



Aéronautique & Astronautique
Les Conférences
du Groupe
3AF Île-de-France
2020-2021

À Paul Kuentzmann

Comptes-rendus – n°5

3AF – Groupe Île-de-France
Association Aéronautique et Astronautique de France

6 rue Galilée – 75016 Paris

Tél 01 56 64 12 30 - Fax 01 56 64 12 31

email : gestionmembres@aaaf.asso.fr

www.3af.fr

Association Aéronautique et Astronautique de France

6 rue Galilée 75016 Paris

Tél 01 56 64 12 30 - Fax 01 56 64 12 31

email : gestionmembres@aaaf.asso.fr

3AF – GROUPE ÎLE-DE-FRANCE

email : 3af.idf@gmail.com

Site Web : <http://www.3af.fr/groupe-regional/idf>

Président : Patrick GILLIÉRON

Vice-Président & Comité Jeunes : Gérard LARUELLE

Communication : Patrick GILLIÉRON & Cyrille CHAISY

Trésorier – Gestion des membres : Cyrille CHAISY

Préparation des conférences : Nicolas BÉREND, Cyrille CHAISY,
Patrick GILLIÉRON et Gérard LARUELLE

Rédaction des résumés* : Gilles JOUBERT, Claude ROCHE, Patrick GILLIÉRON,
Xavier HOTTIN, Pierre ALÉSI, Jacques RENNIER, Nicolas BÉREND, Jean HERMETZ,
Julie GAUVRIT-LEDOGAR, Stéphane QUERRY, Badr RMILI, Philippe PERRIER,
Patrick FARFAL, Philippe TIXIER, Claude LE TALLEC, Dominique SIMON.

Éditeur : Patrick GILLIÉRON

Relectures : Francis HIRSINGER

** Par ordre chronologique des dates des conférences*

Éditorial

Le Groupe 3AF Île-de-France a le plaisir de vous proposer son cinquième recueil des résumés des conférences. Ce recueil, comme les précédents, a pour objectif de laisser une trace des informations essentielles communiquées par des spécialistes pour des passionnés de l'aéronautique et de l'espace.

À l'exception de la conférence sur "l'aérodynamique des configurations particulières" qui s'est tenue en présentiel le 14 janvier 2020, toutes les conférences ont été proposées en visiophonie compte tenu des restrictions sanitaires imposées par la pandémie de la Covid-19. Cette formule a suscité un fort intérêt et a permis d'élargir le champ des auditeurs ; elle sera poursuivie sans que soient totalement supprimées les conférences en présentiel pour préserver le plaisir des rencontres et l'intérêt des échanges en direct.

L'essentiel des résumés a été rédigé par les conférenciers eux-mêmes et sur les treize conférences, huit ont traité d'aéronautique et trois du spatial ; les deux conférences restantes sont communes aux deux domaines. Toutes ont été proposées en partenariat avec le groupe Centre de 3AF et ce partenariat a été élargi en juin 2021 au groupement des ingénieurs et cadres supérieurs de l'aviation civile (GIACRE). Toutes les conférences aéronautiques sont proposées en lien avec les commissions techniques "Aérodynamique" et/ou "Aviation Légère et Machines Dérivées" (ALMD).

Depuis septembre 2021, un partenariat avec le Comité Régional Aéronautique d'Ile-de-France (CRAIF), comité qui regroupe près de 8000 pilotes, privés ou professionnels, a été initié pour proposer quatre visioconférences annuelles sur la thématique de l'Aviation Légère. Ces conférences ne font, pour le moment, pas l'objet de résumés.

Quant aux sujets des conférences, si vous possédez une compétence particulière, si vous connaissez des collègues ou anciens collègues dont la compétence, l'expertise et/ou l'expérience mériteraient d'être partagées, prenez contact avec le bureau du groupe 3AF Ile-de-France via l'adresse email 3af.idf@orange.fr.

Si vous avez enfin un peu de temps et que vous souhaitez participer bénévolement aux activités proposées par le bureau du groupe Ile-de-France telles l'organisation des conférences ou des "Matinales", la rédaction de résumés, l'élaboration des Gazettes... ; n'hésitez pas ! Contactez le bureau à l'adresse précédente.

Pour le bureau du groupe 3AF Île-de-France : Patrick Gilliéron

PS : les textes surlignés de couleur bleue sur la version numérique de ce document sont associés à des liens Web actifs, cliquez dessus pour activer le lien.



Sommaire

| | |
|---|-----------|
| Gilles Joubert - Aérodynamique des configurations particulières..... | 06 |
| Claude Roche - L'intelligence artificielle..... | 09 |
| Jean-Luc Charron - Vers l'aviation légère électrique..... | 14 |
| Xavier Hottin - Les carburants aviation..... | 18 |
| Jean Alési & Jacques Renvier - Le CFM56 ; une histoire humaine..... | 21 |
| Nicolas Bérend, Jean Hermetz & Julie Gauvrit-Legodar - ALTAIR lanceur aéroporté..... | 25 |
| Stéphane Querry & Badr Rmili - FROG lanceurs réutilisables..... | 29 |
| Bérengère Houdou - Explorer la surface de la Lune..... | 36 |
| Philippe Perrier - Les hydroptères, ces bateaux qui volent..... | 40 |
| Patrick Farfal - Contributions du FH aux accidents d'aéronefs..... | 45 |
| Philippe Tixier - DIRISOLAR, le dirigeable tous temps à énergie solaire..... | 51 |
| Claude Le Tallec - eVTOL et autres taxis aériens..... | 56 |
| Dominique Simon - Fédération RSA : l'aviation populaire toujours bien vivante..... | 60 |

Aérodynamique des Configurations Particulières

Par Gilles Joubert (*consultant indépendant, expert en Aérostatique et Aérodynamique & membre 3AF*)

Mardi 14 janvier 2020 de 18h30 à 20h00

Mairie du XVème arrondissement, 31 rue Pécelet – 75015 Paris (Métro Vaugirard)

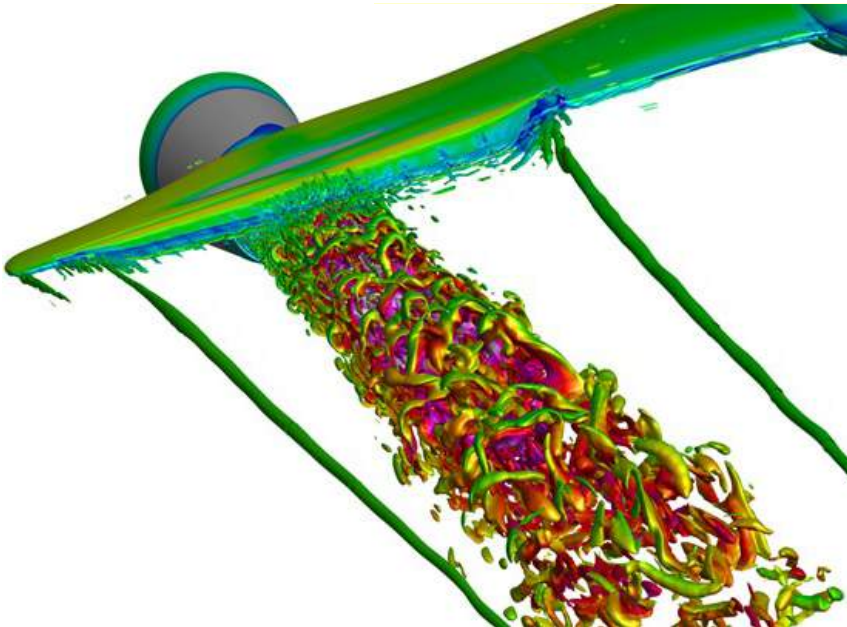


Fig. 1 - Étude de l'effet d'épaissement de la couche limite d'une nacelle motrice sur le bruit de jet.

- les effets de survitesse et de compressibilité (*flutter, buffeting*) ;
- les écoulements décrochés à fortes incidences ;
- le givrage ;
- l'écoulement des corps mal profilés, pour lesquels le contrôle d'écoulement est envisagé ...

Ces études ont la plupart du temps pour point commun la **modélisation aérodynamique ou multiphysique de phénomènes complexes** à simuler. En effet, l'écoulement d'un avion en croisière est aujourd'hui chose relativement bien maîtrisée. En revanche, lorsque l'aérodynamique est fortement instationnaire, présente de larges recirculations, ou bien devient fortement dépendante des conditions initiales ou limites, les modèles se retrouvent souvent poussés dans leurs retranchements et sont parfois en fort décalage avec les observations et mesures réalisées en soufflerie ou en vol d'essais. Une grande partie des travaux présentés lors de la conférence AERO2019 relevaient ainsi de la mise en place et de la validation expérimentale de modèles divers.

1. Interactions aile/nacelle - Plusieurs travaux portaient sur les installations motrices, et leurs interactions avec l'aile lors des phases de décollage ou d'atterrissage. Le travail de Fulvio Sartor et de ses collègues de l'ONERA [1] étudie les effets de l'épaissement de la couche limite externe à la nacelle sur le bruit de jet, figure 1. La simulation numérique utilise un calcul hybride RANS/LES de type ZDES, sur un maillage chimère. L'écoulement simulé, très précis, montre les structures tourbillonnaires issues du jet et son interaction avec l'aile. L'épaissement de la couche limite permet de réduire les fluctuations turbulentes et a priori le bruit associé. La suite de l'étude portera sur l'extrapolation du bruit généré.

L'étude multidisciplinaire et multi-instituts (Uni. Tel Aviv, TsaGi) de J. Ullah et ses collègues [2] porte sur l'installation d'une nacelle sous aile et de son interaction avec l'écoulement au-dessus de la nacelle. Ce

La conférence AERO2019 proposée par la Commission "Aérodynamique" de 3AF - dernière en date suite aux restrictions liées à la Covid-19 - portait sur les « configurations particulières » ou « off-design configurations ». Ce sujet particulier offrait une opportunité remarquable de vulgarisation scientifique, faite dans le cadre des conférences organisées régulièrement à la Mairie du 15ème arrondissement de Paris par la 3AF. Cette conférence s'est appuyée sur **des morceaux choisis de la conférence internationale AERO2019** qui s'est tenue du 25 au 27 mars 2019 au Conservatoire National des Arts et Métiers (Paris).

