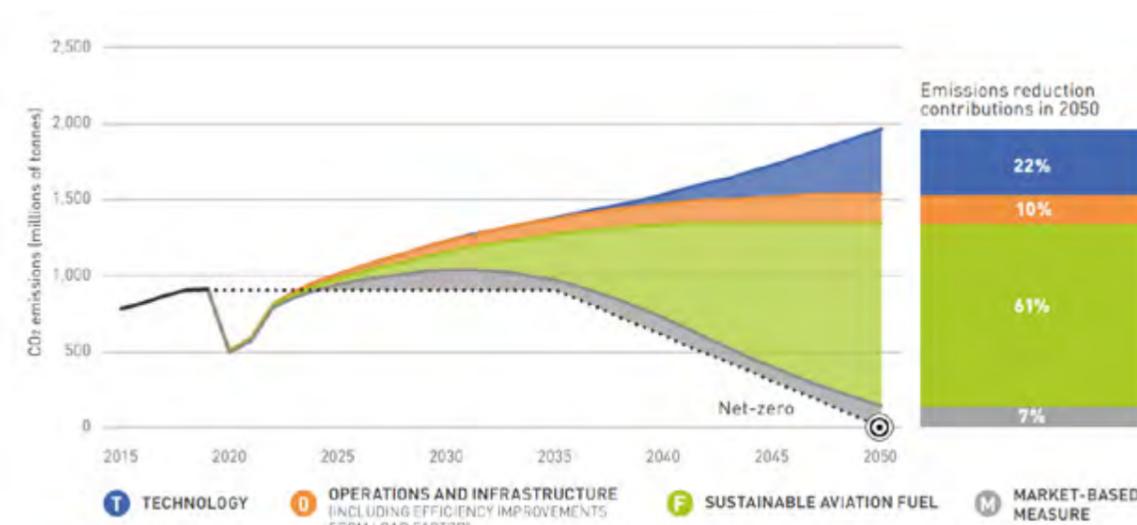
UNE DÉCARBONATION INCOMPLÈTE DU SECTEUR PEUT ÊTRE COMPENSÉE PAR LES PROGRÈS DE LA SÉQUESTRATION DU CARBONE

Les hypothèses ci-dessus de modération du besoin énergétique ne sont pas anodines, en particulier la troisième : l'option selon laquelle la décarbonation de l'aviation ne serait pas totale et où il resterait donc du kérosène fossile en proportion significative. On a vu que le scénario ReFuel EU visait à réglementer une proportion de 70% de SAF en 2050. Soit 30% de kérosène fossile. Ce n'est qu'un ordre de grandeur... mais comment alors assurer la tant vantée « neutralité » ? Eh bien, par les compensations carbone, prises en compte par tous les organismes de la profession.

Nous n'entrons pas ici dans le détail de ces mécanismes, qu'il s'agisse du système CORSIA de l'OACI ou des ETS. Soulignons simplement que les compensations actuelles sont fortement critiquées, avec, pour emblème, les fameux financements de plantation de forêts... ou de non-destruction de forêts. Manque général de lisibilité, conflits avec les usages alimentaires, cas fréquents où le projet financé par la compensation aurait eu lieu de toute façon, décalage dans le temps, compensation d'une émission certaine par une absorption incertaine (car à venir et sujette à aléas), etc. Sur un plan éthique, les compensations sont parfois perçues comme un « commerce des indulgences ».

Si l'aviation doit faire 30% de son chemin de décarbonation à travers ces pratiques, elle risque d'amplifier encore les critiques émises à son encontre.

En revanche, une autre solution existe : la capture et la séquestration du CO₂ (CCUS en anglais), qui suscite un intérêt grandissant. S'il se confirme que les capacités d'enfouissement sous diverses formes sont de grande ampleur, et que les coûts correspondants sont modérés, alors rien n'empêche d'envisager que le transport aérien finance « sa part » de cette capture, proportionnellement à ses émissions. Le GIEC considère maintenant le CCUS comme une condition pour atteindre les objectifs de limitation de réchauffement. Il n'y a aucune raison de mettre en cause le bien-fondé de ce système. Certains mettent en avant les risques de fuite de carbone... mais il ne s'agit que de CO₂, pas de plutonium ! D'autres lui opposent des considérations morales : un CCUS trop facile, en somme, dissuaderait de réduire réellement les émissions à leur source. Peut-être... et où serait le péché ? Cependant on ne peut sérieusement se placer dans la



Scénario de décarbonation de l'ATAG (Air Transport Advisory Group): la quantité de kérosène fossile « résiduel », à équilibrer par des compensations, risque d'être nettement plus élevée que ce qui est indiqué ici. (NB : le pourcentage des SAF n'est pas comptabilisé de la même façon que dans notre article).

perspective où tout continue comme avant, sauf qu'on séquestre tout le CO₂ émis. C'est trop ! Mais si l'on en reste, raisonnablement, aux émissions les plus difficiles à éliminer, après démonstration que tout le possible a été fait, alors la compensation par CCUS des 30% de kérosène fossile de l'aviation trouve sa légitimité.

METTRE EN VALEUR L'AVIATION POUR UN FUTUR ARBITRAGE POLITIQUE

Pour en revenir au besoin « transport aérien » d'électricité décarbonée (pour les SAF), il faut être conscient que celle-ci constituera une ressource rare, ou du moins raréfiée par rapport à la situation actuelle des énergies fossiles. Il est peu envisageable que sa répartition soit effectuée par la seule main invisible du marché. Une intervention publique, d'une manière ou d'une autre, paraît inévitable pour effectuer des arbitrages. (De même pour l'utilisation de la biomasse). Le transport aérien devra donc faire la preuve de son « utilité relative », économique et sociale, par rapport à d'autres « usagers » de ces énergies futures. Il n'y a pas lieu de s'en inquiéter outre mesure. L'utilité du transport aérien est immense. Mais il faut être capable de faire partager cette conviction ; en particulier, de mettre en valeur non seulement son rôle économique mais surtout la place que tient le voyage lointain dans l'ouverture au monde, dans nos consciences, si essentiel à notre civilisation qu'on finirait presque par l'oublier !

Il faut aussi être capable d'en admettre les variations en fonction des usages, et de réfléchir à ce que peut devenir un transport aérien empreint de plus de sobriété.

OSER PARLER DE LA SOBRIÉTÉ ET L'ANTICIPER

Tandis que l'efficacité porte sur la réduction de la consommation d'énergie pour une utilisation donnée, la sobriété concerne la réduction et l'optimisation de certains usages. Voler moins ? Voler mieux ? Il est impossible d'éluder cette question pour l'avenir. Ne serait-ce que parce que l'augmentation, non seulement

du prix du billet lié à celui du carburant (cherté des SAF), mais surtout de l'énergie en général et par conséquent de tout, aura des répercussions inévitables sur la consommation.

Notons au passage qu'il est difficile de prédire le prix du e-carburant en 2050, et même dans la période intermédiaire. Il diminuera progressivement. Un prix au moins double du prix moyen du kérosène d'aujourd'hui (>2€/l au lieu de 1) semble être une anticipation raisonnable. L'effet sur le prix du billet n'est pas très considérable.

Mais il y a peut-être plus important que cet effet mécanique. Alors même que la possibilité du voyage « lointain », pour lequel l'avion n'est pratiquement pas substituable et devrait rester aussi démocratique que possible, il n'est plus guère possible d'éluder la question de ce qui compte vraiment, sur le plan social cette fois. Comme tous nos comportements, la décision de prendre l'avion inclut du superflu et de l'inutile. La société européenne devra choisir entre l'ébriété actuelle qui préside à ses modèles mentaux et une sobriété choisie. L'aviation fera partie de cela. Non par un rationnement quelconque. Mais par une évolution des mentalités, progressive, déjà visible. Rien n'est immuable et nos pratiques actuelles ne datent que de quelques décennies.

En fait, la sobriété aérienne n'est pas tant un levier supplémentaire de décarbonation qu'un cadre nouveau, un environnement socio-politique dont il faut essayer d'anticiper les contours. Il serait bon que le secteur aérien dans son ensemble s'en saisisse avec sincérité, comme quelques acteurs l'ont déjà fait, plutôt que de considérer la seule perspective de la croissance la plus élevée possible, à l'infini. C'est juste une question de bon sens.

Adopter une telle attitude ne peut qu'aider à faire comprendre que la même sincérité préside aux actions de décarbonation à entreprendre et à l'appel aux lourds investissements correspondants. ■

6. Selon l'expression de Xavier Bouis, président de la commission Energie-Environnement de l'AAE

CONFÉRENCE

Soleils éclipsés Supersonique Concorde 001, couronne solaire et exoplanètes de Pierre Léna

PAR BRUNO CHANETZ DIRECTEUR DE RECHERCHE À L'ONERA, PRÉSIDENT D'ALUMNI-ONERA

Le 13 décembre 2023, Pierre Léna, professeur émérite à l'Observatoire de Paris et à l'université Paris Cité, membre de l'Académie des Sciences, a donné une conférence au restaurant du Sénat, grâce au soutien du sénateur Stéphane Demilly, qui nous a accueilli y chaleureusement accueillis. La soirée a débuté par un apéritif dans le salon Vaugirard et s'est poursuivie pour la conférence et le dîner dans le salon Pourpre.



Pierre Léna / Bruno Chanez et Stéphane Demilly



Marie-Lise Chanin et Eric Dautriat / à g. Nicolas Rivière, membre du CA Alumni-ONERA



C. Gazeau, V. Godec, J.-Ph. Régnault et le GDAJ. Sabéné
Ch. Halconrui, B. Chanetz et C. Béseau



DISCOURS DE STÉPHANE DEMILLY, SÉNATEUR DE LA SOMME

Mesdames, Messieurs, Bonsoir à tous,

Je suis très heureux de vous accueillir au Palais du Luxembourg et naturellement je remercie le Président Bruno Chanetz pour l'organisation de ce Dîner Conférence, ainsi que le Professeur Pierre Léna pour sa présence.

Le thème de cette rencontre va mêler aéronautique et astrophysique... sachant que je suis plus à l'aise sur le premier thème...

L'aéronautique me tient bien sûr particulièrement à cœur, en tant que membre de la Commission de l'Aménagement du territoire et du Développement durable au Sénat, mais aussi et surtout en tant

que Sénateur de la Somme, et ancien député-maire de la ville d'Albert, berceau de l'industrie aéronautique française grâce à Henry Potez.

Vous l'avez probablement constaté, les discours « anti-aérien » ou « avion-bashing » se sont durcis ces dernières années.

Même si la réalité de l'impact environnemental de ce moyen de déplacement est inversement proportionnelle à la place qu'il occupe dans le débat public.

Je le rappelle souvent au cours de mes interventions parlementaires, encore tout récemment en tant que Rapporteur du Projet de loi de finances pour le transport aérien.

Monsieur le Professeur, votre ouvrage porte notamment sur le Concorde 001, cette prouesse industrielle et technique.

Cet avion mythique, au-delà d'être un symbole de fierté nationale, est et restera un exemple marquant fort de la technologie ultramoderne... et ce malgré son cinquantenaire !

Il a permis la diffusion des savoirs et des équipements dans l'industrie aéronautique française, un phénomène qui s'est révélé essentiel pour le succès du programme Airbus.

Aujourd'hui, l'industrie aéronautique fait face au défi incontournable de la transition écologique, et a un rôle central à jouer dans la décarbonation du trafic aérien mondial.

Nos politiques publiques doivent soutenir cette industrie d'excellence et son savoir-faire, et favoriser ses capacités de rebond et d'innovation.

Tout relâchement en la matière se traduirait par des transferts d'emplois et une perte conséquente de parts de marché.

Au vu de la crise actuelle et des tensions pesant sur les entreprises de la filière, ce soutien doit être massivement amplifié. Il en va de notre souveraineté industrielle, de nos emplois et de notre économie.

Je vous souhaite un excellent colloque, et remercie à nouveau les intervenants pour leur présence.

Bonne soirée à tous !



Stéphane Demilly prononçant son discours

DISCOURS DE BRUNO CHANETZ, PRÉSIDENT D'ALUMNI-ONERA



Bruno Chanetz prononçant son discours. crédit N. Rivière

Monsieur le sénateur, Monsieur l'académicien, mon général, Mesdames, Messieurs, chers Amis,

J'ai quelques scrupules à prendre la parole, compte tenu du retard pris à cause de la technique. Cependant c'est la dernière fois que je vous impose un discours en tant que président d'Alumni-ONERA. L'année 2024 verra en effet l'élection d'un nouveau président.

Merci cher Stéphane pour votre accueil dans ce salon Pourpre, où nous étions déjà réunis – grâce à vous – le 12 juin dernier, pour une conférence d'Eric Dautriat, vice-président de l'Académie de l'air et de l'espace, qui est revenu ce soir, pour cette conférence de Pierre Léna. Mais avant de vous passer la parole, cher Pierre, permettez-moi d'évoquer, comme de coutume, le semestre écoulé.

Les 21 et 22 septembre notre colloque annuel Meudonnais s'est déroulé, sous la pluie durant les 2 jours, ce qui nous a permis de vérifier la bonne étanchéité du Hangar Y ! La plupart des acteurs Français du domaine du NewSpace étaient réunis. Le premier jour, nous avons eu l'honneur d'accueillir le général Philippe Adam, commandant de l'espace, et le général Sabéné, chef d'état-major du commandement territorial de l'Armée de l'air et de l'espace, lequel a brillamment introduit le colloque. Je le remercie de sa fidélité en étant de nouveau avec nous ce soir. La seconde journée a été introduite par Fabienne Casoli, présidente de l'Observatoire de Paris-Meudon, Philippe Baptiste, président du CNES et Bruno Sainjon, président de l'ONERA. Les enregistrements de toutes les sessions sont disponibles sur coworking channel grâce à Rémi Capoulade et Meriem Belazouz ici présents et que je remercie de nouveau.

Sont également présents ce soir le président du festival STAR's UP François Desgardin, le vice-président Jean-Philippe Régnault et Vincent Godec. Tous les trois firent partie du conseil scientifique du colloque. Avec ce festival annuel, ils nous offrent une belle occasion de faire rayonner la science et je remercie également nos autres amis du festival, présents parmi nous aujourd'hui : Gilles Capelle, qui veille sur la régie, Christophe Gazeau, de Hussar Academy, qui a en charge l'Hackathon concomitant au colloque. Merci également à Philippe Castera, de Dassault systèmes, notre trésorier qui s'est fort investi dans la préparation de cet évènement. Ils sont tous réunis ce soir autour d'une même table avec Olivier Piepsz, président et co-fondateur de

Prométhée, l'opérateur newspace de nano-satellites pour l'observation de la terre. Ils vont réfléchir au prochain évènement d'autant qu'ils ont été rejoints par Nicolas Rivière, membre du CA d'Alumni-ONERA et directeur du programme « systèmes orbitaux » à l'ONERA.

Le 17 octobre dernier, nous avons abordé les technologies quantiques et leurs applications dans le secteur aéronautique, spatial et de défense, au cours d'une table ronde, la onzième réalisée en partenariat avec le cabinet de stratégie international Oliver Wyman. Aussi je remercie, Eric Ciampi d'accueillir ces tables rondes au siège de l'antenne parisienne qu'il dirige.

Enfin la semaine dernière, les 7 et 8 décembre, nous avons organisé un colloque intitulé Eiffel 2023, dans le cadre magnifique de l'Ecole des Beaux-Arts, en partenariat avec l'école nationale supérieure d'architecture de Paris-Malaquais et la société d'encouragement pour l'industrie nationale, présidée par Olivier Mousson, conseiller-maître à la cour des comptes, que je remercie de sa présence ce soir. Je remercie Alexandre Navarro, secrétaire général pour la commission nationale française pour l'UNESCO, à la fois d'avoir parrainé ce colloque dans le cadre du centenaire Eiffel et d'être avec nous ce soir. La table ronde de clôture, animée par Marie-Claire Coët, accueillait huit personnalités dont deux sont présentes : Stéphane Demilly et Véronique Brunet.

Parmi nos invités d'honneur, je voudrais aussi mentionner la présence de Clarisse Angelier, directrice générale de l'Agence Nationale de Recherche et Technologie et de Jean-Marc Flesselles, directeur scientifique chez Saint-Gobain, venu grâce à un de nos membres, Jean-Pierre Dufitumukiza, qui a rejoint ce groupe industriel l'année dernière. C'est grâce au PC de Jean-Marc Flesselles, que nous avons pu surmonter l'éternel conflit entre MAC et vidéo-projecteur. Enfin nous avons également l'honneur d'accueillir Marie-Lise Chanin, votre consœur, Cher Pierre Léna, à l'Académie des sciences.

Il est temps maintenant de vous laisser la parole. Il n'est presque pas besoin de vous présenter, tellement vous êtes connus de nos fidèles. Vous étiez avec nous à Hendaye en 2021, à Loudun en 2022 et à Saumur cette année. Je rappelle seulement que vous êtes ancien élève de l'Ecole Normale Supérieure de la rue d'Ulm, professeur émérite à l'Observatoire de Paris et à l'université Paris Cité. Vous êtes commandeur de la Légion d'honneur. Vous allez nous livrer ce soir un témoignage vécu à partir de documents de première main sur le vol Concorde 001 en 1973, dont vous êtes à l'origine. Cher Pierre à vous la parole.

On trouvera en fin de numéro une recension sur l'ouvrage dont était issue cette magnifique conférence. Beaucoup d'auditeurs étaient venus avec ce livre qu'ils se sont fait dédicacer par Pierre Léna, quelquefois en deux exemplaires pour offrir.



À gauche R. Capoulade, M. Belazouz, Michel et Martine Guétin, Corinne Dollfus ; à droite Florence et Jean Letourneur, M.-C. Coët, V. Brunet



À gauche E. Carly, J.-P. Dufitumukiza ; à droite T. Leygonie, A. Leygonie et C. Aubert.



À gauche Ch. Béseau et O. Voreux



Pierre Léna (crédit V. Brunet) et l'assistance



À gauche G. Capelle et F. Desgardin ; à droite J. Peter, J.-Ph. Regnault et O. Piepsz



C. Béseau, Ch. Halconruy ; P. Léna et Ph. Castera



C. Aubert et P. Léna



Ph. Tixier face C. Angelier, P. Léna face à E. Dautriat



M.-L. Chanin, O. Mousson face à B. Chanetz, puis A. Navarro et J.-M. Flesselle

PRÉSENTATION DU PROJET HYPATIE PAR BENJAMIN RIGAUD



Benjamin Rigaud

Daniela Carneiro-Fuentes de León y León, philanthrope, donatrice de maintes œuvres charitables et mécènes de nombreuses institutions, dont Alumni-ONERA, avait invité plusieurs personnes à la soirée, dont Benjamin Rigaud, élève de Sciences-Po Paris, qui après la conférence de Pierre Léna, lui a offert une œuvre d'art encadrée en rapport avec le projet Hypatie pour la Tour Eiffel. Benjamin Rigaud était accompagné de Sahiba Tiguercha, également étudiante à Sciences-Po Paris et de Caroline Aubert, présidente d'ELYKSIR, société qui accompagne les décideurs à l'Europe et à l'International.

Le projet HYPATIE est soutenu par Laurence Bertrand Dorléac, présidente de la Fondation Nationale des Sciences Politiques (FNSP), Nathalie Drach-Temam, présidente de Sorbonne Université et Françoise Combes, vice-présidente de l'Académie des Sciences.

Issue de Sorbonne Université, cette initiative vise à enrichir la liste des 72 savants figurant au 1er étage de la Tour Eiffel en y intégrant les noms de 40 femmes scientifiques au 2e étage.



À l'origine de cette démarche, Benjamin Rigaud, président de l'association Défis Sorbonne, a donné vie à cette idée, portée avec enthousiasme par l'association Femmes et Sciences, sous la présidence éclairée de l'astrophysicienne Isabelle Vauglin. Sous la direction de Sandrine Aragon, agrégée de Lettres spécialisée dans l'accès des femmes à la culture en France, un comité d'experts des trois facultés de Sorbonne Université a dévoilé cette liste de femmes scientifiques lors de la conférence intitulée "Les Éclipsées : femmes scientifiques ou la face cachée de l'Histoire", qui s'est déroulée lors de l'éclipse du 25 octobre 2022 à l'Observatoire de Paris, en présence de Marie Christine Lemardeley, Adjointe à la Maire de Paris. L'œuvre officielle issue de ce projet fut remise à des élues de Paris et à des personnalités académiques, en marge de la remise du Prix Nobel de la Paix au mouvement "Femme Vie Liberté" à travers la physicienne Narges Mohammadi. C'est un exemplaire encadré qui a été remis à P. Léna.



Benjamin Rigaud, Pierre Léna, Bruno Chanetz et Sahiba Tiguercha

CAHIER

Compte-rendu du colloque en hommage à Denis Papin à Saumur le 26 mai 2023

PAR BRUNO CHANETZ DIRECTEUR DE RECHERCHE À L'ONERA, PRÉSIDENT D'ALUMNI-ONERA

Ce colloque s'est déroulé au pôle régional de formations de l'université d'Angers – campus de Saumur, où nous étions accueillis par Jackie Goulet, maire de Saumur et président de l'Agglomération Saumur Val de Loire et Laetitia Saint-Paul, députée de la 4^e circonscription du Maine-et-Loire, qui ont successivement prononcé de sympathiques mots de bienvenue (transcription littérale non communiquée). Puis Jacques Rao, Bruno Chanetz et Piotr Graczyk ont introduit le colloque.



Jackie Goulet, Laetitia Saint-Paul, Jacques Rao, Bruno Chanetz et Piotr Graczyk

DISCOURS DE JACQUES RAO, CONSEILLER, COMMISSION NATIONALE FRANÇAISE POUR L'UNESCO (CNFU)

Madame la Députée, Monsieur le Maire, M. le Président d'Alumni ONERA, cher Bruno, Mesdames et Messieurs en vos titres et qualités, Mesdames et Messieurs,

1. Je suis très heureux de représenter la CNFU à cette séance d'ouverture et de vous transmettre un message d'amitié et de remerciements pour votre invitation de la part de son Président, son excellence l'ambassadeur Yves Saint-Geours et de son Secrétaire général Alexandre Navarro qui aurait souhaité être des vôtres ce matin.

2. C'est toujours un vrai plaisir de revenir à Saumur, cette ville qui a une double affiliation avec l'UNESCO comme vous le savez : d'une part elle est située dans le magnifique périmètre du Val de Loire entre Sully-sur-Loire et Chalonnes-sur-Loire classé au patrimoine mondial de l'humanité depuis l'an 2000 ; d'autre part elle accueille la prestigieuse Ecole nationale d'équitation et son Cadre noir où est exercé l'équitation de tradition française également inscrite par l'UNESCO en 2011 sur la liste représentative du patrimoine culture immatériel. C'est dire toute la richesse du patri-

moine qui est réuni dans cette belle cité au milieu des châteaux de la Loire.

3. Mais l'UNESCO ce n'est pas que la culture et l'éducation, c'est aussi la science, le « S » de son sigle qui couvre toutes les sciences, exactes et naturelles, sociales et humaines, comprises au sens le plus large. C'est pourquoi la CNFU est très heureuse de parrainer aujourd'hui le Colloque que vous organisez en hommage à Denis Papin (1647-1713), ce grand inventeur, mathématicien et physicien qui incarne le génie scientifique français. Nous savons tous qu'il inventa la première machine à vapeur, l'autocuiseur et le digesteur, et que ses travaux contribuèrent considérablement par la suite au progrès industriel dans le domaine des transports, du rail, de la navigation et de l'aviation, de l'électricité et du nucléaire. Je ne m'étendrai pas là-dessus puisque d'éminents spécialistes, beaucoup plus qualifiés, interviendront tout au long de cette journée à ce sujet et le feront bien mieux que moi.

4. Qu'il me soit toutefois permis de souligner que Denis Papin était un « Européen » avant l'heure. Membre de l'Académie des sciences, il fut également membre de la Royal Society de Londres et membre de l'Académie des sciences de Berlin, sans oublier son rôle dans la fondation de l'Académie des sciences de Venise. Bref,

au-delà des vicissitudes politiques et religieuses de son époque, il aura démontré que les sciences n'ont pas de frontières, que rien ne peut freiner la recherche scientifique ni étancher la soif de découvertes innovantes sinon révolutionnaires. Par ses nombreux voyages et séjours à l'étranger, il aura côtoyé les plus grands esprits de son temps (Boyle, Huygens, Leibniz, Newton, Savery), partagé ses connaissances scientifiques et développé des liens avec de brillants savants, et chercheurs comme lui, d'autres nations.

5. Or, le développement d'une communauté scientifique internationale et solidaire, la transmission des savoirs aux générations futures, le partage des connaissances scientifiques pour le bien de tous, et la mise des sciences au service du progrès universel, sont précisément au cœur du mandat de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, les sciences et la culture (UNESCO). Ceci explique le choix de la CNFU de soutenir votre Colloque qui nous aidera à mieux comprendre la portée visionnaire des découvertes de Denis Papin et le rapprochement que l'on peut faire entre sa démarche scientifique et l'esprit des idéaux de l'UNESCO, à plus de trois siècles d'intervalle.

6. C'est dans ce même esprit d'ouverture et de partage que la Conférence générale de l'UNESCO a adopté à l'unanimité de ses 193 pays membres, en 2021, une Recommandation sur une science ouverte, afin de permettre un plus grand accès à tous aux connaissances scientifiques. C'est aussi sous l'égide de l'UNESCO qu'a été établi en 1976 le Centre international de mathématiques pures et appliquées (CIMPA) à Nice, un centre de catégorie 2 affilié à l'UNESCO avec un rayonnement international. Enfin, il y a 25 ans était créé le Prix international L'Oréal-UNESCO pour les Femmes et la Science afin d'aider à assurer une meilleure parité des genres dans les carrières scientifiques.

7. Je terminerais en signalant quelques nouvelles initiatives de l'UNESCO dans le domaine qui nous intéresse aujourd'hui : tout d'abord (a) le Conseil exécutif de l'Organisation vient de proposer, cette semaine, la proclamation de 2025 comme Année internationale des sciences et technologies quantiques par l'ONU ; ensuite (b) il a décidé de créer à Shanghai un nouvel Institut de catégorie 1 de l'UNESCO pour les sciences, la technologie, l'ingénierie et les mathématiques (STIM), mieux connu sous son sigle anglais (STEM) ; enfin (c) il s'est engagé à renforcer l'application de la Recommandation concernant la science et les chercheurs scientifiques qui avait été adoptée en 2017 par la Conférence générale.

8. Ainsi, les mathématiques, la recherche et l'innovation si chers à Denis Papin ont de beaux jours devant eux. Comme l'a si bien dit le sociologue Edgar Morin, qui vient de célébrer ses 100 ans il y a peu à l'UNESCO, et je le cite : « *Qu'y a-t-il à l'origine des grandes inventions ? Des rêves !* ». Alors oui, continuons à rêver avec Denis Papin lors des travaux de cette rencontre à laquelle je souhaite plein succès !

DISCOURS DE BRUNO CHANETZ, PRÉSIDENT D'ALUMNI-ONERA

Madame la Députée, Monsieur Le Maire, je vous remercie pour vos sympathiques mot d'accueil

Monsieur le Secrétaire général, cher Jacques Rao, je vous remercie pour votre introduction et Monsieur l'Académicien, cher Pierre Léna, pour votre présence.

Madame la Députée, vous venez d'évoquer les nouvelles mobilités auxquelles vous réfléchissez dans le cadre de la crise climatique. Aussi je vous informe que nous avons organisé en septembre dernier un colloque de deux jours sur le sujet à Meudon. Aussi j'ai le plaisir de vous en remettre les actes, parus dans la revue Trajectoire(s) n°2 de notre association.

Revenons au présent colloque « *histoire des sciences* » en hommage à Denis Papin, organisé en partenariat avec l'université d'Angers et l'Académie des Sciences. Déjà le 20 juillet 1947 à Chitenay, dans le Loir-et-Cher, un académicien – bien connu de nos membres puisque nous lui avons consacré en 2021 un colloque sur « *Le futur de l'aérostation et des dirigeables* » - Albert Caquot, présidait la cérémonie célébrant l'anniversaire des 300 ans de la naissance de Denis Papin en cette commune. Il titra ainsi le discours lui rendant hommage : « *Denis Papin, grand mécanicien, grand inventeur* », reconnaissant en lui un maillon essentiel dans la conception de la machine à vapeur que devaient perfectionner « *Savery, Newcomen et Cayley et surtout (le) magnifique ingénieur James Watt* ». Il poursuivait : « *Grâce à la vapeur, l'ère de la vitesse pouvait naître avec les voies ferrées, et l'énergie mise à sa disposition décuplait l'industrie* ». À l'heure où beaucoup de nos contemporains voient dans la révolution industrielle le péché originel, responsable de la destruction de notre planète, je livre à votre méditation ce que déclarait Albert Caquot - dont l'esprit patriotique et philanthropique ne peut être mis en doute - mais dont les propos trois quart de siècle plus tard raisonnent étrangement, lorsqu'il encense la mécanisation, qui « *permettra la vie heureuse pour les plus humbles, en mettant à leur disposition les nouveaux et les plus fidèles esclaves mécaniques que créera l'intelligence* ».

Mais si nous sommes réunis aujourd'hui à Saumur pour évoquer la mémoire de Denis Papin, pionnier de la machine à vapeur, c'est parce qu'il fut étudiant à l'Académie protestante de Saumur, avant d'émigrer en Angleterre et en Allemagne. En 2017 déjà, nous avons rendu hommage, en l'hôtel de ville de Saumur, à un autre savant ayant étudié au sein de cette académie : le mathématicien Abraham de Moivre. Nous avons publié par la suite un fascicule spécifique des *comptes rendus de mécanique de l'Académie des Sciences*, dont j'ai le plaisir, Madame la députée, Monsieur le Maire, de vous remettre des tirés à part.

Quand je dis « nous », il s'agit du professeur Piotr Graczyck et du Dr Conor Maguire. Piotr Graczyck enseigne les mathématiques à l'université d'Angers et co-organise le présent colloque. Conor Maguire, qui habite au château de Beaulieu à Saumur, est à l'initiative du premier colloque historico-scientifique de notre cycle,

consacré à Abraham de Moivre. J'ajoute que l'illustration du flyer de 2017 était, comme celle de cette année, due au talent de Sylvie Taugourdeau, conseillère communautaire de Saumur.

La révocation de l'édit de Nantes par Louis XIV a contraint Papin à l'exil, comme ce fut également le cas pour Abraham de Moivre. Ainsi Denis Papin n'a pas bénéficié de la reconnaissance de sa patrie d'origine pour ses inventions, mais c'est un honneur posthume pour lui – et bien réel pour nous – que la présence en ce jour de Pierre Léna, membre de l'Académie des Sciences, institution partenaire de ce colloque, aux côtés de l'université d'Angers et d'Alumni-ONERA, l'association des anciens docteurs de l'Office national d'études et de recherches aérospatiales. Pierre Léna conclura ce colloque en fin d'après-midi.

Ce colloque se propose de rappeler ce matin la vie et l'œuvre de Denis Papin, de montrer l'utilisation de la machine à vapeur au cours de la révolution industrielle dans le domaine des transports. Un premier exposé devait présenter les mathématiques à l'époque de Denis Papin. Malheureusement Jean-Jacques Loeb est souffrant, mais consolation pour les amateurs de mathématiques, nous aurons en début d'après-midi une conférence sur l'utilisation des mathématiques dans l'ingénierie.

Les autres exposés de l'après-midi feront écho à ceux de la matinée en présentant la situation actuelle dans différents domaines :

- les centrales nucléaires, où l'on génère de la vapeur pour produire de l'électricité. Cet exposé sera présenté par un ingénieur de l'industrie nucléaire ;
- la chaîne de traction des trains à grande vitesse par le directeur de projet du futur TGV M ;
- la propulsion aéronautique par un membre d'Alumni-ONERA, expert en combustion ;
- l'application de la technique des panneaux solaires pour un dirigeable par l'inventeur du projet Dirisolar.

Avant de laisser la parole au Professeur Piotr Graczyck, la cheville ouvrière de ce colloque, grâce à qui nous sommes reçus dans ce bel amphi, je vous signale que l'année dernière nous étions à Loudun, dans le département voisin de la Vienne, pour honorer la mémoire de l'astronome Ismaël Boulliau, qui par rapport à Papin est un illustre inconnu. Cependant son apport à la science n'est pas sans intérêt et je tiens à votre disposition des exemplaires des actes de ce précédent colloque, publiés dans le n°3 de notre revue TRAJECTOIRE(S). Ces actes feront également l'objet en fin d'année d'un fascicule spécifique des comptes rendus de Mécanique de l'Académie des sciences.

Bonne journée historique et scientifique !

DISCOURS DE PIOTR GRACZYCK, PROFESSEUR DE MATHÉMATIQUE, UNIVERSITÉ D'ANGERS

Je remercie chaleureusement les membres du Comité d'Organisation pour le travail accompli afin que ce colloque puisse se tenir aujourd'hui. Mes plus grands remerciements vont :

- au Professeur Bruno Chanetz pour sa grande passion scientifique et organisatrice. Nous lui devons la composition des exposés très riches et variés, par les plus grands experts du domaine ;
- à Mme Lucie Bitaud, la directrice du Pôle Régional de Formations, qui nous accueille ce matin dans cet amphithéâtre flamboyant neuf au Campus Régional de Formations récemment ouvert ;
- à Sylvie Taugourdeau, qui a réalisé le visuel original de l'affiche du colloque et à Marie-Claire Coët, qui a très professionnellement assuré la conception graphique du flyer ;
- au Dr. Conor Maguire pour sa grande idée de célébrer et populariser à Saumur les plus grands scientifiques qui y ont étudiés à l'Académie de Saumur. Sans cette idée de Conor, il n'y aurait eu ni le colloque Abraham de Moivre en 2017 ni le colloque Denis Papin aujourd'hui.

Je remercie les sponsors principaux du colloque, Alumni-ONERA et la Région des Pays de la Loire qui par l'intermédiaire de la Maison des Mathématiques de l'Ouest (MMO) a soutenu la popularisation des sciences auprès du grand public dans notre région.

Je remercie aussi mon laboratoire LAREMA pour l'aide financière apportée à ce colloque. C'est Luck Darnière qui nous a représenté efficacement auprès de ces organismes, merci Luck !

Je voudrais terminer en vous parlant de deux grandes nouveautés que ce Colloque Papin a apportées à l'échelle régionale :

- Pour la première fois, des exposés d'un colloque de médiation et culture scientifique ont été donnés aux lycéens. Hier après-midi en effet 300 lycéens de tous les lycées de Saumur, réunis à dans l'amphithéâtre du Lycée Duplessis-Mornay ont assisté à trois exposés, parmi ceux que nous aurons aujourd'hui ;
- La deuxième nouveauté est la reconnaissance des exposés de notre colloque par l'Ecole Doctorale de l'Université d'Angers comme formation doctorale. Les doctorants de l'Université d'Angers qui participeront au colloque auront ainsi acquis des heures de formation obligatoire pour un doctorat en France.

Je vous souhaite à toutes et à tous un excellent colloque.

SESSION HISTORIQUE (MATINÉE)

Cette session a été présentée par **Luck Darnière**, maître de conférence et membre du LAREMA, le laboratoire de recherche mathématique de l'université d'Angers. Ses recherches portent sur la logique mathématique, les algèbres de Heyting, la géométrie p-adique. Il a publié de nombreux articles dans des journaux scientifiques internationaux. Passionné de vulgarisation scientifique, il est aussi représentant à Angers de la Maison Mathématique de l'Ouest. Basée à Nantes, cette structure fédérative promeut la diffusion des mathématiques vers le grand public en Bretagne et en pays de Loire à travers toutes sortes de manifestations, souvent à l'interface des mathématiques et d'autres disciplines, notamment artistiques.

DENIS PAPIN, SA VIE, SON ŒUVRE

par Bernard Vivier, Pau Wright Aviation

Bernard Vivier a réalisé toute sa carrière professionnelle dans l'industrie aéronautique et spatiale, plus particulièrement au sein de la Branche Espace et Défense d'Aérospatiale puis EADS (maintenant Airbus Group), où il a occupé des postes de direction dans les domaines commerciaux et de stratégie industrielle. Passionné d'histoire aéronautique, il est l'auteur de plusieurs ouvrages sur l'aéronautique dans les Pays de l'Adour. Impliqué dans la promotion des métiers aéronautiques auprès des jeunes, il est Colonel de la réserve citoyenne de l'Armée de l'Air et de l'Espace et président de l'association aéronautique Pau Wright Aviation.



Marie-Claire Coët présentant l'exposé de Jean-Pierre Comes - Pierre Léna posant une question

L'ÉVOLUTION DE LA TRACTION VAPEUR DES CHEMINS DE FER FRANÇAIS

par Jean-Pierre Comes, Revue Transports & Patrimoine Ferroviaires

Jean-Pierre Comes, ingénieur en optique et chef d'entreprise, a travaillé dans des secteurs très variés, de l'industrie du caoutchouc au secteur immobilier. Mais sa passion des transports, notamment ferroviaire est une constance. Il a souvent roulé à bord de machines à vapeur, a écrit de nombreux articles et quelques livres. Il est actuellement rédacteur en chef de la revue Transports & Patrimoine Ferroviaires et vice-président de FACS - Patrimoine Ferroviaire, organisation Reconnue d'Utilité Publique qui a pu sauvegarder une quarantaine d'engins ferroviaires dont la moitié est classée aux monuments historiques. Ils roulent sur des chemins de fer touristiques et historiques, regroupés au sein de l'UNECTO (Union des Exploitants des Chemins de fer Touristiques et de Musées), instance dont il est administrateur. Il est aussi expert auprès du ministère de la Culture pour le patrimoine Ferroviaire. Jean-Comes étant malade, c'est Marie-Claire Coët et Bruno Chanetz qui ont fait la présentation à sa place, grâce au déroulé précis fourni par l'auteur.

LA MACHINE À VAPEUR DANS L'AÉROSTATION AU XIX^e SIÈCLE

par Jean Molveau

Jean Molveau est journaliste spécialisé dans l'aéronautique, et plus particulièrement dans l'aviation légère et sportive. Il a fait partie de l'équipe créatrice du bimestriel Vol à Voile dont il assume la fonction de rédacteur en chef depuis... 1990.

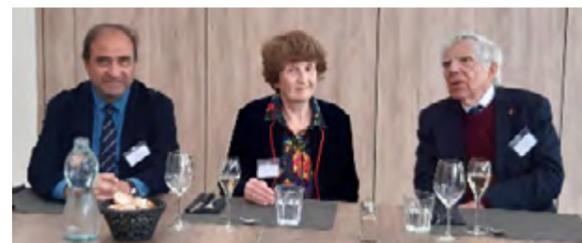
Il a collaboré à de nombreux magazines. Pilote de planeur, collectionneur, il est également passionné d'Histoire, et donc d'histoire de l'aéronautique. Membre de la Commission Histoire de l'Aéroclub de France, il a adhéré très tôt à l'ACEBD, Association pour un conservatoire européen des ballons et dirigeables dans l'ombre de l'astronome-aéronaute Audouin Dollfus. Jean Molveau est l'auteur de plusieurs ouvrages traitant d'aviation et d'aérostation.

LES TRACES DE DENIS PAPIN DANS LA POUSSIÈRE DE L'HISTOIRE

par Conor Maguire, Société des Lettres, Sciences et Arts du Saumurois

Conor Maguire a étudié à l'université de Dublin (Trinity College de Dublin), en Irlande, où il a passé un master de physique théorique et un autre en recherche opérationnelle. À l'université de Limerick il a soutenu une thèse sur la façon dont les programmes européens de sciences et technologies contribuent à l'intégration européenne. Il a travaillé comme délégué national et consultant auprès de divers organismes internationaux tels que l'UNESCO, l'OCDE, la Commission européenne, etc. Il a par exemple, été l'un des auteurs de l'étude STRIDE (Science and Technology for Regional Innovation and Development in Europe), qui a entraîné un investissement de 400 millions d'euros par la Commission européenne. Il vit maintenant à Saumur et apprécie les gloires de l'architecture et de l'histoire que l'on trouve dans la région de la Loire - et, en fait, dans toute la France. Il considère la science et la technologie comme une part importante du patrimoine français, et les investissements dans le système éducatif et dans la haute technologie comme la clé de la prospérité remarquable dont il a été témoin dans son pays d'origine.

La matinée s'est achevée par un repas au restaurant l'Escale de la gare, face à la gare TGV, à 500 mètres du lieu des conférences. Ce repas fut offert aux intervenants et membres du comité d'organisation par le LAREMA.



Jacques Rao, Marie-Claire Coët et Pierre Léna



Bernard Vivier et son épouse Micheline

SESSION SCIENTIFIQUE (APRÈS-MIDI)

Cette session a été présentée par Marie-Claire Coët, ingénieur des Arts et Manufactures (actuelle école CentraleSupélec), actuellement directrice de l'information scientifique et technique à l'ONERA et référente science ouverte. M.-C Coët est chevalier de l'ordre du mérite national.

MATHÉMATIQUE ET DÉFIS D'INGÉNIERIE, L'EXEMPLE DE SOLAR IMPULSE

par Christophe Béseau

Christophe Béseau est fondateur et président d'Inworks. Christophe est fort de 25 ans de conseil en innovation pendant lesquels il a travaillé sur près de 200 projets très variés, ce qui lui a donné une large vision des applications des mathématiques et aussi de ce qu'il faut inventer pour apporter des solutions à des problèmes non conventionnels ou que les autres ne sont pas encore parvenu à résoudre. C'est là sa spécificité. Il est l'expert mathématicien du programme Solar Impulse. Solar Impulse est un avion solaire. C'est le premier avion à avoir effectué un tour du monde sans carburant ni émission polluante pendant le vol et en utilisant des technologies « sur étagère ». Christophe Béseau ayant déjà présenté cet exposé au restaurant du Sénat et écrit à la suite un excellent article publié dans le n° 3 de Trajectoire(s), le lecteur voudra bien s'y reporter.

GÉNÉRER DE LA VAPEUR POUR PRODUIRE DE L'ÉLECTRICITÉ DANS LES CENTRALES NUCLÉAIRES

par Nicolas Rey-Tornero

Nicolas Rey-Tornero est diplômé de l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Caen et docteur en physique, mécanique des fluides, énergétique & procédés de l'Université de Grenoble. Il a soutenu, en janvier dernier, sa thèse sur « l'Etude et la conception d'un réacteur spatial à sels fondus » dont Bruno Chanetz était l'un des deux rapporteurs¹. Il est ingénieur nucléaire chez NAAREA, jeune start-up (créée il y a un an) qui développe un réacteur à sel fondu de quelques dizaines de MW de puissance. Compte tenu de ses contraintes professionnelles qui ne lui laissent pas le temps d'écrire un article dans notre revue, c'est Laura Matteo, CEA, qui a bien voulu s'en charger, sur recommandation d'Elsa Merle, également examinatrice de la thèse de Nicolas Rey-Tornero.

LA CHAÎNE DE TRACTION DES TRAINS À GRANDE VITESSE

par David Goeres, SNCF

David Goeres est ingénieur, diplômé de l'école nationale supérieure de l'électronique et de ses applications. Près de 25 années d'expériences à la SNCF sur les projets TGV ont permis à David Goeres de développer une expertise reconnue sur les matériels à grande vitesse. Il est membre du réseau des experts scientifiques et techniques de la SNCF et directeur des projets TGV M. TGV M est la future version de TGV qui va être mise en service dans 2 ans. Ce futur RGV est conçu avec l'objectif d'optimiser les coûts d'exploitation et de maintenance et de faire face aux enjeux énergétiques et de mobilité durable.

1. <https://theses.hal.science/tel-04099142>

PROPULSION AÉRONAUTIQUE, ÉTUDES EXPÉRIMENTALES DE LA COMBUSTION

par Axel Vincent-Randonnier, ONERA

Axel Vincent-Randonnier est ingénieur à l'ONERA depuis près de 20 ans. Il est expert dans le domaine des essais et des bancs de combustion. Il est docteur en chimie et en énergétique de l'Université Paris VI et titulaire d'un Post-Doctorat qu'il a effectué à l'ONERA, sur l'étude expérimentale de la combustion assistée par plasma. Il est membre d'Alumni ONERA. Axel est auteur ou co-auteur de nombreuses publications scientifiques et de plusieurs inventions dans le domaine la combustion.

LE DIRIGEABLE SOLAIRE, UNE RÉVOLUTION POUR LE TOURISME DURABLE

par Philippe Tixier, Dirisolar

Philippe Tixier, ingénieur Sup'Aéro (promotion 68), est également diplômé de l'EMBA-HEC (Executive Master of Business Administration). Après 4 ans chez Snecma, il a poursuivi sa carrière chez Framatome et Giat Industrie, où il a occupé des postes de direction. Chez GIAT, il fut notamment directeur de la ligne de produits blindés légers et moyens, avec près de 2000 collaborateurs qui lui étaient rattachés. Il est fondateur et CEO de Dirisolar, une société qui a pour vocation de fabriquer des dirigeables solaires. Philippe nous a présenté une invention qui est la sienne et qui change la donne du dirigeable. L'article de la présente revue est écrit par Christophe Béseau, conseiller de Dirisolar.



Axel Vincent-Randonnier



Pierre Léna concluant le colloque

Le colloque s'est achevé par des propos conclusifs de Pierre Léna, qui ont fait l'admiration des auditeurs, éblouis par sa faculté de synthétiser et de restituer dans la foulée de l'évènement et de si belle manière l'esprit et les apports de la journée. Sa conclusion est placée à la fin du présent dossier, qui constitue les actes de ce colloque en hommage à Denis Papin.

VISITE ET DÉGUSTATION AU DOMAINE LANGLOIS-CHATEAU

La fin d'après-midi fut consacrée à une visite des caves de la maison Langlois-Chateau (sans « ^ » sur le « a » car il s'agit des patronymes des fondateurs Edouard Langlois et son épouse Jeanne Chateau). Le directeur général de cette maison appartenant au groupe Bollinger, François-Régis de Fougereux, cousin de Philippe Castera, nous a guidé pour une très intéressante visite des caves, où de nombreux aspects de la vinification ont été abordés. La dégustation des vins tranquilles de la maison, à l'étage du caveau, fut également très appréciée ! Grâce à Philippe Castera, François-Régis de Fougereux nous a invité à prolonger la soirée devant le caveau sous le soleil ligérien, en dégustant l'excellent Crémant de la maison, dans le cadre d'un buffet dînatoire offert par Alumni-ONERA et préparé par la Duchesse Anne, pâtisseries emblématiques de Saumur.



Visite des caves sous la conduite de François-Régis de Fougereux



Le buffet dînatoire sur la terrasse de la maison Langlois-Chateau

CONCERT ALEXANDRE GALÈNE AU CHÂTEAU DE BEAULIEU



Le château de Beaulieu (crédit photo Gerry Walsh)



Alexandre Galène - L'enfilade des salons à Beaulieu lors du concert

A l'issue du cocktail, la soirée s'est poursuivie au château de Beaulieu - où logeaient les intervenants du colloque - par un concert offert par les propriétaires Dr Conor et Mary Coady-Maguire. Le pianiste Alexandre Galène joua un programme classique varié : Bach, Mozart, Schubert, Liszt, Chopin, Tchaïkovski, Schuman, Brahms, Guastavino et Mignone. ■

CAHIER

Denis Papin, sa vie, son œuvre

PAR BERNARD VIVIER, PRÉSIDENT DE PAU WRIGHT AVIATION

Contemporain de Charles Huygens, Robert Boyle, Isaac Newton et de Gottfried Wilhelm Leibnitz, qui fut d'ailleurs pour lui un ami fidèle, Denis Papin a certainement sa place parmi ces célébrités, en ayant apporté, par l'expérimentation, la validation de principes physiques qui seront, notamment avec la machine à vapeur, le « moteur » de la révolution industrielle, vers la fin du 18^e siècle.

Le colloque de Saumur fut une excellente opportunité de dresser un bilan de la vie et de l'œuvre de Denis Papin, qui furent, selon les époques, mises en lumière, puis méconnues ou adaptées à l'imagerie populaire et enfin appréciées comme il se devait.



Denis Papin

Né à Chitenay en août 1647, Denis est issu d'une famille de religion protestante, ce qui aura un impact important sur sa vie, bien avant la révocation officielle de l'édit de Nantes, en 1685.

Les études de médecine qu'il achève en 1669 ne le conduisent pas à exercer. Passionné de physique, il s'y consacre et sans doute sur la recommandation de l'épouse de Colbert, qui était originaire de Blois et dont on avait dû attirer l'attention sur ce jeune homme brillant, devient en 1671 l'assistant de Christian Huygens, alors directeur de l'Académie Royale des Sciences créée à l'initiative de Colbert.

Ce poste remarquable, alors qu'il n'a que 24 ans, lui permet de travailler avec ce grand savant et de mener avec lui, en 1673, une expérience qui démontre un principe moteur dû à une combustion qui provoque un vide partiel.

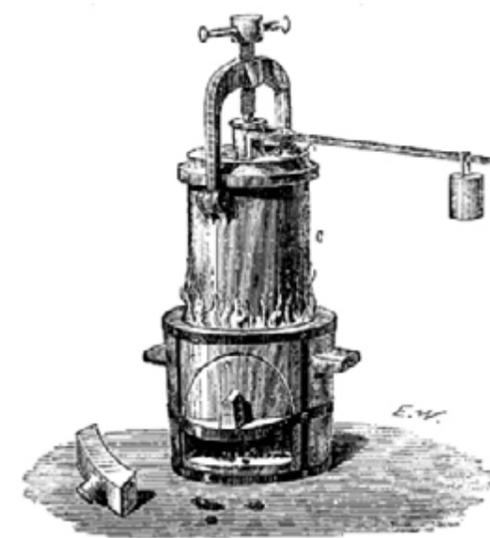
Un cylindre contenant de la poudre à canon enflammée contient un piston qui, après obtention d'un vide partiel, descend en déplaçant une charge de 70kg sur 30 cm... Les résultats de cette expérience seront, plus tard, repris par Papin dans un autre contexte.

