



Association Aéronautique
et Astronautique de France

LETTRE 3AF

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



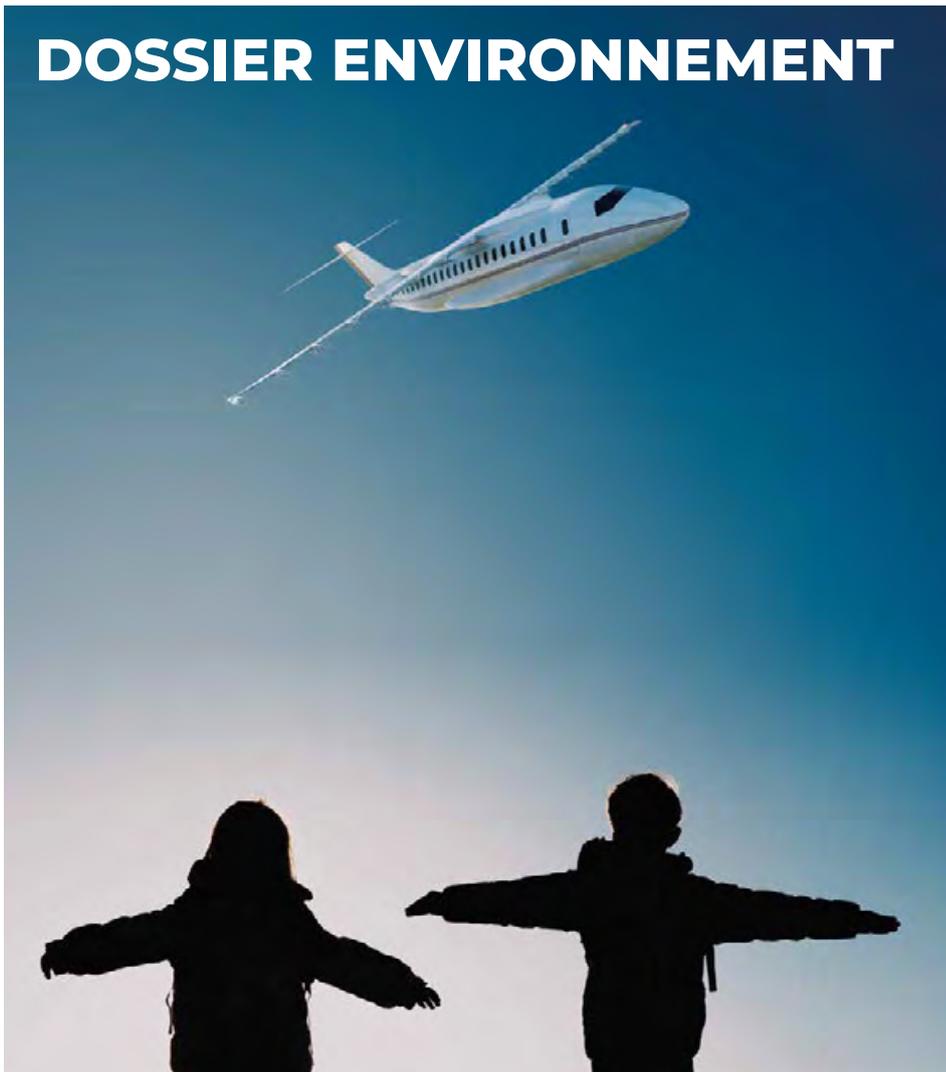
**DOSSIER ETHIQUE ET
NUMÉRIQUE : TABLE RONDE À
L'HÔTEL DE L'INDUSTRIE**



**VIE 3AF : FRANÇOIS LEPROUX
PRÉSIDENT DU GR GRAND EST**



**INTERVIEW D'OLIVIER LESBRE
PRÉSIDENT DU GROUPE ISAE**



DOSSIER ENVIRONNEMENT

Diverses Influences sur le climat terrestre



**INFLUENCE DES TRAÎNÉES
DE CONDENSATION**



MESURE DES GES PAR LIDAR

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

DIRECTEUR DE LA
PUBLICATION
Louis Le Portz

RÉDACTEUR EN CHEF
Bruno Chanetz

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

CONCEPTION GRAPHIQUE
ICI LA LUNE
www.icilaLune.com

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

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

3 ÉDITORIAL

4 MESSAGE DU PRÉSIDENT

POINT DE VUE

5 TABLE RONDE ÉTHIQUE ET NUMÉRIQUE : LES ENJEUX DANS LE SECTEUR AÉRONAUTIQUE SPATIAL ET DÉFENSE

par Bruno Chanetz et Marie-Claire Coët

7 PARCE QUE NOUS EXPLORONS COMME NOUS RESPIRONS...

par Jacques Arnould

8 ÊTRE ÉTHIQUE, C'EST AUSSI UNE QUESTION DE TECHNOLOGIE !

par Emmanuel Bloch

9 PROCHES ? ENJEUX D'ÉTHIQUE DU NUMÉRIQUE EN PROXIMITÉ DISTANCIÉE

par Claude Kirchner

11 IL N'Y A PAS DE « DÉCISION AUTONOME ÉTHIQUE » MAIS NÉCESSITÉ D'UNE ÉTHIQUE DE L'« AUTONOMIE »

par Catherine Tessier

12 PLACER L'HUMAIN DANS LES MEILLEURES CONDITIONS ...

par Pascal Traverse

14 LES COMPAGNIES AÉRIENNES DEVANT LA PANDÉMIE ; REDONNER CONFIANCE EN RÉPONDANT AUX BESOINS DES PASSAGERS

par Jean-Baptiste Rigaudias

17 INFLUENCES DIVERSES SUR LE CLIMAT TERRESTRE

par Roland Berton

ACTUALITÉS

36 L'ONERA SIGNATAIRE DE L'INITIATIVE ZERO EMISSION AVIATION (ZEMA)

par Marc Lesturgie

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

37 LES DIFFÉRENTES FACETTES DU CIRRUS HOMOGENITUS

par Étienne Terrenoire

45 OBSERVER LES GAZ À EFFET DE SERRE PAR LIDAR

par Nicolas Cézard, Myriam Raybaut,
Laurent Lombard et Jean-Baptiste
Dherbecourt

49 OPTIQUE ADAPTATIVE POUR L'ASTRONOMIE

par Thierry Fusco

54 INSTABILITÉS DE COMBUSTION DANS LES MOTEURS CRYOTECHNIQUES

par Pierre Cordesse

57 NIMESIS TECHNOLOGY : LES ALLIAGES À MÉMOIRE DE FORME AU SERVICE DU SPATIAL

par François Leproux et Charlotte Thiriot

FORMATION

61 INTERVIEW D'OLIVIER LESBRE DIRECTEUR GÉNÉRAL DE L'ISAE- SUPAERO ET PRÉSIDENT DU GROUPE ISAE

par Jean-Pierre Sanfourche

66 AIM : ARTERY IN MICROGRAVITY par Abin Alex, Laura Passoni, Luigi Avallone et Seungah Lee

70 RÉINVENTER LE TRANSPORT AÉRIEN : 3^E FORUM 3AF ÉTUDIANTS À L'ENAC LE 28 JANVIER 2021

par Francis Guimera

VIE 3AF

74 NAISSANCE DU GROUPE RÉGIONAL GRAND EST

par François Leproux, Damien Hartmann et
Arnaud Vacelet

HISTOIRE

79 LOUIS SUSANE, PIONNIER DE LA FUSÉE DU 19^E SIÈCLE À METZ

par Philippe Jung

NOTE DE LECTURE

89 VOUS NE VOUDRIEZ PAS MOURIR DEMAIN ?

par Bruno Chanetz

90 LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE DE ROBERT KANDEL DANS LA COLLECTION QUE SAIS-JE ?

par Bertrand de Montluc

93 CONTRE L'ÉCOLOGISME DE BRUNO DURIEUX AUX ÉDITIONS DE FALLOIS

par Pierre Bescond

ÉVÉNEMENTS 3AF

95 LES PROCHAINS ÉVÉNEMENTS



ÉDITORIAL

Bien que la crise du transport aérien ne soit pas terminée, il faut dès à présent se préoccuper de redonner confiance aux passagers. C'est le sujet difficile qu'aborde Jean-Baptiste Rigaudias, membre de la commission technique 3AF *Aviation commerciale* dans un article point de vue. Nous consacrons également un article point de vue au sujet *Éthique et numérique : les enjeux dans le secteur aéronautique et spatial*. Ce dossier est le fruit d'une table ronde qui s'est déroulée le 20 octobre 2020 à l'Hôtel de l'industrie et qui réunissait des experts du CNES, de l'ONERA, d'Airbus, de Thales, ainsi que Claudie Haigneré, ancienne ministre et spatonaute.

Un autre dossier, relatif à l'environnement, se décline dans les différentes rubriques de ce numéro. La Lettre 3AF n°44, parue en octobre 2020, traitait de l'avion à hydrogène. Le même mois paraissait le magazine *Aviation civile* de la DGAC, consacré au plan de soutien massif pour le secteur aéronautique, où s'exprimaient des responsables d'organismes et sociétés de l'aéronautique. Pour aller vers l'avion vert, Stéphane Cueille (Safran) entendait miser sur la substitution du kérosène par de nouveaux carburants. Jean-Brice Dumont (CORAC) renchérissait nous souhaitons apporter des réponses très rapides sur l'incorporation des biocarburants. Claire Rais Assa, (Direction du transport aérien) précisait : *On entend par biocarburants durables des carburants issus de ressources qui n'entrent pas en concurrence avec l'alimentation et qui n'affecte pas l'environnement*. Et Philippe Beaumier (ONERA) complétait : *Nous allons élargir le périmètre de nos études environnementales pour évaluer finement l'impact de l'aviation décarbonée sur le climat*. Le présent dossier s'intéresse à l'état des connaissances dans les domaines de la théorie, du calcul et de la mesure. L'article de synthèse de Roland Berton (ONERA) traite des influences diverses sur le climat terrestre. Celui d'Eric Terrenoire (ONERA) se focalise sur l'influence des traînées de condensation des avions et de leurs répercussions sur la modification du bilan radiatif terrestre. Dans la perspective d'un avion décarboné, ce phénomène mérite d'être bien caractérisé, son impact pouvant être supérieur à celui du dioxyde de carbone. Enfin, compte tenu des enjeux attachés aux gaz à effet de serre (GES), il importe de développer des techniques de mesure des concentrations des GES dans l'atmosphère telles que celles impliquant des lidars que présente Nicolas Cézard (ONERA). Fort de ses compétences multidisciplinaires, l'ONERA fait partie

des treize institutions de recherche à travers le monde qui ont uni leurs forces pour constituer l'initiative ZEMA pour *Zero Emission Aviation* afin de lancer des recherches pour une aviation durable et respectueuse de l'environnement avec l'objectif de rendre l'aviation *sans pratiquement aucun impact environnemental négatif*.

Notre rubrique Sciences et techniques aérospatiales compte deux articles émanant de lauréats des prix 3AF *réussite et meilleure thèse 2020*. Thierry Fusco traite d'optique adaptative et Pierre Cordesse de combustion dans les moteurs fusées. Un autre article aborde les matériaux à mémoire. Il est dû à François Leproux, ingénieur chez Nemesis Technology à Metz. François Leproux vient de fonder avec Damien Hartmann, président d'Open Space Makers, le groupe régional Grand Est présenté dans cette Lettre. Et pour renforcer la coloration messine de ce numéro, Philippe Jung évoque la vie de *Louis Susane, pionnier de la fusée du XIX^e siècle à Metz*.

La rubrique Éducation présente une interview d'Olivier Lesbre, président du groupe ISAE par Jean-Pierre Sanfourche, ainsi qu'un article sur la formation des étudiants et la valorisation de leurs travaux à l'ISAE concernant le projet *Aorta in Microgravity* dans le cadre d'*Orbit Your Thesis* de l'ESA.

Notre dossier Environnement se poursuit par des notes de lecture qui témoignent de la passion entourant ce sujet. En effet, notre société occidentale est tiraillée entre deux craintes contradictoires : celle du manque de ressources fossiles pour maintenir ses acquis et celle d'une utilisation abusive de ces mêmes ressources qui mettrait l'humanité en péril. Ces deux peurs sont aussi exagérées l'une que l'autre. Henri Madelin dénonçait en 1974 : *Il y a une mythologie qui se pare de couleurs scientifiques lorsqu'il est question du futur. Le thème de l'épuisement des réserves est un thème qui revient périodiquement dans l'histoire pétrolière. En 1923 déjà, le suédois Arrhenius, prix Nobel de chimie, annonçait avec inquiétude « l'épuisement des réserves dans vingt ans »¹*. À la même époque en 1931, Paul Valéry avait déclaré, ayant à l'esprit la démesure du productivisme : *le temps du monde fini commence*. Et dès 1912, Paul Claudel faisait dire à Anne Vercors, paysan libre du quinzième siècle : *Tel a été le mal du monde, que chacun a voulu jouir de ses biens, comme s'ils*

¹ Henri Madelin, *La mythologie de l'or noir*, Universalia, 1974

ÉDITORIAL (SUITE)

avaient été créés pour lui, et non point comme s'il les avait reçus de Dieu en commende ².

Dans ce contexte, l'essai de Jean Viala, lauréat du prix 3AF en 2016, est l'ouvrage pragmatique d'un ingénieur confiant dans les progrès de la science, pour résoudre la crise climatique au moyen des biotechnologies, la pénurie énergétique grâce à la fusion nucléaire et les problèmes de nourriture par l'accroissement de la surface et de la productivité des terres. Notons que les rendements céréaliers ont augmenté en moyenne dans un rapport 17 depuis l'époque médiévale. Quand Anne Vercors énonce : *Et depuis 10 ans il n'est pas une heure de mon travail qu'il (Dieu) n'ait quatre fois payée et une fois encore* ³, il exprime que ses terres champenoises lui rapportent cinq fois la semence, ce qui était exceptionnel pour l'époque, la moyenne étant de quatre. Elle avoisine maintenant 70 et dans la Vienne en 2019, on obtint même 80.

² Paul Claudel, *L'annonce faite à Marie*, Gallimard, 1912.

³ Marc Fontecave, *Halte au catastrophisme !*, Flammarion, 2020.

⁴ Bruno Chanetz, éditorial *Lettre n° 40*, décembre 2019.

Nous sommes les enfants gâtés et rebelles de la révolution industrielle, désirant à la fois le maintien du niveau de vie actuel et une exploitation vertueuse des sources d'énergie d'où l'attrait pour une croissance verte. Marc Fontecave, professeur au Collège de France, a déclaré récemment : *La décroissance, on en a fait l'expérience en 2020, fait effectivement chuter le CO₂ : en perdant 10% de notre PIB, nos émissions ont baissé de 7%. Cela signifie que pour atteindre la neutralité carbone, il faudrait que dans les trente ans à venir, nous ayons la même pandémie et le même résultat économique chaque année !* ³. Jean-Marc Jancovici, expert en énergie déjà cité dans nos colonnes ⁴, fondateur du *shift project*, met en garde contre le mythe d'une transition heureuse et lorsqu'on lui demande si un scénario 100% énergies renouvelables est possible, il répond : *Bien sûr que c'est possible. En l'an de grâce 1500, le monde était 100% énergies renouvelables.* ■

Bruno Chanetz
rédacteur en chef et président du HCS



LE MOT DU PRÉSIDENT

Contrecoup de la crise de la COVID 19 qui s'éternise, celle du transport aérien s'enlise. Pourtant il faut bien envisager l'avenir et redonner confiance aux usagers en répondant à leurs besoins. C'est le sens de l'article de la commission *Aviation civile* qui imagine comment les compagnies aériennes peuvent répondre à la pandémie. Dans cette Lettre également, des étudiants de l'ENAC réfléchissent au transport aérien de demain.

Ces crises ont également pour conséquence de révolutionner totalement la filière aéronautique en exigeant de ce secteur la conception d'avions « verts ». Nous aurons dans le prochain numéro le point de vue de Safran sur la question de la motorisation par la voix de Stéphane Cueille et celui de la *Délégation générale de l'aviation civile* (DGAC) grâce à l'interview de son directeur Damien Cazé. Mais déjà la DGAC a notifié des contrats de recherche pour aller vers la décarbonation du transport aérien. Déjà l'ONERA est impliquée dans l'initiative *Zero emission aviation* (ZEMA). Le rôle de l'ONERA, organisme multidisciplinaire, se révèle également dans cette Lettre au

niveau climatique, par son expertise et sa capacité de calcul et de mesure.

C'est une révolution également qui est engagée au niveau de la 3AF, celle de sa mutation *digitale*. Le nouveau site doit nous permettre de mieux échanger. Il faut que les adhérents se l'approprient et en fassent véritablement le creuset de notre association.

Autre changement – provisoire celui-ci – que la transformation de nos congrès du présentiel en distanciel. Ce sera le cas de *space propulsion* « d'Estoril » (Portugal) en mars prochain, d'*Aérodynamique* de « Poitiers » en avril et d'*Intelligence économique et stratégique* (IES) de « Paris » en mai.

En vous souhaitant un bon début d'année malgré les contrariétés de la période. ■

Louis Le Portz
président de la 3AF

POINT DE VUE

TABLE RONDE ÉTHIQUE ET NUMÉRIQUE : les enjeux dans le secteur aéronautique spatial et défense

par **Bruno Chanetz**, président d'Alumni-ONERA et du HCS 3AF et **Marie-Claire Coët**, membre de la Commission Information scientifique et prospective

Cette table ronde, initialement prévue en soirée le 9 juin 2020, a été reportée au mardi 20 octobre 2020 et avancée à 18 h 00 afin de tenir compte du couvre-feu qui débutait alors à 21 h, prélude au second confinement national devant être décrété fin octobre, puis au couvre-feu avancé. En définitive, la période était moins propice que si nous avions maintenu la date initiale, mais les temps sont incertains et depuis un an, il est très difficile de programmer un évènement !

L'Hôtel de l'industrie nous accueillait dans le salon des trois consuls, 4 Place Saint-Germain des Prés à Paris.

Claude Kirchner, directeur du comité national pilote d'éthique du numérique, devait animer ce débat, mais devant les difficultés de voyager inhérentes à la période, ce fut Catherine Tessier qui reprit ce rôle. Claude Kirchner a néanmoins commis un écrit sur la thématique de cette table ronde pour le présent dossier, constitué des articles proposés par les intervenants à l'issue de l'évènement.

Les cinq intervenants présents dans le salon des trois consuls étaient :

- **Jacques Arnould**, éthique des programmes et conduite des activités spatiales au CNES
- **Emmanuel Bloch**, directeur responsabilité d'entreprise chez Thalès
- **Claudie Haigneré**, spationaute et ancienne ministre
- **Catherine Tessier**, référente intégrité scientifique et éthique de la recherche de l'ONERA, membre du comité national pilote d'éthique du numérique
- **Pascal Traverse**, responsable avion autonome chez Airbus

<https://www.industriennale.fr/evnement/table-ronde-ethique-et-numerique-les-enjeux-dans-le-secteur-aeronautique-spatial-et>

Grâce à un partenariat noué avec Alumni-ONERA, l'enregistrement des débats, réalisé par les techniciens de l'hôtel de l'industrie, est disponible sur Coworking channel :

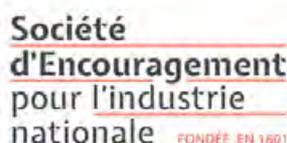
<https://coworkingchannel.news/tag/table-ronde-ethique-et-numerique/>



Catherine Tessier avec à sa droite, Emmanuel Bloch et Claudie Haigneré



Pascal Traverse avec à sa droite Jacques Arnould



POINT DE VUE

TABLE RONDE ÉTHIQUE ET NUMÉRIQUE : LES ENJEUX DANS LE SECTEUR AÉRONAUTIQUE SPATIAL ET DÉFENSE



L'assistance avec au fond Michel Scheller et Bertrand de Montluc

MOT D'INTRODUCTION PAR BRUNO CHANETZ

Madame la Ministre, Monsieur Le Président, Mesdames, Messieurs, chers Amis,

Tout d'abord je voudrais remercier Olivier Mousson, président de la société d'encouragement pour l'industrie nationale de nous accueillir ce soir à l'hôtel de l'industrie.

C'est un exercice convenu que celui de remercier aussi les auditeurs présents à une conférence. Néanmoins ce soir je le fais avec la plus sincère reconnaissance envers vous, qui êtes venus nombreux en considération des temps que nous vivons, peu propices aux rassemblements.

En effet depuis quelques jours combien ai-je reçu de SMS et de courriels me demandant si cette table ronde était reportée, certains pensant même que son maintien était illégal. Je voudrais rappeler que la Constitution qui régit notre cinquième République s'appuie sur la déclaration des Droits de l'Homme, dont la valeur constitutionnelle a même été reconnue par le Conseil constitutionnel en 1971.

Or l'article V de la déclaration des Droits de l'homme et du citoyen dispose que **Tout ce qui n'est pas défendu par la Loi ne peut être empêché, et que nul ne peut être contraint à faire ce qu'elle n'ordonne pas.**

Ainsi la tenue de cette table ronde est tout à fait légal et conforme aux règles édictées par le protocole sanitaire en place que nous aurions été bien coupables de braver compte tenu du thème abordé ce soir ! Avant de laisser la parole à Catherine Tessier, qui a accepté d'animer cette table ronde au dernier moment en remplacement de Claude Kirchner, directeur du comité national pilote d'éthique du numérique, retenu à Bordeaux, je voudrais dire quelques mots sur les trois associations organisatrices de cet événement.

En commençant par la plus ancienne : la **société d'encouragement pour l'industrie nationale** fondée sous le consulat le 31 octobre 1801, soit donc 100 ans avant la loi de 1901 qui donnera un cadre aux associations. Cette société, qui fêtera ces 220 années d'existence l'année prochaine, a été créée afin de faire rentrer la France dans la Révolution industrielle. Elle poursuit aujourd'hui son activité au service de l'industrie et de l'innovation technologique.

La deuxième la 3AF, **association aéronautique et astronautique de France**, a été créée en 1972. C'est la Société Savante Française de l'Aéronautique et de l'Espace. Elle a pour objet la progression et la promotion des sciences et techniques aérospatiales. Elle est représentée ce soir par son président d'honneur, l'Ingénieur général de l'armement Michel Scheller, ancien directeur général de l'aviation civile et ancien Président de l'ONERA.

La troisième association ALUMNI-ONERA, est l'association des anciens docteurs de l'ONERA, l'**Office national d'études et de recherche aérospatiales**. L'ONERA a été créé en 1946. Il y en régit permanent 300 doctorants à l'ONERA et chaque année une centaine de docteurs sont diplômés. 40 % d'entre eux continuent à travailler dans le secteur aéronautique, spatial et défense et 35 % dans l'enseignement et la recherche. Alumni-ONERA a été fondée en 2016 pour conserver un contact avec eux et favoriser les échanges professionnels. Des événements comme celui d'aujourd'hui en fournissent l'opportunité.

A tous je souhaite une excellente soirée en remerciant tout particulièrement les intervenants de cette table ronde, dont certains ont fait le déplacement de Toulouse. C'est le cas de Catherine Tessier et de Pascal Traverse.

Parce que nous explorons comme nous respirons...

par Jacques Arnould, Centre national d'études spatiales



Jacques Arnould

L'académicien avait répété son argument favori : quoiqu'il en soit de la confiance à accorder à la loi de Moore, les progrès accomplis depuis un demi-siècle en matière d'automatisme, de robotique, d'intelligence artificielle et de technologies numériques permettent d'avancer sans aucune hésitation que « les machines remplaceront bientôt les astronautes dans l'exploration de l'espace »... Assis face au savant, l'astronaute lui accorda quelques secondes de répit avant de rétorquer : « Et ce jour-là, les robots entrèrent à l'académie pour prendre votre siège ! »

Les premières décennies de l'aventure spatiale ont souvent été marquées par de telles joutes oratoires et par de tels débats. Certes, *L'Étoffe des héros* met en scène un truculent échange à propos des singes qui prirent place à bord des premières capsules spatiales de la NASA avant que des humains puissent s'y installer, faisant ainsi de ces derniers les (apparentes) doublures des premiers ; mais la fierté égratignée des pilotes d'essai américains n'offre que le reflet d'un sentiment plus largement partagé par les humains face au progrès technologique et à la robotisation de nos sociétés : ce que Günther Anders appelle la honte prométhéenne. Dans son ouvrage *L'obsolescence de l'homme*, paru en 1956, le philosophe allemand désigne ainsi le sentiment de faiblesse qui peut nous troubler lorsque nous comparons notre condition biologique à l'imposante toute-puissance des machines que nous imaginons et construisons aujourd'hui. Nos artefacts, nos créatures auraient fini par nous dépasser, conclut

Anders, au point que nous pourrions souhaiter devenir nous-mêmes des machines. En 1956, le terme de cyborg n'était pas encore né et la notion de transhumanisme émergeait à peine : ont-ils donné raison au philosophe ? Il faut bien reconnaître qu'ils en ont du moins illustré la pensée...

Mais peut-être, pour aborder la dimension éthique du recours (bien nécessaire) à la robotique, au numérique, pour explorer l'espace, devons-nous interroger l'idée même d'explorer.

J'aime à dire que nous, les humains, explorons comme nous respirons ; car l'exploration consiste en ce double mouvement de sortir de nous-mêmes, de nos zones de connaissance et de confort (autrement dit d'expirer) pour affronter, découvrir des territoires jusqu'alors inconnus de nous, puis de revenir en nous-mêmes et parmi les nôtres (autrement dit d'inspirer) pour raconter ce que nous avons vu, senti, éprouvé et pour préparer ainsi les explorations suivantes. Mais il faut aller plus loin : non seulement nous explorons comme nous respirons, mais explorer serait même le propre de notre espèce (en attendant que la découverte d'êtres et d'intelligences extraterrestres ne vienne me contredire). Car nous ne sommes pas seulement dotés de curiosité, un caractère que nous partageons avec de nombreux animaux, mais aussi d'imagination : nous seuls sommes capables d'outrepasser l'ici et le maintenant pour rejoindre d'autres lieux et d'autres temps. Probablement n'explorons-nous jamais que les territoires que nous avons d'abord imaginés.

Et les robots ? Viennent-ils concurrencer cette singulière propension humaine à explorer ? Évidemment non, puisque nous ne les avons pas dotés d'une imagination. Pour autant, nous devons reconnaître qu'avant d'être l'objet de passes d'armes entre académiciens et astronautes, ils ont été d'une grande utilité pour entamer l'exploration de l'espace extra-atmosphérique. Grâce à eux, nous avons pu voir la surface de Mars et même nous y déplacer, rebondir à la surface de la comète « Tchouri », écouter le vent au-dessus de Titan et même franchir les frontières du système solaire. Oui, j'ai bien écrit « nous », car ces sondes sont l'œuvre de nos savoir-faire, de nos savoir-imaginer, de nos savoir-oser.

Nous ne devons donc avoir ni honte, ni peur des robots. Apprenons plutôt à travailler avec ces machines auxquelles nous confions une part de nos connais-

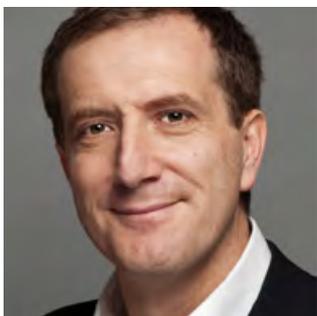
POINT DE VUE

TABLE RONDE ÉTHIQUE ET NUMÉRIQUE : LES ENJEUX DANS LE SECTEUR AÉRONAUTIQUE SPATIAL ET DÉFENSE

sances, de nos données, parfois aussi de notre sécurité. Avant même d'explorer de nouvelles terres inconnues grâce à eux (car nous aurons longtemps encore besoin de protections et d'interfaces entre nos corps et les conditions extraterrestres), nous devons poursuivre l'exploration de ces machines que nous fabriquons et des usages que nous pouvons en faire, enfin et surtout, l'exploration de nous-mêmes. Car telles sont à la fois l'origine et la fin de toute exploration que nous pouvons entreprendre : nous connaître nous-mêmes ou, plus exactement peut-être, choisir d'être, de demeurer et de devenir humains.

Être éthique, c'est aussi une question de technologie !

par Emmanuel Bloch, directeur responsabilité d'entreprise, Thalès



Emmanuel Bloch

Les questions d'éthique liées au développement des nouvelles technologies – intelligence artificielle, big data, cybersécurité, etc. – sont sur le devant de la scène. Si les enjeux éthiques de la biométrie, de la création de fichiers, de l'utilisation de données personnelles ne sont pas nouveaux, néanmoins la rapide diffusion de systèmes utilisant ces technologies dans la plupart des activités humaines a considérablement changé la donne.

En l'espace de quelques années, un nouvel environnement plutôt anxigène a remplacé la vision traditionnelle du futur radieux offert par les technologies numériques et en particulier l'émergence de l'intelligence artificielle (IA) : les robots sont devenus des « robots tueurs », les réseaux sociaux des « bulles filtrantes » propagatrice de

fake news, la vidéo-protection un moyen de surveillance de masse, et l'IA une source de biais discriminatoires. Si ces préoccupations sont toutes légitimes et incontournables, il faut l'avouer, parfois la visibilité médiatique s'est avérée bien au-delà du risque réel.

La première conséquence de cette inquiétude fût l'émergence de multiples initiatives visant à réguler ces technologies et, en particulier, celles perçues comme étant à la source de tous les risques potentiels : l'intelligence artificielle. En l'espace de quelques mois, l'Union européenne, l'Unesco, le Conseil de l'Europe, l'OCDE, le G7, le Québec, le Department of Defence des États-Unis, etc. mais également les entreprises, ou les associations professionnelles, se sont mises à élaborer chartes, recommandations, principes, lignes de conduites, visant à proposer une régulation de l'IA afin de rendre cette technologie plus éthique ou digne de confiance.

Très rapidement cependant, deux grands écueils sont apparus : le manque de substance et le manque de sens. Le manque de substance : c'est le cas de la charte qui se veut tellement universelle, que finalement elle en devient désespérément vague. L'intention initiale de ne vexer aucune des parties prenantes lors de sa conception l'a vidée de sa substance. Ces chartes énumèrent donc des principes contre lesquels personne ne peut s'opposer – une IA juste, une IA conservant la place de l'humain, etc. – et qui restent assez peu précis pour que chacun puisse y trouver ce qu'il vient y chercher et puisse se targuer sans trop de soucis d'en respecter les principes.

Le manque de (bon) sens, se révèle lorsque, au contraire, l'auteur a voulu intégrer de grands principes qui fonctionnent bien sur le papier mais sont inapplicables : l'IA doit faire le Bien, être explicable, préserver l'autonomie de l'humain, l'humain doit donner son accord avant mise en relation avec une IA, etc. Bien sûr, certains de ces principes sont très importants dans certains cas précis, mais il est impossible et souvent inutile même de les généraliser.

La solution ne serait-elle pas alors de sortir de l'éthique ? Ou plutôt de revenir aux enjeux fondamentaux de l'application de ces technologies. Un système aéronautique doit avant tout être conforme aux normes qui encadrent ce secteur, notamment en ce qui concerne sa fiabilité. La question de l'utilisation de l'IA dans un cockpit d'avion n'est pas de savoir si elle est « éthique » ou pas, mais bien si elle permet bien de renforcer encore

POINT DE VUE

**TABLE RONDE ÉTHIQUE ET NUMÉRIQUE :
LES ENJEUX DANS LE SECTEUR AÉRONAUTIQUE SPATIAL ET DÉFENSE**

la sécurité des vols sur le domaine où elle s'applique. De même, l'utilisation de technologies numérique dans la défense doit à la fois apporter un avantage opérationnel flagrant, tout en facilitant le respect des conventions internationales et notamment le droit humanitaire. Si l'utilisation de l'IA faillit à l'un de ces principes, alors elle n'a pas d'utilité.

Ce n'est qu'à cette condition que les principes énoncés plus haut prennent du sens. En effet, la question de l'explicabilité n'a pas la même intensité s'il s'agit d'expliquer pourquoi un site de vidéo recommande tel film à l'utilisateur, ou s'il s'agit de comprendre la sélection de telle cible par un système de défense. De même la fiabilité et la sécurité d'une IA attendue n'est pas la même lorsqu'il s'agit de reconnaître un chat sur une photo ou de faire atterrir un avion.

Derrière ces exemples, c'est la notion de criticité que l'on aborde et qui est rarement considérée, bien qu'essentielle, dans tous ces travaux sur la définition de principes pour une IA « éthique » ou de confiance. Or, l'aéronautique, la défense ou le spatial sont des secteurs critiques et disposent en conséquence de contraintes très spécifiques souvent peu couvertes dans les débats actuels autour des enjeux de ces nouvelles technologies.

L'autre aspect, pourtant essentiel, mais également assez peu évoqué concerne la frugalité. L'IA, le big data, la cybersécurité sont des technologies gourmandes en énergie et en données. La reconnaissance vocale de notre téléphone serait bien moins performante sans les fermes de serveurs qui viennent l'appuyer en permanence (souvent même à l'insu de son utilisateur). Sur ces points, les secteurs de la défense, de l'aéronautique et du spatial se différencient aussi fortement des autres secteurs. En effet, ce sont des milieux souvent très contraints que ce soit au niveau de l'énergie (le nombre de watts disponibles sur un satellite, dans un avion ou dans un char est limité) ou même des données (il y a assez peu de données issues de combats aériens réels ou de vols d'avion de ligne en condition extrême).

Cette frugalité pose des défis parfois immenses aux entreprises qui développent des solutions à base d'IA dans ces secteurs. Mais elle préfigure l'avenir de ces technologies. On ne pourra pas multiplier sans fin le nombre de fermes de serveurs (leur coût en énergie et en matière première devient de plus en plus lourd) ni continuer à utiliser toutes les données disponibles sans

limite, les questions de vie privée devenant prégnantes face à la multiplication des abus récents.

En conclusion, le principal enjeu « éthique » du numérique dans la défense, l'aéronautique et le spatial, c'est avant tout de permettre le développement d'applications qui garantissent un réel bénéfice opérationnel dans les contraintes légales, réglementaires et éthiques définies.

Et c'est à cela d'ailleurs que travaillent les acteurs du secteur lorsqu'ils déploient des technologies toujours plus explicables, robuste, fiables et frugales. Parce qu'au final être éthique ce n'est pas de faire le Bien, mais de se donner les moyens de faire toujours mieux, quand bien même l'environnement est particulièrement complexe. ■

Proches ? Enjeux d'éthique du numérique en proximité distanciée

par **Claude Kirchner**, INRIA, CCNE pour les sciences de la vie et de la santé, Comité national pilote d'éthique du numérique



Claude Kirchner

Être proche pour des humains a des sens différents : on peut parler de proximité spatiale, de proximité génétique, de proximité d'amitié, d'intérêt, d'idée ou d'opinion. La proximité spatiale nous permet souvent d'échanger des informations via nos cinq sens principaux (le goût, l'odorat, l'ouïe, la vue et le toucher), qui constituent des dispositifs de perception d'informations en particulier pour l'humain.

POINT DE VUE

TABLE RONDE ÉTHIQUE ET NUMÉRIQUE : LES ENJEUX DANS LE SECTEUR AÉRONAUTIQUE SPATIAL ET DÉFENSE

Le numérique, en tant que système de traitement d'information, peut interagir de manière fondamentale avec nos sens. En temps quasi réel depuis des points éloignés sur la planète ou de l'espace proche, nous pouvons nous voir et nous entendre et dans une moindre mesure aujourd'hui, toucher, sentir et goûter. En aéronautique cette capacité est évidemment centrale. Dans un contexte radicalement différent, la Covid-19, cette capacité permise par le numérique nous est particulièrement précieuse car nous pouvons être proches et en particulier nous voir et nous entendre en temps réel, tout en étant physiquement distants, ce que nous pouvons appeler proximité distanciée. La télémedecine, le téléenseignement, le télétravail ou la téléconférence en sont des exemples importants qui ont vu en 2020 des développements remarquables et radicaux.

Cette imbrication du numérique au cœur même des relations humaines est l'objet d'enjeux d'éthique fondamentaux. Comment les algorithmes qui traitent les informations que nous échangeons dans le contexte de proximité distanciée prennent en compte des valeurs cruciales telles que la dignité humaine, la transparence, la confidentialité, la facilité d'usage, l'accessibilité ? Dans le cadre du Comité national pilote d'éthique du numérique (CNPEN), nous avons émis plusieurs avis sur ces enjeux d'éthique dans le cadre de la pandémie: ils sont disponibles en français ou en anglais sur le site ccne-ethique.fr.

En aérospatial, la perception de la distance intervient aussi bien dans les relations inter-objets : un avion et le sol, deux satellites en phase de rendez-vous, que dans les relations inter-humain : entre des membres d'un équipage, entre le pilote et les contrôleurs aériens, entre les membres de l'équipage et les passagers; qu'entre aussi l'humain et des objets : le pilote et les moteurs, les contrôleurs et les radars.

Le numérique change profondément la capacité de proximité distanciée. Entre le pilote et des commandes de vol, on est passé d'une relation basée sur des câbles, à une relation basée sur l'électricité et aujourd'hui sur des traitements d'information dans lesquels le numérique permet de s'abstraire des supports utilisés pour le transport de l'information, typiquement des ondes acoustiques, des câbles électriques, des ondes électromagnétiques, des fibres optiques, en fonction des besoins. Cette intermédiation du numérique est tout sauf neutre et comme on l'a vu par exemple avec l'introduction des

commandes électriques (et numériques) dans l'A320, elle induit dans tous les cas des traitements de l'information qui vont depuis un transfert le plus fidèle possible (donc incluant en particulier des codes détecteurs d'erreurs) à des traitements limitant la commande au contexte courant, par exemple pour ne pas induire un décrochage de l'avion.

Ces algorithmes de traitement de l'information doivent permettre d'assurer les contraintes de sécurité et de sûreté et déjà à ce niveau les enjeux d'éthique du numérique relatifs au respect de l'humain dans sa dignité, comme dans sa responsabilité, doivent être identifiés en tant que tels. La prise en compte par exemple de la qualité des prises de décisions doit permettre d'identifier la prise en compte des valeurs d'ergonomie ou de sécurité.

Cette intermédiation du numérique permet d'envisager de nouvelles situations : on a distancié le pilote du moteur via le numérique, donc on peut envisager que le pilote ne soit plus dans l'appareil et il faudra prendre en compte la perception induite de la proximité distanciée entre le pilote et les passagers ce qui aujourd'hui questionne l'acceptabilité sociale d'une telle distanciation. Autre exemple, la distanciation entre les contrôleurs aériens et l'aéroport, comme par exemple à Örnköldsvik au Nord de la Suède où depuis l'été 2014 le contrôle aérien de l'aéroport est réalisé à distance depuis l'aéroport de Sundsvall à plus de 150 km de là. Dans ces deux situations de nouveaux dilemmes éthiques naissent des tensions entre les hiérarchies de valeurs sous jacentes aux notions de proximité, distanciée, ou pas.

Le numérique a joué et va jouer un rôle fondamental dans les relations humaines et par conséquent dans la notion même de proximité. La Covid-19 en a été un formidable révélateur. En aérospatial la proximité distanciée est une réalité depuis plusieurs décennies et les enjeux d'éthique du numérique sous-tendus par sa mise en œuvre sont omniprésents et maintenant mieux identifiés. Ces deux situations montrent l'importance d'instances pérennes de réflexion sur ces enjeux d'éthique du numérique au niveau national et international, associant au plus près expertise et société civile et permettant d'éclairer l'ingénierie, le régulateur ou le législateur mais aussi le public pour mieux les comprendre et les maîtriser. ■

Il n'y a pas de « décision autonome éthique » mais nécessité d'une éthique de l'« autonomie »

par Catherine Tessier, Référente intégrité scientifique et éthique de la recherche de l'ONERA, membre du Comité national pilote d'éthique du numérique



Catherine Tessier

Avion « autonome », sonde « autonome », arme « autonome »... L'« autonomie » des engins dans les domaines aéronautique, spatial et défense reste un défi scientifique majeur dès lors qu'il est envisagé de substituer à la décision humaine une « décision » numérique. Peut-on en effet formuler sous forme mathématique – et donc coder – l'ensemble des éléments qui concourent à une prise de décision, en saisir toutes les nuances, les incertitudes ? Comment distinguer, par le calcul, des situations apparemment très similaires mais qui demandent des réactions totalement différentes ? Qu'est-ce, mathématiquement, qu'une décision « adaptée », « correcte », « juste », voire « bonne » ? C'est l'objet même de la recherche que d'élaborer des réponses à ces questions de définition, de modélisation, de calcul. Tout aussi majeures et intimement liées aux premières sont les questions éthiques soulevées par la « décision » numérique : au nom de quoi, de quels principes ou de quelles valeurs, envisage-t-on d'affecter des fonctions décisionnelles à une machine, à un programme ? Une

telle machine est-elle désirable ? En quoi cette machine va-t-elle transformer les comportements humains ?

L'automatisation du processus décisionnel est fondée sur les deux fonctions de perception (considérée au sens large, c'est-à-dire l'ensemble de la chaîne fonctionnelle allant de la prise d'information au calcul d'estimations de l'état de situation) et de calcul de décisions (concernant des actions à réaliser ou le fait de ne pas agir). Elle est justifiée par des besoins de réaction rapide ou plus généralement d'action dans des circonstances où les capacités humaines sont dépassées ; par des raisons d'optimisation, de rationalisation des décisions ; par une volonté d'assister l'humain dans des situations complexes, voire de le remplacer. Cependant la « décision » numérique est d'une tout autre nature que la décision humaine, puisque fondée sur des calculs mathématiques dont le cadre et les modalités ont été définis à l'avance dans un cahier des charges et formalisés au travers de spécifications précises. On peut donc interroger la pertinence d'une « décision » numérique dès lors que des caractéristiques humaines telles que l'expérience, le jugement, l'intuition, la mise en contexte, le ressenti, l'invention, voire la réaction réflexe – si on les considère comme indispensables dans un processus de décision – ne peuvent être mises sous forme mathématique ou du moins imparfaitement. Par exemple, doit-on tenter de formaliser et de programmer ce que serait, sur un théâtre d'opérations, une décision conforme aux principes d'humanité (éviter les maux superflus), de discrimination (distinguer les objectifs militaires des populations et biens civils), et de proportionnalité (adéquation entre les moyens mis en œuvre et l'effet recherché) inscrits dans le droit international humanitaire ? Doit-on anticiper dans un programme la réponse à une situation de dilemme (situation dans laquelle toute décision trahit une ou plusieurs valeurs morales) et si oui de quelle manière, ou bien doit-on s'en abstenir ? Plus généralement, qu'en est-il de l'autonomie de l'humain (le pilote d'avion, le militaire en opération) face à l'« autonomie » de la machine, de la préservation de ses savoir-faire et de ses capacités intrinsèques face à la croissance des capacités numériques ?

Il n'y a pas de « décision autonome éthique », pas de « numérique éthique » par construction : un objet, un programme, ou un résultat de programme ne peut en effet pas être « éthique » en soi. En revanche c'est en accompagnant la conception et les usages par la réflexion éthique, c'est-à-dire en se posant des questions, chemin faisant, sur la raison d'être et sur les impacts de ce qu'on

est en train d'imaginer ou de mettre en œuvre, et en en anticipant, dans la mesure du possible, les dérives, que la décision « numérique » sera susceptible d'être pertinente, adaptée, acceptable et acceptée. La nécessité de réflexions éthiques relatives au numérique a entraîné une multiplication de comités et groupes d'experts, nationaux et internationaux, qui publient régulièrement des recommandations, avis, chartes, voire des grilles d'« évaluation éthique ». Ces instances ne se substituent pas au chercheur ou à l'ingénieur : en effet qui d'autre que celui qui imagine, conçoit, fait, est mieux placé pour mener, au sein même de ses travaux, le questionnement au sujet de l'objet qu'il est en train d'étudier et dont il connaît les subtilités techniques ? Interroger les motivations et la portée de « décisions » numériques, considérer de manière critique la façon dont il les conçoit et leurs applications potentielles, devrait être aussi naturel pour le chercheur ou l'ingénieur que de consulter l'état de l'art ou de vérifier ses résultats. Un effort supplémentaire certes, mais qui contribue à enrichir la qualité du travail scientifique, à imaginer de nouvelles approches techniques, et à déjouer les fantasmes qui se créent à partir de la notion – mal nommée – d'avion ou d'arme « autonome » qui « déciderait » sans qu'en soient maîtrisés et compris tous les enjeux. ■

Placer l'humain dans les meilleures conditions ...

par Pascal Traverse, responsable avion autonome chez Airbus, membre 3AF



Pascal Traverse

Deux grands thèmes :

- Aviation civile et l'augmentation continue de l'automatisation qui pourrait se traduire par des opérations avec un seul pilote.
- Aviation militaire et les initiatives que nous prenons pour cadrer le design du système de combat aérien futur (SCAF) par des règles d'éthique.

Notre pratique de l'autonomie est de placer l'humain dans la meilleure position pour décider et cela passe par la délégation à des systèmes de décisions moins "stratégiques".

Cela passe également par des débats que l'on peut qualifier d'éthiques.

Prenons un exemple concret. Avec l'introduction des commandes de vol électriques sur l'A320, nous avons installé des protections du domaine de vol qui peuvent contraindre une action du pilote.

Par exemple, le pilote qui cabre l'avion ; si un algorithme estime que le risque de décrochage est trop fort, il restreindra la manœuvre commandée par l'humain.

Dans les années 80, la polémique fut forte. Le mot « éthique » n'était pas utilisé ; il le serait certainement aujourd'hui.

TABLE RONDE ÉTHIQUE ET NUMÉRIQUE : LES ENJEUX DANS LE SECTEUR AÉRONAUTIQUE SPATIAL ET DÉFENSE

Un gros travail de réflexion, d'analyse et d'essais fut mené à Airbus mais aussi avec des pilotes de compagnies aériennes et évidemment les agences de sécurité comme l'EASA ou la FAA.

Trente ans après, cette technologie fut adoptée par Boeing sur ses B777 et B787 ainsi que par d'autres avionneurs.

Comparant les statistiques d'accidents entre les avions équipés de ce genre de système et ceux qui ne le sont pas, un rapport 3 apparaît en faveur de cette innovation. En prenant ces statistiques par type d'accidents, il apparaît que le type d'accidents que les protections du domaine de vol cherchent à éviter a diminué d'un rapport 4 (en accidents par million de vols).

Cette restriction de l'autorité de l'humain sur la machine a donc un bilan très positif.

<https://accidentstats.airbus.com/statistics/fatal-accidents>

Pour le futur, nous voulons continuer à améliorer la sécurité aérienne. En suivant les exigences réglementaires qui vont régulièrement dans le sens de plus de rigueur mais aussi en allant plus loin. Innover dans ce domaine est consensuel dans l'industrie. La question est plutôt de comment y arriver.

Le levier essentiel est de placer l'humain dans les meilleures conditions pour prendre une décision. Donc, de lui donner du temps et les informations pertinentes pour analyser la situation. Donner du temps signifie par exemple que le pilote automatique et le système automatique de gestion des pannes sont disponibles en permanence, en toutes circonstances, libérant le pilote des tâches court terme de gestion du vol et des systèmes.

C'est à dire, plus d'autonomie pour l'avion au sens de moins de décisions tactiques immédiates prises par l'humain, pour lui permettre une meilleure prise de décisions stratégiques, comme par exemple le choix d'un aéroport de déroutement.

Basée sur l'expérience acquise au fil des décennies avec l'introduction de nouvelles technologies, l'augmentation de l'autonomie se traduira vraisemblablement par une évolution du rôle de l'équipage.

Plusieurs pistes sont ainsi actuellement explorées pour améliorer la sécurité des vols et utiliser l'automatisation et la connectivité des avions. Les opérations à un seul pilote (SPO) sont envisageables.

Concernant un avion sans pilote, outre la difficile acceptabilité de ce concept, nous pensons que l'humain est meilleur que la machine pour trouver une solution à un problème inconnu, imprévu et non-répertorié, « unknown unknown ».

Des débats similaires existent dans l'aviation militaire notamment dans le cadre du programme SCAF (système de combat aérien futur, FCAS en anglais). Il s'agit d'un système de systèmes, composé d'un avion piloté par un homme et entouré de drones coopératifs qui communiqueront et échangeront des informations à l'aide d'un combat cloud.

Airbus a mis en place et travaille avec un comité d'experts indépendants qui a pour mission de définir un cadre éthique et légal à ce projet. Les débats sont ouverts et transparents, publiés via un site internet :

<https://www.fcas-forum.eu/en>

Un outil essentiel aux travaux de ce comité sera la grille d'évaluation pour une intelligence artificielle de confiance, grille sponsorisée par l'Union européenne et à laquelle Airbus a contribué.

<https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/assessment-list-trustworthy-artificial-intelligence-altai-self-assessment> ■

Les compagnies aériennes devant la pandémie ; redonner confiance en répondant aux besoins des passagers

par Jean-Baptiste Rigaudias, commission aviation commerciale

UNE DEMANDE ÉVANOUIE

Retrouver la demande est le seul moyen de préserver les emplois (directs et indirects) de l'industrie, les prestigieuses des pavillons, les succès des industries aéronautiques.

Deviner l'avenir du transport aérien est « à la mode » : il suffit de voir la fréquence avec laquelle le sujet est questionné dans les media ou le nombre de projets d'étudiants auxquels il est imposé ! Les infortunés chargés de réfléchir, sollicitent les témoignages des relations auprès desquelles ils peuvent se faire recommander : faut-il se demander si ceux qui leurs prescrivent ce sujet espèrent trouver une réponse à leurs propres interrogations ?

La demande ne vient que des besoins à satisfaire. Et celui-ci est dimensionné par les décisions des États : quand les frontières sont fermées aucun voyage international n'est possible, quand hôtels, restaurants, musées, divertissements d'une région sont inaccessibles, personne n'envisage de s'y rendre, quand les activités sont suspendues, que leurs emplois s'exercent à distance, chacun à son domicile, les affaires se passent de rencontres, qu'elles eussent été bilatérales ou organisées pour de vastes participations.

LA SITUATION SANITAIRE ÉVOLUE

Les gouvernements, face à une situation sanitaire que ni eux ni leur opposition ne connaissent, ni ne prévoient, sans soins à prescrire, sans prévention dont leurs experts sauraient l'effet, sont obligés de tâtonner, la situation d'un jour ne confirmant précisément ni n'infirmité de même, l'efficacité des mesures adoptées les jours précédents. De là, l'oscillation sans préavis entre limitation des occasions de contacts entre leurs administrés et libéralisation de l'exercice de telle ou telle activité incontournable pour la santé de leur économie. Ce propos n'est aucunement critique, il ne veut que peindre le vécu.

Ce serait impuissance satisfaite que de se contenter d'attendre que le virus disparaisse, d'autant qu'aucune expertise ne dispose d'argument pour prétendre quand il disparaîtra, ni s'il disparaîtra.

La situation évolue avec une meilleure connaissance de l'infection : les quarantaines sont devenues quatorzaines et même des sept jours, des tests quasi-instantanés sont disponibles, les critères diagnostiquant l'infection sont identifiés, les hôpitaux évitent d'être dépassés pour autant que l'État mesure la propagation et régule les échanges entre ses résidents.