La conférence AERO2019, du fait de la thématique choisie cette année-là, donnait un aperçu très intéressant des actuelles problématiques traitées par la recherche scientifique aéronautique. Le thème des « configurations particulières » est en effet en rapport avec les écoulements aérodynamiques complexes, à la limite ou en dehors de l'enveloppe de vol des aéronefs. Une liste non exhaustive des sujets exposés inclut donc :

- les configurations de décollage et d'atterrissage avec hypersustentation et présence des nacelles motrices ;

Aérodynamique des Configurations Particulières

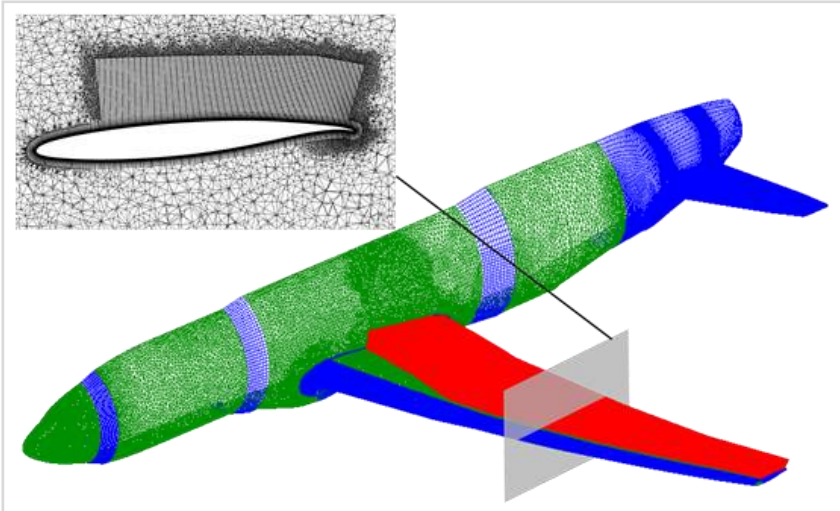
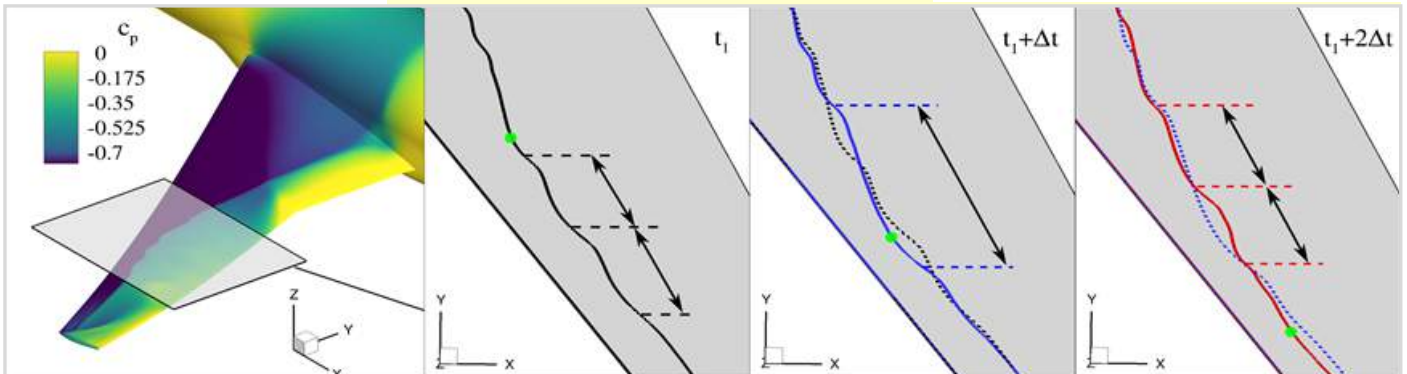


Fig. 2 - Étude de l'instabilité d'une onde de choc [3].

1. Buffet : oscillation de choc qui implique des fluctuations de pression et notamment de portance, limitant ainsi l'enveloppe de vol des avions civils.

Fig. 3 - Étude de l'instabilité d'une onde de choc [3].



travail, expérimental et numérique, permet de valider qualitativement les modèles numériques, ainsi que d'étudier l'impact de la présence proche des parois de la soufflerie sur les résultats.

2. Effets de survitesse et compressibilité - Des travaux sur les effets de survitesse et de buffet¹ ont également été présentés. L'instabilité de l'onde de choc présente à l'extrados d'un aéronef volant en régime transsonique peut en effet poser des problèmes sur la structure de l'aile et/ou sur l'aérodynamique des empennages situés en aval. Le travail très intéressant de M. C. Ehrle et ses collègues de l'Université de Stuttgart [3] consiste à étudier les variations transverses de quelques variables physiques (*de forme ondulatoire dans l'axe de l'envergure de l'aile*) et de tester différents protocoles pour modéliser les phénomènes, figures 2 et 3.

La méthode dite de Lattice-Boltzmann est développée afin que le modèle soit compatible avec le domaine transsonique par l'équipe de B. König et ses collègues de l'Université de Stuttgart [4]. Ce travail permet d'étendre le domaine de validité de cette méthode numérique très précise, avec des résultats convaincants. La validation est possible grâce à des essais en

soufflerie ou la PSP (*peinture sensible à la pression*) donne la position des ondes de choc sur l'extrados de l'aile.

3. Décrochage à forte incidence - Le décrochage aux fortes incidences est étudié sur un avion léger par une équipe mixte DLR-ONERA [5], où une maquette d'avion est mise en essais dans la soufflerie verticale de Lille, figures 4 et 5. En parallèle des simulations numériques sont effectuées. La validation est à la fois statique



Fig. 4 - Essai en soufflerie [5].

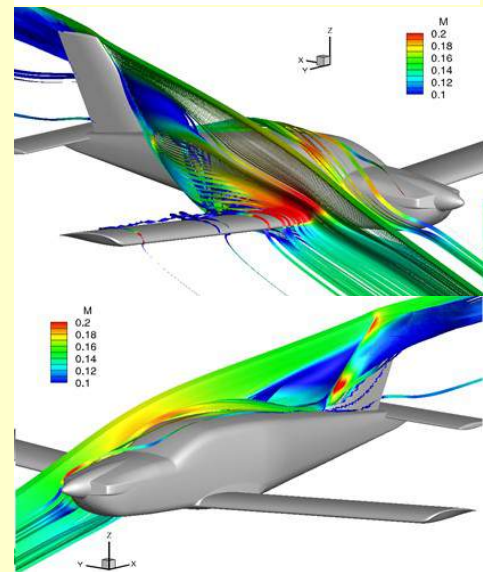
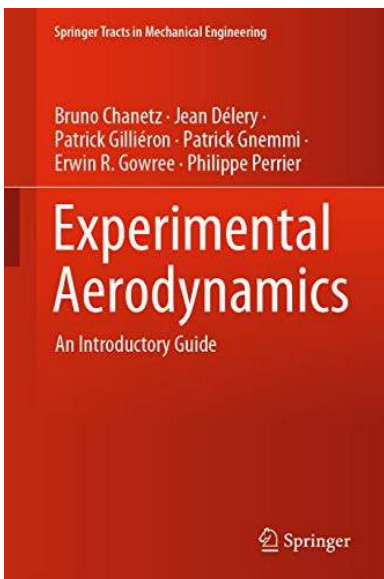


Fig. 5 - Étude numérique du comportement aérodynamique d'un avion léger générique [5].

Aérodynamique des Configurations Particulières



Ouvrage collectif réalisé par la commission "Aérodynamique" de 3AF.



Version anglaise actualisée parue en 2020 aux éditions Springer.

(comparaison des polaires) et dynamique (comparaison des efforts en fonction de taux de rotation différents) et les modélisations sont en bon accord avec les mesures.

4. Givrage - Le givrage est notamment abordé par l'équipe de S. Bourgault-Cote de Polytechnique Montréal [6]. Par accréation de glace sur le bord d'attaque d'une aile, le givrage en modifie considérablement les caractéristiques aérodynamiques. Il est donc très important d'étudier ce phénomène. Les modélisations de givrage sont complexes, et dans le cas présent la simulation se concentre sur l'accréation elle-même. L'impact aérodynamique du givre est évalué par calculs 2D, moins coûteux en ressources de calcul, mais sur plusieurs sections d'une aile. L'ensemble est regroupé par extrapolation, ce qui donne accès aux performances de l'aile complète. La validité de la modélisation est acquise pour certains paramètres et permet de prédire qualitativement l'impact sur la polaire de l'aile.

5. Écoulements de corps mal profilés - Une étude de corps peu profilé sur lesquels un contrôle d'écoulement tente de réduire les impacts négatifs (inertionarités, forte traînée...) est faite par l'équipe de M. Lorite-Diez [7]. Le corps étudié est de type Ahmed Body (jugé représentatif de véhicules terrestres), sur lequel un soufflage est réalisé à l'arrière. Cette étude expérimentale montre une forte réduction de effets instationnaires de l'écoulement aval, ainsi qu'une réduction de traînée pour un choix judicieux des paramètres de soufflage.

En conclusion, il est à noter que le séminaire organisé à la Marie du 15ème arrondissement de Paris a été bien reçu. Le public était très hétérogène, avec des chercheurs du domaine comme des passionnés sans connaissances spécifiques à l'aérodynamique. C'est pourquoi l'introduction de ce séminaire tentait d'éclairer pour le public concerné les notions de base de mécanique des fluides, d'aérodynamique, de méthodes expérimentales et de modélisation numérique, ceci afin de donner au public concerné quelques bases lui permettant de découvrir ensuite dans les meilleurs conditions les publications exposées en résumé. Les questions finales ont été pertinentes et montraient l'intérêt du public pour les problématiques et résultats exposés.

Il semble que cette expérience soit bénéfique à renouveler, tant pour la diffusion de connaissances à tous, l'illustration du travail de recherche pour les jeunes et moins jeunes que cela intéresse, ainsi que pour contribuer à la notoriété de la 3AF auprès du grand public et des professionnels concernés.

L'auteur de ces lignes se permet d'ajouter que l'expérience de vulgarisation a été extrêmement enrichissante et intéressante. L'auteur tient à remercier Patrick Gilliéron, Gérard Laruelle et Jean Déléry pour leur confiance et leurs contributions.

Gilles Joubert, 2020.