La pression de l'autorité royale sur les protestants commence bien avant 1685 et c'est très certainement sur la perception que son avenir n'est pas en France que Denis Papin, recommandé par Huygens, part pour Londres en 1675 et y devient assistant de Robert Boyle, pionnier de la méthode expérimentale et qui dirigeait alors la Royal Society dont il était l'un des fondateurs.

C'est en travaillant dans le laboratoire de Boyle que Papin réalise une invention remarquable : il conçoit qu'en « pressant » l'eau dans un contenant, elle doit chauffer davantage.

Pour vérifier cette théorie, en ayant pour objectif de mettre au point un outil permettant aux pauvres de se nourrir à peu de frais, il invente le « Digesteur », cylindre contenant eau et aliments, chauffé et qu'il équipe d'une soupape de sûreté.

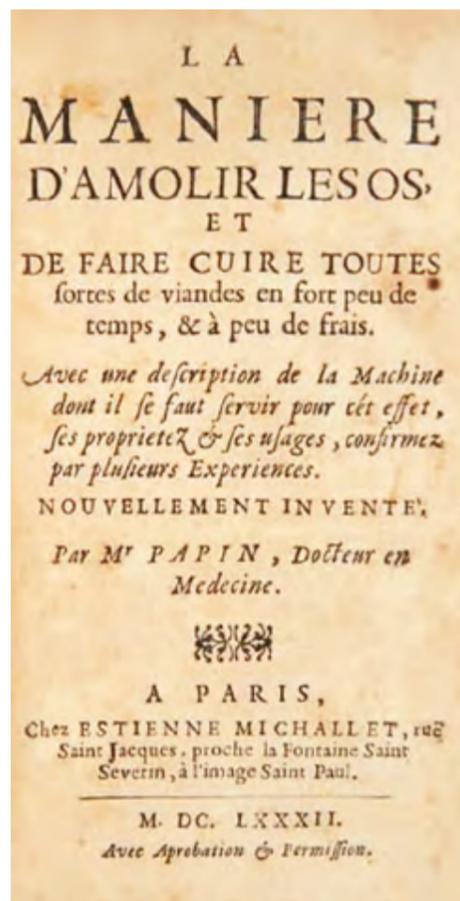
Il vient tout simplement d'inventer l'autocuiseur !



Le Digesteur

Son invention le rend célèbre et le fait entrer à la Royal Society en 1680, alors que de nombreuses cuisines des cours d'Europe s'équipent de « Digesteurs » et que, multipliant les expériences, combinant Digesteur et moyens de faire le vide, il découvre la conservation des aliments sous bocal... et transforme les os en gelée (servie dans les hôpitaux pendant de nombreuses années...). Il est bien possible que l'on ait là, aussi, l'origine de la « jelly » anglaise...

Publié d'abord en anglais, son mémoire sera en français en 1682.



Mémoire publié à Paris

Totalement tourné vers la science et de nouvelles recherches, Denis Papin n'organisera aucune exploitation industrielle du Digesteur et ne cherchera même pas à en tirer des revenus pour de futures expériences.

C'est là un trait constant de sa vision de l'homme de science : il lui apparaît normal que celui-ci, au service de la société, ait son quotidien assuré et ses recherches garanties par le mécénat privé ou d'état. Savant pauvre, il passera sa vie à rechercher des subsides et des soutiens, sans songer à exploiter ses inventions, mais souvent au risque de laisser.

Même si, à l'époque, aller d'une capitale à l'autre était chose courante, Denis Papin va se lancer dans une vie de « savant nomade » qui ne lui permettra pas de se fixer.

C'est ainsi qu'il ira en Italie, à Venise, où la Sérénissime entend créer une académie des sciences et lui demande d'en assurer la création. Parti en 1682, il reviendra à Londres en 1684, les fonds affectés venant à manquer.

En 1688, il pense avoir trouvé en Allemagne, auprès de l'électeur de Hesse, à la fois un poste (professeur de mathématiques à Marbourg) et un mécène lui offrant un laboratoire pour ses expériences et des fonds pour les conduire.

C'est donc en Allemagne qu'il va faire preuve, à la fois de continuité dans ses travaux commencés à Paris et poursuivis à Londres et d'un surprenant éclectisme en se lançant dans les inventions les plus diverses.

A chapitre de « l'inventeur prolifique », lors du séjour allemand, l'on peut citer, sans ordre particulier : un pressoir à cidre pneumatique, un soufflet géant pour l'aération des mines, un alambic à air pulsé, une lanterne sous-marine pour attirer les poissons... un lance-grenades pneumatique et même un coussin pneumatique, ancêtre de nos matelas pneumatiques et qui équipa, à sa grande satisfaction, la voiture de Leibnitz !

Ne cessant de se voir reprocher de dépenser des fonds sans résultat « commercial » tangible pour son commanditaire, il est certain que Papin était tenté d'en trouver...

Il constatait amèrement : « Les princes ont tant de sortes d'occupations qu'ils ne pensent guère aux sciences ».

Mais au milieu de toutes ces inventions de circonstance (y compris, d'ailleurs, la réalisation de deux sous-marins, dont l'un aurait été essayé en 1695), l'on constate qu'un travail fondamental se poursuit autour des thèmes de travail sur le vide et l'eau.

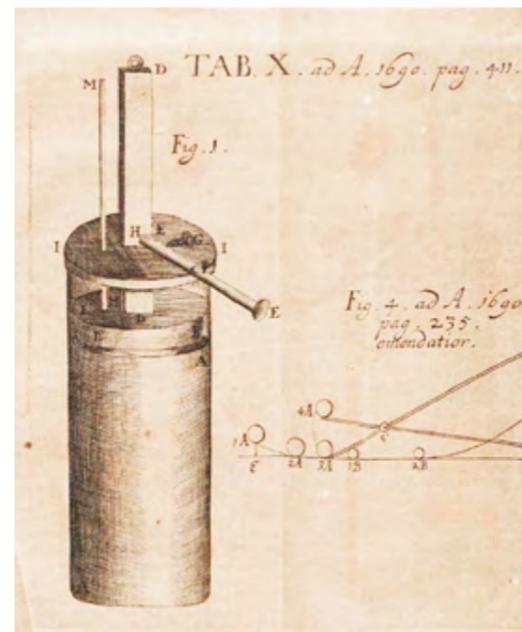
C'est en effet en 1690, à Marbourg, que Denis Papin décide de revenir aux acquis fondamentaux des travaux parisiens, enrichis par ceux issus du Digesteur. L'idée est simple : la poudre à canon étant malcommode, la remplacer par de l'eau semble évident. En chauffant, on fera ensuite le vide en condensant la vapeur.

Un montage expérimental est réalisé sur la base d'un petit système de cylindre-piston de 4 cm de diamètre sur lequel le cycle expansion/condensation est réalisé. C'est un plein succès, le piston, en redescendant sous la pression atmosphérique, soulève un poids de 30 kg.

Les résultats sont publiés dans un mémoire intitulé « Nouveau moyen de produire des forces mouvantes extrêmement grandes ».

Denis Papin a parfaitement conscience de l'importance de ce qui vient d'être démontré et de sa portée. Il écrit à cet égard : « Cette invention se pourrait appliquer à tirer l'eau des mines, jeter des bombes, ramer contre le vent.

Cette force serait préférable à celle des galériens pour aller vite en mer. »



L'expérience de Marbourg

Il sait cependant que les techniques métallurgiques de l'époque ne permettent pas encore de réaliser des tubes bien rectifiés et des pistons munis d'une étanchéité allant au-delà de la pression atmosphérique, mais il se montre confiant dans les capacités industrielles futures. Restant « scientifique », il lui paraît normal de ne pas entrer dans les techniques de réalisation, laissant cela aux hommes de l'art...

Si les principes de la machine à vapeur sont bien ainsi posés et que sa vision de ses développements lui apparaît claire, il estime aussi que l'une des premières applications pourrait être la navigation maritime. Le problème étant la transmission du mouvement à ... un autre dispositif qu'une rame.

Denis Papin conçoit alors une roue à aubes, qu'il expérimente avec succès sur une petite barque. Estimant ne plus pouvoir recevoir en Allemagne les fonds suffisants pour poursuivre ses travaux et sa position s'étant affaiblie après l'explosion d'un canon expérimental à vapeur (!), il décide de rentrer en Angleterre en utilisant, jusqu'au port de Brême, avant un embarquement, sa barque munie de roues à aubes et mue par des matelots.

L'aventure va bientôt s'arrêter, car, refusant de payer des droits de passage à des bateliers, il va voir sa barque détruite à Münden.

L'imagerie populaire française s'emparera de cet incident et l'infortuné Papin sera, au XIX^e siècle, dessiné sur sa barque, munie d'un foyer, en cours de démantèlement ! Naturellement, une telle chaudière à vapeur était techniquement irréaliste en 1707...

Il va continuer son voyage, pensant trouver des fonds à Londres et estimant que, sur le modèle de sa barque, « il sera facile d'en faire d'autres où la machine à feu s'appliquera fort commodément » ...

Il avait parfaitement raison, mais sa vision était fort en avance, puisque ce n'est que le 9 août 1803 que l'Américain Robert Fulton fait naviguer sur la Seine le premier bateau à vapeur, ou, comme le disait Denis Papin « mis en mouvement par le feu » !



Imagerie populaire

A Londres, tout a changé. Isaac Newton dirige la Royal Society et ne le reçoit pas bien. Sa réputation de perpétuel quémendeur le précède et les soutiens ne sont pas au rendez-vous. Disposant de moins en moins de ressources, il s'isole et craint que ses inventions ne lui soient volées. Il y décède sans doute, selon de récentes recherches, en 1713.

Denis Papin avait ouvert la voie. Dès 1712, Thomas Newcomen et Thomas Savery réalisent une pompe à vapeur pour assécher les mines, qui n'est autre que la mise en œuvre, à bonne échelle, de l'expérience de Papin en Allemagne. Il est bon de souligner que Papin avait travaillé avec Savery, en Angleterre et que le mémoire et les expériences de Papin y étaient connus... Les pompes Newcomen resteront en service pendant environ 75 ans.

Il est indéniable que les travaux de Papin sur le vide et l'eau, depuis 1679 jusqu'au cylindre/piston de 1690, ont ouvert la voie vers la réalisation des machines à vapeur industrielles.

Nous pourrions conclure, avec l'illustre François Arago : « L'homme de génie est toujours méconnu quand il devance trop son siècle »

Bibliographie principale :

- « Notice sur Denis Papin – éloge historique par le Dr. François Ducoux » Sté. académique de Blois, 1854
- Œuvres numérisées de Denis Papin – Gallica
- www.francearchives.gouv.fr – Denis Papin
- « La manière d'amolir les os et de faire cuire toutes sortes de viandes en fort peu de temps et à peu de frais ». www.gutenberg.org - Denis Papin
- « Nouvelle manière pour lever l'eau par la force du feu ». Denis Papin - <https://archive.org>
- François Arago, « Hommage à James Watt ». Séance de l'Académie des Sciences du 18 décembre 1834

CAHIER

L'évolution de la traction Vapeur des Chemins de Fer Français

PAR JEAN-PIERRE COMES, RÉDACTEUR EN CHEF DE TRANSPORTS & PATRIMOINE FERROVIAIRES, VICE-PRÉSIDENT DE PATRIMOINE FERROVIAIRE (FACS)



Cet article est issu de la présentation remise par Jean-Pierre Comes pour le colloque. Il en présente une version résumée.

A noter que cette présentation avait reçu le concours de FACS - Patrimoine Ferroviaire, reconnue d'utilité publique, qui œuvre pour la préservation du patrimoine des chemins de fer. Grâce à son action continue, elle a pu constituer une des premières collections de locomotives et de matériel roulant qui circulent sur les chemins de fer touristiques, qu'elle a lancés, ainsi que sur le réseau SNCF. Elle conserve des archives et publie une revue « Transports & Patrimoine Ferroviaires ».

LES PREMIÈRES MACHINES À VAPEUR ROULANTES

En 1690, Denis Papin est l'inventeur du cylindre à vapeur, dont le mouvement permet la création de machines à vapeur fixes, amenant la révolution industrielle anglaise de la fin du XVIII^e siècle. Cependant l'application aux transports se fait attendre, pour apparaître en France en 1769, sous la forme d'un engin routier destiné à déplacer des pièces d'artillerie : le fardier de Cugnot, dont la figure 1 présente une reconstitution, qui évolue sous pression lors de la fête de la vapeur, au Chemin de fer de la Baie de Somme en 2021.



Figure 1 : Le fardier de Cugnot (crédit JP Comes)

Puis apparaît enfin, le chemin de fer, idée géniale qui consiste à adapter des roues à une machine à vapeur fixe, qui devient ainsi une machine mobile, dont les roues reposent sur un système très

ancien datant du XV^e siècle : des rails. La locomotive à vapeur, due à Richard Trevithick, est ainsi née en Angleterre en 1802. La consécration intervient en 1829 lors du concours de Rainhill qui voit le succès de la Rocket de George et Robert Stephenson, locomotive équipée d'une chaudière tubulaire, utilisant le principe mis au point par le Français Marc Seguin (brevet d'une chaudière à tubes de fumée déposé en février 1828).

Le générateur de Marc Seguin, avec adoption de l'échappement de la vapeur, détendue dans les cylindres, par la cheminée, activant ainsi le tirage, deviendra la référence en matière ferroviaire, malgré quelques essais de chaudière à tubes d'eau. Une reconstitution fonctionnelle en est régulièrement présentée (voir Fig. 2).



Figure 2 : reconstitution de la machine de Marc Seguin lors du salon Rétromobile à la Porte de Versailles (crédit JP Comes)

Marc Seguin fait circuler ses machines à deux essieux moteurs, sur sa ligne de Saint Etienne à Lyon à la fin de 1829. Mais ce sont des fabricants anglais qui équipent les premières compagnies françaises. Même Marc Seguin avait importé deux locomotives « Stephenson ». Ces machines ne développent que quelques dizaines de chevaux (vapeur), mais elles peuvent rouler à plus de 80 km/h. Les ingénieurs doivent porter leurs efforts sur la voie et le matériel remorqué, dont les conceptions rustiques, et pour cause, ne suivent pas les performances rapidement croissantes. Autre gros problème apparu très rapidement aux responsables de ces chemins de fer : il s'avère finalement facile de faire rouler un train, mais il est plus difficile de l'arrêter. L'amélioration des systèmes de freinage devra suivre, et même précéder, celle de l'aug-

mentation de la vitesse et des poids remorqués. Et ceux-ci croissent très rapidement !

Les locomotives des origines n'ont le plus souvent qu'un essieu moteur encadré par un essieu porteur. La grande ligne Paris-Rouen est construite par des entreprises anglaises car la France, dans cette période d'investissements dans des infrastructures ferroviaires, ne disposait pas à cette époque de suffisamment d'entrepreneurs disposant du savoir-faire, et de la - toute jeune - expérience d'outre-manche.

CENT ANS DE PROGRÈS DANS LES PERFORMANCES DES LOCOMOTIVES

Un anglais, William Buddicom, installe à Sotteville-lès-Rouen des ateliers de construction de locomotives. En 1843, sa locomotive à voyageurs, pour cette ligne est un modèle représentatif de l'état de la technique de la traction vapeur.

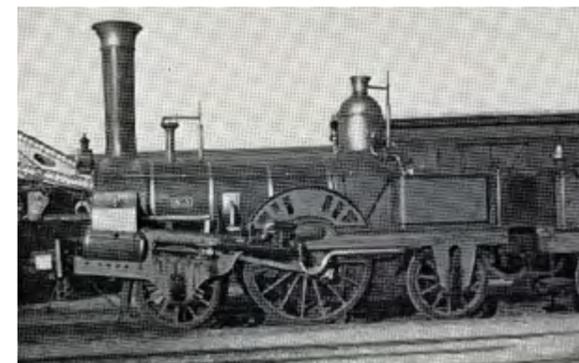


Figure 3 : Locomotive Buddicom

Les principales dispositions, qui perdureront, sont déjà là. Les cylindres extérieurs attaquent par des bielles manivelles, les roues motrices de grand diamètre. La machine est guidée par des essieux l'encadrant avec des roues de plus petite dimension. Cette machine, courait à 90 / 95 km/h grâce à ses roues motrices de 1,68 m. Ses sœurs du Paris-Orléans permettent 110 à 120 km/h (exceptionnellement) avec leurs roues de 2,04 m. **Le diamètre des roues motrices est le premier point** de progression vers l'augmentation des vitesses. La robustesse de ce type de machine leur permet de rester en service (certes déclassé) jusqu'en 1914, soit plus de 70 ans.

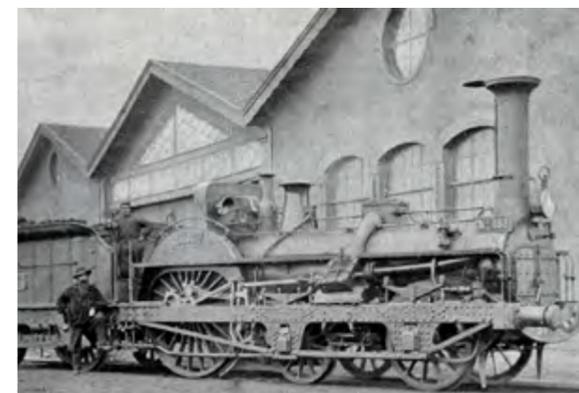


Figure 4 : Locomotive de Thomas Crampton

L'évolution vers plus de vitesse, est illustrée par les engins de Thomas Crampton construits à partir de 1848, jusqu'en 1864. Plus de vitesse nécessite plus de stabilité. La disposition reste du type une roue motrice et deux roues porteuses, mais le châssis, avec un longeron extérieur aux roues est allongé et la grande roue motrice est placée à l'arrière. Son diamètre varie de 2,10 m à 2,30 m selon les réseaux qui les utilisent (NORD, EST, PLM). Un châssis plus long, permet d'installer une plus grande chaudière, d'avoir de plus grandes surfaces de chauffe qui augmentent la production de vapeur. **L'accroissement des dimensions de la chaudière est le deuxième point** permettant d'aller vers des performances accrues. Les dispositions des Crampton leur procurent une excellente stabilité de plate-forme. A tel point qu'en 1853, un décret impérial les autorise à rouler à 120 km/h sur le réseau du NORD. A cette allure, elles tirent 60 t, et 85 t à 100 km/h en développant 400 ch et consommant 8,5 kg de coke au km. Une de ces machines atteint même 150 km/h grâce à ses excellentes proportions du circuit de vapeur. **L'écoulement des fluides constitue le troisième point** important vers la course à la puissance. La prise de vapeur dans le dôme, les dimensions des tuyaux, leurs courbures, les ouvertures des tiroirs de distribution et les dimensions des cylindres conditionnent le bon rendement de l'engin. La régulation de l'arrivée de la vapeur dans les cylindres, et de son bon échappement, fut réglée par la coulisse de Stephenson (1843) qui permit la mise au point de différents systèmes (Gooch, Walschaerts...). C'est ainsi qu'on attribue aux Crampton la performance d'avoir ramené l'empereur Napoléon III de Marseille à Paris à une vitesse moyenne de 100 km/h. Toutefois, la rigidité longitudinale du châssis sur une voie pas encore adaptée à des efforts importants, et un centre de gravité trop bas, donnent lieu à des réactions indésirables. Les grandes roues motrices, finalement peu chargées, avaient une propension aux patinages. Ce qui fait que le PLM abandonna les Crampton assez rapidement, malgré leurs qualités. La technique évolue vite. Malgré tout, les Crampton firent une belle carrière au NORD et certaines passèrent le cap du million de km.

La recherche de la vitesse est une chose. Simultanément les charges remorquées augmentent et le problème des plus lourds trains de marchandises nécessite des machines plus puissantes, comme pour celles des trains de voyageurs. Mais il s'agit de transmettre cette puissance, et la solution permettant d'augmenter les performances passe par **le quatrième point qui consiste à augmenter le nombre de roues motrices**, qui seront de petit diamètre pour les « marchandises », et permettront d'affronter les rampes.

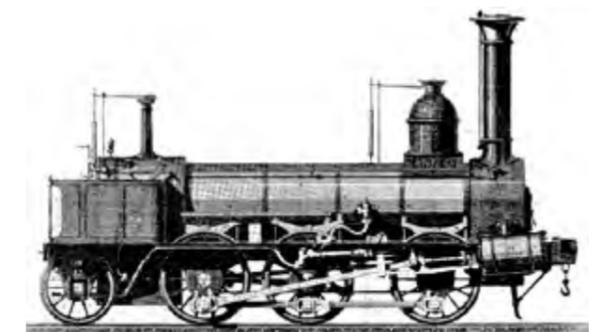


Figure 5 : L'Antée 031 de Flachot



Figure 6 : L'Aigle d'Ernest Gouin pour l'OUEST

Dès 1849, Eugène Flachet construit deux locomotives, l'Hercule et l'Antée, destinées aux trains de travaux de la ligne du Pecq à Saint-Germain-en-Laye en rampe de 3,5 %. Ces machines à 3 essieux accouplés hissent 93 tonnes sur cette pente que l'on est en train d'équiper d'un système de « chemin de fer atmosphérique » utilisant l'aspiration des trains par le vide. Elles démontrent paradoxalement l'inutilité de ce procédé coûteux, que l'on met en place, parce que l'on pense que des locomotives ne pourraient pas y tracter des trains. La traction atmosphérique est malgré tout exploitée jusqu'en 1859.

Certains constructeurs iront vers les extrêmes, tels Ernest Gouin en 1855 avec L'Aigle, pour l'OUEST, avec ses roues motrices gigantesques de 2,85 m, qui ne fit aucun service commercial.

Jusqu'ici, les progrès ne s'étaient réalisés qu'en accroissant les dimensions des éléments des locomotives, donc leur poids avec des solutions simples et évidentes : plus long, plus gros, donc plus puissant. En 40 ans l'évolution est considérable : la surface de chauffe passe de 10 m² à 200 m², le poids par essieu de 2 t à 14 t, l'empattement de 2,40 m à 4,85 m.

Un cinquième point d'amélioration consiste à augmenter la pression des chaudières qui passe de 7 à 11 kg/cm², la qualité des aciers s'améliorant. Mais il apparaît aussi que des gains de puissance peuvent être obtenus en s'intéressant à la production et à l'utilisation de la vapeur.

Le compoundage en fait partie, c'est le sixième point important. Inventé par Anatole Mallet qui réalisa la 1ère machine compound en 1876, il ne perça réellement qu'en 1889 avec la C1 PLM de M. Henry, et la 701 du NORD, réalisée grâce à la collaboration de M. de Glehn ingénieur à la SACM (société Alsacienne de Constructions Mécaniques) et de M. du Bousquet de la compagnie du NORD.

Le système compound consiste à mieux utiliser la détente de la vapeur. Un premier passage dans un cylindre HP permet une détente partielle, puis la vapeur est dirigée vers un cylindre BP de plus gros diamètre pour terminer son expansion. Ceci permet de réduire les pertes par condensation avec les parois froides du cylindre et du piston lors de l'usage classique de la simple détente, dite simple expansion. Le compoundage confère aux machines de ce type le nom de locomotives à double expansion.

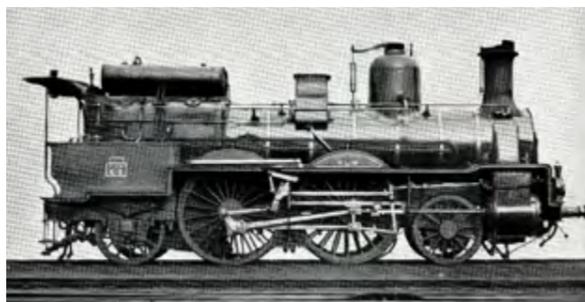


Figure 7 : La C1 compound du PLM

La C1 de M. Henry, même si elle semble encore archaïque, porte quelques progrès supplémentaires intéressants : un foyer de type Belpaire, favorisant le rendement calorifique, une chaudière timbrée à 15 kg/cm², chiffre élevé pour l'époque, et un équipement de frein à air avec ses disgracieux réservoirs.

La 701, comme la C1 est une machine à 4 cylindres, 2 extérieurs et 2 intérieurs, selon une disposition qui deviendra classique pour les compounds. En 1886, ce fut la première compound à 4 cylindres. Mais si la double expansion réduit la consommation de charbon (18%) et d'eau (23%), c'est au prix d'une complexité mécanique doublée, et surtout de la présence d'un essieu coudé pour les cylindres intérieurs. La 701 consomme 7,81 kg de charbon au km et développe 700 ch.

En 1898, survient une septième évolution : la surchauffe. Et c'est Denis Papin qui en est à l'origine : il avait expérimenté en 1698 qu'en plongeant un fer rouge dans le cylindre, à chaque coup de piston, il en résultait une grande diminution de consommation. L'ingénieur allemand Schmidt réalise sa première surchauffeur en 1898. Il s'agit de faire passer la vapeur saturée, avant son introduction dans les cylindres, dans des tubes positionnés dans des gros tubes à fumée. On obtient alors une vapeur à 250° qui ne se condense pas. Cette application donna lieu à une longue polémique entre partisans du compoundage et ceux qui préconisaient la simple expansion avec surchauffe. En même temps, le tube à fumée à ailettes (tube Serve) permet de très bons échanges de température, et de ne pas exagérer la longueur des chaudières.

Le réchauffage de l'eau d'alimentation constitue la huitième application destinée à améliorer le rendement du générateur : par prélèvement de vapeur d'échappement, on réchauffe l'eau froide provenant du tender avant de l'introduire dans la chaudière. Différents systèmes de pompes mélangent eau et vapeur pour porter la température de l'ensemble à près de 100°C, procurant ainsi des économies de charbon.

Au début du XX^e siècle les constructeurs et exploitants avaient donc fait évoluer la locomotive qui avait quitté le stade d'un certain empirisme. Les besoins de traction de trains de plus en plus lourds nécessitent plus de poids adhérent, plus d'essieux moteurs, plus de puissance, et pour cela des chaudières de plus gros diamètre et plus longues. La locomotive devient plus lourde et c'est tant mieux pour l'adhérence, mais le poids par essieu augmente et les voies doivent s'adapter : des rails plus lourds, plus de traverses au km et plus d'épaisseur de ballast, sont nécessaires. L'augmentation de la vitesse nécessite, non seulement de la puissance, mais aussi des empattements plus longs, des guidages du châssis par des essieux porteurs et directeurs, des bogies à rappel, qui ouvrent la porte à la vitesse des machines modernes.

La course à l'augmentation continue. Une illustration en est donnée par la Mountain 241 A de l'EST, dont le diamètre des roues atteint 1,95 m, pour un poids de 123 t (voir Fig. 8).



Figure 8 : La Mountain 241 A de l'EST (tableau d'Albert Brenet)

Ces machines exercent des efforts importants sur la voie. Après un déraillement leur vitesse est limitée à 105 puis 110 km/h. Seules les 241 P de la SNCF arrivées à partir de 1948, ont permis le 120 km/h.

LE DÉCLIN DU FERROVIAIRE

Le début des années 20 marque la fin de l'hégémonie du transport ferroviaire. Automobiles, camions, autocars commencent à proliférer, souvent à partir de surplus militaires. Les chemins de fer doivent s'adapter, y compris la traction vapeur qui commence à connaître la concurrence de l'électrification d'une part, et du moteur à explosion, d'autre part, notamment pour des autorails sommaires, de faible puissance et de confort médiocre pour des services omnibus. Ces nouveaux modes de traction offrent l'avantage de coûts d'exploitation beaucoup moins élevés, certes au prix d'investissements lourds dans le cas des électrifications.

Cependant la période de l'entre-deux guerres est riche en évolution. La recherche d'économie de charbon, dont la 1ère guerre a montré les difficultés d'approvisionnement devient nécessaire. De plus, le prix en augmente fortement dans les années 20, et conduit les ingénieurs à intensifier leurs recherches sur la meilleure manière de produire la vapeur et de l'utiliser. La thermodynamique et l'écoulement des fluides donneront des résultats remarquables.

La SNCF, à la fin de la seconde guerre mondiale, doit rapidement reconstituer un parc de traction dévasté, nécessaire à la remise en marche de l'économie. L'industrie française n'est pas en mesure de livrer, le Diesel de ligne balbutie et l'électrification est longue à mettre en place.

Aussi, la SNCF se tourne t'elle vers les Etats Unis, et commande 1340 Mikado (141 R) chauffées au charbon et au fuel lourd pour une grande partie. Ce sont des machines autorisées à 100 km/h, à simple expansion surchauffées, à 2 cylindres, à roues de 1,65 m, faciles à construire et à entretenir, selon le pragmatisme US. Le type 141 devenant la machine mixte de route, par essence. Elles développent 2900 ch. De construction robuste et moderne, de conduite simple, un des avantages de la simple expansion, elles seront banalisées et non plus affectées à une seule équipe de conduite, comme c'était l'usage.

ANDRÉ CHAPELON, « THE GENIUS OF THE FRENCH STEAM »

Au 20^e siècle, André Chapelon, ingénieur de la Division des Etudes de Locomotives de la SNCF, laissera une réputation brillante. Les Anglais l'appelaient « The genius of the French Steam ». Il étudia et réalisa des prototypes prometteurs tels les 242 A 1 et 160 A 1, ébauchés avant-guerre. Ils sont terminés, essayés, mais n'auront pas de suite. Ainsi la 242 A1, la locomotive à vapeur restée la plus puissante d'Europe, avec 4000 ch (voir Fig. 9).



Figure 9 : La 242 A1 d'André Chapelon

Elle provient de la reconstruction de la 214.101 ETAT, une machine prototype, ratée. Livrée en 1946, compound à 3 cylindres dont 1 HP intérieur et 2 BP extérieurs, roues de 1,95 m, haute surchauffe, échappement Kylchap triple. Elle pesait 148 t et était autorisée à 130 km/h.



Figure 10 : deux projets de Chapelon, la 232 Hudson et la 242 Niagara

Les différents projets de construction de machines modernes et performantes selon les principes de Chapelon ne verront pas le jour, et ce grand ingénieur n'aura finalement jamais réalisé une machine neuve selon ses principes novateurs, testés et validés sur les prototypes. Il aura dû se contenter de transformer des « sapsins » en machines remarquables et améliorer les machines unifiées d'après-guerre. La figure 10 présente en haut une 232 Hudson à grande vitesse, dont le carénage est un restant de la période « streamlined » et en bas, une 242 Niagara pour trains rapides lourds.

LA FIN DES LOCOMOTIVES À VAPEUR

Le dossier Vapeur est fermé en laissant une certaine frustration, car la pièce n'a pas été jouée jusqu'au bout. Les années 50 et 60 voient l'émergence des Diesel de route, et la progression rapide des électrifications. On assiste alors à la réforme de pans entiers du parc Vapeur, surtout des compounds dont on épuise prioritairement le potentiel kilométrique. Ces machines sont victimes de leurs sophistications et de leur technicité qui nécessite des équipes de conduite, et d'entretien, hautement qualifiées. La conduite d'une compound nécessite beaucoup d'expérience. Un mécanicien titulaire d'une machine de vitesse du dépôt de Tours est surnommé « sénateur » en raison de son salaire élevé par rapport à la moyenne. Par contre, il est possible d'affecter du personnel moins formé, donc moins cher, aux simples expansions, à la conduite plus aisée, mais beaucoup moins économe en eau et charbon. L'excellence laissera donc la place à la simplification, et là comme ailleurs, les comptables tirent vers le bas hommes et machines. Les « simple expansion » clôtureront donc la traction vapeur tant en service de banlieue qu'en service de route. C'est même une Consolidation (la 140 C 38) d'avant 1914 qui fermera le ban le 20 novembre 1975.

En dépit de son retrait dans le domaine ferroviaire, la Vapeur reste de nos jours le moyen transitoire le plus utilisé pour produire de l'électricité. On n'a toujours pas trouvé mieux que de faire bouillir de l'eau, puis turbiner la vapeur pour entraîner un alternateur. Que l'énergie de chauffe vienne de la lignite, du charbon, du fuel lourd n°2, du gaz, ou de l'uranium 235 ..., la force de la vapeur, mise en évidence par Denis Papin il y a plus de 3 siècles, reste d'actualité !

Sauf mention contraire, les figures sont issues d'un numéro spécial de « L'Illustration » sur les chemins de fer.

LA PACIFIC DE LA SÉRIE 3702 À 3721, LE MEILLEUR DU SAVOIR-FAIRE FRANÇAIS



La Pacific - peinture de Chris Ludlow

On repère sur cette peinture, la cheminée qui comporte un échappement Kylchap double, juste derrière on voit les ballonnets du réchauffeur d'eau ACFI dont la pompe se trouve sur le tablier, puis la boîte à feu Belpaire devant la cabine. Le tuyau incliné de gros diamètre, mène la vapeur vers le cylindre HP, dont on distingue le mécanisme de commande de l'arbre à cames commandant les soupapes. L'esthétique de cette machine est soignée. Mises en service par le Paris-Orléans en 1909-10, sous les numéros initiaux 3502 à 21, ces compounds à 4 cylindres et vapeur saturée, ont des roues de 1,95 m et une puissance inférieure à 2000 ch, un peu décevante. A la fin des années 20, le P.O est confronté à 2 problèmes : relayer aux Aubrais ou à Tours la traction électrique qui y amène des trains lourds au tracé tendu, et ensuite à faire face à une certaine impécuniosité. D'autre part l'électrification avançant, libère des locomotives devenant inemployées. Aussi il est décidé qu'il serait judicieux de moderniser les 3500, plutôt que de commander des machines neuves. Cette mission fut confiée à André Chapelon, ingénieur thermodynamicien du P.O, qui se révéla être le Bugatti des locomotives à vapeur. Les transformations, faites en 1929-32 portèrent, entre autres, sur l'application de la surchauffe mais surtout sur l'accroissement du circuit de la vapeur dont les dimensions ont doublé. Ces machines reçurent une distribution par soupapes Lentz, et un échappement double à ajustage Kylala limitant les contre pressions. Les résultats furent conformes aux espoirs et ces machines dépassent 3500 ch en économisant 25% de combustible à puissance égale, sans qu'il y ait d'incidence sur l'entretien, les parcours entre révision générale avoisinant les 500000 km. Fait exceptionnel, le Réseau du NORD, commanda au P.O la transformation de 20 autres machines pour son propre usage. Ces machines autorisées à 130 km/h circulèrent jusque dans les années 60 en tirant des trains de 600 à 800 t. ■

CAHIER

La machine à vapeur dans l'aérostation au XIX^e siècle

PAR JEAN MOLVEAU, JOURNALISTE DE L'AÉROSTATION

Si l'emploi de la machine à vapeur s'est généralisé dans l'industrie durant cette période, son utilisation pour la conquête de l'air reste l'apanage d'Henri Giffard.

« Hier, vendredi 24 septembre [1852], un homme est parti, imperturbablement assis sur le tender d'une machine à vapeur, élevée par un ballon ayant la forme d'une immense baleine [...]. Ce Fulton de la navigation aérienne se nomme Henri Giffard. C'est un jeune ingénieur qui aucun sacrifice, aucun mécompte, aucun péril n'ont pu décourager ni détourner de cette entreprise audacieuse [...] ¹. » Cette ascension, débutée à l'Hippodrome de Paris ² prend fin à Élancourt, Seine-et-Oise (Yvelines, Trappes aujourd'hui), au terme d'un parcours de 28 km à la moyenne de 6 km/h. Exploit planétaire, c'est le premier vol réussi d'un aéronef motorisé de l'histoire de l'humanité.

LE DIRIGEABLE DE MONSIEUR GIFFARD

Depuis la naissance de l'aérostation en 1783, la montgolfière – le ballon à air chaud –, par les frères Joseph (1740-1810) et Étienne (1745-1799) Montgolfier et la charlière – le ballon à gaz –, par le professeur Jacques Charles (1746-1823), pléthore de chercheurs ont rêvé de rendre le ballon dirigeable. Mais ils ont dû se résoudre à admettre qu'il n'est qu'une bulle en suspension dans l'atmosphère. La dirigeabilité ne sera véritablement obtenue qu'un siècle plus tard, le 9 août 1884 – mais ceci est une autre histoire !

L'homme de 1852 n'est pas un utopiste. Il pratique l'aérostation depuis ses 18 ans, sous la férule de l'un des « grands » de l'époque, Eugène Godard. À l'orée des années 1850, le docteur Leberdier demande à Giffard de concevoir un ballon modèle réduit capable d'évoluer dans son jardin des Champs-Élysées. Cela amène le concepteur à déposer un brevet sur l'application de la vapeur à la navigation aérienne le 20 août 1851.

Aidé par trois élèves de Centrale, Cohen, David et Sciama, il élabore un ballon dirigeable dont la fabrication est sous-traitée à E. Godard. Giffard est confiant : il a signé un contrat avec le directeur de l'hippodrome pour dix ascensions de son aérostat !

1. Article d'Émile de Girardin paru dans le quotidien *La Presse* du 26 septembre 1852.

2. Plus qu'un champ de courses équestres comme aujourd'hui, l'Hippodrome de Paris est un lieu où se donnent des spectacles en extérieur. Créé par Victor Franconi, il est inauguré le 4 juillet 1845. Il sera supprimé dix ans plus tard en raison de l'aménagement de la Place de l'Étoile. Mais d'autres viendront par la suite, à la Porte Dauphine, à l'Alma et aux Champ-de-Mars... Le dernier, Pace Clichy, ferme en 1907. L'on y pratique souvent des ascensions en ballons, grande attraction du XIX^e siècle.

Celui-ci cube 2 500 m³. Il mesure 44 m de long et 12 m de diamètre. Le gouvernail est une voile triangulaire, à la poupe. Le filet qui enserrme l'enveloppe remplie de gaz d'éclairage est réuni par une ralingue horizontale de 20 m, à laquelle est suspendue, 6 m plus bas, la nacelle. Laquelle est un brancard en bois sur lequel est fixée la chaudière à foyer renversé alimentée au coke. La machine à vapeur est un monocylindre développant 3 ch, entraînant une hélice tripale propulsive de 3,40 m de diamètre à 110 tours/minute. Le groupe motopropulseur pèse 150 kg. La force ascensionnelle est mesurée à 1 800 kg.



Figure 1 : Portrait colorisé d'Henri Giffard d'après une photo de 1863.

Giffard décrit ainsi son aventure : « je suis parti seul de l'Hippodrome le 24, à 5 heures et quart. Le vent soufflait avec une assez grande violence. Je n'ai pas songé un seul instant à lutter directement contre le vent ; la force de la machine ne me l'eût pas permis mais j'ai opéré avec le plus grand succès diverses manœuvres de mouvement

circulaire et de déviation latérale. L'action du gouvernail se faisait parfaitement sentir, et à peine avais-je tiré légèrement une de ses deux cordes de manœuvre, que je voyais immédiatement l'horizon tourner autour de moi. Je suis monté à une hauteur de 1 500 mètres, et j'ai pu m'y maintenir horizontalement à l'aide d'un nouvel appareil que j'avais imaginé et qui indique immédiatement le moindre mouvement vertical de l'aérostat. [...] Cependant la nuit approchait, je ne pouvais rester plus longtemps dans l'atmosphère [...], j'étais en ce moment à la plus grande élévation que j'aie atteinte ; le baromètre marquait 1 800 m ; je m'occupais immédiatement de regagner la terre [...]

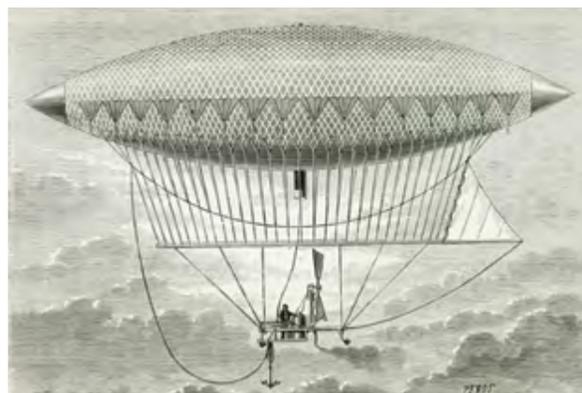


Figure 2 : Le premier aéronef motorisé et piloté de l'histoire de l'humanité : le ballon dirigeable de 1852 d'Henri Giffard.

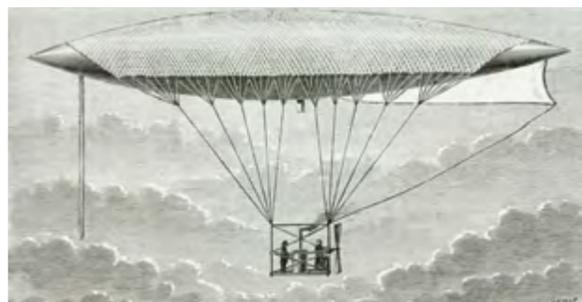


Figure 3 : L'essai de 1852 ne fut malheureusement pas transformé en 1855, l'enveloppe s'échappant du filet, heureusement sans dommage pour l'équipage.

Ce vol restera unique, la compagnie du gaz de Passy rechignant à fournir l'approvisionnement pour d'ultérieurs gonflements...

La conclusion est tirée par Gaston Tissandier : « À dater de ce jour, le principe de la navigation aérienne est définitivement créé. M. Giffard, avec une puissance de conception que l'on trouve seulement chez le véritable novateur, avait résolu toutes les difficultés théoriques. Il venait de prouver que l'emploi d'un aérostat très allongé, dont on peut seul espérer la direction, était aussi avantageux que possible par sa marche dans l'air et par les facilités de son atterrissage ; il avait trouvé avec hardiesse les conditions de stabilité dans l'atmosphère d'un aérostat allongé³. » Et d'ajouter : « Enfin, résultat vraiment frappant, M. Giffard, pour la première fois, avait associé ces deux forces : la machine à vapeur et l'aérostat ; grâce aux dispositions nouvelles d'un foyer à

flamme renversée, le danger de cette union terrible du feu et du gaz combustible venait d'être rendu complètement illusoire. »

UNE SECONDE TENTATIVE

L'expérience s'étant déroulée avec un vent assez fort, Giffard songe à la réitérer dans des conditions plus favorables. Il s'adresse alors à Gabriel Yon, autre aéronaute et fabricant de matériel aérostatique, pour construire un nouveau ballon de plus gros volume (3 200 m³), plus fuselé encore ; la suspension de la nacelle est repensée, la ralingue qui rassemble le filet se situe au pôle supérieur de l'enveloppe, épousant sa forme. La puissance motrice est portée à 5 ch. La longueur est de 70 mètres pour un diamètre de 10 m.

En 1855 (date exacte inconnue, et cet essai n'est pratiquement pas documenté), en présence de G. Yon, le remplissage, toujours au gaz d'éclairage, a lieu à l'usine de Courcelles à Paris, par un vent de 4 m/s.

Catastrophe ! Par manque de stabilité dû à l'allongement conséquent de la carène, à quelques mètres du sol des oscillations en tangage se produisent et s'intensifient ; bientôt l'avant se dresse, tandis que le filet censé retenir l'enveloppe prisonnière, glisse vers l'arrière... Les aéronautes n'ont que le temps de tirer la corde de soupape (afin de vidanger le gaz et dégonfler) pour regagner la terre ferme. Mais une fois l'équipage débarqué, le ballon allégé se cabre et s'échappe du filet, atterrissant à 500 mètres !

Giffard, qui mûrissait un projet grandiose de ballon dirigeable de 50 000 m³ avec deux chaudières, une à vapeur, l'autre à pétrole, jette l'éponge. « Sans renoncer à la navigation aérienne, qu'il ne perdit jamais complètement de vue, il dirigea momentanément son esprit vers d'autres travaux et inventa "l'injecteur Giffard", considéré aujourd'hui à juste titre par tous les hommes compétents comme un organe essentiel de la machine à vapeur. »⁴

UN INGÉNIEUR PROLIQUE

Henri Giffard (8 janvier 1825–15 avril 1882) étudie au Collège royal Bourbon (lycée Condorcet), et dès son plus jeune âge, il est habité par le génie de la mécanique et la passion de l'invention. Vers 1840, il fait l'école buissonnière pour voir passer les trains de la ligne de Paris à Saint-Germain-en-Laye. En 1844, au moment d'intégrer l'école Centrale, sa carrière est compromise par un revers de fortune familial, qui entraîne la saisie des biens des Giffard... Il entre alors comme dessinateur à la compagnie des chemins de fer déjà citée, et il parvient effectivement à conduire des locomotives ! Il suit toutefois les cours de Centrale en candidat libre. Il produit ses premiers moteurs à vapeur à haut rendement en 1849. Giffard enchaîne les innovations concernant la machine à vapeur, débutant en 1857 par un brevet de valve de régulateur.

À cette époque, pour introduire de l'eau dans la chaudière des locomotives, on recourt à une pompe. Le 1^{er} février 1858,

il enregistre un nouveau brevet d'un système d'injecteur fonctionnant à la force centrifuge, mais est menacé de procès pour plagiat. Il réplique alors, dès le 8 mai suivant, par le brevet de ce qui sera identifié sous l'appellation d'« injecteur Giffard ». Lequel est composé de deux cônes séparés par un intervalle libre. La vapeur qui sert à actionner le dispositif se condense en abandonnant sa vitesse et en la transformant en pression, qu'elle transmet à l'eau qui alimente alors la chaudière. La pression communiquée à l'eau est ainsi supérieure à la pression initiale de la vapeur. La première locomotive équipée du dispositif est testée l'année suivante. L'injecteur Giffard bientôt universellement employé, lui assure de confortables revenus.

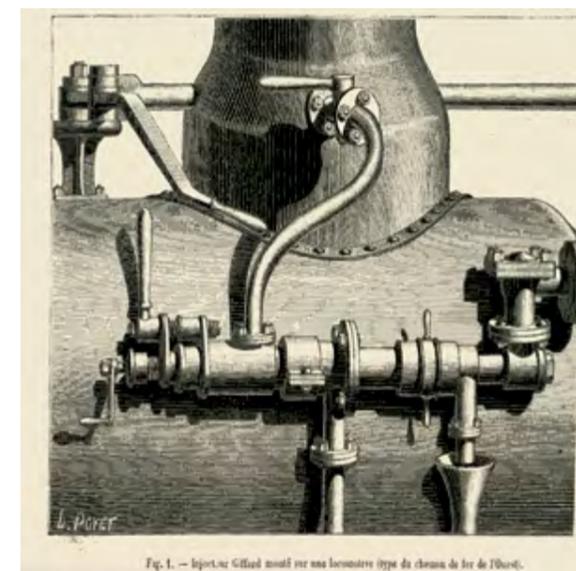


Figure 4 : L'injecteur Giffard, en se généralisant, a fait la fortune de l'ingénieur

Il renoue avec l'aérostation à la fin de la décennie 1860, ce qui le conduit à travailler sur un procédé testant la résistance et l'imperméabilité des étoffes aérostatiques, et à améliorer les processus de production d'hydrogène.

Atteint de cécité précoce, Henri Giffard se suicide en respirant du chloroforme. Il lègue sa fortune à la nation pour des œuvres humanitaires.



Figure 5 : Les principaux brevets et les recherches menées par Henri Giffard

En 1859, l'Institut de France lui a décerné le Grand-Prix de mécanique. Et en 1876, la Société d'encouragement pour l'industrie nationale lui attribua la grande médaille Prony. Giffard figure parmi les 72 savants inscrits sur la tour Eiffel.

LES BALLONS CAPTIFS GIFFARD

Pour l'Exposition universelle de Paris de 1867, Henri Giffard conçoit un système de ballon captif, installé à Paris au 42 avenue de Suffren. Gonflé avec 5 000 m³ d'hydrogène, il embarque douze voyageurs à une hauteur de 250 mètres. Il est repositionné l'année suivante, exploité par Eugène Godard place Victor Hugo, mais est détruit par accident.

En 1869, un autre est installé à Londres utilisant les mêmes ingrédients. Avec ses 12 000 m³, il peut emmener 30 passagers à 500 mètres. Giffard ayant pris tous les coûts à sa charge (une enceinte en bois spécialement édifée), cet épisode lui fait perdre la bagatelle de 700 000 francs/or – mais l'engouement populaire est considérable !

LE « GRAND BALLON CAPTIF DE LA COUR DES TUILERIES »

Selon des principes identiques, est installé devant l'arc de triomphe du Carrousel un gigantesque « sphérique » captif, qui constitue l'une des principales attractions de l'Exposition universelle de 1878. On a dit qu'en deux mois ce monumental bijou de technologie a élevé autant de gens que toute l'aérostation mondiale depuis son avènement... La totalité de ses composants est l'œuvre d'Henri Giffard.



Figure 6 : Vue générale descriptive du site du Grand ballon captif de la cour des Tuileries de 1878

Pour un prix de 10 F, et à raison d'une dizaine d'ascensions par jour (selon la météo), 40 à 50 personnes survolent Paris à 500 m, sous la houlette de deux aéronautes professionnels. Quelque 35 000 individus en ont profité, du 28 juillet au 4 novembre 1878 (72 jours opérationnels).

3. Tissandier, Gaston *Les ballons dirigeables : expériences de M. Henri Giffard et de M. Dupuy de Lôme*, Dentu, Paris 1872.

4. Tissandier, Gaston *ibid.*



Figure 7 : débute une ascension, l'une des attractions les plus prisées de l'Exposition universelle de Paris de 1878

Ses dimensions sont colossales : 25 000 m³ d'hydrogène, diamètre : 36 m, hauteur totale : 55 m (soit 10 de plus que l'Arc de triomphe de l'Étoile !), poids : 14 tonnes.