Quelles dispositions les États pourraient-ils prendre pour améliorer spécifiquement dans ce contexte la santé du transport aérien, autres que de lui allouer, frontières fermées, des subsides en espérant qu'il survive ? Excellent sujet dont l'OACI serait le lieu naturel de débat, sinon que son horizon d'adoption de recommandations, proscrit d'en attendre un effet quelconque. L'IATA a publié la synthèse de la situation du transport aérien mondial : elle est catastrophique. Les transporteurs, sauf exceptions (chinoise par exemple, dont le marché domestique demeure), auraient dû, sans les aides reçues, disparaître et licencier une part de leurs effectifs égale à celle perdue de leur trafic : lorsque la reprise surviendra, les exploitants qui auront survécu trouveront d'ailleurs la demande que satisfaisaient ceux qui auront disparu. À noter que lorsque les aides ont pris la forme d'une augmentation de capital au plus bas de la valeur de l'entreprise aidée, l'État fera une plus-value lorsqu'elle retrouvera sa valorisation « ante ».

Les voyages sont un facteur potentiel d'importation d'infection dans chaque lieu d'accueil : nul État ne veut, chez lui, « trop » risquer de transférer la maladie d'une région à l'autre, ni ne veut « trop » risquer que les voyageurs venus d'un autre État, importent un accroissement de contagion. Pourquoi se satisfaire de ne pas « trop risquer » ? Précisément parce que la méconnaissance de ce qui caractérise la situation exige d'accepter que le risque zéro est inatteignable !

POINT DE VUE

LES COMPAGNIES AÉRIENNES DEVANT LA PANDÉMIE ; REDONNER CONFIANCE EN RÉPONDANT AUX BESOINS DES PASSAGERS

DES VOLS GARANTIS SANS VIRUS ?

Depuis peu, quelques exploitants envisagent des vols « **garantis sans virus** » : cette démarche repose sur la disposition nouvelle des tests qui seraient systématiquement réalisés avant embarquement. Dans des machines désinfectées avant départ, les présents embarqués auraient été contrôlés non infectés, négatifs, à la précision du test près... ainsi qu'à la durée près du vol pour les passagers qui y verraient leur état évoluer malencontreusement. Ces exploitants veulent rassurer les passagers testés négativement, donc sur le fait que leur transport ne leur fait pas prendre de risque. En pratique, faudrait-il que le test prenne place au plus tard, donc à l'entrée de la passerelle si les employés qui le pratiquent sont eux-mêmes testés négatifs.

Ajoutons qu'une fois embarqué, chaque passager est protégé de ses voisins, tous assis masqués dans le même sens, dans des rangées séparées les unes des autres par les dossiers qui masquent leurs têtes. Prendre ces vols dits sans virus, protégerait de (presque) toute contagion. Certaines compagnies demandent aussi que les passagers changent leur masque toutes les 4 heures.

Cette disposition à elle seule paraît cependant encore insuffisante pour organiser les voyages aériens en toute sérénité. En effet le départ assuré par le test négatif ne préjuge pas de l'accueil à l'arrivée : quarantaine ou autre test (le verdict sera-t-il le même ?). Ne faudrait-il donc pas que les États des arrivées reconnaissent le résultat négatif des tests effectués à l'embarquement. L'État de l'exploitant devrait à cette fin officialiser que les passagers des vols « sans virus » dudit exploitant seraient **exempts de toute mesure de consignation et test à leur arrivée** sur son territoire, et s'efforcer d'obtenir la même officialisation **bilatéralement** de la part des États d'arrivée des vols internationaux du même exploitant. Aux États alors de contrôler l'exécution de la procédure déléguée ¹, comme ils en délèguent d'autres, le plus souvent de police ², aux exploitants aériens. Ces reconnaissances risquent de demander un temps certain.

Une première réalisation entre États-Unis et Italie a été annoncée dans la presse, avec reconnaissance par ces deux États, des procédures de l'exploitant.

¹ Envisageable aussi pour les déplacements par moyens de service public de surface

² Et déjà de vaccination contre des maladies connues pour certaines destinations

³ Seuls certains le font

Reste encore qu'une fois parti, un voyageur ne peut embarquer sur son vol de retour que s'il est testé à nouveau négatif lorsqu'il se présente sur ce vol : ce risque d'être consigné et soigné loin de chez lui peut encore suffire à faire renoncer aux déplacements aériens... Il appartient donc aux exploitants de choisir la suite selon l'avenir qu'ils escomptent.

À eux donc de choisir soit des vols sans virus, qui ne rassureront qu'une partie de leur clientèle, ou, pour faciliter vraiment le recours à leur offre, garantir, avec l'accord des États de destination de ses vols sur ses procédures, à chacun des résidents qui en sont partis en ayant été testés négativement alors, le retour réservé avec leur départ même si le test lors de son retour était positif !

Evidemment ce ne sont plus les vols exactement sans virus, nous y reviendrons. Mais la seule mesure qui permet d'envisager sans réserve un voyage aérien est la certitude raisonnable qu'il se déroulera comme il est organisé : ces autorisations d'embarquement par les États d'origine et de destination d'un vol, vaudraient sans autres mesures que les tests agréés des exploitants, pour les testés négatifs en classe sans virus, et pour les autres, par exemple en embarquement, sièges et service ségrégués, à la condition qu'ils résident dans l'État de destination et effectuent le retour d'un aller-retour réservé dont ils auraient effectué l'aller.

Il est d'ailleurs traditionnel pour le transport aérien historique d'assurer exceptionnellement le retour « chez eux » de malades : c'est pourquoi, même en période d'épidémie déjà rencontrée, nul hier ne se demandait si un passager aérien voisin était atteint d'une quelconque maladie. C'est aussi pourquoi certains exploitants ³ commercialisent transport en civière, malgré l'accueil commercial qu'ils savent objet de réserves.

Les dispositions sanitaires qui régissent les voyages, aériens et maritimes, entre la Corse et la France continentale relèvent précisément fin 2020 de ce type d'organisation : test négatif au départ du continent sans autre contrainte, ni au débarquement, ni pour l'embarquement de retour !

POINT DE VUE

LES COMPAGNIES AÉRIENNES DEVANT LA PANDÉMIE ; REDONNER CONFIANCE EN RÉPONDANT AUX BESOINS DES PASSAGERS

Déjà en temps normal, le nombre des passagers aérien dans la population est minoritaire, celui de malades qui veulent voyager est rare, et, dans la situation présente, parmi l'ensemble des passagers effectuant leur aller testés négativement, le nombre, parmi ceux effectuant leur retour et devenus testés positifs seraient donc exceptionnels. Ils ne compteraient que ceux qui négatifs lors de leur aller et ayant réservé en même temps leur retour, auraient dans les quelques jours de leur séjour contracté le virus. Les États pourraient d'ailleurs bilatéralement limiter la durée du séjour pour lequel la garantie du retour s'appliquerait, et spécifier la déclaration des testés positifs. Ce n'est plus qu'une question de procédures à exécuter avec rigueur par les personnels.

DES VACCINS ?

L'arrivée des vaccins évidemment permettrait aux autorités d'aviation civiles de stipuler bilatéralement aux exploitants de contrôler l'existant « certificat international de vaccination » de leurs passagers : toutefois, les délais de disponibilité de vaccins pour passagers aériens (et équipages relevés au moins) ne seront pas disponibles avant que les résidents prioritaires n'aient été servis ! Là encore le délai demandé sera certain.

DES ACCORDS ENTRE ÉTATS

Evidemment, pour ne pas annihiler les effets des mesures décrites, resterait à l'État à s'engager, et à engager bilatéralement les autres États, à ne pas modifier les règles adoptées sans un préavis raisonnable, par exemple la quinzaine de jours qui couvriraient une grande partie des allers-retours réservés.

De telles dispositions, très particulières, applicables unilatéralement aux déplacements nationaux, puis bilatéralement entre des états de l'Union européenne, pourraient voir le jour avant la disponibilité de vaccins éprouvés pour les effectifs de voyageurs aériens : faudrait-il toutefois que tous les exploitants obtiennent des autorités concernées l'agrément de leurs procédures. En outre les retours garantis faciliteraient sûrement la conclusion des accords bilatéraux, les États d'accueil des visiteurs étant ainsi délivrés des malades retournant dans leur État de résidence. Bien sûr d'autres transports publics revendiqueraient le bénéfice des dites dispositions.

L'accord déjà d'une grande partie des États de l'Union européenne serait le signe indispensable pour des extensions au reste du monde, ce qui est fondamental pour l'aérien compte tenu des poids respectifs des longs et courts courriers dans les chiffres d'affaires de l'industrie.

UNE EXPÉRIENCE EN MATIÈRE DE PANDÉMIE ?

Nous avons vécu plusieurs expériences de par le monde au cours des décennies précédentes. Ces épidémies/pandémies n'ont pas alors ralenti le besoin de se déplacer par les airs ou autrement...

Peut-on considérer que ces moyens de transport avaient été plus sains qu'ailleurs ? Qu'ils avaient changé les comportements, modifié le besoin de rencontrer des interlocuteurs ou d'aller séjourner un temps sous d'autres cieux.

Le passager consent à l'inconfort raisonné qu'on lui inflige ; ce qui compte pour lui n'est pas tant le moyen de transport que la destination choisie.

Et tous les virus qui ont circulé, circulent encore (sans comparer les nocivités), ne freinent pas les décisions de voyager quand les procédures à suivre rassurent et autorisent une organisation qui ne serait pas perturbée trop souvent. ■

Influences diverses sur le climat terrestre

par Roland Berton, maître de recherche à l'ONERA



Roland Berton est ancien élève de l'Ecole centrale des arts et manufactures et docteur en astrophysique de l'université de Paris VII Jussieu.

« Il n'est désir plus naturel que le désir de connoissance. Nous essayons tous les moyens qui nous y peuvent mener. Quand la raison nous faut ¹, nous y employons l'expérience qui est un moyen plus foible et moins digne ; mais la vérité est chose si grande, que nous ne devons desdaigner aucune entremise qui nous y conduise. »

Montaigne, Essais (III, XIII : De l'expérience) 1595.

1. INTRODUCTION

Jusqu'à l'époque de Kepler et Galilée, les phénomènes célestes reflétaient la perfection, les orbites astrales étaient supposés circulaires, en opposition avec le monde terrestre, imparfait. Maintenant, nous savons que les orbites sont "ovales", et que le soleil nous irradie de sa lumière vitale, mais aussi de particules diverses, et que des astéroïdes "tombent" sur la Terre, rarement heureusement.

Cet article ne prétend pas trancher dans le débat actuel sur le climat, mais fait le point sur un sujet aux multiples facettes en présentant des théories faisant intervenir des phénomènes naturels, qui sont écartés par les thèses officielles parce que les mécanismes en sont encore imparfaitement compris. Ils mettent en scène, entre autres, le rayonnement cosmique provenant du soleil et d'autres étoiles de la Galaxie, nous parvenant modulés par leur interaction avec le vent solaire et le champ géomagnétique, ou l'interaction des flux solaires interagissant avec ce dernier.

Certes, l'influence de l'activité solaire sur le climat terrestre à l'échelle de millénaires est maintenant bien admise et expliquée par le couplage de l'ensoleillement avec les mouvements de la Terre selon les cycles de Milankovitch. Mais il reste des phénomènes à plus court terme, transitoires, qui intéressent de plus en plus les historiens, car ils ont pu causer des catastrophes et bouleversements plus graves encore que l'effet de serre dû au dioxyde de carbone (CO₂) en provoquant la ruine de civilisations qui ne produisaient pas encore ce gaz en quantité importante.

Il existe actuellement plusieurs organismes regroupant les partisans et les adversaires du changement climatique d'origine humaine, dit "anthropogénique" ². À l'origine, l'organisme "officiel", l'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), ou en français le GIEC (Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat) ³, a été créé en 1988 à la demande du G7 pour montrer, à charge, que l'activité humaine est responsable du changement climatique, et par conséquent d'édicter la conduite, écologique, à tenir pour l'enrayer. Son siège se trouve à Genève, en Suisse. Il regroupe actuellement 195 états membres de l'ONU, et compte des membres scientifiques éminents, dont des français ⁴. Il a suivi les préceptes d'un célèbre climatologue britannique, H. H. Lamb (1913-1997), qui avait malgré tout mis en garde contre la surestimation de l'importance du dioxyde de carbone. Depuis sa création jusqu'à présent, cinq rapports techniques ont été publiés par le GIEC (en 1990, 1995, 2001, 2007 et 2013), et le prochain devrait être publié en 2022.

En face du GIEC, se sont constituées plusieurs institutions non-gouvernementales pour contrebalancer la thèse exclusivement anthropogénique – "carbonique" pourrait-on dire – de la dérive climatique par l'effet de serre dû au dioxyde de carbone d'origine humaine. Le NIPPC (*Nongovernmental International*

1. manque

2. Dans un contexte où la physique joue un rôle important, nous éviterons l'emploi du néologisme "anthropique", qui a l'inconvénient de se prononcer comme "entropique", dont le sens est bien établi en thermodynamique, et nous utiliserons donc le terme "humain".

3. On peut remarquer que, curieusement, le mot "experts", qui apparaît souvent dans les intitulés du GIEC, ne figure pas dans le sigle, puisque le "E" de GIEC signifie "évolution" ! Le sigle anglais IPCC ne le contient pas davantage.

4. J. Jouzel (CEA, Lab. Sci. Clim. Env.), H. Le Treut (Ecole Polytechnique, Univ. Paris 7, ENS), V. Masson-Delmotte (CEA, Lab. Sci. Clim. Env.), M. Latif (Univ. Kiel). C. Landsea (NOAA, Colorado State Univ.), spécialiste reconnu des ouragans, a démissionné du GIEC en 2005 pour "divergence d'opinion" scientifique.

POINT DE VUE INFLUENCES DIVERSES SUR LE CLIMAT TERRESTRE

Panel on Climate Change) a été créé en 2003 par F. Singer, président du SEPP (*Science & Environmental Policy Project*), pour présenter une estimation réaliste et objective du réchauffement climatique.

Ensuite, la GWPF (*Global Warming Policy Foundation*) a été créée en 2009 et elle est financée par des dons. Son siège se trouve à Londres, en Angleterre. Elle compte également des membres scientifiques éminents, dont des français ⁵. L'attitude de climatologues, comme M. Leroux (1938-2008), vient à l'appui de cette démarche [6]. Il faut citer également l'association des Climato-Réalistes, fondée en 2015, qui compte environ 4700 membres, et regroupe des scientifiques francophones ⁶, ainsi que les Climato-Optimistes.

Dans un but de pondération et de "réflexion apaisée", nous proposons ici une modeste synthèse sans parti-pris prenant en compte des processus naturels qui sont avancés pour expliquer les variations actuelles du climat, dont les protagonistes sont le Soleil, le vent solaire, les rayons cosmiques, les interactions gravitationnelles ainsi que les champs magnétiques solaire et terrestre, l'atmosphère, les volcans et l'eau.

Parmi le grand nombre d'ouvrages consacrés à ce sujet "brûlant", un livre très didactique publié il a douze ans pose très bien les problèmes, et en analyse objectivement la plupart des aspects [5]. La climatologie est en effet une science complexe qui fait appel à plusieurs spécialités : mécanique céleste, astrophysique, magnétohydrodynamique, transfert radiatif, géophysique - externe (magnétosphère) et interne (géodynamo) -, géologie, géochimie, océanographie, météorologie, glaciologie, botanique, biologie, géographie et histoire humaines.

Aussi, pour planter le décor, présenterons-nous successivement les différentes pièces de ce puzzle : le Soleil (§ 2), le rayonnement cosmique (§ 3), le géomagnétisme (§ 4), le globe terrestre (§ 5). Nous ferons ensuite une synthèse et un bilan dans la conclusion. Les encarts développent quelque peu mathématiquement certains points théoriques.

2. LE SOLEIL

2.1. EFFET DYNAMO

Le globe solaire est une boule de gaz chaud (rayon $\approx 700\,000$ km) en équilibre sous l'effet des forces de gravitation et de pression. Il comporte un noyau (épaisseur $\approx 160\,000$ km), siège de réactions thermonucléaires de fusion qui, à la base, transforment l'hydrogène en hélium, puis une zone radiative (épaisseur $\approx 440\,000$ km), une zone convective (épaisseur $\approx 100\,000$ km), deux couches superficielles minces, la photosphère (500 km) et la chromosphère (1000 km), et enfin la couronne, très chaude (température $\approx 2 \times 10^6$ K), qui s'étend jusqu'à plusieurs millions de kilomètres. *La photosphère délimite le disque solaire tel que nous le voyons de la Terre.*

Le champ magnétique solaire est créé par les mouvements du gaz interne ionisé (plasma) et les courants électriques qu'ils engendrent. La configuration de base de ce champ est dipolaire, caractérisée par son moment ($M \approx 3,5 \times 10^{29}$ A m² actuellement), et elle est déformée par la rotation de période d'environ 26 jours à l'équateur, ce qui crée une composante quadripolaire (voir Figure 1). Le couplage du champ magnétique avec les mouvements du plasma électriquement conducteur engendre un phénomène d'entretien du champ magnétique, dit "effet dynamo", avec une périodicité à peu près constante de 22 ans depuis le XVII^e siècle, et une inversion des pôles tous les 11 ans environ [1][8]. Pendant le minimum de Maunder (environ 1650-1715), l'activité solaire aurait baissé de 26% et cela aurait été la cause du « Petit Age Glaciaire » (PAG) sur Terre (voir § 5.7) [7][8].

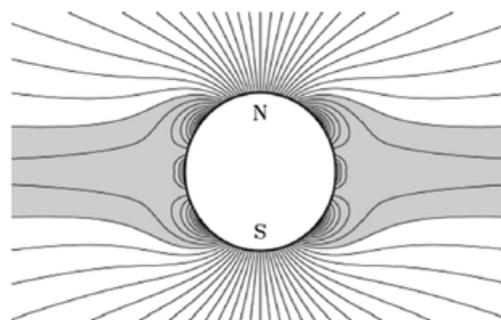


Figure 1 : Champ magnétique solaire.
Coupe dans un plan méridien ([9]).

⁵ S.I. Akasofu (Univ. Alaska), V. Courtillot (IPGP), J.A. Curry (GIT, Climate Forecast Applications Network), F. Dyson (Univ. Princeton), R. Linzen (MIT), H. Svensmark (Danmarks Tekniske Univ.), N. Shaviv (Univ. Jérusalem). Il est à noter que R. Lindzen a fait partie du GIEC et qu'il en a démissionné.

⁶ V. Courtillot (IPGP), F. Gervais (Univ. Tours), C. Gerondeau.

Une région active solaire est constituée, en surface, de plusieurs taches plus ou moins grandes, qui forment des groupes de polarités magnétiques opposées (Nord et Sud) et apparaissent plus sombres car elles sont des endroits où les tubes de champ magnétique émergent à la surface du soleil, et réduisent les transferts de chaleur [1][4][9]. Le nombre de taches, caractérisé par le nombre de Wolf R , est corrélé aux inversions du champ magnétique, et est donc un bon indicateur de l'activité magnétique du soleil. Il est estimé par la relation :

$$R = k(10g + n) \quad (1)$$

où k , g , n désignent respectivement un facteur de calibration, le nombre de groupes de taches et le nombre de taches individuelles. Différentes calibrations ont été réalisées depuis la définition de Wolf en 1848, en particulier pour reconstituer les variations antérieures à 1700. Ce nombre augmente du minimum au maximum et il est minimal au moment de l'inversion. Depuis 1750 on a compté 24 cycles, et nous sommes actuellement au début du cycle n°25 (voir Figure 2).

La durée du cycle d'activité présente des fluctuations de ± 1 an autour de la valeur moyenne, qui sont corrélées avec la température de surface [24]. On peut aussi noter que les amplitudes des cycles sont très variables : petites (cycles nos 5, 6, 7, 12, 14, 16) ou grandes (cycles nos 18, 19, 21, 22). Par analyse spectrale, des périodicités de 54 ans et 204 ans ont aussi été mises en évidence.

2.2. ÉMISSIONS D'ÉNERGIE

La couche superficielle du Soleil (photosphère) rayonne comme un corps noir de température effective 5750 K dans tout le spectre électromagnétique (EM) de l'infrarouge (IR) à l'ultra-violet (UV) en passant par le visible (luminosité : environ $3,86 \times 10^{26}$ W). Par ailleurs, le vent solaire (VS), constitué de particules chargées (protons et électrons), prend naissance dans la couronne et "souffle" en permanence dans l'espace jusqu'à la Terre et au-delà.

Le champ magnétique solaire est "gelé" dans le VS et, dans l'espace interplanétaire, il prend la forme d'une spirale d'Archimède, dite "spirale de Parker" (voir Figure 3), à la façon d'un tuyau d'arrosage de jardin rotatif, par combinaison de la vitesse d'éjection du VS et de la vitesse de rotation du Soleil (environ 26 jours à l'équateur). Il s'étend dans l'espace interplanétaire jusqu'à l'héliopause, au-delà de l'orbite de Pluton.

Le VS a une composante lente située dans le plan équatorial (vitesse de 300 km/s) et une composante rapide au-delà de 15° de latitude solaire (Nord ou Sud), qui dépend de l'intensité du cycle d'activité solaire (vitesse de 500 à 800 km/s). Il met environ 3 jours et demi pour parvenir jusqu'à la Terre, et peut produire des perturbations géomagnétiques par interaction avec le champ magnétique terrestre (voir § 4.2). Une corrélation entre le VS et l'activité cyclonique terrestre a été mise en évidence depuis longtemps [36][45].

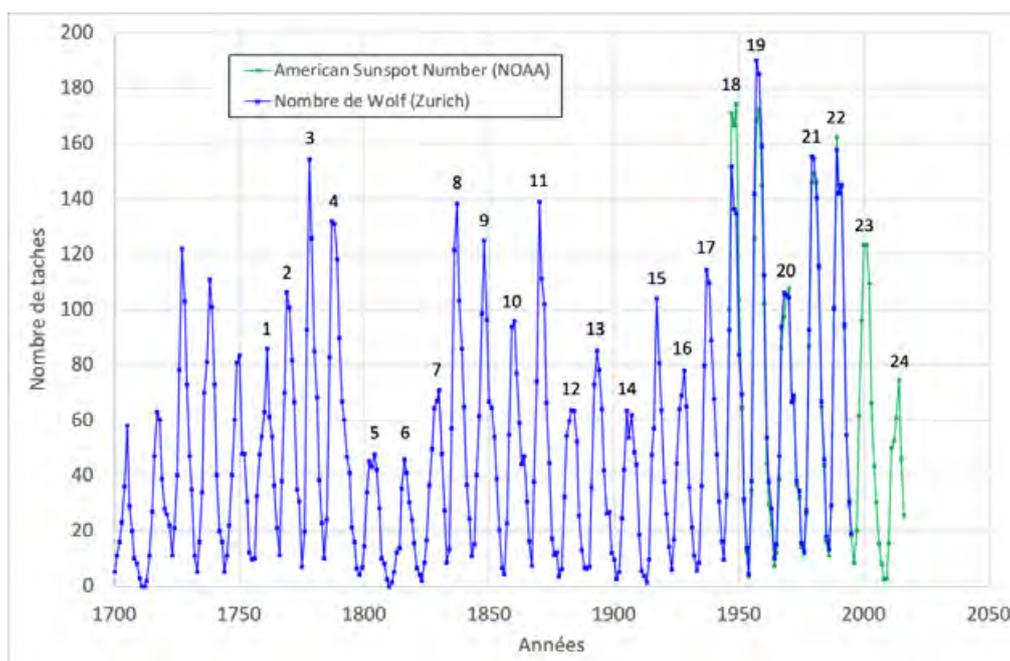


Figure 2 : Variation de l'activité solaire estimée par le nombre de Wolf R_z (données [4] et NOAA).

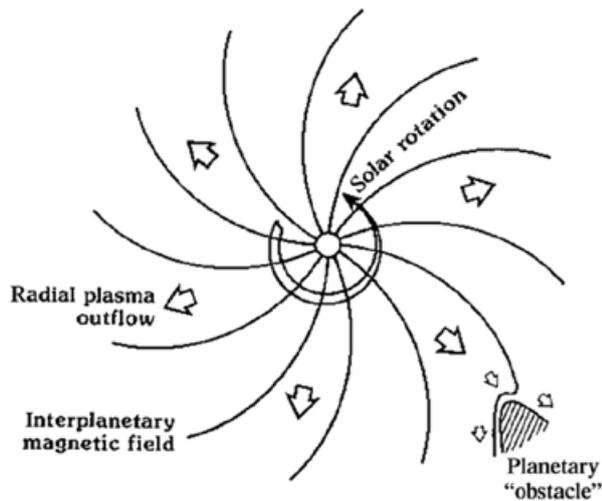


Figure 3 : Spirale de Parker formée par le champ magnétique solaire dans le plan équatorial du soleil ([9]). L'obstacle planétaire en bas à droite est la magnétosphère formée par le champ magnétique d'une planète comme la Terre.

A côté de cette émission "calme", des phénomènes de dissipation irréguliers et cataclysmiques, dus à des instabilités magnétiques et à la rotation différentielle, relevant de la MHD, libèrent de l'énergie à différents niveaux dans l'atmosphère solaire sous forme de particules et de rayonnement EM :

- au niveau de la photosphère et de la chromosphère, dans les régions actives, les éruptions expulsent et accélèrent vers l'extérieur des particules légères, électriquement chargées, du plasma (protons, particules alpha (noyaux d'hélium 4), électrons, etc.), et émettent aussi des ondes EM de courte longueur d'onde (rayons γ et X) ;
- dans la couronne, des éjections très massives vers l'espace (EMC / Coronal Mass Ejections, CME), souvent associées à des éruptions, et constituées d'un plasma similaire, sont produites principalement dans les protubérances instables.

3. LE RAYONNEMENT COSMIQUE

3.1. ORIGINE

Le rayonnement cosmique (RC), en provenance du Soleil et de l'espace galactique entourant le système solaire, n'est pas un rayonnement électromagnétique, car il est constitué de protons (environ 88 %), de particules alpha (environ 9 %), d'électrons (environ 2 %), de neutrons et de particules diverses (environ 1%). Il a un flux au sommet de l'atmosphère terrestre d'environ 10^{-5} W m^{-2} , ce qui est faible par rapport à la constante solaire (voir § 5.3), mais certaines de ces particules sont suffisam-

ment énergétiques pour ioniser les molécules de l'air et en transmuter certains atomes. C'est d'ailleurs l'origine principale du carbone 14, par les collisions de neutrons avec des noyaux d'azote 14, entre 9 et 15 km d'altitude.

Les sources galactiques de RC sont des étoiles chaudes, explosives, situées dans les bras spiraux de notre Galaxie. Des reconstitutions utilisant des données géologiques ont mis en évidence, au cours des derniers 500 millions d'années, une alternance de quatre périodes chaudes et froides. Ces dernières correspondraient à la traversée des bras spiraux par le Soleil et son cortège planétaire, occasionnant un flux de RC important et entraînant, d'après la théorie de la nucléation (voir § 3.2), une période glaciaire sur Terre [11].

3.2. INTERACTION AVEC L'ATMOSPHÈRE

L'idée que le RC produit des variations climatiques en modifiant la couverture nuageuse et le champ électrique, créant ainsi des orages, remonte à 60 ans [37]. On avait aussi remarqué l'anti-corrélation du RC avec l'activité solaire (voir Figure 4). Des études récentes ont étayé cette théorie en montrant une corrélation entre les variations du RC et la couverture nuageuse (environ 2%) très forte aux latitudes moyennes, et assez faible aux tropiques. On peut montrer qu'une telle variation de 2% de la couverture en nuages bas produit une variation de $1,2 \text{ W m}^{-2}$ de l'énergie reçue par le sol, soit à peu près autant que ce qui est imputé à l'effet de serre par le CO_2 (voir § 5.3 & 5.4) [39].

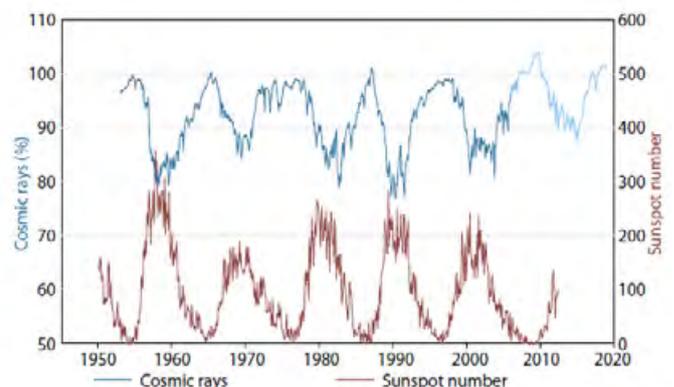


Figure 4 : Anti-corrélation du rayonnement cosmique avec l'activité solaire mesurée par le nombre de taches ([40]).

Sur les deux cycles solaires nos 22 et 23, cette corrélation était plus forte à basse altitude (inférieure à 3,2 km) qu'à moyenne altitude (supérieure à 3,2 km), mais elle semble s'être atténuée depuis (voir Figure 5).

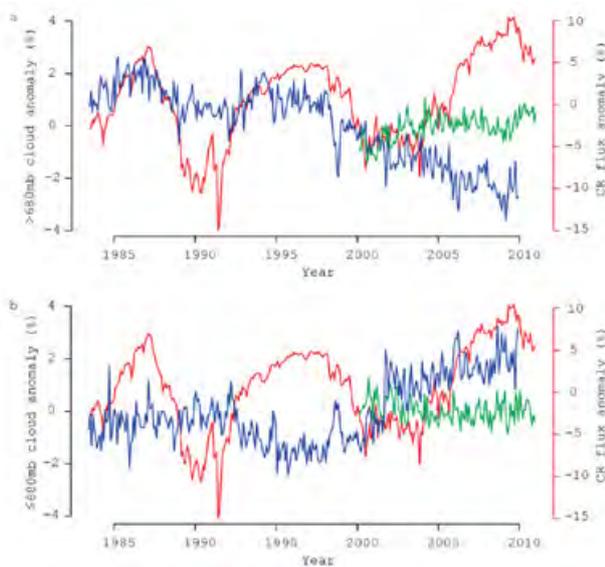


Figure 5 : Corrélation entre la couverture nuageuse à basse (a) et moyenne (b) altitude et les rayons cosmiques dans l'intervalle de temps 1985–2010 ([31]).

Par ailleurs, le RC incident interagit avec le VS, qui lui fait écran, et en effet, on constate une anti-corrélation entre les deux. Quand l'activité solaire est forte, le RC est faible et vice versa. On observe également une modulation du RC par les variations du champ géomagnétique dues à la dérive des pôles magnétiques, qui est plus forte que celle due à la variabilité solaire [28].

Le mécanisme proposé suppose que la formation d'ions induite par le RC dans la stratosphère, entre 15 et 20 km, augmente la croissance de noyaux de condensation nuageux dans les aérosols, par rapport à un processus de nucléation n'impliquant que des particules neutres (voir Figure 6) [47]. Ce processus s'insère dans un schéma plus général faisant intervenir notamment le circuit électrique global (CEG ⁷) (voir Figure 7).

Un projet d'étude en laboratoire, intitulé "CLOUD" (Cosmic Leaving Outdoor Droplets) ⁸, a été élaboré par le CERN entre 1998 et 2009 pour analyser l'interaction d'une source artificielle ajustable de RC avec différents types d'aérosols (vapeur d'eau, dioxyde de soufre, terpènes) créés dans une chambre de 26 m³ contenant de l'azote et de l'oxygène [39]. Les résultats montrent que le taux de nucléation par des ions provenant du RC est multiplié par 100 par rapport à la nucléation par des molécules neutres.

4. LE GÉOMAGNÉTISME

4.1. DYNAMO

Le champ magnétique terrestre est créé par le fluide conducteur formant le noyau externe (rayon compris entre 1300 et 3500 km), constitué de métal en fusion (nickel : 20% ; fer : 80%), et animé de mouvements de rotation et de convection. La configuration globale du

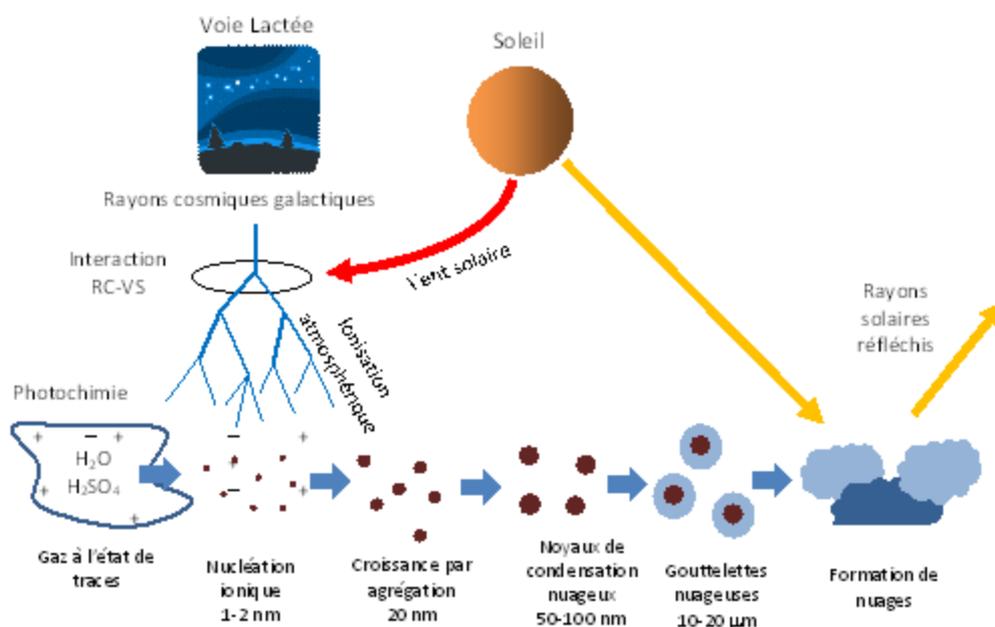


Figure 6 : Mécanisme de nucléation activé par les rayons cosmiques (d'après [40]).

⁷ https://en.wikipedia.org/wiki/Global_atmospheric_electrical_circuit

⁸ https://en.wikipedia.org/wiki/CLOUD_experiment

POINT DE VUE INFLUENCES DIVERSES SUR LE CLIMAT TERRESTRE

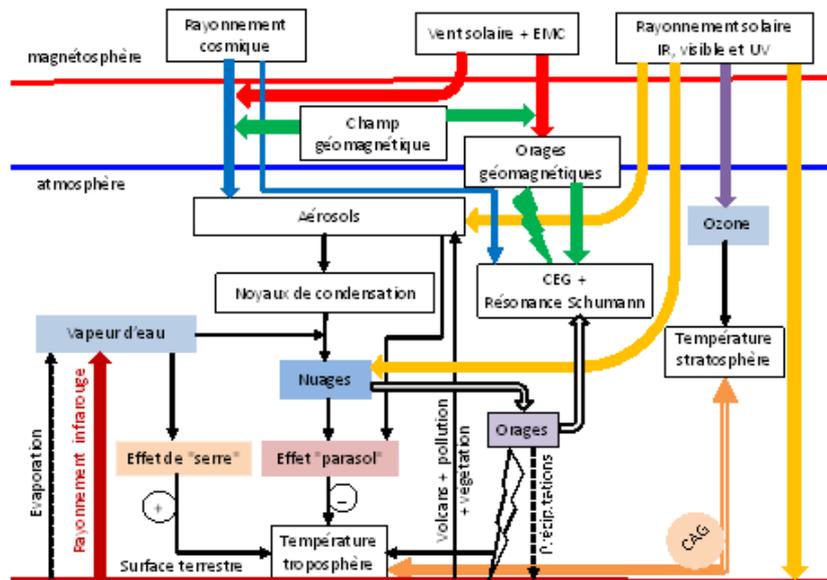


Figure 7 : Processus de couplage entre le rayonnement et le vent solaires, le rayonnement cosmique, le champ géomagnétique, le cycle de l'eau et les nuages (CEG : circuit électrique global ; CAG : circulation atmosphérique générale ; EMC : éjection de masse coronale).

Le champ géomagnétique est aussi dipolaire, caractérisée par son moment dipolaire ($M \approx 7,8 \times 10^{22} \text{ A m}^3$), mais elle est déformée par le VS, et est appelée magnétosphère (voir Figure 8) [1][9]. Le VS abordant la magnétosphère avec une vitesse supersonique, il se forme un choc courbe en avant de la Terre. Précisons également que l'axe du champ magnétique fait un angle de $11^\circ 30'$ avec l'axe de rotation.

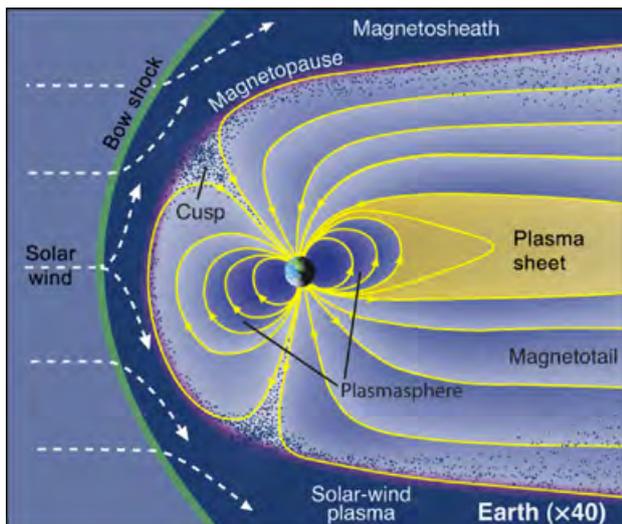


Figure 8 : Champ magnétique terrestre montrant le vent solaire, l'arc de choc et la magnétosphère limitée par la magnétopause (l_g). La Terre n'est pas à l'échelle (x40).

Ce champ magnétique subit des inversions, qui, contrairement au champ magnétique solaire, n'ont pas de périodicités décennales ou séculaires : les intervalles entre deux inversions successives, inscrits dans les roches de la croûte terrestre, peuvent atteindre des centaines de milliers d'années. Ainsi, au cours des 5 derniers millions d'années, le champ géomagnétique s'est inversé 20 fois. Pendant une inversion, le champ ne disparaît pas, mais acquiert une structure qui n'est plus dipolaire, avec plusieurs pôles répartis. Enfin, il existe des événements où le moment dipolaire devient très petit sans s'annuler.

Une dérive des pôles magnétiques est observée depuis 1885, le pôle Nord migrant vers la Sibérie orientale ($86,5^\circ \text{ N}$, 164° E en 2020), le pôle Sud vers l'Océan indien (64° S , 136° E en 2020), avec une décroissance associée du moment magnétique dipolaire (20 % en 500 ans). De plus, il existe des perturbations brèves, les secousses géomagnétiques, régies par le noyau externe, dont les plus récentes ont été enregistrées en 1969, 1972, 1992 et 2003. Les déplacements des pôles magnétiques sont très importants car ils modifient la distribution géographique des incursions du RC dans l'atmosphère [20]. On a ainsi pu mettre évidence une corrélation entre la phase de croissance de secousses géomagnétiques et l'avancée des glaciers alpins [19]. Si l'intensité géomagnétique continuait de décroître au même rythme, cela pourrait mener à une inversion de polarité dans un futur proche, et avoir des conséquences réellement catastrophiques.

4.2. PERTURBATIONS GÉOMAGNÉTIQUES EXTERNES

Au cours de leur rotation, les limites des secteurs du champ magnétique solaire interplanétaire, structuré selon de la spirale de Parker (voir § 2.2), balayent le champ géomagnétique et interagissent avec la magnétosphère terrestre, en y canalisant le VS. Les aurores polaires sont une manifestation visible de l'interaction des particules chargées du VS avec les molécules de l'air qui se produit dans le couloir compris entre les latitudes 65° et 75° (Nord et Sud), dit "zone aurorale", au-dessus de 100 km d'altitude. Les particules n'entrent pas directement dans l'atmosphère côté "jour", mais sont piégées dans la queue de la magnétosphère, côté "nuit" et renvoyées 3 jours plus tard dans les cornets polaires ("cusp" sur la figure 8).

Par ailleurs, ces perturbations pourraient induire une ionisation de l'air plus bas, à environ 10 km d'altitude, ce qui faciliterait la nucléation et la formation de cristaux de glace, donc de cirrus. La couche de cirrus ainsi constituée au niveau de la tropopause produirait une absorption du rayonnement dans la basse stratosphère, et corrélativement une baisse de température dans la troposphère sous-jacente [36][38].

D'autre part, des corrélations montrent qu'un orage géomagnétique, résultant d'une éruption solaire intense, produit une perturbation dans la calotte polaire thermosphérique (entre 95 km et 400 km) qui se propage vers le bas jusqu'à la troposphère (en dessous de 10 km), où elle produit une augmentation brusque de pression et de température, dans un délai de trois jours environ [38]. Il en résulte une intensification des anticyclones subpolaires (sibériens notamment) et du jet-stream [15].

Le couplage géomagnétique a été aussi invoqué pour expliquer la formation de vortex polaires pendant l'hiver de chaque hémisphère [36]. La corrélation entre les perturbations géomagnétiques et l'activité solaire étant établie, un calcul simple montre que la conversion de l'énergie magnétique injectée aux latitudes aurorales (entre 40° et 70°) peut communiquer suffisamment d'énergie cinétique aux masses d'air de la haute troposphère et basse stratosphère, avec des puissances de plusieurs térawatts⁹ [21]. Néanmoins, le mécanisme, relevant de la MHD, n'a pas encore été élucidé.

9. 1 TW (térawatt) = 10¹² W, soit l'équivalent de 1000 centrales nucléaires de 1 GW (= 10⁹ W).

5. LE GLOBE TERRESTRE

5.1. MÉCANIQUE CÉLESTE

À long terme, les variations du climat terrestre sont produites par les variations d'ensoleillement dues aux oscillations de l'axe de rotation du globe terrestre, semblable en cela à une toupie [8] :

- précession (période d'environ 26000 ans) ;
 - nutation (environ 18,6 ans).
- et aux variations des paramètres orbitaux :
- excentricité de l'orbite (environ 100 000 ans) ;
 - obliquité de l'orbite (environ 40 000 ans).

Ces variations périodiques, de périodes très différentes, se combinent pour donner les cycles dits de Milankovitch [5][8][20]. Les perturbations du mouvement de la Terre sont dues aux effets gravitationnels des planètes et de la Lune et peuvent être calculées avec précision jusqu'à 10 millions d'années. Dans certaines analyses des variations de la température régionale, on a pu ainsi détecter une période de 10,4 ans, caractéristique de l'activité solaire, et une période de 18,8 ans, caractéristique du saros (période de répétition des éclipses de Soleil et de Lune), suggérant des effets de marée lunaire [4].

Les géologues brossent un tableau réaliste et cohérent des variations climatiques, en caractérisant clairement l'alternance des périodes glaciaires et interglaciaires [43]. Ainsi, les périodes glaciaires se distinguent par une diminution de l'apport énergétique solaire, la constitution de calottes polaires, l'extension de la banquise, la baisse du niveau marin, l'aridité et l'érosion mécanique des terres ainsi que la baisse de la proportion de CO₂. Les intervalles interglaciaires se distinguent au contraire par l'augmentation importante de l'apport énergétique solaire, la hausse des niveaux marins, des précipitations élevées, une végétation abondante et une hausse du taux de CO₂ dans l'atmosphère. Actuellement, nous serions aux deux tiers d'un intervalle interglaciaire [43].

À l'échelle de l'année, il faut rappeler que les saisons sont provoquées par l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport à la normale au plan de sa trajectoire, l'écliptique (23°26' soit 23,44° en 2020), comme sur Mars (25,19°). Pour la Terre, cet angle diminue actuellement de 0,47" par an. S'il était nul, il n'y aurait pas de saisons sur la Terre et sur Mars. On peut noter que c'est le cas de Mercure (0,03°) et pratiquement aussi de Jupiter (3,12°).

POINT DE VUE INFLUENCES DIVERSES SUR LE CLIMAT TERRESTRE

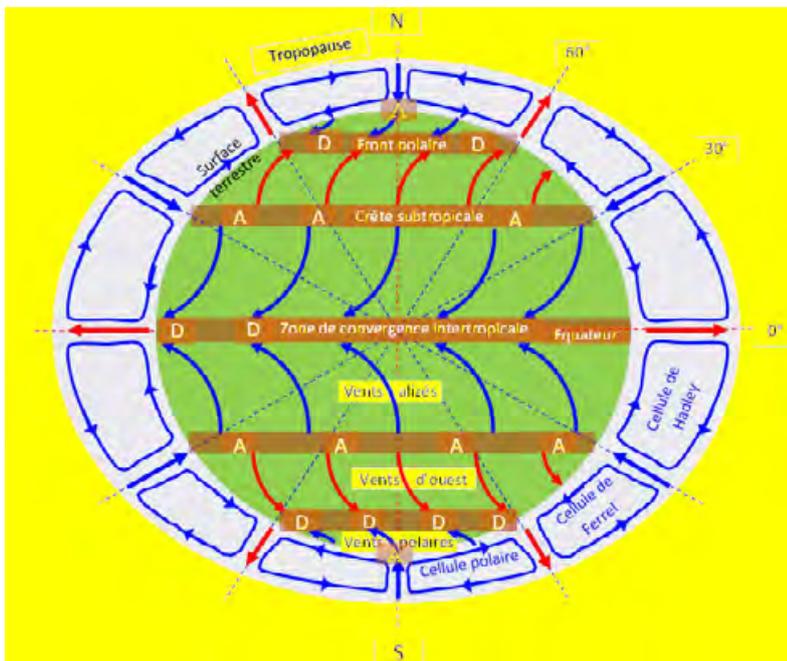


Figure 9 : Structure schématique de l'atmosphère terrestre due à la circulation générale. Les cellules convectives sont représentées en coupe sur la troposphère bleue. Les directions des vents dans la basse troposphère sont indiquées en rouge et en bleu en projection sur le disque terrestre vert. La rotation cause un aplatissement du globe terrestre et de la troposphère, celle-ci étant plus mince aux pôles (8 km environ) qu'à l'équateur (16 km environ). Par souci de clarté, l'épaisseur de la troposphère (entre la surface terrestre et la tropopause) est exagérée par rapport au rayon terrestre (A : anticyclone ; D : dépression).

À cause de l'incidence faible des rayons solaires aux pôles, les zones polaires reçoivent moins d'énergie par m^2 et sont donc plus froides que les zones tropicales, au voisinage de l'équateur.

5.2. MÉTÉOROLOGIE

À proprement parler, la climatologie est l'étude du climat sur de longues durées, par extrapolation des méthodes de la météorologie. Le rôle de la circulation atmosphérique générale (CAG) est fondamental dans les échanges énergétiques entre les différentes latitudes dans le cadre de la météorologie, et donc de la climatologie [6]. On distingue classiquement un système de 3 cellules dans chaque hémisphère (voir Figure 9), qui sont induites par la convection et la rotation terrestre, et ont la forme de rouleaux toroïdaux : celles de Hadley (0° à 30° de latitude Nord ou Sud), celles de Ferrel (30° à 60° N ou S) et les cellules polaires (60° à 90° N ou S) [6]. À noter que l'atmosphère de Vénus, qui tourne 243 fois moins vite que la Terre, ne comporte qu'une cellule de Hadley dans chaque hémisphère.

Les mouvements horizontaux sont régis localement par les gradients de pression et la force de Coriolis (vent géostrophique) et les mouvements verticaux par la gravité, la convection et les gradients de pression. À cause de la force de Coriolis, les vents horizontaux des cellules de Hadley (alizés) et des cellules polaires sont

déviés vers l'ouest, et ceux des cellules de Ferrel (vents d'ouest) vers l'est (voir Figure 9). Les zones limites que constituent l'équateur et les zones polaires jouent des rôles particuliers.

Ainsi, les nuages se forment en majorité au voisinage de l'équateur, dans la zone de convergence intertropicale, à la jonction des cellules de Hadley des deux hémisphères, ainsi qu'aux latitudes tempérées dans des zones dépressionnaires. À l'opposé, les anticyclones mobiles polaires (AMP) seraient un facteur fondamental des variations météorologiques, en repoussant des dépressions cycloniques, qui s'installent au Canada et en Sibérie, et provoquant ainsi des hivers très rigoureux [33].

Au XIX^e siècle, la classification des "climats" de W.P. Köppen (1846-1940)¹⁰ en 5 types de base (tropical, sec, tempéré, continental, polaire), complétés par 5 régimes de précipitations et 6 régimes de températures, qui a été adoptée depuis lors, montre bien l'hétérogénéité géographique des variations climatiques. On voit également que le climat ne peut être caractérisé uniquement par la température. Depuis cette époque, de nombreuses observations au sol ont montré que les variations de la température au lieu d'observation et celles du nombre de Wolf R (voir § 2.1) était corrélées tantôt positivement (en phase), tantôt négativement (en opposition de phase) [4].

10. dont le météorologue A. Wegener (1880-1930), auteur de la théorie de la dérive des continents, était le gendre.

Dans les années 1990, des analyses fines d'observations au sol aux États-Unis ont mis en évidence que ces corrélations étaient opposées des deux côtés des Montagnes Rocheuses, et distribuées dans des régions stables pendant des décennies, maintenues ainsi par des systèmes d'ondes stationnaires hypothétiques. Des observations par satellite viendraient à l'appui de cette thèse [4]. Cela corrobore la difficulté de calculer une température "globale" (voir Annexe 3).

Un système d'oscillations quasi-biennales (OQB) des vents zonaux (i.e. suivant les parallèles de latitude) a été mis en évidence dans la basse stratosphère, entre 20 et 35 km d'altitude dans la bande tropicale entre 12°S et 12° N. Dans les années 1970, on a expliqué ce phénomène à l'aide d'ondes verticales, principalement d'ondes de gravité, mais il n'existe à ce jour aucune explication définitive. Plus récemment, on a mis en évidence la corrélation d'une composante de ce phénomène aux hautes latitudes avec l'activité solaire, montrant l'importance des zones polaires, par où pénètrent les perturbations géomagnétiques (voir § 4.2).

Enfin, l'oscillation de l'Atlantique nord, découverte dans les années 1920, résulte de la différence de pression entre l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande

et de leurs fluctuations. Elle n'a pas de période particulière, mais elle influence le régime des vents d'ouest, et par là-même, le climat de l'Europe de l'Ouest ainsi que les températures océaniques de cette région. À la même époque, l'oscillation australe, de nature analogue et corrélée au phénomène El Niño, a été mise en évidence dans l'océan Pacifique sud.

5.3. BILAN ÉNERGÉTIQUE

Le flux de rayonnement électromagnétique au sommet de l'atmosphère, la constante solaire S , est actuellement d'environ 1367 W m^{-2} , et il varie de 0,1 % au cours d'un cycle. Une variation séculaire de ce flux radiatif a par ailleurs été mise en évidence il y a 50 ans [16]. Diverses études montrent qu'à notre échelle de temps les variations de ce flux dans le visible ne peuvent induire les changements climatiques observés (voir ci-dessous).