RÉFÉRENCES :

- [1] Fulvio Sartor, Fabien Gand and Thomas Le Garrec (ONERA) ; *Installed jet at take-off conditions: the effect of the external boundary layer thickness on aerodynamics and aeroacoustics.*
- [2] Junaid Ullah, Aleš Prachař , Miroslav Šmíd, Avraham Seifert, Vitaly Soudakov, Thorsten Lutz, Ewald Krämer ; *Reynolds Number and Wind Tunnel Wall Effects on the Flow Field Around a Generic UHBR Engine High-Lift Configuration.*
- [3] M. C. Ehrle A. Waldmann, T. Lutz and E. Krämer (Uni Stuttgart) ; *Simulation of Transonic Buffet at the Common Research Model with an Automated Zonal Detached Eddy Simulation Approach.*
- [4] Benedikt König, Deepali Singh, André Ribeiro and Ehab Fares (Uni Stuttgart) ; *Lattice-Boltzmann Simulations at the Corners of the Flight Envelope.*
- [5] Dennis Keller and Dominique Farcy (DLR) and Jean-François Le Roy (ONERA) ; *Numerical Investigation of the Aerodynamic Behavior of a Generic Light Aircraft.*
- [6] Simon Bourgault-Cote, Matthieu Parenteau and Eric Laurendeau (Polytechnique Montréal) ; *Quasi-3D multi-layer ice accretion model using a Vortex Lattice Method combined with 2.5D RANS solutions.*
- [7] M. Lorite-Diez (Université de Jaen, Espagne), J.I. Jiménez-González , L.Pastur (IMSIA-ENSTA ParisTech), C. Martínez-Bazán, O. Cadot (Université de Liverpool) ; *Experimental sensitivity analyses of steady and periodic modes to continuous blowing at the base of a 3D bluff body.*

CONFÉRENCE

L'intelligence artificielle : base, évolution, challenges et risques

Par Claude Roche (membre émérite de l'Association Aéronautique et Astronautique de France, vice-président de l'Académie de l'Air et de l'Espace)

En visiophonie le mardi 29 septembre 2020 de 18h30 à 20h00



© Claude Roche.

Le démarrage officiel a été la Conférence de Dartmouth (USA) en 1956, avec Marvin Minsky, John McCarthy et Claude Shannon, où le mot a été inventé, les ordinateurs commençant à se répandre. Ce n'est que vers 1965 que les études ont démarré en France avec Jacques Pitrat et Jean-Claude Simon.

Après une petite période où on a essayé d'imiter sans succès les neurones humains avec le Perceptron de Rosenblatt, deux écoles se font jour : la reconnaissance des formes (approche dite « connexionniste ») utilisant leurs descriptions et les probabilités, et l'IA dite maintenant « symbolique » utilisant la logique pure, supposant que les concepts de base sont décrits a priori, et qu'ils peuvent être manipulés de manière logique.

Au début, les recherches en apprentissage automatique étaient au centre des préoccupations des chercheurs, avec la théorie des jeux appliquée en particulier au jeu d'échecs, la démonstration de théorèmes, la recherche opérationnelle, le traitement des images, la reconnaissance des formes imagées et la reconnaissance de la parole.

En même temps les ordinateurs ont vu leurs performances augmenter considérablement, et l'ordinateur Deep Blue a gagné contre le champion du monde d'échecs G. Kasparov en 1997.

C'est alors que Yann Le Cun et ses amis

américains ont développé l'« apprentissage profond » qui consiste à faire croître des milliers de « neurones » constitués d'opérateurs de natures différentes dans le but de reconnaître des formes, présentées à l'ordinateur sous des milliers d'aspects. L'ordinateur crée alors un système qui répond au problème avec une certaine probabilité, mais sans qu'on sache comment il fonctionne : c'est plutôt de l'« intuition artificielle ». Mais c'est grâce au mariage entre l'IA symbolique et cet apprentissage profond efficace pour la reconnaissance des formes, que le programme ordinateur AlphaGo a gagné contre le champion du monde de go Lee Sedol en 2016.

Depuis, la mode de l'IA s'est installée. Les intellectuels, les industriels et les médias ne jurent plus que par l'IA, parlant de quelques décennies avant que la machine ne surpasse l'homme !

Qu'est-ce qu'une forme ou un concept ?

Les formes et les concepts existent quand il y a des faits qui sortent du pur alea, parce que des relations existent entre des formes ou concepts à la base de ces faits. Les formes et concepts constituent alors une immense structure de graphe en poupées russes, dont le niveau le plus bas est la sortie de capteurs optiques, acoustiques ou autres, et montrant une continuité totale pour les formes, les concepts, les idées, les théories... L'ensemble donne une représentation statique et dynamique du monde extérieur à l'homme, à l'être vivant ou à la machine.

La reconnaissance des formes et l'IA symbolique

- La reconnaissance des formes étudie la détection et la description de ces formes ou de ces concepts par la machine : c'est le lien avec l'extérieur ou la réalité, un peu comme la science physique qui essaye de formaliser la réalité.

L'IA symbolique étudie comment résoudre des problèmes basés sur ces formes ou ces concepts, un peu comme la science mathématique.

Leur rapprochement : prenons l'exemple

3AF Les Conférences du Groupe Ile-de-France
LES BUREAUX DE L'AÉRONAUTIQUE ET DE L'ASTRONAUTIQUE
RECHERCHE, CONCEPTION, FABRICATION, POLITIQUES ÉCONOMIQUES
Association Aéronautique et Astronautique de France
www.3af.fr

L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE : BASES, ÉVOLUTION, CHALLENGES ET RISQUES
Par Claude Roche, membre émérite de la 3AF
vice-président de l'Académie de l'Air et de l'Espace

Une conférence organisée par le Groupe Ile-de-France de la 3AF à la Mairie du XV^e arrondissement, 31 rue Piquet - 75015 Paris (Métro Vaugirard)

MARDI 29 SEPTEMBRE 2020 de 18h30 à 20h
Après un bref rappel historique, l'expert montrera ce qu'est réellement l'Intelligence Artificielle, de quoi ce n'est pas, ce qu'on peut faire avec aujourd'hui, ce qu'on ne peut pas faire ou avec des risques, les définitions scientifiques, réelle et non scientifique, les idées fausses qui persistent, les recherches actuelles, et le futur possible dans de nombreuses années et même de nombreuses décennies.

Enregistrement des participants sur le site 3AF
<https://www.3af.fr/annuaire/conferences-artificielle>

Entrée gratuite et ouverte à tous, membres et non membres 3AF
Voir le site 3AF à l'adresse : <https://www.3af.fr/annuaire/conferences>

CALENDRIER DES PROCHAINES CONFÉRENCES 3AF ILE-DE-FRANCE
Actes éditoriaux : 1 Par le PAF, 20 - 2020 Les Chiffres, mardi 17 novembre 2020, 18h30/20h
Des moments d'actualité : 100 ans de la persécution des Juifs, mardi 19 novembre 2020, 18h30/20h
3AF - Fédération Aéronautique et Astronautique de France, 8 rue Saclay, 91128 Paris - Groupe 3AF Ile-de-France
Page: www.3af.fr Page: www.3af.fr Page: www.3af.fr

L'intelligence artificielle

une machine) doit analyser ses coups possibles, puis, pour chacun, les coups possibles de l'adversaire et, pour chacun d'eux, ses réponses possibles, etc..., jusqu'au niveau permis par ses capacités. Au dernier niveau, le joueur évalue subjectivement l'intérêt pour lui de sa situation, et en remontant tous ses coups jusqu'au début il prendra la meilleure décision supposant ses évaluations bonnes. Il peut aussi dans son parcours logique supprimer des branches et pousser plus loin certaines autres. Là encore il y a place à de l'évaluation. Avant c'était l'IA symbolique qui traitait le problème sans reconnaissance de formes, avec des évaluations simples.

Pourtant ces deux types d'évaluations, « choisir la meilleure branche à analyser » et « décider qu'une situation est bonne » peuvent être et sont considérées maintenant comme de la reconnaissance de formes : les formes « bonne situation » ou « bonne branche » par rapport aux autres.

C'est grâce à l'utilisation dans ces évaluations de l'apprentissage profond, adapté à la reconnaissance des formes, que la fusion des deux écoles a commencé à se faire avec de manière significative la victoire de la machine AlphaGo contre le champion du monde de go.

Depuis, de nombreux systèmes sont étudiés en utilisant de la même façon et de manière intriquée l'ensemble de ces deux méthodologies, maintenant totalement intégrées et formant l'« Intelligence artificielle » elle-même, qui les regroupe : la voiture autonome, les robots d'aide-

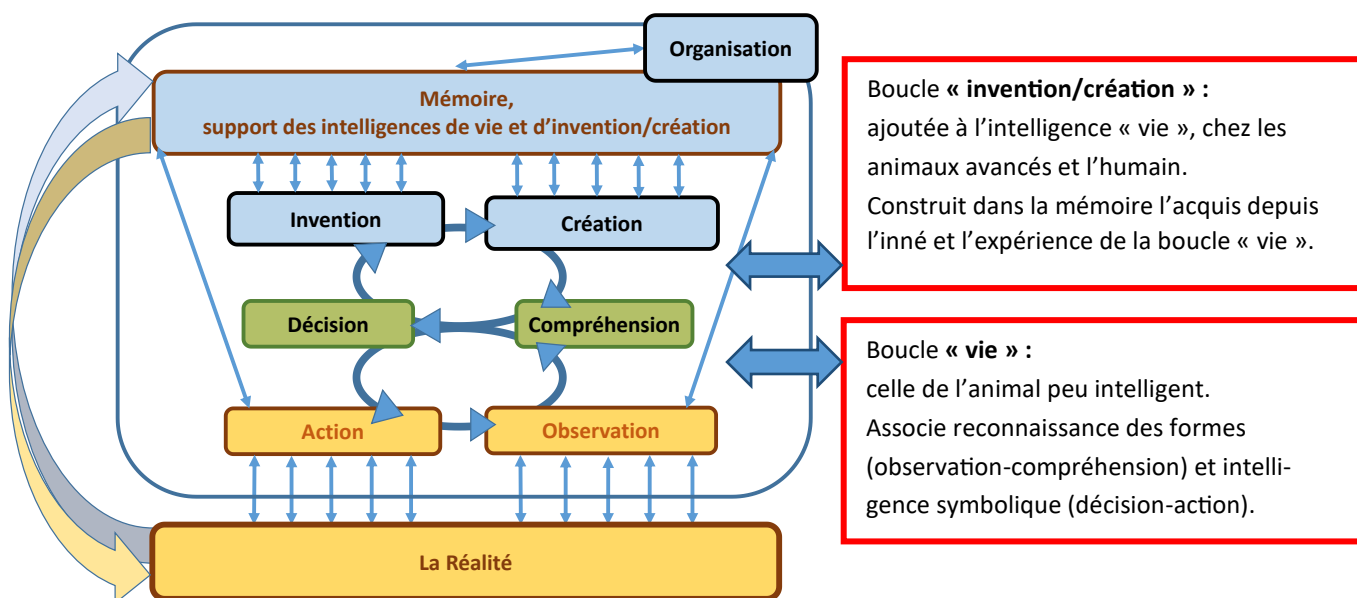
ménagère, les systèmes de sécurité,...