Sa nacelle en bois est une galerie circulaire de 18 m de circonférence, l'espace central qui laisse passer le câble de 8,5 cm de diamètre et 660 m de longueur fait 4 m de diamètre. Elle a un double fond, avec des sacs de lest, permettant de piloter le ballon devenu libre en cas de rupture du câble. L'enveloppe de couleur jaune est constituée de quatre couches de toile.

Le câble est fixé au cercle de charge métallique réunissant le filet enfermant l'enveloppe et auquel est suspendue la nacelle par l'intermédiaire de pesons indiquant constamment la force ascensionnelle de l'aérostat.

Au sol, la nacelle reste suspendue au-dessus d'une vaste cuvette conique. On y accède par une passerelle amovible. Le câble descend au fond de la fosse, tourne autour d'une poulie métallique montée sur une suspension à la cardan. Puis il circule dans un tunnel long de 60 m avant de s'enrouler sur le tambour du treuil.

Lequel est en fonte, de 1,70 m de diamètre et 11 m de longueur. Il est entraîné par deux roues d'engrenages de 3,50 m de diamètre, actionnées chacune par une machine à vapeur à 4 cylindres de 300 chevaux, par l'intermédiaire de pignons de petits diamètres.

Le pouvoir sustentateur de l'hydrogène étant supérieur à celui du gaz de ville, un générateur Giffard est présent sur le site. 25 ballons libres ont profité de cette installation.

Trois « capitaines de bord » ont officié, choisis par l'inventeur : les frères Eugène (fils) et Jules Godard, ainsi que Camille Dartois.

ÉPILOGUE

Désormais géré par les Godard, le ballon des Tuileries reprend du service l'année suivante, mais il est malheureusement ruiné par un orage.

L'architecture du « système Giffard » va se généraliser, reprise par tous les constructeurs : Godard, Lachambre, Mallet, Surcouf et Yon. Elle perdure aujourd'hui, après un lifting technologique (un treuil électrique actionnant une centrale hydraulique a naturellement remplacé la machine à vapeur) par Aérophile, société qui exploite et exporte des ballons captifs dans le monde entier. Se perpétue ainsi l'une des plus belles réussites d'Henri Giffard.

Les illustrations proviennent de la collection de l'auteur. ■

CAHIER

Les traces de Denis Papin dans la poussière de l'histoire

PAR CONOR MAGUIRE ¹, SOCIÉTÉ DES LETTRES, SCIENCES, ET ARTS DU SAUMUROIS ²

Mots-clés : Denis Papin, vapeur, digesteur, Révolution Industrielle, Google Ngram.

RÉSUMÉ

La plus grande réussite de Denis Papin (1647-1713) fut sans doute d'apprécier le potentiel de la vapeur pour effectuer des travaux mécaniques ; en cela, il s'inscrit dans la longue lignée des grands esprits de l'histoire qui ont lutté pour capturer le pouvoir de la vapeur pour faire fonctionner des appareils mécaniques, y compris des gens comme Héros d'Alexandrie (né en 10 avant JC) qui, il y a environ deux mille ans, a inventé la turbine à vapeur *aeolipile* ³ et, même avant lui, Archimède (né en 287 avant JC) qui a inventé l'un des premiers appareils à vapeur ⁴. Cependant, ces dispositifs n'avaient apparemment aucune application pratique à l'époque.

Dans cet article, nous explorons les œuvres de Papin et les empreintes qu'il a laissées dans la littérature - qui peut être considérée comme un artefact culturel qui résume une partie de « l'ADN » de la société humaine. Nous utilisons des techniques bibliométriques pour analyser la littérature publiée (livres, manuscrits, brevets, etc.) sur la période du XVII^e au XXI^e siècle afin de retracer, sous forme quantitative, l'influence impressionnante de Papin sur la science et la technologie.

INTRODUCTION

Papin est né en 1647, au grand siècle, alors que les sciences fondées sur l'évidence et l'expérimentation étaient encore balbutiantes. Il allait exceller dans ce domaine. À cette époque, de plus en plus de manuscrits et de livres étaient publiés, ce qui nous offre aujourd'hui une riche ressource pour rechercher ses traces du

17^e siècle jusqu'à nos jours. Pour cela, nous nous tournons vers la scientométrie qui est un domaine d'étude de la métascience qui fournit des métriques pour analyser la science. Nous utilisons ici la bibliométrie qui est l'une des techniques quantitatives de la scientométrie et qui peut être déployée pour étudier l'impact d'auteurs spécifiques en calculant, par exemple, les fréquences de citation ou référencement. Cette approche est facilitée par le fait qu'aujourd'hui de grandes quantités de littérature historique, les « Big Data », ont été scannées et numérisées. Même si l'œuvre de Papin remonte à plus de trois cents ans, il aura certainement laissé son empreinte. Nous retracerons ses traces dans la littérature et dans quelle mesure il a influencé les autres par la fréquence avec laquelle ils faisaient référence à son œuvre. Nous montrerons que ses expériences, comme dans le cas de nombreuses recherches fondamentales, ont continué à produire des résultats et à être référencées longtemps après sa mort, à mesure que le plein potentiel de ses idées et de ses résultats expérimentaux a été réalisé. Nous verrons que l'empreinte laissée par Papin est grande, s'étendant sur plusieurs siècles.

Nous analyserons la base de données Google Books (<https://books.google.com/>) qui contient des millions de livres numérisés remontant au XVI^e siècle ⁵. Aussi, le moteur de recherche Google Ngram Viewer (<https://books.google.com/ngrams/>) sera utilisé pour produire des graphiques de séries temporelles (ngrams ⁶) de la fréquence de référencement de Papin et de son œuvre. Afin de situer l'œuvre de Papin dans le contexte d'autres développements de son époque, nous utilisons Ngram Viewer pour retracer l'évolution du développement plus large de la science et de la technologie au fil du temps. Nous effectuons également des recherches sur Google Scholar (<https://scholar.google.com/>), qui contient à lui seul environ 110 millions de documents scientifiques en anglais ^{7,8}.

1. cm@chateaubeaulieu.fr

2. <http://sllsas.sauumur.free.fr/accueil.htm>

3. <http://www.britannica.com/technology/aeolipile>

4. Jo Marchant (2010). *Reconstructed: Archimedes's flaming steam cannon*. *New Scientist - Technology*, 13 juillet.

5. Joab Jackson. (2010). *Google: 129 Million Different Books Have Been Published*. *PCWorld*, août 6.

6. Un n-gram est une collection de n éléments successifs dans un document texte pouvant inclure des mots, des chiffres, des symboles et des signes de ponctuation. www.mathworks.com.

7. Madian Khabza et C. Lee Giles. (2014). *The Number of Scholarly Documents on the Public Web*. *PLOS ONE*, www.plosone.org, 1 mai, Volume 9, Issue 5, e9394.

8. Gusenbauer, M. (2019). *Google Scholar to overshadow them all? Comparing the sizes of 12 academic search engines and bibliographic databases*. *Scientometrics* 118, 177-214. <https://doi.org/10.1007/s11192-018-2958-5>

Papin fut un inventeur renommé. Il a travaillé et rivalisé avec de nombreux ingénieurs et inventeurs importants de son époque et a contribué au développement des pompes à eau, de la machine à vapeur à cylindre et à piston, des hauts fourneaux, des pédalos, du sous-marin, du canon à air et d'un lance-grenades^{9,10}. Ses expériences n'ont pas toujours été couronnées de succès. Néanmoins, elles contribueront à des améliorations techniques ultérieures qui seront essentielles à l'émergence de la Révolution Industrielle (1760-1840) et de « l'ère de la vapeur » (1770-1914)¹¹.

Denis Papin est né près de Blois, en France, en 1647. Plus tard, il part vivre à Saumur chez son oncle Nicolas Papin¹² qui était médecin. Denis Papin lui-même poursuivra plus tard ses études de médecine à l'Université d'Angers ; cependant, il trouvait ce métier plutôt ennuyeux et avait en effet une mauvaise opinion de ses collègues. Il s'intéressait beaucoup plus à la physique, aux mathématiques et à l'ingénierie et consacra donc le reste de sa vie à l'invention dans ces domaines¹³. Aujourd'hui encore, Denis Papin est cité 8 420 fois dans la base de données Google Scholar (qui couvre à la fois la littérature scientifique et les brevets) alors qu'il n'a été publié sur Internet qu'en 2004.

DIGESTEUR DE PAPIN

Les travaux de Papin pour capter la puissance de la vapeur pour diverses applications l'ont amené à développer un appareil bien spécifique : une marmite pour la cuisson sous pression. On pourrait facilement imaginer que même si Papin avait abandonné la médecine, sa formation dans ce domaine aurait pu influencer en partie le développement de son fameux « Digesteur » destiné à la cuisine et au ramollissement des os. Cela a créé une révolution dans la cuisine car son nouveau dispositif pouvait à la fois cuire plus rapidement et rendre les aliments durs comestibles. On l'appelait la « Marmite de Papin » ou le « Papin Digester »¹⁴ ; cependant, il n'est devenu un appareil de cuisson domestique que pendant la Seconde Guerre mondiale, lorsque les gens ont commencé à apprécier son efficacité en termes de temps et d'économie en raison de son temps de cuisson beaucoup plus court et de sa capacité à cuire plus facilement des morceaux de viande moins chers¹⁵. Cette marmite, ou « digesteur de Papin », deviendra la cocotte-minute (*pressure cooker*) des temps modernes.

9. <http://www.britannica.com/biography/Denis-Papin>

10. <http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/history/Biographies/Papin.html>

11. <http://www.history.com>

12. Jean Luc Tulot avec la collaboration de Bernard Mayaud. (2001). *Les réformés de Saumur au temps de l'édit de Nantes*. <http://boisseau.xavier.free.fr/html/saumur/DECOUPAGE%20DE%20SAUMUR/ORIGINAL%20FRANCAIS.htm>

13. L. de la Saussaye. (1869). *La vie et les ouvrages de Denis Papin*. Franck, Paris.

14. https://www.larousse.fr/encyclopedie/personnage/Denis_Papin/136994

15. *The History of Pressure Cookers (Pressure Cooker Evolution and History)*. Mars 8, 2019, par Viccie. <https://missvickie.com/pressure-cooker-history/>

16. Anuradha Varanasi. (2022). *Why COP27 Must Accelerate Access To Clean Cookstoves For A Just Energy Transition*. Forbes, août 28.

17. Susan C. Anenberg, Kalpana Balakrishnan, James Jetter, Omar Masera, Sumi Mehta, Jacob Moss, et Veerabhadran Ramanathan. (2013). *Cleaner Cooking Solutions to Achieve Health, Climate, and Economic Cobenefits*. *Environmental Science & Technology* 2013 47 (9), 3944-3952. DOI: 10.1021/es304942e

18. Africa-Europe Foundation. (2022). *Africa's universal access to clean cooking solutions ahead of COP27*. 12 octobre. www.africaeuropefoundation.org.

19. The Club of Rome. (1972). *The Limits to Growth*. <http://www.clubofrome.org>

20. Ouedraogo, D., Igo, S., Compaore, A., Sawadogo, G., Zeghmati, B. et Chesneau, X. (2020). *Experimental Study of a Metallic Pressure Cooker Insulated with Kapok Wool*. *Energy and Power Engineering*, 12, 73-87. doi: 10.4236/epe.2020.1222006.

21. Marco Storni. (2021). *Denis Papin's digester and its eighteenth-century European circulation*. Cambridge University Press. 11 octobre.

Dans le cadre de la Conférence COP27 en Égypte en novembre 2022 qui, *inter alia*, a abordé la question d'une cuisine efficace et propre et son rôle dans la protection de la santé humaine (en particulier celle des femmes) et de l'environnement^{16,17}, le célèbre autocuiseur (« digesteur ») développé par Papin est toujours pertinent pour faire face à la crise du réchauffement climatique à laquelle est confronté le monde moderne où, encore, la cuisson sur feu ouvert est très répandue dans les pays en développement. Une caractéristique clé du digesteur était, et reste, son efficacité énergétique. L'une des principales préoccupations politiques de l'UNESCO est le développement durable en Afrique. Dans ce contexte, la Fondation Afrique-Europe déclare que : « *Avoir une cuisine propre n'est simplement utile. C'est la différence entre la vie et la mort* » (« *Having clean cooking is not a 'nice-to-have'. It's the difference between life and death* »)¹⁸. Dès 1972, le Club de Rome nous alertait sur les problèmes de ressources auxquels nous sommes aujourd'hui confrontés¹⁹. Il est donc encourageant de constater que les travaux se poursuivent pour perfectionner l'autocuiseur de Papin avec des innovations telles que la conservation de la chaleur grâce à l'isolation²⁰ et que son invention est toujours pertinente face aux défis du monde moderne - 344 ans après sa présentation de son « digesteur à vapeur » à la Royal Society, Londres, en 1679.

En raison de son efficacité, le digesteur de Papin s'est répandu dans toute l'Europe et a influencé un certain nombre de variantes de son invention dans d'autres pays²¹. La Figure 1 montre la fréquence de référencement de *digesteur de Papin* et *Papin's digester* dans les corpus français (FR) et anglais (EN), respectivement, sur la période 1600 à 2019. Il est à noter que le taux de référencement du digesteur de Papin a atteint son maximum pendant la Révolution Industrielle et le début de l'ère de la vapeur, soulignant clairement l'importance continue de l'œuvre de Papin pour les développements technologiques au cours de ces périodes, c'est-à-dire entre 100 et 200 ans après sa mort.

LA VAPEUR COMME SOURCE DE PUISSANCE MÉCANIQUE

Lors du développement du digesteur, les explosions n'étaient pas inhabituelles en raison de la haute pression accumulée dans la cuve scellée. Tout cela était très dangereux, mais cela indiquait que la vapeur pouvait être une source d'énergie pour effectuer

des travaux mécaniques. Pour résoudre le problème des risques d'explosion, Papin a inventé la soupape de sécurité (ou soupape d'évacuation de la vapeur) pour contrôler la pression à l'intérieur de son digesteur. Cette innovation serait d'une importance capitale pour diverses machines qui seraient plus tard inventées pour accomplir des travaux, par exemple la machine à vapeur. Une analyse plus approfondie montre que la référence à *souppes de pression & soupape de sécurité* et à *safety valve & pressure valve* dans les corpus français et anglais, respectivement, a sensiblement augmenté au cours de la période connue sous le nom de l'ère de la vapeur, soit entre un et deux siècles après la mort de Papin en 1713. De toute évidence, son œuvre est restée pertinente au cours de ces dernières périodes de développement industriel et technologique rapide, lorsque les ingénieurs et les inventeurs ont exploité les premiers travaux de Papin. La Figure 2 montre la fréquence de référencement de (*Papin's digester + Papin's digester*)²² et *steam engine* dans le corpus anglais, 1600 à 2019. Le taux de référencement de Papin et de son digesteur était particulièrement fort au début de l'ère de la vapeur alors que la machine à vapeur se développait.

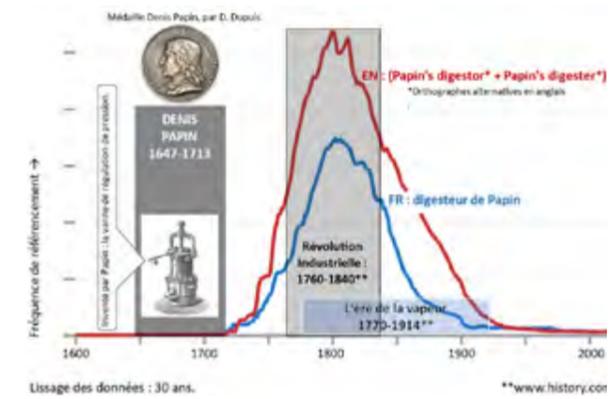


Figure 1. Fréquence de référencement de *digesteur de Papin* et *Papin's digester* dans les corpus français (FR) et anglais (EN), respectivement, 1600-2019.

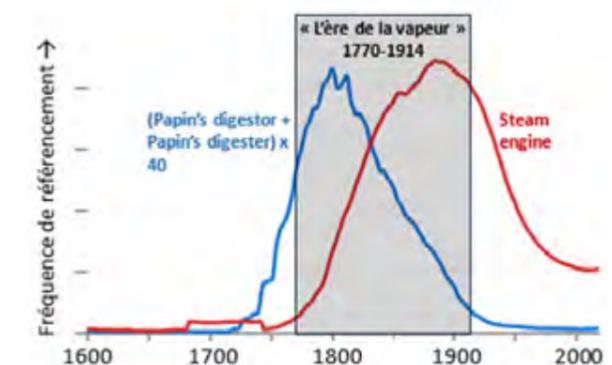


Figure 2. Fréquence de référencement de (*Papin's digester + Papin's digester*) et *steam engine* dans le corpus anglais, 1600-2019.

22. Multiplié par un facteur heuristique de 40 pour faciliter la comparaison visuelle avec l'autre courbe.

L'INFLUENCE INTERNATIONALE DE PAPIN

Au cours de sa vie, Papin a voyagé dans divers pays d'Europe et a travaillé avec plusieurs scientifiques parmi les plus éminents de son époque, dont Gottfried Wilhelm von Leibniz (1646-1716), Christiaan Huygens (1629-1695) et Robert Boyle (1627-1691). Ainsi, son œuvre et sa réputation sont devenues internationalement connues. La Figure 3 montre la fréquence relative avec laquelle Denis Papin est référencé dans quatre corpus européens différents : français, allemand, anglais et italien sur la période 1600 à 2019. Dans tous ces corpus, le taux de référence à Papin a augmenté rapidement environ 100 ans après sa mort pendant la Révolution Industrielle, ce qui montre clairement que les implications des inventions de Papin étaient pleinement réalisées et appliquées aux machines et aux innovations manufacturières pendant cette période de transformation rapide des méthodes de production, jusqu'à l'ère de la vapeur (1770-1914) et au-delà. Papin est beaucoup plus référencé dans le corpus français. Une analyse plus approfondie de Ngram a montré qu'entre 1850 et 1950 environ, même si Papin avait passé la plus grande partie de sa carrière en Angleterre, il était systématiquement référencé environ 10 fois plus souvent dans le corpus français que dans le corpus anglais. Au cours des dernières décennies, le référencement est resté quasiment dans les mêmes proportions.

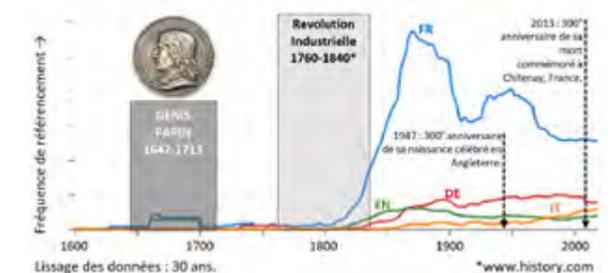


Figure 3. Fréquence de référencement de Denis Papin dans les corpus français (FR), allemand (DE), anglais (EN), et italien (IT), respectivement, 1600-2019.

SON ŒUVRE DANS LE CONTEXTE DE SON ÉPOQUE – ET APRÈS

Du vivant de Papin, les concepts physiques fondamentaux tels que le volume, la température, la pression, la vapeur et le vide suscitent une préoccupation croissante. La Figure 4 le montre pour la littérature française. Le livre de Papin, « *Nouvelles expériences du vide* », publié en 1674, devient de plus en plus référencé à cette époque, signe évident de son actualité. Vers 1800, on a assisté à une accélération notable de l'intérêt pour le sujet de la vapeur, et à un déclin de cet intérêt au cours des premières décennies du 20^e siècle. La Figure 5 montre la corrélation entre le taux de référence à la vapeur dans cinq corpus (français, allemand, anglais, italien et espagnol), ce qui montre un intérêt généralisé pour le potentiel de la vapeur en tant que force motrice tout au long de ce que l'on appelle l'ère de la vapeur.

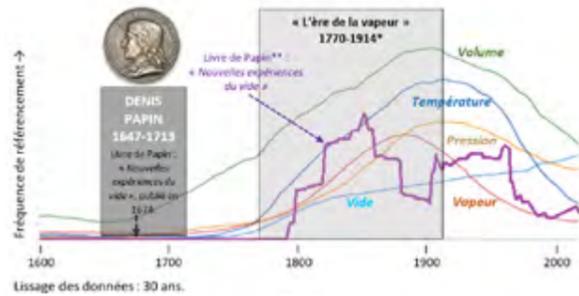


Figure 4. Fréquence de référencement des concepts : volume, température, pression, vapeur, et vide, respectivement, dans le corpus français, 1600-2019.

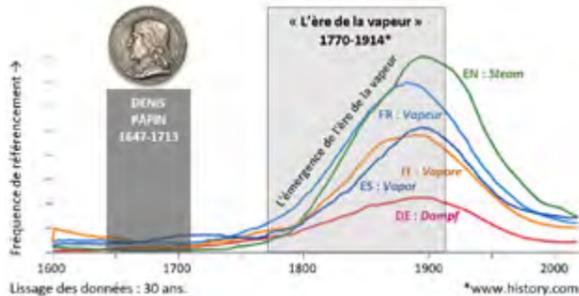


Figure 5. Fréquence de référencement de vapeur (FR), Dampf (DE), steam (EN), vapore (IT), et vapor (ES) dans les corpus, français, allemand, anglais, italien, et espagnol, respectivement, 1600-2019.

La vapeur allait devenir une source d'énergie essentielle pendant la Révolution Industrielle et l'ère de la vapeur. La Figure 6 montre l'augmentation et la diminution de l'utilisation de la vapeur comme force motrice pour diverses machines, notamment le bateau à vapeur et la locomotive à vapeur.

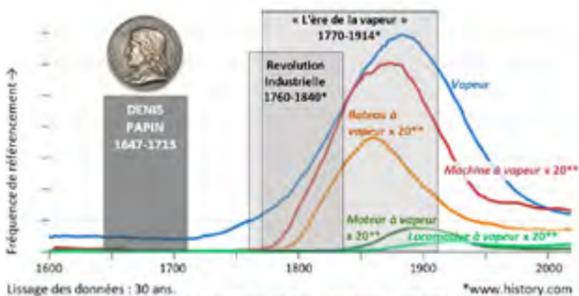


Figure 6. Fréquence de référencement de vapeur*, machine à vapeur*, bateau à vapeur*, locomotive à vapeur*, respectivement, dans le corpus français, 1600-2019.

La Révolution Industrielle a été rendue possible grâce à l'utilisation du feu, de l'eau, et de la vapeur pour fournir la force motrice qui a permis la transition de la fabrication manuelle de produits à l'utilisation de machines. Les premières expériences de Papin et d'autres sur l'utilisation de la vapeur pour générer de la force motrice ont conduit à un intérêt accéléré pour le potentiel

de la vapeur pour alimenter les machines ; c'était le fondement, la condition *sine qua non* de la Révolution Industrielle. Au cours de sa carrière, Papin rivalisait avec certains des grands inventeurs de son époque. La Figure 7 montre le taux relatif auquel Papin (1647-1713) et deux inventeurs anglais renommés de son époque, Thomas Newcomen (1663-1729), et Thomas Savery (1650-1715) ont chacun été référencés dans les littératures française et anglaise combinées.

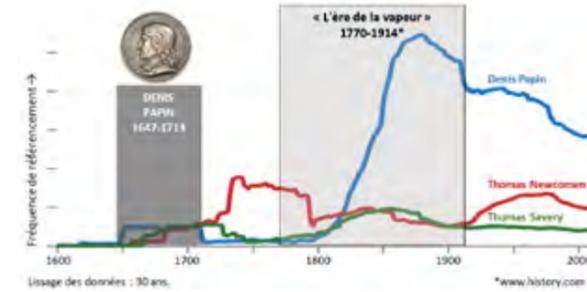


Figure 7. Fréquence de référencement de Denis Papin, Thomas Newcomen, et Thomas Savery, respectivement, dans les corpus français et anglais (cumulativement), 1600-2019.

Cela montre que pendant « l'ère de la vapeur », de 1770 à 1914, le taux de référence à l'œuvre de Papin dans les littératures française et anglaise combinées a fortement augmenté et qu'il était beaucoup plus référencé que Newcomen ou Savery, ou même que les deux combinés. Il est clair qu'à mesure que la technologie de la vapeur se développait, les travaux de Papin restaient pertinents pour les générations suivantes d'inventeurs.

Le célèbre ingénieur et physicien Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832) est généralement considéré comme le « père de la thermodynamique », qui fut la prochaine étape du développement vers la compréhension et l'exploitation efficace de la vapeur. En 1824, Carnot publia son livre « Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance ». Une analyse bibliométrique plus approfondie montre que même tout au long du XX^e siècle, Papin était encore référencé dans les littératures française et anglaise (combinées) entre 40 % et 50 % du taux de Carnot. Il s'agit d'une indication remarquable de la pertinence continue des œuvres de Papin pour l'entreprise scientifique alors qu'elle progresse vers le prochain niveau de compréhension et exploitation des moteurs thermodynamiques.

REMARQUES FINALES

Le vaste paysage de l'histoire humaine montre de nombreuses tentatives ingénieuses pour exploiter l'énergie du monde physique, notamment celle du vent, du feu, du soleil, de la gravité et, jusqu'à aujourd'hui, des forces nucléaires. Papin a compris le potentiel du feu, grâce au vecteur de la vapeur, pour accomplir un travail utile. L'analyse quantitative des traces de Papin dans la littérature montre qu'il fut l'un des pionniers à reconnaître le potentiel de la transformation de la vapeur en force motrice. Son œuvre a été entreprise à l'aube même de l'ère de l'exploitation de

la vapeur et bien avant la Révolution Industrielle et ce que l'on appellerait l'ère de la vapeur lorsque les technologies pertinentes étaient suffisamment mûres pour permettre la construction de machines pratiques entraînées par la vapeur. Ses expériences avec l'utilisation de la vapeur ont clairement démontré son potentiel, ce qui a inspiré d'autres scientifiques et ingénieurs à travailler dans ce domaine. Son œuvre a été à la base de nombreuses machines qui seront inventées dans les années qui suivront sa mort et qui contribueront de manière majeure à la Révolution Industrielle qui sera transformatrice, apportant richesse et améliorations à la société.

Papin a passé une grande partie de sa carrière à l'étranger, loin de son pays natal, la France, et n'a pas toujours été bien traité. Malgré son génie et le fait qu'il ait contribué de manière importante à l'exploitation du monde physique par l'humanité pour faciliter le progrès de la société, il mourra à Londres dans l'anonymat et la pauvreté - ce qui est une ironie injuste de l'histoire, car son digesteur (autocuisseur) allait considérablement aider les pauvres gens en rendant les viandes moins chères plus comestibles. En effet, l'influence de son digesteur est encore considérée aujourd'hui comme une aide à la santé humaine et à l'environnement, en particulier dans les pays du tiers monde. Nous avons montré ici que son œuvre a perduré dans la littérature pendant des centaines d'années après sa mort, prouvant l'importance de son héritage. ■

23. Carnot, Sadi. (1824). *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. Bachelier, Paris.

CAHIER

Usage de la vapeur dans les centrales nucléaires

PAR LAURA MATTEO, DOCTEUR-INGÉNIEUR, CEA-IRESNE ET NICOLAS TAUVERON, DIRECTEUR DE RECHERCHE CEA, CEA-LITEN

BREF HISTORIQUE DE L'USAGE VAPEUR DANS LE CADRE INDUSTRIEL

La première machine à vapeur naît au XVII^e siècle dans un contexte d'exploitation des mines de charbon anglaises. L'eau qui s'accumulait alors dans les points les plus bas des mines à ciel ouvert constituait une problématique industrielle majeure qui rendait rapidement les gisements inexploitable. Ce contexte poussa les inventeurs de l'époque à rechercher des solutions mécaniques à l'extraction de l'eau en remplacement des actions manuelles constatées inefficaces.

L'approche de ces premiers inventeurs de machines à vapeur est principalement expérimentale. Leurs recherches donnent lieu successivement à diverses machines à vapeur, dont la frise chronologique en Figure 1 illustre le chevauchement des périodes d'utilisation :

- La machine de Papin en 1681
- La pompe à feu de Savery en 1698
- La machine à feu de Newcomen en 1712
- La machine de Watt en 1769 (voir schéma de principe en Figure 2)

La diversification des usages industriels des machines à vapeur arrive alors, avec la distribution d'eau dans les villes qui devient envisageable en recourant à ce type de machines et représente une véritable avancée pour le confort des citoyens au quotidien à cette époque.

Par la suite c'est le premier véhicule à vapeur imaginé par Cugnot en 1771 qui voit le jour, puis le bateau à vapeur D'Abbans en 1783 et finalement la locomotive à vapeur de Stephenson en 1814 dont on connaît le rôle primordial qu'elle a joué dans les transports de personnes et de marchandises au XIX^e siècle.

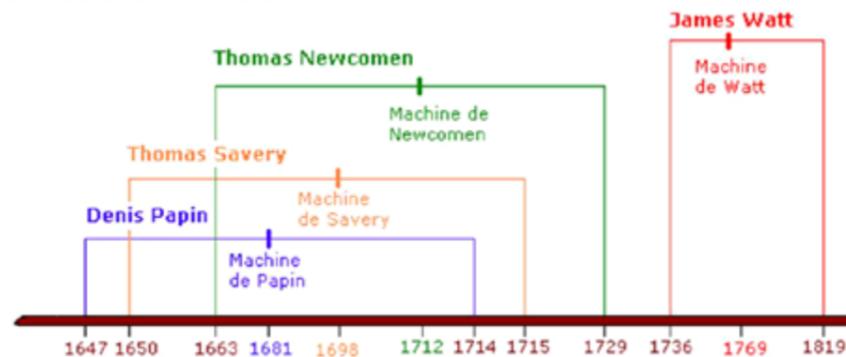


Figure 1 : Frise chronologique des machines à vapeur

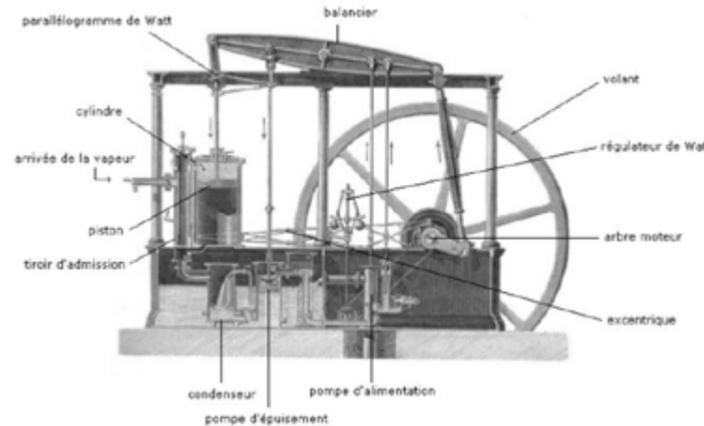


Figure 2 : Machine de Watt

C'est dans un deuxième temps en 1824 qu'intervient Sadi Carnot, jeune français et ancien élève de l'École polytechnique âgé alors de 28 ans, pour poser les fondements théoriques de la thermodynamique : la théorie générale, les grands principes, le lien avec l'hydraulique (conservation du calorique), l'indépendance du fluide, le rôle de la source froide et le fameux cycle de Carnot. Son précieux écrit « *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* » est considéré comme une référence scientifique majeure (cf. Référence 1). Le rendement de Carnot, dont l'expression très simple met en jeu les températures froide et chaude d'un cycle thermodynamique, permet toujours dans les études actuelles de connaître rapidement la valeur maximale théorique du rendement qui ne pourra pas être dépassée par un cycle donné.

$$\eta_c = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

Avec η_c le rendement de Carnot, T_f la température de la source froide et T_c celle de la source chaude.

Carnot est suivi plus tard par Clapeyron en 1834 qui travaille sur le changement de phase, Joule en 1847 qui énonce le premier principe de la thermodynamique, Thomson en 1845-50 et Clausius en 1850 qui achèvent de construire les lois de la thermodynamique telles que nous les connaissons aujourd'hui.

C'est l'inventeur Parsons qui permet à la turbine à vapeur « moderne » de voir le jour en 1884. Il est possible de remonter jusqu'au 1^{er} siècle en trouvant des prototypes cousins de la turbine vapeur telle que nous la connaissons, parfois rudimentaires mais basés sur le même principe de conversion de pression du fluide en énergie mécanique de rotation d'un arbre solide. L'ancêtre le plus lointain datant du 1^{er} siècle est l'éolipyle inventé par le mathématicien Héron d'Alexandrie (Cf. Référence 2).

Depuis lors, l'enjeu consiste principalement à optimiser la géométrie de la turbine vapeur en vue d'en améliorer le rendement de conversion. Cela a pu se faire via des essais expérimentaux mais aussi en profitant aujourd'hui de moyens informatiques conséquents et d'outils de simulation monodimensionnels & tridimensionnels performants, permettant d'affiner toujours plus le dessin des aubes et de la machine complète.

LA TURBINE VAPEUR ET LE CYCLE DE RANKINE THÉORIQUE

L'usage de la turbine vapeur permettant la conversion d'une pression en une énergie mécanique de rotation se fait au sein d'un cycle thermodynamique dit « de Rankine », nom de son inventeur. Il s'agit d'un cycle à changement de phase où une source de chaleur transfère son énergie à de l'eau initialement liquide, qui sous ce flux de chaleur va venir se vaporiser et continuer son chemin dans le cycle sous forme gazeuse. Un schéma de principe d'un cycle thermodynamique de Rankine théorique est donné en Figure 3, lequel met en avant les principaux composants stratégiques d'un tel système de conversion :

- **La source chaude**, constituée du générateur de vapeur (échangeur de chaleur fournissant de la chaleur à l'eau et donnant lieu à sa vaporisation), *Boiler* en anglais
- **La machine de conversion permettant de récupérer un travail**, constituée de la turbine vapeur (conversion d'une pression en une énergie mécanique de rotation), *Steam turbine* en anglais
- **La source froide** constituée du condenseur (échangeur de chaleur prenant de la chaleur à l'eau sous phase gazeuse et donnant lieu à sa condensation), *Condenser* en anglais
- **La machine de conversion fournissant un travail**, constituée de la pompe (conversion d'une énergie mécanique de rotation en pression), *Steam turbine* en anglais

Les cycles de Rankine étant des cycles thermodynamiques à changement de phase, ils permettent d'assurer la fourniture de

travail via le pompage en phase liquide, ce qui coûte peu d'énergie en comparaison à la compression en phase gazeuse qui existe dans les cycles thermodynamiques à gaz (sans changement d'état liquide-vapeur) de type Brayton par exemple. D'un point de vue pratique, les pompes des cycles de Rankine sont donc alimentées électriquement sans contrainte de positionnement et sans se soucier du rendement de conversion du moteur électrique (généralement très élevé), alors que les compresseurs des cycles Brayton à gaz sont souvent connectés mécaniquement à l'arbre de la turbine dans un souci d'économie d'énergie.

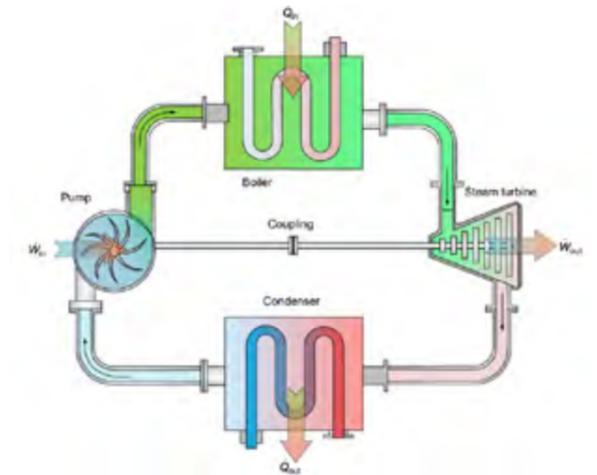


Figure 3 : Cycle de Rankine théorique (Cf. Référence 3)

USAGE DE LA VAPEUR D'EAU DANS L'INDUSTRIE NUCLÉAIRE

Plusieurs technologies de réacteurs nucléaires existent dans le monde et ont pu coexister simultanément en France, mais la plus commune reste celle des **Réacteurs à Eau Pressurisée**. Initialement de licence américaine Westinghouse, cette technologie a été transportée par la suite en France et a évolué au sein de l'entreprise Framatome. Elle a également été portée par le développement de la propulsion navale militaire.

Ces réacteurs sont composés de deux circuits principaux dans lesquels circule de l'eau. Au sein du circuit primaire l'eau est mise sous pression (155 bars) de sorte à rester sous sa phase liquide même à 320°C. Elle est pompée afin d'assurer la **circulation forcée** du fluide (par opposition à la circulation naturelle qui existe sous conditions de géométrie, de gravité et d'écart de température entre deux points). La circulation forcée permet une bonne extraction de la chaleur au niveau du cœur nucléaire, ainsi que son transport jusqu'au générateur de vapeur. Ce dernier constitue la source froide du point de vue du circuit primaire, mais la source chaude du point de vue du circuit secondaire qui est tout simplement le cycle de Rankine servant à la conversion thermique-mécanique.

Bien que le principe de fonctionnement soit le même et que les composants stratégiques soient toujours présents, un cycle de Rankine industriel s'éloigne assez fortement d'un cycle de Rankine théorique de par sa complexité architecturale. Une illustration de modélisation d'un cycle de Rankine de Réacteur

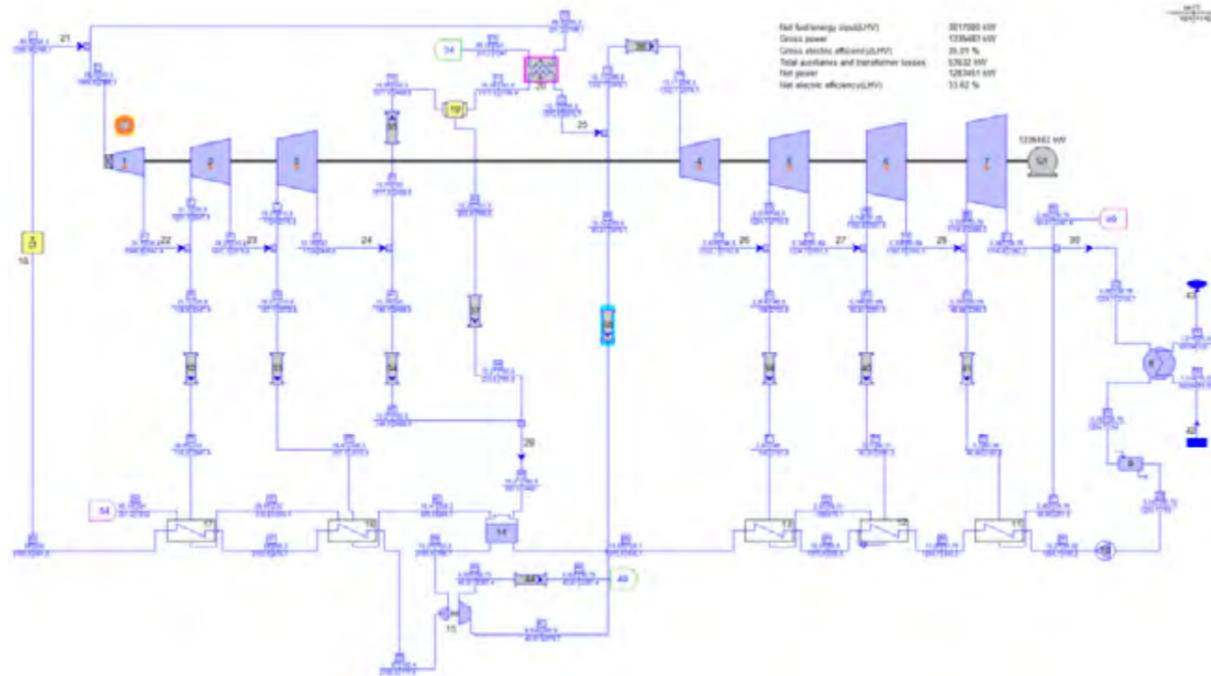


Figure 4 : modèle THERMOFLEX d'un REP 1300 MWe

nucléaire à Eau Pressurisée (REP) à l'aide du logiciel Thermoflex est proposée en Figure 4, laquelle permet d'appréhender le degré de complexité du système. En effet, la recherche d'optimisation du rendement a conduit les ingénieurs à créer des chemins secondaires pour le fluide dit « soutirages » en plus du circuit principal, ainsi que des échangeurs de chaleur permettant de préchauffer ou de surchauffer le fluide dans certaines zones. L'énergie n'est pas prise ailleurs que dans le cycle de Rankine lui-même, mais elle est distribuée aux endroits qui permettent de maximiser l'efficacité du cycle. Il faut également mentionner qu'une fraction de la vapeur est aussi utilisée pour directement entraîner une turbopompe dans le circuit secondaire.



Figure 5 : Réacteur à Eau Pressurisée du parc EDF (cf. Référence 4).

Pour expliquer l'utilisation de la vapeur dans le cadre de l'énergie nucléaire, nous allons toutefois nous ramener à une image simplifiée du cycle de Rankine (voir Figure 5) servant à la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique, puis électrique via la connexion de la turbine à un alternateur.

La régulation de la puissance fournie par le réacteur peut se faire via la variation de l'admission de vapeur à la turbine. Ceci est

très utile pour EDF qui se sert d'une partie de son parc de réacteurs nucléaires en mode « réseau prioritaire » ce qui permet de faire varier la production en fonction de la demande et de la fourniture d'électricité par les autres systèmes énergétiques (intermittents notamment).

D'autres technologies de réacteurs nucléaires font usage de la vapeur d'eau pour la conversion d'énergie. Les réacteurs dits « bouillants » sont des réacteurs à eau à cycle direct, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'échangeur de type générateur de vapeur permettant de transférer l'énergie à un second circuit et isolant ainsi le cœur nucléaire et l'eau primaire activée. Au lieu de se faire au circuit secondaire, le changement de phase est opéré dès la sortie du cœur nucléaire, point chaud du réacteur. La vapeur chemine ainsi directement vers les turbines pour la transformation en énergie mécanique. Il n'y a pas eu de réacteur de ce type en France.

Au contraire les RNRNa, réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (métal liquide opaque) disposent eux de trois circuits distincts. Un primaire en fluide sodium où se trouve le cœur, un secondaire toujours en sodium qui sert à déporter l'énergie vers un dernier circuit en eau (le cycle de Rankine servant à la conversion d'énergie). L'ajout d'un circuit intermédiaire a un rôle vis-à-vis de la sûreté car il permet d'éloigner toute éventuelle réaction chimique sodium-eau du cœur du réacteur. Le troisième circuit est très semblable au cycle de Rankine des REP décrit plus tôt. Des réacteurs de ce type ont existé en France (Phénix, Superphénix) mais ne sont plus en exploitation aujourd'hui, ils sont en cours de démantèlement. De par la haute température disponible du côté de la source chaude (550°C en sortie du cœur nucléaire), le rendement global des RNRNa était supérieur à celui des REP du parc actuel d'EDF de quelques pourcents. La température de la source froide (fleuve, air ambiant) étant la même quel que soit la technologie

de réacteur installée dans la centrale nucléaire, nous pouvons aisément nous attendre à cette amélioration du rendement grâce à l'expression du rendement de Carnot !

Il faut également rappeler que les réacteurs nucléaires dits de première génération (la filière « uranium Naturel Graphite Gaz ») utilisaient un circuit primaire dont la caloporteur était du gaz carbonique sous pression et un circuit secondaire avec un cycle de Rankine assez classique, à ceci près qu'une partie de la vapeur générée était utilisée directement pour produire de l'énergie mécanique entraînant les soufflantes au CO₂ du circuit primaire (cf. Référence 7). Cet usage d'une fraction de la vapeur du circuit secondaire à d'autres fins que la production électrique pour le réseau a été reprise dans certains réacteurs à haute température (c'est le cas du réacteur de Fort Saint Vrain aux Etats-Unis). Il est intéressant de noter qu'en situation hors-nominale de la vapeur supplémentaire pouvait être produite pour alimenter ces turbo-soufflantes. On retrouve également cette possibilité d'utilisation de vapeur pour entraîner des turbopompes en situation accidentelle dans certains concepts de réacteurs à eau.

UTILISATION DE LA VAPEUR À DES FINS AUTRES QUE LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ PAR LES CENTRALES NUCLÉAIRES

La plupart des centrales nucléaires installées actuellement sont électrogènes, c'est-à-dire dédiée à la production d'électricité. Il existe toutefois des cas particuliers non-électrogènes tels que la centrale de Madras utilisant de la vapeur et de l'électricité en vue de dessaler l'eau de mer (cf. Référence 8).

Il existe également des exemples tels que la centrale de Beznau en Suisse (voir Figure 6) dédiée au chauffage urbain. On peut mentionner aussi des projets de cogénération industrielle en vue de la production d'hydrogène par électrolyse.

Plus généralement, d'autres réalisations et projets variés et innovants voient le jour dans le monde dans un contexte qui est aujourd'hui celui de la décarbonation des divers usages de l'énergie.

VAPEUR MAIS PAS VAPEUR D'EAU : VALORISATION DE LA CHALEUR FATALE

Tout ce qui a été décrit précédemment n'a traité que de l'eau liquide versus vapeur. Il s'agit ici de parler d'autres fluides de travail potentiellement intéressants pour la récupération d'énergie dite de « basse température », avoisinant typiquement les 80- 100 degrés Celsius.

Tout procédé industriel thermique rejette de la chaleur dans l'environnement. C'est le cas de la chaleur transmise au fleuve ou à l'air ambiant en bout de chaîne par les centrales nucléaires, mais aussi par tout autre type de centrale. Cette chaleur est cependant de basse qualité (c'est-à-dire difficile à exploiter) car sa température est basse. Par conséquent, Carnot nous dit que l'usage de cette chaleur va nécessairement se faire à un rendement assez bas.

Une variante des cycles de Rankine décrits précédemment a vu le jour dans le cadre de cette volonté de récupérer la chaleur « fatale » (cf. Référence 5), actuellement perdue. Il s'agit des cycles de Rankine à fluides organiques (ORC). Les fluides organiques ont

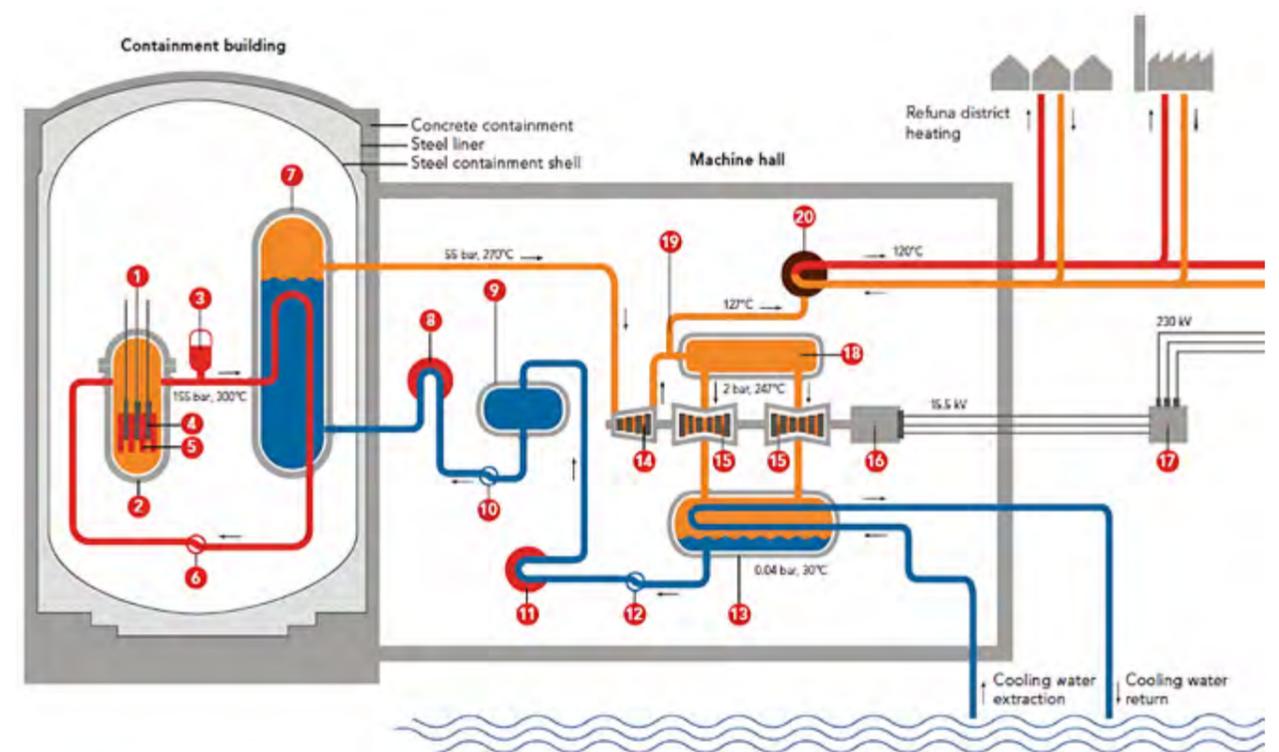


Figure 6 : Centrale nucléaire de Beznau (Suisse)

pour principale caractéristique de se vaporiser à basse température au niveau du générateur de vapeur. La turbine en aval travaille donc ensuite avec de la vapeur de fluide organique et non plus de la vapeur d'eau. Il existe des boucles expérimentales en France permettant de comprendre et de caractériser le fonctionnement des ORC en vue de coupler ces systèmes à tout type de procédé industriel rejetant de la chaleur (réacteur nucléaire ou autre). Certaines cascades entre cycles de Rankine classique et cycle de Rankine à fluide Organique permettraient d'augmenter le rendement électrique global (cf. Référence 9), mais n'ont pas vu le jour. On trouve des applications de ces ORC également pour améliorer la résilience des réacteurs nucléaires en cas d'incident amenant à une perte éventuelle d'alimentation électrique (cf. Référence 6).