Dans une approche globale, valable en toute rigueur sur le long terme à l'équilibre, et pour une sphère homogène, un bilan des flux radiatifs incidents, réfléchis et absorbés (voir Tableau 1) permet d'estimer la température de surface "moyenne" du globe à partir de l'équation de conservation de l'énergie (voir Annexe 1). Ce calcul simple montre également que la variation cyclique de

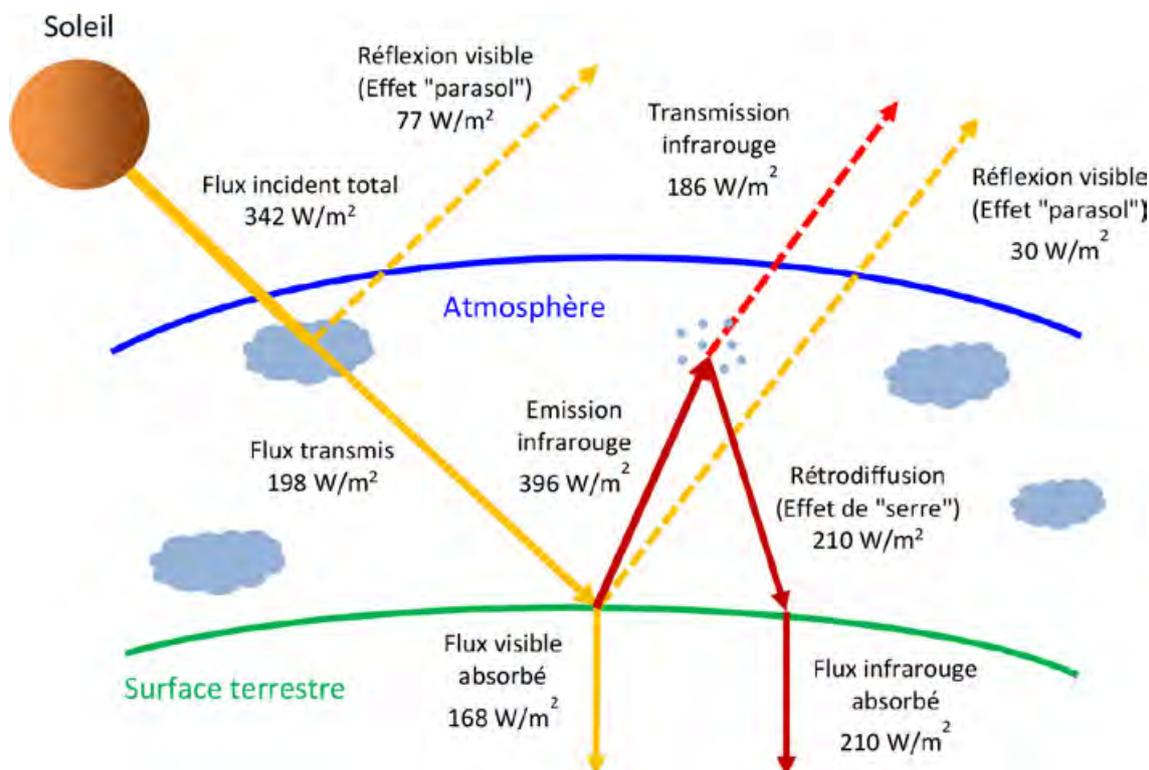


Figure 10 : Représentation schématique du bilan énergétique dans l'atmosphère terrestre (Tableau 1). Les directions des rayons sont indicatives.

POINT DE VUE INFLUENCES DIVERSES SUR LE CLIMAT TERRESTRE

la constante solaire S de 0,1% induit une variation de température de 0,0046°C seulement !

L'effet de "serre" ¹¹ consiste dans le fait que l'énergie absorbée par le sol dans le visible, et qui est réémise dans l'infrarouge en vertu de la loi de Wien (voir Annexe 1), est absorbée et réémise vers le sol par certains gaz de l'atmosphère. Il est nécessaire pour maintenir la surface terrestre à une température permettant la vie, et en éviter le gel, mais il ne doit pas devenir trop grand non plus. En plus des sources radiatives, on avance d'autres forçages, d'une part thermique de 78 W m^{-2} et d'autre part convectif de 24 W m^{-2} , qui, ajoutés à l'effet de "serre", contribuent également à faire varier la température (voir Figure 10).

Tableau 1 : Bilan radiatif terrestre (d'après [5][6][10])

| Sources (+) et puits (-) | + | - |
|--|---------------------|---------------------|
| | (W/m ²) | (W/m ²) |
| Flux solaire $S/4$ | 342 | |
| Réflexion atmosphère | | 77 |
| Réflexion sol | | 30 |
| Flux transmis $(1-\alpha)S/4$ | 235 | |
| Flux absorbé par l'atmosphère (A) | | 67 |
| Flux absorbé par la surface terrestre | 168 | |
| Effet de serre H ₂ O vapeur | 100 | |
| Effet de serre H ₂ O liquide (nuages bas) | 30 | |
| Effet de serre CO ₂ | 55 | |
| Effet de serre O ₃ | 17 | |
| Autres (CH ₄ , N ₂ O, CFC.) | 13 | |
| Effet de serre total (F) | 210 | |
| Bilan total (visible + infrarouge) | 378 | |

Les gaz principaux de l'atmosphère sont l'azote (N₂, 78,08%), l'oxygène (O₂, 20,95%), l'argon (Ar, 0,93%) qui ne sont pas absorbants dans le visible ou l'infrarouge. Parmi les gaz mineurs, les gaz les plus absorbants, causant un effet de "serre", sont : la vapeur d'eau (H₂O, 2500 ppmv¹²), le gaz carbonique ou dioxyde de carbone (CO₂, 360 ppmv), le méthane (CH₄, 1,8 ppmv), le protoxyde d'azote (N₂O, 300 ppbv), l'ozone (O₃, 30 ppbv). Les concentrations sont indiquées dans la basse atmosphère. Il est très révélateur

de constater que de nombreux articles, thèses et livres consacrés à l'effet de "serre" écartent d'emblée la vapeur d'eau.

Et pourtant, résultant de la condensation de la vapeur d'eau (voir §3.2), les nuages sont aussi un élément fondamental dans l'évaluation des échanges radiatifs de la surface terrestre avec l'atmosphère car, assurant une couverture d'au moins 50 %, ils modifient l'albédo α (facteur de réflexion) et la transmittance β , et produisent aussi des effets thermiques lors des changements de phase (vapeur, liquide, glace). Ainsi, on peut calculer qu'une diminution de l'albédo α de 1% produit une élévation de température de 0,64°C, du même ordre que celle due à l'effet de serre de CO₂ (voir Annexe 1). En l'occurrence, une diminution de α de 30 à 29 % produirait une augmentation de $3,6 \text{ W m}^{-2}$ de l'énergie solaire parvenant au sol, pratiquement égale au forçage ΔF obtenu par doublement de la concentration de CO₂ (voir Annexe 2) [5].

Les nuages bas (type stratocumulus) contribuent au refroidissement le jour (effet "parasol"), et au réchauffement la nuit (effet de "couverture"), alors que l'impact des nuages comportant de la glace (types cirrus et cumulonimbus) dépend de leur épaisseur optique. Les nuages constituent donc une source importante d'incertitude dans les "prévisions" climatiques [6]. On sait également que les traînées de condensation, formées dans le sillage des avions, favorisent la génération de nuages de glace artificiels, analogues à des cirrus : l'analogie a pu être constatée lors des attaques du 11 septembre 2001 à New-York [42]. Ainsi, selon les circonstances, l'eau peut produire un refroidissement ou un réchauffement : c'est pourquoi la prise en compte de son cycle complet dans les modèles est fondamentale (voir Figure 7).

5.4. DIOXYDE DE CARBONE

Selon la thèse "carbonique", le principal responsable des variations climatiques actuelles est le gaz carbonique ou dioxyde de carbone (CO₂) d'origine humaine, par augmentation de l'effet de serre qu'il produit. D'aucuns y ont vu une résurgence du problème de la couche d'ozone dans les années 1970, et du dommage causé par les CFC d'origine humaine également. Les sources naturelles et humaines de dioxyde de carbone peuvent être estimées

11. L'analogie avec une serre botanique vitrée est un peu abusive car, dans le cas de la serre, la vitre en verre ou en polyéthylène bloque surtout les échanges convectifs, tout en restant partiellement transparente au rayonnement infrarouge, alors que dans le cas de la Terre, c'est essentiellement le rayonnement infrarouge qui est piégé dans la basse atmosphère.

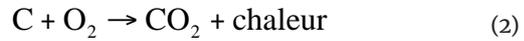
12. ppmv = parties par million en volume, soit 10^{-6} ; ppbv = parties par milliard (billion) en volume, soit 10^{-9} .

et comparées par leur « équivalent carbone »¹³ (voir Tableau 2) [5]. Il faut noter que le CO₂ en lui-même n'est pas un gaz polluant, qu'il est inerte, incolore, non toxique à la concentration de 500 ppmv, et que les inquiétants panaches de fumée d'usine souvent montrés à dessein ne sont pas du CO₂ à l'état pur !

Tableau 2 – Bilan massique du carbone atmosphérique en 2005 [5]

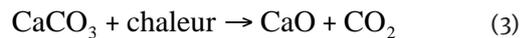
| Sources (+) et puits (-) | + Gt C/an | - Gt C/an |
|--------------------------|-----------|-----------|
| Respiration végétale | 120±30 | |
| Photosynthèse | | 120±30 |
| Dégazage océanique | 90±20 | |
| Absorption océanique | | 90±20 |
| Respiration humaine | 0,6 | |
| Combustibles fossiles | 7,3 | |
| Fabrication du ciment | 0,7 | |
| Brûlis | 1,5 | |
| Émissions volcaniques | 0,1 | |
| Bilan total | 9,6 | |

L'équation chimique élémentaire de production de CO₂ par la combustion de charbon (carbone C) peut s'écrire simplement :



On remarquera que, en plus de produire du CO₂, cette réaction est exothermique, c'est-à-dire qu'elle produit de la chaleur, ce qui est justement la source d'énergie exploitée. Dans la combustion d'un hydrocarbure, composé de carbone et d'hydrogène, il y a en plus production de vapeur d'eau !

À l'inverse, la production de ciment résulte de la réduction du carbonate de calcium en oxyde de calcium par chauffage entre 600 et 900°C, selon la réaction suivante, absorbant, au contraire, de l'énergie (endothermique) :



L'idée de l'effet de "serre" atmosphérique remonte à J. Fourier (1768-1830), et elle a été développée par d'autres physiciens du XIX^e siècle, la première estimation avec le dioxyde de carbone étant due à S. Arrhenius (1859-1927)¹⁴ [4],[13][22]. Un calcul simple met en relation les variations

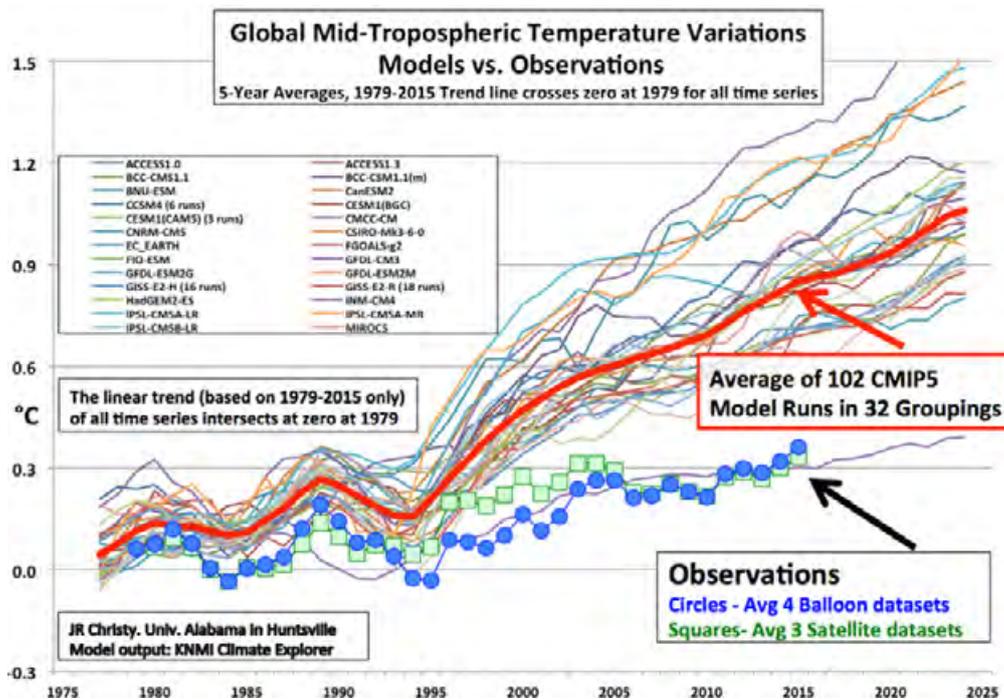


Figure 11 : Comparaison entre les simulations numériques du GIEC et les observations par satellite et ballon [18].

13. Gt : Gigatonne, soit 10⁹ tonnes, c'est-à-dire un milliard de tonnes. Par ailleurs, les conversions en équivalent carbone sont telles que : 1 ppmv CO₂ = 2,12 Gt C et : 1 kg CO₂ = 0,273 kg C.

14. dont la jeune militante écologiste suédoise Greta Thunberg est une descendante.

de concentration en CO₂ et les variations de température (voir Annexe 2). On s'aperçoit que l'augmentation de température induite par une augmentation du taux de CO₂ atmosphérique ne dépasserait guère 0,7 °C, si tant est qu'une température globale ait un sens (voir Annexe 3) et que la concentration de CO₂ soit uniforme dans l'atmosphère. Diverses études montrent d'ailleurs que la proportion de CO₂ humain / CO₂ naturel dans l'atmosphère est surestimée par le GIEC [14][25][26].

La température "moyenne" calculée par divers modèles numériques, *sauf un modèle russe (INM-CM4), est contredite par les observations et en diverge à partir de 1995* (voir Figure 11) [18]. À noter que dans son quatrième rapport (2007), le GIEC déclarait : « *Nous devrions reconnaître que nous avons affaire à un système chaotique d'équations non linéaires couplées, et que de ce fait la prédiction à long terme du climat dans le futur est impossible* ». Ainsi, certains parlent maintenant de "variations" ou "changements" climatiques, plutôt que de "réchauffement".

Par ailleurs, il est étonnant que la Terre ait subi dans les deux millénaires passés des variations de température supérieures à celles constatées actuellement, avec une amplitude d'au moins 2°C, alors que la teneur en CO₂ était apparemment à peu près constante (C = 280 ppmv) : on a en effet connu l'optimum médiéval (900-1300) et le petit âge glaciaire (1300-1800) [5][7]. Plus loin dans le temps, durant le précédent interglaciaire (dit « Éémien »), il y a environ 120 000 ans, la concentration en CO₂ (290 ppmv) était inférieure à la valeur actuelle, et la température étaient plus élevée de 2 à 4 °C. Plus récemment, avant que le bois ne soit remplacé par le charbon puis le fioul et le gaz, le chauffage des habitations devait produire une quantité non négligeable de CO₂ (voir Tableau 2, poste "brûlis").

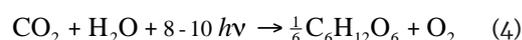
Ceci pose le problème de la fiabilité des analyses de carottes glaciaires, en contradiction avec des mesures végétales (nombres de stomates), et remet en question l'apparente stabilité du CO₂ pendant ces périodes. De plus, il a été démontré *que les variations de CO₂ sont plutôt la conséquence, et non la cause, des variations de température*, avec lesquelles elles semblent corrélées [26]. Ce sont les variations de température qui produiraient les variations de CO₂ par absorption ou dégazage des océans [5][26].

On peut aussi se demander pourquoi la planète Mars, dont la température "moyenne" est de 210 K (avec un pic

de rayonnement de corps noir à 13,8 μm) et la pression au sol de 610 Pa, dont l'atmosphère est constituée de gaz carbonique à 95%, soit 2500 fois plus que sur Terre, ne subit pas un effet de "serre" plus important [5].

5.5. VÉGÉTATION ET VOLCANISME

La photosynthèse est un puits de CO₂, correspondant à sa fixation par les plantes en présence d'eau H₂O et de lumière (photons d'énergie *hν*) pour donner des sucres C₆H₁₂O₆ et de l'oxygène O₂ :



L'influence du dioxyde de carbone sur la croissance végétale fait l'objet d'expériences dans le cadre du projet FACE (*Free-Air CO₂ Enrichment*) avec des taux de CO₂ de l'ordre de 550 ppmv [12]. Cela se traduit par l'augmentation de la croissance (10 à 25 %) visible notamment sur l'épaisseur des cernes annuels des arbres.

L'augmentation de CO₂ a une influence différente selon le type de plante : les plantes en C₃ (95% des plantes vertes) assimilent une partie du CO₂ absorbé et ont une photo-respiration (réciproque de la réaction (4)) importante, alors que les plantes en C₄ (5% : graminées tropicales, maïs, sorgho, canne à sucre) assimilent la totalité du CO₂ absorbé, avec une photo-respiration très faible. Chez ces dernières, le métabolisme est rendu possible grâce à une structure particulière des feuilles (anatomie de type Kranz).

Les plantes en C₄, dont le rendement photosynthétique est très supérieur à celui des plantes en C₃, sont responsables de la fixation d'environ 30% du carbone sur Terre. Il semblerait que *la réponse de la végétation terrestre soit en proportion constante par rapport à l'augmentation de CO₂* [17]. Avec la montée des océans envisagée ci-dessous, la submersion de la végétation côtière par de l'eau salée a également une action sur la végétation. Certains genres, dits halophytes, sont déjà adaptés à cet environnement (Tamarix, Acacia, Eleagnus, etc.). Là-encore, il semblerait que les plantes en C₄ soient mieux dotées pour vivre dans des environnements salins.

Il est bien sûr souhaitable que le déboisement à grande échelle soit réduit afin que le puits de carbone constitué par les arbres continue son action bénéfique. En particulier, la culture intensive de biocarburants pourrait

15. https://fr.wikipedia.org/wiki/Lac_m%C3%A9romictique

nuire au maintien des forêts primaires. Or on sait que le défrichement dû à l'agriculture augmente l'érosion et l'aridification (abaissement des nappes phréatiques). Cela entraîne l'augmentation de l'albédo, et par suite la baisse de la température [43].

Le rôle des volcans est très important dans l'évolution du climat, car il cause un refroidissement par les gaz éjectés lors des éruptions, et favorise la production d'aérosols [4]. Ainsi, en 1783, B. Franklin, en visite à Paris, avait constaté un refroidissement du temps, dû à l'éruption du Laki, quelques mois auparavant [8]. Après une suite de tels refroidissements, quand ces causes se dissipent, il n'est pas étonnant que l'atmosphère se réchauffe. Entre le XVII^e siècle et le début du XXI^e, des éruptions notables ont marqué la période "industrielle" (Tambora en 1815, Krakatoa en 1883, Katmai en 1912, Pinatubo en 1991).

Par ailleurs, *les volcans sont des sources importantes de dioxyde de carbone*. Ainsi certains lacs de cratère méromictiques¹⁵ (Lacs Nyos et Monoun au Cameroun) piègent-ils d'énormes quantités de CO₂ dans leurs eaux profondes, qu'ils libèrent brutalement lors d'éruptions limniques¹⁶ (environ 1000 km³) pouvant provoquer des catastrophes humaines (plus de 1700 morts au lac Nyos en 1986).

On sait également qu'il existe des volcans sous-marins, qui contribuent au réchauffement des océans, comme le Mayotte aux Comores. De plus, depuis une vingtaine d'années, on a mis en évidence des "supervolcans", dont les caldeiras sont dix fois plus grandes que celles des volcans "ordinaires", et dont les éruptions éjectent mille fois plus de matière (environ 1000 km³) que ceux-ci. L'une d'elles, due au volcan Toba (Sumatra), il y a 73000 ans environ, pourrait expliquer que, parmi les nombreuses espèces humaines coexistant auparavant, seule l'espèce humaine actuelle (*H. sapiens*) subsiste.

5.6. OCÉANS

La profondeur "moyenne" des océans, égale au rapport de leur volume à leur surface, est d'environ 3,8 km. L'augmentation de la température "moyenne" de la basse atmosphère est censée entraîner l'augmentation du volume océanique, donc de la hauteur "moyenne" des océans :

- d'une part, par simple dilatation d'une couche superficielle (zone thermocline) d'environ 600 m d'épaisseur où se produit le transfert thermique à l'interface air-eau ;
- d'autre part, par la fonte des glaces qui ne sont pas flottantes, dites "inlandsis" (Antarctique, Groenland, glaciers).

Notons que, pour les glaces flottantes (Arctique, icebergs), leur mélange avec les eaux océaniques ne produit pas d'augmentation du volume océanique, à cause de la propriété étonnante de l'eau selon laquelle la glace a un volume spécifique plus grand que l'eau liquide, et donc se rétracte en fondant ! Quant aux glaciers, *leur fonte partielle peut être bénéfique en approvisionnant en eau douce certaines régions désertiques du globe* (Équateur, Bolivie, Pakistan., etc.), *et certains d'entre eux sont même en progression* (Groenland, Pakistan, Nouvelle-Zélande, etc.).

Dans ces conditions, on trouve que la dilatation thermique due à une élévation de température de 0,7°C entraînerait une montée du niveau moyen d'environ 11 cm. Par ailleurs, la fonte complète de l'inlandsis produirait une élévation du niveau moyen d'environ 70 m. À noter que si l'on tient compte du fait que la surface des continents diminue par submersion, cette valeur doit être revue à la baisse, puisque la surface marine augmente. De plus, le GIEC reconnaît lui-même que *cette fonte totale prendrait plusieurs millénaires, mais il est fort possible que la Terre n'entre d'ici là dans une autre période glaciaire* [5][43].

Toutefois, comme pour la température "globale", il est difficile de définir un niveau "moyen" des océans à cause des marées, des courants marins chauds, de l'hétérogénéité du fond marin et finalement des irrégularités du géoïde [5], si bien que seule l'étude par zone est probante [43]. Ainsi on sait, par exemple, que *la Méditerranée accuse une différence de niveau d'une quarantaine de mètres entre la zone la plus élevée, le long de la côte espagnole, et la zone la plus basse, au sud-est de la Crète* [5]. De plus, certaines zones du géoïde s'enfoncent à cause du refroidissement et du tassement de la croûte terrestre, et donnent l'impression que c'est le niveau marin qui monte [5]. Les séismes peuvent aussi s'accompagner de la montée et la descente de certaines zones, comme ce fut le cas lors du fameux séisme du Kanto (région de Tokyo) au Japon en 1923.

16. https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89ruption_limnique

17. La conductivité thermique de l'eau est environ 20 fois supérieure à celle de l'air à 20°C sous 1 atmosphère.

Il est aussi reconnu que les océans jouent un rôle fondamental dans la régulation thermique par les brassages dus aux courants en eaux profondes et les échanges avec l'atmosphère¹⁷, et jouent ainsi le rôle de "chauffe-eau" de notre planète [43]. Cela est matérialisé par la circulation thermohaline, qui comprend, notamment, le Gulf Stream dans l'Atlantique nord et le Kuroshio dans le Pacifique nord, ainsi que par le phénomène El Niño dans le Pacifique sud [5].

Quant à la prétendue "acidification" des océans, il faudrait plutôt parler de *baisse de l'alcalinité*, car l'eau de mer est encore actuellement alcaline (pH ≈ 8), et les variations de son pH sont heureusement modérées par l'effet tampon [5]. Rappelons que les coquillages et les crustacés utilisent le dioxyde de carbone dissous dans l'eau de mer pour synthétiser le carbonate de calcium nécessaire à l'élaboration de leur coquille ou carapace !

5.7. ANTHROPOSPHÈRE

On désigne ainsi l'environnement proche de l'être humain et leurs interactions mutuelles. Des observations naturelles (avancée/recul des glaciers, croissance des chênes, etc.), de l'activité humaine (natalité, mortalité, dysenterie, prix du blé et du sel, dates des vendanges, qualité du vin, etc.) et thermométriques (série de Manley, de 1659 à nos jours) ont été compilées depuis des siècles, et corroborent les corrélations précédentes avec les aléas climatiques [7].

Elles mettent en évidence une alternance de périodes chaudes et froides depuis 3000 ans environ. En particulier, le « Petit Age Glaciaire » (PAG) est corrélé aux minima de Maunder (environ 1645-1715) et Dalton (environ 1790-1830) de l'activité solaire. Toutefois, on observe *des intermèdes froids dans les périodes chaudes et, inversement, des intermèdes chauds dans les périodes froides*. Ainsi, pendant le PAG, la Mer de Glace a connu une dizaine de périodes alternées d'avancée et de recul entre 1570 et 1856 [7]. De même, certaines années (1420, 1718-19, 1778-79, 1788, 1811, 1846) ont connu des étés caniculaires pendant le PAG. À l'opposé, pendant le "réchauffement" présumé du XX^e siècle, la décennie 1962-1972 a été particulièrement froide et humide, favorisant le développement de la grippe de Hong-Kong en 1968-69.

De plus, le « Petit Optimum Médiéval » (POM) européen (900-1300) correspond à un réchauffement en Europe et à un refroidissement en d'autres parties du monde, dont l'Australie, ce qui corrobore les phénomènes mentionnés au §5.2. Plus récemment, la canicule de 1893 a touché la France, l'Allemagne, l'Europe du nord, mais ni la Finlande, l'Italie et l'Espagne [7].

La concentration "moyenne" C de dioxyde de carbone "anthropogénique" a été corrélée à la population mondiale P entre 1800 et nos jours (voir Figure 12). Une loi de puissance reliant C et P a ainsi été trouvée [27] :

$$C = 7,72 P^{1,35} \quad (5)$$

mais malgré cette forte corrélation, aucun mécanisme n'est proposé. En fait, la concentration C est déduite par la procédure suivante : aux mesures effectuées depuis 1958 au sommet du volcan Mauna Loa, en Polynésie, on soustrait les variations saisonnières, et la valeur constante 280 ppm de la concentration "préindustrielle". On préjuge ainsi de l'origine humaine du résultat, *mais il n'y en a aucune preuve directe*.

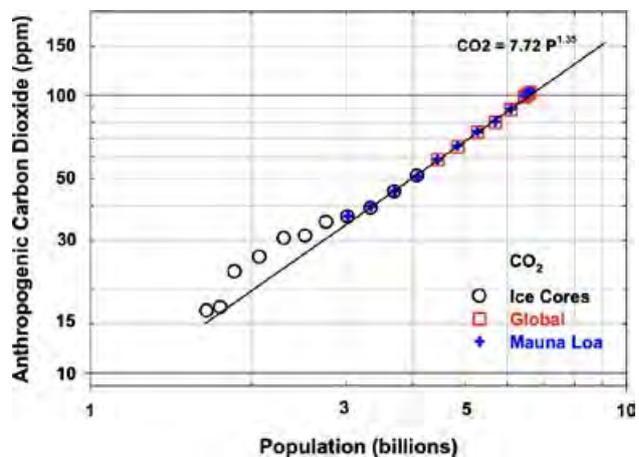


Figure 12 – Corrélation entre la concentration en CO₂ supposée d'origine humaine et la population mondiale (billion = milliard) [27].

Une méthode plus scientifique, mais délicate, pour distinguer le CO₂ d'origine humaine de celui d'origine naturelle (voir Tableau 2) repose sur sa richesse isotopique en ¹²C et ¹³C, les plantes absorbant de préférence le ¹²CO₂ parce qu'il est plus léger. Cependant, tout n'est pas aussi simple, car les plantes en C₄ (voir §5.5) absorbent plus facilement le ¹³CO₂ que les plantes en C₃ !

18. Et ce d'autant plus que, comme les ruminants, la Terre « pète », en libérant des gaz à effet de "serre" lors des éruptions volcaniques !

D'un point de vue théorique, si le réchauffement climatique dû au CO₂ croît avec l'activité humaine, donc la démographie, il serait judicieux de mettre en équation le mécanisme mis en jeu et de faire intervenir la variable "population" *P* dans les modèles climatiques (voir Annexe 3). On peut d'ailleurs mentionner à cette occasion le concept de "Gaïa", élaboré par Lovelock et Margulis, selon lequel la Terre se comporterait comme un organisme vivant¹⁸ et ferait son autorégulation [35]. Cette théorie séduisante est contestée et certains aspects semblent mis en défaut par l'évolution actuelle du climat [29].

Malgré tout, les modèles analytiques élaborés depuis une soixantaine d'années donnent les tendances climatiques [16], et montrent, en particulier, que *des variations non-linéaires peuvent induire un comportement chaotique* [10]. À l'opposé, des processus dissipatifs (orages) produisent une stabilisation à long terme (circuit électrique global), tout comme les oscillations quasi-biennales, qui y contribuent aussi.

Par ailleurs, les phénomènes climatiques possèdent des constantes de temps *finies* (périodicités, temps de relaxation) qui peuvent être déduites des équations traitées et des observations paléo-climatiques [8][43]. Or les approximations simplistes des variations sont souvent montrées comme étant linéaires, avec une croissance indéfinie (constante de temps infinie), peu réaliste et peu "physique" à long terme. Si les réponses sont rapides, il est difficile d'expliquer les décennies "froides" (1962-72) en Europe depuis 1958, périodes pendant lesquelles le CO₂ accuse malgré tout une hausse constante.

6. CONCLUSION

Ainsi, le coupable apparemment tout trouvé qu'est le dioxyde de carbone dû à l'industrie humaine, même s'il y contribue modestement, ne doit pas faire oublier que les causes principales de l'évolution du climat à moyen et long terme sont : les cycles de Milankovitch, l'activité solaire, le géomagnétisme, le rayonnement cosmique et le volcanisme. Les phénomènes examinés ici montrent des périodicités et des constantes de temps très diverses, allant de plusieurs mois à plusieurs années. Les saisons sont l'archétype de ces variations, que tout un chacun vit chaque année. Les climats du passé montrent que *l'augmentation du taux de CO₂ atmosphérique suit l'augmentation de la température et non l'inverse* [43].

Il apparaît que des mesures suffisamment précises des paramètres les plus pertinents n'ont pu être effectuées que depuis quelques années, et que l'on manque actuellement de recul. *Plusieurs décennies seraient sans doute encore nécessaires pour apprécier les tendances actuelles du changement climatique* [5]. Des corrélations étroites sont indéniablement établies entre les activités solaire et géomagnétique et les phénomènes atmosphériques. La difficulté est d'en établir les relations de causalité et les mécanismes dans le cadre de modèles quantitatifs. Il existe d'autres indices de variation relatifs au Soleil (diamètre, flux UV), au géomagnétisme (circuit électrique global, ionosphère, résonance de Schumann¹⁹) et au cycle de l'ozone, que nous n'avons pu exposer ici.

Néanmoins, il faut mettre ces « balbutiements » en regard des approximations faites dans les gros modèles numériques sur la prise en compte des nuages et des interactions sol-troposphère-stratosphère-magnétosphère, qui sont encore mal connues (notamment les oscillations quasi-biennales), au bénéfice de la corrélation apparente et trompeuse entre les variations de CO₂, de la production de carbone supposé d'origine humaine et de la température. Or les nuages, en faisant varier l'albédo et l'absorption de l'atmosphère, sont un facteur crucial des irrégularités météorologiques qui doit être mis au premier plan, et dont la modélisation ne peut qu'être améliorée.

Comme le montre la classification des climats de Köppen, il est aussi simpliste de caractériser le "climat" planétaire uniquement par la seule variable "température". Les variations sont en effet qualifiées de "globales" par la thèse "carbonique", alors qu'elles sont différentes dans les deux hémisphères (calottes polaires en particulier), et que le dioxyde de carbone est uniformément réparti [5]. Ce fait est d'ailleurs renforcé par *l'impossibilité de définir une température moyenne qui ait un sens physique à court terme* [23]. Plus généralement, il existe des dissymétries dans tout l'environnement terrestre (géoïde, champ géomagnétique, flux de RC, OQB, répartitions inégales des océans, des courants marins, des volcans, des vents et de la population entre les deux hémisphères) et des mouvements terrestres eux-mêmes (orientation de l'axe de rotation) qui rendent l'analyse des "aléas" climatiques extrêmement complexe [43].

19. https://en.wikipedia.org/wiki/Schumann_resonances

En fait, cette controverse met en évidence le manque de compréhension de mécanismes élémentaires : la formation de noyaux de condensation, la réaction des plantes à des variations de la concentration en CO₂, etc. Les rayons cosmiques, "modulés" par l'activité solaire, jouent un rôle fondamental dans cette théorie de l'évolution du climat, réactualisation d'idées anciennes. Il faut mentionner également une théorie récente, selon laquelle les rayons cosmiques, "modulés" cette fois-ci par le champ géomagnétique, pourraient expliquer certaines mutations génétiques des êtres vivants, et de l'espèce humaine en particulier [30]. Cela montre bien le rôle fondamental que jouent les champs magnétiques dans l'évolution de la vie sur la Terre.

Notre époque semble dominée par le paradoxe suivant. D'un côté, le monde "bouge", évolue, et nous devons nous adapter à cette évolution ; d'un autre côté, certains changements, jugés inquiétants par le GIEC, sont rejetés et nous devons les combattre. *D'aucuns se demandent même si la réémergence de l'effet de serre, juste après la catastrophe de Tchernobyl (1986), ne serait pas liée à une tentative de l'industrie du nucléaire pour se réhabiliter* [2]. Quoi qu'il en soit, la prudence conseillerait d'éviter l'implantation de centrales nucléaires à proximité de failles géologiques, comme à Fukushima et à Tsuruga, au Japon, et l'enfouissement de déchets radioactifs au fond de lacs, comme dans le lac Karatchaï, en Russie !

En parallèle, plusieurs méthodes de géo-ingénierie pour enrayer les perturbations climatiques sont actuellement proposées, l'une d'elles consistant à déclencher la pluie artificielle dans des zones désertiques. À côté des technologies d'ensemencement polluantes des nuages, utilisant notamment l'iodure d'argent²⁰, il existe des technologies "propres" utilisant des décharges électriques [32][46]. Une autre stratégie consisterait à créer des cirrus artificiels, qui formeraient une couverture (effet "parasol") et contribueraient à refroidir le climat [34]. Une branche technologique, l'ingénierie, ou génie, climatique en émerge, qui doit être pratiquée avec prudence et la maîtrise des conséquences de son action sur l'environnement [3][5][44].

Bénéficiant des observations de Tycho Brahé, très précises pour leur époque, Johannes Kepler put démontrer que l'orbite de Mars n'était pas un cercle mais une

ellipse²¹. Il réfuta ainsi les modèles en vogue reposant sur le "postulat du cercle", tel celui, complexe, de Ptolémée constitué d'un échafaudage astucieux de cercles principaux (déférents) et secondaires (épicycles)²², avec un décentrement (équant) préfigurant les foyers ! De tels modèles décrivaient tant bien que mal les mouvements apparents des planètes (notamment les rétrogradations) vus de la Terre, mais pas les mouvements réels. De même, il faut rester prudent vis-à-vis de la démarche actuelle *qui s'efforce de décrire certaines apparences climatiques à l'aide du postulat d'un concept unique, incomplètement démontré, faute d'observations adéquates*.

BIBLIOGRAPHIE – OUVRAGES GÉNÉRAUX

- [1] R. Berton, "La magnétohydrodynamique", Masson, 1990.
- [2] J.L. Daly, "The Greenhouse trap", Bantam, 1989.
- [3] C. Hamilton, "Earthmasters - The dawn of the age of climate engineering", Yale University Press, 2013.
- [4] D.V. Hoyt, K.H. Schatten, "The role of the sun in climate change", Oxford University Press, 1997.
- [5] A. Legendre, "L'homme est-il responsable du réchauffement climatique", EDP Sciences, 2009.
- [6] M. Leroux, "Global warming. Myth or reality ? - The erring ways of climatology", Springer, 2005.
- [7] E. Le Roy-Ladurie, D. Rousseau, A. Vasak, "les fluctuations du climat - De l'an mil à aujourd'hui", Fayard, 2011.
- [8] E. Nesme-Ribes, G. Thuillier, "Histoire solaire et climatique", Belin, coll. Regard sur la Science, 2000.
- [9] T. Spohn, D. Breuer, T.V. Johnson, "Encyclopedia of the solar system", Elsevier, 2014.
- [10] T. Stocker, "Introduction to climate modelling", Springer, 2011.
- [11] H. Svensmark, N. Calder, "The chilling stars - A new theory of climate change", Totem Books, 2003.

BIBLIOGRAPHIE – ARTICLES

- [12] E.A. Ainsworth, S.P. Long, "What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂", *New Phytologist*, vol. 165, pp. 351-372, 2005.
- [13] S. Arrhenius, "On the influence of Carbonic acid in the air upon the temperature of the ground", *Phil. Mag.*, vol. XXXI, pp. 237-276, 1896.

20. https://fr.wikipedia.org/wiki/Ensemencement_des_nuages

21. https://fr.wikipedia.org/wiki/Les_Somnambules

22. dont la somme constitue d'ailleurs un développement en série de Fourier !

- [14] E.X. Berry, "Human CO₂ emissions have little effect on atmospheric CO₂," *Int. J. Atm. Oc. Sci.* vol. 3(1), pp. 13-26, 2019.
- [15] V. Bucha, V. Bucha, Jr, "Geomagnetic forcing of changes in climate and in the atmospheric circulation," *J. Atm. Sol. Terr. Phys.*, vol. 60(2), pp. 145-169, 1998.
- [16] M.I. Budyko, "The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth," *Tellus*, vol. 21, pp. 611-619, 1969.
- [17] L.A. Cernusak, V. Haverd, O. Brendel, D. Le Thiec, J.-M. Guehl, M. Cuntz, "Robust response of terrestrial plants to rising CO₂," *Trends Plant Sci.*, vol. 24 (7), pp. 578-586, 2019.
- [18] J.R. Christy, "Testimony," U.S. House Committee on Science, Space & Technology, 2 février 2016.
- [19] V. Courtillot, Y. Gallet, J.-L. Le Mouél, F. Fluteau, A. Genevey, "Are there connections between the Earth's magnetic field and climate?," *Earth Plan. Sci. Lett.*, vol. 253, pp. 328-339, 2007.
- [20] V.A. Dergachev, S.S. Vasiliev, O.M. Raspopov, H. Jungner, "Impact of the geomagnetic field and solar radiation on climate change," *Geomag. Aeron.*, vol. 52(8), pp. 959-976, 2012.
- [21] A. J. Dessler, "Some problems in coupling solar activity to meteorological phenomena" in "Possible relationships between solar activity and meteorological phenomena" NASA SP-366, pp. 187-197, 1973.
- [22] J.-L. Dufresne, "Jean-Baptiste Joseph Fourier et la découverte de l'effet de serre," *La Météorologie*, vol. 53, pp. 42-46, 2006.
- [23] C. Essex, R. McKittrick, B. Andresen, "Does a global temperature exist?," *J. Non-Equilib. Thermodyn.*, vol. 32, pp. 1-27, 2007.
- [24] E. Friis-Christensen, K. Lassen, "Length of the solar cycle: an indicator of solar activity closely associated with climate," *Science*, vol. 254(5032), pp. 698-700, 1991.
- [25] F. Gervais, "Tiny warming of residual anthropogenic CO₂," *Int. J. Mod. Phys. B*, vol. 28(13), 1450095, 2014.
- [26] H. Harde, "What Humans contribute to atmospheric CO₂: comparison of Carbon cycle models with observations," *Earth Sci.*, vol. 8(3), pp. 139-159, 2019.
- [27] D. Hofmann, "The exponential increase in anthropogenic atmospheric carbon dioxide and its relation to human population growth," *Conference on Climate Variability and Change* N° 21, P5.11, 2009.
- [28] N. A. Kilifarska, V. G. Bakmutov, G. V. Mel'nik, "Geomagnetic field and climate: causal relations with some atmospheric variables," *Izvestiya, Phys. Sol. Earth*, vol. 51(5), pp. 768-785, 2015.
- [29] J.W. Kirchner, "The Gaia hypothesis: conjectures and refutations," *Clim. Change*, vol. 58, pp. 21-45, 2003.
- [30] V.V. Kuznetsov, N.D. Kuznetsova, "Reversals and excursions appear to govern life evolution".
- [31] B.A. Laken, E., Pallé, J., Calogovic, E.M., Dunne, "A cosmic ray-climate link and cloud observations," *J. Sp. Weather Sp. Clim.*, vol. 2, A18, 2012.
- [32] S. Larigaldie, "Proposal : a method for limiting the climatic heating and for the triggering of rainfall," *Bull. CEAS*, Avril, pp. 18-20, 2019.
- [33] M. Leroux, "L'anticyclone mobile polaire, relais des échanges méridiens : son importance climatique," *Géodyn.*, vol. 2(2), pp. 162-167, 1987.
- [34] U. Lohmann, B. Gasparini, "A cirrus cloud climate dial?," *Science*, vol. 357(6348), pp. 248-249, 2017.
- [35] J.E. Lovelock, L. Margulis, "Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the Gaia hypothesis," *Tellus*, XXVI, vol. 1-2, pp. 1-10, 1974.
- [36] I. Mironova, B. Tinsley, L. Zhou, "The links between atmospheric vorticity, radiation belt electrons, and the solar wind," *Adv. Space Res.*, vol. 50, pp. 783-790, 2012.
- [37] E.P. Ney, "Cosmic Radiation and the weather," *Nature*, vol. 183, pp. 451-452, 1959.
- [38] W.O. Roberts, R.H. Olson, "New evidence for effects of variable solar corpuscular emission on the weather," *Rev. Geophys. Sp. Phys.*, vol. 11(3), pp. 731-740, 1973.
- [39] H. Svensmark, "Cosmoclimatology: a new theory emerges," *Astron. Geophys.*, vol. 48(1), pp. 18-24, 2007.
- [40] H. Svensmark, "FORCEMAJEURE - The Sun's role in climate change," *The Global Warming Policy Foundation, GWPF Report 33*, 2019.
- [41] R.S.J. Tol, "Population and trends in the global mean temperature," *Atmosfera*, vol. 30(2), pp. 121-135, 2017.
- [42] D.J. Travis, A.M. Carleton, R.G. Lauritsen, "Contrails reduce daily temperature," *Nature*, vol. 418, p. 601, 2002.
- [43] B. Van Vliet-Lanoë, "Le réchauffement climatique actuel : une évolution thermique naturelle aux forçages oubliés," <https://www.youtube.com/watch?v=yihyLp5aVsU>, 2019.
- [44] J. Varet, "La géo-ingénierie climatique," *Encyclopédie du développement durable*, N° 210, 2014.
- [45] J.M. Wilcox, P.H. Scherrer, L. Svalgaard, W.O. Roberts, R.H. Olson, R.L. Jenne, "Influence of solar magnetic sector structure on terrestrial atmospheric vorticity," *J. Atmos. Sci.*, vol. 31, pp. 581-588, 1974.
- [46] Y. Yang, X. Tan, D. Liu, X. Lu, C. Zhao, J. Lu, Y. Pan, "Corona discharge-induced rain and snow formation in air," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 46(5), pp. 1786-1792, 2018.
- [47] F. Yu, R. P. Turco, "From molecular clusters to nanoparticles: Role of ambient ionization in tropospheric aerosol formation" , *J. Geophys. Res.*, vol. 106, D5, pp. 4797-4814, 2001.

Annexe 1

EQUILIBRE RADIATIF

La loi de déplacement de Wien, conséquence de la loi de Planck, relie la longueur d'onde λ_m (en m) du maximum du spectre d'un corps noir à sa température T_s (en K) :

$$\lambda_m T_s = 2,89777291 \times 10^{-3} \quad (6)$$

Si l'on adopte pour le soleil une température de surface de 5780 K, on obtient : $\lambda_m \approx 0,5 \mu\text{m}$. Le soleil rayonne donc dans le visible. Par contre, pour la surface terrestre, avec $T_s = 288 \text{ K}$, on aura : $\lambda_m \approx 10 \mu\text{m}$. *La terre rayonne donc dans l'infrarouge.* De même, pour Mars, avec $T_s = 210 \text{ K}$, on aura : $\lambda_m = 13,8 \mu\text{m}$.

Si T est la température caractéristique au sol, S la constante solaire, A le flux absorbé par l'atmosphère, F le flux dû au forçage radiatif, le bilan énergétique à l'équilibre stationnaire s'écrit [10] :

$$\underbrace{\frac{1}{4}(1-\alpha)S}_{\text{irradiation incidente}} - \underbrace{A}_{\text{absorption atmosphérique}} + \underbrace{F}_{\text{effet de serre}} - \underbrace{\varepsilon\sigma T^4}_{\text{réémission par le sol (corps gris)}} = 0 \quad (7)$$

où $\alpha < 1$ et $\varepsilon < 1$. La température l'équilibre T_0 est telle que :

$$T_0 = \sqrt[4]{\frac{\frac{1}{4}(1-\alpha)S - A + F}{\varepsilon\sigma}} \quad (8)$$

Pour un albédo $\alpha \approx 0,3$, une émissivité $\varepsilon = 0,97$, une constante solaire $S = 1367 \text{ W m}^{-2}$, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W K}^{-4} \text{ m}^{-2}$, et compte tenu des données du tableau 1, on obtient : $T_0 = 288 \text{ K}$, soit 15°C environ. C'est la température standard mesurée à la surface de la terre aux latitudes moyennes. Sans effet de serre ($F = 0$), la relation (8) montre que cette température descendrait à : $T_0 = -17^\circ\text{C}$. Examinons maintenant quelques variations.

1) Toutes choses restant égales par ailleurs, la relation (8) montre que les variations relatives de T_0 et S sont liées par la relation :

$$\frac{\delta T_0}{T_0} = \frac{1}{4} \left[1 + 4 \frac{F - A}{(1-\alpha)S} \right]^{-1} \frac{\delta S}{S} \quad (9)$$

Avec $A = 67 \text{ W m}^{-2}$, $F = 210 \text{ W m}^{-2}$, $\alpha = 30 \%$, on en déduit qu'une variation relative $\delta S/S \approx 0,1 \%$ par cycle ne peut produire qu'une variation relative de température $\delta T_0/T_0 \approx 0,016 \delta S/S \approx 0,000016$, soit $\delta T_0 = 0,000016 \times 288 \approx 0,0046 \text{ K}$, soit $0,0046^\circ\text{C}$. *C'est négligeable devant l'effet de serre de CO_2* (voir Annexe 2).

2) Si maintenant on suppose S constante, une variation $\delta\alpha$ de l'albédo α entraîne une variation de la température δT_0 telle que :

$$\frac{\delta T_0}{T_0} = -\frac{1}{4} \left[1 + 4 \frac{F - A}{(1-\alpha)S} \right]^{-1} \frac{\alpha}{1-\alpha} \frac{\delta\alpha}{\alpha} \quad (10)$$

Avec $A = 67 \text{ W m}^{-2}$, $F = 210 \text{ W m}^{-2}$, $\alpha = 30 \%$, on en déduit qu'une variation absolue $\delta\alpha = -1 \%$, donc relative $\delta\alpha/\alpha \approx -3,3 \%$ produit une variation relative de température $\delta T_0/T_0 \approx 0,067 \delta\alpha/\alpha = 0,00067$ soit $\delta T_0 = 0,0022 \times 288 \approx 0,64 \text{ K}$, soit $0,64^\circ\text{C}$, *ce qui est le double de l'effet de serre de CO_2* (voir Annexe 2).

3) Enfin, si l'on fait varier seulement le forçage F d'une quantité δF , cela produit une variation de la température δT_0 telle que :

$$\frac{\delta T_0}{T_0} = \frac{1}{4} \frac{\delta F}{\frac{1}{4}(1-\alpha)S - A + F} \quad (11)$$

Avec $A = 67 \text{ W m}^{-2}$, $F = 210 \text{ W m}^{-2}$, $\alpha = 30 \%$, on en déduit qu'une variation absolue $\delta F = 2 \text{ W m}^{-2}$ du forçage produit une variation relative de température $\delta T_0/T_0 \approx 0,13 \%$ donc $\delta T_0 = 0,0013 \times 288 \approx 0,38 \text{ K}$, soit $0,38^\circ\text{C}$. *C'est la valeur du forçage obtenu par l'effet de "serre" de CO_2* (voir Annexe 2).

Annexe 2

EFFET DU CO₂

L'écart à l'équilibre de ce flux, appelé forçage radiatif, est dû à un excès ou un déficit de gaz à effet de serre (H₂O, CO₂, N₂O, CH₄...) et, dans le cas de CO₂, il a pour expression [5][10]:

$$\Delta F_{CO_2} = a \operatorname{Ln} \frac{C}{C_0} \quad (12)$$

où C est la concentration effective (ppmv), et C_0 la concentration d'équilibre. Les constantes valent : $a = 5,35 \text{ W m}^{-2}$ et $C_0 = 280 \text{ ppmv}$, qui est la valeur estimée à peu près constante jusqu'au XVII^e siècle. Les mesures actuelles donnent : $C \approx 410 \text{ ppmv}$ ($\Delta F = 2,04 \text{ W m}^{-2}$) et on anticipe un doublement ($C = 560 \text{ ppmv}$) d'ici la fin du XXI^e siècle ($\Delta F = 3,71 \text{ W m}^{-2}$).

La relation entre une augmentation du forçage radiatif ΔF et la hausse de la température d'équilibre ΔT_0 est alors donnée par l'expression suivante, que l'on obtient en prenant la dérivée logarithmique de (8), toutes choses (S , α , A) restant égales par ailleurs :

$$\Delta T_0 = b \Delta F ; \quad b = \frac{T_0}{(1-\alpha)S + 4(F-A)} \quad (13)$$

Le coefficient b est appelé sensibilité climatique. Avec $T_0 = 288 \text{ K}$ et $F = 378 \text{ W m}^{-2}$, on obtient : $b \approx 0,19 \text{ K m}^2 \text{ W}^{-1}$. Des augmentations du forçage $\Delta F = 2,04 \text{ W m}^{-2}$ et $\Delta F = 3,71 \text{ W m}^{-2}$ doivent produire les variations respectives de température d'équilibre : $\Delta T_0 = 0,39 \text{ K} = 0,39 \text{ }^\circ\text{C}$ et $\Delta T_0 = 0,71 \text{ K} = 0,71 \text{ }^\circ\text{C}$, c'est-à-dire 0,14 % et 0,25 % en valeurs relatives.

Il en résulte de ce calcul que la prévision du GIEC ($\Delta T_0 = 1,15 \text{ }^\circ\text{C}$) est surestimée, car elle repose sur une détermination de la sensibilité climatique qui ne tient pas compte de l'effet de serre ($F = 0$, $A = 0$) : $b = 288/235/4 \approx 0,31 \text{ K m}^2 \text{ W}^{-1}$ [5] ! De plus, comme le montre la relation (12), le forçage radiatif par le CO₂ varie comme le logarithme de la concentration, ce qui signifie qu'il va tendre vers une quasi-saturation, et que son importance doit être sans doute tempérée.

Annexe 3

TEMPÉRATURE ET ANOMALIE DE TEMPÉRATURE "GLOBALES"

L'anomalie de température "globale" ΔT est définie par une moyenne pondérée [23] :

$$\Delta T = \frac{\sum_{i=1}^N A_i \left[T(r_i, t_M) - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M T(r_i, t_j) \right]}{\sum_{i=1}^N A_i} \quad (14)$$

calculée en N points d'un maillage de la surface terrestre, chacun étant pondéré par l'aire A_i de la maille qui l'entoure, et sur M instants temporels. La maille a des dimensions angulaires constantes, typiquement, $5^\circ \times 5^\circ$. Comme il y a des lacunes dans le maillage on doit faire des interpolations entre les points connus pour les combler.