Les fonctions de l'intelligence humaine - Les fonctions de l'intelligence humaine peuvent être représentées comme sur la figure précédente. Les deux intelligences « vie » et « invention/création » ont pour rôle d'obtenir ensemble la meilleure bijection entre la réalité telle que l'appréhende l'humain et le contenu de sa mémoire, en lui permettant d'influencer les deux de manière cohérente. Le support de ces fonctions est la mémoire.

En comparaison, l'« intelligence artificielle » telle qu'étudiée actuellement, voitures autonomes, robots aide-ménagère et systèmes de sécurité, ne couvrira que partiellement l'intelligence de « vie », et non l'intelligence « invention/création », sauf en ce qui concerne partiellement l'intuition par l'apprentissage profond, l'« intuition artificielle ».

La définition rigoureuse de l'intelligence artificielle - Quand l'ordinateur doit prendre seul des décisions et actionner une boucle de vie et que :

1. la solution est définie entièrement par un modèle logique : **c'est de la programmation ;**
2. si par contre ce problème n'a pas de modèle rigoureux de solution ou que l'ordinateur n'a pas les capacités pour l'appliquer en temps voulu, et qu'on veut trouver quand même une solution acceptable pratiquement, **cela s'appelle de l'intelligence artificielle.**



L'intelligence artificielle



© Gerd Altmann - Pixabay.

Conclusion immédiate : alors que la programmation génère les erreurs du modèle et des bugs, l'IA montre toujours, en plus des bugs, une probabilité d'erreur due à cette absence de modèle rigoureux : GPS, reconnaissance vocale, de visages,...

Les exemples donnés au paragraphe précédent, comme les voitures autonomes, répondent à cette définition, de même la détection d'orages sur images radar météo...

- Par contre un système complexe de contrôle de la position, de la vitesse et de l'attitude d'un avion par rapport au sol (numérisé en mémoire), pourrait prévoir un crash immédiat. Il pourrait mettre l'avion en position de sécurité et le faire atterrir ensuite sur l'aéroport le plus proche. C'est complexe, mais ce n'est pas de l'IA : tous les modèles existent.
- De même les analyses statistiques élaborées de pannes moteurs d'avions ou celles analysant les votes dans les différents états américains pour « améliorer » pour un candidat ses chances d'être élu, ne sont pas non plus de l'IA : les statistiques et corrélations ne décident rien, ce sont des humains pilotant les calculs qui décident.

La création de l'IA, les logiques de développement - Afin de créer une intelligence artificielle telle que nous l'avons définie, les développeurs doivent, en se basant sur leur intuition et leur connaissance du problème, chercher de manière aléatoire ou réfléchi des fonctions à assembler de

manière multiple et évaluer ces assemblages sur un ensemble de « données d'apprentissage » représentatif du phénomène, et surtout le faire de très nombreuses fois, en suivant le principe « **essai et erreur** » (en anglais « try and error » ou « test and learn »), enfin, valider le résultat sur d'autres données représentatives et, si les performances conviennent, valider le système trouvé en opération.

C'est ainsi que pendant des décennies, et même sans ordinateur au début, les chercheurs travaillant sur la reconnaissance des empreintes digitales ont construit leur activité, ainsi que les chercheurs en reconnaissance de la parole, du langage, des visages...

Aujourd'hui, après ces décennies de recherche, on dispose de nombreuses expériences de développement dans des domaines extrêmement divers, de nombreuses idées de méthodes et d'outils, comme les big data et les clouds, les calculs de probabilités et les utilisations des statistiques, les parcours de graphes avec minimax, branch and bound, les traitements d'images et de sons, l'apprentissage profond, et tous les modèles avec traitements adaptés comme le 2D, le 3D, le 4D, la syntaxe et la sémantique pour la parole et la lecture... Ces méthodes et outils, et toutes ces applications amènent certains à parler d'intelligences artificielles au pluriel. Il ne s'agit pourtant que d'outils et de méthodes pour traiter d'un même type de problèmes : ceux dont on ne connaît pas de modèles rigoureux programmables directement, et qu'on résout approximativement en utilisant le principe de développement par « essai et erreur ».

- On retrouve ce principe dans l'intelligence humaine elle-même, et dans le principe de la science qui détecte des faits non expliqués, cherche de nouveaux schémas explicatifs, avec « essai et erreur », ... puis tests et validations qui peuvent prendre des décennies, comme pour chaque nouvelle théorie.
- Il est très proche aussi du principe « hasard et nécessité » pour la création des êtres vivants eux-mêmes, qu'on peut étendre à l'« Évolution ».
- On le retrouve enfin dans le fonctionnement de l'apprentissage profond lui-même, et on le retrouvera sans doute dans le futur de l'apprentissage automatique de l'IA symbolique.

Il faut noter qu'actuellement les dévelop-

L'intelligence artificielle

pements de l'IA sont encore principalement humains, l'apprentissage automatique n'intervenant que marginalement et en complément.

Ils ne portent d'ailleurs que sur les fonctions « boucle de vie », et absolument pas encore sur l'intelligence symbolique des boucles « invention/création ».

Les problèmes de développement de l'Intelligence Artificielle

1. Les risques basiques dûs à l'insuffisance de la qualité des développements :

- les buts du système construit ont été insuffisamment bien définis : les buts ne sont pas complets, ou sont contradictoires, comme dans 2001 l'Odyssée de l'espace le problème de la machine HAL qui « craque psychologiquement » ;
- les données d'apprentissage et/ou de test n'ont pas été représentatives des situations possibles, ou ont oublié des situations exceptionnelles importantes ;
- la construction de l'apprentissage profond n'a pas été menée jusqu'au bout ;
- l'oubli du fait que par définition les systèmes IA auront toujours un taux d'erreur non nul ;
- l'oubli du fait que les systèmes créés aujourd'hui par apprentissage automatique profond fonctionnent sans qu'on sache comment, et qu'ils ne peuvent être formellement certifiés.

L'IA, forte du futur lointain (de très nombreuses décennies), qui aura probablement des capacités à peu près comparables à celles de l'humain, aura plus ou moins les mêmes défauts dans les mêmes cinq cas, et pour les mêmes cinq raisons. L'humain de même !

2. Les risques sociétaux des systèmes développés :

- avant l'accident de voiture, l'IA décide de tuer les autres ou la famille ?
- Quid des robots autonomes militaires, alors que, d'après le code de la guerre, on n'a pas le droit de chercher à tuer, si on n'est pas sûr de sa cible ;
- on est obligé de demander du parfait au robot qu'on ne peut pas traduire en justice ; son propriétaire seulement peut l'être ou celui qui l'a mis en marche ;
- le mort aux USA par un véhicule autonome a donné plus de réactions négatives

que nos milliers de morts sur les routes ;

- il a fallu des décennies pour automatiser le métro, alors que ce n'est qu'un ascenseur horizontal en termes de technologie, donc sans aucun risque.

Tous les systèmes sensibles vont prendre beaucoup de temps et d'adaptations avant d'être utilisés, ce qui n'est pas le cas d'autres comme la reconnaissance de visage, la compréhension du langage, ...

3. Les interfaces homme-machine :

- les relations opérationnelles entre l'homme et la machine devront s'adapter : exemple des pilotes dont les compétences de pilotage diminuent depuis l'introduction du pilotage automatique, l'une des nombreuses raisons du crash de l'AF 447 Rio-Paris, même problématique pour les conducteurs de voitures autonomes ;
- les problèmes d'interfaces homme-machine sont déjà imparfaitement résolus : en introduisant un troisième larron, quid des interfaces multipliées par 3 ?
- dans une interface entre un humain et une machine, il faut une intelligence chez chacun de ce que pense l'autre, de ce qu'il peut penser, de ses réactions, comme dans les interfaces entre deux humains ou entre deux machines ; comment peut-on maintenant correctement traiter aujourd'hui



NAO est le premier robot humanoïde français. © SoftBank Robotics.

L'intelligence artificielle

l'interface humain-IA alors que le seul apprentissage fonctionnant correctement aujourd'hui construit des systèmes qui marchent à peu près, mais sans qu'on sache comment, et ce encore pendant longtemps.

De très nombreuses simulations et expériences prenant beaucoup de temps seront nécessaires, avec d'intenses et de multiples réflexions.

Les recherches à mener dans les nombreuses décennies à venir, avant l'IA forte - L'IA forte représentera un pas autrement plus grand que celui ayant donné notre IA actuelle :

- sa mémoire sera de nombreux ordres de grandeur supérieure à celle de l'IA actuelle ;
- elle apprendra à apprendre ;
- elle inventera et créera, avec la boucle « invention/création » que l'IA actuelle n'a pas.

1. Premier ensemble de recherches : l'apprentissage automatique de l'opérateur principal de l'IA symbolique qui ira « chercher ou découvrir une forme ou concept de tel type et prendre ses caractéristiques », à la fois dans la réalité observée et dans sa mémoire. Ces deux opérations correspondent en effet à la nature de la compréhension, cette bijection recherchée entre la réalité et sa représentation en mémoire.

2. Deuxième ensemble de recherches : apprendre à la machine à découvrir une nouvelle forme ou concept. D'abord dé-

tecter dans l'univers observé que quelque chose sort de l'ordinaire, et déclencher une recherche de sa définition par représentation symbolique, aidée par une intuition qu'elle aura appris auparavant à se construire. L'apprentissage profond est extrêmement loin d'arriver à tout cela.