RÉFÉRENCES

1. Sadi Carnot, 1824, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*.
2. Philippe Morin, Le musée des Arts et Métiers, <http://visite.artsetmetiers.free.fr/>
3. Ibrahim Dincer, 2018, Chapter 1.6.5.3.1 « Steam Rankine cycle », Energy Fundamentals, in Comprehensive Energy Systems.
4. Site internet du groupe Electricité De France, <https://www.edf.fr/groupe-edf/>
5. Nicolas Tauveron et al, 2014, « Available Systems for the Conversion of Waste Heat to Electricity », Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, IMECE2014, November 8-13, 2014, Montreal, Quebec, Canada.
6. Guillaume Lhermet et al, « Etude expérimentale et numérique d'un Cycle de Rankine à fluide Organique (ORC) appliquée aux Réacteurs à Eau Pressurisée (REP) »
7. R. Lheureux & A. Aguilera, 1992. « Safety criteria and provisions for the evacuation of residual heat from graphite gas cooled reactors. In: IAEA Specialists' Meeting on Decay Heat Removal and Heat Transfer Under Normal and Accident Conditions in Gas Cooled Reactors », pp.30–41.
8. Matt Fisher, Alina Constantin, Joanne Liou, 2021, « Au-delà de la production d'électricité : l'électronucléaire au service des applications non électriques », AIEA.
9. Bo Liu, 2014, Modélisation d'un cycle de production d'électricité bi-étagé à aéro-réfrigérant sec, Thèse de l'école nationale supérieure des mines de Paris. ■

CAHIER

Les chaînes de traction des TGV

PAR DAVID GOERES, DIRECTEUR DU PROJET TGVM, EXPERT DES CHAÎNES DE TRACTION TGV



Le TGVM

LES DÉBUTS DE LA MOTORISATION ÉLECTRIQUE

La motorisation électrique des trains est apparue en 1837, soit à peine trente ans après la circulation du premier train à vapeur. Après ce premier train électrique qui utilisait des batteries embarquées, il faut attendre 1879 pour voir Werner Von Siemens faire rouler à Berlin la première locomotive électrique. La petite locomotive électrique était entraînée à 13 km/h sur un anneau de 300m par un moteur série de 2,2 kW alimenté en 150 V continu par un 3e rail avec un galet collecteur.

Très vite, les villes adoptent ce nouveau mode transport et construisent des lignes de tramway. Clermont Ferrand sera la première à inaugurer son tramway le 7 janvier 1890.

C'est de nouveau en Allemagne que la première utilisation ferroviaire du courant alternatif se fait en 1904 avec des moteurs à collecteurs par alimentation directe en monophasé, dont la difficile commutation impose la fréquence peu ordinaire de 16 2/3 Hz sous 15kV. Cette tension caténaire spécifique s'est généralisée jusqu'à nos jours en Allemagne, en Autriche et en Suisse.

Mais il faut attendre la fin de la seconde guerre mondiale pour voir des grands chantiers d'électrification des lignes ferroviaires partout en Europe. Dès lors, les chaînes de traction électriques se multiplient et deviennent de plus en plus performantes.

DÉFINITION DE LA CHAÎNE DE TRACTION ÉLECTRIQUE

Dans le monde ferroviaire, le terme « chaîne de traction électrique » définit tous les équipements électriques permettant de générer un effort mécanique au niveau des roues motorisées d'un train, appelé également « effort à la jante », à partir d'une source électrique soit interne, par exemple des batteries, soit externe par une caténaire.

Une chaîne de traction regroupe les principaux composants suivants :

- Le pantographe qui permet de capter l'énergie électrique à la caténaire ;
- Le transformateur principal qui abaisse la valeur de la tension des caténaires monophasées afin de la rendre compatible avec les semi-conducteurs ;
- Les convertisseurs électriques, à base de semi-conducteurs, qui transforment la tension caténaire en un réseau de tensions triphasées de fréquence variable (fréquence = vitesse de rotation du moteur) ;
- Le moteur de traction qui permet de transformer une puissance électrique en effort de rotation.

La figure 1 montre la courbe de l'effort en fonction de la vitesse (F(v)) d'un train. Elle caractérise l'effort mécanique généré par l'ensemble des moteurs du train sur toute la plage de vitesse d'exploitation. Cette courbe F(v) doit être supérieure à la somme des forces qui s'opposent au déplacement du train, appelées « résistance à l'avancement ». Ceci afin de pouvoir circuler à la vitesse maximale des lignes ferroviaires ciblées pour le service commercial mais aussi de démarrer dans les rampes maximales de ces lignes.

La résistance à l'avancement en fonction de la vitesse (R(v)) est caractérisée par l'équation suivante :

$$R = A + Bv + Cv^2 (+Mgp)$$

- v est la vitesse du train
- A + Bv représente la résistance due au roulement et aux frottements mécaniques
- Cv² représente la résistance due à la traînée aérodynamique du train
- M est la masse du train
- g est l'accélération de la pesanteur
- p est l'inclinaison de la rampe (dans le ferroviaire maximum 3,5%)

Comme pour tout mobile terrestre, la résistance à l'avancement d'un train augmente avec la vitesse de circulation. C'est d'autant plus vrai pour un train à grande vitesse, pour lequel la traînée aérodynamique devient prépondérante et représente environ 80% de la résistance à l'avancement à 300km/h. Ainsi, la résistance à l'avancement d'un TGV double entre 200km/h et 300km/h. Cette contrainte, liée à la grande vitesse, entraîne un saut de performances important pour les chaînes de traction TGV par rapport à des trains exploités à des vitesses inférieures à 200km/h. Ainsi, TGV doivent disposer d'une puissance de traction

très élevée pour emmener ses 400T à plus de 300km/h. Cette puissance de traction est passée de 6,4MW pour les TGVSE qui étaient dimensionnés initialement pour 260km/h, à 8MW pour le TGV Atlantique, premier TGV à circuler à 300km/h en service commercial. Avec l'arrivée des TGV Réseau, cette puissance a été portée à 8,8MW afin de leur permettre de circuler à 300km/h sur des zones géographiques plus accidentées. Il faut attendre le milieu des années 2000 avec l'inauguration de la Ligne à Grande Vitesse Est Européenne, première ligne en Europe homologuée pour une vitesse commerciale de 320km/h, pour que la puissance de traction des nouvelles motrices TGV à motorisation asynchrone soit portée à 9,28MW. C'est sur cette même ligne que le record de vitesse sur rail sera battu par la SNCF et Alstom. En effet, le 4 avril 2007, la rame TGV V150 atteint la vitesse de 574,8km/h avec une puissance de traction de 19,6MW. A titre de comparaison, la puissance de la voiture moyenne en France est de 85kW.

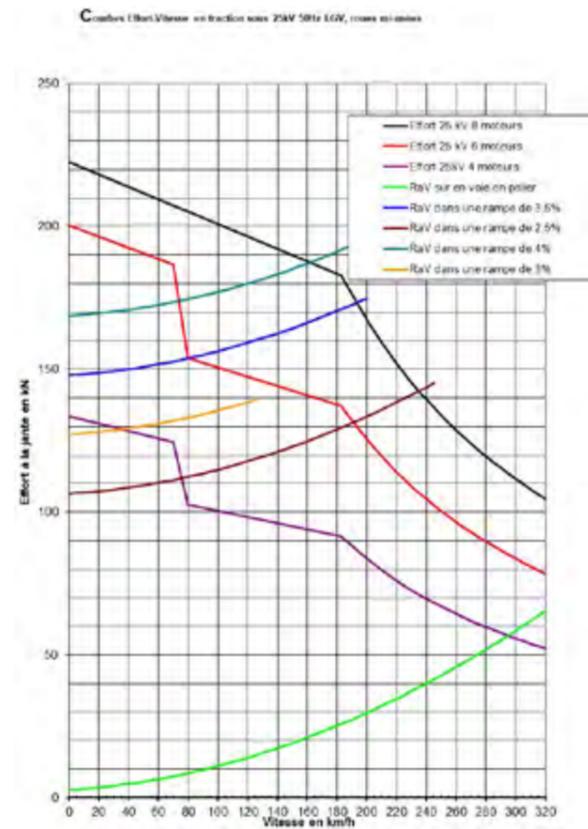


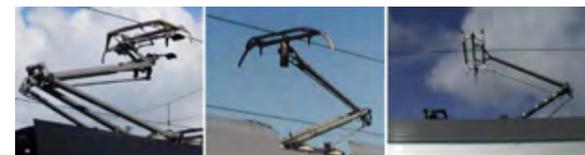
Figure 1: Courbes Effort-Vitesse en traction sous 25kV 50 Hz LGV, roues mi-usées

LE PANTOGRAPHE

Tous les composants de la chaîne de traction sont ainsi hors norme pour atteindre de telles performances à commencer par le pantographe, qui permet de capter cette puissance à la caténaire. Le pantographe est soumis à toutes les « agressions » météorologiques possibles, ainsi qu'aux turbulences aérodynamiques inhérentes aux écoulements de l'air autour du train.

Cet équipement électromécanique permet de capter une puissance apparente d'environ 10MVA via une surface de contact

avec la caténaire équivalente à une pièce de 1€. Pour atteindre cette performance, le pantographe doit avoir une structure métallique la plus légère possible tout en assurant le plus de stabilité aux bandes de frottement et résister aux contraintes aéroulques à 320km/h. De plus, le choix des matériaux de frottement des bandes en contact avec la caténaire est en lien direct avec la durée de vie de la caténaire. Ces bandes sont le plus souvent composées de poudre de carbone et de poudre de cuivre dans des proportions adaptées à la vitesse et aux courants à capter.



TGVSE Pantographe AMDE 25kV AM "à double étage"
 TGVA et TGV R Pantographe GPU 25kV "Grand Plongeur Unique"
 TGV POS Pantographe CX 25kV Pilotage de l'effort en fonction de la vitesse

Ces optimisations sont illustrées sur la figure 2 avec trois générations de pantographes de TGV.

Pantographe	Masse mobile du pantographe	Masse mobile de l'archet
AMDE 25kV	50 Kg	10 Kg – Archet métal
GPU 25kV	40 Kg	8 Kg – Archet carbone
CX 25kV de 1 ^{re} génération	25 Kg	8 Kg – Archet carbone
CX 25kV de 2 ^{me} génération	23 Kg	5 Kg – Archet carbone mono-bande

Figure 2: Trois générations de pantographe

Pour assurer un captage, le pantographe doit assurer une poussée mécanique suffisante sur la caténaire afin d'assurer un contact électrique de bonne qualité. Ni trop, pour ne pas soulever excessivement le fil de contact élastique de la caténaire, ce qui pourrait conduire à son arrachement ; ni trop peu, pour éviter la séparation physique entre les bandes de frottement et la caténaire, qui génère des arcs électriques destructeurs pour les parties métalliques de l'archet. Les effets aéroulques étant de plus en plus importants à mesure que la vitesse augmente, l'effort mécanique doit s'accroître à mesure que la vitesse augmente. L'effort de contact est usuellement proportionnel au carré de la vitesse.

L'effort mécanique du pantographe soulève légèrement la caténaire aux zones de contact et produit une onde qui se déplace à la vitesse du train. Cette onde nécessite, pour des vitesses élevées, d'assurer une distance minimum entre 2 pantographes en service. Cette distance minimum ne permet pas de lever les deux pantographes des deux motrices accouplées lors des circulations de 2 rames TGV. En effet, l'ondulation de la caténaire n'est pas suffisamment « amortie » pour assurer un captage de qualité. Ainsi, il n'est pas possible de lever le pantographe de chaque motrice mais seulement un pantographe par rame, celui de la motrice arrière, en fonctionnement nominal, et celui de la motrice avant, en cas d'avarie. L'énergie électrique est acheminée à la motrice distante via un câble 25kV, appelé « ligne de toiture », fixé sur la toiture du TGV.

LE TRANSFORMATEUR DE PUISSANCE (TFP)

L'énergie captée à la caténaire par le pantographe est ensuite acheminée au transformateur principal (TFP) de chaque motrice (voir Fig. 3). Le TFP assure d'une part une isolation galvanique entre le 25kV capté à la caténaire et le reste des équipements électriques du train ; et, d'autre part, il permet d'adapter le niveau de tension électrique afin de le rendre compatible avec les semi-conducteurs de puissance des convertisseurs électriques. Dimensionné pour une puissance d'environ 5MVA, le TFP d'une motrice TGV est un équipement relativement volumineux et d'une masse moyenne de 10T.



Figure 3: Transformateur principal de motrice TGV asynchrone

Le principe de fonctionnement d'un TFP est assez simple, il permet à un courant électrique circulant dans une bobine primaire d'induire un courant dans une bobine secondaire via un circuit magnétique. L'intensité du courant secondaire est égale à l'intensité du courant primaire multipliée par le rapport entre le nombre de spires du bobinage primaire et le nombre de spires du bobinage secondaire.

La puissance électrique absorbée par le bobinage primaire étant égale à la puissance dans le bobinage secondaire aux pertes près ($U1 \cdot I1 = U2 \cdot I2$), la relation entre les tensions des bobinages vérifie l'égalité suivante : $U2 = (n2/n1) \cdot U1$. Le rapport $n2/n1$ appliqué à un train est environ 1/25, permettant ainsi d'abaisser la tension 25kV de la caténaire appliquée au primaire du TFP à une tension secondaire d'environ 1000V. Un transformateur de TGV dispose de 4 bobinages de traction secondaires, un pour chaque essieu moteur de la motrice (voir Fig. 4).

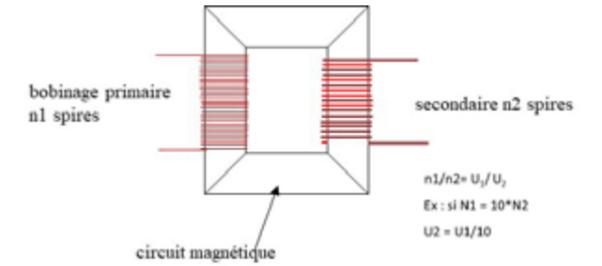


Figure 4: Bobinages d'un transformateur de TGV

LA CONVERSION D'ÉNERGIE

FONCTIONNEMENT D'UNE CHAÎNE DE TRACTION SOUS CATÉNAIRE CONTINUE

La conversion d'une tension continue en un réseau de tensions triphasées à fréquence variable est assurée par un convertisseur appelé « onduleur de tension ». L'association d'un onduleur et d'un moteur triphasé permet d'assurer la fonction « traction » d'un train sous caténaire continue. Voir (Fig. 5)

La technologie des interrupteurs de puissance « IGBT » (Insulated Gate Bipolar Transistor) permet, depuis plus de vingt ans, de réaliser la fonction onduleur de tension. Les onduleurs à IGBT absorbent (traction) ou restituent (freinage par récupération d'énergie) de la puissance à la source de tension continue. Il s'agit donc d'un convertisseur réversible capable de créer un réseau triphasé à partir d'une tension continue (traction) ou une tension continue à partir d'une tension triphasée (freinage).

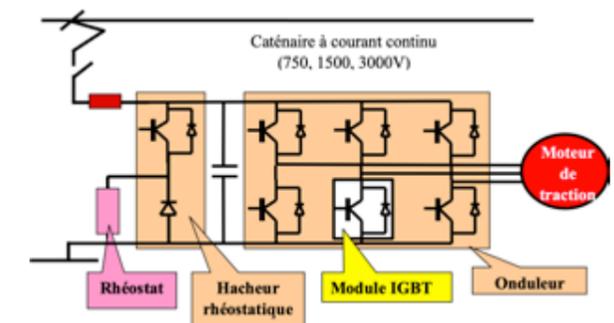


Figure 5. Architecture typique de la chaîne de traction moderne alimentée en courant continu

Un onduleur transforme une tension continue en une tension sinusoïdale. Pour ce faire, les semi-conducteurs vont « découper » une source de tension continue E, et en appliquant plus ou moins longtemps cette tension à la charge (coefficient α), vont créer une tension moyenne dont l'amplitude pourra varier en fonction du coefficient α . (voir Fig. 6)

Ce principe appliqué 3 fois, en déphasant les ordres de commandes de 120° permet de créer un réseau triphasé dont l'amplitude est fonction de α . La fréquence est déterminée par la commande des semi-conducteurs (voir Fig. 7)

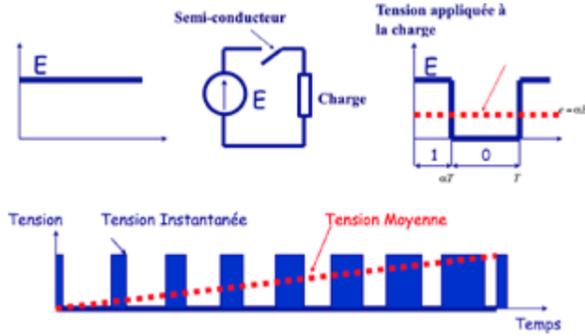


Figure 6 : Génération d'une tension moyenne variable

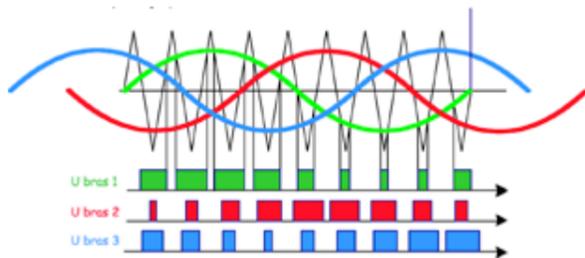


Figure 7 : Construction d'un réseau triphasé

FONCTIONNEMENT D'UNE CHAÎNE DE TRACTION SOUS CATÉNAIRE MONOPHASÉE

Les chaînes de traction fonctionnant sous des tensions caténaires monophasées (25 kV – 50 Hz ou 15 kV – 16,7 Hz) disposent d'un étage supplémentaire capable de transformer la tension sinusoïdale à fréquence fixe (fréquence de la caténaire) en une tension continue adaptée au fonctionnement de l'onduleur. Cet étage supplémentaire est composé d'un pont monophasé à commutation forcée (PMCF). Voir Fig. 8.

Le PMCF est un convertisseur réversible comme l'onduleur. Sa structure et son pilotage lui permettent de jouer le rôle de redresseur d'une part (transformer une tension sinusoïdale en tension continue), mais aussi d'être un onduleur capable de renvoyer vers la caténaire l'énergie de freinage produite par les moteurs de traction. Son fonctionnement est similaire à un onduleur monophasé travaillant à fréquence fixe, celle de la caténaire.

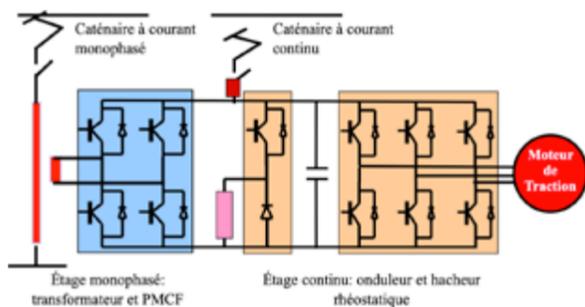


Figure 8 : Architecture de la chaîne de traction « moderne »

Ainsi, les convertisseurs de la chaîne de traction permettent de transformer la tension 25kV de la caténaire de fréquence fixe 50Hz,

en un réseau de tensions triphasées sinusoïdales d'amplitudes et fréquences variables, la vitesse de rotation du moteur synchrone ou asynchrone étant proportionnelle à la fréquence.

LES MOTEURS DE TRACTION

Le moteur électrique est le dernier composant de la chaîne de traction. Il peut être fixé dans le bogie ou sous caisse au-dessus du bogie ; cet environnement contraint donc fortement son volume. Plusieurs types de moteurs électriques se sont succédés dans le ferroviaire au fil des années. Le moteur à courant continu était usuellement utilisé jusqu'au début des années 80. Son fonctionnement très simple permettait de le piloter à partir de composants électromécaniques.

L'apparition des Thyristors (semi-conducteur) de forte puissance dans les années 80, associée à des électroniques de commande numérique a permis de concevoir des pilotes complexes, et l'utilisation de moteurs synchrones et asynchrones. Ces moteurs alternatifs ont l'immense avantage d'être moins complexes, plus puissants (pas de collecteur) et plus légers.

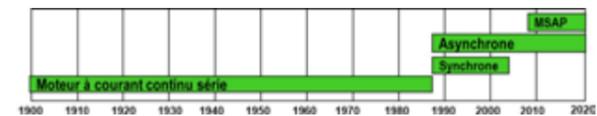


Figure 9 : Evolution des moteurs au cours des âges

Ainsi les années 90 ont vu le déploiement du moteur synchrone, notamment sur les TGVA, TGVR et TGV Duplex de première génération. Il faut attendre le début des années 2000, et l'apparition des IGBT de puissance pour que le moteur asynchrone se généralise. Pour comprendre ces évolutions successives, il convient d'évoquer les paramètres fondamentaux de dimensionnement.

Le couple « C » d'un moteur vérifie l'égalité $C = A * B * D^2 * L$ (voir Fig. 10).

- A en Ampère.conducteurs/m
- B = induction en Tesla
- D = diamètre du moteur
- L = longueur de fer

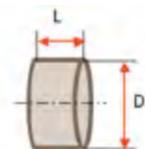


Figure 10 : caractéristique du moteur

Ainsi, le couple est directement lié au volume de fer du moteur. Pour un moteur de locomotive fret, qui nécessite un fort couple au démarrage, on privilégiera un moteur de diamètre important.

Mais pour une application grande vitesse, il est plus pertinent de disposer d'une vitesse de rotation élevée et d'augmenter la longueur de fer, dans le respect des contraintes d'encombrement associées au bogie. En effet, réduire le diamètre des moteurs est

nécessaire pour augmenter la vitesse de rotation sans augmenter les contraintes mécaniques et donc les contraintes de calage des conducteurs électriques du rotor.

Ainsi, en considérant un même volume de moteur, les 3 figures ci-dessous illustrent le gain en longueur de fer des 3 types de moteurs électriques :



Figure 11 : gain en longueur de fer du moteur selon les types utilisés

L'alimentation des enroulements des rotors nécessite l'ajout de balais qui sont en contact avec le collecteur du moteur à courant continu ou les couronnes du moteur synchrone. La suppression de ces dispositifs dans le moteur asynchrone permet de disposer d'un volume de fer plus important et donc d'une plus grande puissance.

Le tableau ci-dessous illustre les gains apportés par les différentes motorisations TGV :

Année	1981	1989	2007
Ligne LGV	Paris - Sud Est	Atlantique	Est Européenne
Type de moteur	Courant continu	Synchrone	Asynchrone
Puissance de kW	535	1100	1160
Rapport kg/kW	2,9	1,35	1,16
Vitesse en tr/min	3400	4000	3900

Figure 12 : tableau comparatif des performances des différents moteurs de TGV

Le moteur synchrone à aimants permanents est apparu au milieu des années 2000. Ce moteur reprend les avantages du moteur synchrone tout en éliminant la contrainte d'alimentation des enroulements du rotor (électro-aimant) qui ont été remplacés par des aimants. Ce moteur très compact est de plus en plus utilisé dans l'automobile et sur les tramways. Cependant, certains de ses modes dégradés et son coût (utilisation de terres rares pour les aimants) freinent sa généralisation à des matériels à plus grande vitesse. A noter, que l'AGV d'Alstom est le premier train à grande vitesse à utiliser cette motorisation.

LA CHAÎNE DE TRACTION DU TGVM : DE NOUVEAUX DÉFIS

Différentes chaînes de traction se sont succédées au gré des avancées technologiques. Les performances étaient souvent à la limite de ce que permettait la technologie de l'époque. L'arrivée des IGBT a permis de standardiser la conversion d'énergie électrique et par conséquent les chaînes de traction. Cette standardisation a permis des gains de fiabilité notables et une réduction des coûts.

Les défis liés au réchauffement climatique et la nécessité de réduire toujours plus la consommation d'énergie induisent un nouveau souffle d'innovation dans cet environnement standardisé. Ces nouveaux défis ont évidemment orienté les choix techniques du nouveau TGVM. Une attention particulière a été portée sur les innovations en lien avec l'aérodynamique, ce qui a réduit d'environ 13% le coefficient de pénétration dans l'air du

TGVM vis-à-vis de ses prédécesseurs. Ce gain sur la résistance à l'avancement a contribué à diminuer, dans les mêmes proportions, la puissance des moteurs de traction et donc leur taille. Ainsi, ces optimisations ont permis de fixer les moteurs du TGVM sur le bogie (voir Fig. 13) alors qu'ils étaient historiquement fixés sur la caisse des motrices. Cette nouvelle architecture a simplifié la chaîne cinématique entre le moteur et l'essieu, entraînant une réduction de coût importante, une plus grande fiabilité et un gain de rendement de 2%.

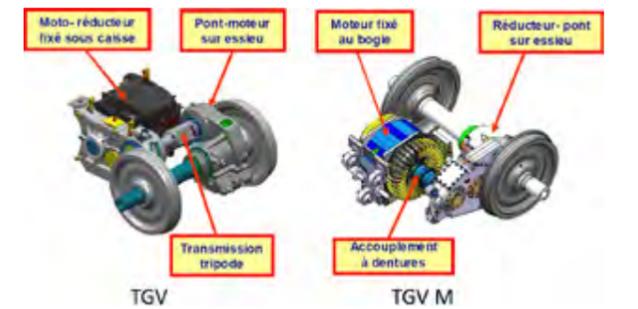


Figure 13 : Evolution d'architecture moteur du TGVM par rapport à son prédécesseur

D'autres optimisations et innovations ont permis de réduire de 20% la consommation d'une rame TGVM par rapport aux TGV Duplex existants. Le nombre de places assises ayant par ailleurs été augmentées de 10 à 20% sur TGVM, c'est une réduction de 32 à 37% de GES par voyageur. Cet écart s'accroît jusqu'à 50% de gain pour le TGVM en comparaison avec les matériels à grande vitesse à 1 niveau des exploitants ferroviaires concurrents de la SNCF. Toutes ces innovations permettent au TGVM de reprendre une longueur d'avance vis-à-vis de ses concurrents, validant l'objectif initial de ce partenariat d'innovation entre SNCF Voyageurs, Alstom et l'ADEME.

CAHIER

Propulsion aéronautique : Etudes expérimentales de la combustion

PAR AXEL VINCENT-RANDONNIER, INGÉNIEUR AU DÉPARTEMENT MULTI-PHYSIQUE POUR L'ÉNERGÉTIQUE, DE L'ONERA, MEMBRE D'ALUMNI-ONERA

La machine à valeur inventée par Denis Papin est une machine qui convertit une source d'énergie (originellement chimique) en énergie thermique, et transfère la chaleur produite à un fluide, l'eau, qui passe alors de l'état liquide à l'état gazeux. Ce changement d'état s'accompagne d'une forte expansion du fluide conduisant, dans un espace confiné, à une augmentation de pression (conversion d'énergie thermique en énergie mécanique).

A l'instar de la machine à vapeur, un moteur d'aéronef convertit une source d'énergie chimique en énergie thermique par combustion puis en énergie mécanique (quantité de mouvement), les gaz émis à très haute température étant soit accélérés au moyen d'une tuyère pour propulser directement l'aéronef, soit utilisés pour actionner une hélice (ou un rotor dans le cas des hélicoptères).

Parmi les différences notables entre ces deux machines, on remarque que dans le cas de la machine à vapeur, les fonctions de conversion chimique/thermique et thermique/mécanique ont lieu dans des espaces séparés alors que dans le moteur d'aéronef, elles sont réunies en un même lieu : la chambre de combustion. En outre, la montée en pression dans la machine à vapeur est essentiellement due au changement d'état de l'eau tandis que dans le moteur d'aéronef, elle est le fait de l'expansion des gaz par chauffage à des températures généralement supérieures.

A titre de comparaison, pour une pression de chambre/réservoir de 10 bar et en négligeant les pertes, il faudra une puissance d'environ 170 kW afin de vaporiser environ 66 g·s⁻¹ d'eau dans la machine à vapeur (température d'ébullition autour de 180°C) et générer une poussée masse × vitesse de 100 kg·m·s⁻¹. Dans le moteur d'aéronef, la même poussée peut être obtenue en brûlant 1,7 g·s⁻¹ d'hydrogène, 4,1 g·s⁻¹ de méthane ou 4,9 kg·s⁻¹ de kérosène dans 136 g·s⁻¹ d'air.

Les moteurs d'aéronefs les plus répandus aujourd'hui sont le turboréacteur (avions de ligne moyen ou long courrier), le turbopropulseur (avions régionaux) et le turbomoteur (hélicoptères).

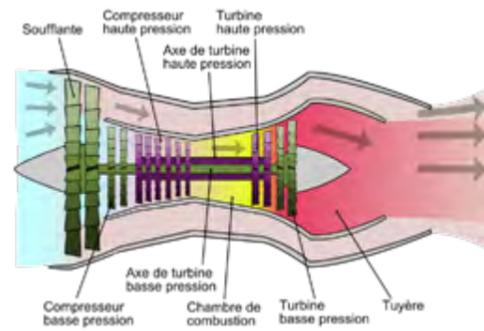


Figure 1 a : Schéma de principe du turboréacteur

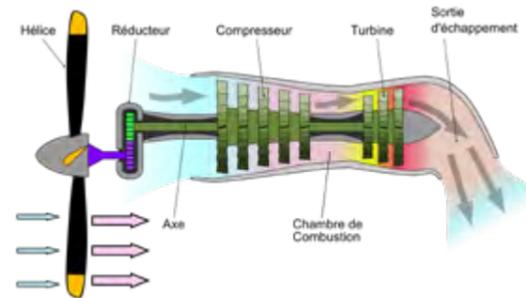


Figure 1 b : Schéma de principe du turbopropulseur

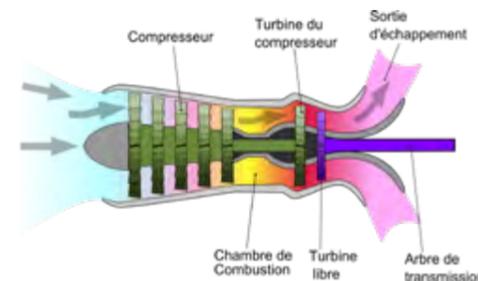


Figure 1 c : Schéma de principe du turbomoteur

Tous trois reposent sur le concept de la turbine à gaz pour lequel l'air qui alimente le moteur est comprimé au moyen d'un compresseur avant d'entrer dans la chambre de combustion où l'on injecte le combustible qui, une fois qu'il a brûlé avec l'air entraîne la turbine avant que le mélange de gaz brûlés ne soit libéré dans l'atmosphère. On notera que, contrairement aux moteurs

thermiques automobiles présentant des cycles (remplissage de la chambre de combustion avec de l'air et du carburant, fermeture de la chambre et compression, allumage/explosion du mélange, détente et évacuation des gaz brûlés), ces moteurs d'aéronef, une fois allumés, fonctionnent continuellement, l'air et le carburant alimentant une flamme stable qui ne s'éteindra qu'à la fermeture de l'arrivée de carburant, lors de l'arrêt du moteur.

Dans les turboréacteurs modernes, le taux de compression peut atteindre un facteur 40 ou 50, ce qui signifie que, pour de l'air ingéré à une pression de 1 bar et 15°C (condition de décollage avec une atmosphère standard), la pression dans la chambre de combustion atteint 40 à 50 bar. La phase de compression de l'air s'accompagne de sa montée en température (autour de 650°C pour un taux de compression de 40). À l'altitude de croisière des avions de lignes (environ 10 ou 11 km d'altitude), la pression ambiante chute à 0,25 bar et la température à -56°C, ce qui amène la pression et la température de l'air en entrée de chambre de combustion autour d'une douzaine de bar et 425°C.

Ce sont ces conditions de fonctionnement que l'on doit pouvoir reproduire dans nos foyers d'essais pour étudier la combustion dans des conditions représentatives du fonctionnement des moteurs réels. Pour cela, l'ONERA dispose de plusieurs moyens d'essais [1] sur les sites de Palaiseau en Ile de France et du Fauga-Mauzac près de Toulouse.

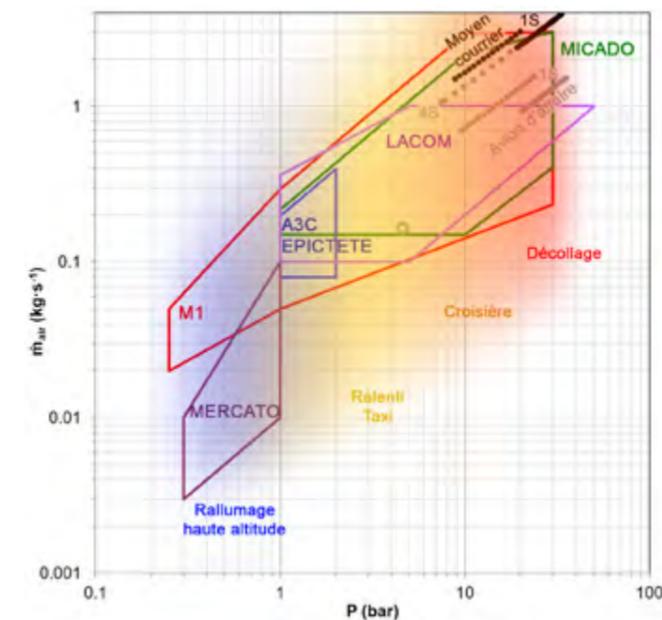
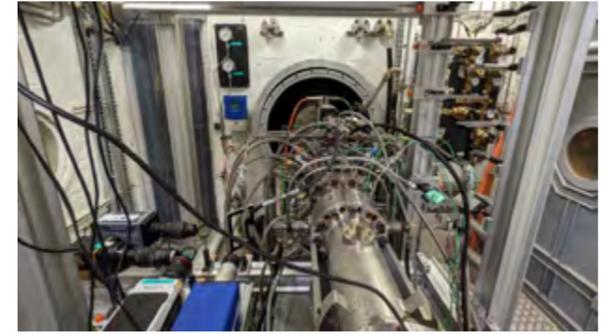
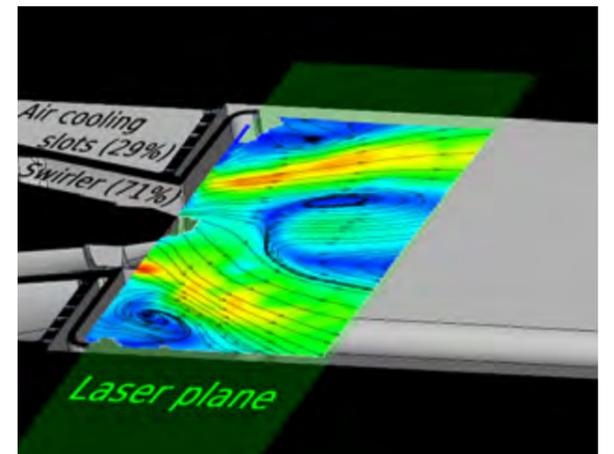


Figure 2 : Domaine de fonctionnement des principaux moyens d'essais dédiés à l'étude de la combustion dans les foyers de turbomachines.

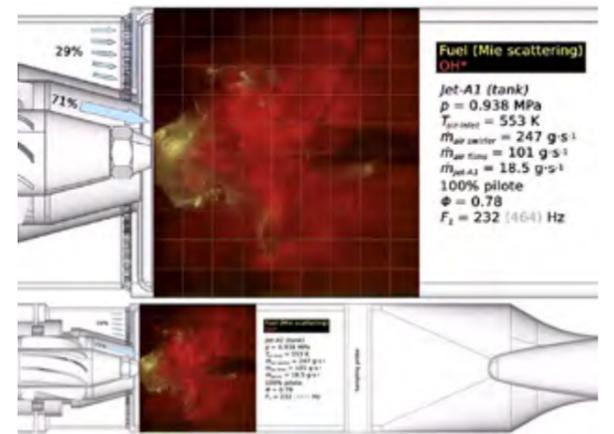
Ils permettent de couvrir l'ensemble du domaine de vol des aéronefs, du ralenti au plein gaz (décollage) en passant par le régime de croisière et le cas particulier du rallumage en haute altitude, lorsque le carburant, très froid, peine à se pulvériser et à se vaporiser. Ces bancs d'essais sont pour la plupart équipés d'accès optiques permettant ainsi la mise en œuvre de nombreux diagnostics.



(a)



(b)



(c)

Figure 3 : Banc MICADO (a) équipé de plusieurs diagnostics optiques (on note la présence de 4 caméras en bas à gauche), mesure de champ de vitesse par imagerie de particules (b) et vue du foyer en fonctionnement montrant en fausses couleurs le spray de kérosène (en jaune) et la flamme (en rouge)(c).

Les études qui sont menées au sein de ces installations ont pour objet de caractériser/mesurer les écoulements (vitesse, température), la pulvérisation du carburant par les injecteurs, la stabilité de la combustion ou l'efficacité des techniques de refroidissement des parois internes de la chambre, sans oublier le contrôle des niveaux d'émissions polluantes. C'est en effet dans la chambre de combustion que le combustible réagit avec

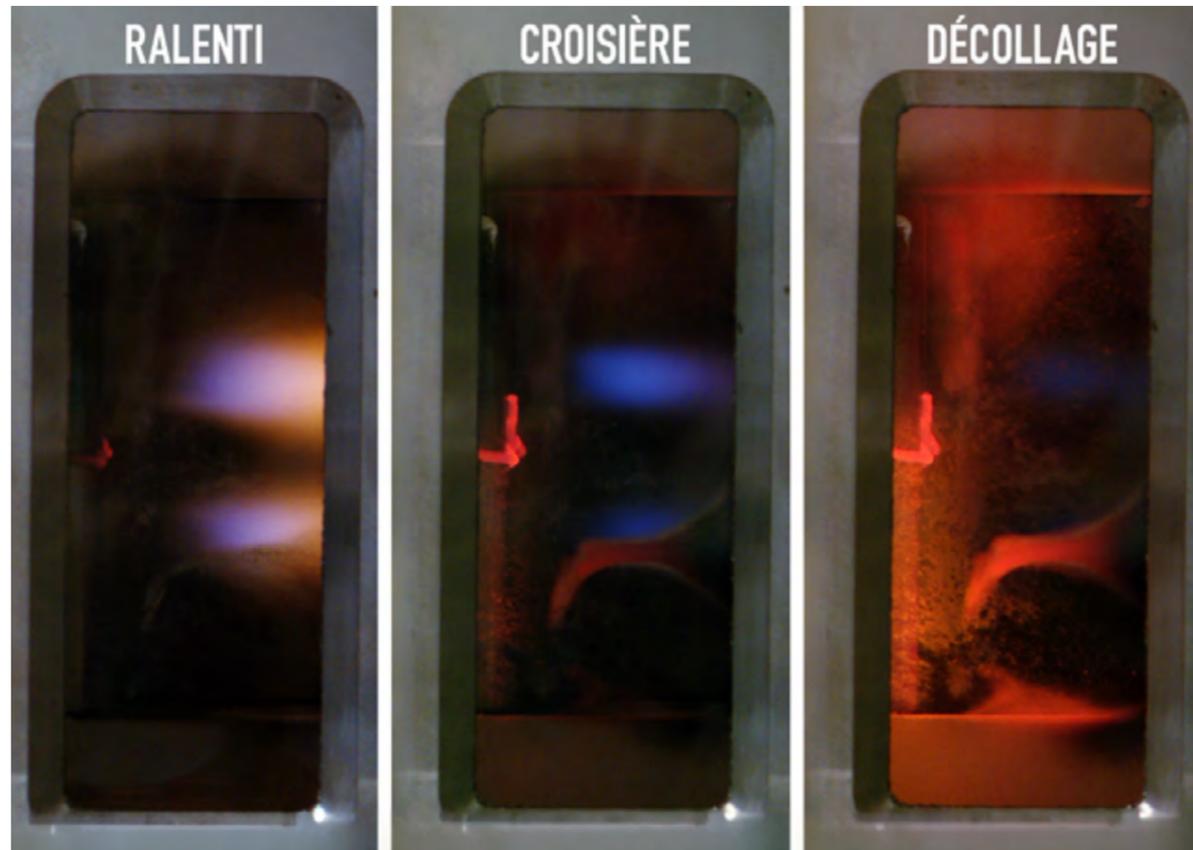


Figure 4 : Visualisation d'une flamme d'hydrogène générée par un injecteur à très faible niveaux d'émissions

l'oxygène de l'air pour produire des gaz brûlés, essentiellement du dioxyde de carbone (CO_2) et de la vapeur d'eau (H_2O), mais aussi des espèces minoritaires polluantes comme les oxydes d'azote (essentiellement NO et NO_2 , couramment réunis sous le vocable NO_x), le monoxyde de carbone (CO), des composés organiques volatils (COV) et des particules de suies que l'on trouve souvent mentionnées PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$, PM_1 ou $\text{PM}_{0,1}$ (PM est l'acronyme anglais de particulate matter et le chiffre qui suit désigne le diamètre maximal en μm des particules considérées).

Ces particules de suie sont des agrégats issus d'hydrocarbures imbrûlés majoritairement constitués d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (ou HAP), molécules comportant plusieurs cycles benzéniques (les molécules dérivées du benzène sont appelés composés aromatiques).

Les particules de suies sont surtout produites lorsque le moteur fonctionne à pleine puissance, de même que les NO_x , alors que le CO , fruit d'une combustion incomplète, se forme plutôt à bas régime. L'art des motoristes consiste donc à trouver le meilleur compromis entre efficacité, sobriété, minimisation de l'emprunte environnementale, sans évidemment sacrifier la sécurité. L'ONERA les épaula dans cette tâche grâce à ses équipes mettant en œuvre des moyens d'essais, de diagnostic et de simulation numérique avancés.

Récemment, dans le cadre d'un projet national portant sur la décarbonation du transport aérien par substitution de l'hydrogène aux carburants fossiles, l'ONERA a mis en œuvre l'ensemble de ces compétences et moyens pour concevoir, optimiser, réaliser un nouveau système d'injection à très faibles émissions. Celui-ci a été testé avec succès et caractérisé au banc MICADO fin 2022 [2]. Ces essais ont permis de démontrer la validité du concept proposé en mesurant des niveaux d'émission d'oxydes d'azote inférieurs à 10 ppm (parties par million) sur un large domaine de fonctionnement moteur. Ce concept a en outre fait l'objet d'une demande de dépôt de brevet conjointe avec le partenaire industriel.

Références

[1] A. Cochet, V. Bodoc, C. Brossard, O. Dessornes, C. Guin, R. Lecourt, M. Orain, A. Vincent-Randonnier, ONERA test facilities for combustion in aero gas turbine engines, and associated optical diagnostics, AerospaceLab journal 11-1 (2016)

[2] Jiangheng L. Ruan, Axel Vincent-Randonnier, Guillaume Pilla, Cornelia Irimiea, Development of innovative low nox hydrogen-fueled burner for aeronautic applications, TurboExpo 2023, Boston, GT2023-100453

CAHIER

Le fond plat, avenir prometteur de l'aérostation

PAR CHRISTOPHE BÉESAU, PRÉSIDENT INWORKS, CONSEILLER DIRISOLAR

UN ÉCOSYSTÈME EN MUTATION

Depuis une vingtaine d'années, les projets d'aérostats innovants se sont multipliés et leur possible retour dans les airs a fait les gros titres de la presse. Cette effervescence autour d'une idée ancienne – rappelons que le premier vol d'un dirigeable, alors mû par un moteur à vapeur ¹, date de 1852 – est principalement liée aux objectifs de réduction des émissions de CO_2 issues de la consommation de kérosène.

Car le transport aérien "classique" est devenu l'un des accusés du réchauffement climatique. D'un mal à un mot, il n'y a qu'un pas et les Suédois ont ainsi forgé le néologisme *flygskam*, "la honte de voler", pour désigner la culpabilité que devrait éprouver chaque voyageur montant dans un avion.

Dans ce contexte, les propriétés des aérostats apparaissent salutaires, et ont entraîné l'écosystème de l'aéronautique dans un élan de mutation. La portance aérostatique offre en effet l'avantage de ne pas utiliser d'énergie pour se maintenir en l'air, mais seulement pour se déplacer ². Il en résulte donc une grande efficacité énergétique du vol, déclenchant ainsi un regain d'intérêt pour les dirigeables, ces oubliés du début du XX^e siècle que la Seconde Guerre mondiale d'abord, puis les flottes commerciales d'avions de ligne des années 1950, avaient rapidement relégués au rang de "dinosaures de l'air".

1950 – 2000 : LES ANNÉES FAST IS BEAUTIFUL

Dès lors, le marché de l'aviation commerciale n'a cessé de croître avec une incroyable régularité. Le nombre de passagers annuel est multiplié par 8 entre 1950 et 1970, franchit la barre des 500 millions en 1973 et atteint 1 milliard en 1986 ³.

L'aérien progresse à une rapidité fulgurante, offrant toujours plus de confort et de vitesse. Le Concorde (qui ne cessera ses vols qu'en 2003) est le point d'orgue de ces années où le leitmotiv *fast is*

beautiful fait figure de modernité, et où le lancement du TGV, battant record après record, permet même au transport terrestre d'y faire écho.

Le dirigeable classique et ses images en noir et blanc illustrant les livres d'histoire apparaît alors définitivement démodé. C'est oublier que l'hydrogène a été remplacé par l'hélium, gaz porteur parfaitement sûr, et qu'en dépit de ses inconvénients d'encombrement et de relative lenteur, le dirigeable présente la capacité inégalée de rester en vol beaucoup plus longtemps qu'un avion, et qui plus est pour un coût beaucoup plus faible. Les militaires ne se priveront d'ailleurs pas d'exploiter ces caractéristiques, surtout aux États-Unis où la marine utilisera de tels engins d'abord pour détecter les sous-marins allemands guettant et torpillant les Liberty Ships au début de leur traversée vers l'Europe ⁴, puis jusqu'au début des années 60 avec par exemple des missions de radar volant.

Mais, qu'il soit rigide ou souple (le fameux "Blimp", connu pour son usage avant tout publicitaire), le dirigeable à profil classique reste pénalisé par son instabilité à l'approche du sol. Plus encore que sa lenteur ou son encombrement, cette instabilité porte préjudice à l'appareil car elle complexifie l'atterrissage et rend l'engin particulièrement sensible aux turbulences au sol, même légères. Ainsi, un tel appareil ne peut se poser sans risque que si le vent est inférieur à 20-25 km/h, une limite faible qui restreint d'autant plus l'usage de l'appareil. Cette instabilité rend également le dirigeable classique incapable de se poser seul, une équipe au sol étant indispensable pour stabiliser l'engin et l'arrimer à un mât.

Dès lors, le concept même de dirigeable est-il irrémédiablement condamné, en dépit de ses avantages indéniables, au premier rang desquels une utilisation parcimonieuse de l'énergie ?

C'est la question qu'explore Dirisolar dès 2010, en faisant le pari d'utiliser les lois de l'aérodynamique pour maîtriser l'effet combiné du vent et de la proximité du sol sur la stabilité de l'en-

1. Équipé d'un moteur à vapeur de 3 chevaux, le dirigeable du Français Henri Giffard effectue son vol inaugural le 24 septembre 1852.

2. Certains engins sont cependant à flottabilité partielle, et dans ce cas une partie de l'énergie embarquée doit aussi être utilisée pour compléter la portance aérostatique.

3. Et 3 milliards en 2011. Source : ICAO.

4. 250 dirigeables Goodyear ont ainsi joué un rôle décisif pendant la Seconde Guerre mondiale.

gin. Et cela, en s'appuyant sur un phénomène aérodynamique bien connu mais jamais exploité de façon contrôlée sur un dirigeable, l'effet Venturi.

L'EFFET VENTURI AU SECOURS DU DIRIGEABLE ?

L'effet Venturi, c'est ce phénomène aérodynamique qui permet aux voitures de Formule 1 de rester littéralement "collées" sur la piste en dépit des très hautes vitesses atteintes. C'est encore l'effet Venturi qui est utilisé tous les jours par les ouvriers du bâtiment pour projeter la peinture à l'aide de leurs pistolets pneumatiques. Et chacun de nous se trouve être un peu le Monsieur Jourdain de l'effet Venturi, lorsque, sans même que nous sachions comment, le bec de la pompe à essence arrête miraculeusement le remplissage de carburant avant tout débordement du réservoir.

Rappelons que du point de vue de la mécanique des fluides, l'effet Venturi correspond au phénomène par lequel, dans le cas d'un écoulement horizontal, la réduction de la section d'écoulement entraîne l'augmentation de la vitesse du fluide et la diminution de sa pression.

La démonstration est assez simple et s'appuie d'abord sur le principe de conservation du débit, avant et après la réduction de la section. Cette conservation du débit exprime que le rapport des sections est en rapport inverse des vitesses, ce qui s'écrit :

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

où S_1 et V_1 sont respectivement la section et la vitesse d'écoulement avant réduction de section, et S_2 et V_2 les paramètres correspondants, après la réduction de section.

Or, d'après le théorème de Bernoulli, la quantité $\frac{1}{2}V^2 + \frac{p}{\rho} + gz$ se conserve le long d'une ligne de courant du fluide, p étant la pression, ρ la masse volumique du fluide, g l'accélération de la pesanteur et z l'altitude du point considéré. Pour un écoulement horizontal, z est constant et l'expression de conservation de la quantité de Bernoulli s'écrit simplement :

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2$$

On en déduit l'expression de la différence de pression avant et après réduction de section, en fonction de la vitesse du fluide :

C'est-à-dire, en remplaçant le rapport des vitesses

$$p_2 - p_1 = \frac{1}{2}\rho V_2^2 \left(\frac{V_1^2}{V_2^2} - 1 \right)$$

par le rapport inverse des sections :

Enfin, comme la réduction de la section implique que $S_2 < S_1$, il en découle que la différence de pression

$$p_2 - p_1 = \frac{1}{2}\rho V_2^2 \left(\frac{S_2^2}{S_1^2} - 1 \right)$$

est négative : on constate donc bien une dépression au niveau de la section réduite S_2 .