La pertinence de la température moyenne ainsi évaluée est battue en brèche par un argument thermodynamique : *la température étant une grandeur intensive, une somme de températures n'a pas de sens physique pour un système hors-équilibre, ce qui est le cas de la Terre* [23]. Il est possible de définir mathématiquement une infinité de températures moyennes, certaines augmentant avec le temps, d'autres diminuant. Une tentative dans ce sens a été faite, en pondérant la température par la population P_i de la maille i au lieu de l'aire A_i dans la relation (14) [41]. Le résultat montre que la température augmente moins qu'avec la pondération par l'aire ! Depuis sa création, le GIEC a d'ailleurs été amené à revoir son mode de calcul de la température "globale".

De plus, *ce ne sont pas des grandeurs intensives, comme la température ou la pression, qui régissent directement des phénomènes dynamiques, mais leurs gradients* (cf. convection et vent géostrophique). Ainsi, il est abusif de prétendre qu'un réchauffement du climat cause davantage d'événements comme des tempêtes et des cyclones [23]. ■

L'ONERA signataire de l'initiative Zero Emission Aviation (ZEMA)

par Marc Lesturgie, directeur des affaires internationales, ONERA



13 institutions de recherche à travers le monde ont uni leurs forces pour constituer l'initiative « Zero Emission Aviation» (ZEMA), afin de lancer une recherche pionnière pour une aviation durable

Le Sommet de l'Aviation de Berlin a réuni, le 24 novembre 2020, les principaux acteurs de l'industrie et de la recherche aéronautique. À cette occasion, 13 pays ont déclaré leur engagement pour une aviation durable et respectueuse de l'environnement.

L'objectif est de rendre un vol d'avion sans pratiquement aucun impact environnemental négatif. Pour réaliser cette transformation, des instituts de recherche – l'ONERA, BME, CAE, CIRA, DLR, ILOT, INCAS, INTA, KARI, NLR, TsAGI, TU Vienna, et VZLU - ont uni leurs forces pour former l'initiative «Zero Emission Aviation» (ZEMA).

L'initiative ZEMA considère que l'aviation durable ne sera pas réalisée si l'industrie se limite à une démarche d'évolution incrémentale, et recommande notamment le développement de nouvelles technologies et de carburants durables. Ainsi les chercheurs prévoient de considérer des sources d'énergie alternatives associées au développement de nouvelles technologies de propulsion pour réduire les émissions.

UNE AUTRE PISTE : OPTIMISER LE TRAFIC AÉRIEN

Les signataires de la déclaration souhaitent également travailler à l'optimisation du trafic aérien, un autre volet d'intervention qui nécessite des évolutions techniques pour la mise en œuvre en toute sécurité de routes aériennes optimales compte tenu des contraintes climatiques ; la mobilité urbaine et les avions électriques sont aussi des domaines d'intérêt pour atteindre cet objectif d'aviation durable.

Pour chacun des instituts de recherche, la déclaration ZEMA marque également un engagement à développer une aviation durable qui répond aux besoins et aux attentes de la société.

Cinq années ont déjà passé depuis l'accord de Paris sur le changement climatique, accord qui prévoyait que les émissions nettes des gaz à effet de serre devraient être nulles à partir de la seconde moitié de ce siècle. Le Green Deal européen appelle l'Europe à être climatiquement neutre d'ici 2050, un objectif qui, comme l'a souligné la Commission européenne, nécessitera des investissements considérables.

L'ONERA : MULTIDISCIPLINARITÉ POUR PRÉPARER LE FUTUR

Depuis plusieurs années déjà, l'ONERA mène de nombreux projets présentant des concepts d'avion innovants (NOVA, AMPERE, DRAGON...), avec un objectif commun : réduire leur impact environnemental. Il n'a pas attendu que cette problématique soit dans l'air du temps pour s'y atteler.

En France, les instances institutionnelles (CORAC, GIFAS) se sont d'ailleurs tournées vers l'ONERA, expert neutre pluridisciplinaire de son domaine, pour contribuer à faire émerger une vision nationale sur les trajectoires d'émissions de CO2 pour l'aviation en 2050. ■



Les différentes facettes du *cirrus homogenitus*

par Étienne Terrenoire, ONERA

INTRODUCTION

En fonction des caractéristiques moteurs des avions, de la nature de leurs émissions et des conditions météorologiques ambiantes aux altitudes de vol, une traînée de condensation (condensation trails ou *contrails* en anglais) est susceptible de se former dans le sillage d'un avion. Les conditions météorologiques pilotent la durée de vie de ces traînées qui, dans certaines situations (par exemple sursaturation de l'air par rapport à la glace), persistent jusqu'à plusieurs heures après le passage d'un avion. En cas de fort vent aux altitudes de vol, en plus de s'étendre verticalement (de l'ordre de la centaine de mètres), les contrails peuvent s'étendre de manière horizontale (de l'ordre de plusieurs dizaines de kilomètres) et prennent alors éventuellement l'aspect d'un voile nuageux. La photo de la Figure 1 permet de distinguer des contrails jeunes, quelques minutes après le passage de l'avion, de type linéaire et débutant par certains un étalement horizontal. Ces nuages de cristaux de glace d'origine anthropique sont officiellement dénommés *Cirrus homogenitus* par l'Organisation météorologique mondiale lorsque leur durée de vie est supérieure à 10 minutes.



Figure 1 : *Cirrus homogenitus* jeunes en phase de dispersion et de diffusion (Photo E. Terrenoire).

Dans le contexte général de la volonté de réduction de l'impact climatique de l'aviation, les contrails font l'objet d'une attention particulière. En cas de persistance prolongée, les contrails produisent un déséquilibre du transfert radiatif¹ atmosphérique terrestre significatif, engendrant un forçage radiatif effectif estimé en 2018 entre 17 et 98 mW/m² avec une valeur médiane estimée

à 57,4 mW/m² (Lee et al., 2020) représentant ainsi 2,5% du forçage radiatif anthropique total. Ils induisent un déséquilibre du transfert radiatif atmosphérique terrestre en renvoyant vers l'espace le rayonnement solaire de courte longueur d'onde mais également en absorbant le rayonnement infrarouge terrestre (Haywood et al., 2009). Ces valeurs, bien que modestes en comparaison du forçage anthropique global estimé en 2011 à 2,3 (1,1-3,3) W/m² (Lee et al., 2020 ; IPCC, 2013) sont, pour le domaine en haut de fourchette, potentiellement supérieures à l'ensemble des autres composantes du forçage lié aux émissions de l'aviation et notamment le CO₂. En 2011, les émissions de l'aviation représentaient 4% du forçage radiatif anthropique global (voir Figure 2). La majorité du forçage radiatif de l'aviation serait due aux nuages induits (Aircraft Induced Cloud ou AIC en anglais) (Kärcher, 2018 ; Lee et al., 2020).

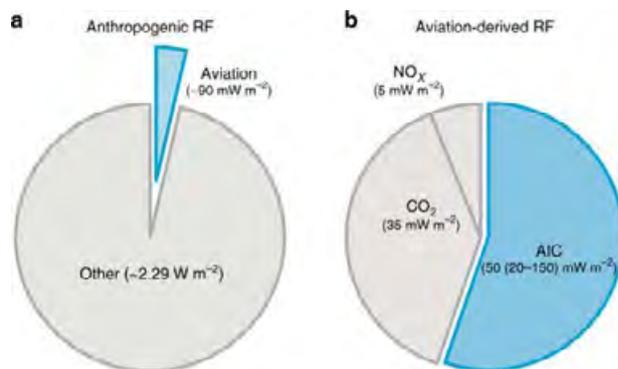


Figure 2 : Répartition du forçage radiatif anthropique global dû à l'aviation pour l'année 2011.

On peut noter la grande amplitude entre les valeurs minimale et maximale de la fourchette estimée. Pourquoi un tel écart ? Tout simplement car l'estimation, via la mesure ou la modélisation, de l'impact radiatif et a fortiori climatique d'un contrail n'est pas une mince affaire.

L'INTERACTION JET – TOURBILLON - ATMOSPHÈRE

Dans le cas des avions commerciaux classiques, un contrail est le résultat de l'interaction entre les

1. Grandeur physique permettant de quantifier (W/m²) l'ampleur de déséquilibre radiatif terrestre engendré par un agent perturbateur tel qu'un contrail. Une valeur positive indique un réchauffement alors qu'une valeur négative correspond à un refroidissement.

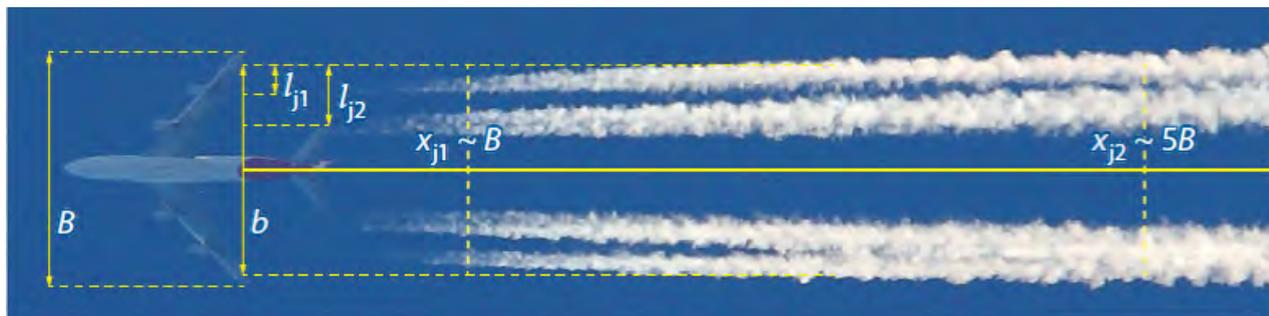


Figure 3: Localisation du début d'interaction entre le tourbillon de bout d'aile et le moteur externe (x_{j1}) et entre le tourbillon de bout d'aile et le moteur interne (x_{j2}). Selon la formule de Jacquin et Garnier (1996) pour un avion de ligne de type quadriréacteur et d'envergure B . L'interaction entre le tourbillon marginal et le moteur externe débute à une envergure (B) derrière l'avion et l'interaction entre le tourbillon marginal et le moteur interne débute à cinq envergures derrière l'avion ($5B$). Photographie provenant de Wikipédia, copyright Firooo2/Flagstaffotos.

tourbillons marginaux d'un avion, les jets moteur et l'air ambiant où se situe la trajectoire de l'avion correspondant ici à la haute troposphère. La distance (noté x sur la figure 3) à partir de laquelle l'interaction entre le jet moteur et les tourbillons marginaux débute est dépendante de la distance entre la position du moteur par rapport au bout d'aile et donc du type d'avion (biréacteurs, quadriréacteurs). Cette interaction met en jeu non seulement des phénomènes aérodynamiques complexes mais également un grand nombre de processus thermodynamiques et physico-chimiques macro et microscopiques. La prise en compte de l'ensemble des processus impliqués est un véritable défi pour les modélisateurs qui, de surplus, disposent d'un nombre de données limitées pour se comparer à l'observation étant donné le défi posé par la caractérisation expérimentale de ces cirrus anthropiques, même si l'exploitation d'observations satellitaires des contrails est une alternative intéressante.

Schmidt (1941) et Appleman (1953) furent les pionniers dans l'élaboration d'un critère simple dit Critère de Schmidt-Appleman (CSA) permettant de statuer sur le déclenchement ou non de la formation d'un contrail. Le CSA révisé depuis par Schumann (1996) est basé sur des caractéristiques moteurs telles que l'efficacité de

propulsion et l'indice d'émission en eau associées aux variables de température et d'humidité caractérisant les conditions météorologiques atmosphériques ambiantes aux altitudes de vol.

Au cours des 30 dernières années, la communauté scientifique s'est attelée à modéliser précisément l'interaction gaz/particules ayant lieu au sein du panache dans le sillage de l'avion et correspondant à l'ensemble des processus microphysiques impliqués dans la formation des contrails tels que la nucléation, la coagulation, la condensation, l'évaporation. Les travaux actuels sont orientés vers l'étude de l'impact de l'utilisation des carburants alternatifs et plus particulièrement les changements qu'ils sont susceptibles d'engendrer sur les caractéristiques intrinsèques des contrails découlant de leur usage. En effet, la composition chimique des émissions joue un rôle majeur pour la formation des contrails. Pour comprendre pourquoi il est nécessaire de détailler les principales étapes de formation d'un contrail, plaçons-nous dans un cas atmosphérique favorable à la formation et à la persistance d'un contrail. L'essentiel des mécanismes microphysiques conduisant à la formation de cristaux de glace ont lieu dans les premiers instants après la sortie du moteur (voir Figure 4).

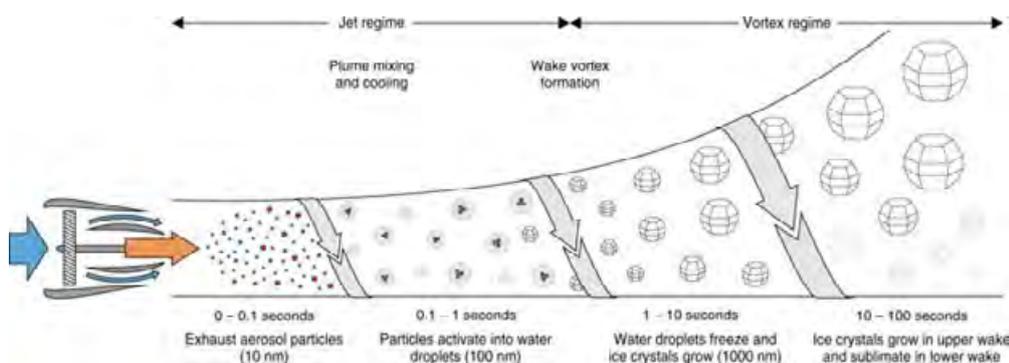


Figure 4 : Evolution physicochimique du panache d'un moteur d'avion (à gauche) depuis l'éjection jusqu'à 100 s après l'éjection (extrait de Kärcher, 2018).

Tout d'abord, pendant les premiers dixièmes de seconde après l'émission, le jet chaud (600 K) composé d'agents chimiques en phases gazeuse et aqueuse ainsi que de particules ultrafines de type suies (de taille inférieure à 100 nm) subit une violente détente en se mélangeant avec l'air glacé environnant (225 K). Le taux de dilution entraînant un refroidissement soudain du panache est essentiellement fonction de la vitesse d'éjection, de la température des gaz émis et de la température ambiante. Le panache est alors en sursaturation par rapport à l'eau liquide et les gouttelettes d'acide sulfurique hydraté (issu du soufre contenu dans le carburant actuel Jet A-1 d'origine fossile) renforcent l'hydratation des particules de suies qui grossissent rapidement grâce à la vapeur d'eau présente dans le panache condensant sur celles-ci. Si la concentration en nombre de cristaux formés dans le panache est assez importante (par exemple supérieure à 10 000 particules par cm³ pour une taille proche du micromètre), la traînée de condensation devient alors visible. Au-delà d'une seconde après l'éjection du moteur, le tourbillon de bout d'aile provoque un enroulement du jet moteur (phase vortex) et un mécanisme de subsidence² s'appliquant au contrail fraîchement formé. Son intensité est alors contrôlée essentiellement par la masse de l'avion ainsi que par les conditions de stabilité atmosphérique et d'humidité ambiante. Les cristaux de glace pris dans la subsidence subissent un réchauffement par compression adiabatique provoquant pour une partie leur sublimation mais l'entraînement d'air frais humide pendant la descente permet également de maintenir la saturation par rapport à la glace et donc la présence des cristaux, à condition bien sûr que la masse d'air ambiante soit suffisamment hydratée (zone de sursaturation). Au sein de la phase tourbillon, l'équilibre entre sublimation et sursaturation pilote le nombre de cristaux persistant dans le panache.

Dans le même temps, un tourbillon secondaire provoque l'arrachement d'une partie de la couche supérieure du contrail provoquant la remontée des cristaux concernés qui continuent à grossir tant que la sursaturation par rapport à la glace perdure, ce qui dépend une nouvelle fois principalement des conditions d'humidité et de température ambiante à cette altitude (8-13 km) (à droite sur la Figure 4). Par la suite, l'influence du tourbillon de bout d'aile diminue (phase de dissipation) et les conditions météorologiques ambiantes (ex : cisaillement, turbulence, stabilité thermique) pilotent la dispersion du contrail jusqu'à son évaporation parfois

plusieurs heures après sa naissance marquant ainsi sa fin de vie. Cette description du cycle de vie d'un contrail permet de comprendre que les émissions moteurs (gaz et particules) et l'ensemble des mécanismes thermodynamiques et physico-chimiques conduisant à la naissance d'un contrail sont fortement interdépendants.

INFLUENCE DES CONDITIONS AMBIANTES ATMOSPHÉRIQUES

Au cours des 10 dernières années, les variables clés influençant la durée de vie d'un contrail ont été étudiées, notamment grâce aux outils de modélisation de la mécanique des fluides. Par exemple, Lewellen (2014), grâce à une approche de type Large Eddy Simulation (LES) pour la modélisation de la turbulence montre que plus la température de l'air ambiant est basse, plus la durée de vie d'un contrail est élevée (plus de 30 heures pour une température de 205 K) comparée à une dizaine d'heures uniquement pour une température de 225 K. De plus, toujours d'après le même jeu de simulations, une valeur plus élevée de la sursaturation de l'air ambiant par rapport à la glace renforcera inévitablement la durée de vie du contrail de quelques heures (voir Figure 5). Les calculs démontrent également que le nombre de particules de glace commence à diminuer environ 100 s après l'émission (décroissance en loi de puissance) (voir graphiques a et b de la Figure 5). La décroissance comme expliqué précédemment est due à la sublimation préférentielle des petits cristaux de glace encapsulés dans le tourbillon subissant la descente. Cette diminution du nombre de petit cristaux s'accompagne d'une croissance de la masse totale de glace présente dans les premières heures de vie du contrail (supérieure à 5 heures) avant que celui-ci subisse une décroissance prononcée à son tour et disparaisse, excepté pour une température particulièrement froide (205 K), ce qui est cependant peu probable aux altitudes de croisière des avions de ligne (pression correspondante de 250 hPa par exemple).

2. En météorologie : mouvement de l'air vers le sol.

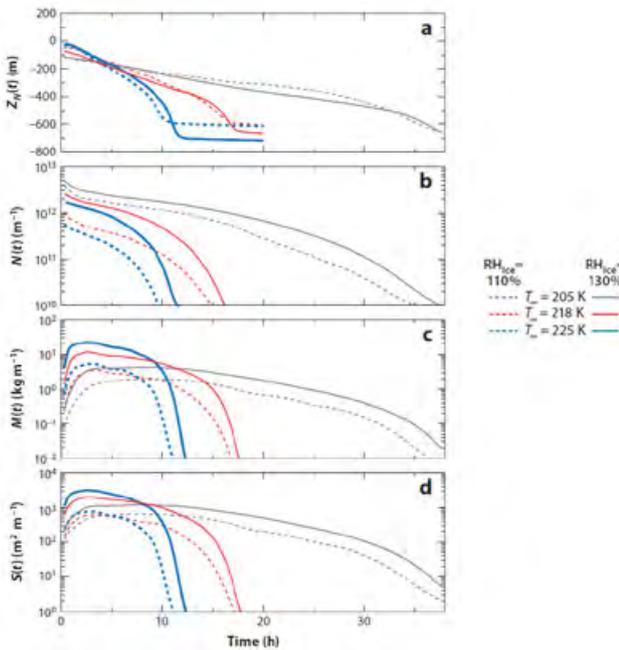


Figure 5 : Résultats des simulations de Lewellen (2014) : (a) altitude moyenne de la localisation des cristaux par rapport à l'altitude de vol, $Z_N(t)$; (b) nombre de cristaux par unité de longueur, $N(t)$; (c) masse de glace, $M(t)$; (d) surface de glace disponible, $S(t)$. Les lignes correspondent à la température ambiante $T = 205\text{ K}$ (noir), 218 K (rouge), et 225 K (vert) et à la sursaturation de l'air par rapport à la glace $RH_{\text{glace}} = 110\%$ (tirets) et 130% (continue). © American Meteorological Society.

INFLUENCE DE L'AVION

D'autres travaux utilisant la LES ont mis en évidence que l'intensité des tourbillons marginaux ainsi que la quantité de cristaux formés dépendent fortement du type d'avion (Unterstrasser et Görsch, 2014). Les résultats indiquent qu'après une durée de vie de 4 min, ce qui correspond à la fin de la phase tourbillon, l'épaisseur du contrail varie entre 220 m pour le Bombardier Canadair Regional Jet (CRJ) et 500 m pour un Airbus A380 car la descente des tourbillons est plus prononcée pour les avions les plus grands et les plus lourds (voir Figure 6). Pour ce type d'avion, la descente plus marquée du contrail engendre une sublimation plus importante et un contrail moins chargé en cristaux dans sa partie inférieure. L'épaisseur du contrail est aussi contrôlée par la stabilité thermique de la couche atmosphérique aux altitudes de vol et elle est plus élevée si la stabilité thermique est plus faible.

| Aircraft Type | A320 | | A300 | | A350 | |
|--|------|------|-------|------|-------|-------|
| | CRJ | B737 | B767 | B777 | B747 | A380 |
| Wing span b/m | 21.2 | 34.4 | 47.6 | 60.9 | 64.4 | 79.8 |
| Circulation $\Gamma_0/(m^2 s^{-1})$ | 130 | 240 | 390 | 520 | 590 | 720 |
| Descent speed $w_0/(ms^{-1})$ | 1.24 | 1.41 | 1.66 | 1.73 | 1.85 | 1.83 |
| Vortex time scale t_0/s | 13.4 | 19.1 | 22.5 | 27.6 | 27.3 | 34.3 |
| core radius r_c/m | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 4.0 | 4.5 | 4.5 |
| Ice crystal number $N'_0/(10^{11} m^{-1})$ | 4.08 | 8.51 | 16.70 | 34.0 | 31.78 | 46.07 |
| Water vapor emission $I_0/(g m^{-1})$ | 1.77 | 3.70 | 7.26 | 15.0 | 13.82 | 20.03 |
| Plume radius R_{init}/m | 8 | 12 | 15 | 20 | 20 | 25 |
| Plume radius R_{init}/m | 10 | 15 | 20 | 25 | 25 | 32 |
| Mesh sizes $(dx, dy/2, dz)/m$ | 0.35 | 0.57 | 0.79 | 1.00 | 1.06 | 1.32 |

Figure 6 : Liste des paramètres clés caractérisant le jet moteur en fonction du type d'avion (Unterstrasser et Görsch, 2014).

La Figure 7 montre le profil vertical du nombre de cristaux de glace présents dans le contrail, quatre minutes après l'émission moteur et donc après la déstructuration des tourbillons marginaux pour deux type de sursaturation par rapport à la glace. Pour une sursaturation par rapport à la glace de 140%, peu de cristaux subliment et l'extension verticale du contrail varie entre 220 m pour un CRJ et 500 m pour un A380. Pour les avions les plus grands, l'épaisseur du contrail est identique dans les deux cas (120 et 140%) et le pic de concentration est plus prononcé au niveau de l'altitude de vol alors que pour les avions régionaux les profils sont similaires mais le tourbillon primaire (noté P sur la Figure7) contient un nombre plus élevé de cristaux que le secondaire (noté S sur la Figure 7).

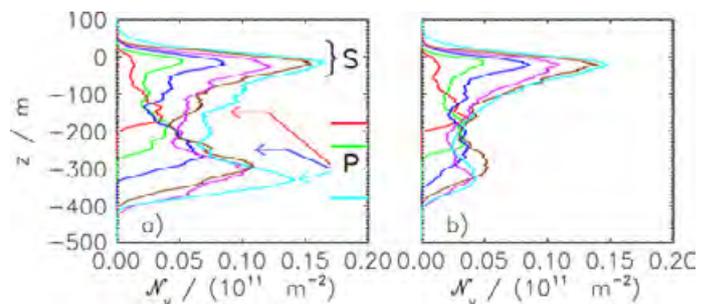


Figure 7 : Profils verticaux du nombre de cristaux de glace intégré le long du contrail 4 minutes après l'émission pour deux saturations par rapport à glace (140 % à gauche et 120 % à droite). La position des tourbillons primaire et secondaire est notée P et S respectivement, sur le graphique de gauche. La fréquence de Brunt-Vaisala est de $1,15 \cdot 10^{-2} s^{-1}$. L'altitude de croisière est $z = 0$. (Unterstrasser et Görsch, 2014).

Un abaissement du tourbillon primaire de 300 m environ équivaut à une augmentation de la température de 3 K environ, ce qui laisse à penser que la sursaturation n'est plus atteinte entraînant la sublimation des cristaux. Pourtant, les travaux de Lewellen (2014) prouvent le

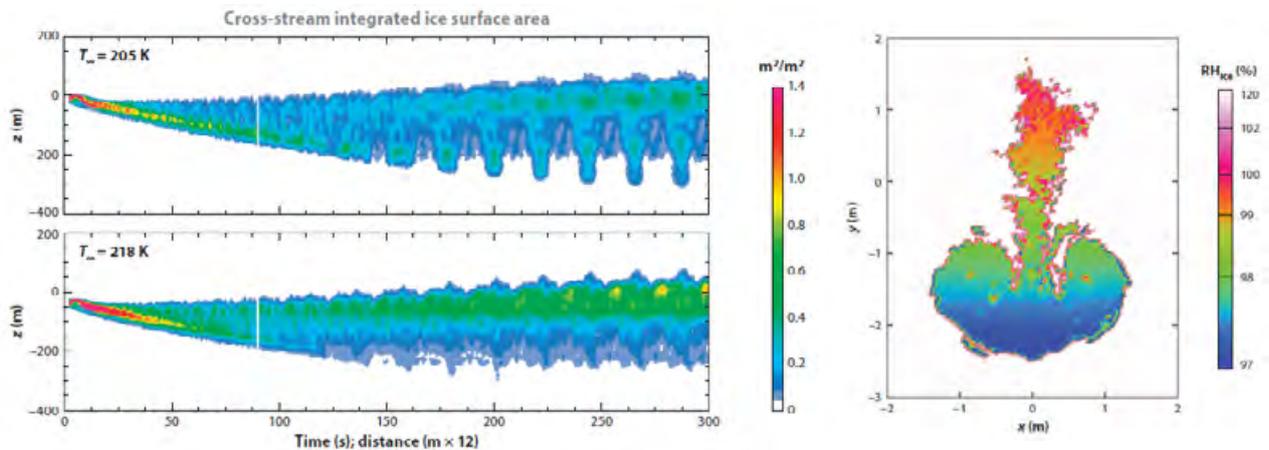


Figure 8 : A gauche : surface de glace intégrée le long d'un contrail (m^2/m^2) simulé entre 0 et 300 s pour une température de 205 K (en haut) et 218 K (en bas). Extrait de Lewellen et al. © American Meteorological Society. À droite : coupe transversale (vue de côté) – sursaturation par rapport à la glace régnant au sein d'un contrail. L'axe des y correspond à la déplacement verticale (0 étant la position moteur) et l'axe des x à la déplacement latérale (adapté de Naiman et al. (2011) par Paoli et Shariff, 2016).

contraire. La Figure 8 démontre que l'abaissement du tourbillon primaire permet également un entraînement d'air humide ambiant assurant des conditions en permanence proches de la sursaturation et donc un maintien des cristaux à condition bien sûr que l'air ambiant soit sursaturé par rapport à la glace.

INFLUENCE DES ÉMISSIONS MOTEUR

L'utilisation des carburants alternatifs conduit à une modification de la nature physico-chimique des émissions. Les mesures effectuées en vol lors de la campagne ACCESS réalisée en 2013-2014 par le consortium NASA/DLR/NRC (Moore et al., 2018) montrent que l'utilisation d'un mélange 50-50 Jet-A1/biofuel (HEFA) par rapport à un Jet A1 pur, réduit de 50 % et 70 %, respectivement, le nombre et la masse de particules émises par les moteurs. Ce résultat crucial laisse donc à penser que l'utilisation des carburants alternatifs est susceptible de modifier la composition des contrails. Grâce aux nombreux travaux de modélisation résumés dans son papier, Karcher (2018) schématise à travers la Figure 9, la relation existant entre le nombre de cristaux présents dans un contrail et les émissions de suies pour deux températures atmosphériques ambiantes, l'une proche et l'autre inférieure de 12 K au seuil de formation déterminé par le CSA. La zone grisée correspond au nombre de particules de suies émises par kg de carburant (de 1014 à 1015) pour un carburant aéronautique classique actuel tel que le Jet-A1. Pour ce type de carburant, il apparaît que le nombre de cristaux de glace produits, et donc présents dans le contrail, augmente linéairement avec le

nombre de particules de suies émises par les moteurs, et ce, pour les deux températures sélectionnées. Ce type de comportement a été confirmé par Terrenoire et al. (2018) dont les simulations utilisant un modèle de microphysique détaillé illustrent, 10 s après l'émission moteur, la diminution du nombre de cristaux formés lorsque le nombre de particules de suies émises est abaissé d'un facteur 2 (voir Figure 10).

En revanche, Karcher (2018) indique un comportement différent pour des émissions de suies inférieures de plusieurs ordres de grandeur par rapport au facteur d'émission classique (Jet-A1). Dans ce cas de figure, deux types de comportement doivent être distingués. D'une part, pour des températures bien inférieures au seuil de déclenchement des contrails (218 K pour des latitudes extratropicales et 228 K aux tropiques), le comportement précédemment décrit s'inverse et ainsi, plus le nombre de cristaux augmente, plus le nombre de particules de suies diminue. Dans ce cas, ce sont des particules aqueuses fines qui, en fonction de leur composition chimique (encore mal caractérisée à l'heure actuelle) se formeraient potentiellement en plus grande quantité pour ensuite geler et éventuellement grossir. Dans ce cas, un seuil minimum de production de cristaux de glace est donc observé pour des valeurs d'émissions de suies se situant aux alentours de 1014. D'autre part, pour des températures proches du seuil de déclenchement des contrails, la production de cristaux de glace continuerait à diminuer pour des émissions de suies comprises entre 1013-1014 pour atteindre un plateau pour des valeurs d'émission de suies inférieures à 1013. Dans ce cas, c'est la concentration

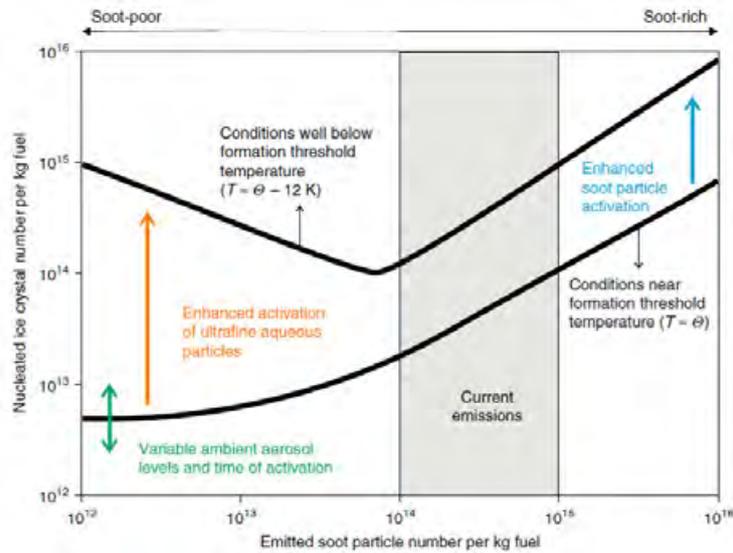


Figure 9 : Nombre de cristaux de glace formés par kg de carburant en fonction du nombre de particules de suies émises par kg de carburant pour deux températures ambiantes. (Extrait de Kärcher, 2018).

de fond en particules atmosphériques qui détermine la valeur minimale de production de cristaux. En se basant sur l'utilisation d'un modèle microphysique simulant de manière détaillée le régime jet du contrail, Rojo et al. (2015) établissent que lors de l'utilisation d'un biocarburant pur, les particules de fond atmosphérique (500/cm³) entraînées dans le panache dominant, en concentration relative (%), à partir de 4 s après l'émission moteur contre 10 s pour un mélange 50-50 Jet-A1/biocarburant. L'étude souligne également le rôle des particules de fond atmosphérique en démontrant leur influence cruciale sur la distribution des cristaux de glace composant le contrail

et par conséquent le rôle grandissant de la nucléation dite homogène lors de l'utilisation de carburants alternatifs (voir Figure 11).

INCERTITUDE CONCERNANT LES CRISTAUX DE GLACE ET L'IMPACT CLIMATIQUE ASSOCIÉ

Burkhardt et al. (2018) ont récemment démontré à l'aide de simulations climatiques globales qu'une réduction d'un facteur 2 de la concentration des cristaux de glace dans les contrails engendre une réduction du forçage

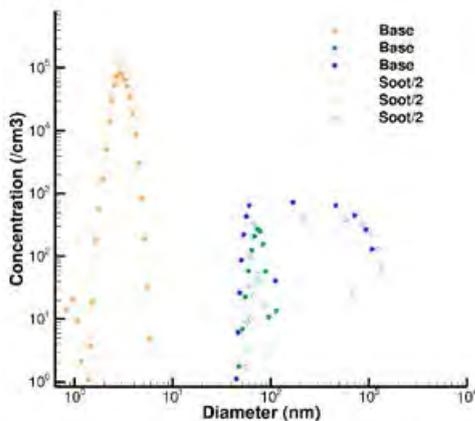


Figure 10 : Distribution en taille des aérosols 10 s après l'émission moteur utilisant un carburant de type Jet A-1 (Base) et un carburant de type alternatif (Soot/2) dont les émissions de particules de suies ont été réduites d'un facteur 2 (Terrenoire et al., 2019). En vert : particules volatiles, en bleu : cristaux de glace.

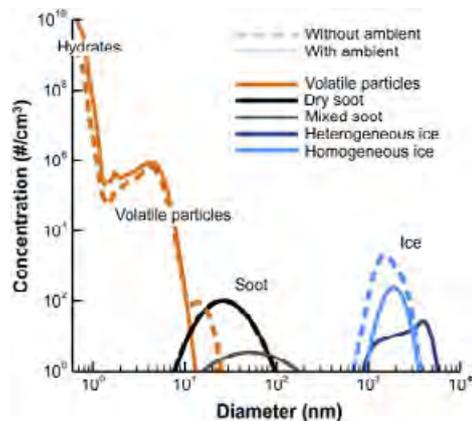


Figure 11 : Distribution en taille des aérosols 1 s après l'émission moteur utilisant un carburant alternatif avec prise en compte (lignes continues) ou non (pointillés) des aérosols de fond atmosphérique (Rojo et al., 2015).

radiatif de l'ordre de 20 %, démontrant ainsi une relation non-proportionnelle entre les deux variables. Les cristaux de glaces composant la traînée sont en général assimilés dans les modèles à des sphères, mais à l'heure actuelle, aucune observation in situ n'a pu véritablement confirmer ou infirmer cette hypothèse, ce qui est une limitation majeure du fait de la relation intime existant entre la géométrie d'un cristal et son interaction avec le rayonnement de courte longueur d'onde d'origine solaire ou situé dans l'infrarouge terrestre. Certains travaux de modélisation montrent cependant la complexité de la structure 3D d'un contrail, 5 min après l'émission et illustrent la compétition thermodynamique qui existe au sein d'un contrail (voir Figure 12). Les diamètres les plus grands (en rouge) sont clairement situés au niveau du tourbillon primaire alors que le vortex secondaire forme un rideau de cristaux de plus petite taille car il existe une compétition plus importante pour la vapeur d'eau dans la partie inférieure du contrail du fait du plus grand nombre de cristaux formés.

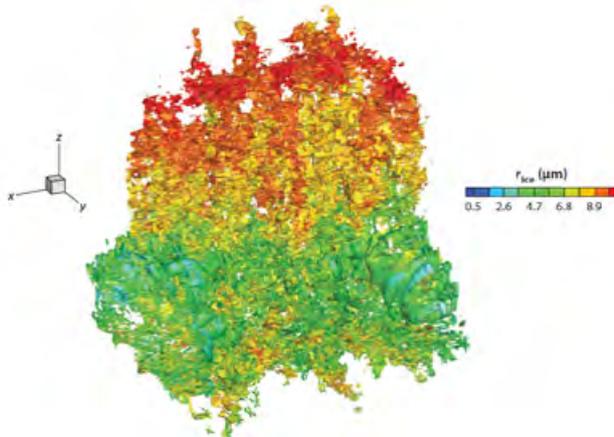


Figure 12 : Structure 3D du rayon des cristaux de glace modélisée au sein d'un contrail, 5 min après l'émission (Paugam et al., 2010).

La maîtrise de la distribution spatiale et temporelle des cristaux de glace au sein d'un contrail est un défi majeur de la modélisation de leur impact radiatif et donc climatique. Les travaux à ce sujet montrent une forte dépendance du forçage radiatif à la géométrie des cristaux. Ainsi, Schumann et al. (2012) indiquent que les cristaux sphériques généralement privilégiés dans les modèles de contrail engendrent un forçage radiatif net positif (réchauffement) et maximal pour des épaisseurs optiques de l'ordre de 1,5 à 550 nm (voir Figure 13). D'une manière générale, ce forçage tend à diminuer pour les épaisseurs optiques plus élevées. En revanche, pour des cristaux de type droxtal ou pour toute autre géométrie

non-sphérique, le forçage radiatif est positif (réchauffement) pour des épaisseurs optiques faibles mais devient négatif (refroidissement) pour des épaisseurs optiques plus élevées, le changement de signe (positif à négatif) étant fortement dépendant de la géométrie des cristaux.

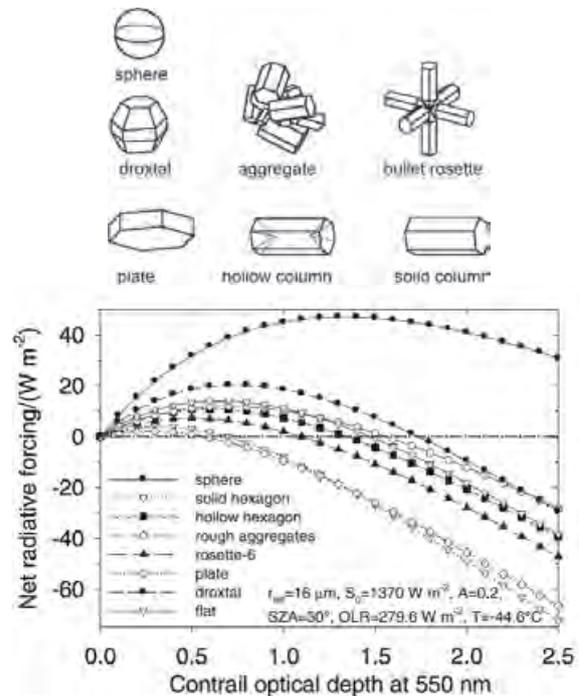


Figure 13 : Forçage radiatif (W/m^2) en fonction de l'épaisseur optique du contrail à 550 nm pour différentes géométries de cristaux de glace (extrait de Schumann et al. (2012)).

Plus récemment, les travaux de Sanz-Morère et al. (2020) ont montré à travers la modification du coefficient d'asymétrie d'une sphère que plus de la moitié de l'incertitude qui règne autour de la valeur du forçage radiatif d'un contrail est liée à l'hypothèse de base assimilant les cristaux de glace composant le contrail à une géométrie de type sphérique. Les travaux confirment ainsi l'impact majeur du choix de la géométrie des cristaux composant les contrails dans l'évaluation de leur impact climatique.

CONCLUSION

Les récentes études citées démontrent la complexité du système étudié qui, en résumé, correspond à l'interaction physico-chimique d'un jet moteur « pris au piège » dans un tourbillon avec son environnement atmosphérique immédiat. Les travaux indiquent également une relation directe entre la nature des émissions moteur, la distribution en taille et nombre ainsi que la géométrie des cristaux de glace composant un contrail et donc son

impact climatique. En 2020, suite au plan national de relance aéronautique, deux projets de recherche soutenus par la DGAC viseront à la quantification (mesure in situ et modélisation) de l'impact de l'utilisation des carburants 100% alternatifs tels que les carburants de synthèse durables (VOLCAN) ou encore l'hydrogène (CIRRUS-H2) sur la formation des contrails tout en permettant une étroite collaboration entre l'ONERA, l'industrie aéronautique (Airbus, Dassault Aviation, Safran) et le CNRS. Ces études, en s'appuyant notamment sur les outils de modélisation des contrails développés à l'ONERA, tels que MoMiE (Vancassel et al., 2014 ; Khou et al., 2017 ; Montreuil et al., 2018) et le code CEDRE, fourniront des données précieuses, aidant à la compréhension de l'influence des carburants alternatifs sur les caractéristiques intrinsèques des contrails déterminant leur impact climatique potentiel.

RÉFÉRENCES

- Appleman, H., "The formation of exhaust condensation trails by jet aircraft," *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, Vol. (34), 1953, pp.14-20.
- Burkhardt, U., Bock, L., & Bier, A. (2018). Mitigating the contrail cirrus climate impact by reducing aircraft soot number emissions. *Climate and Atmospheric Science*, 37,1-7.
- Haywood, J. M., R. P. Allan, J. Bornemann, M. Forster, P. N. Francis, S. Milton, G. Radel, A. Rap, K. P. Shine, and R. Thorpe (2009), A case study of the radiative forcing of persistent contrails evolving into contrail-induced cirrus, *J. Geophys. Res.*, 114, D24201, doi:10.1029/2009JD012650
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Jacquin L, Garnier F. 1996. On the dynamics of engine jets behind a transport aircraft. Rep. AGARD CP-584, NATO, Brussels.
- Kärcher, B. Formation and radiative forcing of contrail cirrus, *Nature Communication*, 9, 2018, p. 1824.
- Khou, J.C., Ghedhaïfi, W., Vancassel, X., Montreuil, E., and Garnier, F., "CFD simulation of contrail formation in the near field of a commercial aircraft: Effect of fuel sulfur content," *Meteorologische Zeitschrift*, 2017, doi:10.1127/metz/2016/0761.
- Lee, D.S, D.W. Fahey, A. Skowron, M.R. Allen, U. Burkhardt, Q. Chen, S.J. Doherty, S. Freeman, P.M. Forster, J. Fuglestedt, A. Gettelman, R.R. De León, L.L. Lim, M.T. Lund, R.J. Millar, B. Owen, J.E. Penner, G. Pitari, M.J. Prather, R. Sausen, L.J. Wilcox, *The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018*, *Atmospheric Environment*, 2020.
- Lewellen DC. 2014. Persistent contrails and contrail cirrus. Part II: Full lifetime behavior. *J. Atmos. Sci.* 71:4420-38.
- Moore, R. H. et al. Biofuel blending reduces particle emissions from aircraft engines at cruise conditions. *Nature* 543, 411-415 (2017).
- Montreuil, E., Ghedhaïfi, W, Chmielarski, V., Vuillot, F., and Gand, F., "Numerical simulation of contrail formation on the common research model Wing/Body/Engine configuration," 10th Space and Atmospheric Environment, AIAA Conference, 2018. DOI:10.2514/6.2018-3189.
- Naiman AD, Lele SK, Jacobson MZ. 2011. Large eddy simulations of contrail development: sensitivity to initial and ambient conditions over first twenty minutes. *J. Geophys. Res.* 116:D21208.
- Paoli, R. et Karim Shariff, *Contrail Modeling and Simulation*, *Annual Review of Fluid Mechanics* 2016 48:1, 393-427.
- Paugam R, Paoli R, Cariolle D. 2010. Influence of vortex dynamics and atmospheric turbulence on the early evolution of a contrail. *Atmos. Chem. Phys.* 10:3933-52
- Rojo, C., Vancassel, X., Mirabel, P., Ponche, J. L., Garnier, F., 2015: Impact of alternative jet fuels on aircraft-induced aerosols, *Fuel*, 144, 335.
- Sanz-Morère, I., Sebastian D. Eastham, Raymond L. Speth, and Steven R. H. Barrett *Environmental Science & Technology Letters* 20207 (6), 371-375 DOI: 10.1021/acs.estlett.0c00150
- Schumann, U.; Mayer, B.; Graf, K.; Mannstein, H. A Parametric Radiative Forcing Model for Contrail Cirrus. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2012, 51, 1391-1406.
- Schumann U. 1996. On conditions for contrail formation from aircraft exhausts. *Meteorol. Z.* 5:4-23.
- Schmidt E. 1941. Die Entstehung von Eisnebel aus den Auspuffgasen von Flugmotoren. In *Schriften der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung*, Vol. 44, pp. 1-15. Berlin: Verlag R. Oldenbourg
- Terrenoire, E., X. Vancassel, W. Ghedhaïfi, E. Montreuil. Chemical composition in near-field aircraft plumes at cruise level. *The 23rd ATRS World Conference*, July 2019, AMSTERDAM, Netherlands.
- Unterstrasser, S.; Görsch, N. Aircraft-type dependency of contrail evolution. *J. Geophys. Res.* 2014, 119, 14,015-14,027, 2014JD022642.
- Vancassel, X., Mirabel, P., Garnier, F. Numerical simulation of aerosols in an aircraft wake using a 3D LES solver and a detailed microphysical model, 2014, *Int. J. Sustainable Aviation*, Vol. 1, No. 2. ■

Observer les gaz à effet de serre par lidar

par Nicolas Cézard, Myriam Raybaut, Laurent Lombard et Jean-Baptiste Dherbecourt, ONERA

INTRODUCTION

Le phénomène de réchauffement climatique est directement induit par l'augmentation dans l'atmosphère de la concentration des gaz à effet de serre (GES), en tête desquels le dioxyde de carbone (CO₂) et le méthane (CH₄). D'après les derniers chiffres de l'Organisation météorologique mondiale (OMM), la concentration en CO₂ dans l'atmosphère a augmenté de 48% entre 1750 et 2020, passant de 278 ppm à 410 ppm (parties par million). Et le méthane fait encore « mieux », si l'on peut dire. Sa concentration atteint désormais 1877 ppb (partie par milliard), ce qui représente une hausse de +160% par rapport à son niveau de plateau préindustriel (722 ppb en 1750). L'OMM rappelle également que le dioxyde de carbone et le méthane sont responsables à eux seuls de plus de 80% du forçage radiatif mondial (voir Figure 1) depuis l'époque préindustrielle.

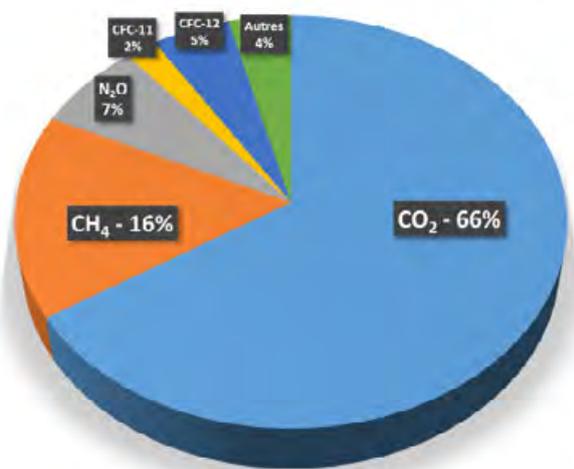


Figure 1 : Contributions des principaux GES persistants à l'augmentation du forçage radiatif mondial depuis l'époque préindustrielle, jusqu'en 2019 – d'après [1].

En Europe, la grande majorité des émissions de GES est liée à l'utilisation de l'énergie, dans tous les secteurs : production énergétique, transport, industrie, chauffage résidentiel, agriculture, stockage des déchets. Les sources de GES sont donc partout : dans nos villes et nos maisons, dans nos champs, nos étables, dans nos voitures, nos bateaux, nos avions, dans nos usines, et jusque dans nos décharges publiques. Partout, il faut tenter de « traquer » les émissions de GES, ce qui signifie les détecter et les quantifier, afin de pouvoir intervenir

de manière appropriée et réduire les émissions. En parallèle, une surveillance de la concentration des GES à l'échelle planétaire, depuis un satellite, est une nécessité pour mesurer les flux régionaux de GES, en termes de puits et sources, sur l'ensemble du globe. Observation locale et observation globale des GES dans l'atmosphère sont ainsi des objectifs à poursuivre simultanément.

PRINCIPE DU LIDAR POUR LA DÉTECTION DES GES

L'un des outils d'observation les plus appropriés pour la détection et la mesure à distance des GES atmosphériques est le LIDAR (Light Detection and Ranging). Cette technique, analogue au Radar mais fonctionnant dans le domaine des fréquences optiques, comprend un émetteur, générant des impulsions laser se propageant le long d'un faisceau très directif dans une direction d'observation donnée (voir Figure 2), et un récepteur optique de haute sensibilité, chargé de collecter le rayonnement, extrêmement faible, rétrodiffusé par les poussières en suspension dans l'atmosphère (aussi appelés aérosols).

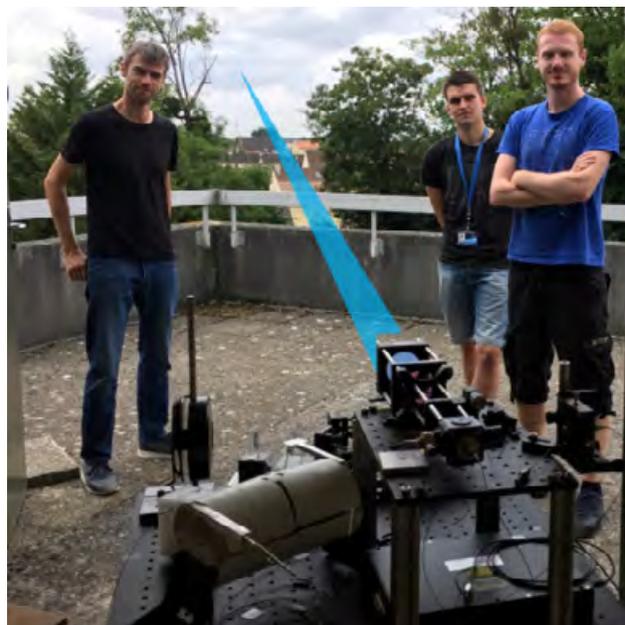


Figure 2 : Dispositif d'émission/réception du Lidar VEGA dédié à l'observation du méthane. Le faisceau, matérialisé ici pour l'illustration, est invisible et à sécurité oculaire dans la réalité. De gauche à droite, Nicolas Cézard, Simon Le Méhauté, et Philippe Benoit (ONERA, 2017).

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES OBSERVER LES GAZ À EFFET DE SERRE PAR LIDAR

En chronométrant le temps mis par la lumière pour effectuer l'aller-retour entre le laser et les aérosols diffusants, il est possible, d'une part, d'établir une correspondance entre l'instant de réception du signal et la distance des aérosols à l'origine du signal diffusé. Ceci permet à un LIDAR d'effectuer des mesures dites « résolues spatialement » (voir Figure 3).