3. Troisième ensemble de recherches : la récursivité des opérateurs. S'il existe un jour une méthode pour découvrir des formes et des concepts, cette méthode sera elle-même basée sur des concepts, qu'on peut découvrir avec la même méthode. Ces idées sont à rapprocher de celles de Jacques Pitrat, le pionnier français de l'IA, qui a construit le programme CAIA (Chercheur Artificiel en Intelligence Artificielle), mais qui, dans les années 70, disposait d'ordinateurs encore trop peu évolués et puissants pour tester encore ces idées.

C'est alors qu'on pourra imaginer des systèmes dont on pourra représenter formellement le fonctionnement, et qu'on pourra certifier, alors qu'aujourd'hui, même l'apprentissage profond crée des systèmes dont on ne peut comprendre le fonctionnement rigoureux.

J'appelle d'ailleurs souvent l'apprentissage profond, « apprentissage de l'intuition », plutôt qu'« apprentissage de l'intelligence », bien que Blaise Pascal les appelât toutes les deux intelligences ou plutôt « esprits » : l'esprit de géométrie et l'esprit de finesse.

Claude Roche, novembre 2020.

© AIRBUS/Ingénieur de l'Armement.



Vers l'Aviation Légère Électrique

Par Jean-Luc Charron,
président de la Fédération Française Aéronautique (FFA)

En visiophonie le mardi 17 novembre 2020 de 18h30 à 20h00



L'EASA certifie le Velis Electro,
© Pipistrel/Green Aerolease/
FFA, Info Pilote.

avion autour d'un moteur électrique (propulsion distribuée...) ou d'électrifier un avion certifié à moteur thermique bénéficiant de bonnes qualités aérodynamiques. La nécessité de réduire les coûts et les durées de développement conduit à privilégier cette dernière solution. Ce choix étant fait se pose alors la problématique du stockage de l'énergie et par suite de l'autonomie sachant que 30 kg de batteries sont approximativement nécessaires pour disposer de l'énergie contenue dans 1 kg d'essence. À cette problématique s'ajoutent la nécessité de connaître à tout moment la quantité restante d'énergie, d'éviter les surchauffes (batteries de puissance) pour prévenir les risques d'incendie et d'identifier une solution de recharge : recharges rapides (1 heure / heure de vol avec diminution de la durée de vie des batteries) ou changement de batteries. Cette dernière solution nécessite un contrôle minutieux des jeux de positionnement des packs de batteries et n'est aujourd'hui pas retenue pour des raisons de certification. S'ajoute enfin la nécessité de disposer d'un réseau de distribution électrique (380 Volts) qui puisse supporter l'électrification des automobiles et des avions.

L avion électrique : de quoi parle-t-on ? L'avion électrique de la FFA n'est pas un VTOL¹. Par ailleurs l'avion commercial moderne est déjà très électrique car l'énergie secondaire, celle utilisée pour les asservissements, la navigation, etc., est totalement électrique mais il n'existe pas d'avion de transport à propulsion électrique. Pour l'avion commercial, beaucoup d'annonces sont faites mais aucune perspective industrielle réaliste n'existe en dehors de démonstrateurs technologiques médiatisés comme Solar Impulse.

Concernant les perspectives d'avions électriques exploitables, il est nécessaire de distinguer les démonstrateurs, des prototypes, des préséries ou des séries. À ce stade, l'objectif de la FFA est de mettre à disposition des avions électriques exploitables, c'est-à-dire des avions pour lesquels peuvent être mis à disposition des éléments interchangeables issus d'une chaîne de production. L'exploitation nécessite alors d'identifier la cible et l'usage à partir des problématiques génériques liées à la propulsion électrique et à l'innovation.

Concernant la propulsion électrique - La batterie constituant aujourd'hui la seule source électrique embarquée exploitable, la solution pourrait être de concevoir un

Concernant l'innovation dans le milieu aéronautique - La difficulté majeure porte sur la certification pour laquelle la normalisation, basée essentiellement sur des motorisations thermiques, contraint fortement l'innovation. S'ajoutent ensuite des difficultés réglementaires telle la désignation des licences (SEP, SE pour Single Engine mais P pour piston) et des résistances culturelles aux changements qui nécessitent d'énormes efforts de pédagogie (et donc de disponibilité !) pour faire comprendre, repositionner les risques et faire évoluer les textes réglementaires.

Le projet "Avion Électrique" de la FFA - Le porteur du projet est la Fédération Française Aéronautique, premier groupement de pilotes privés au monde après les États-Unis qui regroupe près de 44000 licenciés répartis dans 600 aéroclubs (resp. 10000

3AF Les Conférences du Groupe Ile-de-France
LE BUREAU DE L'AVIATION ET DU PILOTE, ASSOCIATION, OBSERVATION, INFORMATION, ÉTUDES, ÉTUDES
www.3af.fr Association Aéronautique et Astronautique de France

AVIATION LÉGÈRE ÉLECTRIQUE
Par Jean-Luc CHARRON, président de la Fédération Française Aéronautique (FFA)

Une conférence en visiophonie organisée par le Groupe Ile-de-France de la 3AF en partenariat avec la Mairie du 15ème
MARDI 17 NOVEMBRE DE 18H30 à 20H

La Fédération Française Aéronautique (FFA), en coopération avec le DGAC et l'EASA, prépare et organise l'introduction de l'Avion électrique dans les séminaires pour la formation et l'entraînement au vol fixe. Une initiative prometteuse pour leur sécurité et leur plaisir de voler.

INSCRIPTION OBLIGATOIRE sur le site 3AF
<https://www.3af.fr/evenement/aviation-electrique-ffa>

Date à la date officielle de la Conférence. Les conférences du groupe 3AF de l'Ile-de-France sont organisées et financées par le Groupe Ile-de-France de la 3AF en partenariat avec la Mairie du 15ème.

Accès gratuits sur inscription, membres et non membres 3AF
Voir le site 3AF à l'adresse : <https://www.3af.fr/manifestation/conferences>

PROCHAINES CONFÉRENCES 3AF ILE-DE-FRANCE
Les prochains séminaires de formation et d'entraînement au vol fixe sont organisés par le Groupe Ile-de-France de la 3AF en partenariat avec la Mairie du 15ème.
Date et lieu de la conférence : MARDI 17 NOVEMBRE 2020, 18H30-20H
Lieu de la conférence : Mairie du 15ème, 150 rue de Valenciennes, 75015 Paris
Contact : info@3af.fr / [+33 1 47 33 10 00](tel:+33147331000)

1. VTOL : Vertical Take Off and Landing, aéronef à décollage et atterrissage verticaux.

Vers l'Aviation Légère Électrique

et 70 en Île-de-France). Cette fédération est inscrite au code de l'Aviation Civile et est l'interlocuteur principal de la DGAC pour toutes les questions réglementaires.

Le projet "Avion Électrique" est l'aspect visible d'une démarche stratégique destinée à répondre aux missions fondatrices de la FFA ainsi qu'à reconstruire la légitimité et l'acceptabilité de l'aviation légère. Répondre aux missions fondatrices de la FFA consiste à fédérer les aéroclubs, leur fournir des moyens et des outils, adapter et préparer le changement dans un contexte d'évolution sociologique (comportements, attentes) à fortes préoccupations environnementales (bruit, pollutions ...). Reconstruire la légitimité et l'acceptabilité consiste à rappeler, aux populations et riverains d'aérodromes, l'importance des contributions de l'aviation légère au développement des industries et des carrières (ouvriers, commerciaux, techniciens, ingénieurs...) aéronautique et spatiale. La mise en œuvre de ce projet s'appuie sur les concepts de FAB'LAB et d'AVIONLIB'. Des concepts qui consistent respectivement à créer un espace d'évaluation entre un constructeur et un représentant des aéroclubs et à mutualiser les ressources tant au niveau national qu'au niveau des régions.

Les objectifs - Cinq objectifs sont identifiés :

- préparer et sécuriser l'introduction de l'avion électrique dans les aéroclubs pour l'école de début et l'entraînement en tour de piste : une mission

ciblée ;

- participer à l'élaboration du cadre réglementaire autour de l'avion électrique : ne pas écrire la réglementation de l'électrique avant d'avoir évalué l'électrique ;
- évaluer la faisabilité et les conditions de l'exploitation réelle d'un avion électrique en conditions « aéroclub » : essayer n'est pas nécessairement adopter ;
- assumer et afficher pour le compte de nos clubs les prémices de la transition énergétique (être acteur, ne pas subir) ;
- développer un retour contributif d'expériences à la transition énergétique.

Le choix du vecteur - Le choix s'est initialement orienté vers AIRBUS et PIPISTREL, deux sociétés qui disposaient de chaînes de fabrication sachant que PIPISTREL commercialisait déjà un appareil léger désigné Alpha Trainer dont l'électrification pouvait s'effectuer rapidement. L'abandon du projet EFAN par AIRBUS, associé à la certification électrique de l'Alpha Trainer devenu Alpha Electro et au lancement de sa fabrication en série, a conduit la FFA à retenir la société PIPISTREL.

Le choix du lieu - Le lieu d'expérimentation s'est orienté vers l'aérodrome de Toussus-le-Noble, proche du pôle d'innovations de Paris-Saclay. Un aérodrome que les politiques locaux souhaitent voir devenir pôle d'innovations, qui bénéficie d'une volumétrie importante de

Tableau de bord
du Velis Electro, © FFA.



Vers l'Aviation Légère Électrique



Jean-Baptiste Djebbari, ministre délégué aux transports, © FFA.

2. EASA : European Aviation Safety Agency, Agence Européenne de la Sécurité Aérienne.

3. FOCA : Federal Office of Civil Aviation (Switzerland), Office Fédéral de l'Aviation Civile.

4. Depuis le 17 novembre 2020, les avions électriques de la FFA ont beaucoup volé ; à septembre 2021 la flotte des avions de la FFA est celle qui a accumulé le plus d'heures de vol.

mouvements aériens (110 000 mouvements/an), d'infrastructures adaptées (aéroclubs, sociétés et centres de formation) et sur lequel s'exerce une forte pression des riverains. Cette pression, ayant conduit à l'instauration de plages de silence pour les avions à moteur thermique, justifie à elle seule l'intérêt de montrer que sont prises des initiatives porteuses d'un futur aéronautique plus silencieux.