Comment tirer parti d'un tel phénomène sur un dirigeable en approche du sol ? Les appareils actuels ne sont-ils pas déjà soumis à un tel effet ?

DES PROBLÈMES DE COUPLE

Nous ne parlerons pas ici de relations humaines mais bien de physique et d'aérodynamique ! Et pour commencer, il nous faut revenir sur le profil des dirigeables classiques. Historiquement, les dirigeables présentent une section transversale circulaire afin d'optimiser leur traînée aérodynamique pour un volume donné de gaz porteur. Leur enveloppe, allongée de façon caractéristique dans le sens de la marche, permet de faciliter la progression en vol et leur confère cette silhouette typique que tout le monde connaît. Comme pour tout aéronef motorisé, la manœuvre d'approche du sol est effectuée en propulsant l'appareil contre le vent. En ajustant sa propre vitesse avec celle du vent, le dirigeable réduit sa vitesse horizontale par rapport au sol et commence alors sa descente.

- Dans le cas du dirigeable à profil classique évoqué ci-dessus, une dépression entre le sol et l'enveloppe apparaît par effet Venturi et génère une force aérodynamique (appelée rabattance) dirigée vers le sol. Mais au fur et à mesure que l'appareil s'approche du sol apparaît en contrepartie un phénomène de compression de l'air sur l'avant de l'enveloppe, compression qui exerce alors une force opposée, dirigée vers le haut, et s'opposant à la rabattance.
- Cette force vers le haut s'exerçant d'abord sur la partie frontale de l'enveloppe, elle crée en permanence un couple cabreur qui modifie l'incidence et donc l'équilibre de l'appareil. Ce changement d'incidence augmente la portance de l'enveloppe face au vent, et donc tend à éloigner le dirigeable du sol, tout en réduisant aussi l'effet Venturi.

C'est donc la combinaison de ces deux phénomènes qui rend intrinsèquement instable l'approche au sol d'un dirigeable à profil classique. Il en découle une inévitable complexité de la manœuvre d'atterrissage et la nécessité de disposer au sol d'une équipe capable d'attraper les élingues et d'arrimer l'appareil.

Dès 2010, Dirisolar a étudié très méthodiquement ces inconvénients issus de la forme classique du dirigeable, et ceci en considérant d'abord l'objet volant aérostatique le plus simple qui existe, le ballon sphérique (voir Figure 1). Le ballon est ainsi placé dans un courant d'air horizontal près du sol. Les logiciels de CFD disponibles analysent alors très finement l'écoulement de l'air autour de ce ballon, et notamment quand il est près du sol.

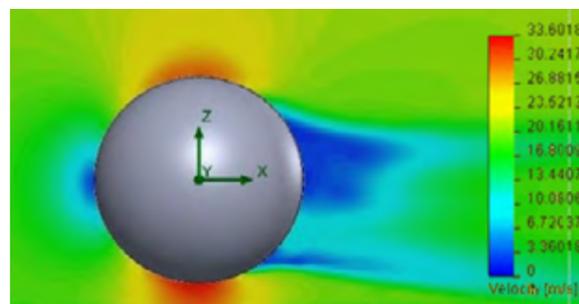


Figure 1. Section longitudinale circulaire d'un ballon sphérique. Le courant d'air arrive de la gauche, les couleurs indiquent les variations de vitesse de l'air

Ce sont alors les mêmes phénomènes que ceux décrits aux 1) et 2) précédents qui s'appliquent à cette sphère, c'est-à-dire un effet Venturi conjugué à une force dirigée vers le haut et s'exerçant sur sa partie frontale (c'est à dire sur la partie à gauche du graphique).

Considérons maintenant un objet à section longitudinale hémisphérique ou quasi hémisphérique (voir Figure 2), le fond de l'appareil étant constitué de la partie quasi plane de ce profil.

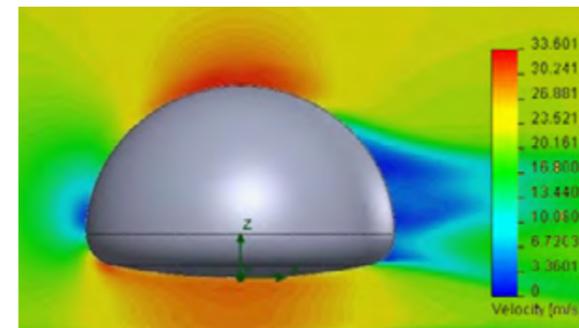


Figure 2. Section longitudinale quasi-hémisphérique. Le courant d'air arrive de la gauche, les couleurs indiquent les variations de vitesse de l'air

- Comme dans le cas précédent, à l'approche du sol apparaît par effet Venturi une dépression générant une force de rabattance, tirant l'appareil vers le sol.
- Mais en raison de la forme aplatie du fond, cette force croît beaucoup plus rapidement, et ceci jusqu'à atteindre 3 fois la force de rabattance du profil standard pour la même altitude au sol.
- Parallèlement, la forme particulière de l'avant réduit considérablement l'importance du couple cabreur, ce qui permet de contrôler l'incidence.

À l'approche au sol, on obtient donc la conjugaison d'un effet Venturi considérablement renforcé et d'un couple cabreur limité, la combinaison de ces deux effets permettant le contrôle de la manœuvre d'atterrissage.

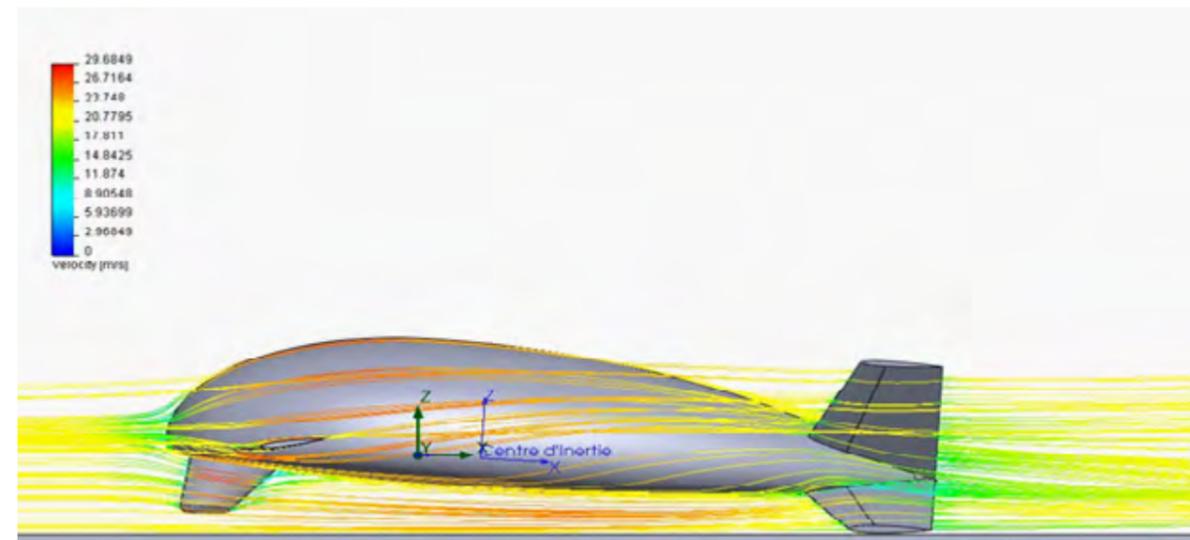


Figure 3. Calculs d'optimisation du profil de l'appareil, tirant parti du fond plat

Transposé sur la forme allongée du dirigeable, ce profil permet donc d'obtenir, à l'approche au sol, un effet du vent inverse de celui que l'on a sur un dirigeable à profil conventionnel : le vent fait descendre l'appareil doucement vers le sol, avec une incidence qui reste maîtrisée. Les effets du profil à fond plat ont été expérimentés dès 2011 sur un dirigeable de taille réduite, le DS 0.6. Cette « proof of concept » a permis de valider d'abord physiquement les bénéfices du fond plat, avant de les explorer et d'en améliorer encore les effets à l'aide de simulations multiphysiques.

Ce principe du profil "à fond plat" est breveté en Europe et aux États-Unis par Dirisolar, et exploité sur son tout premier appareil, le DS-1500.

LE DS-1500 : DES CARACTÉRISTIQUES HORS NORMES

Des milliers de simulations multiphysiques ont permis de quantifier précisément les forces et le couple s'appliquant à un appareil à fond plat lors de l'approche au sol. De façon complémentaire, une simulation dynamique d'atterrissage incluant la prise en compte en temps réel des commandes de vol a également permis de démontrer la capacité du pilote à poser l'appareil entièrement seul, du jamais vu dans toute l'histoire des dirigeables.

Ces simulations ont aussi permis d'optimiser le profil de l'appareil pour tirer au mieux parti des propriétés du fond plat (voir Figure 3). Ainsi, des empennages spécifiques accentuent la manœuvrabilité de l'engin et améliorent encore la maîtrise en douceur de l'angle d'incidence et de l'altitude. Ainsi optimisé, l'appareil devient particulièrement simple à piloter : 4 commandes de vol seulement, alors qu'il en faut 10 pour un dirigeable conventionnel.

Le DS-1500 de Dirisolar est donc un appareil hors du commun. De par ses caractéristiques aérodynamiques, il est capable de repousser les limites d'utilisation des dirigeables classiques et de se poser, sans assistance au sol, avec des vents jusqu'à 50 km/h. Propulsé par des hélices spécifiques à bas bruit entraînées par

des moteurs électriques brushless, l'appareil est ultra-silencieux, inaudible à 100 mètres. Des panneaux photovoltaïques placés sur les empennages arrière permettent la recharge des batteries embarquées et assurent un vol à l'énergie solaire, sans consommation d'énergie fossile et sans aucune émission de CO₂ ni de polluant. Enfin, les passagers bénéficient d'un confort de vol exceptionnel, placés dans un cockpit frontal leur offrant une large visibilité panoramique à plus de 180°.

Le projet a été présenté à la DGAC et à l'EASA. Au stade actuel de sa conception (TRL 6), aucun point n'a mis en cause sa faisabilité et le processus de certification de type est prêt à être engagé auprès de l'EASA. Dirisolar a d'ailleurs rejoint le groupe de travail des projets de dirigeables qui a pour objectif d'établir une spécification type de certification des dirigeables, non encore établie à ce jour.

L'AVENIR EST À LA MULTIPLICITÉ DES SOLUTIONS VOLANTES

Certaines Cassandre prévoient la fin pure et simple du transport aérien de tourisme, pour des raisons environnementales évidentes. D'autres annoncent que le coût de ce type de déplacement deviendra tellement exorbitant que l'on ne pourra s'offrir un tel voyage qu'une seule fois dans sa vie, ou bien prévoient que nous sommes à l'aube d'une désaffection massive des touristes pour l'aérien. Les ingénieurs aéronautiques, de leur côté, travaillent sans relâche au complexe développement de l'aviation commerciale à l'hydrogène, promise à l'horizon 2040.

L'avenir est plutôt à la multiplicité des solutions volantes, permettant une étroite adéquation entre l'inextinguible désir des humains de voler, l'exigence d'une rapide réduction des nuisances pour la planète et un coût de vol restant raisonnable, c'est-à-dire accessible à une famille. Car n'en déplaise aux Cassandre précitées, la demande pour l'expérience d'un aérien "propre" est encore et toujours confirmée par toutes les études de marché. Ainsi en 2020, 79% des touristes interrogés se déclaraient désireux d'une balade aérienne familiale sur le principe d'un dirigeable à énergie solaire, et 62% étaient prêts à déboursier au moins 70€ par passager⁵ pour y accéder.

Un appareil comme le DS-1500 a l'ambition de répondre à ce marché d'un tourisme aérien facile et économique à travers une offre de vols décarbonés permettant de découvrir (ou redécouvrir) les plus beaux sites touristiques de la planète. Sans nuisance sonore ni pollution, sans infrastructure défigurant les paysages, un DS-1500 transporte plus de 20 000 passagers par an pour un ticket à 70€ la demi-heure de vol (c'est-à-dire trois fois moins élevé qu'un vol de tourisme en hélicoptère ou en montgolfière). Et décollage et atterrissage s'effectuent depuis le même terrain, contrairement à un vol en montgolfière, offrant ainsi le confort d'improviser un vol de tourisme à la dernière minute.

Ainsi, le DS-1500 propose-t-il à tous la magie du tourisme aérien... mais libéré de tout sentiment de *flygskam* ! ■

5. Études de marché ESSEC, 2013, 2016 et 2020

CAHIER

Clôture du Colloque Denis Papin

PAR PIERRE LÉNA, MEMBRE DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

Une fois encore cette année, je suis heureux de témoigner ici du patronage de l'Académie des sciences à ce Colloque, co-organisé par ONERA-Alumni et l'Université d'Angers. Ces rencontres annuelles, de haut niveau scientifique, sont dues à une belle initiative de Bruno Chanetz, organisateur hors pair avec Marie-Claire Coët. Il convient tout d'abord de les remercier chaleureusement pour savoir mettre ainsi en avant un patrimoine historique, autour de personnages de notre terroir qui ont illustré dans les siècles passés la marche en avant, féconde mais souvent balbutiante, de la science. En outre, une publication dans les Comptes-rendus de l'Académie assure pérennité et transmission aux communications de cette journée. Merci encore aux intervenants, ainsi qu'à l'Université d'Angers pour cet accueil dans la douceur angevine.

Denis Papin fut un homme attachant, lié au protestantisme si vivant à Saumur, que la France, dans un moment où se préparait déjà la triste révocation de l'Édit de Nantes, ne sut pas s'attacher, pas plus qu'elle ne conserva l'immense figure de Christian Huygens, accueilli à l'Académie des sciences en 1670, quatre ans après sa création. Ce dernier avait recruté le jeune Papin, âgé de 24 ans, en tant qu'assistant. En 1674, l'un et l'autre se retrouvent donc à Londres, non sans que Papin ait publié une première expérience, où l'énergie chimique de la poudre à canon est transformée en énergie mécanique déplaçant un piston. Peu après et pour la suite de son existence, c'est la transformation de l'énergie thermique en énergie mécanique qui mobilise sa vive imagination et ses talents d'expérimentateur, on pourrait presque dire 'de bricoleur habile', talents qu'il cultive auprès de Robert Boyle, afin de produire 'des forces mouvantes extrêmement grandes', comme il l'écrira quinze ans plus tard, puisqu'à l'époque c'est de *force* et non d'*énergie* qu'il est question, ce dernier concept n'existant pas encore.

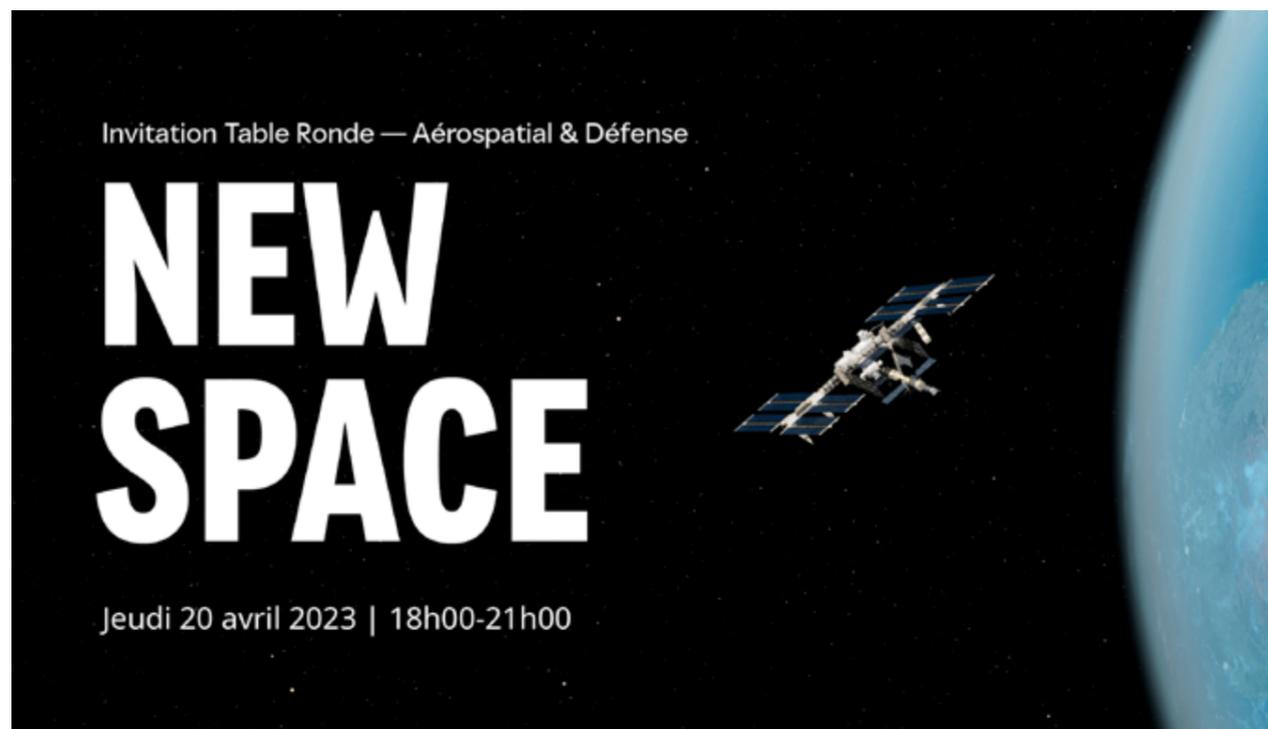
L'histoire de cette transformation, par le biais de la vapeur d'eau, est extrêmement intéressante. Source d'une révolution industrielle majeure en Europe, peut-être la première, ses débuts furent marqués par de nombreuses tentatives et réalisations empiriques, de plus en plus performantes, où s'illustrèrent, aux côtés de Papin, les noms de Thomas Newcomen et de James Watt. Il est fascinant aujourd'hui de lire la rapide progression des dispositifs techniques, qui à partir de 1750 envahissent les mines britanniques et en assurent la puissance, en parallèle à la lente émergence de la science conceptuelle, cette science dont Robert Boyle et l'abbé Edme Mariotte posent les premiers jalons et qui n'aboutit qu'un siècle plus tard au magnifique édifice de la thermodynamique.

Cette émergence mystérieuse d'une science nouvelle, qui naît d'une sorte de rêve éveillé face à la réalité, en s'appuyant le plus souvent sur une mathématisation du monde, est sans doute exemplaire du rapport entre l'ingénieur et le savant, de cet appui mutuel que se donnent l'expérience et la conceptualisation dans la science moderne, ainsi que Blaise Pascal l'avait génialement mis en œuvre au Puy-de-Dôme. Conor Maguire, secouant avec talent la poussière de l'histoire, nous a montré dans son approche si originale que le terme moderne de *scientist* n'apparaît dans la littérature que vers 1850, avec l'écllosion de la thermodynamique.

Il est piquant d'observer que, de nos jours, un scientifique au talent exceptionnel, Pierre-Gilles de Gennes, prix Nobel de physique en 1991, s'attaqua au même problème que Papin, à savoir le jet d'eau nécessaire pour éteindre un incendie. Papin est peut-être l'auteur du mémoire anonyme, portant sur un jet orientable, présenté en 1671 à l'Académie, tandis que de Gennes, doté d'une éblouissante intuition expérimentale, sut proposer aux pompiers de Paris l'ingrédient qui, mélangé à l'eau, réduisait la turbulence dans le tuyau et permettait aux lances d'atteindre les immeubles de grande hauteur dont Paris commençait alors à se doter. Il s'agit d'un polymère de haut poids moléculaire, le poly-oxyéthylène, utilisé à très faible concentration : mais l'explication précise du phénomène continue de défier les physiciens.

Au cours de cette journée, d'excellents exposés nous ont montré quelques remarquables exemples du devenir de l'art de l'ingénieur, désormais appuyé sur la science fondamentale, l'un et l'autre témoignant de la créativité présente en Europe. Pourtant, une phrase de la correspondance de Papin, lors des échecs qui marquèrent la fin de sa vie, n'est-elle pas particulièrement actuelle, lorsqu'il écrit *Les princes ont tant de sortes d'occupations qu'ils ne pensent guère aux sciences* ? La carrière, heurtée et souvent malheureuse, de cet homme dont le corps repose à Londres et qui fut un nomade entre France, Angleterre et Allemagne, ne nous parle-t-elle pas aujourd'hui de ces jeunes chercheurs, dont le prince ne se soucie guère du nomadisme et qui, après une thèse souvent brillante en France, accumulent les séjours postdoctoraux et s'exilent pour longtemps dans l'incertitude du lendemain, voire abandonnent le métier de chercheur ?

Pour conclure, donnons-nous donc rendez-vous dans un an à Montpellier, pour y découvrir l'abbé Bertholon, un *électricien des Lumières*, comme l'a heureusement qualifié mon confrère Jean-Paul Poirier.



Invitation Table Ronde — Aérospatial & Défense

NEW SPACE

Jeudi 20 avril 2023 | 18h00-21h00

L'industrie spatiale est en pleine transformation avec l'avènement du New Space. Des centaines d'entreprises innovent pour améliorer l'accès à l'espace et les services qui peuvent en découler.

Dans cette course, la donnée collectée par les nouveaux satellites (constellation, nano satellites, etc.) ouvre la voie à de nouvelles utilisations. De nombreux secteurs, tels que les transports, l'assurance, l'énergie, l'agriculture, innovent en mettant en place de nouveaux cas d'usages. La recherche de business modèles innovants et rentables est clé pour déployer à l'échelle ces cas d'usages.

Nous vous invitons à participer à notre 10ème évènement Alumni Onera / Oliver Wyman autour du thème : « New Space : utilisation de la data dans les différents secteurs économiques et nouveaux business modèles ».

Cet évènement se déroulera dans nos locaux au 1 rue Euler, Paris 8ème.

Nous espérons pouvoir échanger avec vous à cette occasion et vous prions de bien vouloir nous confirmer votre participation avant le 10 avril auprès de Claudia Mukendi : claudia.mukendi@oliverwyman.com

 | 

18h00-18h30
Accueil / Introduction

18h30-18h45
Sami Yacoubi
SpaceSence

18h50-19h05
Olivier Michel
Unseenlabs

19h10 - 19h25
Astrid Cousteau
Kineis

19h30-19h45
Marion Messador
Kayrros

19h50-20h05
Giao-Minh Nguyen
Prométhée

20h10-20h30
Questions / Réponses

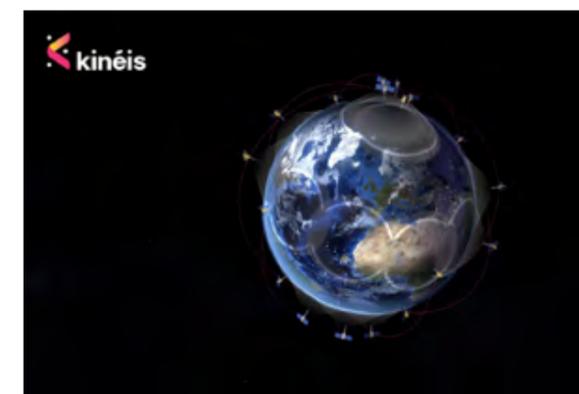
20h30
Cocktail dînatoire

TABLE RONDE NEWSPACE DU 20/04/2023

KINEIS, opérateur satellitaire et fournisseur de connectivité globale, déploie la première constellation européenne dédiée à l'internet des objets (IoT)

PAR SÉBASTIEN MARTIGNAC, KINEIS

Le New Space a vu depuis ces dernières années l'émergence d'acteurs privés du secteur spatial. Ces acteurs bousculent les agences étatiques, notamment avec l'utilisation d'innovations technologiques plus performantes et moins coûteuses, dans un objectif commercial. En France, Kinéis, opérateur satellitaire et fournisseur de connectivité globale, illustre cette évolution avec le déploiement de la première constellation française et européenne de nanosatellites, dédiée à l'Internet des Objets (IoT), prévu en 2024.



Constellation Kinéis de 25 nanosatellites © Kinéis

UN ACTEUR INCONTOURNABLE DE LA TECH SPATIALE EUROPÉENNE ET DU NEW SPACE

Créée en 2018, la société toulousaine Kinéis hérite de quarante ans d'expertise dans la collecte de données depuis l'espace et a

développé une technologie IoT fiable donnant facilement accès à des données satellitaires utiles. Grâce à sa constellation de 25 nanosatellites, Kinéis localise et connecte des objets où qu'ils se trouvent sur la planète, en particulier dans des zones blanches, dans le but de mettre en œuvre des solutions dans des domaines qui représentent aujourd'hui des enjeux majeurs pour l'Homme, ses activités et son environnement : agriculture et pêche connectées, prévention des feux de forêts, traçabilité des animaux sauvages, suivi des infrastructures et des réseaux énergétiques, suivi du transport et de la logistique. Kinéis dispose du label French Tech Next40, promotions 2021 et 2022. Depuis février, Kinéis a renforcé sa position dans la communauté de la Tech en intégrant le programme 2023 de la French Tech 120, une promotion axée sur les enjeux environnementaux et sociétaux.

LA PREMIÈRE CONSTELLATION DE NANOSATELLITES DÉDIÉE À L'IOT AVEC 100% D'INVESTISSEMENTS FRANÇAIS

Pour connecter simplement des millions d'objets, à faible coût, partout sur la planète grâce à la connectivité spatiale, les prouesses techniques ne suffisent pas. Kinéis a atteint son objectif d'une levée de fonds de 100 millions d'euros en 2020, fait inédit pour un projet d'IoT spatial européen privé. Cette levée de fonds historique fait de Kinéis un acteur privé du New Space bénéficiant d'un accompagnement important de la part d'institutions stratégiques, sans égal sur le marché. CLS, le CNES, Bpifrance, via le fonds Sociétés de Projets Industriels (SPI), financé par le Programme d'investissements d'avenir et la Banque Européenne d'Investissement, l'Ifremer, Thales, CELAD, BNP Paribas

Développement, Hemeria et d'autres partenaires industriels et financiers, investissent et soutiennent l'ambition de Kinéis de fournir une connectivité spatiale universelle.

Après avoir finalisé cette levée de fonds, Kinéis a noué des partenariats en France et à l'international. En tant que nouveau fournisseur français de connectivité globale, Kinéis devient ainsi le premier acteur de connectivité spatiale IoT à financer son développement, de la construction de sa constellation au lancement de ses 25 nanosatellites, prévu en 2024, en passant par le développement de son segment sol. La jeune société tient non seulement ses promesses financières et industrielles. Kinéis prend de l'avance et assoit sa place dans le paysage du New Space.



LA CONNECTIVITÉ KINEIS : UNE RÉPONSE COMMERCIALE AUX BESOINS DES UTILISATEURS DE LA DONNÉE

Le spatial n'est cependant pas la finalité de Kinéis, il reste un moyen pour déployer une offre de services à l'Internet des objets (IoT). Ce dernier présente de nombreux avantages pour répondre aux besoins des utilisateurs de la donnée, en particulier dans les régions éloignées ou difficiles d'accès. Kinéis se développe sur ces nouveaux marchés et répond aux besoins de ces utilisateurs, grâce à sa connectivité satellitaire qui offre de nombreux avantages :

- Une couverture planétaire globale fournie par ses 25 nanosatellites permettant aux utilisateurs d'accéder à leurs

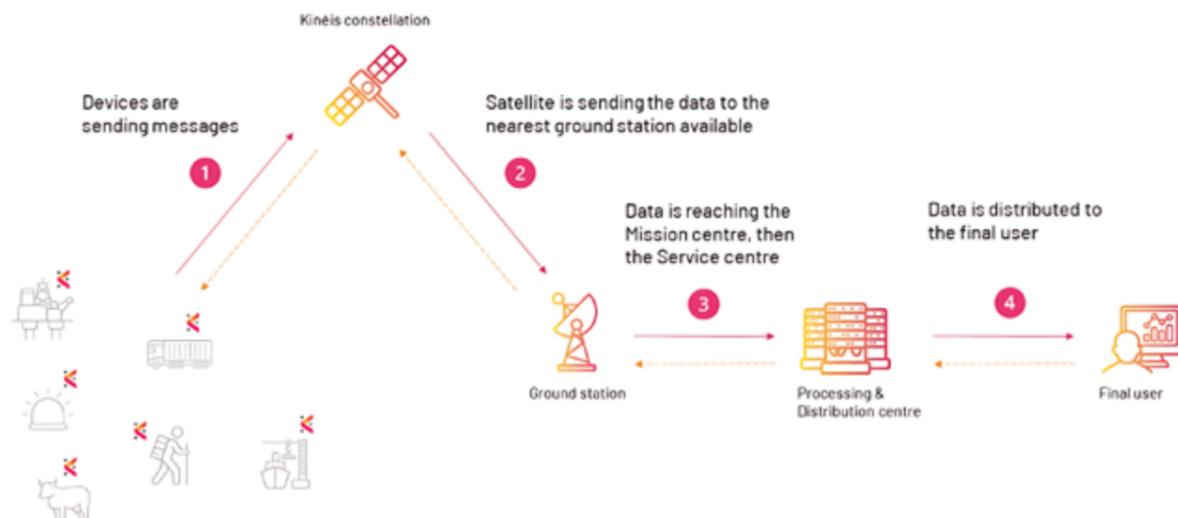
données IoT, n'importe où dans le monde, dans les endroits les plus reculés, sans dépendre d'infrastructures terrestres.

- Une connectivité plus fiable que les réseaux terrestres car non soumises aux interruptions de catastrophes naturelles, de pannes d'infrastructures ou aux zones mal desservies.
- Le temps de revisite des nanosatellites Kinéis, inférieur à 15 minutes en 2024, permet de délivrer un message en peu de temps à l'utilisateur final.
- Une communication bidirectionnelle entre les terminaux et les nanosatellites.
- La possibilité d'hybridation avec des réseaux de communication terrestres de l'IoT (LoRa, Sigfox).
- La sécurisation des liens de communication avec le satellite et la transmission des données à l'utilisateur final (couche cryptographique).
- La miniaturisation des terminaux.
- La basse consommation énergétique des terminaux.
- Une utilisation simple.
- Des prix attractifs.

COMMENT FONCTIONNE LE SYSTÈME DE CONNECTIVITÉ KINEIS POUR L'IOT ?

Grâce à un terminal (ou device), un Objet est connecté à la constellation Kinéis de 25 nanosatellites en orbite basse. Il peut envoyer un signal au satellite passant au-dessus de lui qui le renvoie à une des 20 stations-sol (ou GRS - Ground Remote Station). Ces dernières transmettent les signaux au Centre de Mission, puis au Centre de Service qui distribue la donnée à l'utilisateur final.

En plus des nanosatellites, Kinéis déploie également son réseau de 20 stations-sol (GRS) qui représentent une composante essentielle de la performance de la connectivité Kinéis pour l'Internet des Objets. Elles permettent notamment la redescende de la donnée satellitaire et l'envoi des commandes aux satellites. Plus de stations sont déployées avec des positions géographiques optimisées, plus rapidement la donnée reçue par le satellite est mise à disposition de l'utilisateur. Le déploiement des GRS est assuré par Kinéis et prévu jusqu'au premier lancement en 2024, afin d'assurer le bon fonctionnement de la constellation dans des conditions optimales.



Ground Remote Station (GRS) Kinéis en Polynésie française © Kinéis

UN ACTEUR DE L'INNOVATION SPATIALE

Kinéis déploie toutes ses capacités d'innovation technologique à réunir le New Space et l'IoT.

La taille d'un nanosatellite Kinéis (l'équivalent de 16 briques de lait) imposait de concevoir et de développer un nouveau concept d'antenne petite et pliable, d'autant que chaque nanosatellite dispose de 3 types d'antennes. Le système antennaire représente une des particularités des nanosatellites Kinéis, notamment les antennes UHF-S auto-déployables, issues de la R&D du CNES et co-conçues par Cobham Aerospace Communications et Comat, une société toulousaine.

La double antenne UHF-S répond à ce cahier des charges puisqu'elle est constituée d'une antenne rigide en bande S (conçue et produite par Cobham), surmontée d'une antenne pliable UHF (co-conçue par Cobham et Comat). L'ensemble a été qualifié par rapport aux conditions de lancement, à leur performance mais aussi à leur compacité. L'antenne UHF déployable permet l'émission et la réception de messages avec les terminaux terrestres (devices).

Son innovation réside dans ses 4 brins métalliques rigides en cuivre béryllium (un métal dur et léger) ressemblant à une chaîne ADN, et qui assurent 2 fonctions : le rayonnement des

radio fréquences et un rôle dans le mécanisme de déploiement de l'antenne, notamment dans l'écartement entre les 10 anneaux de sa structure. L'antenne bande S communique avec les stations-sol du système Kinéis.

La troisième antenne, l'antenne AIS, représente une innovation technologique développée spécifiquement pour les satellites Kinéis. Elle est dédiée au système maritime d'identification automatique des navires (Automatic Identification System), un système anticollision qui permet aux bateaux et aux systèmes de surveillance du trafic maritime de connaître l'identité du navire, son statut, sa position et sa route, dans une zone de navigation dense (Singapour, Chine, Europe du Nord). Grâce à ses 6 brins métalliques indépendants (6 monopôles), l'antenne assure une meilleure réception puisque le signal d'un bateau est reçu par chacun des 6 brins, ce système augmentant le taux de réception dans ces zones à forte densité de navigation.

Dans quelques mois, le premier lancement de 5 lancements consécutifs, prévu au printemps 2024 en Nouvelle-Zélande avec Rocket Lab, initiera la mise en orbite de la constellation Kinéis des 25 nanosatellites, écrivant ainsi une nouvelle page de l'aventure spatiale française et européenne.

Acteur du New Space, Kinéis relève le double défi technologique et commercial au service de l'Internet des Objets satellitaire, pour améliorer la vie des hommes, faciliter leurs activités et les aider à préserver leur planète.

À Toulouse, ou encore dans le monde avec le déploiement des stations-sol, les équipes poursuivent leurs actions pour mener à bien la réussite de l'aventure humaine, spatiale et commerciale de Kinéis. Elles se concentrent notamment sur les qualifications techniques des nanosatellites avec l'ensemble du système, avant la phase cruciale des lancements et l'ouverture des services commerciaux à destination des clients Kinéis.

WWW.KINEIS.COM



Tests de vibrations du Proto-Flight Model Kinéis chez Mecano ID, à Toulouse. Crédit : ©Kinéis_Thierry de Prada 2023

TABLE RONDE NEWSPACE DU 20/04/2023

UNSEENLABS, leader mondial de données et de solutions de radiofréquences (RF) pour la surveillance maritime

PAR OLIVIER MICHEL

I – SOCIÉTÉ

Unseenlabs est une entreprise française basée à Rennes en Bretagne, et fondée en 2015 par trois frères : les Galic. Ils ont mis au point une nouvelle technologie qui utilise la détection des signaux radiofréquence depuis l'espace pour géolocaliser les navires en mer qui ne veulent pas être vus.

Après avoir reçu une récompense décernée par le ministère de l'Enseignement supérieur, de Recherche et de l'Innovation en 2016, une levée de fond en 2018 a permis à Unseenlabs de créer et lancer son premier satellite (2019). Unseenlabs utilise des nanosatellites pour fournir de la donnée à ses clients publics et privés (États, assureurs maritimes, armateurs, ONG, etc.).

La constellation de nanosatellites d'Unseenlabs détecte, caractérise et géolocalise les signaux RF qui viennent d'un large éventail d'émetteurs. Grâce à ses satellites, elle couvre des zones maritimes qui s'étendent sur des centaines de milliers de km².

Après une deuxième levée de fonds de 20 millions d'euros en avril 2021, et depuis le lancement de BRO-1 (Breizh Reconnaissance Orbiter) en 2019, six autres BRO ont été lancés.



Satellite Unseenlabs

L'entreprise française est entièrement opérationnelle depuis 2019, et fournit des données RF à ses clients du secteur public ou privé.

En juin 2023, la constellation est constituée de neuf satellites. L'objectif est de la développer en lançant cinq ou six nouveaux satellites tous les ans : dix de plus début 2023, et une constellation complète réunissant vingt-cinq satellites à l'horizon 2025.

II – VISION

La genèse du projet Unseenlabs prend racine dans une constatation concernant les navires en mer : il existe un manque considérable de données de géolocalisation. Cela est principalement dû au fait que les navires peuvent disparaître des radars et devenir invisibles. Il s'agit d'une problématique sérieuse car ces navires sont susceptibles de s'adonner à des activités illégales en mer (liste non exhaustive) :

- La pêche illégale, non déclarée et non réglementée ;
- Des intrusions malveillantes dans des eaux sous juridiction d'un État (Zones Économiques Exclusives (ZEE), plateaux continentaux, eaux territoriales) ;
- Dommages environnementaux (dégazage sauvage) ;
- Destruction de câbles sous-marins sensibles.

Nos océans sont, de diverses manières, une ressource inestimable : leur exploitation nous apporte des ressources alimentaires importantes et produit des emplois. Les océans jouent également un rôle clé dans la régulation du climat, accueillent plus de la moitié de la vie sur Terre, et ils sont au cœur du système commercial mondial.

Tandis que la flotte mondiale ne cesse de se développer (plus de 70 000 navires dans la flotte commerciale mondiale), le manque de données de géolocalisation précises et à jour sur les navires en mer occasionne des problèmes environnementaux et de sécurité, que ce soit dans le secteur public ou dans le secteur privé.

L'objectif d'Unseenlabs est la collecte de nouvelles données pour aider les acteurs du maritime à résoudre ces problématiques. Prendre soin des océans reste notre premier objectif. En assurant la sécurité à bord des navires et en participant à la prévention des actes criminels et anti-environnementaux, Unseenlabs veut aider tous les acteurs du secteur en surveillant des zones sensibles en mer avec rapidité et précision.

III-TECHNOLOGIE

La détection des signaux radiofréquence depuis l'espace est l'interception par des satellites des ondes électromagnétiques émises par les appareils électroniques depuis la surface terrestre.



Localisation des navires entre l'Écosse et la Norvège

Les navires en mer sont équipés d'un grand nombre d'appareils de communication et de navigation qui émettent, continuellement ou occasionnellement, des signaux qui se propagent à courte, moyenne ou longue distance.

Les satellites RF sont équipés d'antennes spécifiques, et peuvent détecter ces signaux sur de très vastes zones. Suite à un traitement avancé des signaux interceptés, ils [les satellites] caractérisent tous ces émetteurs en les géolocalisant dans un espace-temps précis. Ensuite, ils peuvent donner à chaque navire en mer une signature unique, ou empreinte, pour surveiller sa localisation en mer en temps quasi réel.

La technologie unique d'Unseenlabs détecte tous les navires en mer qui émettent des signaux radiofréquence (avec une borne AIS activée ou désactivée), à toute heure du jour et de la nuit, partout sur le globe et peu importe les conditions météorologiques. Avec sept satellites, le temps de revisite actuel sur une zone donnée est d'environ 6h (3h en 2023, et moins d'1h en 2025). La précision de la géolocalisation des navires est proche du mille nautique (2 km).

IV-MARCHÉS

Notre service de surveillance maritime fournit aux acteurs du secteur des données fiables et précises sur le trafic maritime. Que ce soit pour des États qui souhaitent mieux contrôler leurs Zones Économiques Exclusives ou pour des entreprises qui veulent surveiller leurs zones d'intérêt, nous collectons et délivrons des données essentielles pour chacun de nos clients.

Le service proposé par Unseenlabs est pleinement opérationnel, et a des applications concrètes pour les problématiques suivantes (liste non-exhaustive) :

La lutte contre les activités malveillantes et les intrusions dans les eaux sous juridiction d'un État (Zones Économiques Exclusives (ZEE), plateaux continentaux, eaux territoriales) ;

- La lutte contre le terrorisme en mer et la piraterie ;
- La protection des installations offshore (plateformes pétrolières, éoliennes offshore) ;
- La protection des principales voies maritimes et des installations sous-marines sensibles (câbles sous-marins, gazoducs, acoustique sous-marine, etc.) ;
- La lutte contre la pêche illégale, non déclarée et non réglementée

L'objectif d'Unseenlabs est de fournir des données essentielles pour aider ses clients de différentes manières : la protection des océans, la protection de leurs eaux territoriales, l'assistance des navires en détresse, la surveillance du trafic maritime, etc.

V - SERVICE

Unseenlabs fournit les données de géolocalisation des navires en mer avec une caractérisation des émetteurs détectés partout sur le globe. Notre service est opérationnel et couvre toutes les mers du monde. Chacun de nos satellites couvre de très grandes zones d'intérêt en mer.

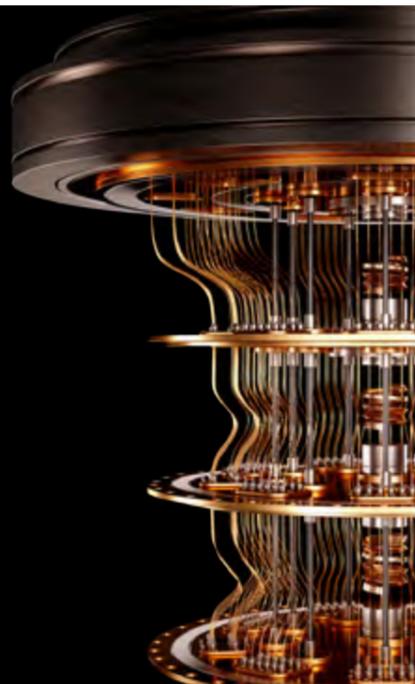
Grâce à notre constellation de satellites RF, nous détectons les signaux radiofréquence émis par les bateaux qui naviguent sur de vastes zones maritimes. Après une phase de traitement et d'analyse, nous fournissons à nos clients des données complètes et facilement interprétables. Cela apporte une nouvelle couche de données de référence utilisable par les acteurs de la surveillance maritime.

Unseenlabs vous propose des données légères et facilement exploitables, conçues pour répondre à vos objectifs et à vos attentes. ■

Invitation Table Ronde — Aéropatial & Défense

LE QUANTIQUE ET SES APPLICATIONS POUR LE SECTEUR AÉROSPATIAL ET DÉFENSE

Mardi 17 octobre 2023 | 18h00-21h00



Le quantique devrait permettre de déployer des capacités de calcul et de résolution de problèmes encore jamais exploitées.

Les impacts de cette révolution dans le secteur Aéropatial & Défense commencent à être explorés, tant par les acteurs traditionnels que les start-ups.

Alors que la course à l'innovation est enclenchée, des questions clés comme le financement de l'innovation, la structuration des écosystèmes et la montée en maturité des premiers cas d'usage sont au centre des débats.

Nous vous invitons à participer à notre 11ème évènement Alumni Onera / Oliver Wyman autour du thème : « Le quantique et ses applications pour le secteur Aéropatial et Défense ».

Cet évènement se déroulera dans nos locaux au 1 rue Euler, Paris 8ème.

Nous espérons pouvoir échanger avec vous à cette occasion et vous prions de bien vouloir nous confirmer votre participation avant le 9 octobre auprès de Claudia Mukendi : claudia.mukendi@oliverwyman.com

 | 

18h00-18h30

Accueil / Introduction

18h30-18h45

Charles Beigbeder
Audacia

18h50-19h05

Georges-Olivier Reymond
Pasqal

19h10 -19h25

Sylvain Schwartz
Onera

19h30-19h45

Neil Abroug
Secrétariat Général Pour
l'Investissement (SGPI)

19h50-20h05

Théau Peronnin
Alice & Bob

20h10-20h25

Frederic Barbaresco
Thales

20h30-20h45

Questions / Réponses

20h45

Cocktail d'înatoire

TABLE RONDE LE QUANTIQUE ET SES APPLICATIONS DANS LE SECTEUR ASD

Quantique et *New space*

PAR CHARLES BEIGBEDER, CEO AUDACIA

Nous sommes conscients que les technologies quantiques vont révolutionner de multiples secteurs, de la santé à l'intelligence artificielle, en passant par la logistique. Mais qu'en est-il d'un secteur déjà en pleine mutation : l'exploration spatiale, à l'ère du "New Space" ? Rares sont les domaines qui ont autant captivé l'imagination scientifique que l'immensité de l'espace et les promesses des technologies quantiques.

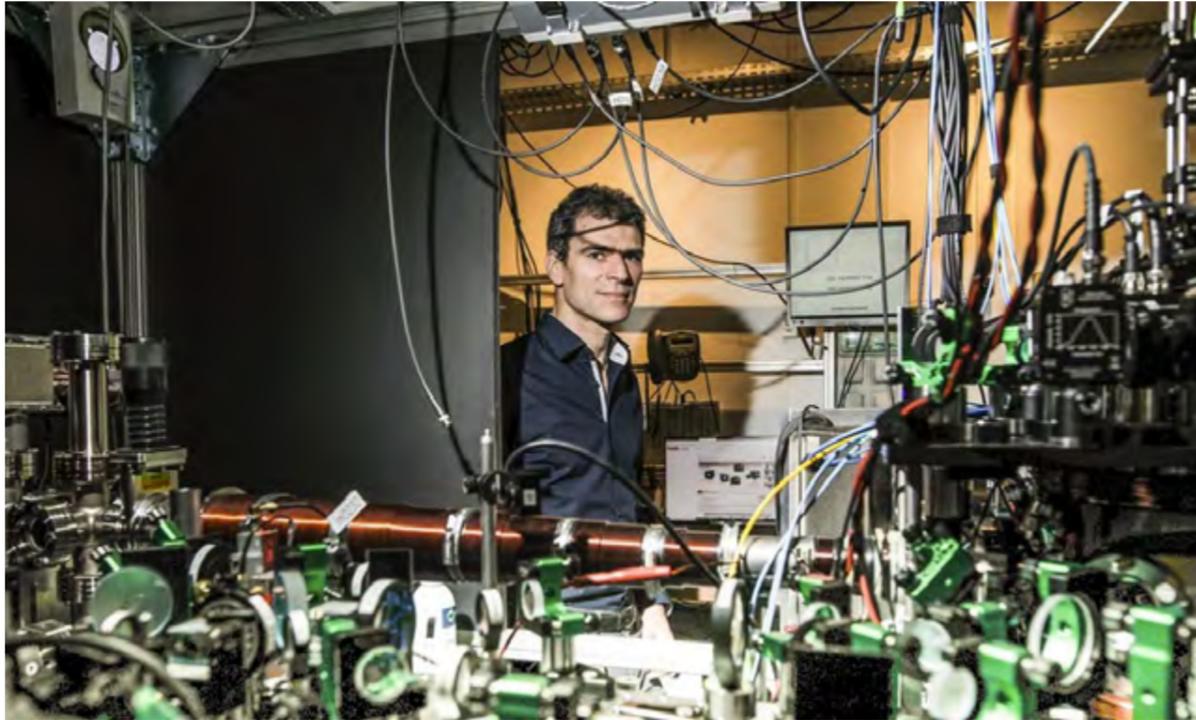
Une des premières applications prometteuses combinant ces deux mondes est le déploiement des communications quantiques dans le secteur spatial. Face aux menaces que représente l'informatique quantique, les communications quantiques se profilent comme une solution sécurisée pour l'avenir. Les satellites pourraient permettre l'établissement d'un réseau mondial de communications quantiques, reliant des réseaux à une échelle plus réduite au sol. La Chine est à l'avant-garde de ce domaine. Récemment, elle a dévoilé un réseau de communications quantiques d'une envergure sans précédent, opérationnel à l'échelle d'une ville. Tout comme les communications classiques, ce réseau repose sur la fibre optique, mais les données sont sécurisées grâce à la distribution de clés quantiques (QKD), garantissant la détection de toute tentative d'intrusion dans la

communication. La Chine ambitionne également d'étendre ces communications via satellite en exploitant les résultats de sa mission spatiale expérimentale QUESS lancée en 2016, axée sur la distribution de clés quantiques, la distribution d'intrication quantique et la téléportation quantique. Jusqu'à présent, des démonstrations de communications quantiques ont été réalisées entre le satellite Mozi de la mission QUESS et plusieurs villes chinoises. L'Agence spatiale européenne, ainsi que les États-Unis et le Royaume-Uni, collaborent également pour développer ce type de réseau de communications.

Une autre utilisation des technologies quantiques réside dans l'utilisation du calcul quantique pour la simulation. Récemment, MBDA et l'ONERA se sont associés à Quandela, une startup française spécialisée dans les calculateurs quantiques photoniques, pour simuler la combustion d'un moteur d'avion. L'ONERA possède une expertise dans l'application du quantique au service des secteurs de l'aérospatial et de la défense. Le calcul quantique offre l'avantage notable de réduire le temps nécessaire à ces simulations, un aspect crucial sachant que 95% du temps de calcul, toutes disciplines confondues, est consacré à la résolution de problèmes impliquant la simulation de phénomènes complexes



Photo taken on Nov. 26, 2016 shows a satellite-to-earth link established between quantum satellite "Micius" and the quantum communication ground station in Xinglong, north China's Hebei Province. Credit: Jin Liwang Alamy



Georges-Olivier Reymond est le patron de Pasqal, une start-up du quantique qui mise sur les atomes neutres. (Romain GAILLARD/REA)

comme la combustion. De telles avancées pourraient améliorer les performances des moteurs et réduire leurs émissions polluantes. Les premiers résultats sont attendus pour la fin de l'année 2023.

Le domaine quantique peut également compléter le spatial grâce aux avancées récentes liées aux capteurs inertiels quantiques. L'idée de déterminer sa position à partir d'un calcul prenant en compte nos accélérations successives depuis un point de départ est ancienne. Cependant, les accéléromètres n'ont jamais atteint une précision permettant d'obtenir des résultats satisfaisants. La navigation permise par le système de positionnement GNSS est demeurée jusqu'à présent la solution prédominante, la navigation inertielle étant plus rarement utilisée. Cela pourrait changer avec l'avènement d'accéléromètres quantiques bien plus précis que leurs homologues classiques. L'utilisation d'une combinaison de capteurs hybrides quantiques et classiques pourrait réduire la dépendance aux constellations, offrant des applications pour la navigation autonome et la défense, notamment.