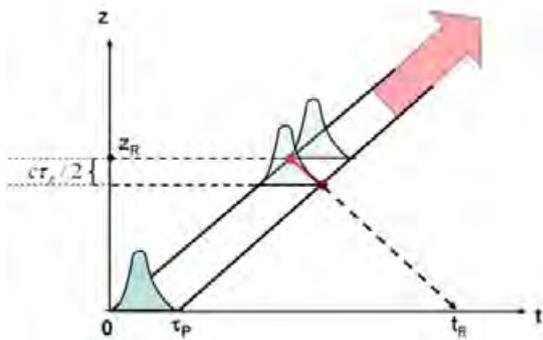


Figure 3 : Diagramme d'émission « espace-temps » d'un LIDAR. Une impulsion est émise dans l'intervalle de temps $[0, \tau_P]$ et un signal lidar est détecté à l'instant t_R . Ce signal provient d'un segment d'atmosphère de longueur $\Delta z = c\tau_P/2$ (résolution du lidar), localisé à la distance $z_R = ct_R/2$ (capacité télémétrique).

D'autre part, il est possible de détecter et quantifier par LIDAR la concentration de certaines espèces de gaz atmosphériques, en exploitant leurs propriétés spectroscopiques, c'est-à-dire leur capacité à absorber de la lumière à certaines fréquences (ou longueurs d'ondes) bien précises. C'est le principe du lidar DIAL (Differential Absorption Lidar), illustré Figure 4. L'émetteur doit alors générer des impulsions lasers à des fréquences dites ON

(absorbées par le gaz cible) et OFF (non absorbées). Le signal lidar rétrodiffusé à la fréquence ON est alors plus rapidement atténué que le signal OFF, au moment où il rencontre le gaz cible.

Les propriétés spectroscopiques des gaz imposent donc de réaliser des émetteurs laser fonctionnant à des longueurs d'ondes très précises. Le tableau indique quels sont les domaines de longueurs d'onde les plus adaptés pour la détection à longue distance du dioxyde de carbone, du méthane, et de la vapeur d'eau. La vapeur d'eau, principal fluide caloporteur dans l'atmosphère, entre en effet également dans la catégorie des GES, et bien que la gestion de ses émissions ne soit pas aussi problématique que pour le CO₂ et le CH₄, il est tout aussi important d'en suivre la dynamique atmosphérique.

| CO ₂ | CH ₄ | H ₂ O |
|-----------------|-----------------|------------------|
| 1.57 μm | 1.65 μm | 0.93 μm, 1.53 μm |
| 2.05 μm | 2.30 μm | 1.98 μm |

Bandes de fréquences les plus couramment utilisées pour la mesure à longue distance des GES par LIDAR.

Outre leurs longueurs d'ondes d'émission, les systèmes lidars doivent également satisfaire de nombreuses exigences techniques, en fonction du besoin : énergie et durée des impulsions émises, cadence de répétition, qualité spectrale et spatiale du faisceau délivré, polarisation, sensibilité de détection, compacité, robustesse thermomécanique, traitement rapide des données, etc.

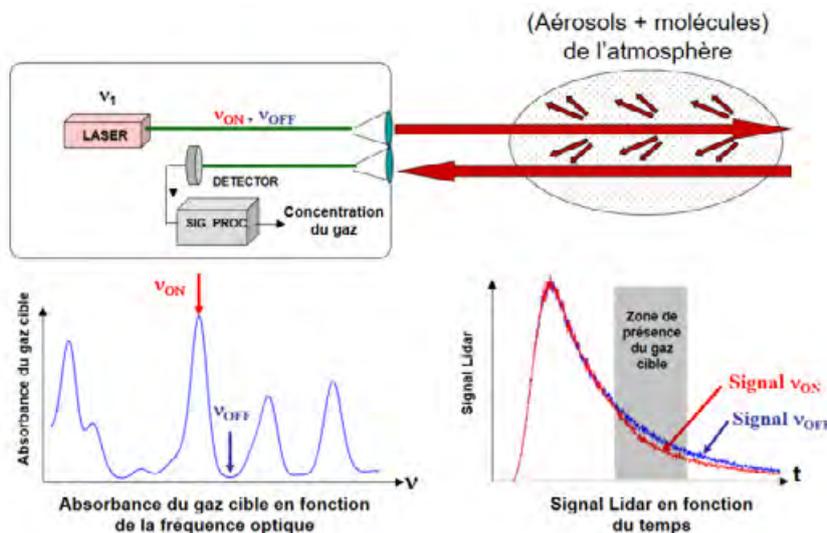


Figure 4 : Principe du lidar DIAL. La vitesse différentielle de décroissance du signal lidar aux longueurs d'onde ON et OFF est l'indicateur de la présence du gaz et de sa concentration.

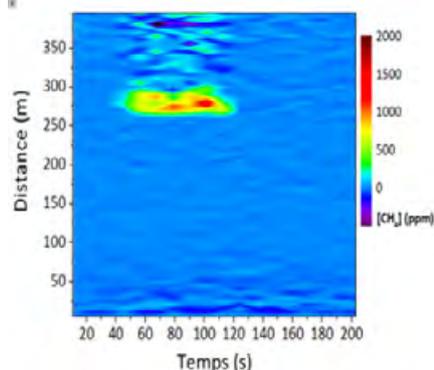
LES LIDARS ONERA POUR LA DÉTECTION DES GES

Au fil de plusieurs décennies de recherches, l'ONERA a développé une expertise reconnue internationalement dans le domaine des lidars. Sur le seul sujet des lidars pour la détection des GES, une vaste « panoplie » de démonstrateurs innovants a progressivement vu le jour [2] depuis environ 2010, basés sur plusieurs technologies laser différentes (voir l'encart page 48).

Par exemple, dans le cadre d'un partenariat recherche-industrie entre l'ONERA et la société Total, deux lidars ont été développés (2013-2018), permettant des mesures de fuites de gaz en milieu industriel. Le lidar VEGA (voir Figure 2), basé sur une source laser fibrée à 1,65 μm , permet une mesure conjointe du vent et du CH_4 , tandis que le lidar GAZL (voir Figure 5), basé sur une source laser paramétrique, permet de mesurer le CH_4 à 1,65 μm et le CO_2 à 1,57 μm .



Figure 5 : Lidar GAZL déployé sur le terrain lors d'une campagne de mesure en 2018 (à gauche) et visualisation d'une mesure de panache d'un rejet contrôlé de méthane pour tester le dispositif (à droite), avec en abscisse le temps et en ordonnée la distance par rapport au lidar ; la concentration en méthane sur l'axe de visée en fonction de la distance est indiquée en couleurs (DPHY, 2018).



Dans la bande de fréquence située autour de 2 μm , qui peut être avantageuse pour certaines applications, d'autres développements sont en cours. Le projet

LEMON, financé par l'Union européenne et coordonné par l'ONERA, vise au développement d'un instrument sol et aéroporté pour la mesure multi-espèces du CO_2 et de la vapeur d'eau atmosphériques [3]. Il vise aussi à la montée en TRL (Technological Readiness Level) des sources paramétriques pour la détection future des GES depuis un satellite. Il s'agit de démontrer que le laser peut satisfaire les propriétés spectrales, énergétiques, et temporelles spécifiques à ces mesures spatiales. Il s'agit aussi, dans la continuité du projet GENUIN au profit de l'ESA (European Space Agency), de vérifier la tenue en environnement spatial (radiatif, vibratoire, thermique) des sous-systèmes clés. Le lidar WAVIL, développé en collaboration entre l'ONERA et le CNRS/LATMOS, sera quant à lui dédié principalement à la mesure de la vapeur d'eau et de son isotope HDO, afin de faire progresser les connaissances sur le cycle de l'eau à des échelles pertinentes pour la météorologie et le climat [4].

Utilisant une technologie laser alternative, dite hybride (c'est-à-dire basée sur des étages d'amplification fibrée puis cristalline), le lidar HELENA est également en cours de développement, pour la mesure du CO_2 et du vent à 2 μm , avec là aussi des perspectives d'applications aéroportées et spatiales.

Enfin, de nouvelles technologies, de TRL moins élevés, sont en cours d'expérimentation afin de faire gagner en performances les lidars de demain. C'est par exemple le cas de l'utilisation des peignes de fréquences pour la spectroscopie des GES par lidar, sujet d'actualité qui fait l'objet de thèses depuis quelques années à l'ONERA.

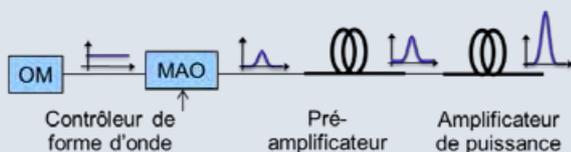
RÉFÉRENCES

- Bulletin sur les gaz à effet de serre - N°16: Bilan des gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère, d'après les observations effectuées à l'échelle du globe en 2019 (<https://library.wmo.int/>)
- N. Cézard, J. Dherbecourt, M. Raybaut, and A. Dolfi-Bouteyre, "Development of gas sensing Lidars for industrial and climate issues," in *Optical Sensors and Sensing Congress, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2020)*, paper LM4A.3. <https://lemon-dial-project.eu/>
- J. Hamperl et al. "WaVIL: a Differential Absorption LIDAR for Water Vapor and Isotope HDO Observation in the Lower Troposphere - Instrument Design," in *Optical Sensors and Sensing Congress, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2020)*, paper LM4A.4.

QUELLES SOURCES POUR LES LIDARS DE DÉTECTION DES GES ?

Les sources laser développées à l'ONERA pour la détection de GES sont de deux types : les sources laser à fibre et les sources laser paramétriques. Ces sources sont bien adaptées à la génération d'impulsions alternativement ON et OFF dont les longueurs d'onde dépendent du gaz étudié.

Les sources laser à fibre développées à l'ONERA sont en général basées sur l'architecture MOPFA (voir Figure). Un oscillateur maître (OM) émet en continu un signal laser à la longueur d'onde ON ou OFF. Il est découpé en impulsions de fréquence et de durée contrôlables par un modulateur acousto-optique (MAO). Les impulsions sont amplifiées dans un ou plusieurs amplificateurs à fibre jusqu'à un niveau limité par les effets non linéaires dans la fibre (dont le diamètre de cœur est généralement de l'ordre de 10 µm). Pour aller au-delà de cette limite de puissance, l'ONERA développe différentes techniques d'amplification.

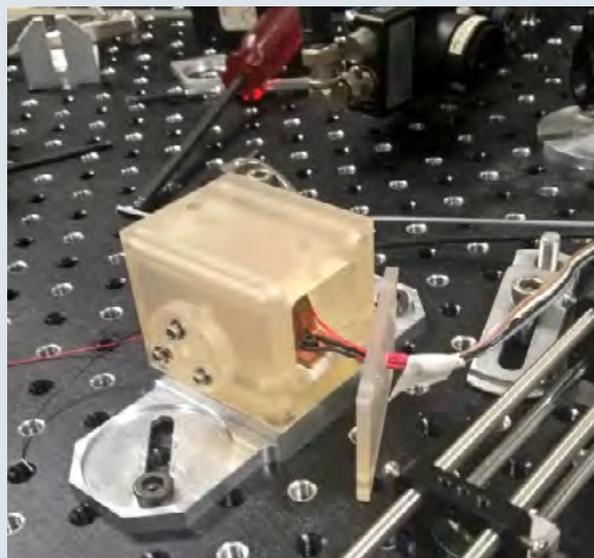


Architecture MOPFA (master oscillator - power fiber amplifier). OM : oscillateur maître, MAO : modulateur acousto-optique.

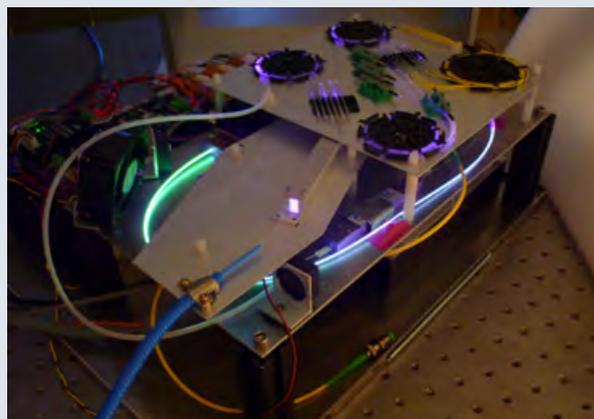
Le domaine de longueurs d'onde accessible en technologie fibrée est gouverné par les dopants insérés dans les fibres, à savoir 1,03-1,1 µm pour l'ytterbium, 1,4-1,6 µm pour l'erbium et 1,9-2,2 µm pour le thulium et l'holmium. Dans certains cas, il est possible d'exploiter des effets non linéaires, comme l'effet Raman, pour étendre la plage spectrale de fonctionnement. L'architecture fibrée est très versatile, compacte, efficace, robuste aux variations de température et aux vibrations. Elle est bien adaptée à des lidars destinés à être embarqués ou déployés sur le terrain.

Les sources paramétriques permettent la conversion efficace d'une onde laser de pompe vers des ondes filles. Leur principal intérêt est de pouvoir considérer des longueurs d'ondes inaccessibles par d'autres technologies, et de pouvoir accorder ces longueurs d'ondes

sur une plage permettant d'intéresser plusieurs espèces chimiques. C'est la solution source retenue par exemple pour la mesure du CH₄ pour la mission spatiale franco-allemande MERLIN, première mission spatiale pour la mesure lidar d'un gaz à effet de serre, qui sera lancée dans quelques années. À l'ONERA, les travaux portent sur des sources paramétriques de nouvelle génération très compactes et accordables. ■



Oscillateur Paramétrique Optique développé à l'ONERA dans le cadre du projet ESA GENUIN. La source est en Zérodur, matériau permettant une très bonne stabilité thermo-mécanique, et a démontré un très haut potentiel de tenue en environnement vibratoire pour les applications spatiales (DPHY - 2018).



Source fibrée forte puissance crête ONERA BOFIX

Optique adaptative pour l'astronomie

par Thierry Fusco, ONERA

Thierry Fusco, directeur de recherche à l'ONERA, est lauréat en 2020 du Prix de l'excellence scientifique de la 3AF et également du Grand Prix Charles Defforey de l'Institut de France.

L'Optique Adaptative (OA) a pour objectif la modification et la mise en forme en temps réel de surfaces d'ondes optiques. Cette maîtrise de l'onde (cohérente ou incohérente) permet d'en optimiser les caractéristiques et performances vis-à-vis d'un domaine applicatif donné et ceci en dépit des perturbations évolutives qui pourraient venir les dégrader. Cela peut concerner l'imagerie à haute résolution mais aussi la propagation et la mise en forme de faisceaux laser à travers des milieux inhomogènes (localisation, focalisation, couplage dans des fibres, etc.) avec des champs applicatifs très variés allant de l'observation de l'espace depuis la terre ou de la terre depuis l'espace (astronomie, imagerie de satellites) aux télécommunications optiques à très haut débits en passant par les applications biomédicales (imagerie à haute résolution de la rétine par exemple).

Depuis plus de trente ans, l'OA trouve dans l'astronomie depuis le sol aux longueurs d'onde visibles et infrarouges un domaine applicatif idéal, avec des retombées astronomiques et astrophysiques importantes, comme les mesures ultraprécises d'orbites d'étoiles proches pour étudier les caractéristiques physiques du trou noir central de notre Galaxie (prix Nobel de physique 2020¹) ou encore la détection directe et la caractérisation spectrale de planètes extrasolaires². Elle est aussi un terreau fertile à des innovations scientifiques et techniques majeures dans le domaine de l'optique de l'automatique et du traitement du signal et des images [1,2].

Aujourd'hui, tous les grands télescopes au monde, de la classe des 8-10 m de diamètre, sont équipés d'OA. Dans ces systèmes, qui fonctionnent en boucle fermée à l'aide d'une étoile appelée "étoile guide", l'onde réfléchie sur le miroir déformable est envoyée à un analyseur de surface d'onde (ASO). Les aberrations résiduelles mesurées par l'ASO sont utilisées pour contrôler le miroir déformable placé généralement dans un plan pupillaire. L'OA est, sans aucun doute, LA solution pour l'observa-

tion astronomique à haute résolution depuis le sol et un complément indispensable aux observatoires spatiaux (Hubble, *James Webb Space Telescope* ou JWST, etc.). Tous les nouveaux projets de télescopes incluent désormais l'OA dès les premiers stades de leur conception, certains comme le futur *European-Extremely Large Telescope* (ELT) de 39 m de diamètre de l'European Southern Observatory (ESO) intègrent l'OA dans le télescope lui-même en amont des instruments scientifiques.

Néanmoins, certaines limitations technologiques (temps de réponse des composants du système, bruit de lecture des détecteurs, etc.) ou fondamentales (bruit photonique) réduisent l'efficacité de l'OA. Lors des observations, le front d'onde n'est alors que partiellement corrigé et la turbulence résiduelle perturbe l'image finale. Une autre limitation des systèmes d'OA vient du domaine angulaire restreint (domaine isoplanétique) où l'on peut considérer que les dégradations sur le front d'onde sont identiques et donc où la correction du système sera la plus efficace. En dehors de cette zone, la qualité de la correction (et donc les performances de l'OA) chutera en fonction de l'angle. Ce domaine isoplanétique, qui fixe le champ de vision utile de tout AO, n'est que de quelques secondes d'arc aux longueurs d'onde visibles et de quelques dizaines dans l'infrarouge [2].

Un système d'OA classique ne fournira donc que des images partiellement corrigées (incluant ainsi un flou résiduel) sur un champ de vision restreint. La recherche de nouveaux concepts est donc essentielle pour rendre l'OA toujours plus performante et opérationnelle.

DE L'OPTIQUE ADAPTATIVE CONVENTIONNELLE À L'OPTIQUE ADAPTATIVE EXTRÊME

Après le succès de NAOS [3], la première OA généraliste du VLT (Very Large Telescope), qui a permis une première

1. <https://www.defense.gouv.fr/english/actualites/articles/un-instrument-d-optique-concu-par-l-onera-au-coeur-des-observations-d-un-des-laureats-du-prix-nobel-de-physique-2020>

2. <https://www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/laureats-du-grand-prix-scientifique-de-la-fondation-charles-defforey>

démocratisation du concept pour l'astronomie avec à son actif un rôle clé dans des découvertes majeures comme la toute première image d'une planète extrasolaire ou encore la mesure précise de la masse du trou noir centrale de notre Galaxie, la seconde génération d'instruments assistés par OA a eu pour ambition de repousser les limites de qualités des images et de leur contraste. Ainsi le 4 mai 2014, après plus de 10 ans de développements menés conjointement entre les laboratoires CNRS (observatoire de Grenoble, Marseille et Paris), l'ONERA et des partenaires Européens, Allemands (Max Planck Institute), Italiens (INAF), Suisses (ETH Zurich) et coordonnés par l'European Southern Observatory (ESO), l'instrument SPHERE (*Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch*) pour le VLT a vu le jour. Dédié à la recherche et la caractérisation de planètes extrasolaires SPHERE [4] et son système d'OA (dit extrême) SAXO [5, 6] intègre alors les innovations conceptuelles et technologiques les plus avancées dans le domaine (voir Figures 1 à 3). Avec sa correction quasi parfaite des effets de la turbulence permettant d'atteindre la limite de diffraction d'un télescope de 8 m jusqu'aux longueurs d'onde visibles (soit moins de 20 millisecondes d'arc équivalent à 90 nanoradians), SPHERE-SAXO est alors sans doute le système d'OA le plus performant au monde. Avec ce type de système, il est possible de détecter un objet (idéalement une planète) très faible, proche d'une étoile brillante (typiquement un rapport de flux d'un million pour une séparation angulaire de l'ordre de quelques dixièmes de seconde d'arc). Les ingrédients clés pour permettre un tel exploit sont :

- L'analyse du front d'onde : les approches d'analyse de front d'onde conventionnelles, telles que mises en œuvre sur NAOS, par exemple, ne fonctionnent pas assez bien pour répondre aux exigences SPHERE en termes de précision et de sensibilité ultimes. Il a donc fallu proposer des modifications de différents concepts (notamment du Shack-Hartmann) afin d'améliorer les performances ultimes et de gagner l'ordre de grandeur nécessaire pour atteindre les spécifications imposées par l'imagerie dynamique élevée [7].

- Le contrôle : prise en compte et correction des vibrations du télescope [8].
- La calibration du système : pré-compensation des aberrations non vues par le système AO, entre autres) [9].

Depuis son ouverture à la communauté en 2015, SPHERE a permis une production scientifique d'ampleur avec plus de 200 papiers dans des revues prestigieuses (Nature, A&A, MNRAS etc.).

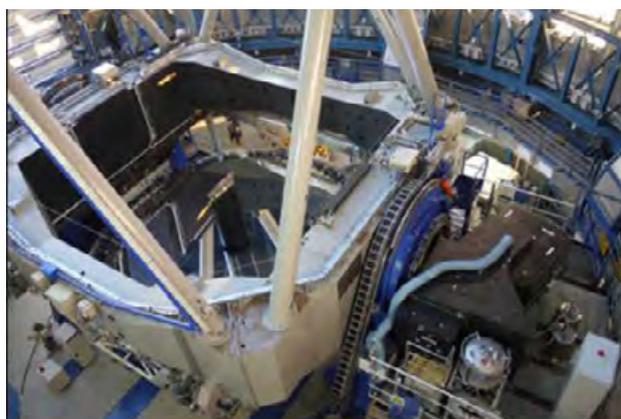


Figure 1 : L'instrument SPHERE installé au foyer Nasmyth du VLT

| | H band (1.6 μm) | I band (0.84 μm) | R band (0.65 μm) |
|------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Without AO | | | |
| With AO | | | |

Figure 2 : Les performances de SPHERE obtenues sur le ciel du proche IR (bande H) au visible (bande R). La limite de diffraction du télescope est atteinte dans tous les cas.



Figure 3 : Image à haute résolution du disque de AU Microscopii vu par SPHERE. Les structures principales se déplacent vers l'extérieur du disque à des vitesses vertigineuses. (Boccaletti et al, Nature, 2015)

L'expérience unique de SPHERE-SAXO a permis d'identifier les nouveaux défis et les nouvelles voies de développement pour les futurs instruments d'imagerie et de caractérisation des planètes extrasolaires. En particulier, elle a permis de lancer de nouvelles recherches concernant l'analyse de surfaces d'onde pour développer de nouveaux dispositifs ultrasensibles (domaine de très faible nombre de photons) et ultraprécis (précision nanométrique)³ [10].

Pousser les recherches dans les domaines de l'OA, combiner des concepts optiques innovants avec des techniques de détection et de contrôle de plus en plus sophistiquées, le tout étant lié et optimisé avec les approches les plus avancées d'intelligence artificielle et d'apprentissage machine profond nous permettra de gagner les 5 ordres de grandeurs nécessaires à la détection d'exo-terres à l'horizon 2035 (avec la 2ème génération d'instruments ELT, voir ci-dessous). Une étape intermédiaire essentielle dans cette course au contraste ultime sera d'ici 2025, la mise en œuvre d'une version améliorée de SAXO pour repousser les limites de SPHERE et valider dans des conditions opérationnelles les nouveaux développements technologiques et conceptuels proposés récemment ou encore à inventer.

ALLER PLUS LOIN : LES SYSTÈMES D'OA TOMOGRAPHIQUES ASSISTÉS PAR LASER

Si l'OA extrême a pour but de repousser toujours plus loin la performance ultime de l'instrument, elle doit utiliser une étoile suffisamment brillante pour pouvoir effectuer des mesures à des précisions nanométriques jusqu'à plusieurs milliers de fois par seconde. Ceci restreint l'observation aux quelques milliers d'étoiles les plus brillantes du ciel et empêche ainsi l'OA d'apporter une correction suffisante pour l'ensemble de la voute céleste. Moins d'un pourcent de cette dernière est observable avec l'approche dite « classique » de l'OA. Cette limitation vient du fait que les aberrations de phase sont générées par un volume turbulent (la turbulence atmosphérique étant essentiellement répartie dans les 20 premiers kilomètres d'altitude) alors que leur correction est effectuée dans un seul plan pupille, celui du miroir déformable généralement conjugué optiquement dans le pupille du télescope. Ainsi, la correction est efficace en direction de l'étoile guide mais se dégrade très rapidement dans le champ de vue.

3. Voir <https://anr-wolf.com/>

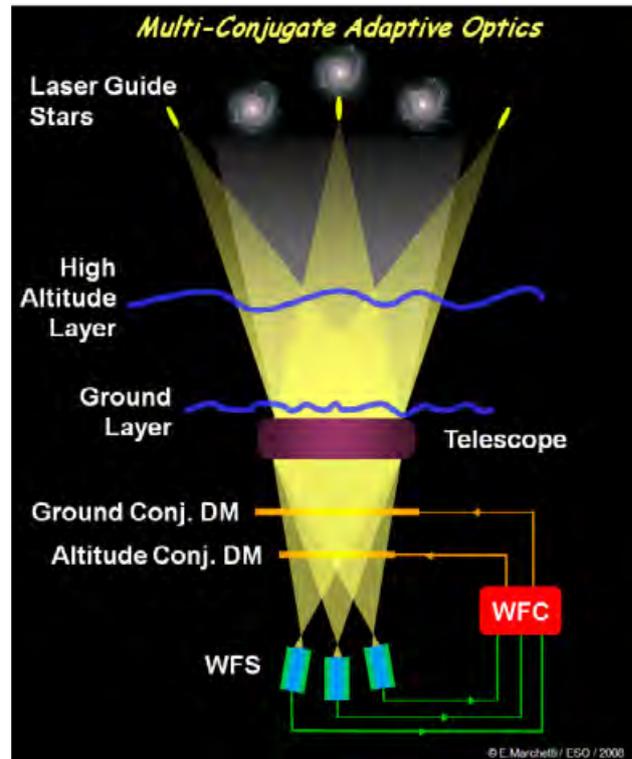


Figure 4 : Le concept d'OA tomographique assistée par laser. Plusieurs étoiles artificielles créées en excitant des atomes de sodium à 90 km d'altitude servent de référence pour une mesure bidimensionnelle du front d'onde dans plusieurs directions permettant une reconstruction tridimensionnelle du volume turbulent. Ce dernier étant ensuite corrigé grâce à plusieurs miroirs conjugués optiquement à différentes altitudes

Pour surmonter cette limitation, le concept même d'OA a évolué (voir Figure 4).

- Pour pallier à l'absence d'étoiles suffisamment brillantes dans le ciel, des étoiles artificielles sont générées grâce à l'excitation des atomes de sodium en abondance à environ 90 km d'altitude par un laser ayant la bonne longueur d'onde (589 nm) et une puissance importante (plus de 20 W à l'émission) [11, 12].
- Pour augmenter le champ de vue, une mesure tomographique du volume de turbulence est effectuée en utilisant plusieurs étoiles laser (reconstruction du volume 3D à partir d'un ensemble de mesures à 2 dimensions). À partir de cette information sur le volume turbulent, une correction est appliquée par plusieurs miroirs conjugués optiquement à différentes altitudes. [2, 13, 14].

On parle alors d'optique adaptative tomographique assistée par laser. Les problèmes, que ce soit au niveau de la mesure sur spot laser que de la reconstruction tomographique, liés à ce type de configuration sont nombreux et leur complexité augmente proportionnellement à la taille des télescopes considérés. Les premiers systèmes intégrant laser et mesure du volume turbulent ont commencé à voir le jour depuis quelques années et le futur grand défi autour de l'optique adaptative sera leur mise en œuvre opérationnelle pour les futurs télescopes géants (*Extremely Large Telescopes*).

LES NOUVEAUX TÉLESCOPES GÉANTS : NOUVEAUX DÉFIS, NOUVELLES SOLUTIONS

La prochaine décennie verra l'avènement des télescopes géants. Avec un diamètre pouvant aller jusqu'à 39 m pour le télescope européen (ELT) ⁴, ces télescopes [15,16], ayant une surface collectrice près de 13 fois supérieure ⁵ à la génération actuelle, vont révolutionner l'astronomie au sol. La diversité des thèmes astrophysiques et des besoins d'observation associés font de l'OA un élément indispensable qui se situe maintenant au cœur même de ces télescopes (voir Figure 5). Au-delà de la correction de la turbulence atmosphérique elle-même, le nouveau défi à relever sera la capacité à gérer les défauts introduit par le télescope lui-même. Ce dernier aura un dôme de la taille d'un stade de foot avec 74 m de haut sur 89 m de base au sol pour une masse totale de près de 5000 tonnes, le tout remplis de structures qui généreront leur propre turbulence locale. Le miroir primaire sera composé 798 segments hexagonaux de 1,4 m de diamètre qu'il faudra positionner les uns par rapport aux autres avec des précisions sub-micrométriques. L'ELT intègre un miroir déformable de 4,2 m de diamètre composé de près de 5000 actionneurs fonctionnant à plus d'un kilohertz. La combinaison des tailles titanesques des optiques et de besoins extrêmes en termes de précision (nanométrique) font de l'optique adaptative pour les ELT un challenge scientifique, technologique et instrumental immense. Les problématiques conceptuelles combinées aux contraintes d'ingénierie sont aujourd'hui le quotidien des chercheurs, ingénieurs et techniciens qui travaillent à la conception et la réalisation des futurs instruments d'Optique Adaptative de l'ELT. Pour deux de ces instruments (HARMONI et MOSAIC), la réalisation de l'OA est une aventure commune entre le LAM (Laboratoire

d'Astrophysique de Marseille) et l'ONERA qui ont unis leurs efforts pour répondre à ce défi hors-norme [17].



Figure 5.1 : L'ELT : un Dôme de 74 m de haut, une base de 89m de diamètre, 5000 tonnes, un miroir primaire de 39m de diamètre composé de 798 segments hexagonaux de 1.4m positionnés avec une précision sub-micrométrique.



Figure 5.2 : L'instrument HARMONI 10x5x8 m3, 35 tonnes. Spectro-Imageur de première lumière de l'ELT. Instrument à haute résolution spatiale et spectrale. Il intègre 2 systèmes d'OA (dont un tomographique Laser fonctionnant avec 6 étoiles artificielles) et un imageur hyper-spectral fonctionnant dans le visible et dans l'Infra-Rouge (de 0.45 à 2.2 microns) qui allie résolution spatiale (jusqu'à des pixels de 4 millisecondes d'arc) et spectrale (avec une résolution pouvant évoluer entre 3000 et 20000 selon les besoins)

QUELQUES PERSPECTIVES

Le domaine de l'OA pour l'astronomie est extrêmement actif. Ainsi, les sujets abordés depuis 20 ans, loin d'être clos, regorgent au contraire de pistes à explorer, de systèmes à imaginer et à construire, de concepts à étudier,

4. Ses concurrents américains GMT et TMT faisant respectivement 24 et 30m de diamètre.

5. L'ELT collectera 100 millions de fois plus de lumière qu'un œil humain et 256 fois plus que le télescope spatial Hubble.

d'expériences à conduire, d'algorithmes à proposer. Il est par nature impossible de dresser une liste exhaustive de ces activités futures, mais nous pouvons mettre en évidence certains axes majeurs qui sont, et seront dans les années à venir, les piliers des recherches à mener.

Le premier de ces axes est sans aucun doute le développement du futur télescope géant européen (ou ELT). L'instrumentation associée à ce télescope présente un nombre incalculable de défis. L'OA est au cœur de cette entreprise tant en ce qui concerne le télescope lui-même que son instrumentation avec pour objectif une première lumière pour le télescope en 2026 et la toute première image d'une planète tellurique à l'horizon 2035 !

Le deuxième axe majeur repose sur la mise à niveau de l'instrument SPHERE. Après sa mise en œuvre dans le ciel en 2014, des améliorations possibles ont été identifiées pour que le système gagne en détectivité. L'expérience unique acquise sur SPHERE pendant les 10 ans de développement de l'instrument sera essentielle pour imaginer des concepts innovants et de nouveaux composants afin de gagner 2 à 3 ordres de grandeur en termes de contraste et de détectivité sur le système.

Enfin, il est important de mentionner des sujets de recherche non liés à l'astronomie mais qui se nourrissent des recherches et développements menés pour les télescopes géants. Il s'agit notamment de l'AO pour l'ophtalmologie, les télécommunications optiques, l'observation de satellites en orbite basse, l'imagerie endo-atmosphérique et la mise en forme de faisceaux laser (imagerie ou focalisation du faisceau laser). Ces activités regroupent des enjeux liés à la mesure et à la pré compensation du volume de turbulence (pour corriger les effets de l'anisoplanétisme mais aussi de la scintillation), sur les problèmes d'analyse et de contrôle du front d'onde mais aussi sur le traitement des données qui sont en forte synergie avec les activités menées dans le contexte astronomique.

BIBLIOGRAPHIE

- Roddier, F, *Adaptive Optics in Astronomy*, Cambridge University Press, 1999, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511525179>
- Fusco, T. *Correction partielle et anisoplanétisme en optique adaptative : traitements a posteriori et optique adaptative multiconjuguée*. Thèse de Doctorat. Université de Nice Sophia Antipolis, 2000
- Fusco, et al (2004). NAOS on-line characterization of turbulence parameters and adaptive optics performance. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 6(6), 585.
- J.-L. Beuzit et al. SPHERE: the exoplanet imager for the Very Large Telescope. *A&A* 631, A155 (2019)
- Fusco, T et al (2006). High-order adaptive optics requirements for direct detection of extrasolar planets: Application to the SPHERE instrument. *Optics Express*, 14(17), 7515–7534.
- Fusco, T., Sauvage, J.-F., Petit, C., Dohlen, K., Costille, A., Mouillet, D., & Beuzit, J.-L. (2015). SPHERE-SAXO: optique adaptative extrême pour la détection de planètes extrasolaires. *Photoniques*, (75), 34–37.
- Fusco, T., Petit, C., Rousset, G., Conan, J.-M., & Beuzit, J.-L. (2005). Closed-loop experimental validation of the spatially filtered Shack–Hartmann concept. *Optics Letters*, 30(11), 1255–1257.
- Petit, C., Conan, J.-M., Kulcsár, C., Raynaud, H.-F., & Fusco, T. (2008). First laboratory validation of vibration filtering with LQG control law for adaptive optics. *Optics Express*, 16(1), 87–97.
- Sauvage, J.-F., Fusco, T., Rousset, G., & Petit, C. (2007). Calibration and precompensation of noncommon path aberrations for extreme adaptive optics. *JOSA A*, 24(8), 2334–2346.
- Fauvarque O, Neichel B, Fusco T, Sauvage J-F, Girault O. General formalism for Fourier-based wave front sensing: application to the pyramid wave front sensors. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*. 8 mars 2017;3(1):019001.
- N. Ageorges, C. Dainty, *Laser Guide Star Adaptive Optics for Astronomy*, NATO ASI Series (ASIC, Volume 551)
- Robert, C., Conan, J.-M., Gratadour, D., Schreiber, L., & Fusco, T. (2010). Tomographic wavefront error using multi-LGS constellation sensed with Shack–Hartmann wavefront sensors. *JOSA A*, 27(11), A201–A215.
- Fusco, T., Conan, J.-M., Rousset, G., Mugnier, L. M., & Michau, V. (2001). Optimal wave-front reconstruction strategies for multiconjugate adaptive optics. *JOSA A*, 18(10), 2527–2538.
- Neichel, B., Fusco, T., & Conan, J.-M. (2009). Tomographic reconstruction for wide-field adaptive optics systems: Fourier domain analysis and fundamental limitations. *JOSA A*, 26(1), 219–235.
- R Gilmozzi, J Spyromilio. The European extremely large telescope (E-ELT). *The Messenger*, 2007, eso.org
- Fusco, T., & Cuby, J.-G. (2010). E-ELT, le futur télescope géant européen. *Photoniques*, (48), 42–44.
- Neichel, B, Fusco T, Sauvage JF et al, The adaptive optics modes for HARMONI: from Classical to Laser Assisted Tomographic AO, *Proceedings Volume 9909, Adaptive Optics Systems V*; 990909 (2016) ■

Instabilités de combustion dans les moteurs cryotechniques : couplage entre modèles à interface diffuse et modèles cinétiques pour la simulation de l'atomisation

par Pierre Cordesse, Air Liquide Advanced Technologies, membre 3AF et Alumni-ONERA

Diplômé de l'Ecole centrale de Paris, Pierre Cordesse a obtenu un doctorat en mathématiques appliquées à l'Ecole polytechnique, cofinancé par le CNES et l'ONERA. Lauréat du prix thèse décerné par la 3AF en 2020, cet article relate les travaux objets de ce prix. Pierre Cordesse est actuellement responsable produit management de gaz sur des applications satellites et lanceurs au sein d'Air Liquide Advanced Technologies management. Il est aussi membre fondateur de SpaceCon'nect qui aura lieu en juin 2021 à Meudon dans le cadre du festival Star's up.

Gardiens de l'espace, les lanceurs sont soumis à des améliorations intenses et compétitives, par le biais de campagnes de tests expérimentaux et numériques. Les simulations numériques prédictives sont devenues obligatoires pour améliorer notre compréhension de la physique. Ajustables, elles se prêtent parfaitement à la conception et l'optimisation, en particulier de la chambre de combustion, pour garantir la sûreté et maximiser l'efficacité. Comme présenté Figure 1, l'un des principaux phénomènes physiques impliqués dans la combustion est l'atomisation du jet, qui pilote à la fois les distributions de gouttelettes et les potentielles instabilités à haute fréquence en conditions sous-critiques.

Elle englobe un large spectre de topologies d'écoulement diphasique, des phases séparées à la phase dispersée, en passant par une région mixte où la physique et l'organisation de l'écoulement à petite échelle sont très complexes. La Figure 2 schématise les différentes topologies d'écoulement dans le cas spécifique des moteurs cryogéniques équipés d'injecteurs à cisaillement coaxial où le carburant est de l'hydrogène gazeux, $H_{2(g)}$, et l'oxydant de l'oxygène liquide, $O_{2(l)}$.

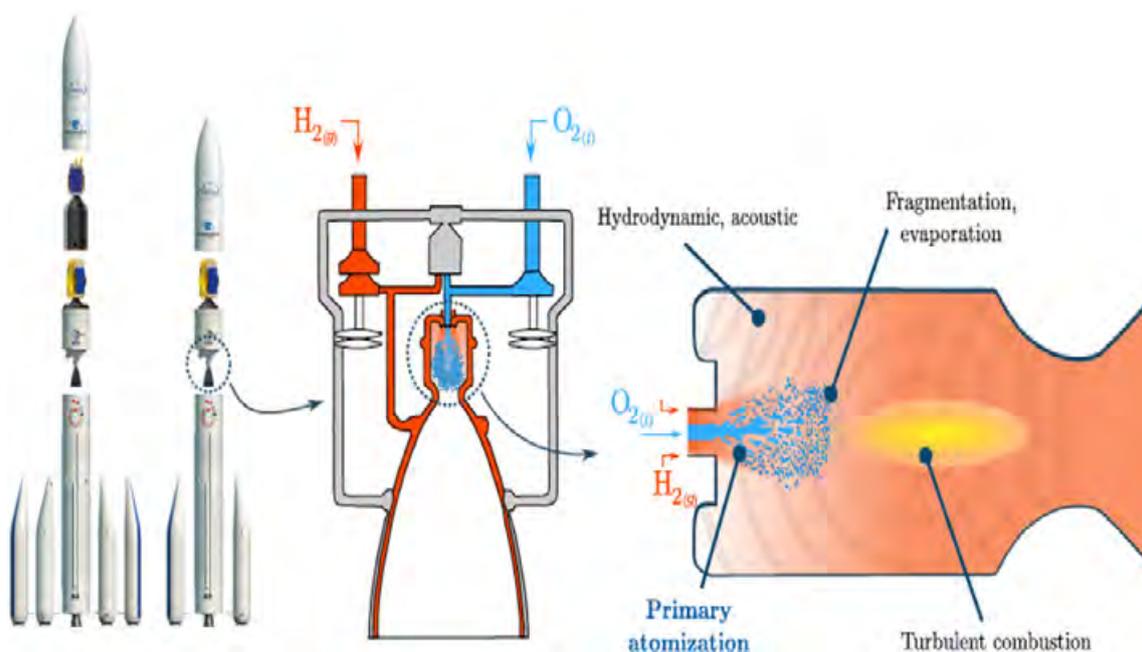


Figure 1 : Représentation de l'atomisation de l'oxygène liquide $O_{2(l)}$ dans l'hydrogène gazeux $H_{2(g)}$ au sein de la chambre de combustion des moteurs cryogéniques équipant Ariane 6.

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES INSTABILITÉS DE COMBUSTION DANS LES MOTEURS CRYOTECHNIQUES

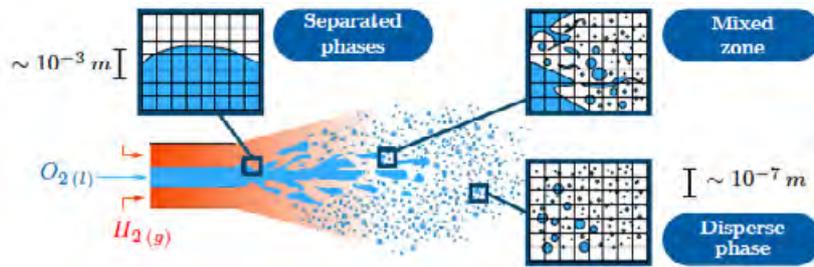


Figure 2 : Organisations d'écoulement et échelles de l'atomisation de jet par injection cryogénique en conditions sous-critiques.

Les modèles d'ordre réduit sont de bons candidats pour réaliser des simulations prédictives mais exigeantes en termes de ressources CPU sur des configurations industrielles. Néanmoins, ils n'ont pu jusqu'à présent saisir que la dynamique à grande échelle et doivent être couplés à des modèles à phase dispersée par le biais de paramètres ajustables et peu fiables afin de prédire la formation de brouillard de gouttes.

L'amélioration des modèles d'ordre réduit existants repose sur quelques principes clefs fournissant des problèmes interdisciplinaires faisant appel tant à l'analyse mathématique et à la modélisation physique de ces systèmes d'EDP (Equations aux dérivées partielles) qu'à leur discrétisation numérique et leur implémentation dans des codes de CFD à des fins industrielles.

Ainsi, l'auteur a d'abord proposé une extension de la théorie des équations de conservation supplémentaires aux systèmes d'EDP impliquant des termes non-conservatifs afin de pouvoir l'appliquer aux modèles d'écoulement diphasique existants. En effet, cette première contribution a permis de révéler des propriétés clefs des systèmes d'EDP, notamment sur l'existence d'une équation conservative supplémentaire d'entropie, mais aussi des conditions de symétrisation entropique du système et de son hyperbolicité garantissant ainsi son caractère bien posé.

D'autre part, l'auteur a développé un formalisme de thermodynamique multi-fluide tenant compte des effets non-idéaux d'interaction entre phase. Cela a permis de proposer de nouvelles pistes pour définir une entropie de mélange strictement convexe et consistante avec le système d'équations et les lois de pression qui l'équipent. Ce nouveau formalisme thermodynamique, combiné avec la théorie des équations de conservation supplémentaires devrait permettre la symétrisation entropique des modèles diphasiques, de prouver leur hyperbolicité et d'obtenir des termes sources généraux.

Par ailleurs, s'appuyant sur une fonction de densité de probabilité (fdp), la thèse rompt avec l'approche standard de modélisation d'interface, qui consiste à décrire l'interface comme une surface géométrique d'épaisseur nulle, et propose une approche multi-échelle de celle-ci sans aucun postulat sur sa localisation ni sa forme. Ce nouvel outil de modélisation multi-échelle semble unifier les diverses approches de modélisation des écoulements diphasiques et permet de décrire un mélange multi-fluide comportant une dynamique interfaciale complexe.

Ces trois premières briques théoriques ont permis, au travers d'une méthode de dérivation mathématique de modèle : le Principe de Moindre Action (PMA), d'apporter un nouvel élan dans la modélisation réduite d'écoulement diphasique, en rupture avec ce qui se faisait depuis plusieurs dizaines d'années. Le PMA a conduit en effet à un nouveau modèle diphasique à une vitesse couplant grandes et petites échelles de l'écoulement et intégrant des effets non-idéaux de thermodynamique permettant de capturer des dynamiques complexes de l'interface et de l'interaction de fluides en fort déséquilibre thermodynamique. Ce type d'écoulements complexes dépasse le cadre des moteurs fusées et se retrouve en aéronautique, dans les écoulements nucléaires, et dans tout procédé industriel d'atomisation comme en agriculture ou en biomédicale.

Afin de mesurer l'apport de cette modélisation innovante et de rupture, l'auteur a développé une stratégie numérique de séparation d'opérateurs basée sur la discrétisation par volumes finis pour implémenter le nouveau modèle dans le logiciel industriel de CFD multi-physique, CEDRE, de l'ONERA afin d'évaluer numériquement ce dernier et de permettre à moyen terme de le rendre accessible aux partenaires industriels de l'ONERA.

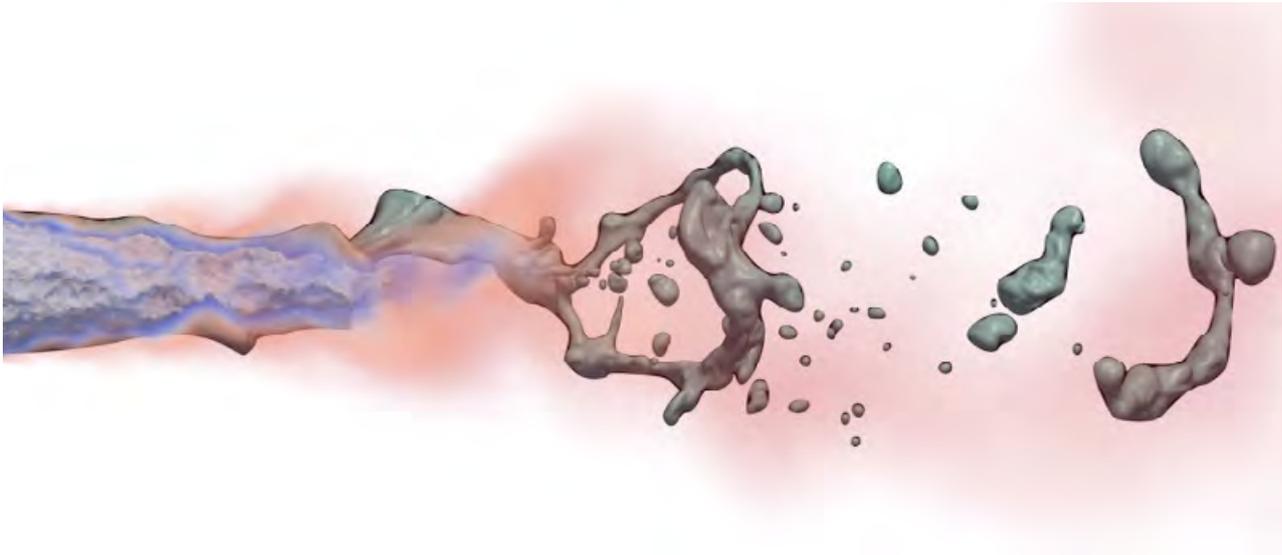


Figure 3 : Dard liquide obtenu avec le modèle d'ordre réduit implémenté dans CEDRE (couleur) comparé aux résultats du code DNS ARCHER (gris).

Dans cette démarche d'évaluation de la prédictibilité du modèle, ont été construits et analysés les fondations d'une hiérarchie de cas tests accessibles à la simulation numérique directe tout en étant au plus près de configurations industrielles de l'industrie aéronautique et spatiale. La hiérarchie de cas tests a été initiée par une atomisation d'eau assistée par air à l'aide d'un injecteur coaxial, qui dispose en outre des résultats expérimentaux du banc d'essai LEGI. La comparaison a montré une bonne concordance en terme de longueur de noyau liquide, comme le montre la Figure 3, ainsi que des gains CPU importants entre le modèle d'ordre réduit à sept équations mis en œuvre dans le code CEDRE et les résultats DNS obtenus avec le code ARCHER.

Les résultats de tout modèle d'ordre réduit peuvent être ainsi comparés à ceux de la DNS (Direct Numerical Simulation). Pour conclure, les résultats des simulations faites avec le nouveau modèle ont été validés sur de nombreux cas académiques 1D et 2D et sont très encourageants. Un calcul 3D sur une configuration d'écoulement cryogénique est d'ailleurs en train d'être mis en place.

Cette thèse a été enrichie par des collaborations multiples, encouragées par l'ouverture de l'équipe de recherche du directeur de thèse Marc Massot, professeur à l'École polytechnique. Ainsi, en plus des travaux de recherche menés avec certains collaborateurs de l'ONERA et du CMAP, l'auteur a eu l'opportunité de travailler avec le Complexe de Recherche Interprofessionnel en Aérothermochimie (CORIA) à Rouen, le laboratoire Énergétique moléculaire et macroscopique, combustion (EM2C) de CentraleSupélec, le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), le CNES et la NASA.

Pour terminer, ces travaux offrent un nouveau terrain de jeu aux horizons multiples et ont ainsi conduit à plusieurs nouveaux projets en cours concernant l'enrichissement de la description de l'interface en sous-échelle, la prise en compte du transfert de masse et de chaleur dans le nouveau formalisme de thermodynamique multifluides et son implémentation numérique, la poursuite du développement et implémentation numérique du modèle d'écoulement diphasique à deux échelles et enfin, la consolidation de la hiérarchie des cas de test susceptibles d'être utilisés par DNS pour évaluer les modèles d'ordre réduit. ■

Nimesis Technology : les alliages à mémoire de forme au service du spatial

par François Leproux, Nimesis Technology, président du GR Grand Est et Charlotte Thiriot, responsable communication Nimesis Technology

À la croisée de la France, du Luxembourg, de l'Allemagne et de la Belgique, le Grand-Est abrite de nombreuses pépites technologiques. C'est le cas de Nimesis Technology, basée à Mécleuves, à proximité immédiate de Metz. Cette PME, dirigée par Alain Hautcoeur, est experte dans le développement d'applications exploitant la technologie des alliages à mémoire de forme (AMF).

Au travers son savoir-faire de pointe, Nimesis Technology accompagne ses clients dans leurs projets les plus ambitieux, du prototypage jusqu'à la production série et ce dans de nombreuses industries (aérospatial, aéronautique, médical, défense, horlogerie, nucléaire, etc.)

DES ALLIAGES DITS « INTELLIGENTS » QUI GARDENT LEUR FORME EN MÉMOIRE

Les alliages à mémoire de forme sont des alliages métalliques à deux, trois, voire quatre éléments. Habituellement peu employés en industrie, ils sont aujourd'hui de plus en plus exploités en raison de leurs étonnantes propriétés. Ces matériaux sont dits à « mémoire », car ils sont capables de retrouver leur forme initiale, c'est-à-dire de « se souvenir » des traitements thermomécaniques qu'on leur a fait subir. La clé physique du phénomène mémoire de forme repose sur une transformation du réseau cristallin du matériau, entre une phase austénitique à hautes températures et une phase martensitique à basses températures. Cette transformation est présente sur la plupart des alliages métalliques comme les aciers mais à des températures où l'effondrement des propriétés mécaniques les rendent inutilisables.

La figure 1 représente schématiquement l'effet de mémoire de forme. L'application d'une contrainte sur une microstructure martensitique entraîne le mouvement des interfaces mobiles des différentes variantes, de sorte que les variantes de martensite accommodant au mieux la déformation progressent au détriment des autres (2). Ce changement d'orientation des variantes permet d'obtenir la meilleure accommodation possible de la déformation, jusqu'à atteindre une déformation

maximum (3). Lorsque la contrainte cesse, une faible partie de la déformation est recouvrée.