Les étapes du projet – L'idée d'un projet prend naissance en 2011-2013 lors du séminaire "Aéroclub de demain" pour être mise en place à l'issue de discussions avec la DGAC et la société PIPSTREL entre 2014 et 2016. Le projet est retenu en novembre 2016 par la DGAC et un groupe de travail est constitué sur le premier semestre 2017 pour établir un cadre réglementaire provisoire d'évaluation de l'électrique et définir un programme de travail à mutualiser avec les aéroclubs de Toussus-le-Noble lorsqu'Airbus abandonne le projet EFAN. Les premiers travaux conduisent à la signature d'une convention avec la DGAC en juin 2017, à la commande de 3 avions (1 avion Alpha Electro et 2 options sur le futur avion électrique certifié) puis à une réunion de cadrage le 16 octobre avec l'EASA², la DGAC, la FFA, la FOCA³ et PIPSTREL. Cette réunion aboutira à la mise en place du "Permit To Fly" EASA de l'Alpha Electro en mars 2018 et à la réception du premier avion à Haguenau (lieu de l'importateur PIPSTREL en France). S'ensuivent les premiers vols en avril sans qu'aucun problème sérieux n'apparaisse au terme des 100 premières heures de vol, puis la FFA reçoit à Toussus son

premier Alpha Electro (F-WLAB) en janvier 2019. Le projet aura alors pris une année de retard principalement liée aux réticences culturelles (changement...), adaptations des moyens (échauffement des batteries...) et certifications inhérentes à la seule innovation. Débutent ensuite la formation des instructeurs à partir de février 2019, les vols de démonstration et les premiers vols avec des pilotes brevetés LAPL ou PPL tandis que se poursuivent les travaux sur la maintenance et les licences.

S'ensuivent la présentation de l'avion par la DGAC au salon du Bourget en juin 2019, puis des présentations, en vol et en statique, au championnat du monde de voltige aérienne à Châteauroux en août 2019 (160 000 spectateurs) ; des présentations qui auront largement contribué à crédibiliser cette nouvelle aviation auprès du public et des différentes instances et partenaires de l'aviation légère.

Et maintenant ? Malgré les intérêts et les soutiens de 2019, la certification a dû être reportée au 10 juin 2020 suite aux problèmes rencontrés sur le Boeing 737Max et à la crise de la Covid 19. Les problèmes du 737Max ont nécessité l'affectation d'une partie des ressources de l'EASA pour une nouvelle certification de l'appareil et engendré de nouvelles investigations sur la partie logiciel de protection des batteries. La crise sanitaire a induit des retards sur la livraison à Toussus du premier Velis Electro, la version avion certifiée de l'Alpha Electro. Comparée à la version précédente, des modifications ont été effectuées sur les batteries, le chargeur, le tableau de bord, et l'appareil a été doté de freins aux pieds.

À la date de notre conférence, l'appareil a relativement peu volé⁴, chaque vol a donné totale satisfaction mais des réticences subsistent quant à son exploitation : variante moteur électrique traité aujourd'hui comme une qualification, règles de maintenance restrictives (visites 100 heures au lieu de 50 heures), assurance (15 à 18k€/an car pas de tables d'incidents ou d'accidents) et déplacement par la route nécessaire entre deux aéroports trop distants compte tenu de l'autonomie. S'ajoute une forte pression des riverains qui souhaiteraient que tous les avions puissent dorénavant être électriques, perspective inenvisageable actuellement compte-tenu des profils de missions de la

Vers l'Aviation Légère Électrique

flotte actuelle.

Et après ? Les objectifs immédiats consistent à faire voler l'avion, mettre en œuvre un plan de déploiement au sein des aéroclubs malgré une capacité de production limitée (1 seul producteur mondial : Pipistrel, qui est donc en position de monopole) et des difficultés de financement liées à la prévision d'une obsolescence rapide de la technologie qui nécessitent des aides à l'achat difficiles à mettre en œuvre dans un contexte de plans de relance. Ce plan de déploiement repose sur la mise à disposition d'une quinzaine d'appareils d'ici 2022 qui seraient loués avant achat par les aéroclubs et à laquelle seraient associées des aides financières, locales et/ou nationales, et des retours d'expériences agrégées au niveau de l'EASA.

Restent à étendre l'évaluation de l'avion certifié via un déploiement régional, à formaliser les différences de pilotage entre l'électrique et le thermique, à intégrer le FABLAB du Velis Electro en écoles professionnelles, à travailler sur le développement et l'intégration de l'environnement électrique (bornes de recharge, cycle de vie des batteries, électronique de gestion, couplage avec le solaire et l'aérien...) ainsi qu'à explorer les pistes alternatives telles la pile à combustible, l'hydrogène, la turbine génératrice ou l'hybridation⁵.

Conclusion – Dans sa définition actuelle, l'avion électrique alimenté par batteries vole et donne satisfaction à toutes les

personnes qui ont eu la chance d'effectuer au moins un vol à son bord. L'avion sur batteries répond à la mission qui lui a été assignée ; l'appareil est d'un pilotage facile, est parfait pour l'école de début et son empreinte sonore très limitée répond au souhait de silence des riverains d'aérodromes.

L'arrivée de l'avion électrique sur batteries suscite cependant des évolutions dans le pilotage, remet en cause les modes d'exploitation (enchaînement des vols), nécessite des infrastructures adaptées (alimentation et sécurité électriques) et oblige de revoir la réglementation (SEP, variante ou qualification). Des progrès restent à faire aux niveaux du contrôle de l'énergie embarquée (30% de l'énergie non utilisée), de la gestion de la charge des cellules constituant les batteries et sur l'autonomie pour l'enchaînement des vols.

L'avion électrique sur batteries du FABLAB reste distinct des projets VTOL et peut parfois peiner à trouver des financements compte-tenu de l'extraordinaire foisonnement de projets innovants qui peuvent drainer une part importante des budgets. Un travail reste à faire pour clarifier les missions, les horizons temporels et les sauts technologiques « raisonnablement réalistes ». Dans sa définition actuelle, l'avion électrique sur batteries est le premier élément d'un nouvel édifice électrique dont la complexité et les performances se développeront avec le temps, qui s'adresse à la formation initiale et peut dès à présent être mis à disposition des aéroclubs.

La difficulté des prochaines décennies sera de réussir la transition énergétique, sachant qu'aucune énergie alternative n'est aujourd'hui systématiquement compétitive par rapport aux énergies fossiles. Le concept de l'avion électrique sur batteries s'appuie sur "une démarche prudente et réservée pour un projet innovant, audacieux et fédérateur" (verbatim DGAC).

Septembre 2021.

Résumé établi par P. Gillieron en référence à l'exposé du 17/11/2020 de Jean-Luc Charron.

5. Pistes alternatives : en 2021, toutes ces pistes ont été développées. À titre d'exemple, l'École Nationale d'Aviation Civile loue à la FFA 2 Velis Electro pour évaluer l'intérêt de leur exploitation pour la formation de base des élèves « pilote de ligne » ; des énergéticiens et des fabricants de bornes travaillent sur le projet, etc.

Le général Philippe Lavigne, chef d'état major de l'armée de l'air, © FFA.



Les Carburants Aviation et leur intégration dans un monde moins carboné

Par **Xavier Hottin**, aviation générale,
manager Air BP France Petroleum

En visiophonie le mardi 15 décembre 2020 de 18h30 à 20h00



Fig. 1 - Gerhard Neumann (GE) et René Ravaud (Sneema).

Plus que jamais, il est grand temps de prendre soin de notre planète et de la qualité de l'air que nous respirons. À ce titre, les producteurs de carburant, quels qu'ils soient, se sont engagés sur un programme de neutralité carbone d'ici à 2050.

Le secteur aéronautique fait partie intégrante de ce programme pour lequel des investissements de plusieurs dizaines de millions de dollars ont été, et sont encore, réalisés dans la recherche et la production de carburants plus propres.

Le premier pas avait été franchi pour l'aviation légère avec l'introduction de l'UL91, fin 2015, pour les avions équipés de moteurs ROTAX et autres capables de

consommer des essences sans plomb.

En complément, des développements importants ont été entrepris pour réduire l'empreinte carbone des compagnies aériennes et d'affaires avec l'arrivée de BIO-JET ou SAF, pour Sustainable Aviation Fuel, dont les compositions peuvent être multiples. La biomasse de ce dernier, à elle seule, permet de réduire de 80% les émissions de CO₂ sur son cycle de vie.

Cependant, il est à noter que plusieurs technologies sont encore à l'étude pour apporter sur le marché des énergies propres, via des procédés comme le Power To Liquid, l'E-fuel, l'électricité, l'hydrogène...

Un peu d'histoire - Le premier moteur à essence pour l'aviation est celui de l'Antoinette Levavasseur en 1906, dont le plus célèbre de la marque est le Gnome OMEGA de 1909 qui était un moteur rotatif en étoile de 7 cylindres.

Ont suivi dans les années 20 les moteurs en V de Renault, puis les moteurs 12 cylindres en ligne d'Hispano-Suiza.

Comment les essences sont arrivées ? En octobre 1907, Shell découvre l'essence automobile qui servira également à l'aviation, composée de 40% d'essence et 60% de résidus de brut, d'eau, de poussières, d'huiles, de bactéries, de résidus organiques...



Fig. 2 - Antoinette Levavasseur, avion exposé au Musée de l'Air et de l'Espace.

Les Carburants Aviation ...



© René Rauschenberger de Pixabay

En 1921, les Américains Charles Franklin Kittering et Thomas Boyd découvrent le procédé de craquage permettant d'obtenir une Essence avec 100% d'octane. Il faudra attendre 1926 pour que des expériences démontrent que l'ajout de plomb tétraéthyle permet d'augmenter « indéfiniment » l'indice d'Octane.

L'ingénieur Français, Eugène Houdry, met au point le craquage catalytique en 1929 qui permettra de diminuer le coût d'obtention du carburant et d'augmenter l'indice d'octane de 100 à 130 et 145 grâce à la production d'essence synthétique. Enfin, en 1931, l'autorisation d'utiliser du plomb tétraéthyle pour les carburants automobiles et avions, à 87% d'octane et 1% de plomb, soit 0,72 g/l (contre 0,5 g/l au maximum aujourd'hui) sera accordée.

Après Guerre - L'invention de la distillation fractionnée par HR Ricardo permet d'extraire directement les essences pour les avions. Ces essences étaient traitées à la soude pour ôter le soufre et on réalisait une opération d'éthylation pour augmenter son pouvoir de lubrification.