Le calcul quantique promet également de résoudre le problème de la complexité des calculs dans les domaines de la planification et de l'ordonnancement des infrastructures critiques. Thales s'est ainsi associé à la startup Pasqal pour développer de nouvelles

méthodes dans ce domaine. La technologie d'atomes neutres utilisée dans l'ordinateur de Pasqal s'appuie sur les travaux de recherche de son cofondateur, Alain Aspect, lauréat du prix Nobel. À l'heure actuelle, l'ordinateur quantique de l'entreprise est capable de résoudre des problèmes d'optimisation financière complexes avec autant de précision que les ordinateurs classiques, et vise à atteindre l'avantage quantique dans un avenir proche. Fondée en 2019, Pasqal a réalisé en 2021 une levée de fonds de série A, menée par Quantonation, son investisseur principal, et le Fonds Innovation Défense, géré par Bpifrance pour l'Agence de l'Innovation de Défense (AID).

Le fonds Quantonation a suivi l'évolution de la startup française depuis son spin-off de l'Institut d'Optique et a investi dans 27 autres startups, devenant ainsi le plus important fonds dédié aux technologies quantiques. Ce fonds est une composante d'Audacia, société de gestion fondée par Charles Beigbeder. Audacia est aussi à l'origine d'« Expansion », fonds de capital-risque franco-suédois en cours de levée, dédié aux start-ups européennes du New Space et des Nouvelles Mobilités Aériennes. New Space et Quantique, deux domaines qui illustrent véritablement l'excellence de la recherche française et européenne et repoussent les frontières des technologies actuelles. ■

TABLE RONDE LE QUANTIQUE ET SES APPLICATIONS DANS LE SECTEUR ASD

L'ONERA et la deuxième révolution quantique

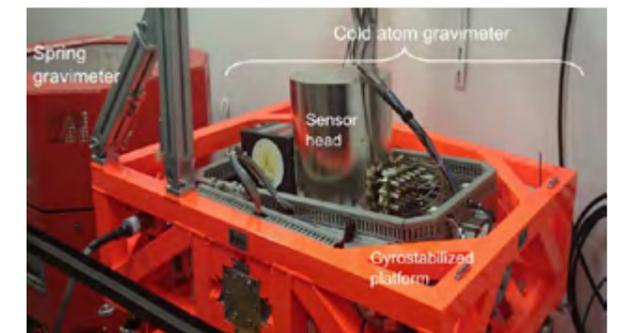
PAR SYLVAIN SCHWARTZ, DIRECTEUR DE RECHERCHE ONERA ET RESPONSABLE DU LABORATOIRE QTECH

Elaborée au début du XX^e siècle, la théorie quantique permet de décrire le comportement de la matière et de la lumière à l'échelle des particules élémentaires. Elle a tout d'abord rencontré de grands succès dans le domaine de la science fondamentale, en permettant par exemple de comprendre la stabilité de la matière, l'origine des liaisons chimiques, la superfluidité et la supraconductivité. Elle a ensuite permis, dans la seconde partie du XX^e siècle, des développements technologiques qui ont radicalement transformé la société. Ainsi le développement des dispositifs à base de semi-conducteurs, qui ont entraîné l'avènement de la microélectronique et des télécommunications optiques, a-t-il été rendu possible par la théorie quantique. Il en va de même pour le laser ou l'horloge atomique, qui ont ouvert la voie à de nombreuses applications telles que la chirurgie laser, les lecteurs de codes-barres ou les systèmes de positionnement type GPS. On parle parfois à propos de ces applications de première révolution quantique.

En plus de transformer la société par les applications que nous venons de citer, certains dispositifs issus de la première révolution quantique comme le laser ou les photodétecteurs ont permis aux chercheurs de faire d'immenses progrès dans le contrôle des systèmes quantiques à l'échelle de la particule élémentaire, ce qui s'est notamment matérialisé par une série de prix Nobel français : Claude Cohen-Tannoudji en 1997 pour le piégeage et le refroidissement d'atomes par laser, Serge Haroche en 2012 pour le contrôle et la manipulation des photons individuels et Alain Aspect en 2022 pour ses expériences mettant en œuvre des photons intriqués. A l'heure actuelle, de nombreux laboratoires à travers le monde sont capables de manipuler de façon routinière des systèmes quantiques individuels, qu'ils soient naturels (atomes, ions, photons) ou artificiels (circuits supraconducteurs, centres colorés du diamant ou spins électroniques). On parle, à propos des nouvelles applications technologiques qui pourraient être permises par le contrôle des systèmes quantiques individuels, de deuxième révolution quantique. La plus célèbre de ces applications potentielles est sans aucun doute l'ordinateur quantique, mais il en existe d'autres, à des degrés de maturité technologique variés, dans les domaines des capteurs, de l'imagerie ou des communications sécurisées. L'ONERA travaille actuellement au développement de certaines de ces applications dans le cadre de son laboratoire transverse QTech, inauguré en février 2022 et dédié aux technologies issues de la deuxième révolution quantique pour les domaines aéronautique, espace et défense. On se propose dans ce qui suit de dresser un panorama des recherches actuellement menées au sein du laboratoire QTech, organisé autour de 4 axes : capteurs à atomes froids, optronique quantique, communications quantiques et calcul quantique.

CAPTEURS À ATOMES FROIDS

Le principe de base de ces capteurs est d'utiliser des atomes piégés et refroidis par laser pour venir sonder l'environnement. En fonction de la configuration mise en œuvre, on peut rendre ces atomes sensibles à la gravité, aux accélérations, aux rotations ou aux champs électromagnétiques. A l'ONERA, le capteur à atomes froids le plus abouti et le plus emblématique est le gravimètre GIRAFE (Gravimètre Interférométrique de Recherche à Atomes Froids Embarquable), qui a fait l'objet d'un précédent article dans la revue Trajectoire(s) [1]. Un avantage important de ce type de gravimètre est qu'il ne nécessite pas de calibration, car la mesure du champ de gravité est directement reliée aux propriétés intrinsèques des atomes, ce qui lui confère un caractère absolu. D'autres capteurs à atomes froids, moins matures technologiquement que le gravimètre, sont en cours d'étude à l'ONERA : accéléromètre pour la géodésie spatiale, accéléromètres et gyromètres 3 axes pour la navigation inertielle, capteurs de champs micro-ondes à atomes de Rydberg pour les radars, les communications radiofréquence ou l'imagerie THz.



Le gravimètre à atomes froids GIRAFE à bord du bâtiment océanographique Beautemps-Beaupré

OPTRONIQUE QUANTIQUE

L'ONERA développe depuis de très nombreuses années des applications mettant en œuvre de la lumière laser, par exemple pour la détection à distance (LIDAR) ou l'analyse spectrométrique de gaz. Les états de la lumière associés, appelés états cohérents, peuvent être en très bonne approximation décrits par la théorie classique des équations de Maxwell, et ne nécessitent pas de faire appel au formalisme quantique. Il existe en revanche d'autres états de la lumière (générés par exemple par des cristaux non-linéaires, des atomes ou des dispositifs semi-conducteurs) ayant des propriétés très différentes des états cohérents, et pouvant

potentiellement conduire à de nouvelles applications. Par exemple, les états comprimés de la lumière permettent de réduire le bruit dans les interféromètres optiques, et sont d'ailleurs utilisés pour cela dans les détecteurs d'ondes gravitationnelles type VIRGO. De même, les paires de photons intriqués (comme celles utilisées dans les expériences d'Alain Aspect) donnent lieu à des corrélations d'origine quantique qui peuvent être exploitées pour sonder un échantillon à une longueur d'onde (typiquement dans l'infrarouge moyen, plus favorable pour certaines applications) tout en effectuant la détection à une autre longueur d'onde (typiquement dans le visible ou le proche infrarouge, où les détecteurs sont beaucoup plus sensibles). Une expérience de spectroscopie fondée sur ce principe est en cours de développement à l'ONERA.

Au-delà des développements expérimentaux, le rôle du laboratoire QTech consiste aussi à apporter une expertise technique à l'Etat ou aux industriels français dans le domaine du quantique. Cela s'illustre par exemple par une récente étude, publiée conjointement avec le laboratoire Kastler Brossel et Sorbonne Université [2], qui a permis de démontrer que l'idée d'utiliser des paires de photons intriqués dans le domaine micro-onde pour améliorer la précision des radars n'était pas applicable en pratique, car l'avantage théorique qui en découle n'est valable que pour des puissances très faibles. Cette étude, qui fait maintenant autorité, a été confirmée par la suite par d'autres études similaires, notamment aux Etats-Unis.

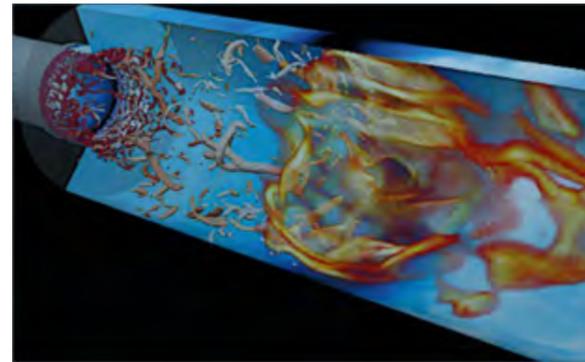
COMMUNICATIONS QUANTIQUES

Une autre application de la lumière quantique concerne la sécurisation des communications. Par exemple, en envoyant un message codé sur un ensemble de photons individuels transmis les uns à la suite des autres, il est possible de garantir a posteriori qu'aucun espion n'a écouté le message. Cela est fondé sur le théorème de non-clonage quantique qui implique qu'il n'est pas possible de dupliquer l'état d'un photon. La seule manière pour un espion de prélever de l'information sur le message consisterait donc à effectuer des mesures sur les photons individuels, ce qui affecterait l'état de ces derniers et révélerait alors la présence de l'espion. Une implémentation possible de ces canaux de communication quantiques consiste à utiliser un satellite permettant de relier entre elles des stations sol. L'ONERA, qui est un acteur reconnu dans le domaine des corrections des effets liés à la turbulence atmosphérique par optique adaptative, travaille actuellement à appliquer cette expertise au domaine des communications quantiques entre une station sol et un satellite, en lien avec des acteurs académiques et industriels du domaine [3].

CALCUL QUANTIQUE

La promesse la plus spectaculaire de la deuxième révolution quantique est sans aucun doute celle de l'ordinateur quantique, qui exploiterait la possibilité de manipuler des superpositions d'états à plusieurs particules (états intriqués) pour implémenter certains algorithmes de façon plus efficace qu'avec un ordinateur classique. En théorie, il suffirait d'être capable de manipuler des états intriqués impliquant « seulement » 50 systèmes quantiques élémentaires (appelés dans ce contexte bits quantiques ou qubits)

pour battre le meilleur des ordinateurs disponibles actuellement. En pratique, le phénomène de décohérence, qui augmente exponentiellement avec le nombre de particules que l'on cherche à intriquer, rend cette tâche très difficile. L'approche suivie à l'ONERA consiste à s'appuyer sur les start-ups françaises qui développent actuellement des calculateurs quantiques (Pasqal et Quandela notamment) pour se concentrer sur le développement d'algorithmes quantiques, dédiés en particulier à la résolution d'équations aux dérivées partielles pour la simulation de la combustion.



L'ONERA étudie par exemple en quoi le calcul quantique pourrait contribuer à ce genre de simulation instationnaire (combustion, domaine aérospatial) dans des conditions industrielles (image issue du calcul classique - Luc-Henry Dorey, DMPE/ONERA & GENCI)

CONCLUSION

La deuxième révolution quantique actuellement en cours pourrait ouvrir la voie à des applications radicalement nouvelles. Avec le laboratoire QTech, l'ONERA entend y prendre pleinement sa part, notamment en ce qui concerne les applications à ses domaines de prédilection que sont l'aéronautique, le spatial et la défense. Dans le contexte actuel de fort intérêt autour des technologies quantiques, il semble également utile de rappeler l'importance du rôle d'expert indépendant que l'ONERA peut jouer auprès de l'Etat et des industriels français, en lien étroit avec les acteurs académiques du domaine.

RÉFÉRENCES

- [1] Alexandre Bresson, Yannick Bidet et Nassim Zahzam, Atomes froids et gravimétrie, *Trajectoire(s)* no. 1, pp. 36-39 (2022)
- [2] Giacomo Sorelli, Nicolas Treps, Frédéric Grosshans et Fabrice Boust, Detecting a Target With Quantum Entanglement, *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* vol. 37, no. 5, pp. 68-90 (2022)
- [3] Valentina Marulanda Acosta, Daniele Dequal, Matteo Schiavon, Aurélie Montmerle-Bonnefois, Caroline B. Lim, Jean-Marc Conan et Eleni Diamanti, Improvement of satellite-to-ground quantum key distribution secret key rate with adaptive optics, *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, San Diego, CA, USA (2023).

Site web du laboratoire QTech: w3.onera.fr/qtech ■



Dans le cadre de STAR's UP,
le festival de l'aérospatial



Avec le parrainage de Stéphane Demilly, membre de la commission de l'aménagement du territoire et du développement durable au Sénat et le soutien de Denis Larghero, maire de Meudon, vice-président du conseil départemental des Hauts-de-Seine



COLLOQUE

Colloque *newspace*, les 21 et 22 septembre 2023, dans le cadre du festival STAR'S UP à Meudon

PAR BRUNO CHANETZ

SESSION D'OUVERTURE DU COLLOQUE JEUDI 21 SEPTEMBRE 2023

Denis Larghero, maire de Meudon, vice-président du conseil départemental des Hauts-de-Seine, a prononcé un discours d'accueil qu'on trouvera, ainsi que toute la cérémonie d'ouverture, sur CC : <https://coworkingchannel.news/replay-colloque-newspace-2023-onera-ceremonie-ouverture/?channel=122984>

Puis le général de division aérienne Julien Sabéné, chef d'état-major du commandement territorial de l'Armée de l'air et de l'espace, a pris la parole.



Le général Sabéné et Denis Larghero

DISCOURS DU GÉNÉRAL SABÉNÉ

Monsieur le maire, cher Denis, Monsieur le président, cher Bruno, Monsieur le vice-président,

C'est pour moi un privilège et un plaisir de me trouver face à vous pour prononcer ce discours d'ouverture. Un privilège d'abord car j'ai l'honneur de représenter l'armée de l'air et de l'espace à un colloque concernant un des milieux que nous avons désormais pleinement associé au champ de conflictualité pour lesquels les aviateurs sont en première ligne. Un plaisir ensuite car c'est la première fois que je retrouve le hangar Y depuis sa restauration et je suis admiratif du

travail réalisé et qui met en valeur de fort belle façon un patrimoine aéronautique d'une richesse qui n'a pas d'équivalent dans le monde. D'ailleurs c'est d'histoire que je viens vous parler maintenant car en ces temps particulièrement incertains sur le plan géopolitique et où les crises se succèdent en tant de domaines différents, l'histoire est une boussole précieuse pour nous éclairer l'avenir.

Alors mon idée n'est pas d'évoquer le old space mais de remonter plus loin dans le temps jusqu'à la naissance de l'aviation dont on fêtera bientôt les 240 ans, plus de 2 siècles ! De Fleurus qui sauva la République en 1794 grâce au ballon d'observation, à peine 10 ans après l'invention de l'aérostat par les frères Montgolfier au premier vol circulaire du dirigeable « La France » qui eut lieu à partir de ce magnifique hangar Y en 1884, je voudrais rappeler à chacun d'entre vous que l'aviation en général et l'aviation militaire en particulier, elle est née en France. Cela est également vrai pour le plus lourd que l'air avec le saut de puce du génial Clément Ader qui se matérialisa au château d'Armainvilliers en 1890, soit 13 ans avant le vol inaugural des frères Wright et de leur fameux Flyer. Les premières mondiales, on les doit à des visionnaires bien de chez nous et permettez-moi de citer le colonel Renard, la capitaine Ferber et l'ingénieur Albert Caquot qui furent tous les trois particulièrement actifs ici-même à Meudon, ville qui peut finalement revendiquer le titre de « berceau mondial de l'aviation ». Ce remarquable état d'esprit qui animait ces pionniers à l'époque, perdurent encore aujourd'hui chez les aviateurs Français de l'armée de l'air et de l'espace, qui ont dans leur ADN, l'audace, l'innovation et la passion.

En 2019, la France a aussi figuré parmi les premiers pays à se doter d'un commandement de l'Espace et je salue son actuel commandant de l'espace, le général Philippe Adam, qui n'a malheureusement pas pu faire le déplacement aujourd'hui. En 2023 les aviateurs poursuivent leur transformation et c'est en tant que chef d'état-major du tout nouveau commandement territorial de l'AAE que j'interviens devant vous aujourd'hui. Basé à Bordeaux-Mérignac, notre mission est d'avoir un coup d'avance en fédérant et en rapprochant les énergies au plus près de nos bases aériennes pour être au rendez-vous des nombreux défis que les aviateurs doivent relever dans un monde devenu particulièrement

complexe, imprédictible et dangereux. Malgré ce contexte difficile, les raisons d'être confiants existent. Nous inscrivant dans les pas de nos aînés prestigieux nous bénéficions en France de filières aéronautiques qui sont remarquables et je tiens à saluer le travail de valorisation de tous ces savoir-faire à la pointe de la technologie, travail qui est mené par l'association Alumni-ONERA, que ce soit par le biais d'événements comme ce colloque ou au travers de la publication de Trajectoire(s), qui est une revue de référence pour tous ceux qui s'intéressent sérieusement à l'aviation et à l'espace.

Pour conclure, je voudrais m'adresser aux plus jeunes d'entre vous et j'étais très heureux de constater qu'il y en avait autant à l'occasion de ce Hackathon qui est mené en parallèle. Alors qu'en à peine plus d'un siècle, l'espace extra-atmosphérique, a succédé à l'espace aérien comme nouvelle frontière, c'est à cette jeune génération que revient le privilège de l'explorer et de repousser encore plus loin les limites des connaissances de l'humanité. Certes en 1909, Clément Ader, avait pu écrire « l'aviation militaire deviendra toute puissante. D'elle dépendra l'avenir des nations ». Mais s'il était encore en vie aujourd'hui, je ne doute pas qu'il dirait la même chose de l'espace et donc du new, voire du next space.

Aujourd'hui, l'avenir des nations dépend pour beaucoup de l'exploitation de l'espace extra-atmosphérique et de ses formes nouvelles telles que le New Space.

Je vous souhaite à toutes et à tous d'excellents échanges, tout au long de ces deux jours de colloque et je vous remercie pour votre attention.



Ouverture du colloque (de g. à d. B. Chanetz, D. Larghero et le général J. Sabéné)

DISCOURS DE BRUNO CHANETZ

Monsieur Le maire, cher Denis, merci de nous accueillir à Meudon, mon général, cher Julien, merci d'être venu de Bordeaux pour ce premier jour de colloque, Mesdames, Messieurs,

Le sénateur Stéphane Demilly me charge de vous faire part de ses regrets de ne pouvoir participer à ce colloque qu'il soutient au nom de la commission sénatoriale de l'aménagement du territoire et du développement durable. Il accueille aujourd'hui au Sénat le roi Charles III, en voyage officiel en France. Maire d'Albert durant 30 ans, Stéphane Demilly entretient des rapports d'amitiés étroits avec les Britanniques,

qui viennent encore nombreux dans cette terre meurtrie de la Somme, rendre hommage à 17 000 des leurs, morts au pays du Coquelicot, durant la première guerre mondiale.

Le général Sabéné a eu la bonté de dire du bien de la revue Trajectoire(s). Aussi je vous invite à prendre le n°2, qui héberge les actes du colloque de l'année dernière sur Les nouvelles mobilités. Il y a 2 ans, nous étions aussi à Meudon pour un colloque sur le futur de l'aérostation. J'ai également quelques tirés à part des actes à disposition. Parmi les articles, celui intitulé La Croisière aux portes de l'Espace de la société Zephalto, également présente aujourd'hui, fait le lien avec le présent colloque.

En effet nous prenons de l'altitude en nous intéressant à l'espace, au newspace plus précisément. Pourtant l'espace n'a rien de nouveau et a peu évolué depuis l'apparition de l'homme. Quand Blaise Pascal écrit : « Le silence éternel de ces espaces infinis m'effraie », il exprime à la fois la crainte et la fascination ressenties par l'être humain depuis qu'il est sur terre.

Pourtant dans les dernières décennies du 20^e siècle, la conquête de l'espace devint réalité. Cette appropriation de l'espace fut le fait d'une poignée de pays, s'appuyant sur leurs organismes institutionnels. Le début de ce siècle a vu de grands changements avec l'émergence de nouveaux acteurs au sein du club des pionniers : d'autres Etats et des entreprises privées.

En 2006, à Washington, devant les dirigeants internationaux de l'industrie spatiale, un homme monte sur scène et déclare : "Salut à tous, je m'appelle Elon Musk, je suis le fondateur de SpaceX. Dans cinq ans, vous êtes morts." Peut-être était-ce l'acte de naissance du newspace, que Jean-Yves Le Gall avait qualifié « d'enfant naturel de la mondialisation et de la numérisation » ?

Ce colloque se propose de mettre en lumière la communauté newspace Française. L'effervescence de ce secteur se traduit par la création de nombreuses start-ups, dont beaucoup seront présentes au cours de ces deux journées, aux côtés des représentants du secteur étatique ou industriel.

Le format de cette rencontre se veut ouvert, varié, dynamique. Cinq sessions sont programmées sur les deux jours avec à chaque fois de courtes interventions, laissant une large place aux tables rondes et à la discussion.

Je voudrais remercier la fondation ART EXPLORA et Didier Gouband, directeur général du hangar Y de nous accueillir sur ce site qui appartenait autrefois à l'ONERA. Nous occupons encore l'autre moitié du centre historique de Chalais-Meudon.

Et j'en profite pour vous dire que Bruno Sainjon, président de l'ONERA, nous fera l'honneur d'introduire la journée de demain. Seront également présents Fabienne Casioli, présidente de l'Observatoire de Paris-PSL et Philippe Baptiste, président du CNES. Pour autant la journée commencera à 9 h 30 comme prévu. Mais afin de leur laisser le temps d'intervenir, l'unique session de la matinée « espace et souveraineté » débutera à 10 h. C'est le seul changement notable si bien que le flyer reste un bon guide pour le programme de ces deux jours.

Je vous souhaite un agréable colloque et laisse la parole à Jean-Philippe Regnault, vice-président du festival star's up, avec qui nous entretenons un partenariat sympathique et efficace depuis trois ans. Je le remercie chaleureusement, ainsi que tous les membres de l'équipe star's up, et les collègues du conseil scientifique et d'organisation, qui ont permis la tenue de cet évènement.

Le discours de lancement du colloque de Jean-Philippe Regnault, partner Data and AI, Accenture, vice-président STAR'S UP, est – comme celui de Denis Larghero – visualisable sur coworking channel (CC). Le teaser, réalisé en direct de l'ouverture par CC est également disponible : <https://coworkingchannel.news/lancement-colloque-newspace-21-22-septembre-2023-reportage-video/>



debout : David Ziegler et Alain Durand ; assis : les autres intervenants

SESSION « L'ESPACE AU SERVICE DE L'ENVIRONNEMENT »

PRÉSIDENTS DE SESSION

- Alain Durand, Directeur Conseil, Practice Défense & Sécurité, Sopra Steria Next
- David Ziegler, Aerospace & Defense Industry, vice-president, Dassault Systèmes

INTERVENANTS

- La ferme solaire, par Nicolas Schneider, Airbus Blue Sky
- Science de la Terre et Spatial : des enjeux de connaissances, des enjeux de société par Gilles Bergametti Directeur de Recherche CNRS, Laboratoire Inter-Universitaire des Systèmes Atmosphériques (LISA), Président du Comité des Programmes Scientifiques du CNES
- Space for Climate Observatory (SCO) : des solutions opérationnelles pour l'étude des impacts du changement climatique par Frédéric Bretar, Directeur du SCO, CNES
- SpacEarth Initiative : la vie sur Terre passe par l'Espace par Marie-Catherine Lejard, Responsable Espace, Direction Affaires R&D, Espace et Environnement, GIFAS
- Prométhée : L'Observation de la Terre pour tous par Olivier Piepsz, président et co-fondateur
- Enjeux de durabilité dans le Newspace par Erika Wolf, présidente et fondatrice Ways Ahead
- 3D digital twin of the Earth from satellite imagery & quantitative simulation par Boris Fechner, SIMULIA Senior Manager, Industry Services, Dassault Systèmes

Les vidéos sont disponibles sur CC, scindées en deux parties : <https://coworkingchannel.news/replay-colloque-new-space-2023-onera-lespace-au-service-de-lenvironnement-partie-1/?channel=122984>

PAUSE REPAS À L'ATELIER AVEC LES DIRECTEURS INNOVATION DU CLUB DE PARIS

À l'invitation de François Desgardin, directeur innovation de NEXITY et président du festival STAR'S UP, la pause repas s'est déroulée pour les membres du conseil scientifique et les intervenants à « l'Atelier », un bâtiment neuf, situé à côté du Hangar Y et du perchoir Y. Ils y ont retrouvé les membres du club de Paris, réunissant les directeurs innovation des grands groupes Français, qui s'étaient réunis le matin à l'Atelier même, à l'initiative de François Desgardin, dans l'objectif que certains d'entre eux puissent assister à notre première session de l'après-midi.



Le général Sabéné et C. Bonnal (CNES); M.-C. Coët (ONERA) et Ph. Tixier (DIRISOLAR) avec D. Larghero

<https://coworkingchannel.news/replay-colloque-new-space-2023-onera-lespace-au-service-de-lenvironnement-partie-2/?channel=122984>



A. Miniussi et J.-C. Traîneau ; Ch. Beigbeder et J.-Ph. Regnault

SESSION « FINANCEMENT ET ENTREPRENARIAT DU NEWSPACE »



Charles Beigbeder à gauche et les intervenants de la sous-session #1

SOUS-SESSION #1 : COMMENT ACCOMPAGNER LES STARTUPS DU NEW SPACE DE LEUR ÉMERGENCE À LA SÉRIE A ?

PRÉSIDENTE

Christelle Astorg-Lépine, directrice STARBURST France avec le soutien d'Antoine Miniussi, ONERA, pour les pitches des start-up.

INTERVENANTS

- Valentin Benoit, CEO RIDE
- Frédéric Adragna, programme connect by CNES
- Charles Beigbeder, chairman d'Audacia, founding partner d'Expansion
- Geoffroy Dubus, partner Demeter
- Jean-Jacques Dordain, conseiller de New Space Capital et de Einstein Industry Venture

Pitches : SpaceBlocs – Geotrend – ION-X - Zephalto – Gama

La vidéo est disponible à l'adresse suivante :

<https://coworkingchannel.news/replay-colloque-new-space-2023-onera-financement-et-entrepreneariat-du-new-space-partie-1/?channel=122984>



Eric Ciampi à gauche et les intervenants de la sous-session #2

SOUS-SESSION #2 : COMMENT ACCOMPAGNER LES STARTUPS DANS LEUR SCALE-UP ?

PRÉSIDENT

Eric Ciampi, partner Oliver Wyman Paris avec le soutien d'Antoine Miniussi, ONERA, pour les pitches des start-up.

INTERVENANTS

- Fabien Apper, CEO U-Space
- Géraldine Naja, directrice Commercialisation Industrie et Compétitivité, ESA
- Sophie Surssock, founding partner Move Capital
- Rasika Fernando, responsable sectoriel industries Aéronautiques et Spatiales, Bpifrance
- Rolando Grandi, gérant Fonds Echiquier Space, Financière de l'Echiquier

Pitches : Unseenlabs – Thrust-me – Stellar Inc - Geoflex – Lean space

La vidéo est disponible à l'adresse suivante :

<https://coworkingchannel.news/replay-colloque-new-space-2023-onera-espace-et-souverainete-partie-2/?channel=122984>

CONSÉQUENCE INATTENDUE DU RESPECT DE LA PARITÉ

Au cours de cette session devait intervenir Tania Lasisz, cheffe de projets New space et innovation dans le spatial, à la sous-direction du Spatial, de l'Electronique et du Logiciel, au ministère de l'économie, des finances et de la souveraineté industrielle et numérique. Le 12 septembre, elle nous fit part de son impossibilité par courriel « Bonjour Bruno et bonjour à tous, En raison d'un impératif à Bercy, je dois malheureusement me désister pour jeudi prochain. Je vous prie de bien vouloir m'en excuser » et comme je lui suggérai de se faire représenter par un de ses collaborateurs, elle me répondit le 14 septembre : « Bonjour Bruno, Nous ne sommes hélas pas disponibles et avec mon absence malheureusement les consignes de ma direction générale concernant la parité ne permettraient pas par ailleurs à l'un de mes collègues de participer à cette table ronde ».

SESSION « EXPLOITATION DES DONNÉES DU SPATIAL »



P.-J. Béranger (à gauche), les intervenants et V. Godec (à droite)

PRÉSIDENTS DE SESSION

Pierre-Jean Béranger, Principal Oliver Wyman
Vincent Godec, ENGINEER, STAR'S UP

INTERVENANTS

- **LAI et l'imagerie satellite au service des enjeux de durabilité environnementale** par Sami Yacoubi, co-fondateur et président, Spacesense
- **Les données RF d'observation de la Terre une révolution pour la surveillance maritime** par Rosario Ruiloba, Directrice du Business Development, UNSEENLABS
- **Les données satellites au service de la régénération des sols** par Alexandre Viennot, responsable développement, Kermap
- **Donnée spatiale et autres sources : enjeux de leur utilisation combinée** par Grégoire Berry, International Markets Development Director, Space pour le groupe Serco
- **Acquisition et exploitation des données satellites pour business, assurance & conseil** par Sylvain Petiot, Lead Data Scientist au sein d'Axa Climate
- **Données du spatial vers un continuum public-privé** par Marc Antoine, directeur des affaires publiques, PRELIGENS
- **Boris Fechner**, SIMULIA Senior Manager, Industry Services, Dassault Systèmes

Parmi les personnalités venues assister à cette dernière session, le général Philippe Adam, commandant de l'Espace, qui a pris la parole au cours de la séance de questions qui a suivi la table ronde.



de g. à d. F. Desgardin, J.-Ph. Regnault, B. Chanetz, le général Adam et A. Durand

Les vidéos sont disponibles sur CC, scindées en deux parties :
<https://coworkingchannel.news/replay-colloque-new-space-2023-onera-exploitation-des-donnees-du-spatial-partie-1/?channel=122984>
<https://coworkingchannel.news/replay-colloque-new-space-2023-onera-exploitation-des-donnees-du-spatial-partie-2/?channel=122984>

SOIRÉE COCKTAIL

La journée s'est terminée par le cocktail offert à tous les participants par la mairie de Meudon.



D. Larghero et le général Ph. Adam

INTRODUCTION DE LA SECONDE JOURNÉE

Trois présidents d'organismes nationaux sont venus introduire cette seconde journée :

- **Fabienne Casoli**, présidente de l'Observatoire de Paris-Meudon, présentée par François Desgardin, directeur Innovation NEXITY, président STAR'S UP
- **Philippe Baptiste**, président du CNES, présenté par Laurent Duthoit conseiller municipal de Meudon en charge du numérique
- **Bruno Sainjon**, président de l'ONERA, présenté par Alain Durand directeur conseil, practise défense et sécurité, Sopra Steria Next, secrétaire général d'Alumni-ONERA



de g. à d. Ph. Baptiste, B. Sainjon et F. Casoli



de g. à d. L. Duthoit, A. Durand et F. Desgardin

Les discours n'ont pas été communiqués, mais ils sont disponibles sur CC :

<https://coworkingchannel.news/replay-colloque-new-space-2023-onera-introduction-de-la-seconde-journee/>

SESSION « ESPACE ET SOUVERAINETÉ »

PRÉSIDENTS DE SESSION

Jean-Claude Traîneau, conseiller émérite, ONERA
Paul Wohrer, chercheur spécialiste des questions aérospatiales, IFRI

INTERVENANTS

- **Les exigences d'une politique spatiale en termes de souveraineté** par Philippe Steininger, conseiller militaire du PDG du CNES
- **Nouveaux acteurs spatiaux, nouvelles politiques spatiales** par Xavier Pasco, Directeur de la Fondation pour la Recherche Stratégique
- **Les nouveaux entrants français de l'accès à l'espace, acteurs de la souveraineté** par Jérôme Vila, Directeur de Programme, Maia Space
- **Espace et souveraineté à l'heure du NewSpace : ruptures et constantes** par Florence Dufresnes, Directrice Innovation, Airbus DS
- **Le rôle structurant du réseau de partenaires dans la mise en œuvre d'une défense spatiale souveraine** par Julien Rouxel, directeur conseil des activités Commandement, Sopra Steria Next, Défense & Sécurité
- **De GRAVES à MEDOC : la souveraineté en surveillance de l'espace à l'heure du NewSpace** par Florent Muller, Directeur Général ASTAREON
- **Les données spatiales et la souveraineté européenne** par Romain Lucken, CEO & Co-fondateur de Share My Space



J.C. Traîneau et P. Wohrer (debout) et les autres intervenants

- **La dimension souveraineté dans le projet de Look Up Space** par Alban de Crémiers, COO de Look Up Space
- **Souveraineté : quelle place pour les coopérations spatiales ?** par la capitaine Béatrice Hainaut, chercheuse «Espace» à l'Institut de Recherche Stratégique de l'École Militaire (IRSEM)

Les vidéos sont disponibles sur CC, scindées en deux parties :

<https://coworkingchannel.news/replay-colloque-new-space-2023-onera-espace-et-souverainete-partie-1/?channel=122984>
<https://coworkingchannel.news/replay-colloque-new-space-2023-onera-espace-et-souverainete-partie-2/?channel=122984>

DÉJEUNER DE MIDI AU PERCHOIR Y



Au 1^{er} plan F. Casoli et D. Larghero, au second plan F. Desgardin et J. Ph. Regnault. Au fond N. Bérend, M.-C. Coët et Ph. Castera (crédit photo B. Chanetz)

SESSION « L'ESPACE POUR RÊVER »

PRÉSIDENTS DE SESSION

Elisa Cliquet-Moreno, chef de projet réutilisation au CNES, Présidente de la commission transport spatial 3AF
Nicolas Warin, responsable développement Plateforme Internet - Open Space Makers

INTERVENANTS :

- **Les spécificités de l'exploration de Vénus et lien avec les enjeux du futur sur Terre** par Thibaut Pouget, représentant Open Space Makers, Responsable Groupe Thématique Colonisation de Vénus
- **Des projets open-source comme ouverture au monde du spatial** par Dorian Busson, responsable Communication Open Space Makers et membre du projet Ad Astra
- **Exploration spatiale : une solution européenne de cargo de l'ISS à la Lune** par Pierre Faucoup, chief Space and Defense Business Officer, The Exploration Company



N. Warin (à g.) et E. Cliquet-Moreno (à d.) entourant les autres intervenants

- **Solar Power Station** par **Christophe Bonnal**, expert sénior à la Direction de la Stratégie du CNES
- **Tourisme Spatial : À la découverte de l'Espace** par le **Général Marc Alban**, président Destination Etoiles
- **Les étudiants dans le spatial : passion et ambition** par **Alan Bourel**, président de l'ESTACA Space Odyssey (ESO)
- **Vers un New Deep Space** par **Louis de Goüyon Matignon**, co-fondateur GAMA

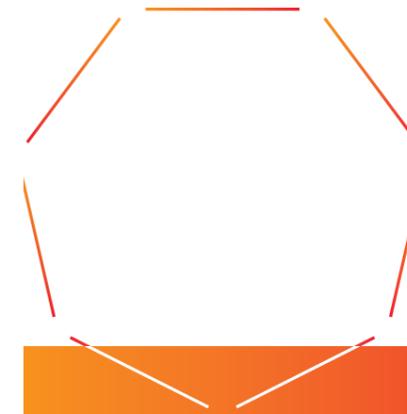
Les vidéos sont disponibles sur CC, scindées en deux parties :
<https://coworkingchannel.news/replay-colloque-new-space-2023-onera-inspiration-lespace-pour-rever-partie-1/?channel=122984>
<https://coworkingchannel.news/replay-colloque-new-space-2023-onera-inspiration-lespace-pour-rever-partie-2/?channel=122984>



L'ASSOCIATION POUR UN CENTRE EUROPÉEN DES BALLONS ET DIRIGEABLES (ACEBD) À L'ORIGINE DU SAUVETAGE DU HANGAR Y

Cette association, fondée par Audouin Dollfus, est actuellement présidée par Philippe Tixier, CEO de Dirisolar. Le secrétaire général est Bruno Chanetz et le trésorier Denis Parenteau, directeur du Musée Air France. C'est grâce à l'ACEBD et à l'énergie déployée par son secrétaire général à l'époque Serge Leroy, conseiller municipal de Levallois-Perret, que le Hangar Y a pu bénéficier de réparations urgentes en 2009, dans le cadre du plan de relance. En effet en réponse à la crise financière des subprimes qui débuta aux USA en 2007, le président de la République Nicolas Sarkozy lança un plan de relance de 26 milliards d'euros et nomma le président du Conseil général des Hauts-de-Seine, Patrick Devedjan, ministre responsable de la mise en œuvre de ce plan de relance avec mission de dépenser plus vite ce qui aurait dû être étalé en matière d'investissement public. Le dossier avec les devis pour les réparations les plus urgentes étant diligemment disponible et opportunément présenté à l'Elysée, des travaux sont entrepris dès 2009 pour un montant voisin de 1,5 millions d'euros.

Ils concernaient la toiture, les bas-côtés et le pignon sud et visaient à le mettre hors d'eau et à l'abri de la rouille. Le Hangar Y est sauvé. Cette même année, la ville de Meudon, dont le Maire était à l'époque Hervé Marseille, récompense l'ACEBD en lui décernant un prix du Patrimoine. En 2009 également le Président de l'ACEBD, Audouin Dollfus est promu chevalier de la Légion d'honneur, au cours d'une cérémonie à l'aéroclub de France, présidée par Claudie Haigneré. Sans les travaux entrepris en 2009, le bâtiment eut été beaucoup plus coûteux à réhabiliter, en 2020, par Art Explora et Culture et Patrimoine, lorsque cette fondation et cette société événementielle, respectivement présidées par Frédéric Jousset et Didier Gouband, décidèrent d'en faire un lieu d'exposition et de manifestation. ■



Feuille de route pour une défense spatiale souveraine



CONTRIBUTEURS

Alain Durand, Secrétaire général d'Alumni-ONERA, est co-auteur d'un intéressant document, qu'il a d'ailleurs remis le 22 septembre dernier à Bruno Sainjon, président de l'ONERA. On trouvera un tiré à part de ce rapport intitulé **Feuille de route pour une défense spatiale souveraine** en annexe de ce n°4 de TRAJECTOIRE(s) et à l'adresse suivante :
https://w3.onera.fr/alumni/system/files/24_pages-ssn_tl_defense_digital_pages.pdf



Nicolas Sauvage
 Expert métier C2 et opérations spatiales
 nicolas.sauvage@soprasteria.com



Alain Durand
 Directeur conseil - Responsable de la cellule de veille et d'intelligence économique
 alain.durand@soprasterianext.com



Julien Rouxel
 Directeur conseil, Défense & Sécurité - Commandement & Opérations
 julien.rouxel@soprasterianext.com



François Bardin
 Senior Manager, Défense & Sécurité
 francois.bardin@soprasterianext.com



C'est de l'action que naît l'inspiration

Une vision ne vaut que si elle est réellement actionnable. Chez Sopra Steria Next, nous concevons des stratégies ancrées dans la réalité de votre entreprise qui produisent des résultats concrets, durables et bénéfiques pour tous.

Sopra Steria Next,
le conseil en transformation digitale.

The world is how shape it*



* Le monde est tel que nous le façonnons.

SPACECON '23
spacecon.io

Alumni PoliTo Paris
ALUMNI
POLITECNICO DI MILANO
PARIGI

1
16th November - Opening Cocktail
Maison d'Italie, Cité Universitaire, Paris

2
EURO2MOON
Air Liquide
17th November - Plenary
École polytechnique, Palaiseau

Laura Chaubard
Directrice Générale école polytechnique

Philippe Baptiste
CNES President

Guilhem Lacaze
ex-principal propulsion engineer SpaceX

Giorgio Saccoccia
Senior Advisor to the director general ESA

Géraldine Naja
Director of Commercialization, Industry, and Contracts ESA

Matt Lowe
YouTuber and creator

@SpaceExplorerW
YouTuber and creator

much more...

SPACE UP FRANCE
Lightning talks

Reinvented MAGAZINE
Fireside chat

The Moon, cornerstone of sustainability in space for Earth and Space?
Round tables

3
kSC
18-19th November - KSPACECONTEST
École polytechnique
Kerbal Space Program e-sport contest

OMEN

Sponsors: DLR, cnes, esa, maiaSpace, INCUB ALLIANCE PARIS-SACLAY, Latitude, université PARIS-SACLAY, SPACEX, POLITECNICO MILANO 1863, CNRS, EUSPFI, Espace - Sciences & Défis du Spatial, CSEP, 3AE, ONERA, KSP

COLLOQUE

SpaceCon, une autre façon d'explorer l'Espace colloque à l'X du 17 au 18 novembre 2023

PAR PIERRE CORDESSE, INGÉNIEUR RESPONSABLE DE PROJET, BU SPATIAL, AIR LIQUIDE ET CO-FONDATEUR DE SPACECON

La 3^{ème} édition de la convention SpaceCon dédiée à l'ensemble des acteurs de l'écosystème spatial s'est achevée le 19 novembre dernier à Palaiseau. Le programme s'étalait sur quatre jours, entre cocktail, conférence et compétition e-sport de 24h, réunissant 400 participants. Pierre Cordesse, membre du CA Alumni-ONERA, était l'un des organisateurs, en tant que co-fondateur de l'association SpaceCon.

Spacecon est une convention dédiée à l'Espace et ses passionnés. Son objectif : réunir étudiants, startups, institutionnels et industriels dans une atmosphère conviviale, inclusive et ludique. L'édition de 2023 a eu lieu du 16 au 19 novembre dernier à Palaiseau sur le campus de l'Ecole Polytechnique. Parmi les principaux sponsors : Omen, Ecole polytechnique, Air Liquide, Euro2moon et IncubAlliance.

"Nous avons créé l'association en 2018 alors que j'étais encore doctorant. Nous ne connaissions pas l'écosystème du spatial, et cette association constituait à nos yeux le meilleur moyen d'identifier et de rassembler l'ensemble des parties prenantes. Pour SpaceCon, notre ambition était d'organiser une conférence sur l'innovation dans le secteur du spatial, de portée internationale et accessible à tous." Témoignage de Pierre Cordesse

Cette année, l'événement a mis l'accent sur les **ambitions spatiales de l'Europe pour la survie de la Terre** en proposant deux moments forts : une journée de conférence le vendredi 17 novembre et une compétition e-sport sur le jeu Kerbal Space Program d'une durée de 24h !

A la plénière du vendredi ouverte par la présidente de l'Ecole polytechnique Laura Chabard, sont intervenus deux présidents d'agence spatiale, **Philippe Baptiste**, président du CNES et **Giorgio Saccoccia**, ancien président de l'agence spatiale italienne et maintenant conseiller au directeur général de l'ESA Josef Aschbacher ainsi qu'un représentant de chaque institution européenne, **Geraldine Naja**, directrice de la commercialisation, de l'industrie et de la compétitivité à l'ESA et **Eric-Olivier Pallu**, Senior Policy Officer pour la commission européenne. Leur intervention ont permis d'offrir un tour d'horizon de toutes les activités en cours et à venir portés par les agences et les

gouvernements afin de ramener l'Europe dans l'aventure spatiale.

Afin d'apporter également des éléments de comparaison, un ancien responsable technique de chez SpaceX, Guilhem Lacaze, a témoigné de son expérience dans cette entreprise américaine qui a révolutionné le marché spatial en quelques années. Pour compléter, une doctorante du CNRS-EHESS, Lucie Senechal-Perrouault, a partagé ses travaux de recherche autour des acteurs commerciaux dans le marché spatial chinois.

Enfin ont eu lieu deux tables rondes qui ont permis d'échanger sur les thèmes de 1/ l'éducation des nouvelles générations pour appréhender les challenges d'une économie extraterrestre en devenir, 2/ la Lune en tant que pierre angulaire de la durabilité dans l'espace pour la Terre et l'Espace.

Enfin, à 10h samedi 18 novembre a démarré la compétition **KSPACECONTEST** qui a rassemblé cette année 18 équipes de joueurs, venues d'Europe. L'objectif dévoilé le jour même était de déposer 10 tonnes de masse sur Mars avec le coût d'empreinte carbone le plus bas, le taux de réutilisabilité le plus élevé et le maximum de réalisme ! Ce défi avait été préparé avec EURO2MOON pour démontrer l'utilité de l'installation d'une base lunaire et/ou d'une station relais dans le cadre d'une mission sur Mars.

"Kerbal Space Program (KSP) est un simulateur de programme spatial qui, bien qu'il ait l'air d'un jeu amusant, intègre tout les lois de la gravité qui régissent le système solaire. La fusée que vous y construisez et devrez lancer est bien soumise aux fameuses lois de Newton." raconte Yann président de l'association des joueurs de KSP et membre de SpaceCon.

Les candidats ont eu 24 heures non-stop pour modéliser leur solution et seulement 7 minutes pour la présenter devant plusieurs professionnels de l'ESA, de MaiaSpace et d'Euro2moon. Parmi les solutions proposées figurent des passerelles intelligentes qui se ravitaillaient autour de la lune et ramenaient les ergols près de la Terre, mais aussi des systèmes d'extraction de ressources automatisés, petits et très mobiles, pour couvrir la plus grande surface possible de la Lune.

"L'organisation de cet événement est une expérience d'entrepreneuriat bénévole et exigeante. Avec 4 jours de conférences, 35 speakers et un hackathon sur les ressources spatiales, nous avons un programme de haut vol ! A titre personnel, cela me permet par ailleurs de créer du lien et de faire les bonnes connexions entre membres de l'écosystème." témoigne Pierre Cordesse.

A quand la prochaine édition ?



Table ronde animée par Euro2moon sur la thématique de la Lune



Compétition de 24h sur le jeu vidéo KSP



Ouverture de la journée du vendredi par l'équipe SpaceCon



07 > 08
décembre
2023



Amphithéâtre
d'honneur des
Beaux-Arts de Paris

14 rue Bonaparte, Paris VI*

Musée d'Orsay

Esplanade Valéry Giscard
d'Estaing, Paris VII*

Colloque
recherche

MINISTÈRE
DE LA CULTURE

PSL
UNIVERSITÉ PARIS

École nationale supérieure
d'architecture Paris-Malaquais



Société
d'Encouragement
pour l'industrie
nationale

Eiffel 2023

Colloque organisé par l'École d'architecture Paris-Malaquais, l'Alumni-ONERA et la Société d'encouragement pour l'industrie nationale, avec la participation de l'Université Gustave Eiffel, la Société des ingénieurs et scientifiques de France, Aéro-Eiffel 100 et en partenariat avec le Musée d'Orsay et les Beaux-Arts de Paris

Sous le parrainage de l'UNESCO



Photo positive, 1887-88. Collections des Beaux-Arts de Paris

Comité d'organisation

Matteo Porrino, ENSA Paris-Malaquais
Bruno Chanetz, Alumni-ONERA

Daniela Carneiro-Fuentes, Aéro-Eiffel 100
Catherine Le Louarn, SEIN

Comité scientifique

Matteo Porrino, ENSA Paris-Malaquais
Bruno Chanetz, Alumni-ONERA

Bertrand Lemoine, SEIN
Jean-Paul Mizzi, Université Gustave Eiffel
Patrice Selosse, IESF



COLLOQUE

Colloque Eiffel 2023 les 7 et 8 décembre 2023 à l'École d'architecture de Paris-Malaquais

PAR BRUNO CHANETZ

HOMMAGE À MAURIZIO BROCATO À L'ORIGINE DE CE COLLOQUE

Rappeler les origines de ce colloque, c'est rendre hommage à Maurizio Brocato, qui fut immédiatement très enthousiaste et proposa aussitôt l'amphi d'honneur des Beaux-Arts, dès lors que je lui soumis l'idée, courant 2022, d'un colloque historique et scientifique sur Gustave Eiffel, pour commémorer le centenaire de la mort, en 1923, de ce grand ingénieur.

J'avais fait la connaissance du professeur Brocato lorsqu'il était professeur à l'École nationale supérieure d'architecture de Versailles (ENSAV) et que j'étais professeur associé à l'université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines entre 2003 et 2009. Il avait souhaité visiter la Grande soufflerie de Meudon. Il m'invita par la suite à faire partie de jurys de soutenance de travaux de fin d'étude, pour des étudiants ayant travaillé sur le Hangar Y ou la grande soufflerie de Meudon. Par la suite il rejoignit l'École nationale supérieure d'architecture de Paris-Malaquais (ENSPAM), où je fus rapporteur ou président de trois thèses d'architecture, dont les travaux relevaient également de la Mécanique des fluides¹.

En 2019, je contactai Maurizio dans le cadre d'un ouvrage auquel je collaborais sur un autre hangar à dirigeables, également Monument historique, celui d'Ecausseville en Normandie, immense hangar en béton de la première guerre mondiale, ayant son seul jumeau subsistant à Augusta en Sicile. Maurizio, originaire de la région, connaissait bien cet édifice, proche de Syracuse, et m'avait très obligeamment mis en contact avec le professeur Illario Saccomanno, de l'université de Catane, qui contribua à ce livre avec un chapitre intitulé « les 100 ans du hangar d'Augusta ». On trouvera à la fin de ce numéro une note de lecture sur cet ouvrage remarquable, intitulé « Le Hangar à dirigeables d'Ecausseville : un centenaire plein d'avenir » sous la direction de Philippe Pâris et Dominique Barjot, paru aux éditions Ouest-France.