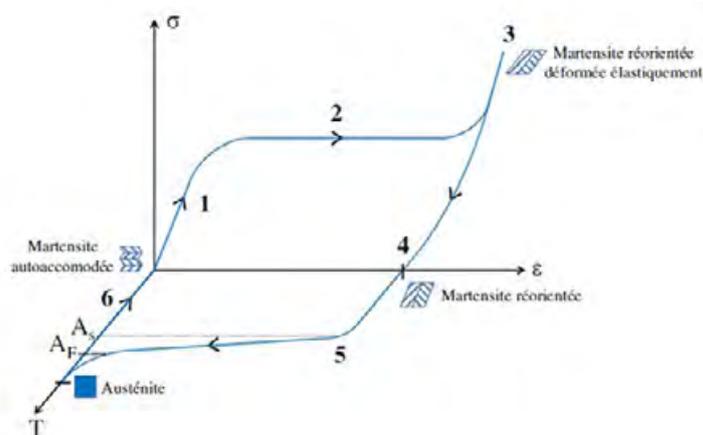


Figure 1 : Représentation schématique de l'effet mémoire de forme

Il subsiste une déformation permanente car la martensite est stable à cette température (4). Pour obtenir le retour à l'état initial du matériau, il est nécessaire d'effectuer un chauffage à contrainte nulle jusqu'à une température supérieure à AF afin d'atteindre une transformation inverse complète (5). Le recouvrement de la déformation s'explique par le retour du matériau en phase austénitique. Enfin le retour à température ambiante entraîne une transformation de phase sous contrainte nulle. Le phénomène d'accommodation prend alors place et reforme le mélange de variantes de martensite initial (6) : c'est l'effet mémoire de forme simple sens.

AUTRE AVANTAGE, LA SUPERÉLASTICITÉ DU MATÉRIAU

Une autre propriété très intéressante des AMF est la superélasticité : c'est la capacité pour un AMF de se déformer de manière réversible sous l'effet d'une contrainte. Lorsque le matériau se trouve sur le point de se transformer thermiquement en martensite, on lui impose une déformation qui entraîne le travail supplémentaire nécessaire à sa transformation. La martensite n'étant pas stable, elle retourne à l'état austénitique si on relâche la contrainte et retrouve sa forme initiale. Un

AMF peut ainsi endurer des taux de déformation compris entre 5% et 8% de manière réversible alors que les métaux classiques ne dépassent pas 0.8%.

DIFFÉRENTES FAMILLES D'ALLIAGES

Les deux principales familles sont les alliages nickel-titane (communément appelé NiTiNol) et les alliages base cuivre. Les propriétés des AMF base cuivre sont très intéressantes (8% à 10% de déformation), mais elles peuvent être limitées par certains phénomènes tels que le vieillissement et la stabilisation de la martensite.

L'élaboration des alliages de Ni-Ti est également coûteuse, le titane étant avide d'oxygène, la fusion est généralement réalisée sous vide. La mise en forme de ces alliages ne présente pas de difficultés particulières, le métal étant encore malléable à la température de forgeage (laminage ou extrusion), environ 800°C. Cependant, il est nécessaire de réaliser un traitement thermique après la mise en forme pour obtenir les propriétés de mémoire. La température et le temps de maintien sont critiques et dépendent du type d'application.

DU MÉDICAL AU SPATIAL, LES DOMAINES D'APPLICATION SONT VARIÉS

Le domaine biomédical a très vite adopté l'utilisation des AMF qui y sont particulièrement bien adaptés. En effet, les températures d'activation de ces alliages peuvent être calquées sur les températures du corps humain. Ils peuvent être utilisés par exemple dans la conception de stents pour maintenir des artères ouvertes ou de corbeilles pour récupérer des calculs rénaux. À noter également que le NiTiNol est biocompatible.

Nimesis Technology se positionne historiquement sur ce domaine, avec un savoir-faire et une expertise reconnus depuis plusieurs années. Parmi ses réalisations phares, on retrouve des stents tressés main aux formes parfois complexes, des corbeilles urologiques ou encore des agrafes d'ostéosynthèse (voir Figure 2)

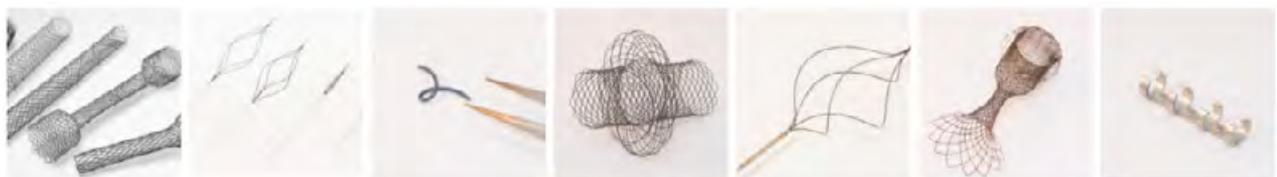


Figure 2 : Composants biomédicaux en AMF produits par Nimesis Technology @Nimesis

Ces alliages aux particularités étonnantes sont également en ligne de mire du secteur spatial : ils permettent de générer beaucoup d'énergie mécanique par simple élévation de température. Les températures d'activation des AMF étant proches de celles rencontrées dans l'environnement spatial (100°C), il est possible d'en tirer profit par exemple en activant un mécanisme lors de phases d'exposition au soleil.

La reprise de forme des AMF est bien adaptée au déploiement d'antennes ou de panneaux solaires. La superplasticité de ces alliages intéresse aussi de grands acteurs spatiaux comme la NASA qui développe des roues pour les rovers lunaires ou martiens (voir Figure 3). Cette élasticité, supérieure à celle de pneus mais avec une masse très largement inférieure, permet par exemple une bonne adaptation aux sols rocailloux.



Figure 3 : Roue en NiTiNol pour des rovers martiens @NASA

APPLICATIONS AÉRONAUTIQUES DES ALLIAGES MÉMOIRES DE FORME

Les AMF présentent l'avantage d'être à la fois capteur et actionneur, ce qui en fait des composants très fiables et robustes. L'industrie aéronautique est très intéressée par les technologies basées sur les AMF, profitant des hauts niveaux de contrainte et de déplacement qu'ils peuvent générer ou de l'énergie qu'ils peuvent stocker tout en réduisant la masse des actionneurs. Ainsi, les AMF peuvent remplacer des actionneurs électriques, pneumatiques ou mécaniques dans les avions.

Les AMF sont par exemple envisagés pour faire varier le profil des ailes (wing morphing) afin de les adapter à chaque domaine de vol. Ainsi, on peut améliorer les performances aérodynamiques de l'avion et diminuer la traînée, la consommation de carburant et les émissions de CO₂. Le wing morphing est particulièrement bien adapté aux entrées d'air, mais également aux ailes volantes, qui sont souvent présentées comme des alternatives aux avions de ligne classiques. Nimesis Technology a d'ailleurs déjà étudié cette technologie (voir figure 4).

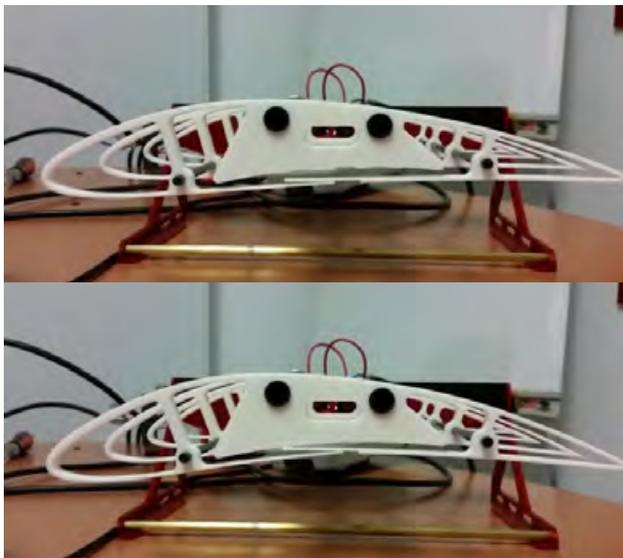


Figure 4 : Wing morphing activé par un AMF @Nimesis

Les AMF peuvent également servir à améliorer les performances des turboréacteurs : ainsi Boeing a déjà étudié l'utilisation de chevrons en AMF situés autour des tuyères de turboréacteurs et qui permettent de réduire le bruit généré au prix d'une augmentation de la traînée. Une fois l'avion en phase de croisière, lorsque la température extérieure baisse, les AMF rétractent les chevrons et réduisent la traînée.

Depuis 2019, Nimesis Technology est impliqué dans un projet, subventionné par la DGA et mené avec EQUIP'AERO SERVICES, qui vise à développer une vanne basée sur un AMF résistante à hautes températures et à un grand nombre de cycles pour réguler la température des fluides hydrauliques dans les échangeurs de chaleur. Un autre projet est également subventionné par l'Union européenne dans le cadre du projet Cleansky 2 pour gérer les échanges de chaleur dans les turboréacteurs.

LA GAMME D'ACTIONNEURS SPATIAUX DE NIMESIS : UNE AVANCE TECHNOLOGIQUE

Nimesis Technology a profité des évolutions du marché spatial pour développer sa propre gamme d'actionneurs spatiaux, les Triggy (voir Figure 5). Le fonctionnement se base sur un principe simple : cet actionneur permet de briser une vis par élévation de la température d'un composant AMF. Celui-ci est une petite bague initialement comprimée et entourée d'un réchauffeur et insérée dans un assemblage mécanique. Lorsqu'on le chauffe au-dessous de la température d'activation de l'AMF (100°C), ce dernier change de phase et récupère sa forme initiale, fournissant assez de déplacement et de force pour briser la vis et ainsi libérer un mécanisme, par exemple un panneau solaire ou une antenne (voir Figure 6).

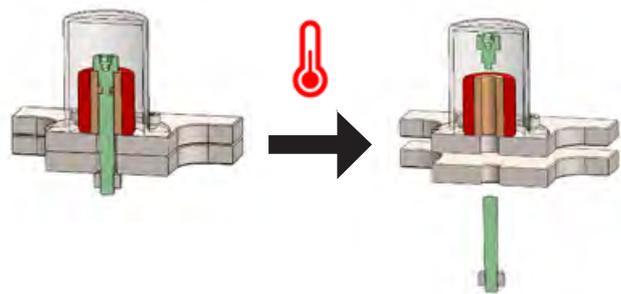


Figure 5 : Schéma de principe d'un Triggy @Nimesis

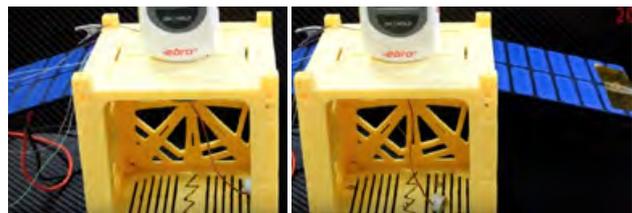


Figure 6 : Déploiement d'un panneau solaire d'un Cubesat 1U par un Triggy @Nimesis

Ce type de composant est utilisé depuis des années sur des missions commerciales ou scientifiques, comme récemment avec l'instrument SEIS de la mission Mars Insight. Mais en s'appuyant sur l'expérience et le savoir-faire de ses collaborateurs, Nimesis Technology se différencie et a mis au point un AMF unique à base de cuivre : le CuAlNi. Cet alliage, dont le procédé de fabrication est breveté, présente plusieurs qualités appréciables pour le spatial : sa température d'activation est plus haute que celles des NiTi (200°C), en dehors de l'intervalle communément rencontré dans le spatial et donne ainsi la garantie de ne pas être activé de manière indésirable (tout en évitant des probléma-

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

NIMESIS TECHNOLOGY :

LES ALLIAGES À MÉMOIRE DE FORME AU SERVICE DU SPATIAL

tiques de contrôle thermique). De plus, le CuAlNi génère plus de déplacement que le NiTiInol, réduisant largement la masse et l'encombrement des actionneurs à performances égales par rapport aux produits concurrents et sont ainsi particulièrement adaptés aux nanosatellites et aux Cubesats. Les Triggy sont développés pour des dimensions adaptées à des vis allant de M2 jusqu'à M12. Plusieurs missions de Cubesats utilisant ces actionneurs sont prévues dans les mois à venir.

D'autres développements sont en cours comme le PinLoader, un actionneur qui permet d'appliquer une charge constante sur un mécanisme puis de la libérer par déplacement d'un pion utilisant également la technologie AMF. Nimesis Technology travaille aussi sur des mécanismes personnalisés pour des clients aux profils variés, des agences spatiales aux start-ups du NewSpace, en développant des solutions innovantes pour des Cubesats ou des rovers. Ainsi, Nimesis Technology travaille avec le CNES pour développer le système de déploiement des panneaux solaires du rover MMX (Martian Moon Explorations) destiné à explorer Phobos, une Lune de Mars dans le cadre d'une coopération avec la JAXA et le DLR à l'horizon 2024 (voir Figure 7).



Figure 7 : Le Rover MMX @CNES-DLR-JAXA

En 2020, Nimesis Technology a pris la tête d'une étude de deux ans sur l'impression 4D (impression 3D des AMF) menée pour l'Agence spatiale européenne avec Thales Alenia Space et le laboratoire LEM3 de l'Université de Lorraine.

Nimesis Technology est également le référent technologique du projet artistique Vitae imaginé par l'artiste Anilore Banon (voir Figure 8). L'idée est celle d'une œuvre vivante posée sur la Lune. Grâce aux AMF, la structure s'ouvrira et se fermera suivant la nuit et le jour lunaires ; elle oscillera entre des températures comprises entre +120°C et -170°. Un modèle réduit a volé avec Thomas Pesquet à bord de l'ISS en 2016.

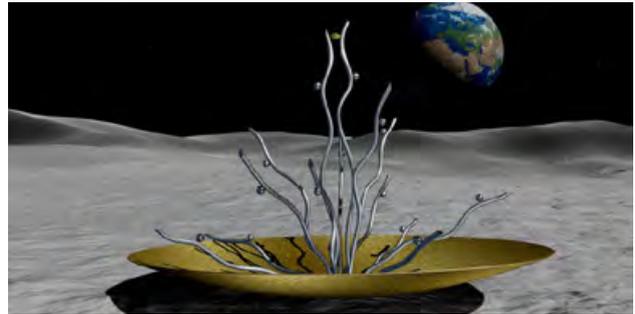


Figure 8 : Le projet VITA d'Anilore Banon @Vitae

Les Triggy de Nimesis Technology ont également convaincu la Commission européenne, dans le cadre du programme H2020 EIC Accelerator : une subvention de 1,2 millions d'euros a été accordée et le Fonds européen d'investissement rentre, à l'occasion d'une deuxième levée de fonds, au capital de Nimesis Technology avec un apport de 500,000€. Ces subventions et investissements récompensent plusieurs années de développement en collaboration avec le CNES et vont permettre l'industrialisation et la commercialisation des actionneurs Triggy et Pinloader (voir Figure 9).



Figure 9 : La gamme des actionneurs Triggy @Nimesis

Au travers un Programme d'investissements d'avenir (PIA), le CNES apporte aussi un appui financier pour qualifier l'ensemble de la gamme Triggy®. Avec BPI France, ce sont donc trois accompagnements importants qui vont permettre une mise sur le marché rapide de ces produits innovants et une croissance de l'entreprise qui se traduit par l'embauche d'une dizaine de collaborateurs, des investissements matériels de plusieurs centaines de milliers d'euros, une certification ISO EN9100 dans les prochains mois et un agrandissement des locaux avec l'établissement d'une salle grise.

Misant sur la dynamique du marché spatial et des constellations de satellites, toujours plus demandeuse de composants standardisés et miniaturisés, Nimesis Technology se donne les moyens pour devenir le leader européen des actionneurs spatiaux à base d'AMF, une technologie essentielle pour constituer une filière industrielle souveraine de nanosatellites. ■

Interview d'Olivier Lesbre directeur général de l'ISAE-SUPAERO et président du Groupe ISAE

par Jean-Pierre Sanfourche, chargé de mission 3AF



Au cours de sa carrière, l'IGA Olivier LESBRE a dirigé le programme de missile SCALP à son lancement, participé à la mise en place du programme A400M et de l'OCCAR, œuvré comme attaché d'armement à Londres à la préparation du traité de Lancaster House et dirigé DGA-Maîtrise de l'information pendant cinq ans. Il est directeur général de l'ISAE-SUPAERO et président du Groupe ISAE depuis 2014.

1 – Pourriez-vous présenter en quelques mots la genèse du Groupe ISAE ?

Le Groupe ISAE a été officiellement créé en 2011 mais il faut revenir quelques années en arrière pour comprendre sa genèse.

Les écoles d'ingénieur aéronautiques françaises avaient depuis longtemps créé un groupe informel, le « groupe des écoles aéronautiques », entre SUPAERO, ENSICA, ENAC et ENSMA. En 2007, à l'instigation de leur ministère de tutelle, l'ENSICA et SUPAERO ont fusionné au sein de l'Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace (aujourd'hui l'ISAE-SUPAERO), pour gagner en efficacité et en visibilité. Toujours dans ce même objectif, quatre ans plus tard, l'ISAE-SUPAERO a souhaité fédérer un groupe autour de la nouvelle marque ISAE, en la mettant à disposition des écoles qui partageaient les mêmes valeurs, la même passion pour l'aéronautique et le spatial et la volonté de développer des projets en commun, au moment où se structuraient d'autres groupes d'écoles d'ingénieurs comme le Groupe INSA ou le Groupe des Écoles centrales.

L'ENSMA de Poitiers, qui entretenait déjà des relations très étroites avec l'ENSICA et SUPAERO, a été en 2011 la première école à rejoindre l'ISAE-SUPAERO pour créer le Groupe ISAE et prendre le nom ISAE-ENSMA. L'ESTACA et l'École de l'air ont, elles aussi souhaité, en 2012, s'associer au Groupe ISAE et participer à des projets communs, sans toutefois modifier leur nom. Le Groupe ISAE a ainsi développé ses activités pendant 6 ans dans cette configuration, sur la base d'une convention liant les quatre écoles. Une étape importante a été la mise en place d'une convention avec le GIFAS pour soutenir le développement du Groupe, en 2015 : ce soutien a permis de doter d'un délégué général à plein temps. En 2017, devant la dimension prise par les activités du Groupe, les quatre

écoles ont décidé de le structurer en association loi 1901.

2 – Jusqu'en 2018, le Groupe ISAE a donc réuni ces 4 écoles d'ingénieurs. Depuis cette date, on a pu constater une accélération des adhésions avec une nouvelle école associée (SUPMÉCA) et 3 écoles partenaires (ESTIA, EIGSI et Elisa Aerospace). Pourquoi une telle évolution ?

En l'espace de quelques années, le Groupe ISAE s'est imposé comme un espace d'échanges de bonnes pratiques et de développement de projets communs, et comme l'interlocuteur naturel des acteurs industriels et institutionnels du secteur aéronautique et spatial, et en particulier du GIFAS. Présent dans les principales régions aéronautiques et spatiales françaises (Ile-de-France, Occitanie, Nouvelle Aquitaine, et PACA), le Groupe offre au secteur aérospatial des profils de diplômés complémentaires pour répondre à la plupart de leurs besoins.

C'est donc très naturellement que d'autres écoles orientées vers ce secteur ont souhaité se rapprocher du Groupe ISAE. SUPMÉCA qui, au cours de ces dix dernières années, a vu la proportion de ses diplômés s'orientant vers le secteur aéronautique devenir majoritaire, est devenue partenaire début 2018, puis associé en 2019. À cette date, les cinq écoles du Groupe ISAE formaient 6000 étudiants (dont 4500 élèves ingénieurs) et plus de 1600 diplômés par an aux niveaux ingénieur, master et docteur.

En 2020, le Groupe ISAE a conclu des partenariats avec ELISA Aerospace, l'ESTIA et l'EIGSI. Ces deux dernières, sans faire de l'ingénierie aérospatiale leur cœur de métier, forment leurs ingénieurs sur des domaines connexes et en voient une proportion importante embauchée dans le secteur. Les trois écoles partenaires représentent quelque 2800 étudiants et 500 diplômés par an.

INTERVIEW D'OLIVIER LESBRE DIRECTEUR GÉNÉRAL DE L'ISAE-SUPAERO ET PRÉSIDENT DU GROUPE ISAE

3 - Quels sont les intérêts pour le Groupe ISAE de conclure des partenariats avec des écoles de domaines connexes comme vous le mentionnez ?

Ces partenariats sont élaborés dans une logique gagnant/gagnant. Les écoles partenaires vont pouvoir participer à des échanges de bonnes pratiques avec les écoles membres et associées du Groupe ISAE et participer à des projets portés par le Groupe dans les domaines de la formation, de la recherche ou de la vie étudiante. Le Groupe ISAE quant à lui pourra s'enrichir d'expertises particulières développées dans ces écoles comme la fabrication additive à l'ESTIA ou le stockage d'énergie à l'EIGSI. Le Groupe ISAE pourra également s'appuyer sur l'expérience internationale de l'EIGSI, implantée à Casablanca, pour étudier et éventuellement répondre à des besoins en formation des pays émergents.

4 - Certaines écoles ont pris la marque ISAE comme l'ISAE-SUPAERO et l'ISAE-ENSMA. Ce n'est pas le cas pour l'ESTACA, l'École de l'air et SUPMECA. Pourquoi ?

Le Groupe ISAE est une structure souple, avec trois niveaux d'intégration et d'implication : membre, associé, partenaire. À chaque niveau correspondent des critères d'éligibilité dans les domaines de la formation, de la recherche, de l'ouverture sociale et internationale et de l'ancrage dans le secteur aérospatial. Une école peut très bien décider de rester au premier niveau d'intégration même si elle est éligible au niveau supérieur.

Les écoles qui souhaitent devenir membre avec une implication élevée au sein du Groupe ISAE doivent prendre la marque ISAE. Ce fut le cas dès 2011 pour l'ISAE-SUPAERO et pour l'ISAE-ENSMA. SUPMECA compte devenir membre en 2021 et prendre ainsi le nom ISAE-SUPMECA.

L'ESTACA et l'École de l'air ne font pas ce choix et souhaitent conserver leur statut d'école associée en raison notamment de leur profil plus spécifique : l'ESTACA couvre l'ensemble du domaine des transports, et destine la moitié de ses étudiants aux secteurs automobile et ferroviaire ; l'École de l'air quant à elle est une école militaire qui forme avant tout des officiers aviateurs pour les besoins spécifiques de l'armée de l'Air et de l'Espace.

5 - Pourriez-vous préciser les objectifs initiaux du Groupe ISAE par ses fondateurs en 2011 ?

Le Groupe ISAE a affiché depuis sa création l'ambition de fédérer en France les écoles du domaine de l'ingénierie aéronautique et spatiale sous une bannière commune, de façon à accroître le rayonnement de ces écoles, tant au niveau national qu'international, et promouvoir la formation d'ingénieurs dans les domaines de l'aéronautique et de l'espace. Les écoles du Groupe ne sont pas dans une démarche fusionnelle. Réparties sur le territoire et complémentaires par leurs cursus et par leurs modes de recrutement, elles déclinent leur ambition fondatrice en trois grands objectifs :

- Répondre aux besoins des acteurs industriels et institutionnels du secteur aérospatial en ingénieurs pluridisciplinaires de haut niveau scientifique, et préparer avec eux l'avenir du secteur.
- Faire de la marque ISAE un label de qualité pour les formations et la recherche dans le domaine aérospatial, en s'appuyant sur des valeurs d'excellence, d'ouverture et d'innovation.
- Faire du Groupe ISAE un creuset pour le développement de projets en commun, au profit de nos étudiants et de nos partenaires industriels et institutionnels.

6 - Comment s'est faite l'intégration de ces nouveaux entrants ?

Après avoir été admise comme partenaire en 2018, puis comme associée en 2019, SUPMÉCA a joué un rôle actif dans toutes les activités du Groupe, en apportant des expériences et des compétences très utiles pour certains projets, comme par exemple le montage de notre nouvelle formation d'ingénieurs par apprentissage. Elle a confirmé lors de son dernier conseil d'administration sa volonté de passer du statut d'école associée à celui d'école membre en 2021, ce qui la conduira à prendre la dénomination ISAE-SUPMÉCA. Cette évolution, que nous allons instruire au niveau des instances de gouvernance de l'association, est pour moi le signe d'une intégration rapide et parfaitement réussie.

Pour les écoles partenaires, leur participation active à certains projets montre leur volonté d'apporter leur valeur ajoutée au développement du Groupe ISAE. Je prendrai l'exemple de l'Alliance ISAE Nouvelle-Aquitaine que nous avons lancée en juillet 2020 sous la houlette de l'ISAE-ENSMA et dans laquelle les trois écoles partenaires ont pris toute leur place. Avec désormais 4

INTERVIEW D'OLIVIER LESBRE DIRECTEUR GÉNÉRAL DE L'ISAE-SUPAERO ET PRÉSIDENT DU GROUPE ISAE

écoles membres ou partenaires implantées en Nouvelle-Aquitaine (Poitiers, Bidart, La Rochelle, Bordeaux) le Groupe ISAE a structuré sa présence dans la région de manière à participer à des projets lancés par la Région Nouvelle-Aquitaine comme actuellement « L'Usine du futur » et le Ferrocampus®, et plus généralement d'assurer une représentation régionale du Groupe ISAE.

7 – Quels sont aujourd'hui les projets menés au sein du Groupe ISAE et ceux en cours de réflexion ?

En faire la liste serait un peu fastidieux ! Beaucoup de ces projets sont en lien direct avec la formation.

Un de nos premiers projets a été de mettre en place une semaine de mobilité interécoles. Sauf crise Covid, tous les ans, au mois d'avril, près de 500 étudiants quittent leur établissement d'origine pour suivre des cours et des séminaires dans une autre école. Cette semaine poursuit deux objectifs principaux : accroître l'offre de formations offerte aux étudiants en leur donnant la possibilité de suivre des modules d'enseignement dispensés dans une autre école et favoriser les échanges entre eux grâce en particulier à leur immersion sur un nouveau campus. Depuis deux ans, elle est centrée sur la thématique de la transition énergétique de l'aéronautique.

Le « Séminaire Espace » du Groupe ISAE est également un rendez-vous attendu de nos étudiants passionnés de spatial. Organisé chaque année sur plusieurs jours en partenariat avec le CNES et le GIFAS, le Séminaire Espace vise à apporter aux étudiants une compréhension des enjeux et des défis du domaine spatial civil et militaire, à travers des conférences, des tables-rondes et des ateliers. Ce séminaire annuel est une occasion privilégiée pour les élèves ingénieurs de rencontrer et d'échanger avec de grandes figures du secteur spatial.

Toujours dans le domaine de la formation, nous avons lancé une nouvelle formation d'ingénieur par apprentissage sous la marque du Groupe ISAE. Elaboré conjointement par des écoles membres et associées (ISAE-SUPAERO, ISAE-ENSMA, ESTACA, SUPMECA), et soutenu par le GIFAS, ce cursus forme des ingénieurs capables d'assurer une interface efficiente entre les bureaux d'études et les chaînes de production, et se déploie progressivement à Toulouse, à Poitiers et à Paris. La première promotion est rentrée à Toulouse en septembre 2020 ; malgré la crise, elle a fait le plein avec 30 nouveaux apprentis. Le déploiement dans les autres écoles du Groupe ISAE

s'étalera jusqu'en 2022.

A mi-chemin entre la formation et la recherche, le Groupe ISAE s'est engagé depuis plus de 5 ans dans le projet Euroglider. Il s'agit de concevoir un planeur biplace destiné à la formation et à l'entraînement des vélivoles, capable de décoller et de prendre de l'altitude sans remorqueur ni treuil grâce à une motorisation électrique. Porté par l'Association européenne pour le développement du vol à voile (AEDEVV), et conduit en partenariat avec Dassault Aviation, ce projet est susceptible de révolutionner la façon dont les clubs de vol à voile organisent leurs formations. Au-delà des aspects techniques innovants (aéro-structure, chaîne d'énergie et de propulsion...), nos étudiants abordent ce projet comme un réel projet industriel : cycle de vie d'un planeur et de sa chaîne d'énergie, cadre réglementaire et environnemental, approche économique... Un planeur banc d'essai a commencé à voler à Salon-de-Provence, et nous comptons communiquer sur ses premiers vols en mode autonome en février 2021.

Ce projet Euroglider illustre très concrètement combien nos écoles s'investissent sur la question du développement durable appliqué au secteur de l'aéronautique. C'est un sujet stratégique qui irrigue en profondeur nos formations et nos activités de recherche, ainsi que la vie de campus ; et sur lequel nous nous positionnons aujourd'hui en concertation avec les acteurs industriels et institutionnels du secteur.

Le dernier zoom que je souhaiterais faire concerne le « Digital learning », qui a connu un coup d'accélérateur avec la crise sanitaire. Dans toutes nos écoles, tous les cours sont passés « à distance » pour ainsi dire du jour au lendemain en mars dernier ! Si nous avons pu le faire, c'est bien sûr grâce à la forte implication du corps enseignant, mais aussi grâce aux investissements en outils numériques qui avaient été réalisés depuis quelques années dans le cadre du Groupe ISAE, avec le soutien financier du GIFAS. Fort de cette expérience, nous avons prévu de développer à l'échelle du Groupe ISAE la production numérique de grains pédagogiques pour l'ingénierie aérospatiale (« Aerospace Digital Nuggets »), en allant jusqu'à la digitalisation de travaux pratiques.

8 – Ce « concept Groupe ISAE » existe-t-il à l'étranger et comment envisagez-vous les relations sur le plan international ?

FORMATION

INTERVIEW D'OLIVIER LESBRE DIRECTEUR GÉNÉRAL DE L'ISAE-SUPAERO ET PRÉSIDENT DU GROUPE ISAE

Si on trouve en France des structures équivalentes (Groupe des Écoles centrale, Groupe INSA, IMT...), ce n'est pas le cas à l'étranger. Nous n'avons donc pas développé de cellule de relations internationales au niveau du Groupe. Le Groupe a cependant mis en place une commission internationale, qui est un lieu d'échanges et de coordination, et qui est également à l'origine d'un programme conjoint d'accueil d'étudiants étrangers, la « Space Summer School » du Groupe ISAE. C'est également dans ce cadre que nous coordonnons la présence de nos écoles dans les grands salons internationaux afin de développer nos relations avec nos partenaires académiques internationaux. Je pense notamment aux salons NAFSA (Amérique du Nord), EAIE (Europe) et APAIE (Asie). Le Groupe sera enfin notre véhicule naturel si nous souhaitons ouvrir à l'avenir un cursus ou un campus à l'étranger.

9 – Comment ce regroupement d'écoles est-il perçu par les principaux employeurs de vos étudiants ?

Le Groupe ISAE forme pour les acteurs industriels et institutionnels du secteur aéronautique et spatial une large gamme d'ingénieurs pluridisciplinaires, de masters et d'ingénieurs-docteurs adaptés à leurs besoins. Les cinq membres du Groupe ISAE forment aujourd'hui 6000 étudiants (dont 4500 élèves ingénieurs), ce qui se traduit par plus de 1600 diplômés par an aux niveaux ingénieur, master et docteur, mais aussi par un réseau de plus de 41 000 alumni qui irriguent toute l'industrie aérospatiale française, avec une forte empreinte internationale. Avec nos partenaires, cela monte à 2100 diplômés par an. Avant la crise, près de 1100 de nos diplômés rejoignaient chaque année le secteur aérospatial : cela représentait environ 50 % des recrutements de jeunes ingénieurs des entreprises du GIFAS. C'est donc tout naturellement que le Groupement des industries françaises de l'aéronautique et du spatial (GIFAS) a pris la décision, en 2015, de mettre en place un programme de soutien au développement du Groupe ISAE. Depuis cinq ans, ce programme a permis de renforcer l'ouverture sociale et l'attractivité internationale du groupe, de faire évoluer son offre de formation (avec par exemple le lancement de la nouvelle formation d'ingénieur par apprentissage du Groupe ISAE en 2020), de développer de nouveaux outils de pédagogie numérique, et de soutenir les activités collectives et les projets comme Euroglider. C'est également dans ce cadre que la filière industrielle aérospatiale peut dialoguer efficacement avec ses écoles d'ingénieurs. Je crois que ce partenariat entre le GIFAS et le Groupe ISAE illustre

de façon remarquable la capacité de la filière aérospatiale française à jouer collectif et à investir sur le long terme, et constitue un atout essentiel pour qu'elle reste longtemps au premier rang mondial !

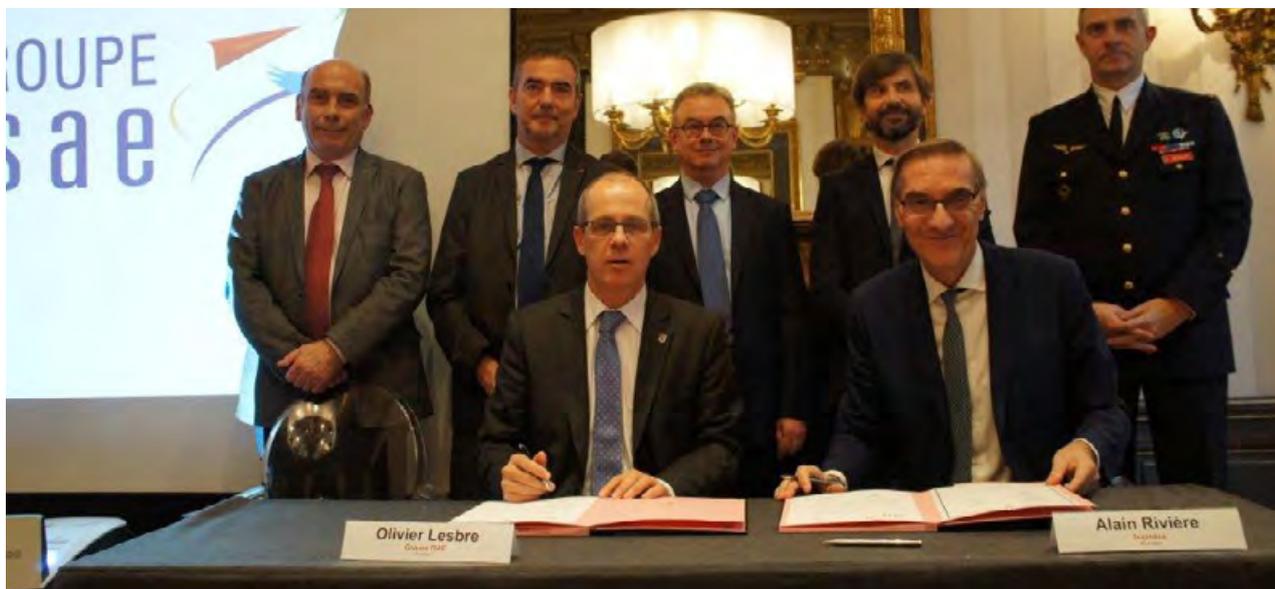


Semaine de la mobilité: une illustration de la diversité des écoles du groupe ISAE © Aude Lemarchand



Euroglider (crédit École de l'air)

INTERVIEW D'OLIVIER LESBRE
DIRECTEUR GÉNÉRAL DE L'ISAE-SUPAERO ET PRÉSIDENT DU GROUPE ISAE



Adhésion de SUPMECA en 2018 (crédit Groupe ISAE)



Vue aérienne du site ENSMA (crédit MJ Pichon)



Campus SUPMECA Saint-Ouen (crédit SUPMECA)



Bourget 2019 stand Groupe ISAE (crédit ISAE-SUPAERO - Aude Lemarchand)

AIM : Artery in Microgravity

par Abin Alex, Laura Passoni, Luigi Avallone et Seungah Lee, étudiants à l'ISAE-SUPAERO et membres de l'équipe AIM

CONTEXTE DU PROJET AIM

Les missions d'exploration habitées dans l'espace lointain gagnent de plus en plus de l'intérêt, nécessitant une profonde compréhension des risques liés à la santé. En fait, une exposition prolongée à la microgravité et aux radiations cosmiques cause de graves problèmes de santé, concernant aussi le système cardiovasculaire. Dans ce contexte, le projet AIM (*Artery In Microgravity*) a été conçu, afin d'étudier l'impact de l'environnement spatial sur les maladies coronariennes, ainsi que sur leur traitement, qui prévoit l'implantation de stents. Plus spécifiquement, les effets de la microgravité et de l'exposition prolongée aux radiations seront étudiés, étant donné qu'ils provoquent respectivement la variation des paramètres hémodynamiques locaux, observés à travers les résultats de la pression systémique, et le déclenchement d'une réponse inflammatoire, augmentant les ions métalliques libérés par les stents. La conséquence est le risque de formation de sténose [1].

Le projet AIM naît de la collaboration entre un groupe d'étudiants de l'ISAE-SUPAERO (Toulouse) et du Politecnico di Torino (Turin). Il a été sélectionné pour la première édition du programme *Orbit Your Thesis!* (OYT) de l'ESA Academy en 2018 ¹. Il s'agit d'un cube 2U adapté pour être reçu par la *ICE Cubes Facility* (ICF) ² à bord du module Columbus dans la Station Spatiale Internationale (ISS). L'expérience était censée être lancée à bord de SpaceX-20 au début de l'année 2020 ; toutefois, suite à l'apparition de la pandémie COVID-19, le lancement du Cube a été retardé. On estime que l'expérience pourra être lancée à bord de SpaceX-23 en août 2021 ou de SpaceX-24, en novembre 2021.

L'installation ICE Cubes à bord de l'ISS (ICF) est une plateforme Plug-and-Play pour des expériences accueillant les interfaces fonctionnelles avec l'ISS. Cette installation est conçue pour toute recherche scientifique et pour les démonstrateurs technologiques qui requièrent d'étudier les effets de la microgravité et de l'exposition aux radiations à l'intérieur d'un espace pressurisé [2].

Le service ICE Cubes est ouvert et adapté pour tous les niveaux d'éducation, ainsi que pour différents cursus, en

offrant aux étudiants universitaires (master et doctorats) la possibilité de concevoir, développer, tester et mener une expérience à bord de l'ISS, sous la supervision des professionnels du Service ICE Cubes [3].

CONCEPTION DE L'EXPÉRIENCE AIM

AIM est basé sur un banc d'essai in vitro compact pour l'étude quantitative et qualitative du flux sanguin dans l'espace (voir Figures 1 et 2). Un fluide imitant le sang s'écoule d'abord dans une artère coronaire endentée transparente, puis dans une artère sténosée transparente grâce à une pompe à débit continu. La pression est surveillée à l'aide de deux capteurs de pression différentielle. Pour la visualisation du flux, un colorant rouge est injecté aux entrées des artères et les flux sont détectés à l'aide d'une caméra et éclairés avec un anneau de LEDs. La libération d'ions métalliques est étudiée en surveillant le pH du fluide dans le réservoir. Des essais au sol seront menés simultanément afin de comparer le comportement sur le terrain et le comportement en microgravité.

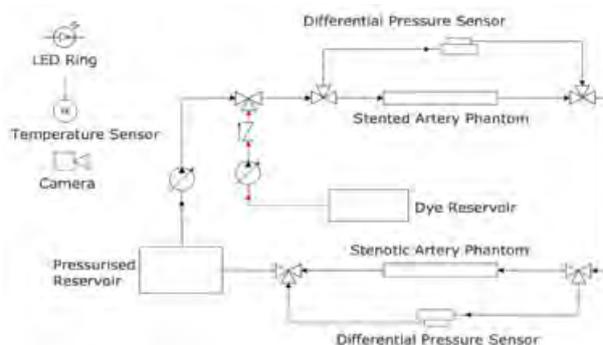


Figure 1 : Schéma de circuit hydraulique

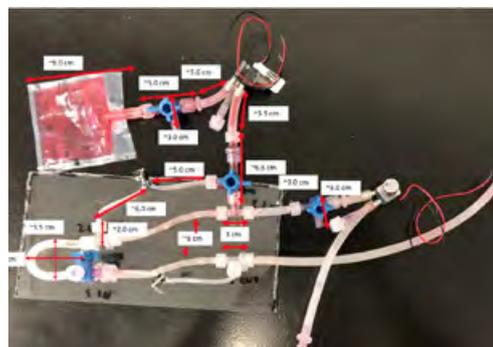


Figure 2 : Circuit hydraulique

1. L'équipe AIM sur le site web de ESA Education https://www.esa.int/Education/Orbit_Your_Thesis/Meet_the_team_AIM#:~:text=The%20Artery%20In%20Microgravity%20

2. Site internet de ICE Cubes Service <https://www.icecubesservice.com/>

DÉVELOPPEMENT DU CUBE AIM

Le projet AIM est composé de deux équipes travaillant en étroite collaboration : l'équipe scientifique de Politecnico di Torino et l'équipe d'ingénierie de l'ISAE-SUPAERO, toutes deux placées sous l'autorité directe de l'ESA. Pour cette année, l'équipe de l'ISAE-SUPAERO est composée d'étudiants en master : Abin Alex, Laura Passoni, Luigi Avallone et Seungah Lee. Ils sont responsables de la réalisation des tests fonctionnels et des tests environnementaux afin de certifier la conformité de l'expérience aux normes de la NASA et de l'ESA. Ce type d'expérience étudiante est la première mission dans l'ISS entrant dans le cadre du programme OYT de l'ESA. Le développement de l'expérience implique de travailler sur les systèmes électroniques, logiciels et structurels.

CONSTRUCTION MÉCANIQUE

L'extérieur du Cube AIM est conçu selon les dimensions standards d'un CubeSat, soit 100x100 mm². La longueur du cube est décrite en termes de "U" et celui développé par l'équipe est un cube 2U de 225 mm. La structure extérieure est faite d'un tube en aluminium de 1 mm d'épaisseur avec deux cadres et une porte en aluminium. Notre Cube sera connecté à l'ICF par le biais du connecteur standard DW13 (voir Figures 3 et 4). La structure interne du Cube est composée d'une structure en acier inoxydable qui contient deux réservoirs, des capteurs, décrits dans le paragraphe suivant, un circuit hydraulique, une caméra USB, un circuit imprimé (PCB), un Odroid (ordinateur de bord) et des LEDs. La structure interne est fixée d'un côté au réservoir et de l'autre côté à la porte du cadre du Cube.

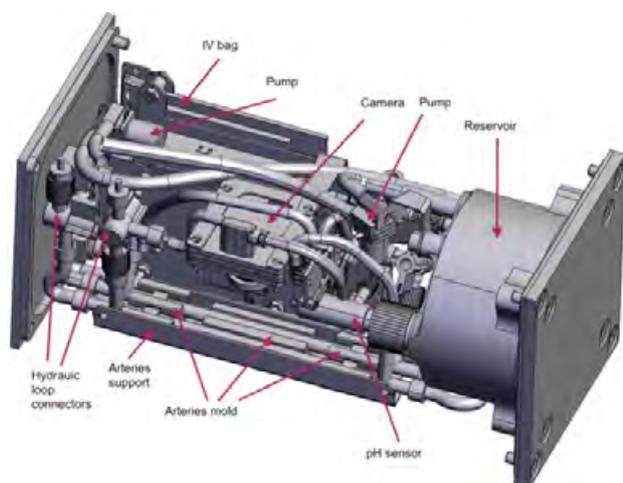


Figure 3 : Modèle 3D de la structure interne du Cube

CONSTRUCTION ÉLECTRONIQUE

L'architecture électronique a été conçue de manière à répondre aux exigences relatives à l'énergie fournie par l'ICF et au débit disponible sur les liaisons montantes et descendantes. L'énergie fournie par l'ICF est convertie dans le Cube par l'intermédiaire d'un circuit imprimé pour alimenter les capteurs et la carte mère à la bonne tension. Les capteurs utilisés pour réaliser l'expérience sont un capteur de température, deux capteurs de pression et un capteur de pH.

La carte mère du Cube est un Odroid C2, doté d'un processeur ARM quadricœur et d'un système d'exploitation Linux, qui contrôle les capteurs et les actionneurs. La sortie des pompes est modulée afin de tester le comportement de l'écoulement à différents débits, en utilisant la modulation de largeur d'impulsion (PWM). La méthode PWM est également exploitée par les LEDs pour éclairer à différentes intensités l'intérieur du Cube, où le débit est enregistré à l'aide d'une caméra. En effet, un haut niveau de luminosité pourrait permettre d'utiliser un fluide imitant le sang ensemené de particules de polyamide au lieu d'un colorant rouge pour la visualisation du flux dans les artères ; ce qui améliore la qualité des résultats scientifiques. Actuellement, les deux options sont étudiées et une des deux sera implémentée.

Le logiciel embarqué contrôle périodiquement les capteurs, la caméra et les pompes. Dès que le Cube est mis sous tension, le processus d'initialisation démarre et les mesures des capteurs sont automatiquement effectuées. Des vidéos et des photos sont prises pour observer le flux des artères. Le logiciel gère également la communication entre le Cube et l'ICF par le biais de câbles Ethernet, en échangeant la télémétrie et la télécommande (TM/TC) et en envoyant les données enregistrées via le protocole de contrôle de transmission (TCP). Les données transférées seront stockées à bord d'un SSD dans l'ISS comme sauvegarde et seront synchronisées avec le centre de contrôle de mission des Cubes ICE (ICMCC) au sol [4]. Les opérateurs de l'expérience AIM peuvent accéder à tout moment au ICMCC via un réseau privé virtuel (VPN) avec le protocole SSH et sauvegarder la base de données dans un serveur à l'ISAE-SUPAERO.

FORMATION

AIM : ARTERY IN MICROGRAVITY

PHASE DE TEST

L'équipe actuelle travaille depuis six mois sur la documentation complète des essais environnementaux. Elle est chargée de formaliser les procédures d'évaluation, de qualification, de la sécurité du Cube, de la phase de lancement et de la manipulation dans l'ISS par les astronautes. Les tâches relatives à l'environnement comprennent des tests de vibration, de vide, de compatibilité électromagnétique (EMC) et des tests acoustiques. Chaque test a une plage de tolérance. Le Cube doit se situer dans ces limites.

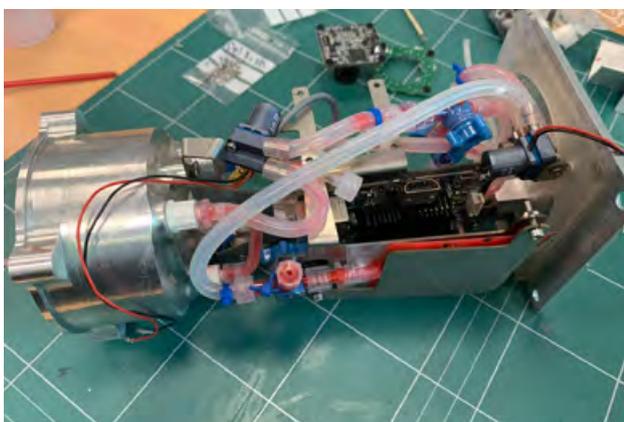


Figure 4 : Cube assemblé sans boîte

TEST DE VIBRATION

Parmi tous les tests environnementaux, l'équipe attend avec impatience le test de vibration. Ce dernier garantit l'intégrité structurelle de tous les composants. Le Cube doit résister à une charge statique, à la vibration sinusoïdale de 5 Hz à 5 000 Hz, où une marge de 5% pour la fréquence modale et une marge de 20% pour le décalage d'amplitude par rapport à la valeur prévue seront considérées comme des critères de réussite.

En outre, le Cube sera soumis à des vibrations aléatoires pendant une courte durée de 60 secondes. Un test de vibration réussi est la base de tous les tests environnementaux. C'est pourquoi l'équipe a décidé d'effectuer un test de pré-vibration dans les installations de l'Institut Clément Ader de Toulouse pour une étude des vibrations aléatoires atténuées et de la résonance. Cet essai permettra de déterminer les parties ou sous-systèmes les plus sensibles/critiques.

Concernant l'instrumentation du test de vibration, un adaptateur et un disque de plaque d'interface ont été conçus par l'équipe. Une fois assemblés, le dispositif

pèse 9 kg. Conçu pour s'adapter au Cube et il est fixé par des trous oblongs et s'ajuste et se fixe solidement au pot vibrant (voir Figure 5).

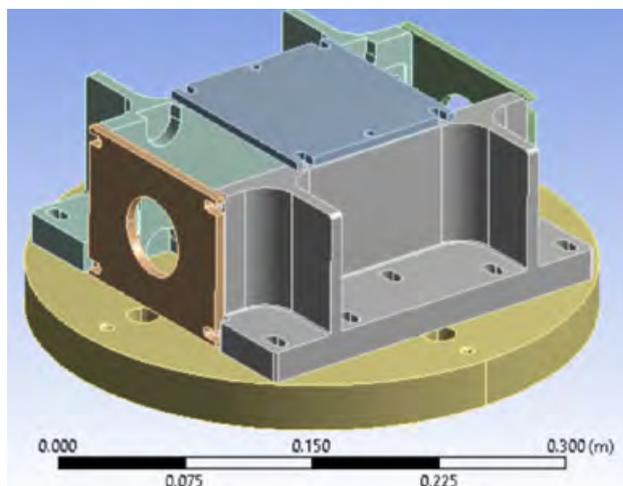


Figure 5 : Adaptateur et un disque de plaque

ESSAI CEM

Le test environnemental suivant est le test de compatibilité électromagnétique (CEM). Tout équipement à bord de l'ISS doit être certifié et respecter des directives strictes en matière de rayonnement électromagnétique. Le Cube doit passer les tests d'émissions de champ électrique E, d'émissions de champ magnétique B et d'émissions conduites. Les limites pour la bande étroite se trouvent à 55 dB μ V/m de 2,2 à 2,4 GHz, tandis qu'elles sont à 2 dB μ V/m/MHz pour la large bande de 442 à 455 MHz. Le Cube doit fonctionner dans le pire des cas avec tous les capteurs, les LEDs, et pompes en marche. Le test est considéré comme réussi lorsque les valeurs d'émission sont inférieures à la plage de tolérance.

TEST DE BRUIT AUDIBLE

Comme de nombreux astronautes travaillent à bord de l'ISS, il est également important de réduire au maximum le bruit audible, contrairement aux missions non habitées. Le test de bruit audible sera effectué dans la chambre semi-anéchoïque de l'ISAE-SUPAERO. Le test vise à vérifier que le bruit audible de tous les côtés du cube ne dépasse pas le seuil de 31 dBA (avec la pondération A) lorsqu'il est mesuré à 64 cm de la surface la plus bruyante du cube dans les conditions de fonctionnement les plus bruyantes.

ESSAI SOUS VIDE

L'essai sous vide garantit que le Cube résistera à une dépressurisation rapide et à des taux de pressurisation de 3,3 kPa/s et 798 Pa/s. Bien que le Cube doive fonctionner dans un environnement de pression nominale, l'enveloppe de pression doit tenir compte du voyage vers l'ISS. De plus, elle devrait également tenir compte d'une urgence comme l'extinction d'un incendie. Le Cube sera dégazé dans les infrastructures de l'ISAE-SUPAERO et préparé pour l'essai sous vide. Il ne devrait y avoir aucune fuite visible et le cube devrait pouvoir résister à une différence de pression de 1 bar.