À noter que toutes les essences confon-

dues représentaient entre 5 et 20% dans un baril de brut.

En 1958, les volumes d'essence avion vendus en France représentaient environ 139 000 m³ (100 000 tonnes), alors qu'en 2018, les volumes d'essence avion étaient de l'ordre de 23 200 m³ (16 700 tonnes). Cette diminution significative provient essentiellement du passage aux avions à turbines, dès les années 60, pour les avions de transport de passagers. Il est à noter qu'à l'échelon mondial, la consommation d'AVGAS en 2018 est d'environ 1 millions de tonnes par année, avec une contribution majeure des États-Unis, de la Nouvelle Zélande et de l'Australie.

Quelques chiffres - Que représentent les volumes de carburants aéronautiques comparés aux carburants dédiés à la mobilité ? Ces informations sont reportées dans le tableau fourni par le Comité Professionnel Du Pétrole (CPDP), voir ci-dessous.

Réponses environnementales - Depuis 2016, le marché français a vu l'arrivée d'une essence avion sans plomb appelée UL91. Ce produit sans plomb normalisé a été développé pour répondre aux

Consommations en France en m³ tous fournisseurs confondus

| Carburants | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2019 | 2020 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Route | 50 086 121 | 50 529 650 | 50 912 149 | 51 193 095 | 50 324 961 | 50 078 716 |
| Avions | 25 686 | 23 133 | 22 720 | 21 556 | 22 441 | 21 240 |
| Ratio | 0,051% | 0,046% | 0,045% | 0,042% | 0,045% | 0,042% |
| JETA1 | 7 876 933 | 8 148 322 | 8 027 667 | 8 225 106 | 8 484 686 | 8 762 704 |
| Ratio | 15,727% | 16,126% | 15,768% | 16,067% | 16,860% | 17,498% |

Les Carburants Aviation ...

besoins des utilisateurs des avions équipés de moteurs Rotax, Continental ou Lycoming... dont les constructeurs/motoristes approuvent l'utilisation.

Spécifications de fabrication UL91

Norme de défense 91-090/ASTM D7547

Couleur : incolore

Indice d'octane, MON Min 91.0

Indice d'octane recherche Min 96.0*

** norme de défense 91-090, pour passer à 98 dans le numéro 5.*

L'UL91 est un carburant approuvé par l'aviation avec un indice d'octane plus élevé que les carburants sans plomb (SP) traditionnels. Il ne contient ni alcool, ni éther que l'on retrouve dans les carburants terrestres et qui altèrent les pouvoirs énergétiques des essences.

Les spécifications et les filtrations requises pour l'UL91 sont visées par l'industrie de l'aviation : les constructeurs d'avions ainsi que les motoristes, les fournisseurs de carburant, l'European Aviation Safety Agency (EASA) et la « Federal Aviation Authority (FAA) ».

Cela garantit entre autres que ce carburant :

- est couvert par les spécifications internationales « Military Defence Standard » ainsi que par les normes ASTM ;
- possède un indice d'octane 91 MON pouvant être utilisé sur beaucoup d'avions ;
- a un intervalle de volatilité contenu ;
- est exempt d'éthanol/oxygénates ou

additifs non approuvés.

Cependant et concernant l'AVGAS qui est l'essence aviation majoritairement consommée aux US, des tests sont encore menés ce jour avec la FAA pour rendre ce carburant plus propre et tout aussi performant, comme par exemple en remplaçant le plomb par du manganèse (non validé à ce jour). Des informations complémentaires sont accessibles sur le site de la FAA : <https://www.faa.gov/about/initiatives/avgas/>

Jusqu'alors, les tests menés ces deux dernières années avec de l'AVGAS sans plomb ont démontré que le carburant ne présentait ni volatilité, ni oxydation, que son indice d'octane n'était pas altéré, que ses caractéristiques de lubrification et de détonation étaient bonnes.

Xavier Hottin, mars 2021.



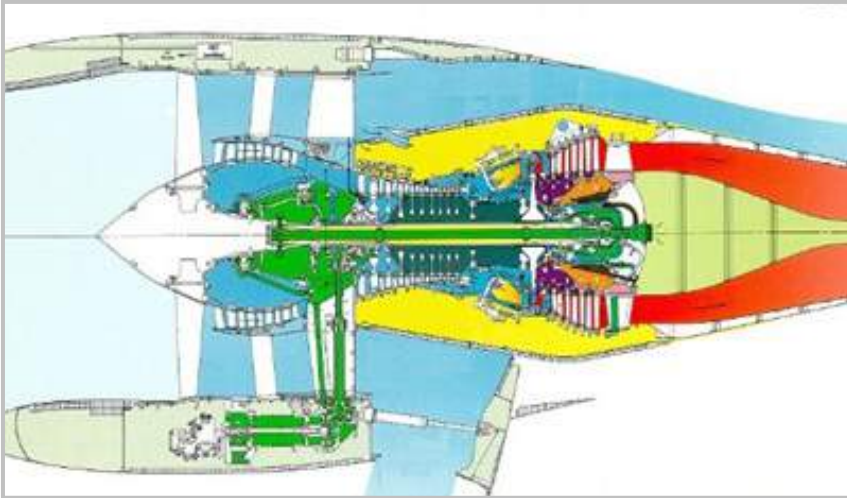
© Baptiste Maltaverne
de Pixabay



Le CFM56 : une histoire humaine

Par **Pierre Alési**, ex-directeur général des moteurs civils de SNECMA et **Jacques Renvier**, ex-directeur des programmes CFM et vice-président CFM

En visiophonie le mardi 26 janvier 2021 de 18h30 à 20h00



rôle décisif, aura lieu en juin 1971 à Barbizon. En septembre 1971, le moteur est baptisé CFM56 association de CF pour commercial fan (GE) et M56, le n° de l'avant-projet de Snecma.

Mais, en octobre 1972, le gouvernement américain refuse d'accorder la licence d'exportation. La situation sera débloquée en mai 1973 lors d'une rencontre entre les présidents Nixon et Pompidou.

La coopération peut se mettre en place, formalisée par la signature des accords du 24 janvier 1974 (figure 1).

La coopération s'appuie sur des concepts



Fig. 1 - Gerhard Neumann (GE) et René Ravaud (Snecma).

La genèse de la coopération - En janvier 1968, Snecma identifie un créneau disponible pour un moteur moderne à grand taux de dilution de 10 t de poussée capable de remplacer les moteurs JT8D et JT3D, déjà anciens et omniprésents sur le marché, en apportant :

- une réduction de consommation et d'émission de CO₂ de 20% ;
- une réduction du bruit de 15 à 20 EP NdB ;
- un concept moderne de maintenance « on condition ».

Snecma juge indispensable de coopérer avec un « grand » pour accéder à l'important marché américain. Le gouvernement soutient le projet et accordera une avance remboursable de 1250 MF (1971).

General Electric exprime un vif intérêt pour une coopération 50/50 et propose un core haute pression dérivé du moteur militaire F101.

En Mars 1971, Snecma recommande GE comme partenaire et la première rencontre des deux présidents René Ravaud et Gerhard Neumann, qui vont jouer un

simples :

- partage physique des tâches de développement, de production, de ventes et de support clients : chaque partenaire est responsable de la conception, la certification, la production et la documentation après vente de ses modules ;
- montage moteur partagé : deux lignes d'assemblage sont prévues ;
- vente et après-vente : le monde est divisé en deux zones mais la politique commerciale et de support clients est la même dans les deux zones.
- **partage des recettes** et non des coûts.

| | Entrée en service | Poussée (lbs) | Taux de dilution | Consommation spécifique | Taux de compression | Température de turbine | Diamètre fan | Masse kg |
|----------|-------------------|---------------|------------------|-------------------------|---------------------|------------------------|--------------|----------|
| JT8D | 1967 | 16000 | 1 | 0,81 | 17,5 | ref | 1,05 | 1500 |
| CFM 56-2 | 1982 | 24000 | 6 | 0,65 | 30,5 | +370° | 1,73 | 2100 |

Le CFM56 : une histoire humaine



Snecma est responsable des modules « basse pression » et de l'inverseur, GE a en charge les modules « haute pression ».

À la recherche d'un premier client : 1974-1979 - Un processus de certification réussi et les essais sur banc volant Caravelle, puis YC15 et Boeing 707, confirment que le moteur est prêt et tient ses performances. Une intense prospection commerciale est alors mise en œuvre auprès des aviateurs et compagnies aériennes.

Début 1979, toujours aucune commande. Si le Président Ravaud reste convaincu du succès proche, certains perdent espoir et « ferment leur cahier ».

Le 29 mars 1979, la première commande arrive - La plus grande compagnie aérienne américaine United Airlines annonce la commande de **30 avions DC8** « remotorisés » avec des **CFM56** construits par GE « and SNECMA of France ». Suivis par les commandes DC8 de Flying Tiger, Delta... 110 avions DC8 seront remotorisés.

En 1981, les commandes vont s'enchaîner :

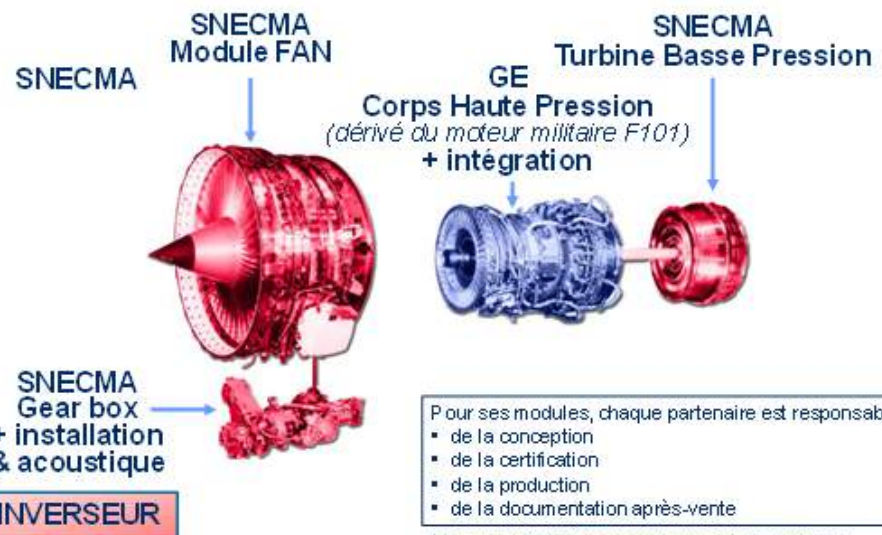
- applications militaires sur plateforme B707 ;
- en mars 1981, Boeing lance le programme B737 motorisé par le CFM56-3 en source unique, moteur dérivé du CFM56-2 avec un diamètre de fan réduit (1.52 m vs 1.73 m) prenant en compte les contraintes d'installation.