Le 21 novembre 2022, eut lieu la première réunion en JITSJI du conseil scientifique et d'organisation avec les membres suivants :

- Catherine Le Louarn, société d'encouragement pour l'industrie nationale (SEIN)
- Daniela Carneiro-Fuentes, tour Eiffel, Aéro Eiffel 100
- Maurizio Brocato, Matteo Porrino et Muriel Léna, ENSAPM
- Bertrand Lemoine, SEIN
- Jean-Paul Mizzi, Université Gustave Eiffel (UGE)
- Patrice Selosse, Ingénieurs et scientifiques de France (IESF)
- Bruno Chanetz, Alumni-ONERA, Aéro Eiffel 100.

Une seconde réunion était programmée en présentiel le 17 janvier 2023 à l'ENSPAM dans une salle de réunion du bâtiment Le Mûrier, où nous devions nous réunir plusieurs fois par la suite. Pour préparer cette réunion, le vendredi 13 janvier après-midi nous avons conversé une heure avec Maurizio par visio-conf. Mais le lundi 16 janvier, peu après 23 heures, Matteo Porrino informa tous les participants de l'annulation de cette réunion par courriel : « En raison de circonstances exceptionnelles, la réunion de demain matin 17 janvier 9h00, ne pourra pas avoir lieu. ». A 23 h 15, Muriel Léna, belle-fille de Pierre Léna m'informait personnellement : « Nous avons appris il y a une heure le décès de Maurizio, mort d'une crise cardiaque. Nous sommes tous très choqués. ».



Photo de la cérémonie du 24 janvier 2023 dans la chapelle des Beaux-Arts (crédit Daniela Carneiro-Fuentes)

1 - Gholan-Reza Degham-Kamiragi le 5 décembre 2014, "les systèmes de ventilation et refroidissement dans l'architecture traditionnelle du golfe persique" ; Margherita Ferrucci le 20 décembre 2017 « Ventilation naturelle en architecture : méthodes, outils et règles de conception » : <https://www.theses.fr/2017PESC1080> ; Kambiz Gohari le 12 janvier 2018, « Morphogenèse des moulins à vent d'Iran : une technique de gestion du vent de manière architectonique » : <https://www.theses.fr/2018PESC1079>

Le 24 janvier 2023, un bel hommage eut lieu dans la chapelle - désacralisée - des Beaux-Arts en présence de sa famille, ses amis et collègues.



Entrée de la chapelle des Beaux-Arts (crédit Daniela Carneiro-Fuentes)

Le 15 février 2023, Matteo Porrino nous accueillait pour la première réunion de l'année, destinée à préparer le colloque Eiffel 2023.

OUVERTURE DU COLLOQUE EIFFEL 2023 LE JEUDI 21 SEPTEMBRE À 9 H00



L'amphi d'honneur des Beaux-Arts



Bruno Chanetz et Jean-Baptiste de Froment

Catherine Le Louarn (SEIN) a assuré la fonction de chairwoman toute la journée. Pour l'ouverture du colloque, elle a donné la parole à Jean-Baptiste de Froment, conseiller d'état, directeur de l'ENSAPM, qui a fait part de sa satisfaction d'accueillir le colloque en ces lieux prestigieux. Puis Bruno Chanetz a répondu et passé la parole à Matteo Porrino. Les discours de MM. de Froment et Porrino n'ont pas été communiqués, mais seront disponibles sur Coworking Channel (CC) comme l'ensemble des exposés des deux journées.

DISCOURS DE BRUNO CHANETZ

Monsieur le Directeur, Mesdames, Messieurs,

Je suis très heureux d'être aujourd'hui dans cet amphi d'honneur des Beaux-Arts, au centre de l'attention des 75 artistes de tous les temps représentés sur ces murs. Gustave Eiffel avait 9 ans lorsque Paul Delaroche acheva cette peinture. Comme en écho à cette fresque, un demi-siècle plus tard, Eiffel fera inscrire les noms de 72 savants Français sur la frise du premier étage de sa tour.

Le plaisir de se trouver ici est cependant terni par l'absence de Maurizio Brocato. Nous honorons aujourd'hui l'œuvre d'Eiffel dans ce site magnifique, où j'ai plusieurs fois eu l'occasion de venir, à l'invitation du professeur Brocato pour participer à des jurys de thèse, sur des sujets d'architecture liés à la mécanique des fluides. Aussi en ce jour, mes pensées vont à Maurizio, avec qui nous avons initié cet évènement et qui nous a brutalement quitté le 16 janvier dernier.

Heureusement pour Gustave Eiffel, dont l'UNESCO commémore cette année le centenaire de la mort, le colloque a pris forme - et très scientifiquement même - grâce à Matteo Porrino, maître de conférence à l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris-Malaquais, qui a repris le flambeau allumé avec Maurizio. Avant de lui passer la parole, permettez-moi quelques mots sur Alumni-ONERA, l'association des anciens docteurs de l'Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales.

L'ONERA compte en permanence 300 doctorants, donc une centaine sont diplômés par an. Parmi eux seulement 10 % restent à l'ONERA, les autres essayant pour beaucoup dans l'industrie aéronautique, spatiale et de défense. C'est pour garder des liens avec eux qu'Alumni-ONERA a été créée il y a 7 ans.

Parmi nos activités annuelles, un colloque scientifique sur deux jours dans le Hangar Y de Meudon.

Ce hall à dirigeables, dû à l'ingénieur Henri de Dion, nous ramène à Eiffel, qui fut son élève et qui l'honora parmi les 72 savants de la tour. Henri de Dion aurait apprécié le colloque historique et scientifique que nous consacrons aujourd'hui à son brillant élève. En effet, en 1877, en tant que président de la Société des ingénieurs civils, il prononça un discours dans lequel il insistait sur l'importance de l'histoire des sciences : "Non seulement elle nous enseigne comment les idées ont pris naissance et se sont développées, mais elle nous montre aussi combien on passe à côté de la vérité et combien, lorsqu'on l'a trouvée, il faut encore d'efforts et de temps pour la répandre et pour lui donner la forme simple sous laquelle nous pouvons l'utiliser".

L'histoire des sciences, Alumni-ONERA en a fait sa marque de fabrique avec déjà l'organisation de six colloques historico-scientifiques, dont cette année celui sur Denis Papin à Saumur. En 2020, nous étions à Méaulte dans la Somme, pour un colloque sur l'industriel Henry Potez, en partenariat avec la société d'encouragement pour l'industrie nationale, également organisatrice de ce colloque Eiffel. Les avions Potez furent étudiés dans la soufflerie Eiffel et la table ronde de clôture comptera parmi ses intervenants le sénateur Stéphane Demilly, biographe d'Henry Potez.

Mais auparavant nous allons découvrir les différentes facettes du génie de Gustave Eiffel, tour à tour et tout à la fois constructeur métallique, mécène, météorologue, aérodynamicien, et pionnier de la science ouverte, ces deux dernières spécialités étant importantes pour l'ONERA. Nous y reviendrons demain.

Je voudrais aussi saluer la présence de Philippe Couperie-Eiffel, président fondateur de l'association familiale de mémoire des « Amis de Gustave Eiffel », fondée en 2008. Cette association œuvre depuis 10 ans pour diffuser les valeurs attachées à la vie et à l'œuvre de Gustave Eiffel, en France et à l'étranger. Cher Philippe vous êtes également président d'honneur de la fondation d'université Gustave Eiffel, pour avoir permis en 2018 à cette université, de prendre le nom de votre trisaïeul. Jean-Paul Mizzi, vice-président de l'UGE, l'évoquera certainement demain lors de la table ronde, intitulée « Eiffel, inspirateur des jeunes générations ». Avec Daniela Carneiro-Fuentes et Martin Peter, vous avez également réalisé les démarches d'inscription de Gustave Eiffel au titre de personnalité éminente de l'UNESCO, auprès d'Alexandre Navarro, secrétaire General de la commission française, et Jacques Rao, conseiller auprès de cette commission, qui demain participera aussi à la table ronde.



Patrice Sélosse et Bertrand Lemoine au premier rang derrière Philippe Coupérie-Eiffel, derrière Denis Gely et au fond Jacques Rao

SESSION 1 : ECONOMIE, SOCIÉTÉ, MÉCÉNAT, SCIENCE OUVERTE (7 DÉCEMBRE MATIN)



L'assistance ; B. Lemoine et C. Le Louarn

Cette première session comportait trois exposés :

- **Eiffel, ingénieur et entrepreneur** par Marc Rumeau, président de la Société des ingénieurs et scientifiques de France
- **Eiffel, mécène des sciences appliquées** par Jean-François Belhoste, directeur d'études émérite, École pratique des hautes études
- **Du tall building au skyscraper : inventions américaines, de Buffington, à Sullivan, à Ferris, et le mythe de la tour Eiffel, 1887-1893** par Roberto Gargiani, professeur honoraire, École polytechnique fédérale de Lausanne

SESSION 2 : CONSTRUCTION MÉTALLIQUES ET ARCHITECTURE (7 DÉCEMBRE APRÈS-MIDI)



S. Yeatman-Eiffel, C. Le Louarn et M. Porrino

Cette session comportait quatre exposés :

- **Gustave Eiffel constructeur** par Bertrand Lemoine, directeur de recherche honoraire, CNRS
- **The phenomenon Eiffel – the context of a complex case** par Tom F. Peters, professeur émérite, Lehigh University
- **Viaducs ferroviaires en arche métallique : principes de conception et de dimensionnement avant et après Garabit** par Matteo Porrino, École d'architecture Paris-Malaquais, laboratoire GSA
- **Fer, fonte, acier, Gustave Eiffel à la croisée des chemins** par Anne-Françoise Gourgues-Lorenzon, professeure, Mines Paris – PSL
- **Comment rénover en préservant l'authenticité des structures métalliques à la Eiffel : l'exemple des halles de gare** par Hannah Franz, doctorante, Université Gustave Eiffel, département Matériaux et structures, laboratoire Structures métalliques et à câbles



A-F. Gourgues-Lorenzon

Eiffel, ainsi que Nicolas Marescaux, beau-frère de Savin, et sa fille Tiphaine. Nicolas Marescaux avait participé l'année dernière au colloque sur les nouvelles mobilités, où il représentait la MACIF. Alexandre Navarro, Secrétaire général de la commission Française pour l'UNESCO, nous avait rejoints. Rémi Capoulade et Meriem Belazouz, co-fondateurs de Coworking Channel, avaient réussi à plus tardivement à rallier l'hôtel de l'industrie, car la gestion de la vidéo leur incombait en totalité. En effet, les appariteurs étant en télétravail, nous n'avons vu aucun technicien durant les deux jours, ce qui devait poser de réels problèmes pour la journée du vendredi ...



Hanna Franz

Olivier Mousson, président de la Société d'encouragement, présenta cette vénérable institution au cours de la soirée.



le premier groupe avant la remise des lunettes magiques

SOIRÉE À L'HÔTEL DE L'INDUSTRIE (7 DÉCEMBRE 2023)

La soirée débuta par une plongée autour de la Tour Eiffel lors de l'incroyable exposition universelle de 1889, proposée par Viality Tour. Nous avons pu revivre la construction de la Dame de Fer, immergé dans l'ambiance animée du XIXe siècle, grâce à la réalité virtuelle. Cette visite guidée insolite prend normalement place sur le Champ-de-Mars. Les concepteurs étaient venus nous en faire bénéficier dans les salons de l'hôtel de l'industrie.



Image virtuelle

La soirée s'est poursuivie autour d'un cocktail offert par la SEIN, Alumni-ONERA et AERO-EIFFEL 100, auxquels participaient les organisateurs, les intervenants et quelques invités. Parmi eux Xavier Bouis, ancien directeur technique général de l'ONERA, Gérard Laruelle, premier directeur général du pôle de compétitivité ASTECH et également ancien de l'ONERA et de l'Aérospatiale. Il y avait également Sylvain et Savin Yeatman-



A. Navarro, J. Rao et R. Capoulade ; J.-P. Mizzi, M. Porrino et A.-F. Gourgues-Lorenzon



P. Selosse, B. Lemoine, M.-C. Coët et M. Larnaudie-Eiffel ; M. Rumeau et M. Belazouz



A. Navarro, O. Mousson, J.-P. Mizzi et B. Chanetz ; X. Bouis et G. Laruelle



Ph. Dandin et M.-H. Pepin

Il fut décidé de bousculer le programme et de reporter cette présentation après la table ronde.

TABLE RONDE : EIFFEL, INSPIRATEUR DES JEUNES GÉNÉRATIONS



M. Larnaudie-Eiffel, A. Navarro et J. Rao ; O. Mousson et C. Le Louarn



Les intervenants de la table ronde – débout M.-C. Coët et B. Lemoine

SESSION 3 : AÉRODYNAMIQUE ET MÉTÉOROLOGIE



Marie-Claire Coët et Martin Peter

La matinée fut difficile au niveau visio car nous n'arrivions pas à projeter les présentations sur l'écran et personne ne répondait au numéro de téléphone à contacter en cas de problèmes. C'est finalement Jean-Philippe Régnauld, qui réussit à sauver la situation, momentanément du moins, puisque les deux premières présentations se passèrent convenablement :

- Eiffel aérodynamicien et météorologue par Martin Peter, conservateur, Soufflerie Eiffel
- 100 ans d'avancées météorologiques depuis Eiffel par Philippe Dandin, directeur, École nationale de la météorologie et Marie-Hélène Pepin, cheffe du département Documentation, Météo-France

En revanche, après la pause il fut impossible de projeter quoi que ce soit, malgré toute la bonne volonté de Rémi et Jean-Philippe et la présentation suivante fut sabordée :

- 100 ans de souffleries depuis Eiffel par Bruno Chanetz, directeur de recherche, ONERA

Cette table ronde devait être initialement animée par Daniel Carneiro-Fuentes. Se sachant dans l'impossibilité d'assister à ce colloque, Daniela avait, en septembre dernier, passé le relais à Marie-Claire Coët, directrice de l'Information scientifique et technique et référente science ouverte à l'ONERA, qui a ainsi préparé avec les intervenants le déroulé au cours du mois de novembre. Participaient à cette table ronde :

- Véronique Brunet, écrivaine et historienne,
- Stéphane Demilly, sénateur, consultant, biographe d'Henry Potez,
- Myriam Larnaudie-Eiffel, Association des descendants de Gustave Eiffel,
- Bertrand Lemoine, CNRS, Jean-Paul Mizzi, Université Gustave Eiffel,
- Jacques Rao, Commission nationale française pour l'UNESCO,
- Marc Rumeau, Société des ingénieurs et scientifiques de France,
- Michel Virlogeux, ingénieur des ponts de Normandie et de Millau

On retrouvait parmi les participants à cette table ronde de vieilles connaissances de notre association : Stéphane Demilly bien sûr, mais aussi Jacques Rao, qui vint représenter l'UNESCO à Loudun et à Saumur, et Jean-Paul Mizzi, qui intervint en 2022 lors du colloque « Les Nouvelles mobilités », grâce à Laurent Chaudron.



Intervention de M. Virlogeux



M. Virlogeux (en bout de table), Ph. Coupérie-Eiffel, S. de Gaulle, J.-B. de Froment



Intervention de J. Rao



à g. S. Demilly puis C. Le Louarn

CONCLUSION

La correspondance avec l'écran n'ayant toujours pas été rétablie, Bruno Chanetz a proposé une présentation plus courte – sans supports graphiques – des souffleries subsoniques, super et hypersoniques des centres ONERA de Meudon, Le Fauga-Mauzac et Modane. Il a débuté son intervention en présentant la controverse entre Prandtl et Eiffel concernant la traînée des sphères. On trouvera dans l'article suivant la substance de cette polémique, qui illustre l'importance du nombre de Reynolds en aérodynamique.



Bruno Chanetz concluant le colloque

**DÉJEUNER CHEZ FRANÇOISE
AÉROGARE DES INVALIDES (8 DÉCEMBRE)**

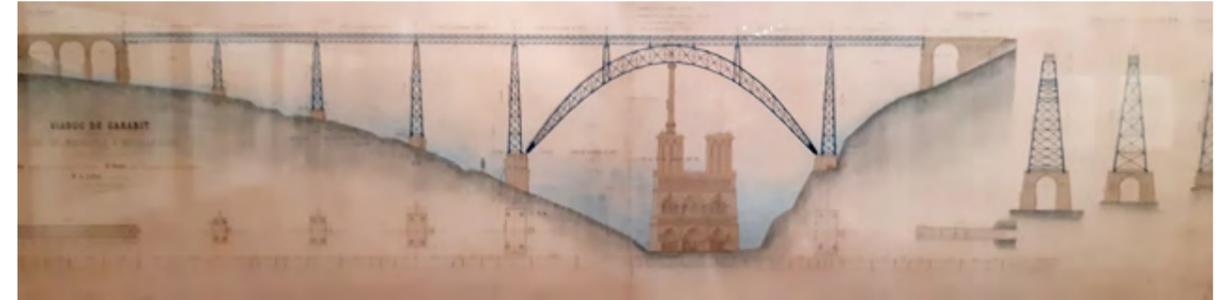
A l'invitation de Gilles Roussel, président de l'UGE, absent et de Jean-Paul Mizzi, vice-président, nous étions invités à déjeuner Chez Françoise à l'aérogare des Invalides. Philippe Coupérie-Eiffel était venu, accompagné de Sophie de Gaulle.

VISITE AU MUSÉE D'ORSAY

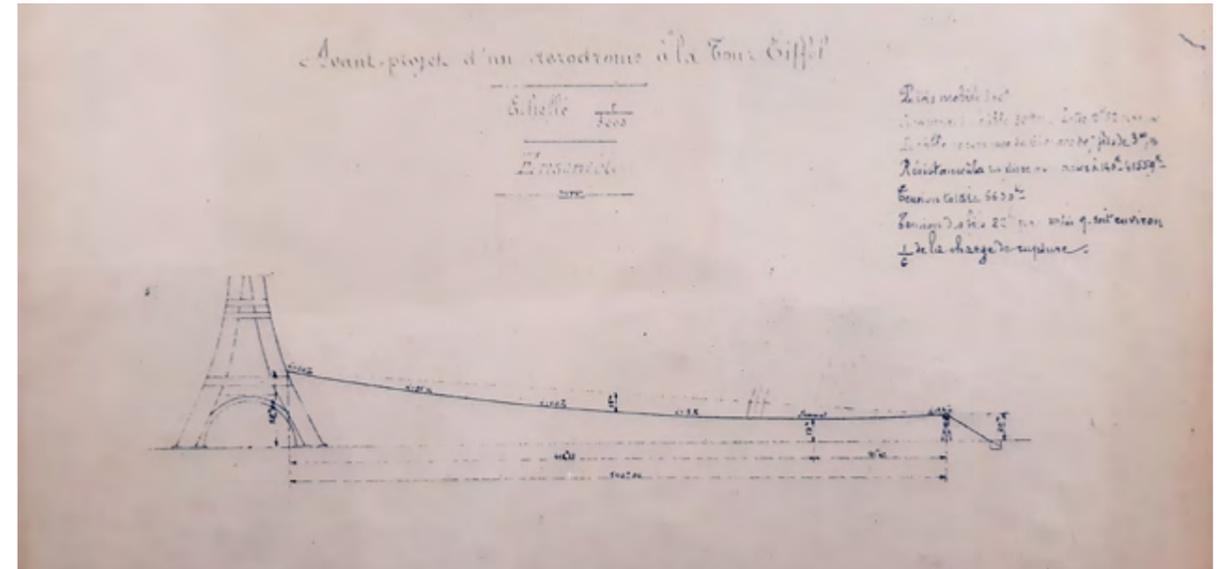
La journée s'est achevée par la Présentation de la collection de dessins d'architecture du musée d'Orsay et la visite guidée de l'accrochage « Gustave Eiffel, bâtisseur de ponts » avec Clémence Raynaud, conservatrice en chef Architecture, Musée d'Orsay, Claire Guitton, chargée d'études documentaires Architecture, Musée d'Orsay et Myriam Larnaudie-Eiffel, Association des descendants de Gustave Eiffel.



Accrochage « Gustave Eiffel »



Dessin représentant le viaduc de Garabit en positionnant Notre-Dame, surmontée de la colonne Vendôme au fond de la vallée



L'« aérodrôme » envisagé par Eiffel à partir du premier étage de la tour



C. Raynaud (à d.) présentant les dessins

Parmi les dessins présentés par Clémence Raynaud, l'un d'eux a particulièrement retenu mon attention, puisqu'il s'agissait du projet, datant de 1903, de construction d'un « aérodrôme ».

Ce dispositif, envisagé par Eiffel en 1903, ne fut jamais installé au Champ-de-Mars. En revanche le capitaine Ferber, avec qui Eiffel était en relation, obtint l'autorisation d'installer sur le centre militaire de Chalais-Meudon un dispositif expérimental très ingénieux, semblable au sien. C'était en fait une sorte de tyrolienne, qui fut construite en édifiant, sur une pente des collines environnant le vallon de Chalais, trois pylônes en bois, reliés entre eux par un câble tendu sur lequel glissait un chariot. L'avion, suspendu au chariot, glissait le long du câble de 40 m de long incliné à 33%. En fin de course, le crochet libérait l'aéroplane qui se retrouvait dans des conditions optimales de vitesse pour voler au ras du sol et donc sans danger pour le pilote.

C'est sur cette image d'un procédé expérimental, alternatif à la soufflerie, que s'acheva ce colloque dédié à Gustave Eiffel, qui sera entièrement disponible sur CC, grâce à Rémi Capoulade et Meriem Belazouz, dont on peut saluer le professionnalisme et le dévouement durant ces deux journées.

L'ASSOCIATION AÉRO-EIFFEL 100 ŒUVRE DEPUIS 2012 POUR LA RECONNAISSANCE DE L'ŒUVRE D'EIFFEL AÉRODYNAMICIEN

L'association est présidée par Martin Peter, conservateur de la soufflerie Eiffel. Le secrétaire général est Gérard Laruelle et le trésorier Bruno Chanetz. Elle fut constituée en 2012 à l'occasion du centenaire de la soufflerie Eiffel pour organiser un colloque à la DGAC en association avec la 3AF et l'association des amis de Gustave Eiffel présidée par Philippe Coupérie-Eiffel dans le cadre de la 47^{ème} Conférence internationale d'aérodynamique appliquée, intitulée *Wind tunnel and computation: a joint strategy for flow prediction* et sous-titrée *1912-2012 centenary of the Eiffel wind tunnel*. En 2013, Aéro-Eiffel 100 organisa, en partenariat avec l'ONERA, le GIE S2A et le CSTB, une exposition à la mairie du XVI^e arrondissement, intitulée : *100 ans de souffleries depuis Eiffel*. Cette exposition qui comprend 45 kakemonos, a été reprise en totalité au musée de l'Air et de l'Espace en 2013-2014, en 2014 dans le hall de la DGAC et partiellement en maintes occasions : soufflerie Hispano-Suiza de Bois-Colombes, journées académiques Air et Espace de Montpellier ... En cette année 2023 du centenaire de la mort d'Eiffel, elle fut partiellement exposée au château de Clos-Vougeot, à la demande de Véronique Brunet, auteure d'une exposition sur l'enfance bourguignonne de Gustave Eiffel. Elle intervint au cours de notre colloque Eiffel 2023.

L'association AERO-EIFFEL 100 a également fait fabriquer une maquette à l'échelle 1/100^e de la Grande Soufflerie S1Ch de Chalais-Meudon, réalisée par différents lycées techniques de l'académie de Versailles. Ce beau modèle réduit, à l'échelle 1/100^e (1,2 m de long pour 120 m de longueur réelle) est opérationnel avec des ventilateurs mus par moteurs électriques. Il a été présenté en juin 2019 au salon du Bourget dans le hall L'avion des métiers, grâce à un emplacement mis à disposition gratuitement par le GIFAS. Depuis la maquette a trouvé sa place dans la mezzanine de la soufflerie Eiffel, rue Boileau à Paris, où elle sera définitivement exposée.

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



La maquette et une photo (avant 1950) de la Grande soufflerie de Chalais-Meudon côté collecteur

COLLOQUE

Gustave Eiffel, une autre carrière dans l'aérodynamique et les souffleries

PAR BRUNO CHANETZ

Au début du XX^e siècle, Gustave Eiffel contribue avec Ludwig Prandtl à fonder une science nouvelle, l'aérodynamique, par laquelle il va étudier les forces auxquelles il s'est confronté toute sa vie: la pesanteur et le vent.

SES MOTIVATIONS ET L'APPAREIL DE CHUTE À LA TOUR EIFFEL

Dès son projet de construction dans les années qui précèdent le centenaire de la révolution Française, la tour avait de nombreux détracteurs : artistes et écrivains. Au début du XX^e siècle, les critiques se poursuivent, quoique moins exacerbées. Gustave Eiffel veut alors prouver son utilité scientifique. A long terme, il sait que c'est le seul moyen d'éviter sa démolition à l'expiration de la concession. Elle représente pour lui un formidable support pour effectuer des expériences en aérodynamique. Aussi Eiffel décide de s'en servir dans l'étude de cette science naissante. Il conçoit un appareil de chute très ingénieux, qu'il installe au 2^e étage, mettant à profit les 115 mètres de hauteur de la plateforme, pour étudier la résistance des corps. Ses premières recherches, saluées par l'Académie des Sciences en 1908, lui permettent de jeter les bases des lois fondamentales de la résistance de l'air.



Appareil de chute conservé à la soufflerie Eiffel rue Boileau à Auteuil

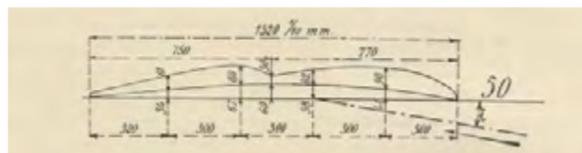
LA PREMIÈRE SOUFFLERIE, AU CHAMP-DE-MARS (1909-1911)

Pour poursuivre ses recherches sur la trainée des objets soumis à la force du vent, Eiffel construit le « Laboratoire du Champ de Mars » qui sera opérationnel de 1909 à 1911. Cette soufflerie est destinée à l'étude de l'aérodynamique, le principe de l'installation résidant dans la mise en mouvement d'air autour de maquettes d'aéronefs, afin de mesurer les forces qui s'y exercent.

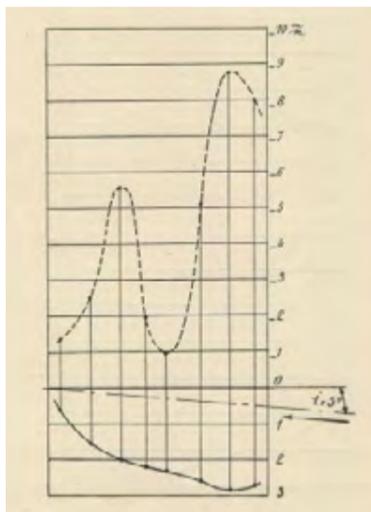
A cette époque, l'aviation est à ses débuts. Les pionniers de l'air payent un lourd tribut à cette technique naissante. De nombreux vols se terminent par des écrasements au sol et la mort des pilotes. Eiffel entend préserver la vie des pilotes par des recherches en soufflerie, en substituant au « *flair du constructeur, l'art de l'ingénieur* ».

UNE AVANCÉE MAJEURE : LA RÉPARTITION DE LA PORTANCE ENTRE INTRADOS ET EXTRADOS

Parmi les tests réalisés, ceux sur les profils d'ailes ont eu des conséquences capitales sur la connaissance de la force de portance. En effet jusqu'aux travaux de Gustave Eiffel, les inventeurs ne se doutaient pas que l'aile était plus aspirée par l'air au-dessus (extrados) que portée par l'air au-dessous (intrados). En mesurant la répartition des coefficients de pression sur les parties intrados et extrados de l'aile « *Cette étude a fait ressortir l'importance prépondérante des dépressions à l'arrière et a montré que l'aile de l'aéroplane est deux fois plus aspirée par l'air qui s'écoule sur sa face dorsale (extrados), qu'elle n'est poussée par l'air qui s'écoule sur sa face ventrale (intrados). Avant que ce fait ne fût mis en évidence au Laboratoire du Champ de Mars, les constructeurs d'avions ne tenaient pas compte des dépressions sur la face dorsale pour l'attache des toiles des ailes, et cela a dû amener des catastrophes par déchirure inexplicables de cette toile pendant le vol. On y a remédié depuis la publication de mes travaux.* ».



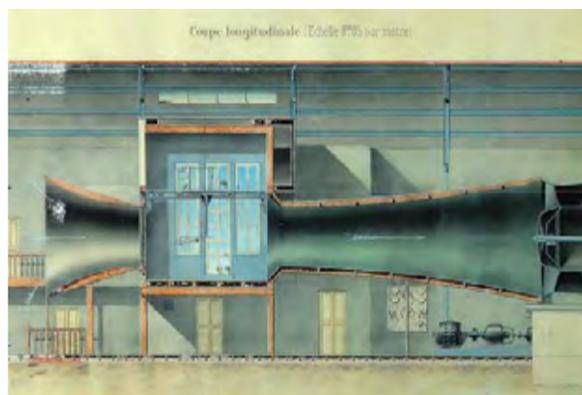
Aile n°50 à deux bosses



Tracé des coefficients de pression associés pour une incidence de 5°

LA SECONDE SOUFFLERIE, À AUTEUIL (À PARTIR DE 1912)

Gustave Eiffel est également à l'origine d'une évolution considérable dans l'art des souffleries. Il intercale une pièce divergente – le diffuseur – entre la veine d'essai et le ventilateur situé en aval. C'est une innovation majeure, puisqu'elle permet de diminuer drastiquement la puissance nécessaire à l'installation. L'efficacité de ce dispositif découle de la loi de Bernoulli, qui stipule que pression et vitesse varient en sens inverse. De fait le diffuseur, en diminuant la vitesse, a pour effet de comprimer l'air. La différence de pression de part et d'autre du ventilateur est alors très inférieure à celle qui règne lorsque le ventilateur est situé directement en aval de la section d'essai. Eiffel résume ainsi la situation : « Le diffuseur économise donc en somme les deux tiers de la puissance. L'avantage de ce système de récupération est manifeste ».



Dessin aquarellé de la soufflerie d'Auteuil de g. à d. convergent, chambre d'essai, diffuseur et ventilateur pour aspiration de l'air

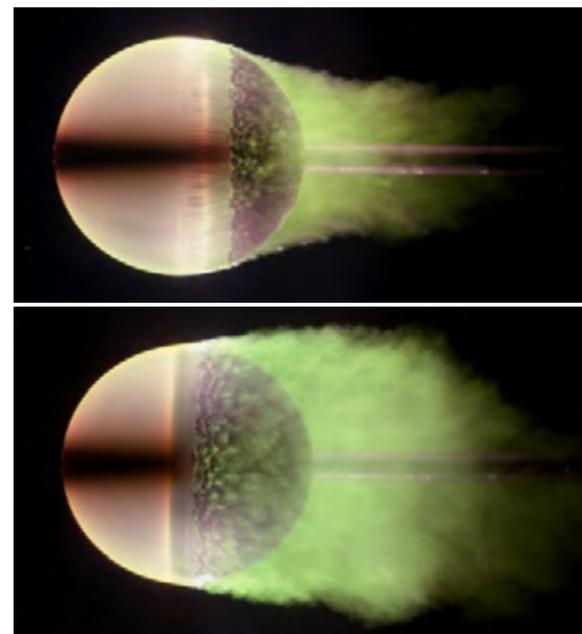
La soufflerie achevée en 1912 à Auteuil, bénéficie de l'invention du diffuseur. Elle provient du transfert de la première soufflerie de Gustave Eiffel, installée au Champ-de-Mars aux pieds de la Tour Eiffel en 1909. La soufflerie du Champ-de-Mars atteignait une vitesse de 18 m/s dans une section d'essai circulaire de 1,5 m de diamètre. Elle était mue par un ventilateur actionné par un moteur de puissance 50 chevaux. Avec ce même moteur transféré du Champ-de-Mars à Auteuil, la nouvelle soufflerie, dotée d'un diffuseur, atteint 32 m/s dans une section de 2 mètres de diamètre, soit un gain en débit de 200 %.

LA CONTROVERSE CONCERNANT LA TRAÎNÉE DES SPHÈRES

Au laboratoire d'Auteuil, Eiffel reprend ses activités là où il les avait laissées au Champ-de-Mars. Il s'intéresse à l'aérodynamique des corps dont la résistance à l'air paraissait suivre des lois particulières en fonction de la vitesse, en premier lieu la sphère. Les mesures effectuées jusqu'à présent au Champ-de-Mars, à des vitesses de 15 m/s conduisaient à des valeurs du coefficient de traînée C_x inférieures de moitié à celles trouvées pour des vitesses plus faibles (9 m/s) par le professeur August Föppl du laboratoire de Göttingen, dirigé par le célèbre Ludwig Prandtl. Föppl n'hésita pas à écrire que le Français avait dû commettre une erreur de calcul, ajoutant pour comble de goujaterie, que c'était pardonnable, eu égard à son âge ! En reprenant à Auteuil les essais, pour différentes vitesses, avec des sphères de différents diamètres, Eiffel découvre alors qu'il y a deux régimes d'écoulement de l'air : l'un aux basses vitesses correspondant au coefficient trouvé à Göttingen (régime laminaire au décollement de la couche limite) et l'autre, aux plus fortes vitesses, correspondant au coefficient trouvé au Champ-de-Mars (régime turbulent au décollement). Ainsi, l'étude expérimentale des sphères réalisée au laboratoire d'Auteuil fut la première qui mit en évidence le rôle important du « nombre de Reynolds » en aérodynamique.

En effet, la transition entre les deux régimes se produit toujours pour la même valeur du produit vitesse \times diamètre. Lorsque que la viscosité et la masse volumique sont constantes, ce qui est le cas dans le bas subsonique, le produit vitesse \times diamètre est en effet similaire au nombre de Reynolds $ReD = \rho V D / \mu$ où ρ est la densité de l'écoulement réel, V sa vitesse, μ la viscosité dynamique de l'air et D le diamètre de la sphère étudiée.

L'exemple de la sphère révèle la complexité du comportement de la couche limite, qui conduit parfois à des résultats paradoxaux. La couche limite laminaire est toujours le siège d'une traînée de frottement plus faible que la couche turbulente. Cependant son décollement plus précoce entraîne, dans le cas de la sphère, un sillage plus perturbé, qui est à l'origine d'une traînée de forme (ou de pression) plus importante que dans le cas turbulent. Ainsi, deux effets antagonistes s'opposent. Lorsque la couche limite opère une transition de l'état laminaire vers l'état turbulent, la traînée due au sillage se réduit plus que n'augmente la traînée de frottement due au parcours de couche limite turbulente plus long sur la sphère. Ainsi l'apparition d'un régime turbulent plus en amont sur la sphère – en ce cas d'espèce, ce qui est loin d'être une généralité – est plus favorable à la réduction de la traînée globale, qui est la somme des traînées de frottement et de forme.



Visualisations (crédit ONERA) au tunnel hydrodynamique de l'écoulement autour d'une sphère en régimes laminaire au décollement (à gauche) et turbulent au décollement au décollement (à droite)

Ce phénomène est illustré par une expérience ancienne réalisée à l'ONERA dans un tunnel à eau par Werlé. La figure du haut est relative au cas obtenu pour un nombre de Reynolds basé sur un diamètre égal à 200 000, et la figure du bas est relative au cas d'un nombre de Reynolds égal à 300 000. On voit bien le sillage moins perturbateur dans le second cas (avec décollement turbulent) que dans le premier cas (avec décollement laminaire plus précoce).

Une application emblématique de ce phénomène est donnée par la balle de golf dotée d'alvéoles qui déclenchent la transition et retardent plus en aval le décollement de la couche limite. Le sillage réduit résultant de cette couche limite turbulente favorise la pénétration dans l'air par réduction de la traînée globale, ce qui entraîne une augmentation de la portée de la balle de golf d'environ 20 %. A l'origine, les inventeurs du golf fabriquaient des balles en cuir, en prenant soin de dissimuler les coutures le plus discrètement possible pour avoir une enveloppe lisse, jugée plus favorable à la pénétration dans l'air. Ils ont découvert plus tard que les meilleures balles de golf étaient des balles endommagées. En effet l'enveloppe plus rugueuse déclenchait la transition de la couche limite plus précocement que la balle lisse.

EIFFEL, PIONNIER DE LA SCIENCE OUVERTE

La controverse entre Prandtl et Eiffel sur la traînée de la sphère met en lumière le rôle essentiel joué par les échanges entre chercheurs pour l'avancement des connaissances. Grâce à ces confrontations, la science progresse et c'était le but poursuivi par Gustave Eiffel : « Ce sont principalement ces progrès [de l'aviation] que j'ai eus en vue en fondant ce laboratoire où les essais sont absolument gratuits, mais où, par contre, tous les résultats sont, dans l'intérêt général, portés à la connaissance de tous, soit par des comptes

rendus... soit par des communications aux Sociétés scientifiques, indépendamment des publications que les constructeurs ou inventeurs peuvent, bien entendu, faire de leur côté, à un moment quelconque. » Gustave Eiffel était un grand chercheur qui n'a pas joué le rôle d'un inventeur méfiant face à des concurrents potentiels. Il offre à tous les constructeurs les moyens de tester gratuitement leurs modèles, si leurs résultats sont publiés et accessibles à tous.

En 1914, il publie « la résistance de l'air et l'aviation » un ouvrage traduit en allemand et en anglais. Son auteur rappelle que « les résultats obtenus ont été d'autant plus appréciés, qu'ils étaient publiés au moment où la science de l'Aviation avait le plus grand besoin de données expérimentales ». Sa contribution à cette science naissante qu'est l'aérodynamique, sera reconnue jusqu'aux États-Unis, qui lui décernent la médaille d'or de Langley en 1913, qui n'avait été précédemment remise qu'à Wilbur et Orville Wright.

DES COLLABORATEURS DE TALENT : LÉON RITH & ANTONIN LAPRESLE

Léon Rith et Antonin Lapresle, ses deux principaux collaborateurs, œuvrent à ses côtés, contribuant à ses découvertes. Il leur rend hommage au début de l'un de ses ouvrages : « Toutes ces expériences ont été faites, comme les précédentes, avec le concours dévoué de mes collaborateurs habituels, M. Rith, ingénieur des Arts et Manufactures, et M. Lapresle, ancien élève de l'École Supérieure d'Électricité. Je me félicite d'avoir, encore une fois, l'occasion de les en remercier aujourd'hui. ».



Gustave Eiffel et Antonin Lapresle

Rith a eu une influence considérable pour la création de la célèbre soufflerie qui a servi de modèle à toutes celles du monde entier. Concernant les problèmes de stabilité des avions, trop complexes pour être alors résolus par l'approche mathématique, Eiffel identifie les principales variables dont dépend l'équilibre en vol horizontal stabilisé (poids de l'appareil, puissance utile du moteur, vitesse, angle d'incidence). Pour faciliter l'interprétation des résultats des essais réalisés pour le compte des constructeurs, Léon Rith met au point le mode de représentation connu sous le nom de « polaires logarithmiques » et universellement adopté pour résoudre les problèmes relatifs aux avions et aux hélices. Eiffel écrit en 1914 « J'estime cette méthode très commode et appelée à rendre d'utiles services dans l'étude des avions ».

Quant à Antonin Lapresle, à qui Gustave Eiffel confie la direction du laboratoire lorsqu'il se retire en 1921, il apporte un perfectionnement important à la balance aérodynamique à trois composantes, qui permet de mesurer rapidement les efforts. Plus tard pour la Grande soufflerie de Meudon, qui sera son œuvre, il conçoit une balance à 6 composantes permettant de mesurer le torseur aérodynamique complet : portance, traînée, force latérale et les moments de roulis, tangage et lacet.

LA SOUFFLERIE EIFFEL DE LA RUE BOILEAU CONTRIBUE À L'EFFORT DE GUERRE

La conception originale de sa nouvelle installation de la rue Boileau en 1912 et ses capacités bien supérieures vont permettre à Eiffel de répondre à une demande grandissante émanant de France et de l'étranger. De nombreux modèles réduits d'avions sont été testés dans la soufflerie Eiffel, de façon à déterminer leurs principaux paramètres de vol. Egalement de nombreuses expériences sur les hélices furent réalisées. Les performances mesurées en soufflerie étaient régulièrement confrontées avec les relevés en vol et confirmaient généralement ceux-ci. Les commandes affluèrent.

Quand survient la guerre de 14-18, l'armée sollicite des industriels de nouveaux matériels de combat. Durant les quatre années de guerre, la soufflerie Eiffel teste plus de 70 modèles d'avions. Eiffel développa son propre avion, le LE, pour « Laboratoire Eiffel », préfigurant les modèles avec ailes en position basse.

L'APPAREIL AÉRODYNAMIQUE SYSTÈME EIFFEL : UN MODÈLE UNIVERSELLEMENT IMITÉ

Le procédé Eiffel est reconnu et en 1914, l'Institut Aérotechnique de Saint-Cyr l'École entreprend la construction d'une soufflerie fonctionnant par aspiration et utilisant le nouveau dispositif mis au point par Gustave Eiffel. En 1929, Albert Caquot, Directeur Technique Général au Ministère de l'Air confie à Antonin Lapresle l'édification de la grande soufflerie de Meudon. Ce dernier dans sa note du 14 mars 1929, émanant du Service des Recherches de

l'Aéronautique - section des recherches aérodynamiques, annonce d'emblée « Nous conservons le dispositif général des souffleries Eiffel ». La soufflerie de type « Eiffel » sera également copiée à l'étranger.

Du vivant même d'Eiffel, de nombreuses souffleries, partout dans le monde vont être construites selon son modèle : Rome, Moscou, Stanford, Dayton, Tokyo, etc. Mais la volonté d'Eiffel ne sera pas respectée et nulle part la plaque indiquant « Appareil aérodynamique système Eiffel Paris » qu'il avait souhaitée, ne sera apposée sur ces installations !

LA SOUFFLERIE D'AUTEUIL AUJOURD'HUI

Plus de 110 ans après sa mise en service en 1912, le laboratoire aérodynamique de Gustave Eiffel à Auteuil est encore opérationnel. En 1921 deux ans avant sa mort, Gustave Eiffel confia sa soufflerie aux Services Techniques de l'Aéronautique (STAé), puis en 1929 le GIFAS en reprit la gestion. En 1983, la société « Aérodynamique Eiffel » fut créée par Martin Peter lorsqu'il rachète la soufflerie qu'il dirigeait. Revendu en 2001 au Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), ce laboratoire continue à apporter à l'industrie une contribution scientifique déterminante sur l'aérodynamique des véhicules, en aéraulique industrielle et en ingénierie du bâtiment. Depuis 2001, Martin Peter est le conservateur de la soufflerie.

Bibliographie

- B. Chanetz – polycopié du Cours de Couche Limite, 3ème année, option Air-Espace, École Centrale de Paris 2005-2006.
B. Chanetz - 1909, la soufflerie Eiffel - La Science au Présent 2009. ISBN 978-2-85229-516-2.
G. Eiffel - Nouvelles recherches sur la résistance de l'air et l'aviation faites au laboratoire d'Auteuil - H. Dunot et E. Pinat, éditeurs -1914.
M. Peter et J.-P. Cuisinier - « Eiffel, la bataille du vent » Éditions CSTB - ISBN 978-2-86891-344-9. ■



Maquette d'un avion Breguet, soufflé en 1916

Inventaire

PAR MARIE-CLAIRE COÛT, DIRECTRICE DE L'INFORMATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE, ONERA

Un porte-clefs d'hôtel
deux règles à calcul
trois pin's
un renard à apprivoiser
un marque-page
des champignons

une carte de vœux

une douzaine de canettes de coca-cola
un trottoir ensoleillé
six documentalistes
« une porte avec son paillason
un monsieur décoré de la légion d'honneur »

une autre carte de vœux

une soufflerie qui aspire Napoléon
un bouquet de fleurs
plusieurs couples d'amoureux
un couvert en acier à ferrer les ânes
un petit garçon qui deviendra astronaute
un autre qui sera aéronaute
une plage à Bali
un dieu grec
des latrines
un monteur d'ours marié à une contractuelle
deux cravates
une ivrogne
un porte drapeau
une lanterne art déco tristement ferrailée
un gibbon orange apprivoisé
un chevalier déchu
six cents chènes truffiers
une lampe bouillotte sauvée des huns
Guignol et Gnafron
Les triplés Figaro

cinq ou six cartes de vœux

Voici l'ébauche d'un « inventaire » bien personnel que j'illustre ici partiellement à travers quelques objets récupérés çà et là et témoignant tous d'un aspect de l'ONERA.

Le fleuron de cette collection est constitué par une paire de règles à calcul d'aérodynamicien fabriquées sous licence ONERA et spécialement conçues et utilisées pour le calcul des écoulements de gaz parfait isentropiques compressibles. Elles seront désormais exposées dans le grand hall du centre de Châtillon.



Datant aussi des débuts de l'ONERA, un couvert au chiffre de l'institution rappelle l'époque où le restaurant d'entreprise était géré en tant qu'œuvre de la direction.



L'air pur du point culminant de l'île de France, où le grand bâtiment de Châtillon s'élève encore, vouait primitivement ce dernier à héberger un sanatorium largement vitré, d'où sa structure si particulière qui lui donne à s'y méprendre l'allure d'un hôpital. On se souvient d'ailleurs de l'hélicoptère qui se posa, il y a quelques années seulement, sur le point H du centre croyant arriver à l'hôpital Marie Lannelongue du Plessis-Robinson, où son passager sans doute fort malade était urgemment attendu. Les nombreux bureaux d'aujourd'hui, disposés le long du grand couloir Nord-Sud, d'où partent plusieurs ailes transversales distribuant elles-mêmes une multitude de petites pièces, tous ces locaux devaient être chambres de poitrinaires, salles de soins, bureaux de soignants, etc. Tout était prévu, même une morgue recyclée en locaux d'archives ! Les clefs de ces bureaux-chambres ONERA étaient à l'origine du même modèle que celles alors en service dans de nombreux hôtels français : une grosse étoile en laiton, bien lourde afin d'être sûr qu'on n'oublierait pas de la déposer à la loge en partant le soir.

Si aujourd'hui le port des tongs et du bermuda est toléré, voire encouragé, il n'en fut pas toujours ainsi. Les anciennes photos témoignent du classicisme avec lequel nos anciens se vêtaient. Je ne peux m'empêcher de déplorer l'absence d'un carré de soie qui aurait fait un juste écho pour les dames aux deux cravates en soie bleue, chacune typique de son époque : fine et stricte rayure d'allure militaire, vite remplacée par un beau motif abstrait issu d'une

L'ingénieur femme convient mal à la recherche; pas assez d'esprit d'invention; pas assez de feu sacré; pas assez de puissance de travail; trop souvent malade, ou dans un mauvais climat sentimental ou psychologique; trop de préoccupations extra-professionnelles; ne désire pas, en général, consacrer son avenir à la recherche. (8)

micrographie d'alliage de titane. Autres temps, autres mœurs. Mais il est une chose intangible, c'est qu'on a depuis toujours veillé de manière intransigeante à la sécurité des personnels de l'Office.

«... En ces périodes de canicule, la Direction du centre vous recommande un certain nombre de points suivants :
 - Venez travailler en tenue adaptée et étonnez vos collègues et amis par l'originalité de votre chapeau (de paille ou autre), lunettes de soleil, chemise, chemisier ou T-shirt, bermuda, tongs, claquettes, sandales ou espadrilles... La chaleur sera moins dure à supporter si la bonne humeur règne entre nous ! En revanche, pas d'impasse sur les Équipements de Protection Individuelle (chaussures, casques, gants...) qui doivent cependant être portés dans le cadre des activités qui le nécessitent. Sécurité oblige.
 - Pensez à vous hydrater régulièrement ;
 - Évitez les efforts physiques... »

Personne ne se risquerait plus aujourd'hui à des propos tels que ceux rapportés en bas de page et extraits du « rapport du directeur général de l'O.N.E.R.A. pour l'année 1947 ». Mais soyons indulgents en les replaçant dans leur époque.

Les temps ont changé et les nombreuses reconnaissances obtenues maintenant par les femmes scientifiques de tous pays et de toutes disciplines témoignent, s'il était besoin, de leur capacité à pleinement embrasser les carrières de la recherche.



Ingénieures, techniciennes, docteurs... Participez à la Journée de l'Orientation d'Elles bougent !

Je vous ai présenté quelques objets d'un musée embryonnaire et non sérieux, que je confie dorénavant aux bons soins de Maxime Ducrocq, l'archiviste de l'ONERA, en espérant qu'avec l'aide de tous il puisse l'enrichir. Le véritable trésor d'archives de l'institution, ses bijoux de famille, c'est le fonds des documents de l'ONERA, conservé depuis l'origine jusqu'à nos jours et quotidiennement enrichi par les documentalistes des nouveaux travaux des ingénieurs-chercheurs de l'Office. Il convient à présent d'instruire quelles peuvent être les possibilités d'explorer et d'exploiter toute la richesse de cette base de connaissance grâce aux nouvelles techniques de l'IA...