CONCLUSION

L'objectif du projet AIM est l'étude de l'impact de l'environnement spatial sur les maladies coronariennes. Pour cela, un Cube compact contenant des artères artificielles ainsi que des stents a été développé. Le liquide coule dans les artères grâce à des pompes et son flux est observé par une caméra. De plus, le niveau de pH, la température et la pression de la circulation sont surveillés grâce aux capteurs. À ce jour, la conception mécanique et électronique et leur implémentation sont presque finalisées, nécessitant d'être testées à travers les essais environnementaux pour vérifier leur conformité à l'environnement de l'ISS et à celui du lanceur. Le Cube développé sera lancé en 2021 par SpaceX. Il permettra aux étudiants de l'ISAE-SUPAERO d'exploiter la mission pendant 3 mois.



Figure 6 : Équipe de l'ISAE-SUPAERO

Au-delà de l'expérience, le projet AIM est une véritable aventure humaine, qui inclut la communication et plusieurs échanges entre les experts de l'ESA Academy et les groupes internationaux des étudiants du Politecnico di Torino et de l'ISAE-SUPAERO. Les voyages dans l'espace sont difficiles et impitoyables, mais nous n'avons jamais été aussi prêts !

REMERCIEMENTS

Cette étude est soutenue par l'ESA Academy. Les auteurs remercient leurs mentors Umberto Morbiducci et Matthieu Compin (membre 3AF). Également, les auteurs remercient l'équipe scientifique du Politecnico di Torino, Elena Torta, Stefano Gabetti, Raffaele Felice, Riccardo Mucci. Les auteurs remercient aussi les anciens membres de l'équipe, Amina Bakkali, Blanca Dalfó, Luis Arcos, Mário Gabriel Santos de Campos, Nicolo Bernardini, Olivia Drayson, Luca Cerquetani, Alessandro Cipoletta, Federico Falcone, Michele Genoni, Federica Vagnone.

RÉFÉRENCES

- [1] https://www.esa.int/Education/Orbit_Your_Thesis/Meet_the_team_AIM
- [2] https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Research/ICE_Cubes_space_research_service_open_for_business
- [3] Drayson, O., Bernardini, N., Abderrahaman, A., Cerquetani, L., Cipoletta, A., Dalfó Ferrer, B., ... Morbiducci, U. (2020). AIM (Artery In Microgravity): An ICE Cubes Mission by University Students
- [4] <https://www.7shield.eu/pilots/ice-cubes-service/> ■

Réinventer le transport aérien : 3^e forum 3AF étudiants à l'ENAC le 28 janvier 2021

par Francis Guimera, président de la Commission technique Aviation commerciale

La Commission technique 3AF Aviation commerciale a demandé à des groupes d'élèves de l'ENAC, de l'ISAE-SUPAÉRO et de TBS, de penser au rôle du transport aérien dans la société et à la façon dont il contribue à son développement en redéfinissant son périmètre, peut être par une diversification de ses activités et en se basant sur la situation actuelle : qui fait quoi et comment ?

Compte tenu de la pandémie, seuls l'ENAC et les masters ISAE-SUPAÉRO ont pu répondre présents. La CT Aviation commerciale se propose de publier sous forme de dossier, avec les noms des auteurs en référence, une étude et des propositions structurées. Ces projets que la CT a eu l'honneur d'écouter ce 28 janvier 2021, doivent être considérés comme une analyse stratégique, un projet innovant et une ouverture potentielle vers l'avenir. Pour réinventer le transport aérien, il faut partager aussi les idées des plus jeunes!

Les deux sujets développés par l'ENAC ont été construits à partir de deux PICs (Project Innovation Challenge) établis par deux professeurs Catherine Letondal et Thierry Druot dont les termes principaux sont les suivants :

« La situation de danger climatique dans laquelle nous nous trouvons représente un risque terrible pour nos sociétés, mais c'est aussi une formidable opportunité pour repenser et faire évoluer nos modes de vie, nos organisations et notre rapport à la planète. Pour autant, penser la durabilité n'est pas chose facile. Nous devons adapter et élargir nos concepts afin d'être capables d'embrasser la complexité du problème ».

PREMIER SUJET : UN DIRIGEABLE, DURABLE, TRANSPORT DE FRET

Cette étude n'a pas la prétention d'examiner un design complet d'un dirigeable, mais de renvoyer une image des éléments à prendre en compte et de proposer des choix techniques.

L'étude présentée par les élèves s'est focalisée sur la pertinence d'évaluer le potentiel d'un grand dirigeable de transport de gros volumes de fret dans le contexte de la transition énergétique. Cette étude s'est attachée à définir le marché du cargo, à essayer d'établir une image du marché du transport de fret dans le monde, permettant plus particulièrement de considérer le transport de fret par dirigeable en lui-même, en essayant de comprendre



RÉINVENTER LE TRANSPORT AÉRIEN : 3^E FORUM 3AF ÉTUDIANTS À L'ENAC LE 28 JANVIER 2021

pourquoi à l'heure actuelle il ne rencontre pas de franc succès sur ce marché.

Les pistes suivantes ont été explorées en s'appuyant sur des recherches bibliographiques.

Considérations sur le marché :

- comment assurer la complémentarité avec l'avion, la route et avec le train : choix des masses et volumes objectifs de la charge utile, des lieux et fréquences d'exploitation, etc.

Considérations sur l'énergie motrice :

- panneaux solaires et hydrogène comme source d'énergie et moyen de stockage pour le dirigeable ?
- autres ?

Considérations sur les opérations et l'exploitation :

- quelles infrastructures au sol (fabrication, stationnement, livraisons, maintenance, déconstruction),
- quelles conditions d'exploitation (sensibilité à la météo, temps d'utilisation, etc.), gestion du vol statique lors d'opérations de déchargement en zone vierge.

Durabilité, le bilan système :

- l'exploitation de grands dirigeables pourrait-elle être à « énergie positive » (globalement productrice d'énergie) ?
- l'exploitation de grands dirigeables pourrait-elle s'accorder avec la dépollution active de l'atmosphère (capture de CO₂) ?
- l'impact sociétal de la construction (fabrication, déconstruction) et de l'exploitation ?

À l'issue de cette étude, les élèves ont formulé la conclusion suivante :

D'un point de vue général, cette étude aura permis de mentionner tous les paramètres à prendre en compte dans le cadre de la conception du dirigeable du futur. Les élèves n'ont pas pu apporter une réponse sur tous les points nécessaires, mais ils se sont efforcés de citer tout ce qui à leurs yeux aura une grande importance. Le dirigeable du futur doit être innovant s'il veut rencontrer du succès. Il est indéniable que de nombreux dirigeables vont être prototypés dans les années à venir (LCA60T de Flying Whales, Aeroscraft, VariaLift, etc.). Leur succès dépendra de leur innovation et de leur capacité à maîtriser les principaux défauts du dirigeable qui restent

sa vitesse, son opérabilité limitée par les conditions météorologiques, les reliefs, etc.

L'architecture avec pile à combustible est une proposition qui semble satisfaire de nombreuses contraintes de développement durable. Il va aussi très probablement permettre de s'affranchir de l'hélium à l'horizon 2040 comme gaz porteur, dont on sait la pénurie prochaine. Les technologies de sécurisation de l'hydrogène vont devoir convaincre aussi les clients potentiels. Mais quoiqu'il arrive, les projets de dirigeables futurs doivent prendre en compte les trois piliers du développement durable : Social, Économique, Environnemental pour prétendre à être des succès.

DEUXIÈME SUJET : UN AÉRODROME DURABLE

De la même manière le sujet avait été posé selon les termes d'un PIC ainsi libellé :

« Le transport aérien se révèle être une activité quasiment emblématique, frappée de plein fouet par les bouleversements qui s'annoncent, car c'est une grosse consommatrice d'énergie fossile. Bien qu'elle ne représente actuellement que moins de 3% des émissions mondiales de CO₂, elle dépend des énergies fossiles, le kérosène ayant des propriétés d'énergie massique et de conditions d'utilisation qui le rendent difficilement remplaçable pour les systèmes embarqués à long rayon d'action. De nombreux acteurs participent à l'activité globale du transport aérien et tous auront un rôle à jouer dans les nécessaires transformations à venir. Parmi tous les acteurs, l'un d'eux jouera sans nul doute un rôle central car il réalise la connexion entre le vecteur aérien et la Cité : il s'agit de l'aéroport. Vue du ciel, l'aéroport n'est qu'un grand bâtiment séparant deux parkings (voitures d'un côté, avions de l'autre) accolés à un grand espace lisse, sillonné de pistes. Le potentiel de développement de l'aéroport dans un contexte de transition énergétique est immense ».

Cette étude a consisté à dévoiler le potentiel de développement de l'aéroport en utilisant une modélisation de l'utilisation/production énergétique des différents composants d'un aéroport et dans un contexte de transition énergétique en travaillant sur l'exemple concret de l'aéroport de Toulouse-Blagnac.

FORMATION

RÉINVENTER LE TRANSPORT AÉRIEN : 3^E FORUM 3AF ÉTUDIANTS À L'ENAC LE 28 JANVIER 2021



Les pistes suivantes ont été explorées :

Le fonctionnement énergétique de l'aéroport :

- organisation énergétique de type « smart-grid » pour l'aéroport,
- l'aéroport comme unité de production énergétique pour l'aviation et pour la cité,
- l'aéroport comme unité de dépollution active de l'atmosphère (capture de CO₂).

L'aéroport dans son territoire :

- rôle de l'aéroport dans le développement des vols intercités,
- relations avec les « petits aéroports »,
- intermodalité et complémentarité avec d'autres modes de transport, courts, moyen et long courriers,
- accès à l'aéroport,
- impact de la robotisation au sol.

L'aéroport acteur du trafic aérien :

optimisation énergétique des vols domestiques et internationaux à nombre de créneaux fixe.

LA CONCLUSION DE CETTE ÉTUDE A ÉTÉ AINSI FORMULÉE PAR CE GROUPE D'ÉLÈVES :

Le potentiel de développement de l'aéroport est important, mais les défis à relever le sont d'autant plus. Dans cette étude, des hypothèses fortes ont été faites de façon à développer une intuition de ce que pourrait être

l'aéroport de demain et faire apparaître de nombreux axes d'améliorations. Il apparaît par exemple que les parkings et les systèmes de traitement de bagages robotisés ont un impact non négligeable sur le besoin en énergie. La réponse à apporter est cependant à nuancer, car la suppression d'un système robotisé crée des emplois et réduit la consommation d'un côté, mais augmente les coûts pour l'exploitant de l'autre. Ce surcoût pourrait en revanche être compensé par des coûts de mise en place et d'entretien plus raisonnables des énergies renouvelables.

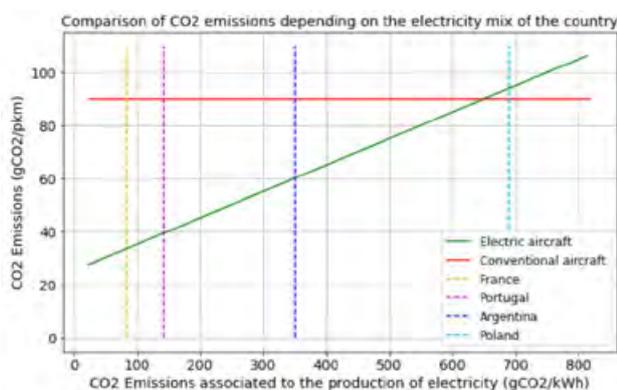
La mise en place d'une multitude de sources d'énergies semble aussi nécessaire, l'énergie devant être disponible tout le temps aux heures d'ouvertures et quelles que soient les conditions météo. L'éolienne sans pale frangible, utilisée en complément d'une centrale photovoltaïque, a semblé intéressante lors de notre étude et pourrait être développée. De très nombreuses autres possibilités, présentées en première partie, existent aussi et devraient être étudiées au cas par cas par un exploitant qui devra considérer chaque option en fonction du flux de passagers attendu et de sa position géographique par exemple.

Troisième sujet : transport aérien, électricité ou hydrogène sont-ils les solutions pour réduire les émissions de CO₂ ? (Sujet suivi par Valérie Budinger professeure à l'ISAE-SUPAÉRO).

À partir de l'étude des émissions de deux voyages : Espagne / Portugal et Argentine (vol et route intérieure)

RÉINVENTER LE TRANSPORT AÉRIEN : 3^E FORUM 3AF ÉTUDIANTS À L'ENAC LE 28 JANVIER 2021

ce groupe a constaté que si le temps de parcours le plus court est sans conteste obtenu par l'aérien, la plus faible émission l'est certainement par le transport terrestre mais avec un temps considérablement plus long. Cependant le kérosène utilisé par l'avion produit un taux de CO₂ considéré comme inacceptable. D'où la question d'une meilleure alternative énergétique pour l'avion de demain.



Une alternative vient donc à l'esprit aujourd'hui :

- l'électricité,
- l'hydrogène.

L'étude effectuée montre que l'électricité peut décroître significativement le taux d'émission de CO₂, mais lequel dépend du pays où elle est produite (du fait du mode de production choisi par chaque pays). De plus, sur le plan technique les vols électriques sont pour l'instant limités en temps de vol, et cette solution ne s'applique aujourd'hui qu'à des avions de petite capacité.

En ce qui concerne l'hydrogène, le constat permet de penser que c'est une réponse à une émission beaucoup plus faible que le kérosène : 80% de moins d'émission d'azote avec en prime le fait qu'un kilogramme d'hydrogène liquide contient 2,8 plus d'énergie qu'un kilogramme de kérosène et surtout que l'hydrogène est abondant sur terre.

En contrepartie, l'hydrogène produit à partir d'énergie fossile, n'est pas une solution pérenne, de gros volumes de stockage étant requis (la densité de l'hydrogène est 10 fois plus faible que celle du kérosène). En outre, l'hydrogène liquide doit être stocké à très basse température dans des réservoirs d'autant plus lourds.

La conclusion de cette étude révèle que l'une ou l'autre de ces deux solutions n'est pas aujourd'hui une solution d'avenir aisée :

1. L'efficacité économique de l'avion électrique dépend du lieu où est produite l'électricité. De plus, sur le plan technique, la technologie actuelle ne permet pas de concevoir des avions de grande capacité.
2. L'efficacité environnementale de l'hydrogène dépend de la façon dont il sera produit et en outre d'une technologie permettant de concevoir des réservoirs plus légers. Enfin, l'utilisation de l'hydrogène, du fait du volume occupé comparativement au kérosène, impose un changement radical dans la forme des avions commerciaux, ce qui n'apparaît pas réalisable à court terme.

Ce groupe a conclu qu'il n'y a pas aujourd'hui de solutions simples et que la technologie doit produire des solutions adéquates en faveur de l'une ou l'autre des solutions énergétiques. En outre, il faudra imaginer un nouvel appareil aux formes adaptées et non pas essayer de transformer un avion existant.

CONCLUSION DU FORUM

Ce troisième forum 3AF étudiants a été organisé par la CT Aviation commerciale dans des conditions difficiles imposées par les restrictions sanitaires et le respect des gestes barrières. Nous devons encore une fois remercier les directions de l'ENAC et de l'ISAE-SUPAÉRO ainsi que les professeurs impliqués pour avoir su organiser avec nous cette session.

Le niveau de réflexion, d'étude, de travail et de ressenti fait que nous devons considérer le résultat de cette session comme plus que satisfaisant. Les membres de la CT ont été frappés par l'excellence des études présentées, la justesse des analyses et la volonté de bien faire de tous les élèves : qu'ils en soient ici encore remerciés. ■

Naissance du Groupe régional Grand Est

par François Leproux, Damien Hartmann et Arnaud Vacelet

Le Conseil d'Administration de la 3AF a validé en octobre 2020 la création du Groupe Régional Grand Est.

La région Grand Est, qui regroupe les anciennes régions Lorraine, Alsace et Champagne Ardennes présente l'avantage d'avoir de nombreux établissements d'enseignement supérieur et de recherche, une industrie aérospatiale modeste mais établie, en voie de développement et organisée dans un cluster ainsi qu'une frontière immédiate avec quatre contributeurs essentiels de l'Europe spatiale (Allemagne, Belgique, Luxembourg, Suisse).

Depuis la crise de la sidérurgie, l'industrie du Grand Est ne cesse de chercher à se réorienter : le grand savoir-faire qu'il y existe, notamment en termes de mécanique, de matériaux et d'électronique est un atout majeur à une reconversion aérospatiale.

L'Est de la France avait été oublié dans les premières décennies du développement de l'industrie aéronautique, à cause de sa proximité avec l'ennemi héréditaire allemand. Ce poids historique se révèle aujourd'hui être un atout : le voisinage de la Belgique et de l'Allemagne, ainsi que le développement de l'industrie spatiale luxembourgeoise, devraient se traduire dans les années à venir

par une forte arrivée d'ingénieurs du spatial français désireux d'entreprendre ou de travailler dans ce secteur en plein essor.

LA LORRAINE, UNE RÉGION FRONTALIÈRE SPÉCIALISÉE DANS LES MATÉRIAUX

En Lorraine, 60 entreprises (3 300 salariés, 500 M€ de CA) ont une activité tournée vers le secteur de l'aéronautique. Il s'agit généralement d'entreprises actives sur plusieurs marchés. Créé en 2003 et membre du Groupement des industries françaises aéronautiques et spatiales (Gifas) depuis 2005, le cluster Aériades regroupe aujourd'hui une trentaine d'entreprises représentant 2 400 salariés et totalisant un chiffre d'affaires de plus de 300 millions d'euros, dont la moitié dans l'aéronautique, l'aérospatial et la défense.

La région accueille deux grands groupes internationaux que sont Safran avec une filiale d'Aircelle et Safran Aero Composite, et le groupe américain Esterline avec la filiale Leach International Europe. En 2015, Safran s'est également implanté dans la Meuse avec une usine à Commercy.





François Hollande à l'inauguration de l'usine SAFRAN de Commercy en 2015

La région Grand Est ne comporte pas de grande école ouvertement tournée vers l'aéronautique mais s'appuie sur de nombreuses écoles d'ingénieurs (ce qui en fait, après l'Ile-de-France, la région la mieux dotée en ce domaine) avec une spécialisation en mécanique, en matériaux et en électronique, essentiellement localisée à Metz et à Nancy parmi lesquelles Les Arts et Métiers, CentraleSupélec ou les Mines de Nancy. Aussi, il est à noter que certains établissements comme l'ENSEM ou l'EEIGM sont partenaires de longue date avec des industriels de l'aéronautique tel que Safran et qu'en général, entre 10% et 30% des étudiants des écoles citées précédemment se dirigent vers l'industrie aéronautique. L'EEIGM a également signé des partenariats avec l'Agence spatiale européenne, Airbus et ArianeGroup pour y placer ses étudiants en stage de dernière année.



Metz et Nancy se partagent une quinzaine de formations d'ingénieurs de très hauts niveaux

Formation unique en Lorraine, le baccalauréat professionnel option cellule ou avionique en aéronautique est proposé par le Lycée polyvalent Jean Zay de Jarny. Un BTS maintenance aéronautique y a également ouvert en 2018. La même année, l'établissement s'est rapproché de la 3AF en s'ajoutant aux quelques 26 propriétaires d'une soufflerie Éolia : la reproduction de la soufflerie conçue à

l'ISAE-ENSMA par le groupe 3AF Poitou a été conclue par Jean Tensi, Président du groupe.



Équipements aéronautiques et soufflerie Éolia du Lycée Jean Zay

La Lorraine compte parmi ses 3 pôles de compétitivité le pôle Materialia dédié aux matériaux et procédés. Ce pôle travaille sur les technologies analysées comme les plus prometteuses pour les matériaux de demain : la métallurgie, les nouveaux procédés de fabrication (fabrication additive) et les composites. La Lorraine accueille également l'un des 8 instituts de recherche technologique en France issus des investissements d'Avenir. L'IRT M2P (Matériaux, Mécanique et Procédés), fondation de coopération scientifique, permettant aux entreprises membres d'avoir accès à des équipements et du personnel hautement qualifié pour mener des travaux de recherche et le développement de produits d'avenir, y est également implanté. Le groupe Safran est l'un des principaux partenaires de l'institut aux côtés d'entreprises de l'automobile et de la métallurgie.

Implanté en Moselle, l'Institut de soudure travaille également avec les grands groupes aéronautiques pour étudier de nouveaux procédés de soudure et de fabrication additive qui sont mis en valeur lors du congrès ICWAM (International Congress on Welding and Additive Manufacturing), le salon international de la soudure et de la fabrication additive. Ce salon, qui réunit plus de 400 spécialistes et industriels, s'intéresse notamment aux

nouvelles technologies de fabrication pour l'aéronautique et le spatial et réunit des intervenants d'entreprises prestigieuses comme Safran, ArianeGroup, Dassault Aviation, Airbus ainsi que des laboratoires et petites entreprises.

Profitant d'une situation géographique exceptionnelle et des liens avec des centres de recherche reconnus, de petites entreprises Lorraines s'attaquent au marché aéronautique et spatial. C'est le cas de l'entreprise Nimesis Technology, basée à Mécleuves, à proximité immédiate de Metz, qui travaille avec le CNES pour développer et certifier une gamme d'actionneurs AMF destinés au spatial (voir article dédié).

L'ALSACE

Comme la Lorraine, l'Alsace n'est pas une région qui saute aux yeux dans l'industrie aérospatiale française. Elle a pourtant des atouts. Le secteur compte 120 entreprises, 4 000 emplois industriels et réalise un chiffre d'affaires annuel de plus de 1 milliard d'euros, selon l'Association pour la promotion des activités aéronautiques en Alsace (Apraa). Créée par Ettore Bugatti en 1909, l'usine Messier-Bugatti-Dowty de Molsheim (Bas-Rhin) est l'un des sites historiques de la société. Intégrée dans le groupe Safran sous le nom Safran Landing Systems, l'entreprise emploie aujourd'hui 900 salariés qui produisent des roues, des freins, des équipements de systèmes hydrauliques de freinage et d'atterrissage et qui effectuent en sus des prestations de maintenance et de réparation pour des clients d'Europe, d'Afrique et du Moyen-Orient.

Si l'Alsace ne présente pas autant de formations d'enseignement d'ingénieurs que la Lorraine, la ville de Strasbourg est dotée d'écoles reconnues comme l'INSA de Strasbourg ; mais aucune de ces écoles ne forme des ingénieurs a priori destinés à travailler dans l'aérospatial. Cependant, la ville comporte une formation originale intégralement destinée au secteur spatial, l'International Space University (ISU). En près de 20 ans, l'ISU a formé plus de 2700 élèves, en provenance d'une centaine de pays différents. L'ISU propose un enseignement complet, abordant les aspects techniques des systèmes spatiaux mais aussi les questions juridiques et économiques du spatial.



L'International Space University (Strasbourg)

Créé par une convention ayant valeur de traité signée entre la France et l'Allemagne en 1958 l'Institut franco-allemand de recherche de Saint-Louis (ISL) est un organisme sous tutelle du ministère des Armées français et du ministère de la Défense allemand, qui le financent à parité. Le centre est situé en Alsace, à la frontière avec l'Allemagne et non loin de la Suisse. La mission de l'ISL est d'effectuer des recherches pluridisciplinaires dans le domaine de la défense et de la sécurité, couvrant des thématiques telles que les capteurs, les sources lasers, les matériaux de protection, le vieillissement des matériaux, la navigation ou l'accélération des projectiles.

LA CHAMPAGNE-ARDENNE

Avec la ville de Reims, la région Champagne-Ardenne est l'un des berceaux de l'aéronautique française. Paradoxalement, il ne reste plus beaucoup de traces de cette histoire, sauf quelques industriels comme Novae Aerospace (ex Reims-Aviation), spécialisée dans les structures aéronautiques. La proximité de la ville avec la région Parisienne en font pourtant un cadre idéal pour des entreprises innovantes qui souhaitent s'éloigner de la capitale pour profiter d'un cadre de vie plus agréable tout en gardant contact avec le cœur économique du pays. En 2020, la société Venture Orbital Systems (VOS) a décidé de déplacer ses activités à Reims pour développer Zephyr, un nano-lanceur capable d'envoyer des satellites en orbite basse. Afin de réaliser son premier lancement en 2024, VOS programme le recrutement d'une centaine de techniciens et d'ingénieurs issus de l'ESTACA, SUPAÉRO et de l'ENSMA ainsi que la réalisation d'un investissement de 70 M€ en 4 ans.



Le lanceur Zéphyr de Venture Orbital Systems

LE VOISINAGE EUROPÉEN

La région Grand Est est frontalière de quatre pays résolument tournés vers l'aérospatial : la Belgique, l'Allemagne, le Grand-Duché du Luxembourg et la Suisse. La région Wallonne, directement frontalière, abrite notamment le centre spatial de Liège (CSL), où sont testés des satellites et appareils spatiaux, l'usine de Thales Alenia Space de Charleroi et le centre de l'ESA de Redu.



Le Luxembourg mise sur l'exploitation des ressources lunaires pour développer son industrie et sa recherche spatiale

Depuis 2016, le Luxembourg affiche de grandes ambitions pour le secteur spatial, en étant le premier pays à légiférer sur l'utilisation des ressources spatiales. Cette décision, suivie par la création en 2018 de l'Agence spatiale luxembourgeoise (LSA), s'est traduite par l'implantation de dizaines de Start-up et sociétés spatiales souhaitant tirer profit de ce nouvel écosystème. C'est notamment le cas de la société japonaise Ispace Systems & Communications qui y développe un rover destiné à l'exploration de la surface lunaire ou de Made in Space Europe qui y développe des bras robots pour récupérer des débris spatiaux en orbite. Chaque année, le Grand-Duché organise le Space Forum, qui réunit les grands décideurs du spatial mais aussi la Space Ressources Week. Enfin,

le pays développe sa recherche spatiale, en 2019 avec un master dédié aux études spatiales à l'université du Luxembourg et en 2020 avec le lancement de l'ESRIC, le centre européen de recherche et d'innovations sur les ressources spatiales, en lien direct avec l'ESA.

LE GROUPE RÉGIONAL 3AF GRAND EST

Aujourd'hui sur notre territoire, depuis l'ISL au Sud de l'Alsace jusqu'à Orbital Venture Systems à Reims, de Nimesis Technology à Metz jusqu'à Safran Landing Systems à Molsheim, l'écosystème industriel aérospatial et aéronautique est bien présent.

Dans ce contexte, le nouveau groupe 3AF va agir dans la région Grand Est pour :

- Faire le lien entre cette industrie naissante et l'enseignement supérieur et ainsi créer une plus forte demande pour une industrie aéronautique dans le Grand-Est
- Assurer dès aujourd'hui que la France profite des savoirs-faires et des connaissances qui seront issues de l'essor spatial Luxembourgeois.

Le comité de pilotage du groupe 3AF Grand Est est formellement établi depuis septembre 2020 et entend porter le développement de ce groupe régional.

PRÉSENTATION DES MEMBRES DU BUREAU



François Leproux, ingénieur diplômé de l'ISAE-ENSMA en 2019 (option matériaux) et de l'ISAE-SUPAERO en 2020 (Space System Engineering), travaille actuellement pour Nimesis Technology, une PME basée à Metz développant des

mécanismes spatiaux à base d'Alliages à mémoire de forme. Membre de la 3AF depuis 2016, il s'est occupé pendant 3 ans des activités jeunes du GR Poitou avec Jean Tensi (organisation de conférences, soufflerie Éolia, "Restaurer Hermès"). Originaire de Thionville en Moselle, il a en partie grandi au Grand-Duché du Luxembourg et souhaite développer les liens entre la France et le Grand-Duché dans le domaine spatial.



Damien Hartmann, 39 ans, habitant dans le Haut-Rhin, est commercial dans l'informatique dans la journée, et en activité bénévole président de l'association Open Space Makers qui porte l'initiative Fédération du CNES.

Vis-à-vis du groupe 3AF Grand Est, il souhaite contribuer à donner de la visibilité à l'écosystème aérospatial dans cette région, et inspirer les jeunes et moins jeunes à le rejoindre et à y apporter leur pierre, dans la lignée des idéaux de Fédération.



Arnaud Vacelet, 38 ans, habitant en Lorraine, est ingénieur qualité satellite au Luxembourg, passionné d'astronomie et d'espace. Pour le groupe 3AF Grand Est, il souhaite partager cette passion.

LE POSITIONNEMENT DU GROUPE RÉGIONAL 3AF GRAND EST

- Assurer le rayonnement de 3AF dans la région couverte par le GR Lorraine couvrant les anciennes régions Lorraine, Alsace et Champagne-Ardenne.
- Créer une dynamique transfrontalière, en construisant en particulier des liens comme des conférences avec les acteurs des domaines spatiaux Luxembourgeois, Belges et Allemands.
- Relayer les actions de 3AF, notamment vers les entreprises et les institutions, les écoles d'ingénieurs, les étudiants, les formations professionnelles, les lycées, et en général l'ensemble des actifs ou anciens actifs du secteur aérospatial.
- Concevoir directement ou en partenariat avec les établissements d'enseignement supérieurs ou professionnels des conférences ou des cours spécialisés en lien avec l'aéronautique et le spatial.
- Assurer le lien entre les industries regroupées au sein des Clusters Aériades (France) et Luxembourg Space

Cluster ou du GLAE (Luxembourg) et l'enseignement supérieur et la recherche du Grand Est en vue d'y développer une demande plus forte d'industrie aéronautique et spatiale en Lorraine

PROCHAINES ÉTAPES

La crise sanitaire n'est pas un frein à la mise en route du groupe régional : comme le reste du monde, nous utilisons à plein les outils de visioconférence pour nous organiser !

Nous comptons lancer au plus tôt une lettre d'informations (Newsletter) et un groupe Web (Linkedin) pour faire connaître le projet et mettre en avant les atouts aérospatiaux de la région.

Nous avons effectué un recensement des entreprises, grandes écoles et laboratoires d'intérêt pour le GR 3AF Grand Est ainsi que de leurs compétences et pris contact avec quelques-unes (Nimesis Technology, Venture Orbital Systems).

Nous avons réalisé la mise à jour d'un dossier de présentation du groupe rédigé en 2019 par François Leproux et concentré sur la région Lorraine pour l'étendre à l'ensemble de la région Grand Est.

Nous prévoyons d'organiser dans le courant du premier semestre 2021 une conférence en ligne et plus tard des webinars avec des acteurs aérospatiaux du Grand Est ou frontaliers sous l'égide du GR 3AF Grand Est

Et nous réfléchissons à la mise en œuvre de projets concrets pour faire travailler les entreprises, étudiants et laboratoires du Grand Est sur des projets aérospatiaux : pourquoi pas une première charge utile pour le lanceur Zephir de Venture Orbital Systems entièrement réalisée dans le Grand Est ?

Si vous habitez dans le Grand Est et que vous voulez contribuer aux activités du groupe, vous pouvez nous contacter via grandest@3af.fr. Construisons ensemble l'avenir aéronautique et aérospatial de notre grande région ! ■

HISTOIRE

Louis Susane, pionnier de la fusée du 19^e siècle à Metz

par Philippe Jung

Après de longues recherches, un papier écrit par Fred Ordway, collaborateur de Von Braun, et Hervé Moulin, pionnier des fusées amateurs françaises, permit de trouver enfin le portrait du général Susane, conservé au *National Air & Space Museum* de Washington¹. Puis, enquêtant à Noël 2001 dans sa ville natale de Metz, l'auteur découvrit que l'atelier des fusées n'était autre aujourd'hui que le 2^e Régiment du génie, boulevard Paixhans.



Louis Susane (1810-1876)

METZ DEVIENT LA PREMIÈRE CITÉ MILITAIRE DE FRANCE

Déjà la plus importante ville du nord-est de la France durant la période médiévale, Metz hérita en 1794 de l'École du génie, alors implantée à Mézières, près de Charleville². Cette décision devait avoir de profondes conséquences pour le siècle à venir.

Dans la lignée des efforts de rationalisation du génie et de l'artillerie, il fut en effet décidé le 4 octobre 1802 de fusionner à Metz leurs écoles, créant ainsi l'École d'application de l'artillerie et du génie³. Située dans l'ancien couvent St Arnould, celle-ci devint de ce fait la principale école d'application pour les élèves de Polytechnique. Le célèbre mathématicien Poncelet y enseigna la mécanique en 1825, et Piobert le cours d'artillerie en 1834. Cette école était également très progressiste, puisqu'elle fut la deuxième en France à proposer dès 1825 des cours industriels à l'attention des ouvriers, dans la foulée de l'initiative du baron Charles Dupin à Paris. Ses locaux abritent aujourd'hui le mess officiers de la place de Metz.

NAISSANCE DE SUSANE EN ITALIE (1810)

L'on sait en réalité peu de choses sur la vie de Louis Susane en dehors de sa période messine. Né à Pérouse le 23 décembre 1810, il était le fils de Pierre Susane, conservateur aux Hypothèques, et Jeanne Reytour.

C'est précisément cette année-là que Napoléon finit par créer une commission ayant pour but de construire des fusées incendiaires, suite à la terreur provoquée par les fusées de Congreve lors du siège de Copenhague en 1807, suivie de leur utilisation contre Boulogne en octobre 1806⁴. Présidée par Monge, de l'Institut, ses membres comportaient des officiers d'artillerie (le général Eblé, le général Lariboisière, chef de l'Artillerie et le commandant Charles Moreton, polytechnicien, en charge de Vincennes), le capitaine Bourée de la Marine, les chimistes Berthollet, de l'Institut, et Guyton-Morveau, ainsi que des représentants du Service des poudres et salpêtres. Eblé avait déjà procédé à quelques essais de fusées à Vincennes en 1805. L'objectif était de mettre au point des fusées de 2 800 m de portée pour la campagne d'Espagne à venir. Elles devaient être essayées par le capitaine Bigot, qui avait lancé des fusées à Anvers en 1809, au Camp de Vincennes (le Fort de Vincennes abrite aujourd'hui le Service historique de la défense). Le capitaine Claude Jacquier, qui avait essayé des fusées type Mager à Vienne en 1809, et réalisa les seules fusées

1. *Nineteen Century rocketry in France* (16.2.91) - FI Ordway, H. Moulin

2. *L'École d'Application de l'Artillerie et du Génie de Metz (1802-1870). Enseignement et recherche* (2.11.95) - P. Bret

3. *L'École d'Application de l'Artillerie et du Génie et les cours industriels de la ville de Metz (1998)* - F. Hamelin

4. *Les fusées de Napoléon* (9.84) - P. Bret

HISTOIRE

LOUIS SUSANE, PIONNIER DE LA FUSÉE DU 19^{ÈME} SIÈCLE À METZ

utilisées par l'Empereur, durant la bataille de Cadix en 1811, y participa.

A cette époque, c'est l'Angleterre qui était à la pointe de la technique en matière de fusées, grâce aux efforts de l'homme d'affaires avisé qu'était William Congreve, en fait une conséquence des intenses bombardements des troupes anglaises en 1780 et 1799 en Inde par l'impressionnant Corps des fuséens du Sultan de Mysore. Une Rocket Brigade fut ainsi créée à Bagshot en 1811. Les fusées Congreve furent aussi utilisées par Wellington lors d'une des batailles les plus curieuses de l'histoire, le 10 avril 1814, commémorée par l'obélisque située près de l'Académie de l'air et de l'espace (AAE) : revenant d'Espagne, les troupes anglaises attaquèrent avec succès Toulouse...pour rien, puisque Napoléon avait capitulé quatre jours auparavant - il est vrai qu'il n'y avait pas de téléphones portables à l'époque !



Bataille de Waterloo. La cavalerie française attaque les troupes anglaises, équipées de fusées Congreve [National Army Museum London]

L'Empereur de retour, le maréchal Davout créa une Compagnie d'artificiers à Bourges en 1815, sous la houlette de Jacquier, avec une mission de recherche. Après la défaite de Waterloo du 18 juin 1815 (des fusées Congreve y furent tirées), le capitaine Brussel de Brulard rapporta à La Rochelle les fusées qu'il avait construites à Hambourg en 1814, utilisant les têtes explosives inventées par Schumacker, mais en les attachant au cartouche, alors que les têtes danoises n'étaient qu'ajustées sur ce dernier ⁵. Lorsque la Compagnie fut transférée à Toulouse au début de 1818, ces fusées servirent de base pour la fabrication de

20 fusées par an, de 2 pouces et 3,5 pouces de diamètre, à des fins d'instruction ⁶. Leurs portées étaient de 2 et 4 km respectivement, soit plus que celles de Congreve.

Ce dernier introduisit une innovation majeure en 1819, en transférant la baguette stabilisatrice d'une position latérale à une fixation centrale, grâce à l'emploi de cinq événements circonférentiels, au lieu d'un seul. La trajectoire de la fusée devenait ainsi plus stable.

LA COMPAGNIE D'ARTIFICIERS À METZ (1821)

Préfigurant le futur, la Compagnie d'artificiers bougea encore en 1821, cette fois pour Metz. Dominique Munier, capitaine en second des Fonderies de Toulouse, en fut nommé responsable. Polytechnicien, et élève de Poncelet, il revenait ainsi au pays, étant né à Jouy-aux-Arches, dans la banlieue de Metz. En 1813, il avait commandé une compagnie d'artificiers à Dantzig, construisant des fusées et publiant ce qui est la première théorie connue de la fusée. Il expliquait clairement que les fusées fonctionnaient par réaction et non en s'appuyant sur l'air (Pascal l'avait établi dès 1666), que la force propulsive s'appliquait au massif (la partie supérieure du cartouche), que le centre de gravité devait être localisé au niveau de l'évent et que, en l'absence de vent, la force de traînée devait être appliquée sur la baguette, très en-dessous du centre de gravité ⁷. Le 3 juin 1821, il fut élu à la Société des amis des lettres, sciences et arts et de l'agriculture de Metz, qui devint le 5 septembre 1828 l'Académie royale de Metz, suite au superbe feu d'artifice offert à Charles X lors de sa visite sur place. Poncelet en fut le président en 1823-1824.

La décision du transfert à Metz découlait de son importance en tant que centre pour les machines, l'hydraulique, la balistique, les matériaux, la friction dans les moteurs et leurs transmissions, et les instruments de mesure, alors que le potentiel de la recherche à Toulouse restait limité. L'École d'application était bien entendu un pôle d'attraction significatif, avec Poncelet, le lieutenant I. Didion (X 1817, né à Metz, auteur de plusieurs ouvrages, traduits dans toute l'Europe, sur la balistique, et même les avions), le lieutenant G. Piobert (X 1813, spécialiste de l'hydraulique et de la balistique, qui devint en 1822 aide de camp du général Valée, directeur général des poudres, inspecteur général de l'Armée et président du

5. *Histoire technique de l'artillerie* - Général Challeat

6. *Fusées de guerre et fuséens au XIX^e siècle* - Commandant Walsdorff

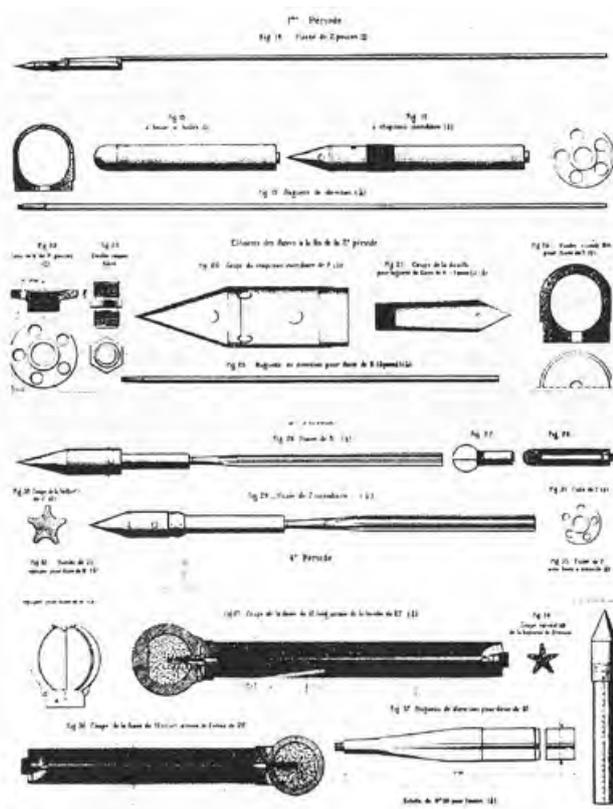
7. *Théorie du mouvement et du tir des fusées* (Académie de Metz 1829) - Capitaine Munier

Comité) et A. Morin (X 1813, spécialiste de la friction et de la balistique). La Compagnie fut rattachée à l'École royale d'artillerie régimentaire, située place St Thiébault au centre ville. Le transfert fut l'occasion de relancer la Commission d'artifices de guerre, qui n'avait pas bien fonctionné à Toulouse de juillet 1818 au printemps 1819. Au sein de celle-ci, le lieutenant V. Lechevalier (X 1813, futur professeur de physique et chimie à l'École de pyrotechnie) étudia les poudres incendiaires et pour amorces d'obus.

Dans la première moitié du 19^{ème} siècle, Metz devint ainsi le plus important centre de recherche en France, un aspect aujourd'hui totalement ignoré, même dans la cité lorraine ! Les autres pôles se trouvaient alors à Paris (la Monnaie, avec le général Valée, et l'Arsenal) et à Vincennes.

CRÉATION DE L'ÉCOLE CENTRALE DE PYROTECHNIE À METZ (1824)

Amplifiant l'importance de Metz en matière de fusées, Louis XVIII décida le 19 mai 1824 de remplacer la Compagnie par une École centrale de pyrotechnie. Rattachée à l'École royale d'artillerie, elle fut installée au Polygone de tir (maintenant la caserne Séré du 2^e Régiment du génie sur l'Île de Chambière). Son titre cachait en fait l'une de ses plus importantes fonctions : la recherche expérimentale. Le commandant Frédéric Cailly-Duchêne, X 1802, diplômé de l'École d'application et aide de camp de Lariboisière, en fut nommé directeur le 7 juillet, avec Munier comme adjoint. Il y avait deux lieutenants et quatre maîtres-artificiers. D'autres lieutenants y étaient détachés, tels que Jacques, Moreau, François Rodolphe (St Cyrien) et Didion. Les études duraient deux ans. Cailly, qui eut plusieurs affectations à Metz, fut aussi élu à l'Académie en 1822.



Évolution des fusées françaises, de Toulouse (1818) à Metz (1833, 1849/50, 1854/56) [Cne Pralon-*Revue d'Artillerie* 1882]



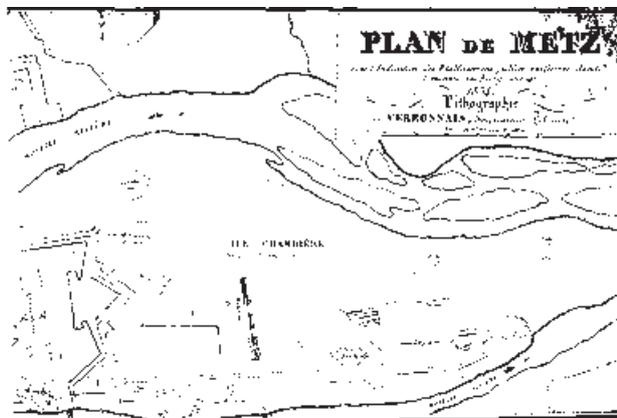
N° 23 École d'Application (au milieu à gauche), n° 38 École d'artillerie (quadrant inférieur gauche). Île de Chambière à droite en haut [Archives Metz].

Parmi les premières activités de la nouvelle école, il y eut le développement par Henri-Joseph Paixhans, lui aussi né à Metz, d'un système de canon utilisant des bombes (boulets creux), et portant son nom. Il fut mis en service par la Marine en 1827. Paixhans choisit de rester dans sa ville car il avait tout sous la main : les aciéries, la poudrerie et le champ de tir. Il est à signaler que, comme Congreve, Paixhans étudia un système de blindage

HISTOIRE

LOUIS SUSANE, PIONNIER DE LA FUSÉE DU 19^{ÈME} SIÈCLE À METZ

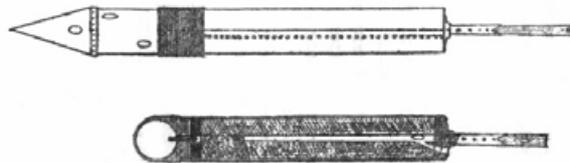
pour navires, utilisant des plaques d'acier, prélude aux cuirassés.



Ile de Chambière, avec le Polygone et l'École de Pyrotechnie (à gauche) [Archives Metz]

Alors que Congreve, impliqué dans une affaire en Angleterre, devait quitter son pays, décidant de rejoindre Nice avec son propre bateau, l'un de ses associés, Robert Bedford, proposa sans succès ses services à la Russie. Sous le nom de Morvat, il prétendit alors auprès de Dupin être le détenteur du "secret" de Congreve. Transmise à Valée en décembre 1826, sa proposition suscita quelques réserves auprès des experts français. Se considérant pour le moins aussi compétents, sinon plus, que l'Anglais, ils décidèrent de prendre leurs distances : à l'époque, outre Lechevalier, Munier et Rodolphe, Rougé travaillait également sur les fusées à Metz, au sein de nombreuses commissions - sans compter les experts de la Marine, tels que Bourée.

L'impact des fusées Congreve à Boulogne, Copenhague, Aix et Flessingue en 1806-1809 avait cependant été tel, et le mythe du secret de Congreve était si répandu, que le ministre décida le 11 mai 1827 d'embaucher Bedford. Ceci en dépit de tirs peu convaincants de quelques fusées de démonstration. Les 6 et 16 octobre, Bedford lança 50 fusées de sa conception à Vincennes, sans bons résultats, bien qu'il les déclara équivalents à ceux des fusées anglaises. Valée, qui voulait mettre Metz sur un pied d'égalité avec Vincennes, décida de transférer Bedford à l'École de pyrotechnie, dans le plus grand secret, seuls Cailly et Munier étant informés⁸.



Fusées de 3 pouces 6 lignes construites par Bedford à Metz en 1827 [note 10]

Par un curieux hasard, Congreve qui s'était arrêté à Toulouse, apparemment pour y soigner une paralysie des jambes, devait y mourir le 15 mai 1828, et être enterré dans le cimetière des Juifs et des Protestants. Peu de temps après, entre le 30 mai et le 18 juillet, Bedford essaya ses nouvelles fusées au Polygone, avec de bien meilleurs résultats, sans toutefois atteindre les exigences du ministère: une pénétration de 4,63 m fut enregistrée dans une butte située à un kilomètre. Une commission, présidée par le commandant de l'École d'artillerie, créée pour contrôler les essais et diriger les recherches, trouva cependant la précision des fusées suffisante. Cailly approuva donc leur emploi, du fait de leur pénétration supérieure à celle des obus, mais seulement par vent modéré.

FEU D'ARTIFICE ROYAL (1828)

Charles X estima que le feu d'artifice tiré à Metz en son honneur le 4 septembre 1828 avait été le meilleur auquel il lui ait été donné d'assister. Munier expliqua cette année-là à l'Académie comment il avait équipé des roues de 16 m de haut avec de nouvelles couleurs bleues inventées par les maîtres-artificiers Auburtin et Depréaux, en utilisant de la pulvérisine, du charbon en chènevottes, du zinc et de l'antimoine⁹. Après quatre jours d'essais, un feu rouge fut créé, à partir de la décomposition de nitrate de strontium par du chlorate de potassium, avec addition de soufre, de noir de fumée et de sulfure d'antimoine.

Sur un plan plus militaire, les premières fusées messines furent livrées en 1828 : quelques-unes furent envoyées à Patras, dans le Péloponnèse¹⁰. Ce fut en pure perte, puisque lorsque l'occasion se présenta d'employer l'arme, son unique servant fut retrouvé ivre mort !

8. Des premières fusées au V-2 (1947) - A. Ananoff

9. Note sur le feu d'artifice tiré à Metz le 4.9.1828 (Académie de Metz 1828) - Capitaine Munier

10. Les fuséens (1831) - Colonel Arago

La stature grandissante de Metz en matière de fusées fut confirmée par la venue sur place en 1828-1829 de Bourée, le commandant à Toulon, afin de préparer la construction chez lui de fusées pour la future campagne d'Algérie.

MUNIER AMÉLIORE LA FUSÉE (1829)

Toujours aussi actif, Munier initia en 1829 un programme d'amélioration de la fusée. Des études sur l'influence du vent débutèrent: le cartouche, la tête et la baguette furent tous modifiés. Les chapiteaux incendiaires furent changés de manière à permettre l'emploi du même tube de lancement que pour les fusées à boulet. Le mélange de poudre, jusque là réalisé à la main, le fut à l'aide de gobelets en bronze, suivant un processus demandant quatre heures.

L'emploi d'une poudre plus active permit de réduire d'un tiers la longueur du cartouche. Il en résulta une amélioration de la précision. Le délai de lancement après allumage fut considérablement réduit, à 0,5 s, au lieu des 2,5 s des fusées Bedford. Selon Munier, l'amélioration de portée était spectaculaire pour les petits angles de tir: 15 fois sous 10° par rapport aux fusées de Bedford (3 fois mieux sous 22°).

La première occasion d'utiliser les fusées de Metz se présenta enfin lors de la campagne d'Algérie de 1830: la 10^e Batterie du 9^e Régiment y fut envoyée brièvement, avec le capitaine Robert, 200 fusées de 2 pouces, 200 fusées de 2,5 pouces et 6 chevaux. Deux types de tubes de lancement furent utilisés : un trépied démontable de 30 kg pour le calibre 2 pouces et un modèle 1827 avec 4 tubes de 1,625 m de long. Mais les soldats n'avaient aucune formation spéciale. Lors de la bataille de Staouéli le 19 juin, quelques-unes de ces fusées suffirent à mettre en déroute la cavalerie adverse. Elles furent aussi utilisées lors de la prise du Fort de l'Empereur à Alger. En fait, elles semblèrent plus terroriser les chevaux qu'avoir des effets létaux. Les exemplaires restants furent laissés à Alger, cependant que les fuséens rentraient à Metz.

PREMIER SÉJOUR À METZ POUR SUSANE (1831)

Après avoir passé ses examens à Rennes, Susane fut admis à Polytechnique en 1829, dont il sortit en 1831, honorablement classé 59^e sur 113. Comme beaucoup de

ses collègues, il suivit à Metz les cours de l'École d'application. À l'époque, trois types de fusées étaient essayées au Polygone :

- calibre 2 pouces, pesant 3 kg, équipées d'une tête à boulet avec 15 balles (portée de 1.650 m à 19°),
- calibre 2,5 pouces, pesant 6 kg, avec tête à boulet incorporant 25 balles,
- calibre 3,5 pouces, pesant 15 kg (portée de 2.380 m à 45°).

Des têtes incendiaires pouvaient aussi être montées. Un ensemble de lancement de type orgues fut construit pour la 9^e Batterie du capitaine Colomb, afin de remplacer les canons de 8 cm, mais sans saisir l'opportunité de simplifier le système. Il fallait donc toujours 6 chevaux pour le tractage, au détriment de l'avantage de légèreté offert par la fusée.

Lorsque Louis-Philippe vint à Metz en 1831, un feu d'artifice fut encore tiré par l'École de pyrotechnie. Peut-être à cette occasion la création d'une batterie spécialisée fut-elle évoquée par le Comité, à l'image de celle des anglais. Mais il faudra encore beaucoup de temps avant de concrétiser...