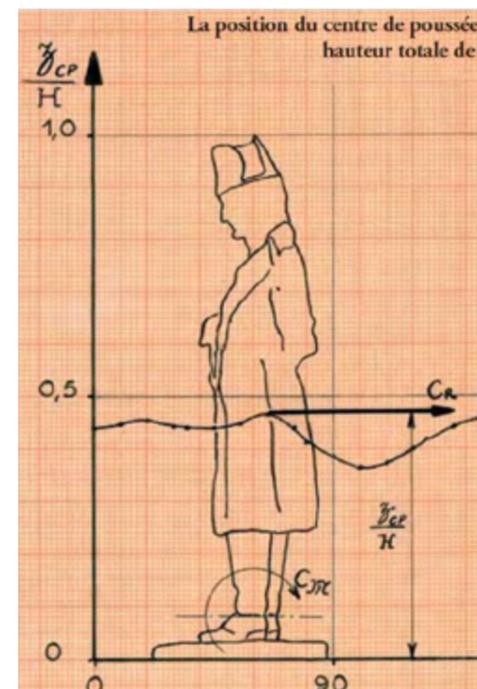


REMERCIEMENTS

Donateurs
 Règles à calcul : Yves Aurenche (ancien de DCV), Nicolas Severac et Jean-Marc Luysen (DAAA)
 Pin's : Jean Montambeaux (ancien d'OP), André Raffard (ancien du DOTA)
 Couverts et cravates : Jean-Christien (ancien CCG)
 Porte-clés : Anne Carole Morelle (ancienne d'ISP)
 Livret d'accueil - édition 1965 : Hervé Consigny (ancien de la DTG)
 Répertoire téléphonique du centre de Châtillon - édition 1954 : Anne-Marie Seguin (ancienne d'ISP)
 Prises de vue : Caroline Gripon-Lamotte (DCOM)
 Pour l'inspiration : <https://www.chrismarker.ch/inventaire-jacques-prevert.html>



Plusieurs cartes de vœux...



Extrait du PV d'essais "Mesure des efforts et des moments dus au vent agissant sur la statue de Napoléon 1er" - mars 1962

RESTAURANT

Dans la région parisienne, un système de "self-service" permet au personnel de déjeuner en une demi-heure, dans le cadre de la journée continue, à des prix très intéressants, variables selon la rémunération. Un bar offre, en outre, sandwiches, boissons (café, thé, infusions). Une salle particulière, munie de réchauds, est à la disposition des personnes apportant leur repas.

CHÂTILLON
1 ^{er} service : 11 h 30 à 12 h 00 OP
2 ^{ème} service : 11 h 45 à 12 h 15 OP - OR - OFT - OD
3 ^{ème} service : 12 h 30 à 13 h 00 OA (sauf ARC) - ON - OMA - KT
4 ^{ème} service : 12 h 45 à 13 h 15 OE - DES - OED - OMT - KA - TNE
5 ^{ème} service : 13 h 30 à 14 h 00 AC - APB - KB - AC - KFG - KJ - OA (ARC)
CHALAIS
1 ^{er} service : 12 h 00 à 12 h 30 KFG - KJ - OFT - TNE - DES - OMT
2 ^{ème} service : 13 h 15 à 13 h 45 OA - OE - TNE
PALAISEAU
1 ^{er} service : 11 h 40 à 12 h 10 Autour OE - OFT - KFG - TNE
2 ^{ème} service : 12 h 50 à 13 h 30 Laboratoires

Extrait du livret d'accueil de l'ONERA édition 1965

AVIS IMPORTANT

Les communications personnelles sont interdites sauf cas exceptionnels de gravité ou d'urgence. Il ne s'agit pas de la vôtre, utilisez la cabine automatique pour la zone restreinte à l'automatique.

En dehors de cette zone et pour la province, n'oubliez pas de signaler qu'il s'agit d'une communication personnelle en donnant votre nom.

En toute occasion, adressez les demandes de l'Office comme s'ils étaient vôtres :

L'unité de communication (5 minutes) coûte :

- 210 F pour MOANS
- 225 F pour CANNES
- 120 F pour ALGER (+ 240 F par minute supplémentaire)

Limitez la durée de vos communications et réglez vos questions très précises.

Si l'emploi du téléphone n'est pas satisfaisant, utilisez le télégramme (dont il reste copie) ou la lettre :

- un télégramme coûte 150 F pour 10 mots (+ 12 F par mot supplémentaire),
- une lettre coûte 15 F.

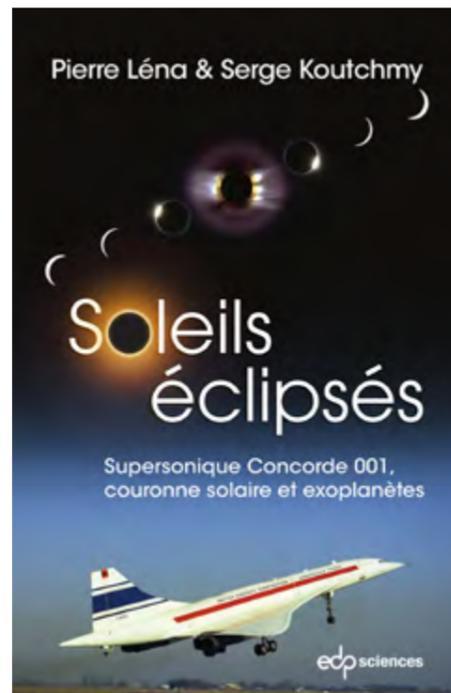
Extrait du répertoire téléphonique intérieur du centre de Châtillon - édition 1954

RECENSIONS

Soleils éclipsés

Supersonique Concorde 001, couronne solaire et exoplanètes de Pierre Léna et Serge Koutchmy édité par EDP SCIENCES

PAR MARIE-CLAIRE COËT, DIRECTRICE DE L'INFORMATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE, ONERA



*À Bruno Chanetz,
dont la curiosité est permanente
et la gentillesse tout autour !
Pierre Léna*

Grâce à l'idée de génie et à l'audace de P. Léna, l'éclipse de soleil du 30 juin 1973 s'est éternisée durant près d'une heure et quart, pour quelques ingénieurs et astrophysiciens embarqués à bord du légendaire Concorde 001. Ce temps à Mach 2 dans l'ombre de la Lune, ils le passèrent à observer la couronne solaire. Record jamais battu depuis 50 ans, cette longue nuit permit des

observations astronomiques exceptionnelles. La première partie de l'ouvrage, contée à la première personne par P. Léna, relate cette aventure humaine et scientifique hors du commun, qu'il imagina et à laquelle il prit part : depuis ce déjeuner mémorable et décisif avec A. Turcat, alors pilote d'essai du supersonique, à qui il expose son idée avec tant d'enthousiasme qu'il le conquiert sur le champ, jusqu'à l'abondante moisson de science récoltée en 74 minutes d'obscurité, en passant par les préparatifs minutieux de l'expédition et le suspens de son déroulement. La seconde partie de l'ouvrage montre et explique au lecteur les formidables progrès faits depuis, en un demi-siècle, dans la connaissance de la couronne solaire. Subtilement didactique, elle aide l'intuition à entrer dans la compréhension des phénomènes complexes. A son terme, elle conduit le lecteur vers la quête des exoplanètes et le mène à la question fondamentale de la vie dans l'univers. Le trait d'union entre les éclipses solaires et les milliards d'exoplanètes, dont peut-être quelques exo-Terre, est fait par les techniques d'observation, nées de celles des éclipses solaires.

En mêlant habilement le récit d'un voyage extraordinaire digne de Jules Verne à un exposé scientifique vulgarisé de l'état des connaissances actuelles sur la couronne solaire et les exoplanètes, les astrophysiciens P. Léna et S. Koutchmy parlent à la fois au cœur et à la raison. Leur ouvrage, très richement illustré, est assurément de ceux qui nourriront chez nos jeunes la réflexion sur la place de l'humanité dans l'univers et qui feront naître chez eux les vocations scientifiques dont le Monde a tant besoin, en suscitant le désir de se dépasser dans des aventures nouvelles pour s'y accomplir... Une lecture pour tous et à recommander sans modération à la jeune génération qui pourra y assouvir sa soif bien légitime d'aventures, d'idéal, d'objectifs nobles et de connaissance.

Les auteurs de Soleils éclipsés sont tous deux des scientifiques de renom international. Pierre Léna est astrophysicien à l'observatoire de Paris, membre de l'Académie des sciences et professeur émérite à l'Université Paris-Cité. Serge Koutchmy était un astrophysicien spécialiste mondial de la couronne solaire, directeur de recherches au CNRS.

RECENSIONS

CONCORDE,

la légende supersonique aux Editions Privat de Gérard Maoui et André Rouayroux

PAR BRUNO CHANETZ



ans d'études pour aboutir à ce supersonique civil qui, à l'instar du paquebot France ou la fusée Ariane, a fait la gloire de notre pays. Le résultat est à la hauteur des ambitions qu'il a suscitées. On connaît le célèbre adage du grand avionneur Marcel Dassault « Pour qu'un avion vole bien, il faut qu'il soit beau ». Or Concorde était un bel avion, la forme gothique flamboyant de ses ailes, définie à l'ONERA, lui conférait une élégance racée.

Dès l'avant-propos les auteurs évoquent la contribution de l'ONERA dans la définition aérodynamique, la conception des entrées d'air des moteurs¹ et l'étude des matériaux. L'ouvrage se divise ensuite en quatre chapitres. Le premier chapitre Rêve d'envol supersonique s'ouvre par de belles photos prises dans les souffleries de l'ONERA à Meudon et Modane, ainsi qu'au tunnel hydrodynamique de l'ONERA - Châtillon². Gérard Maoui est en effet venu consulter les archives de l'ONERA et rencontrer des grands témoins, tel Jacky Leynaert, concepteur des entrées d'air¹. Les essais de givrage, réalisés au cours de l'hiver 1968-1969 dans la soufflerie sonique SIMA de l'ONERA à Modane sont également évoqués. Le second chapitre aborde Les essais en vol. Les auteurs rappellent que lors du 14e vol, l'avion s'alignant sur la place de la Concorde avant de remonter les Champs Élysées, les automobilistes sont spontanément sortis de leur voiture pour applaudir. Le troisième chapitre relatif à l'Exploitation rend compte des difficultés de la commercialisation, montrant que l'exploit technique ne rime pas forcément avec réussite financière. Il évoque aussi les vols affrétés autour du monde avec des records de vitesse, les vols présidentiels et enfin le dramatique accident du 25 juillet 2000 au départ de l'aéroport Charles-de-Gaulle à Roissy. Le quatrième chapitre *Concorde et après ?* examine la situation du supersonique civil, à la suite du dernier vol commercial du 31 mai 2003. Divers projets actuels sont présentés : démonstrateurs, recherches de la NASA ou de l'ONERA³ pour vaincre le bang sonique, nuisance majeure freinant l'émergence d'un nouveau supersonique civil. Enfin un dernier chapitre intitulé *La légende supersonique* conclut l'ouvrage, illustré de photos des lieux où est perpétué le souvenir de cet avion légendaire. ■

Les auteurs de cet ouvrage sont fort légitimes à évoquer le supersonique franco-britannique. Gérard Maoui est spécialisé dans la communication pour l'aéronautique et le spatial. Il a publié de nombreux ouvrages sur cette thématique, principalement dans la collection Ciel du monde qu'il dirige aux Editions du Cherche midi. André Rouayroux est également l'auteur de nombreux livres sur l'aviation, dont deux parus en 2006 et 2017, déjà consacrés à Concorde. Il est passionné par ce monde où évoluent des gens dotés d'un immense talent, celui de donner vie à des machines de rêve. Ce livre fait la part belle à l'illustration. Il met aussi l'accent sur les hommes qui ont participé à la conception, à la fabrication, aux essais en vol et à l'exploitation de Concorde. Il aura fallu dix

1. voir dans la Lettre 3AF n° 35 - page 52, l'article relatif aux entrées d'air
2. voir dans la Lettre 3AF n° 34 - page 48, les visualisations d'Henri Werlé
3. voir dans la Lettre 3AF n° 32 - page 30, la perche virtuelle aéronautique

RECENSIONS

Le Hangar à dirigeables d'Ecausseville, un centenaire plein d'avenir sous la direction de Philippe Pâris et Dominique Barjot aux éditions Ouest-France

PAR BRUNO CHANETZ



Il y a des colloques sans actes, mais aussi des actes sans colloque. C'est le cas de ce remarquable ouvrage collectif, tenant lieu du colloque qui aurait dû avoir lieu en 2020 dans le Hangar à dirigeables d'Ecausseville pour le centenaire de son achèvement. La crise sanitaire ne l'a pas permis, mais en tant que membre du conseil scientifique qui préparait l'évènement, je me félicite

que tous les intervenants pressentis aient accepté de consigner leurs connaissances dans ce superbe ouvrage qu'on doit à Philippe Pâris et à Dominique Barjot. Ils ont su réunir historiens, universitaires, architectes, ingénieurs experts et constructeurs de dirigeables pour brosser un tableau varié et approfondi. L'ouvrage est divisé en quatre parties.

La première est relative à l'histoire du bâtiment et de l'aéronautique dans la Manche pendant la guerre de 1914-1918. A la fin de la guerre de 14, le parc des dirigeables de la Marine française culmine en effet à 37 unités, dont 9 Chalais-Meudon. Dès 1916, la décision de créer un port d'attache dans la région de Cherbourg est prise. Ce sera le lieu-dit de la Bergerie de Vaux, située sur la commune d'Ecausseville et proche de la ville de Montebourg. Par rapport aux hydravions et avions côtiers, dont le rayon d'action est trop court et donc la durée de vol utile faible, l'intérêt des dirigeables escorteurs, est qu'ils pouvaient aller au large pour accueillir et accompagner les convois, un dirigeable pouvant "croiser" plusieurs heures dans des zones où il ne risquait pas, alors, d'être victime d'un avion de chasse. Du fait du formidable pont d'observation qu'ils constituaient, ces dirigeables, armés de bombes, pouvaient aisément attaquer un sous-marin, y compris en petite plongée.

Autonomie et permanence sur zone constituaient des avantages décisifs au plus léger que l'air. L'Aéronautique maritime a ainsi protégé le commerce allié et joué un rôle déterminant dans l'issue du conflit.

La deuxième partie traite de l'architecture du Hangar d'Ecausseville, mais aussi des hangars à dirigeables d'Orly, des hangars pour avions à la même époque, qu'ils soient en bois, métal ou béton armé. Le Hangar d'Augusta en Sicile, qui a fêté son centenaire en 2020 également cent ans, fait l'objet d'un intéressant chapitre. C'est le seul hangar à dirigeables construit dans le cadre du premier conflit mondial avec Ecausseville, subsistant en Europe. Cette partie architecture se termine par un panorama des entreprises françaises du béton armé, ainsi sur l'évocation de l'ingénieur Henry Lossier, constructeur du Hangar d'Ecausseville. De grosses entreprises de construction sont évoquées et notamment l'entreprise Limousin, qui au début des années 30 construisit à Chalais-Meudon la Grande soufflerie. De même il est fait mention d'un grand nombre de personnalités du génie civil de cette époque, dont Albert Caquot. De plus l'existence de deux lexiques des personnes et des lieux permet de retrouver facilement les renseignements cherchés.

Compte tenu des désordres qu'un tel ouvrage en béton armé a pu subir au cours du temps, la troisième partie est consacrée à la problématique de restauration, en envisageant les différents éléments, la structure elle-même, les immenses portes et les tuiles Minard le recouvrant, mais ces analyses tiennent compte des avancées dans le domaine, tels les bétons fibrés à ultra-haute performances.

La quatrième partie envisage l'avenir du bâtiment à l'aune de l'avenir des dirigeables eux-mêmes. Philippe Tixier, président du Groupe de travail 3AF Aérostation et dirigeables, évoque le renouveau du dirigeable, un sujet qu'il connaît bien, étant également président de Dirisolar, un projet de dirigeable solaire pour le tourisme. Thibault Prioux décrit le projet de transport de charge Flying Whales et Alain Bernard celui du transport de

fret Voliris. En effet, ainsi qu'en témoigne le colloque Alumni-ONERA/3AF de juin 2021 (actes formant un n° spécial de Lettre 3AF [n°49]), le dirigeable connaît aujourd'hui un renouveau, surtout en France. Ecausseville peut-il en profiter ou d'autres pistes sont-elles à rechercher pour lui trouver un futur ?

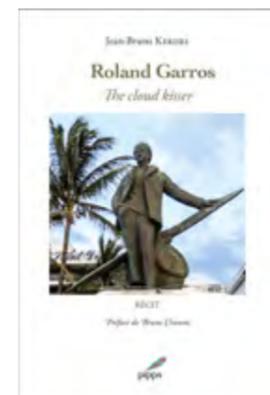
Ce bâtiment exceptionnel méritait ce livre exceptionnel, qui demeurera un ouvrage de référence, car il est le fruit d'un travail

interdisciplinaire de grande qualité. Il intéressera les étudiants aussi bien que les passionnés de l'histoire et de l'actualité du dirigeable, ainsi que les curieux de l'architecture en béton du début du xxe siècle, sans oublier les amateurs du patrimoine insolite et les habitants du territoire sur lequel se dresse ce bâtiment hors norme. ■

RECENSIONS

Roland Garros, *The cloud kisser* par Jean-Bruno Kerisel aux éditions Pippa

PAR JEAN-BRUNO KERISEL, PREFACÉ PAR BRUNO CHANETZ AUX EDITIONS PIPPA



De même qu'Antoine Drouot, le Sage de la Grande Armée, est redevable de sa notoriété au célèbre hôtel des ventes parisien, la popularité de Roland Garros, vainqueur de la traversée de la méditerranée sans escale et héros de guerre, est due au tournoi de tennis international et au stade qui lui est dédié. Aussi cet ouvrage, consacré à l'homme et à l'aviateur est le bienvenu.

En juin 2001, représentant l'ONERA à la cérémonie organisée pour les 120 ans de la naissance d'Albert Caquot à Vouziers, je fis la connaissance de Jean-Bruno Kerisel et découvris que Roland Garros, mort pour la France dans un combat aérien au-dessus de Vouziers, le 5 octobre 1918, était inhumé dans le cimetière communal. Cette connivence de destins exceptionnels est le point départ de cette quête.

Comme dans tous les livres de Jean-Bruno Kerisel se profile la statue du commandeur, l'ingénieur de génie Albert Caquot, grand-père bien-aimé de l'auteur, qui a marqué son enfance et a tracé sa voie en orientant ses études vers l'aéronautique et la prestigieuse école des ingénieurs civils de l'aéronautique Sup-Aéro. Après une carrière vouée à l'expertise industrielle et la conciliation, Jean-Bruno Kerisel renoue avec sa jeunesse aéronautique en donnant cette exo-biographie de Roland Garros.

1. Albert Caquot fut en 1946 le premier président de son Haut conseil scientifique de l'ONERA

Car cet ouvrage n'est pas une peinture pour galerie d'ancêtres, telles qu'elles existaient avant la photographie, où l'on représentait le sujet en uniforme, hiératique, arborant galons et décorations. Il s'agit d'une évocation par petite touche, à la manière pointilliste. C'est le lecteur, qui en prenant du recul, fait apparaître un portrait moins officiel, plus proche et plus sentimental, en un mot plus humain. Ce livre est aussi l'histoire d'une amitié, celle qui le lia à Edmond Audemars, dont la vie parallèle est contée au début de l'ouvrage. Puis c'est la rencontre et l'indéfectible complicité qui s'ensuivit. On mesure cette amitié à l'aune des moyens considérables apportés de France par Audemars pour qu'enfin réussisse la sixième évasion de Roland Garros des camps de prisonniers allemands. Détail piquant et ironie de l'histoire, Roland Garros reçut en captivité une raquette de tennis dissimulant dans son manche une carte de l'Allemagne. Cette longue détention, si mal vécue, lui aura permis de croiser Charles de Gaulle, prisonnier moins heureux, dont toutes les tentatives d'évasion échouèrent. On découvre aussi avec bonheur la profonde amitié que portait Jean Cocteau à Roland Garros.

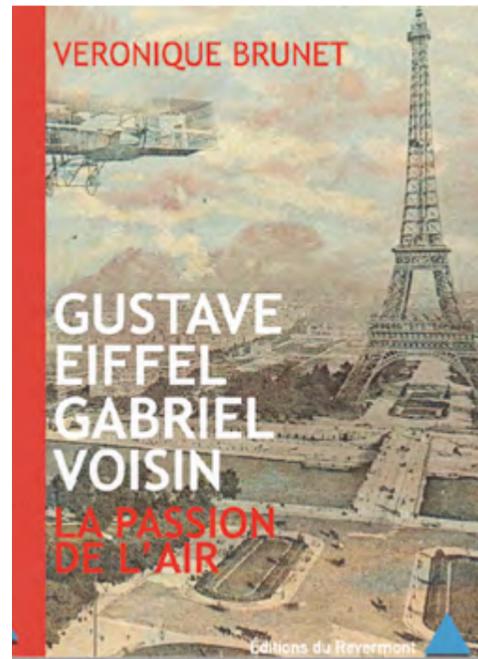
Puis c'est le dernier vol. L'armistice est proche. En route vers son destin, il a 30 ans. L'enquête se resserre autour des circonstances de sa mort, la peinture se précise et le mot est lâché : suicide ? Les raisons ne manquaient pas pour un homme tuberculeux, quelque peu délaissé par sa compagne, et qui craint de ne plus pouvoir voler. Mais depuis Napoléon, les héros ne sont-ils pas « des météores destinés à brûler pour éclairer leur siècle » ? ■

RECENSIONS

Gustave Eiffel, Gabriel Voisin, La Passion de l'air

par Véronique Brunet aux éditions
du Revermont, 2023

PAR BRUNO CHANETZ



à Bruno,
En souvenir des préparatifs pour
l'exposition Eiffel aérodynamiciens au Clos
de Vauxpout, à la boulangerie Eiffel
VÉRONIQUE BRUNET
Avec toute mon amitié
Véronique B

Véronique Brunet est bourguignonne et membre de l'Académie des Sciences et des belles lettres de Mâcon. Elle s'inscrit, au fil des ans, comme historienne d'Eiffel, car ce n'est pas son premier ouvrage sur ce grand ingénieur et sa famille. Elle a déjà publié :

- en 2019 un livre sur la mère de Gustave : « Mélanie Eiffel, mère

et femme d'entreprise moderne en Bourgogne » :

- en 2020 un livre intitulé « Gustave Eiffel, une enfance en Bourgogne » ;
- et en 2021, comme pour compléter l'ouvrage précédent, un livre sur « Gustave Eiffel, voyage de jeunesse, de la Bourgogne à la Suisse ».

Cette année, en plus d'organiser au château de Clos-Vougeot, une exposition sur l'enfance bourguignonne d'Eiffel, elle nous offre, cet ouvrage consacré aux parcours de deux grands hommes attachés à la Bourgogne : Gustave Eiffel, lequel y né en 1832 et Gabriel Voisin, qui y meurt en 1973.

La belle image de couverture, issue d'une carte postale du début du siècle dernier, montrant un aéroplane évoluant autour de la tour Eiffel, illustre avec bonheur cet ouvrage consacré à ces deux pionniers de l'air, précurseurs de l'aéronautique française, qui ont entamé un dialogue fécond de 1907 à 1919, convaincus du bond formidable que l'aviation offrirait à l'humanité. Si la carrière de constructeur métallique a en partie occulté la contribution de Gustave Eiffel à l'aérodynamique et à l'aviation, Gabriel Voisin, a pour sa part, connu la célébrité pour avoir créé en 1908, la première fabrique d'aéroplanes et construit un engin capable de voler sur un kilomètre en circuit fermé.

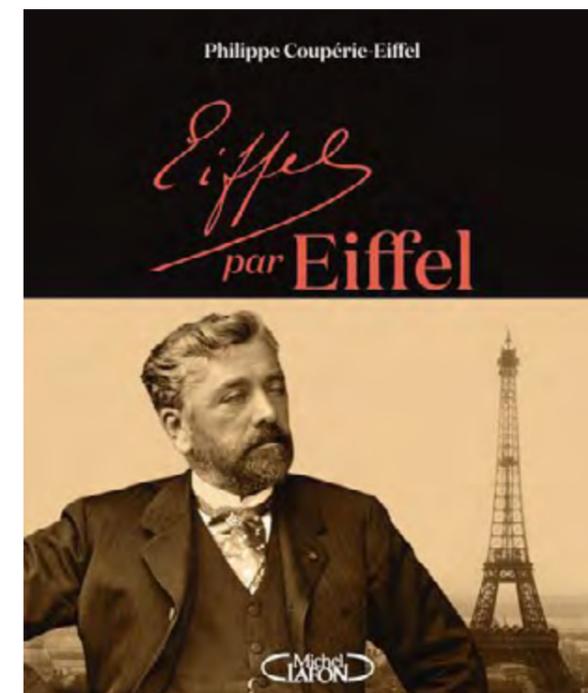
Bien sûr ce livre évoque également Charles Voisin, le frère et « le complice de chaque projet jusqu'au succès des premiers avions Voisin fabriqués à Boulogne puis Issy-Les-Moulineaux ». Car il nous faut bien reconnaître que si le tombeau de Gabriel Voisin est en Bourgogne, c'est bien le territoire de l'actuel département des Hauts-de-Seine, qui est le berceau de l'aviation Française. D'ailleurs Gabriel Voisin rencontra Charles Renard à Chalais-Meudon. Il fit également la connaissance de celui qui fut son adjoint en 1904 : Ferdinand Ferber.

Ce livre permet de vivre, autour d'Eiffel et de Voisin, l'épopée des pionniers de l'aviation : Ernest Archdeacon, Louis Blériot ... et bien d'autres que je vous laisse découvrir au fil des pages. ■

RECENSIONS

Eiffel par Eiffel, de Philippe Coupérie-Eiffel aux éditions Michel Lafon, 2023

PAR BRUNO CHANETZ



à ma chère et à Bruno,
La Gauthier se en fait !
Vive y participez avec votre grand ami,
et allé le votre épan -
avec l'annonce de ma tra
C'est un Amis ! A Paris dimanche 23
Philippe

En 1989, la France commémorait les 200 ans de la révolution Française, et donc les 100 ans de la tour Eiffel. Jacques Chirac, maire de Paris, avait convié le président des Etats-Unis Ronald Reagan à un spectacle au pied de la Tour Eiffel. Dans son avant-propos, Philippe Coupérie-Eiffel conte avec humour, le concours de circonstances favorable qui va lui permettre de pénétrer, quasiment par effraction, jusqu'à la tribune des invités d'honneur sur le pont de l'Alma. Cette cérémonie du (bi-)centenaire lui révéla l'immense héritage moral qui était le sien et dès lors s'imposa à lui comme une évidence, cette double mission, jadis reçue dans son

enfance de son arrière-grand-mère Valentine, la dernière fille de Gustave Eiffel, celle d'apprendre et de comprendre l'œuvre de son trisaïeul, « puis de transmettre ».

Avec ce livre, on peut dire que la mission est accomplie, car c'est un très bel ouvrage dans une collection, où l'on trouve également le général de Gaulle. Une édition de qualité, fort bien illustrée avec un texte passionnant, dont les sources sont en grande partie puisées dans les archives familiales.

Ainsi le chapitre 1, consacré à « l'enfance de l'ingénieur », apporte un éclairage sur le ressenti de Gustave Eiffel vis-à-vis du cursus scolaire qu'il a suivi en ces jeunes années. Le verdict est sans concession pour les petites classes : « On n'y apprenait, en réalité, rien du tout, on y attrapait en revanche force punitions ». Et les premières années passées au lycée ne valaient guère mieux. « Il fallait aller assez loin (au moins en troisième et en rhétorique) pour que l'écolier pût trouver quelque attrait dans ces classes monotones, où l'on s'ennuyait plus qu'on ne peut le dire et où on avait le sentiment de perdre son temps. Pour moi, toutes ces années de collège, avec leurs pensums, leurs retenues, leur abus des leçons apprises par cœur ... ont laissé dans ma mémoire la plus triste impression ».

Le chapitre 2 est consacré à l'Entreprise Eiffel. On y décrit les réalisations les plus marquantes d'Eiffel : le pont Maria Pia sur le Douro au Portugal, ceux en Indochine, suite à la création d'une agence à Saïgon dès 1872, le Bon Marché à Paris, le viaduc de Garabit, la structure de la statue de la Liberté, la coupole de l'observatoire de Nice et celle de l'hôtel Hermitage de Monte-Carlo.

L'édification de la tour de 300 mètres constitue un chapitre, presque à part entière (le n°3). La polémique avec les artistes est bien documentée avec la réponse de Gustave Eiffel au manifeste de protestation des artistes, publié dans Le Temps le 14 février 1887. Le chapitre s'achève par trois projets :

- le métropolitain parisien qui verra sa concrétisation, sans Eiffel, quelques années après ;
- le tunnel sous la Manche, qui attendra encore un siècle avant de se réaliser.
- L'observatoire du Mont-Blanc, dont la construction débute en 1891, mais qui doit être arrêtée au bout six jours en raison des conditions climatiques difficiles et du danger qu'il en résulte pour les ouvriers.

Le chapitre 4 est consacré à l'après Panama. C'est en effet à cause de ce scandale qui l'éclabousse, que Gustave Eiffel se résigne à cesser ses activités industrielles et à se consacrer à la science, en apportant personnellement des contributions décisives à la météorologie et l'aérodynamique. De plus il joue un rôle de mécène dans divers domaines, notamment auprès de l'armée Française. Il apporte son concours au capitaine Ferrié, installant à ses frais la télégraphie sans fil (TSF) à la Tour. Les succès sont rapidement au rendez-vous :

- en 1906, les garnisons de l'Est sont joignables ;
- en 1908, les navires de guerre situés à 3 000 kms sont atteints ;
- en 1912, la Tour est choisie comme centre d'émission des signaux horaires du monde entier.



Philippe Coupérie-Eiffel, à côté de la statue de cire de son trisaïeul au troisième étage de la Tour

Né en 1951, Philippe Coupérie-Eiffel, ici dans l'appartement du troisième étage de la Tour, est le descendant direct de Gustave Eiffel. Jusqu'à l'âge de seize ans, il a passé toutes ses vacances avec son arrière-grand-mère Valentine, la fille cadette de l'ingénieur, dans les diverses propriétés familiales. Bibliothèques, antennes radio, laboratoires météo et objets étranges ont ainsi été le décor de son enfance, tandis que Valentine lui racontait les souvenirs du grand homme. « Apprends et comprends ce que papa a fait, et plus tard tu devras

Le chapitre 5, intitulé « Le patriarche » nous replonge – comme le chapitre 1 - dans les albums familiaux et nous donne une image intime d'Eiffel.

C'est donc tout à la fois, l'homme, l'entrepreneur, le savant et le mécène qui sont décrits dans ce livre, en faisant un ouvrage de référence très utile en cette année où l'on commémore le centenaire de sa mort.

transmettre », lui disait-elle. Il est aujourd'hui le plus ardent défenseur de la mémoire de son ancêtre.

Philippe Coupérie-Eiffel a fondé en 2008 une association « Les Amis d'Eiffel » qui regroupent des milliers de membres et qui a déjà deux centenaires à son actif, celui de la soufflerie en 2012 et celui de cette année 2023. De nombreux élèves d'écoles d'ingénieurs sont adhérents, reconnaissant en Gustave Eiffel un modèle. ■

LES AMIS D'ALUMNI-ONERA

Témoignages

C'est avec plaisir que je viens témoigner du très grand intérêt des événements montés par l'équipe Alumni-ONERA. Dois-je l'avouer, je ne connais pas depuis très longtemps cette association et je suis heureux d'être maintenant en contact direct avec eux compte tenu de l'intérêt des manifestations qui sont réalisées et de la densité des informations que l'on trouve dans ses publications.

C'est ainsi que j'ai eu la chance de participer en 2021 au colloque du futur de l'Aérostation à Meudon, site qui a très largement participé au développement des ballons et des dirigeables.

Je pourrais également parler du colloque newspace en juin 2023, auquel j'ai pris part en tant que membre du comité d'organisation. Deux journées passionnantes où nous avons largement évoqué le futur de la conquête spatiale et de tout ce que cela apportera à l'humanité.

Je voudrais citer une autre manifestation qui a eu lieu en soirée au Sénat, au cours de laquelle nous avons assisté à une présentation sur la motorisation électrique des aéronefs par l'ingénieur qui travaille avec Bertrand Piccard.

Soirée passionnante qui a pu être faite au Sénat grâce au Sénateur Stéphane Demilly, que j'ai pu revoir ensuite pour lui parler de l'information et de la formation des jeunes pour les métiers de l'Espace.

Merci Bruno pour ta disponibilité et tes talents d'organisateur. Grâce à toi, j'ai appris beaucoup de choses, on en apprend à tout âge.

GDA (2s) Marc Alban, ancien directeur du Musée de l'Air et de l'Espace, président du Fonds de dotation « Destination Etoiles »

Si l'on vous dit « Denis Papin » vous répondez, très fier, « la machine à vapeur ». Oui, très bien, mais encore...? On mesure vite la limite de ses propres connaissances sur la richesse scientifique et technique de la France et de ses grands hommes.

Ainsi, c'est un des mérites incontestables des colloques organisés par l'association Alumni ONERA de nous rafraîchir la mémoire, mieux, de nous apprendre combien plus remarquables encore que nous l'imaginions étaient certains de ses savants. J'avoue qu'après avoir apprécié la variété et la pertinence des différentes présentations du colloque de Saumur, j'ai une bien meilleure connaissance de Denis Papin et je me sens un petit peu plus cultivé. Et puis le programme n'était pas qu'historique puisqu'il nous a aussi gratifiés d'une ouverture sur des développements récents et à venir. On ne peut donc qu'applaudir cette manière de valoriser notre patrimoine scientifique, d'autant plus que contrairement à la majorité des colloques, l'accès de ceux-ci est gratuit.

L'Académie des sciences ne s'y est d'ailleurs pas trompée puisque

c'est un académicien, Pierre Léna, qui assurait la conclusion de ce colloque et qu'elle en publie les communications dans ses Comptes rendus. De son côté, l'UNESCO en a parfaitement perçu l'intérêt en acceptant que sa commission nationale française le parraine : elle y a sûrement trouvé son compte puisque la manifestation était aussi culturelle et artistique avec en fin de journée la visite d'une cave et dégustation de vins puis dîner en musique, un récital de piano, au château de Beaulieu.

Merci Alumni ONERA, merci Bruno Chanetz de nous faire vivre aussi intensément la culture scientifique française. J'attends avec impatience le prochain colloque : EIFFEL 2023.

IGA(2s) Pierre Bescond, ancien directeur du centre spatial Guyanais et ancien inspecteur général du Cnes, membre du CA 3AF

Les articles de haut niveau de La Lettre 3AF et de la revue Trajectoires de l'Association Alumni-ONERA sont une source de connaissances très appréciée par la communauté scientifique et technique dans les domaines de l'aéronautique et du spatial. Tout en découvrant des sujets passionnants et innovants, mes étudiants ont pu travailler de nombreux aspects et les développer par leur mise en contact avec les experts, grâce à la bienveillance de Bruno Chanetz. En sa qualité de Rédacteur en Chef de ces revues, Bruno a su et continue de valoriser le savoir-faire français dans les domaines de l'aérospatiale. Via l'Association Alumni-ONERA dont il est Président et avec sa remarquable culture, Bruno a aussi organisé des conférences, colloques et autres tables rondes auxquelles ont participé des personnalités de haut niveau. Ces manifestations, dont le Colloque Eiffel 2023 organisé à Paris en décembre 2023, traitent de sujets très variés associant histoire et science. Elles soulignent l'excellence des travaux qui ont eu lieu en France les siècles derniers et se poursuivent dans divers domaines. Je citerais l'Aérodynamique à laquelle Bruno a apporté sa compétence et son expertise tout au long de sa carrière à l'Onera, et continue de le faire au sein de la Commission Aérodynamique de la 3AF, dont il a présidé le Haut Conseil Scientifique. En résumé : Merci pour tout mon cher Bruno.

Abderrahmane Bairi, professeur des Universités CE, Université Paris-Nanterre

Alumni-ONERA, sous l'impulsion de Bruno Chanetz, est tout le contraire d'un cercle fermé de docteurs. Entre sa revue, ses deux colloques annuels, ses tables rondes, ses débats, c'est une organisation qui agrège autour d'elle, nombre de personnes de tous horizons. Cette (ces ?) Trajectoire(s) pourrai(en)t aussi bien s'intituler Rencontre(s) - si l'on tient à la parenthèse finale ! Les sujets abordés sont si variés

qu'on pourrait croire à d'énormes promotions de thésards à l'ONERA, mais non, c'est l'énergie de Bruno et de ses amis qui est à l'œuvre. Heureusement qu'on peut en être sans en avoir été : pour ma part, je me suis contenté (il y a très longtemps) d'un stage dans cette noble maison en deuxième année d'école d'ingénieurs, je ne suis pas sûr que ça compte...

J'ai particulièrement apprécié l'occasion qui m'a été donnée de m'exprimer sur la décarbonation du transport aérien au restaurant des Sénateurs, où la qualité de l'audience n'a d'égale que celle du menu, le tout grâce à monsieur le Sénateur Stéphane Demilly, inséparable compagnon de route des Alumni.

Bruno prend sa retraite, mais nul doute qu'il restera très présent, de l'histoire des techniques, qui le passionne particulièrement, à l'avenir de la conquête spatiale !

Eric Dautriat,
vice-président de l'Académie de l'air et de l'espace

Mesdames, Messieurs,

Je suis honoré de faire partie des Amis de l'ONERA et d'avoir participé à de nombreux événements portés par le Président Bruno Chanetz.

De nombreux exemples me viennent en tête comme le colloque de Méaulte sur Henry Potez, celui de Meudon sur les nouvelles mobilités ou encore tout récemment celui de l'école des Beaux-arts dédié à la mémoire de Gustave Eiffel.

Ces événements nous permettent de faire vivre une passion commune pour l'aéronautique au travers de son histoire, de ses prouesses industrielles et techniques et de son engagement contemporain en faveur d'une mobilité plus résiliente.

J'ai également été ravi de parrainer plusieurs dîners-conférences au palais du Luxembourg, où je siège en tant que Sénateur de la Somme et commissaire au développement durable.

Mes travaux parlementaires sont bien sûr marqués par mon engagement en faveur du monde de l'aéronautique, tout particulièrement cette année en tant que Rapporteur sur les Transports aériens pour le Projet de loi de finances 2024.

L'ONERA m'a permis d'échanger avec des acteurs engagés autour des sujets cruciaux de la décarbonation, des carburants durables et des innovations technologiques.

Je remercie ses membres pour leur engagement constant, engagement empreint de dynamisme et de professionnalisme.

Mes derniers mots seront pour le Président, Bruno Chanetz.

Cher Bruno, nous avons appris à nous connaître, à nous faire confiance, à travailler ensemble. J'espère que cette amitié et cette complicité perdureront au-delà de votre mandat.

Stéphane Demilly,
sénateur de la Somme, consultant en management

Ayant participé à deux événements, en 2022, je peux effectivement témoigner de l'intérêt historique (Potez) et contemporain (management) de la rencontre avec le sénateur Demilly, mais aussi prospectif avec la table-ronde prospective sur le métavers. Cela a été aussi l'occasion lors de la première de nouer ou renouer des relations avec des auditeurs et, lors de la seconde avec le CESA du GBA Sabéné.

Les rencontres Alumni-ONERA sont d'une richesse, d'une variété et d'une qualité exceptionnelles, tout comme Trajectoire, dont la lecture nous emmène loin des affres du quotidien, avec toujours le souci de nous enrichir de l'histoire des sciences et en osant les sujets les plus prospectifs voire spéculatifs comme le métavers...

Bravo à l'équipe d'Alumni-ONERA et de Trajectoire(s)!

Philippe Lemerrier,
chargé de mission au conseil général de l'Armement

Je suis heureux de saluer ici l'engagement de Bruno Chanetz et de la revue Trajectoires, remerciant ainsi les invitations qui me furent souvent faite d'un accompagnement. En effet, capitalisant sur la diversité des programmes scientifiques et techniques d'excellence auxquels se consacre l'ONERA et ses Alumni, cet engagement a conduit en particulier à relier, de mille manières différentes et originales, une histoire qui s'est déroulée en France au cours des siècles écoulés, avec l'actualité des réalisations contemporaines, et des questions qu'elles posent. Cette histoire, notamment dans nos provinces, est souvent ignorée, alors qu'elle révèle un riche tissu de curiosité et d'invention que prolonge le présent et dont les jeunes, en particulier, doivent avoir connaissance, car c'est sur un tel terreau que s'est construite dans notre pays l'aventure moderne de la science et de la technique. Merci donc à Trajectoires pour accueillir ces récits et les faire partager au plus grand nombre.

Pierre Léna, membre de l'Académie des Sciences

En 2019 j'ai proposé à Bruno Chanetz, président d'Alumni-ONERA et président du Haut-conseil scientifique de la 3AF, de rejoindre la société d'encouragement. Il a accepté avec enthousiasme et plusieurs événements, initiés par Alumni-ONERA ont associé la Société d'encouragement. Pour n'en citer que trois d'entre eux :

- en septembre 2020, le colloque sur Henry Potez à Méaulte dans la Somme ;
- en juin 2021, le colloque de Meudon en hommage à Albert Caquot, qui me toucha puisque ce fut un de mes prédécesseurs à la présidence de notre société ;
- en décembre 2023, le colloque en mémoire de Gustave Eiffel, pour le centenaire de sa mort.

Ces événements sont d'un grand intérêt car ils se projettent dans l'avenir, tout en s'appuyant sur le passé. C'est bien évidemment la même approche que nous avons à la société d'encouragement. Nous étions

faits pour nous entendre. De plus la revue TRAJECTOIRE(S) reflète bien la profondeur de ces manifestations, qui font honneur à la France et à ses grands ingénieurs.

Olivier Mousson, président de la société d'encouragement pour l'industrie nationale

Parmi tant de qualités, la revue des Alumni Onera présente pour moi qui vient de la filière Espace/CNES et d'une vieille famille française bien des qualités qui sont aussi ses atouts.

La revue porte bien son nom puisqu'elle nous conduit régulièrement sur des sujets pointus centrés autour du thème « aéro » à des itinérances souvent inattendues : d'un numéro à l'autre, au sein de chaque numéro nous passons d'un article sur les exploits du passé proche ou lointain, à l'étude de questions tout à fait présentes et à des perspectives pour l'avenir. Ainsi se tracent des trajectoires.

J'ai gardé en tête le n°1 de juillet 2022. Nous sommes sur les traces d'Antoine d'Abbadie, puis passons à l'avènement de la météo à partir du XVII^e siècle pour revenir au présent à l'optique adaptative des télescopes géants, au business models « as a service » et enfin au financement de l'innovation. Pour ne rien gâcher, un papier auquel je suis personnellement sensible ayant participé en 1985 à la création d'une mission de la Recherche au ministère de la Culture en vue de protéger les monuments et les œuvres d'art : un bel article de l'UVSQ sur la recherche en mécanique dans la préservation des monuments historiques.

Au sommaire du n°3 cette année, plusieurs articles et analyses passionnants sur les ambitions technologiques et industrielles pour l'aviation décarbonée.

Bertrand de Montluc, membre émérite de la 3AF, membre de l'AAE

La Commission nationale française pour l'UNESCO (CNFU) est heureuse d'avoir parrainé ces dernières années une série de colloques sur de grands scientifiques français tels Denis Papin, Ismaël Boulliau ou encore Antoine d'Abbadie, organisée par l'association Alumni-ONERA.

Ces rencontres de très haut niveau ont non seulement contribué à mieux faire connaître l'apport incommensurable de ces grandes figures au progrès scientifique contemporain et, partant, à illustrer le génie scientifique français, mais aussi à démontrer la portée universelle de leurs découvertes majeures, bien au-delà de nos frontières. Elles ont aussi mis en valeur l'importance de la recherche, de l'innovation et des inventions dans le domaine des sciences comprises au sens large de l'UNESCO, allant des sciences exactes et naturelles aux sciences sociales et humaines, au profit de toute l'humanité.

Ces conférences rejoignent enfin l'esprit du programme de l'UNESCO pour la célébration d'anniversaires d'éminentes personnalités du monde entier, lors de chaque biennium, à la suite d'une résolution de la Conférence générale réunissant les 194 Etats

membres de l'Organisation.

C'est ainsi que l'UNESCO, sur proposition de la France, s'est associée aux commémorations du 100^e anniversaire de la mort de Gustave Eiffel (1832-1923) cette année. La CNFU est heureuse dans ce contexte d'avoir accordé son patronage au colloque d'Alumni-ONERA, des 7 et 8 décembre 2023, consacré à Gustave Eiffel et à l'universalité de son œuvre multidisciplinaire.

Alexandre Navarro, secrétaire général, Commission nationale française pour l'UNESCO

Nous bénéficions en France de filières aéronautiques qui sont remarquables et je tiens à saluer le travail de valorisation de tous ces savoir-faire à la pointe de la technologie, travail qui est mené par l'association Alumni-ONERA, que ce soit par le biais d'événements comme ce colloque Newspace ou au travers de la publication de Trajectoire(s), qui est une revue de référence pour tous ceux qui s'intéressent sérieusement à l'aviation et à l'espace.

GDA Julien Sabéné, chef d'état-major du commandement territorial de l'Armée de l'air et de l'espace

Cher Bruno, la dynamique et la visibilité de « Trajectoires » vous doivent beaucoup et se nourrissent de ces belles initiatives que sont, en particulier, les colloques historico-scientifiques que vous avez initiés.

C'est un véritable pari que de réussir dans nos régions des colloques de qualité, tant par les thèmes abordés que par les compétences des participants et consacrés à de grandes figures scientifiques françaises, parfois méconnues mais au parcours toujours passionnant. La structuration, qui mêle l'histoire à la prospective est également efficace, alors que le libre accès aux sessions participe à une belle démarche d'ouverture à tous les publics.

Pour avoir eu le plaisir de participer directement à l'organisation du colloque sur Antoine d'Abbadie, à Hendaye, puis d'intervenir lors du colloque sur Denis Papin à Saumur, je puis témoigner du travail intense et remarquable que demande à votre équipe bénévoles ces rendez-vous, dont l'excellence est soulignée par tous.

C'est une voie originale sur laquelle, manifestement, il faut continuer !

Bernard Vivier, ancien secrétaire général et membre émérite de la 3AF, président de Pau Wright Aviation, colonel (RC) Armée de l'Air et de l'Espace

HOMMAGE

Gérard Leclerc, journaliste CNEWS

Le 18 août 2023 est mort tragiquement Gérard Leclerc aux commandes d'un avion de tourisme, un mono-moteur ROBIN de l'aéroclub de Loudun (Vienne). Il avait décollé de l'aérodrome de Véniers et n'a malheureusement jamais rejoint La Baule, où il allait assister à un concert de son frère Julien Clerc, dont il était très proche. Bruno Chanetz et Marie-Claire Coët se sont associés à la peine de sa famille, lors des obsèques, qui se déroulèrent le 24 août au cimetière des Trois-Moutiers, commune où il avait une résidence secondaire.

Il était devenu en 2022 un fidèle de notre association, comme l'a montré le n°3 de Trajectoire(s), où il apparaît deux fois en photo, lors des colloques Boulliau de Loudun et Les Nouvelles mobilités de Meudon. On reproduit deux courriels de sa part, exprimant sa satisfaction d'y avoir participé :

Bonjour Bruno,

Merci très sincèrement pour ces actes du passionnant colloque consacré à Ismael Boulliau. C'était une magnifique manifestation - bravo encore pour l'organisation des travaux et de la soirée - et nous avons appris beaucoup de choses sur cet éminent personnage. Je vais relire avec beaucoup d'intérêt ces actes. Avec encore tous mes remerciements, Bien à vous

Gérard Leclerc, le 17 avril 2022

Bonjour Bruno,

A votre passionnant colloque au Hangar Y, J'ai écouté et discuté avec l'un des initiateurs du projet de dirigeable géant Flying Whales qui doit lancer une usine à Bordeaux

Je voudrais en faire un article pour le prochain numéro de la revue We Demain, mais j'ai bêtement perdu ses coordonnées.

Les auriez-vous par hasard ?
Avec tous mes remerciements

Bien à vous
Gérard Leclerc, 28 novembre 2022

Alumni-ONERA et son président perdent un ami.



Gérard Leclerc et Bruno Chanetz lors du colloque Loudun le 3 juin 2022

VÉHICULE AUTOMATISÉ

— COMMUNAUTÉ D'INTÉRÊT —

MOVIN'ON

MOBILITÉ POUR TOUS, AUTONOMIE POUR TOUS

via le véhicule automatisé partagé dans les territoires ruraux et périurbains



2023

Préparer un modèle global de déploiement et d'exploitation



2024

Tester empiriquement



2025

Répliquer

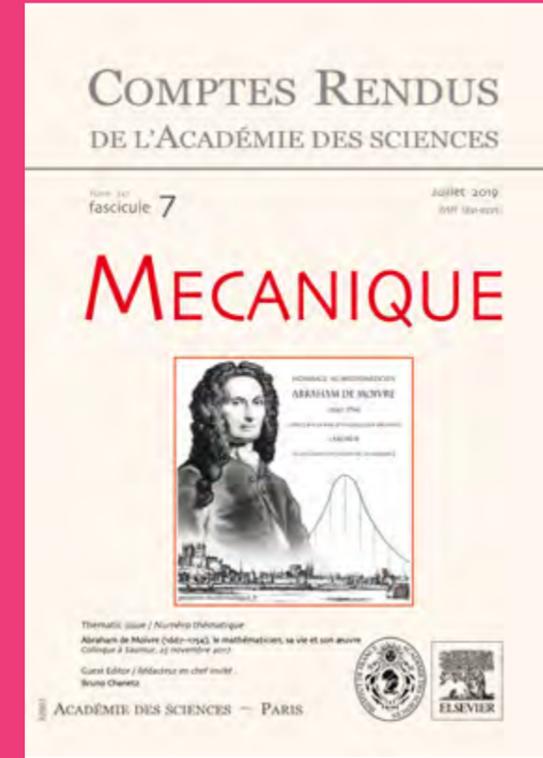
COMMUNAUTÉ D'INTÉRÊT MOVIN'ON
PILOTÉE PAR



REVUES TRAJECTOIRE(S)



PUBLICATIONS AVEC L'ACADEMIE DES SCIENCES



PUBLICATION AVEC LA 3AF



Trajectoire(s)