De nombreuses études de base étaient cependant en cours dans la très active cité messine. En 1832 Piobert réalisa les toutes premières investigations théoriques sur la combustion des poudres à l'École d'application, analysant les caractéristiques physiques (dureté, densité, hygrométrie), les vitesses d'allumage et de combustion, la force balistique et les effets destructifs. Ces études remarquables furent poursuivies à la fin du 19^{ème} siècle par le célèbre Paul Vieille. L'année suivante, une commission des principes de lancement fut créée à l'École d'application, au sein de laquelle Didion poursuivit des recherches aérodynamiques sur le coefficient de traînée à haute vitesse (proportionnel à V^2 et V_3 , à comparer donc à la formule en V^2 aux plus faibles vitesses, telle qu'enseignée à Polytechnique), et Piobert sur le tir en brèche (tir d'artillerie destiné à abattre un pan de remparts), la fabrication et les essais des poudres (dont le pyroxyle plus tard).

Un progrès technologique significatif fut enregistré en mai 1832 lorsque, à Nancy, le chimiste Braconnot découvrit une poudre améliorée en mélangeant à température ambiante de l'amidon et de l'acide nitrique : il l'appela xyloïdine¹¹. Il put aussi l'obtenir, à plus haute

11. Note sur le pyroxyle ou coton-poudre (Académie de Metz 1854) - Susane

HISTOIRE

LOUIS SUSANE, PIONNIER DE LA FUSÉE DU 19^{ÈME} SIÈCLE À METZ

température, avec de la sciure de bois, du coton, du linge et de la gomme. En 1838, Pelouze ajouta de l'eau, créant la pyroxyline, ou coton-poudre, plus puissante que la xyloïdine. Il essaya, initialement avec succès, de faire croire qu'il en avait été l'unique inventeur, jusqu'à ce que Susane démonte la supercherie.

Il est à noter que Bedford proposa en 1832 des fusées spinnées, équipées d'obus à percuteur. Plusieurs furent testées, sans toutefois être acceptées. Si cela est confirmé, l'invention bien connue de la "fusée rotative" par Hale en 1845 aurait donc été largement précédée par les essais de Metz !

Avec la guerre en Europe, l'École de pyrotechnie envoya en décembre 1832 un millier de fusées pour le siège d'Anvers, Bien qu'arrivées le lendemain de la capitulation, onze d'entre elles furent toutefois lancées le 23 décembre contre la flotte hollandaise, à 1 400 m de distance, mais aucune ne fit mouche.

Toutes ces recherches permirent à Metz d'introduire en 1833 quelques petites améliorations à la fusée :

- le bouchon de bois protégeant l'évent durant le transport fut remplacé par un bouchon en fer à double filet avec épaulement,
- pour permettre un montage plus rapide de la baguette, celle-ci eut son filetage externe remplacé par un filetage interne.

Le très controversé Bedford était à cette époque toujours soutenu officiellement: lorsque deux officiers s'opposèrent à l'Anglais, le Comité proposa le déplacement de ceux-ci.

Susane était cependant devenu lieutenant à l'École de cavalerie de Saumur en 1833.

SUSANE DEVIENT AIDE DE CAMP DU GÉNÉRAL NEIGRE

En pleine controverse entre Bedford, revendiquant l'égalité avec les fusées anglaises, et l'Artillerie déclarant ces dernières meilleures, l'Anglais Wade, un ancien associé de Bedford, proposa en 1834 au gouvernement français le sempiternel "véritable secret" de la poudre de la fusée. Des essais comparatifs furent donc menés à La Fère, en présence du général Neigre, le Directeur général des poudres et salpêtres, dont l'aide de camp était Susane. C'était le premier usage de ce champ de tir, situé près de Laon, pour des fusées à longue portée. Les

fusées messines se révélèrent en fait plus puissantes, et de précision équivalente. Au même moment Bedford commença à travailler - mais avec lenteur - au chargement de la poudre à la presse hydraulique.

En 1834 toujours, on notera que le Comité demanda la distribution dans les écoles d'artillerie et les arsenaux du mémoire du capitaine Larchey sur la fabrication des fusées. En septembre Depréaux publia un autre mémoire sur les fusées incendiaires et de campagne, décrivant les essais du 15 octobre 1832 avec des fusées de 2 pouces - 2,5 pouces - 3 pouces - 3,5 pouces. Soumis au directeur de l'École de pyrotechnie en septembre 1835, il mentionnait également d'intéressantes "fusées de communication", utilisées en fait pour passer des signaux. Une référence de 1834 décrit des essais avec 24 affûts, en présence de fort vent : toutes les fusées atteignirent leur cible à 800 m, suivies de 24 autres à 1.200 m.

En 1836 Munier fut muté à Strasbourg, et remplacé par Rodolphe en tant que second à l'École de pyrotechnie. Le mémoire de ce dernier devint la base du cours de pyrotechnie de l'Artillerie. Rodolphe, qui avait participé à la campagne d'Algérie de 1830, fut aussi élu à l'Académie de Metz en 1837.

Mais pourquoi la fusée n'avait-elle toujours aucun crédit en France, une situation que Susane qualifiera plus tard d'injustifiée ?

Quelques indices peuvent être trouvés à l'occasion de l'envoi de fusées de 2 pouces à Constantine : elles ne pouvaient en effet être efficaces contre des habitations en pierres. Pire encore, les soldats n'étaient pas entraînés à les mettre en œuvre, et les officiers ne connaissaient pas : en fait, toutes les colonnes en Algérie, de 1837 à 1844, avaient des fusées, mais ne savaient pas les utiliser, tant était réduite la considération accordée à cette arme ! Le capitaine Coteau, de la 4^e Batterie du 10^e Régiment, lança quelques fusées dans la nuit du 9 au 10 octobre 1837 contre des maisons de pierre, mais évidemment sans résultats. Quelques unes furent néanmoins utilisées avec succès pour passer des signaux destinés à protéger le repli des troupes. Tout ceci renforça le rapport préparé par le Comité et Piobert en juin 1837, considérant la fusée comme pas assez puissante ni précise (à cause du vent), et inférieure au canon - sauf lorsque ce dernier était trop lourd à tracter. Bedford approuva ces conclusions.

Les autorités devenaient impatientes, et le 6 mai 1837 Neigre demanda à Schouller, commandant de l'École

d'artillerie, l'essai de fusées militaires. Le plan de charge était tel à Metz que Cailly dut demander à Rodolphe de vérifier la disponibilité du Polygone, occupé par les essais du système Didelot à projectile creux. L'École de pyrotechnie était fort active en cette période 1836-37, avec Cailly, Rodolphe et le capitaine De Selve (adjoint de Cailly) participant à de nombreuses commissions de recherche et d'expertise:

- fusées de guerre (éclatements, rotation, cartouche), avec Cailly président et Rodolphe rapporteur,
- fusées à projectile creux Didelot, avec De Selve rapporteur,
- détonateur pour obus shrapnell proposé par Bedford, avec De Selve comme rapporteur et Cailly comme membre.



Fusée de 2,5 pouces avec tête explosive de 3,5 pouces (1839)
[note 10]

SUSANE EST PROMU (1839)

Susane fut promu capitaine en 1839, et devint à une date inconnue directeur adjoint de la Capsulerie de guerre, où il étudia les poudres, dont le coton-poudre, et le tir en brèche.

Après qu'un nouvel affût avec auget en bois eut été adopté en 1839, une importante décision de standardisation fut prise en 1840, avec enfin l'imposition du système métrique, ce qui aboutit aux nouvelles désignations suivantes :

| Calibre | Nom | Diamètre effectif |
|------------|-----|-------------------|
| 1 pouce | 5 | 54 mm |
| 2,5 pouces | 7 | 66 mm |
| 3,5 pouces | 9 | 95 mm |

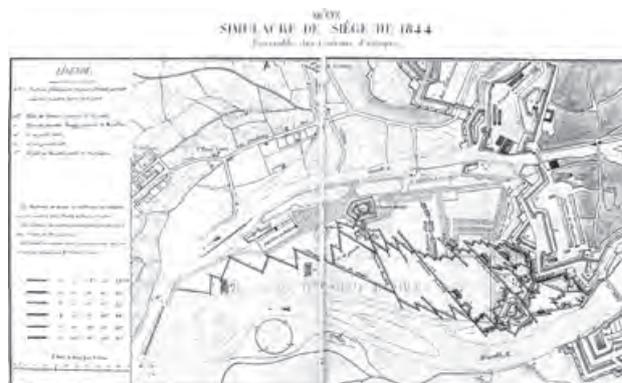
Il avait été possible à l'époque de réduire la longueur de la baguette à 3 m. En 1841 Schouller essaya des fusées de calibre supérieur, avec d'excellents résultats. Mais des imperfections dans la poudre en rendaient l'emploi peu sûr.

CRÉATION DE LA BATTERIE (1842)

C'est donc 31 ans après l'Angleterre qu'une batterie spécialisée en fusées fut enfin créée le 28 mars 1842, suite à la proposition de Schouller au ministre, une

conséquence du manque criant d'instructions pour les fuséens d'Algérie. Spécialisée dans la fabrication et la mise en œuvre opérationnelle des fusées, instruction comprise, la 6^e Batterie du 5^e Régiment correspondante fut attachée à l'École de pyrotechnie, sous les ordres du capitaine Rougé, avec le capitaine Moisson, le lieutenant Degironde et le 2^e lieutenant Guivel. La fusée était en route vers une élévation de son statut en France.

Une importante opération se déroula en 1844 à Metz dans l'Ile de Chambièrre, lorsqu'un siège de la ville fut simulé. Il conduisit à des accidents impliquant des fusées de gros calibre, ce qui, couplé à leur faible précision, aboutit au retrait des fusées de 9 l'année suivante. En juin 1844, on note qu'un obus de la commission des principes de tir, après avoir ricoché, retomba au milieu des membres de la commission des fusées à projectile creux, occupés à mesurer l'impact de leurs propres chapiteaux. Il n'y eut heureusement aucune victime, mais cela aboutit à alterner les travaux des deux commissions tous les deux jours. Un Messin fut quand même un jour blessé lorsqu'une fusée, ayant éclaté en plein vol, dévia de sa trajectoire et s'écrasa rue Saulnerie.



Siège simulé de Metz [Archives Metz]

Du côté de la recherche, quelques modifications furent apportées aux têtes des fusées de 5, leur efficacité étant considérée comme nulle : les études démarrées en 1839 permirent de remplacer le mélange de poudre avec 14 balles par 40 g de poudre seule. L'épaisseur de la tête passait de 4 à 8,5 mm : elle était enfoncée sur le cartouche, et fixée par une bande de tissu collée.

En 1844 le lieutenant-colonel Cailly prit sa retraite, et fut remplacé par Desmazières à l'École de pyrotechnie, Rodolphe restant commandant en second.

HISTOIRE

LOUIS SUSANE, PIONNIER DE LA FUSÉE DU 19^{ÈME} SIÈCLE À METZ

BEDFORD ÉVINCÉ DE METZ (1845)

Alors qu'il était question de réformer l'Artillerie, et que le transfert à Vincennes de l'École de pyrotechnie était envisagé, au vu des dimensions limitées du Polygone, l'opposition à Bedford eut finalement raison de lui, obtenant sa mutation à Vincennes en 1845. La même année, le maréchal Marmont exposa dans son historique "De l'esprit des institutions militaires" une vision incroyablement prophétique sur la fusée militaire, déclarant que, véritable révolution dans l'art de la guerre, elle avait un futur immense, car elle pouvait tout faire en toutes circonstances. Il estima que, plutôt que de créer une unité spécialisée, toutes les unités de l'armée devraient avoir leur propre section de fusées.

A Metz, Rougé introduisit en 1845 un nouvel affût léger avec tripode en bois, permettant le lancement de fusées avec têtes de diamètre supérieur à celui du cartouche. Il proposa un conteneur de transport pouvant être également utilisé pour le lancement d'une salve de 6 fusées. Il mena aussi un court détachement de 25 fuséens en Algérie, réussissant avec quelques tirs à déloger les Arabes de leurs montagnes.

LE PROGRAMME DE 1846 DU COMITÉ

Le Comité estima en 1846 que les fusées européennes étaient supérieures à leurs homologues françaises. Le ministre décida donc d'arrêter les tirs, et de démarrer un vaste programme, supervisé par Rougé, concernant :

- la composition de la poudre, les dimensions et formes des événements et de l'âme,
- des mesures de poussée au dynamomètre,
- la stabilité de vol,
- les procédés de fabrication (mouton ou presse),
- les applications.

Les résultats mirent en évidence que la poudre brûlait trop lentement, et que l'âme devrait être cylindrique plutôt que conique. Piobert estima qu'un cylindre allongé aurait une meilleure pénétration dans l'air. Desmazières put donc conclure fièrement que l'École de pyrotechnie avait réussi à développer, outre le canon Paixhans, un système de fusées militaires et une doctrine pour l'emploi des explosifs et artifices. En réalité, il faudra attendre 1849 pour voir la mise en service de ces nouvelles fusées.

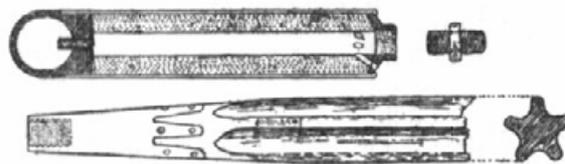
En Allemagne, Schonbein réussit cependant à stabiliser le coton-poudre en septembre 1846 en utilisant de l'acide sulfurique. Un certain Morel devint son agent en France,

brevetant la poudre correspondante sous le nom de fulmicoton. Contacté, Pelouze procéda à quelques vérifications. Suite à des démonstrations à l'Artillerie (dont Piobert), la Direction des poudres et salpêtres en débuta la fabrication dès novembre. Une Commission pyroxyle fut créée le 3 décembre 1846 pour suivre les progrès accomplis, avec le Duc de Montpensier à sa tête, et Susane en tant que rapporteur. À l'issue d'un millier de tirs au fusil et au canon, le pyroxyle fut trouvé trois fois plus énergétique, mais aussi deux fois plus cher que la poudre classique (11,75 F le kilogramme, pour 7 F espérés et 5 F requis). Grâce à Susane, quelques valeurs techniques sont pour la première fois mentionnées :

- une dose de pyroxyle était équivalente à 1,94 dose de poudre fine, 2,19 doses de poudre ordinaire, 2,7 doses de poudre à canon, ou 3,04 doses de mousquet,
- la vitesse atteinte par le projectile était de 530 m/s avec le pyroxyle, contre 460 m/s pour la poudre ordinaire et 510 m/s pour la poudre à canon et mousquet.

Mais dans la foulée de la Révolution de février 1849, tous les documents sur le pyroxyle furent volés, sauf quelques-uns qui purent être sauvés par Susane. Pour des raisons inexplicées, le pyroxyle devint un sujet tabou. Pire, l'Autriche trouva cette poudre si bonne qu'elle l'adopta le 29 décembre 1854 pour ses canons, en pleine guerre de Crimée...

Un événement dramatique était entretemps intervenu le 5 août 1848 lorsque Rougé fut tué par l'explosion d'une nouvelle fusée de 5, dont il terminait la mise au point. Le capitaine Gerbaut le remplaça à la tête de la Batterie, avec comme second le capitaine Norès.



Fusée de 5 (1849) [note 8]

L'année suivante, et avant même la fin du programme de 1846, cette nouvelle fusée de 5 (diamètre interne du cartouche de 54 mm) fut cependant officiellement adoptée, avec une baguette d'un mètre de long seulement. Une des raisons de cet empressement résidait dans le besoin de l'Armée des Alpes. Un grand nombre de ces fusées fut donc construit à Metz, suivies de fusées de campagne de 7 équivalentes (cartouche de 68 mm, baguette de 1 m) en 1850 et de fusées de 9 (cartouche de

98 mm) en 1851. Leurs baguettes avaient à présent une section en étoile à 5 branches, correspondant aux jets des 5 événements. La tension étant retombée, ces fusées ne furent toutefois pas nécessaires. Il en fut probablement mieux ainsi, puisque le manuel d'Artillerie donnant les instructions pour leur emploi ne les décrivait même pas!

SUSANE À L'ÉCOLE DE PYROTECHNIE (1852)

La carrière de Susane connut un coup d'accélérateur, puisqu'après avoir été aide de camp du chef du personnel de l'Artillerie, le général Cugnot de Lanoye, il fut promu commandant en 1850 ("Chef d'escadron"). Ses mérites furent reconnus avec son premier commandement important, la direction de l'École de pyrotechnie, en mars 1852. Son second, nommé dès 1848, était le capitaine Maury (qui le demeura jusqu'à la fin en 1871).

Un mois plus tard, Norès fut envoyé en Algérie avec une demi-batterie de 46 fuséens, et les fusées de 5 prévues pour l'Armée des Alpes. Ce fut le premier séjour permanent de la Batterie, à la demande du général Randon, Gouverneur général de l'Algérie. Les deux autres sections de Metz devinrent alors la 5^e batterie du 11^e régiment.

Tout en introduisant en 1852 le conteneur/affût combiné de Rougé, mais réduit à 4 fusées, l'École de pyrotechnie essaya aussi la fusée du lieutenant-colonel Goupil. En 1845, ce dernier avait proposé une nouvelle configuration avec évent unique et trois empennages, l'âme étant quasi-cylindrique. Cette architecture n'était pas sans rappeler l'extraordinaire fusée de Vaillant de 1821, véritable premier avion-fusée delta de l'histoire. En 1849 il essaya aussi des fusées de type Hale modifié à La Fère, avec un obus ogival de 66 mm. Des anneaux de zinc "en saillie assez forte" étaient supposés garder l'axe de la fusée tangentiellement à sa trajectoire. Mais certains d'entre eux ayant fondu, il décida de braser un bandeau de cuivre en hélice autour du cartouche, d'un pas de 2 mm, avec des protubérances de 5 à 15 mm. Ce fut le type essayé à Metz, avec de mauvais résultats : la portée fut de 30 à 960 m seulement, couplée à de fortes dispersions. Le Comité décida donc le 8 juin 1853 de ne pas le retenir.

SUSANE RÉORIENTE LE PROGRAMME DE 1846 (1853)

Un an après son retour à Metz, Susane, qui connaissait déjà la fusée, devint ce qui en réalité avait manqué depuis

longtemps dans ce domaine à la France, depuis 1783 la patrie de l'aéronautique avec les frères Montgolfier : ce que l'on appelle aujourd'hui un chef de programme. Comme exposé plus haut, tous les ingrédients nécessaires étaient largement disponibles depuis des décennies, les experts, la recherche, les technologies, les moyens industriels, les soutiens et les prophètes. Ce qui manquait simplement, c'était un chef fort, pragmatique, à vision d'ensemble et bien introduit, capable de réunir tous ces éléments en un système opérationnel au sein de l'Armée, au même niveau que les autres armes. Et il n'y avait alors pas de meilleur endroit pour atteindre cet objectif que la place de Metz.

Susane ne tarda pas à intervenir sur le programme de 1846, le considérant trop lent, et en réalité un obstacle à l'introduction rapide d'un système de fusées militaires. Il estima le problème être d'ordre mécanique et non chimique, tournant en dérision les prétentions de Bedford et consorts sur le soi-disant secret de la poudre, une croyance encore tenace. Depuis Groecccus, la poudre n'avait en réalité pas véritablement évolué en 10 siècles.

Avec l'accord du Ministre et du Comité, il décida donc le 16 juillet 1853 de démarrer à zéro un important programme de développement :

- Il énonça pour la première fois que le centre de gravité devait être situé au fond de l'âme (et non au niveau des événements), les conséquences étant très positives : baguette raccourcie, tête plus lourde, trajectoire plus régulière.
- Redémarrer les études sur le chargement de la poudre à la presse, car meilleur et plus sûr que l'emploi du mouton (ce dernier voyait le mélange de petites quantités à la main avec une baguette, avant de lâcher un marteau, un procédé brutal introduisant des bulles d'air et des fissures, qui conduisait à une combustion instable voire explosive). La presse hydraulique, plus puissante et plus régulière, permettait de fabriquer une poudre plus énergétique et d'obtenir une densité supérieure, de 1,7 au lieu de 1,4. Le premier chargement de ce type ayant réussi, deux presses furent installées en 1854 ?
- Utiliser des tôles minces doubles en acier, en provenance des laminoirs lorrains, plutôt que du fer ou du bronze, chers et lourds, de manière à fabriquer des cartouches légers et homogènes.
- Positionner avec précision le cartouche, la baguette et les événements, ces derniers devant être aussi de dimensions précises.
- Utiliser des machines pour assurer une fabrication uniforme (le bloc de poudre était réalisé avec un moule

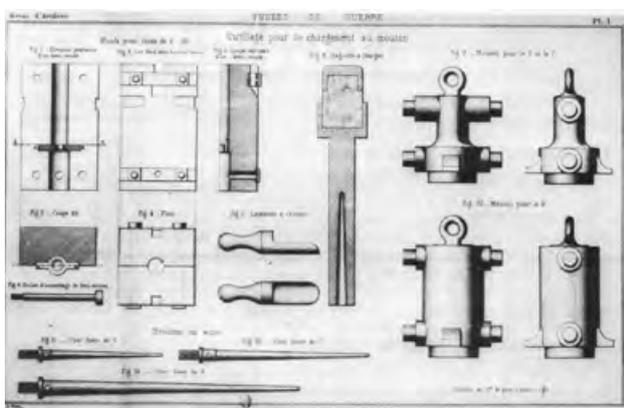
HISTOIRE

LOUIS SUSANE, PIONNIER DE LA FUSÉE DU 19^{ÈME} SIÈCLE À METZ

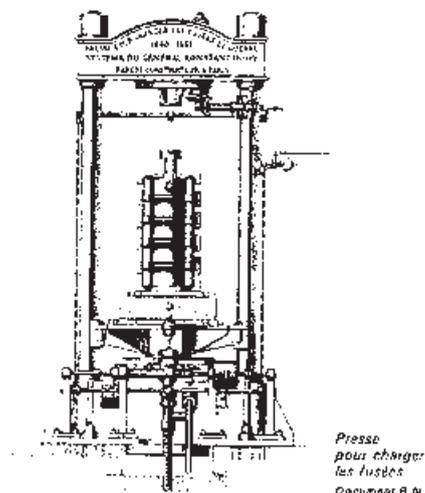
en deux demi-cylindres boulonnés).

- Utiliser un affût léger, éventuellement transportable à l'épaule.

L'objectif était d'avoir un système cohérent avec l'artillerie, le plus petit modèle devant donc avoir une portée minimum de 2.500 m, avec une charge creuse de 3 kg (le calibre minimum devait être de 6 cm et non plus de 5 cm). Les travaux sur la fusée de 9 reprirent également. La Batterie devint entretemps la 4^e du 12^e régiment, toujours avec Gerbaut et Norès, mais avec cette fois-ci un nouveau lieutenant, Bernard.



Mouton (réf. Fusées de guerre - Pralon - 1883)



Presse hydraulique de chargement (1860/61)

Comme l'on pouvait s'y attendre, Susane fut rapidement élu à l'Académie de Metz, en 1853, suite à son importante histoire de l'artillerie en 8 volumes.

Cette année-là, une controverse surgit encore au sein de nombreux officiers, en faveur du système de fusées autrichiennes.

Il en résulta un grand programme d'essais de plusieurs types de fusées, avec la participation de Rodolphe lui-même, allant jusqu'à fabriquer à Metz des fusées étrangères (on imagine aisément Susane voulant clore définitivement ce débat récurrent), et impliquant :

- des fusées françaises de 54 de 1849,
- des fusées réalisées par un déserteur hongrois, ancien officier du corps des pyrotechniciens autrichiens, envoyé secrètement à Metz par le ministère,
- des fusées autrichiennes, construites à Metz suivant les indications du général De Courtigis.



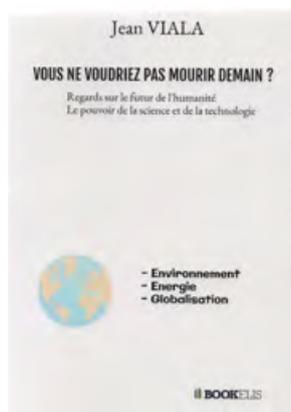
Fusée autrichienne essayée à Metz en 1854
(sans son chapiteau)

Ces dernières étaient particulières, avec une grande âme de surface maximale, fournissant une importante accélération au lancement, d'autant plus qu'un grand effort avait été réalisé pour en alléger tous les éléments. Le résultat était une arme assez précise, mais de courte portée. Les fusées autrichiennes et hongroises donnèrent des résultats équivalents, cependant que les françaises, plus grosses et avec leur baguette courte de 1 m, avaient une plus grande portée et une meilleure régularité. De plus, leur transport et leur mise en œuvre étaient plus faciles. Il n'est donc guère surprenant que le système français soit confirmé une fois pour toutes, d'autant plus que le programme Susane en cours promettait d'autres améliorations. ■

Suite dans la Lettre n°47

Vous ne voudriez pas mourir demain ? Regards sur le futur de l'humanité. Le pouvoir de la science et de la technologie aux éditions Bookelis

par Bruno Chanetz, rédacteur en chef



Jean Viala est membre 3AF. Il a obtenu le Grand prix 3AF en 2016. Ancien directeur technique et conseiller technique du groupe MBDA, il propose son analyse d'ingénieur autour de questions d'actualité :

Quelles sont les grandes menaces sur l'avenir de l'humanité et quelles propositions peut-on faire pour assurer sa sauvegarde sur terre en utilisant la science et la technologie ? L'analyse est basée sur les données connues en 2020. Les diverses opinions scientifiques sont examinées sans ménagement et avec pragmatisme. Il n'hésite pas à adopter parfois des positions non-conformistes et cite la géographe Sylvie Brunel, critiquant la notion de développement durable, où elle voit une conception de l'homme comme un parasite, et la nature comme un idéal.

Dans sa préface, l'auteur pose bien les problèmes auxquels est confrontée l'humanité : crises économique et migratoire sur fond de peur de l'avenir, ce qui l'amène à analyser les trois sujets liés du réchauffement climatique, de l'énergie et de la surpopulation. Cet ouvrage est précieux car il donne un accès facile à un grand nombre de données de base. Le constat qu'il dresse donne des raisons d'espérer, qui tempère le titre inquiétant de l'ouvrage.

L'interaction humaine sur le climat conduisant au réchauffement de la terre est une bonne nouvelle, car on évite une glaciation ! Jean Viala note au passage que la vapeur d'eau contribue pour 60%, et même à 90% si l'on considère les nuages, à l'effet de serre. Il ajoute qu'il y a une chance sur deux de se tromper en affirmant que c'est la contribution humaine qui est responsable du déséquilibre positif du bilan annuel de carbone atmosphérique. Prenant cependant acte du constat du réchauffement climatique, il propose d'intensifier les programmes de transition énergétique, en attendant l'énergie nucléaire verte du futur. Dans l'immédiat, durant la

phase de transition énergétique, l'utilisation de la géo-ingénierie devrait permettre de détourner la lumière solaire. L'histoire nous apprend que c'est possible : Il y a 66 millions d'années, un nuage de poussières soulevé par l'impact d'une grosse météorite a engendré une ère glaciaire. Plus près de nous, l'éruption du Pinatubo en 1991 a produit un refroidissement moyen de 0,5° pendant trois ans.

La disponibilité de l'énergie est telle que les projections catastrophistes n'ont pas lieu d'être. La production mondiale d'énergie commercialisée en 2018 ressort ainsi : 32,3% de pétrole, 28,3% de charbon, 24% de gaz naturel et 11,5% d'énergie renouvelable (les 2/3 dus à l'hydroélectricité). Les ressources prouvées, au rythme actuel de consommation, assurent 90 ans d'autonomie. Plus encore, les ressources terrestres garantissent de l'énergie pour 10 millions d'années, compte tenu des réserves de deutérium, l'isotope naturel stable de l'hydrogène, et de lithium. Le lithium est nécessaire pour la transformation du deutérium en tritium, l'isotope radioactif de l'hydrogène, utilisable dans la fusion nucléaire, l'énergie verte du futur où l'écologie rejoint le nucléaire. La voie de la fusion nucléaire est en effet le Graal car non polluante et sans déchets durables. L'enjeu a été pris en considération parmi les puissances nucléaires, au point que le programme ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) à Cadarache est le plus grand programme mondial de recherche scientifique.

La croissance de la population exige l'établissement d'un ordre mondial indispensable à la survie de l'humanité. Rappelant que la production alimentaire a connu une croissance beaucoup plus importante encore que la population au cours des six dernières décennies et que les prix des denrées alimentaires n'ont cessé de décroître au fur et à mesure de l'amélioration des rendements, on déplore que 15% de la population mondiale soit sous-alimentée, principalement en raison des guerres, de la corruption et des catastrophes naturelles. D'ici 2050 l'augmentation de la population couplée aux appétits grandissants d'un continent asiatique de plus en plus aisé imposent à la production alimentaire d'augmenter encore de 70%. Une régulation

NOTE DE LECTURE

VOUS NE VOUDRIEZ PAS MOURIR DEMAIN ? REGARDS SUR LE FUTUR DE L'HUMANITÉ. LE POUVOIR DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE AUX ÉDITIONS BOOKELIS

internationale s'impose avec une augmentation des surfaces cultivables, l'introduction de progrès techniques afin d'augmenter le rendement des terres cultivables et la modification des comportements alimentaires, ainsi que l'accroissement du rôle des biotechnologies. La question planétaire telle que la survie de l'humanité, doit être régie par des gouvernances édictées au niveau international.

La fin de l'essai examine de quoi dépend la survie de l'humanité en envisageant les différents seuils pour la fin de notre monde :

- une première borne à 4 milliards d'années lors de la rencontre de notre galaxie avec la galaxie voisine Andromède, celle-ci inéluctable car c'est la fin programmée de notre galaxie ;
- une seconde borne à 1 milliard d'année lorsque notre soleil, qui produit déjà 20% de plus d'énergie qu'à ses débuts, fera bouillir l'eau des océans, elle aussi irrémédiable sauf à réussir à bloquer le flux solaire par une géo-ingénierie efficace ;
- une troisième borne à 500 millions d'années quand la quantité de dioxyde de carbone présente dans notre atmosphère sera divisée par 40 par rapport à celle

existante actuellement et qu'on passera en dessous du seuil permettant la photosynthèse, situation qu'il semble difficile de modifier de manière sensible ;

- une quatrième borne, due à l'humanité elle-même, à 100 ans déclarée par Stephen Hawking, qui avait initialement émis l'hypothèse de 1 000 ans ; c'est celle-ci qu'il convient de repousser via une coordination internationale implacable.

L'essai s'achève par un résumé des actions à entreprendre pour « éviter de mourir demain » : poursuite de la transition énergétique, développement de la fusion nucléaire, expérimentation de la géo-ingénierie et encadrement de toutes ces actions par une organisation internationale.

Cet essai est un ouvrage optimiste, où l'auteur nous fait partager sa foi en la science pour résoudre les problèmes de notre monde. Pour lui la théorie du développement est adaptée à la période de transition énergétique en attente des révolutions indispensables qui seront apportées par la science dans les domaines de l'énergie, de la géo-ingénierie et les biotechnologies. ■

NOTE DE LECTURE

Le réchauffement climatique de Robert Kandel dans la collection *Que sais-je ?*

par Bertrand de Montluc, membre du HCS 3AF et du comité de rédaction

Bertrand de Montluc a travaillé dix ans auprès de l'auteur Robert Kandel au service d'Aéronomie du CNRS, laboratoire sélectionné du CNES. Étaient actifs à cette époque et dans le même labo sur ces questions de physique de l'atmosphère : Gérard Mégie, devenu directeur général du CNRS, aujourd'hui décédé, Jean-Loup Bertaux, directeur de recherche CNRS reconverti depuis sa retraite à la prospective démographique, et Marie-Lise Chanin, directrice de recherche CNRS, depuis membre de l'Académie des technologies et membre de l'Académie des sciences, qui a relu et approuvé ce texte.

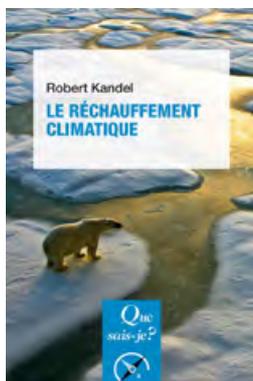
Depuis une quarantaine d'années, avec comme chacun le sait une forte montée en puissance ces dernières années, le « réchauffement global » fait la une de l'actualité non seulement scientifique mais politique.

Psychose, névrose ou légitime préoccupation, la question du climat revient sans arrêt dans les conver-

sations et les médias, sans que l'on sache vraiment de quoi il s'agit : augmentation des températures anormale, multiplication des désastres et des risques naturels, imminence d'un choc climatique majeur ?

Si la communauté scientifique de par le monde est désormais majoritairement d'accord sur la réalité du

NOTE DE LECTURE
**LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE DE ROBERT KANDEL
DANS LA COLLECTION QUE SAIS-JE ?**



phénomène et sa qualification, les élites ordinaires et une partie de la population, tentées par les sortilèges du scepticisme, sont indécises, cela est compréhensible tant le problème est complexe.

Il suffit pour s'en apercevoir de lire le travail du chercheur Robert Kandel sur ce sujet ¹, publié par la collection *Que sais-je ?* (5^e édition 2019) : *Le réchauffement climatique*. Il offre une présentation scientifique (chiffres et données) éclairante des différents facteurs, des incertitudes et des évolutions possibles, sans négliger la dimension politique et le contexte international.

Un tel sujet intéresse nécessairement la société savante 3AF. De nombreux instruments de mesure, spatiaux, en ballon, en avion, au sol, sont conçus, développés et mis en œuvre par des ingénieurs et techniciens de cette communauté.

Sans prétendre résumer l'argumentaire de Kandel, on peut reprendre les plus importantes de ses explications :

POSITION DU PROBLÈME

5% d'augmentation en valeur relative de l'enrichissement en dioxyde de carbone CO₂ atmosphérique de 2001 à 2018 (de 370 ppm à 405 ppm) ; telle est la donnée qui montre d'entrée de jeu l'ampleur et la rapidité de l'enrichissement de l'atmosphère en CO₂. Au total, l'augmentation en CO₂ de toute l'atmosphère au cours du XX^e siècle aura augmenté d'1/4 et de plus d'1/3 depuis le début de la révolution industrielle. La vapeur d'eau, les CFC qui détruisent l'ozone, le dioxyde de soufre et les autres GES (gaz à effet de serre), notamment le méthane, ont augmenté avec des effets directs et indirects sur le bilan radiatif de la Terre. Dans l'ensemble les variations du climat de la Terre dans l'histoire semblent n'avoir jamais dépassé certaines limites : la Terre n'a jamais été totalement couverte de glaces ; elle n'a jamais perdu toute son eau ; la luminosité du soleil aurait augmenté au cours des quatre milliards d'année (de 40% ?), tandis que le CO₂ diminuait entraînant une réduction de l'effet de serre qui a compensé l'augmentation de la luminosité solaire. Il a

dû exister une forme de stabilité. Cela restera-t-il vrai dans l'avenir ? Certains avancent que le renforcement anthropique de l'effet de serre pourrait conduire d'ici quelques milliards d'années à un véritable emballement (comme cela aurait été le cas pour Vénus). Que se passera-t-il plus près de nous sur Terre en 2 100 ?

PERSPECTIVE HISTORIQUE

Dans leur très grande majorité, les climatologues conviennent de la réalité du réchauffement depuis 1900. Le réchauffement assez rapide entre 1910 et 1945 est bien marqué dans la plus grande partie des continents. De 1946 à 1975, les températures diminuent dans l'hémisphère Nord (sauf Russie et Asie centrale) à cause d'un renforcement de l'effet « parasol » dû à la croissance industrielle « sale » compensant l'intensification de l'effet de serre - les températures de l'hémisphère sud continuant à monter. À partir de 1976, les températures augmentent presque partout (latitudes élevées et moyennes). Or cette tendance au réchauffement s'écarte de la variabilité naturelle. C'est seulement en tenant compte du renforcement anthropique de l'effet de serre que les modèles peuvent la simuler.

Concernant la surveillance des océans et des glaces, il a fallu attendre 1948 pour avoir des mesures en profondeur. Avec la fin de la guerre froide on a pu avoir accès aux mesures faites par les marines US et URSS dans l'Arctique. Depuis 1950, l'épaisseur moyenne de la glace polaire en été a diminué de 40% et son étendue de 10 à 15%. Depuis 1979 enfin, les mesures satellitaires (rayonnement micro-ondes) permettent de suivre l'étendue des glaces qui a diminué de 6% en moyenne entre 1979 et 2005.

LES RISQUES CLIMATIQUES AU XXI^e SIÈCLE

Il existe des grands cycles climatiques plurimillénaires, ils sont ponctués dans le temps par des variations beaucoup plus rapides comme celles que nous connaissons. Par nos activités industrielles et agricoles nous changeons l'air et les surfaces sur notre planète. Comme il paraît difficile, sauf catastrophe économique majeure, de réduire rapidement nos émissions de GES et comme ces émissions s'accumulent dans l'atmosphère, l'intensification de l'effet de serre va encore augmenter pendant au moins plusieurs décennies. Pour 2100, les

1. R. Kandel, diplômé de Harvard, est directeur de recherche honoraire du CNRS (Service d'aéronomie et Institut Pierre Simon Laplace).

NOTE DE LECTURE

LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE DE ROBERT KANDEL DANS LA COLLECTION *QUE SAIS-JE ?*

calculs laissent prévoir un réchauffement de plus de 4°C (alors que l'Accord de Paris a pris comme base 2°C).

Dans l'ensemble la vie elle-même n'a pas trop souffert de la situation déséquilibrée du réchauffement, de 5° en quelques millénaires, qui a mis fin à l'ère glaciaire. Mais un réchauffement de 5° en un seul siècle, c'est un autre ordre de problème et il n'est absolument pas certain que le système s'adaptera vers un nouvel équilibre.

Par ailleurs, un réchauffement global fort implique nécessairement une modification sensible du cycle de l'eau. Les satellites météo observent en effet une tendance à l'augmentation de l'humidité accompagnant le réchauffement qui affecte les propriétés physiques des nuages. Les continents se réchauffent plus vite que les océans, les latitudes polaires plus que les tropiques – ce qui entraîne une montée du niveau de la mer et une diminution importante des glaces de mer et des surfaces neigeuses sur les terres. La plupart des modèles donnent des précipitations en augmentation sur l'ensemble des terres émergées aux latitudes élevées (de plus de 20% sur certaines régions en hiver), sur certaines zones océaniques autour de l'équateur, avec une diminution sur les régions autour de la Méditerranée. Quoiqu'il en soit, il est certain que le réchauffement va dessiner une nouvelle carte des ressources en eau.

En réponse aux variations de la température et du bilan hydrique, mêmes ces changements rapides ne constituent qu'une étape dans une évolution globale plus lente, les conditions physiques de la vie sur terre vont changer. Nous pourrions en France et en Europe certainement adapter nos cultures nourricières. Mais dans d'autres régions il n'en ira pas ainsi (mauvais bilans hydriques, désertification, migrations humaines se heurtant aux frontières politiques et idéologiques). Dans certaines régions tempérées de l'Europe du nord, les changements climatiques prévus à 50 ans ne se distinguent pas vraiment des sécheresses passagères. En revanche, dans la moitié sud de l'Europe et autour de la Méditerranée l'assèchement dépassera la variabilité naturelle. Ce qui est certain aujourd'hui, à partir des observations faites depuis 1900, c'est que des changements sont très nets : par exemple, le risque de chaleur extrême l'été en Grande-Bretagne aurait été multiplié par cent ; pour la Chine, il faut s'inquiéter des risques d'inondations et de tempêtes. En d'autres termes, la carte des risques sur le globe va changer.

LES TRAITS DOMINANTS DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

Pour terminer concernant ces évaluations, on peut esquisser, toujours en suivant Kandel, quelques paramètres conjuguant nature des risques/confiance dans les évaluations, comme suit :

1. Réchauffement : il est quasiment certain qu'il fera plus chaud sur presque toutes les terres émergées, avec moins de journées très froides.
2. Ressources hydrologiques : il est probable que pour la plupart des terres des continents aux latitudes moyennes s'assècheront davantage en été (incendies) et le retrait des glaciers de montagne va continuer.
3. Précipitations : dans la plupart des régions, il est très probable que les pluies intenses continueront à augmenter.
4. Cyclones, ouragans, typhons : sur certaines régions tropicales il est très probable que les vents et les pics de grandes pluies seront plus élevés.
5. Niveau de la mer : pour le siècle à venir les projections évaluent la montée du niveau de la mer entre 10 et 90 cm selon les scénarios.

REMARQUES FINALES

Ce qui est le plus préoccupant pour l'avenir, même si certains pays s'engagent réellement vers une transition écologique, c'est que le facteur aggravant principal n'est pas en soi la croissance démographique mais le fait que la croissance de la richesse se fait sans changement radical du mode de production de cette richesse et sans améliorer de façon drastique l'efficacité de l'utilisation de l'énergie.

Afin d'éviter vraiment le danger, il faudrait avant 2050 diminuer les émissions mondiales de près de 60% par rapport au niveau de 2007. Le rapport bien connu de N. Stern (2006) montrait bien que le coût de la transition devrait rester en réalité supportable globalement (1% du PNB mondial) comparé aux coûts socio-économiques d'un changement climatique rapide.

En France, nous avons réduit les émissions de GES dans les secteurs de l'énergie, de l'industrie, de l'agriculture, les émissions continuant à augmenter dans les transports, l'habitat, le tertiaire. On peut espérer que dans nos vieux pays la jeune génération adoptera des modes de vie différents ; dans les pays émergents, cela est moins évident. Un nouveau modèle économique, reposant sur le principe de sobriété, est-il une chimère ? Cela supposerait de repenser l'aménagement du territoire, en intégrant le

NOTE DE LECTURE
**LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE DE ROBERT KANDEL
DANS LA COLLECTION QUE SAIS-JE ?**

principe de justice sociale (accès égal aux réseaux et aux services publics) pour être accepté, tout en limitant les dégâts de la montée des populismes anti mondialisation².

Au niveau global, il est certain qu'il sera difficile de faire accepter aux puissances dominantes une forme de renoncement à leur niveau de vie³. Mais comme le dit Robert Kandel « Le caractère irréversible et le détour-

nement potentiel de certains types de géo-ingénierie pour des visées de domination économique et militaire soulèvent beaucoup de questions »⁴.

Pour conclure, citons la belle phrase de Régis Debray : « On ne choisit pas la terre d'où l'on provient, pas plus que son père ou sa mère, mais on n'est pas sans influence sur ce qu'elle peut advenir entre nos mains »⁵. ■

NOTE DE LECTURE

Contre l'écologisme de Bruno Durieux aux Éditions de Fallos, 2019

par Pierre Bescond, membre du conseil d'administration 3AF et du comité de rédaction

« Contre l'écologisme » ! Comment résister à la lecture d'un livre qui porte un pareil titre ? Bref, condensé, provocateur, agressif, ce titre interpelle le Français bien sûr, qui adore être « contre », mais aussi l'individu qui comme moi-même finit par être ulcéré de ces appels incessants au respect de l'environnement qui sont la plupart du temps des règles de bon sens que tout gamin des années 50 apprenait journallement : « Ne gaspille pas ta nourriture, ne jette pas ton emballage de bonbon par terre, ne laisse pas couler l'eau... ». Écrit par Bruno Durieux de surcroît, quand on connaît le Monsieur, voilà un livre dont on se dit qu'on l'appréciera, ou pas, mais qu'il ne laissera pas indifférent et qu'on y apprendra certainement quelque-chose de toute façon. Le livre a d'ailleurs un sous-titre « Pour une croissance au service de l'environnement » qui rassure vite sur l'objectif de l'auteur : dénoncer les faux prophètes et proposer une démarche environnementale sensée.

Bruno Durieux est en effet un homme d'une grande richesse intellectuelle, d'une vaste culture, et prodigieusement actif. Polytechnicien, il a une formation scientifique - et économique, acquise à l'École supérieure de

la statistique et de l'administration économique (ENSAE) puis à l'INSEE en son début de carrière - et donc une approche logique et méthodique des problèmes. Artiste (il faut voir ses sculptures torturées mais puissantes de métaux enchevêtrés), il en a la perception intuitive qui souvent vaut mieux qu'une démonstration. Et enfin homme politique (il a été conseiller de Raymond Barre, ministre de François Mitterrand -Santé puis Commerce extérieur dans les années 1990-, député du Nord et maire de Grignan), il sait approcher les grandes questions avec les tactiques ou stratégies appropriées.

Conseiller du Commerce extérieur de la France, j'ai bien connu Bruno Durieux lorsqu'il était président du CNCCEF (Comité national des CCEF) de 1999 à 2014. J'ai toujours été frappé par sa capacité d'écoute, ainsi que par son aptitude à reformuler les questions de façon objective.

En revanche il sait prendre parti et c'est sans ambiguïté qu'il condamne l'écologisme dès le début de l'ouvrage, en l'assimilant à "un hyper-malthusianisme" et à "une idéologie de combat dressée contre l'économie de marché". Et il rappelle (je l'apprends)

2. IPCC, *Summary for Urban Policy makers*, December 2018.

3. Voir les livres récents du professeur J.E. Blamont et la présentation faite de son œuvre par l'éditrice R. Shirman dans la vidéo « L'action sœur du rêve » présentée à la SCAM le 20 février 2020, dont la Lettre a rendu compte.

4. Ouvrage cité, p 119.

5. R. Debray, *Le siècle vert*, Gallimard, 2020, p.55.



que l'inspirateur du Principe de précaution, Hans Jonas, "voyait dans le communisme le meilleur des régimes pour maîtriser le consumérisme de son humain prédateur et sauver la planète". Pour lui, c'est donc une religion mortifère de la société civile, un mouvement qui appelle au retour de régimes autoritaires, et surtout une

Cassandre dont aucune des prévisions néfastes ne s'est réalisée : en 2019 la pauvreté n'a jamais été aussi basse, l'air et l'eau plus propres, la nourriture plus saine et abondante et l'espérance de vie aussi haute.

Et de fustiger cette mouvance qui hélas réussit à conquérir les médias et les gouvernements en dépit de ses échecs criants, par exemple :

- malgré l'augmentation de la population mondiale, la faim dans le monde touchait trois fois moins de personnes en 2017 qu'en 1970,
- le refroidissement redouté des années 1970 s'est transformé en une crainte du réchauffement climatique que le « clergé écologiste » décrie avec la même hargne !
- les réserves des ressources identifiées sont encore et toujours sous-estimées,
- la dénonciation virulente du nucléaire est une aberration ; c'est une énergie décarbonée, et il est de plus en plus évident que l'éolien et le solaire ne peuvent que lui venir en complément si l'on veut réduire les gaz à effet de serre...

C'est d'ailleurs faire injure à l'Homme que de ne pas reconnaître sa capacité à s'adapter et à innover pour assurer le maintien de la croissance économique, véritable moteur de l'amélioration des conditions de vie de la population.

Après ce procès des méfaits de la mouvance écologiste, partie au fond relativement courte de l'ouvrage, l'essentiel du livre s'attache à prôner une véritable écologie. Il s'agit de l'étude scientifique rigoureuse des êtres vivants et de leurs interactions dans laquelle croissance, développement des technologies, libre entreprise, tout en respectant l'environnement, se mettant même à son service, seront les bases indispensables à une poursuite de l'amélioration des conditions d'existence des milliards d'habitants de notre planète : santé, durée de vie, éducation, alimentation, logement, soutiens sociaux. Car il n'est pas

contestable que c'est dans les pays riches que la situation environnementale est la plus satisfaisante tandis qu'elle est souvent dramatique dans les pays les moins avancés et que l'amélioration de l'environnement des pays émergents rime avec leur croissance économique.

Bruno Durieux ne cherche d'ailleurs pas à convaincre qu'il a raison mais il appuie ses dires sur une grande variété d'articles, de livres et de rapports de tous pays. Et il souhaite surtout que l'on observe les faits en toute objectivité et que devant leur complexité on accepte des débats vraiment scientifiques et sans arrière-pensées politiques pour juger des meilleures mesures à prendre. Malheureusement trop de responsables politiques, mais aussi des industriels, par facilité et aussi parfois par manque de courage, acceptent les affirmations simplistes et biaisées des écologistes, qui jouent sur la peur.

Comment accepter de condamner les OGM sans poursuivre des études approfondies, y compris sur le terrain, de la génétique et de toutes ses promesses ? Comment oser prétendre qu'il faut figer la biodiversité alors que l'évolution est là pour nous montrer qu'au contraire la nature procède d'une dynamique sans cesse active alternant vie et mort des espèces ? Notre auteur n'est d'ailleurs pas tendre avec les pays ou mouvements politiques qui s'appuient avec démagogie sur les écologistes pour arriver ou se maintenir au pouvoir.

Ce livre est donc un véritable manifeste, à la fois pour une réelle stratégie de défense de l'environnement et pour une prise en compte politique efficace et dynamique du sujet : la triple dimension technique, politique et artistique de Bruno Durieux le conduit à proposer quelques solutions et surtout un plan d'action qui se veut optimiste.

On notera d'ailleurs qu'en 2019, il a fait partie des 56 signataires français d'une pétition remise aux dirigeants de l'ONU et assurant qu'il n'existe pas d'urgence climatique. ■

ÉVÉNEMENTS 3AF

LES PROCHAINS ÉVÉNEMENTS

17-19 MARS

7th EDITION OF THE SPACE PROPULSION CONFERENCE

3AF
Association Aéronautique et Astronautique de France

SPACE PROPULSION 20+1

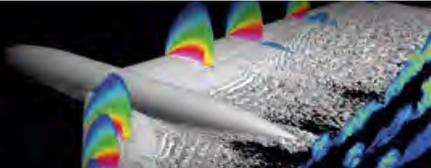
European Space Agency
Agence spatiale européenne

VIRTUAL CONFERENCE
17-18-19 MARCH 2021 - LIVE GET TIME ZONE

12-14 AVRIL

3AF
Association Aéronautique et Astronautique de France

55th 3AF International Conference
AERO2020+1
Poitiers, France - April 12-13-14, 2021



14-15 AVRIL

À DISTANCE

LES ENTRETIENS DE TOULOUSE
14 & 15 Avril 2021



ISAE SUPERA

5-6 MAI

15^{ème} Forum EUROPEEN
IES2020
PARIS, 5-6 MAI 2021

30 ans pour éclairer l'avenir

30 ANS 1990-2020

3AF
Association Aéronautique et Astronautique de France

Espace Chaptal, 23 Rue Chaptal - 75009 Paris

www.ies2020.com

4 JUIN

Ismaël Boulliau, sa vie, son œuvre
Mathématicien, astronome, météorologue

Colloque à Loudun
Vendredi 4 juin 2021
9h00-17h00



3AF
Association Aéronautique et Astronautique de France

ONERA LUMNI

25 JUIN

LE FUTUR DE L'AÉROSTATION ET DES DIRIGEABLES

Vendredi 25 juin 2021
au Centre d'arts et de culture de Meudon



3AF
Association Aéronautique et Astronautique de France

ONERA LUMNI

8 OCTOBRE

Antoine d'Abbadie
Savant, explorateur, écrivain
Sa vie, son œuvre

Colloque à Hendaye
Vendredi
8 octobre 2021
9h00-16h30



3AF
Association Aéronautique et Astronautique de France

ONERA LUMNI

7-9 DÉCEMBRE

3AF
Association Aéronautique et Astronautique de France

14th 3AF INTERNATIONAL CONFERENCE
INTEGRATED AIR AND MISSILE DEFENCE
DECEMBER 07-09, 2021 - NICE, FRANCE

IAMID 14



Association Aéronautique
et Astronautique de France