Lancement industriel - Dès l'annonce de la première commande fin mars 1979, le Président Ravaud décide de moderniser l'outil industriel de Snecma pour le rendre capable de produire 100 moteurs par mois, niveau atteint en 1999 et largement dépassé depuis : réhabilitation de l'usine de Gennevilliers, construction d'un atelier de montage et de bancs d'essais moteurs à Villaroche, responsabilités des chaînes cinématiques moteurs confiées à Hispano Suiza, industrialisation des inver-



Fig. 2 - CFM56-2, second moteur d'essais, 1974.

Partage des tâches 50/50 « work split »



Le CFM56 : une histoire humaine



gramme est lancé en mai 1985 et l'avion entrera en service en avril 1988. L'inverseur sera réalisé par Hispano.

Famille CFM - Des investissements techniques et de production continus permettront à CFM de répondre positivement aux demandes d'améliorations des performances et d'augmentation des cadences de production pour les familles des B737 et A320. Ainsi :

- depuis le lancement du programme : 33 500 CFM56 ont été livrés, 28 000 sont toujours en service (données au 31/12/20) ;
- plus d'1 milliard d'heures de vol ont été accumulées par la famille des moteurs CFM.

Le CFM56 est de loin le moteur le plus vendu de l'histoire de l'aéronautique : un avion équipé de moteurs CFM décolle toutes les 2 secondes.

LEAP®, un nouveau saut technologique - La famille LEAP, entrée en service en 2016, succède au CFM56 amenant une réduction de consommation de 15%, des émissions et du bruit (-15db). Le moteur s'écarte de l'architecture d'origine par un accroissement du taux de dilution (11vs 6) et du taux de compression (+30%) et par l'introduction de nouvelles technologies tels des matériaux composites.

Le LEAP® équipe l'A320 neo en compétition avec Pratt & Whitney, le 737 MAX et le Comac C919 (pour sa motorisation occi-

seurs de poussée confiée à l'usine du Havre et mise en place d'un réseau de sous-traitance. Cet outil permettra de réussir les montées en cadence spectaculaires : 300 en 1984, 900 en 1991, 1700 en 2016 et 2000 avec le LEAP en 2019.

Enfin, les 150 passagers européen l'AIRBUS A320 - Les premiers contacts entre CFM et Airbus sur un avion de 150 places datent de 1978. En janvier 1984, CFM propose à Airbus le CFM56-5 conservant l'architecture du CFM56-2 mais avec de nouveaux composants. Le moteur offre une poussée de 25000 lbs et 10% de réduction de consommation. Le pro-

Fig. 3 - De gauche à droite : Jean Deviese, directeur technique de SNECMA, Pierre Alesi ingénieur en chef CFM56, le président René Ravaud et le président de la division moteur de General Electric.



Le CFM56 : une histoire humaine



Fig. 4 - CFM56 – 5A, 1987.

dentale) sont en source unique. Plus de 4000 moteurs LEAP ont été livrés 3 ans après l'entrée en service.

Pourquoi ce succès ? CFM est devenu un extraordinaire succès technique et commercial avec plus de 32 500 moteurs CFM56 livrés et plus de 18 000 moteurs LEAP® commandés (commandes et intentions de commandes au 31/12/2020).

Quels facteurs peuvent l'expliquer ?
D'abord le produit :

- le CFM56 répond au besoin du marché avec le développement du trafic par des avions de capacité moyenne ;
- un processus d'investissement technologique continu équilibré entre les partenaires permettant de répondre aux demandes des avionneurs et des opérateurs ;
- des coûts de maintenance réduits associés à l'architecture, à la fiabilité et à la disponibilité du moteur ;
- la fiabilité en service du CFM56 définit

- le meilleur standard international ;
- ◇ un record de durée de vie sous l'aile : 50 000 h / 17600 cycles ;
- ◇ une durée de vie moyenne sous l'aile entre 15 000 à 20 000 cycles.

Ensuite la coopération avec ses règles simples et vertueuses :

- le partage physique des tâches 50/50 ;
- le partage des revenus suivant le coût relatif de production de chaque coopérant ;
- **un esprit CFM qui perdure au-delà des pionniers** : crédibilité, confiance, respect mutuelet enthousiasme.

L'effort technologique CFM se poursuit chez GE et Safran pour rendre le moteur plus efficace, réduire la consommation et les émissions, travailler l'intégration et démontrer tout le potentiel de ces nouvelles architectures en coopération avec les avionneurs par des démonstrations au sol et en vol.

Pierre Alési et Jacques Renvier,
mars 2021

Fig. 5 - SAFRAN, essais "Open Rotor" à Istres en 2017.



Largage dans le ciel du CSG : les essais en vol du projet ALTAIR de lancement aéroporté

Par Nicolas Bérend, Jean Hermetz et Julie Gauvrit-Ledogar (ONERA)

En visioconférence le mardi 9 février 2021 de 18h30 à 20h00



Fig. 1 - Système de lancement aéroporté ALTAIR.

Le paysage des systèmes orbitaux a beaucoup évolué ces dernières années, avec la multiplication des petits satellites dans des gammes de masse allant de 1 à 500 kg. Ainsi, le nombre de lancements de petits satellites de moins de 500 kg a été multiplié par 3 entre 2019 et 2022. Dans ce contexte, il existe un besoin croissant pour des systèmes de lancement dédiés à ces petites charges utiles, évitant les contraintes du lancement groupé (rideshare) et du lancement en tant que passager secondaire (piggy-back) sur un « gros » lanceur. Ainsi, il existe plus de 150 projets de petits lanceurs dans le monde, à des degrés de développement divers et certains ont déjà réussi leur premier vol orbital ces dernières années, tels les lanceurs Electron (RocketLab, USA/NZ), Ceres-1 (Galactic Energy, Chine) ou Launcher One (Virgin

Orbit, UK). En Europe, une douzaine de startups existent actuellement sur ce créneau. Parmi les concepts envisagés pour le lancement de petits satellites, le lancement aéroporté, qui consiste à amener et larguer en altitude le petit lanceur au moyen d'un porteur de type aéronautique, présente un certain nombre d'intérêts. Le largage en altitude, tout d'abord, permet un gain en performance sur la partie « fusée » du système, grâce à une réduction du frottement atmosphérique et une meilleure détente des gaz dans la tuyère. Ce concept, par ailleurs, présente des avantages sur le plan des opérations (qui se rapprochent de celles du monde aéronautique) et des capacités de mission (largage au-dessus de l'océan), moins en termes d'azimut de tir accessible et de contraintes de sécurité/sauvegarde qu'un lancement depuis un site terrestre.

L'ONERA étudie depuis 2005 une variante originale du concept de lancement aéroporté dans laquelle le véhicule porteur est un drone conçu spécifiquement pour la mission, ce qui permet notamment d'éviter les contraintes inhérentes à la réutilisation d'un porteur existant et les risques associés à la présence d'humains à bord. Ces travaux ont démarré initialement dans le cadre de projets réalisés en partenariat avec le CNES : les études Dedalus et L3AR, puis le projet Perseus, dans le cadre duquel a été développé le véhicule expérimental EOLE. Cet avion drone miniature, capable de larguer une fusée en vol, est codéveloppé par l'ONERA (maître d'œuvre), le CNES et la PME francilienne Aviation Design. Fin 2015, les travaux sur le concept de « lancement aéroporté par porteur automatique réutilisable » se sont poursuivis à l'échelle européenne et avec la participation d'industriels dans le cadre du projet H2020 ALTAIR (Air-Launch space Transportation using an Automated aircraft and an Innovative Rocket), coordonné par l'Onera et au sein d'un consortium incluant 7 autres partenaires européens (CNES, GTD, Bertin, ETHZ, Piaggio Aerospace, NAMMO et SpaceTec Partners).

Fig. 2 - Système de lancement aéroporté ALTAIR.



ALTAIR : largage dans le ciel du CSG

Le projet ALTAIR, financé par la Commission Européenne et d'une durée de 4 ans (2016-2019), avait pour objectif de démontrer la faisabilité technique et économique de ce concept. Il a conduit à une définition détaillée du système complet (porteur, lanceur et segment sol) mais aussi à un modèle économique et un plan de développement crédible. La mission nominale est le lancement d'une charge utile de 150 kg sur une orbite polaire à 600 km d'altitude (figure 1). Le lanceur, de 26 tonnes, utilise pour les deux étages principaux des moteurs à propulsion hybride H2O2/HTPB et de la propulsion liquide monoergol H2O2 pour l'étage supérieur. Le porteur automatique est d'une masse totale au décollage de 64 tonnes et d'envergure 55 m. En complément, ALTAIR incluait un volet expérimental utilisant le démonstrateur EOLE existant, afin de tester en conditions représentatives mais à échelle réduite des technologies prévues pour le futur système.

Le développement du démonstrateur EOLE est né du besoin de compléter les études de concept de type L3AR/Dedalus par des expérimentations en vol mais aussi de servir de banc d'essai volant dans le cadre du projet Perseus, projet CNES fédérant des travaux étudiés autour de la thématique des micro-lanceurs. La définition du démonstrateur a été réalisée en partenariat étroit entre le CNES, l'ONERA (maître d'œuvre du développement) et Aviation Design, PME française spécialisée dans la fabrication et la mise en œuvre de véhicules expérimentaux, et a fait l'objet d'un brevet commun. Le principal objectif est de larguer, en situation représentative, des fusées, propulsées ou non, pilotées ou non, de la gamme des fusées Ares alors au cœur des travaux Perseus, en utilisant des dispositifs de séparation et largage (DSL) variés, dans des conditions cinématiques et dynamiques également variées mais maîtrisées. Il s'agit également d'acquies des données susceptibles d'aider à mieux comprendre, analyser, modéliser et simuler cette phase critique du concept de lancement aéroporté.

Dans les grandes lignes, la configuration du démonstrateur est caractérisée par une voilure à grand allongement associée à une formule bi-fuselage pour placer la fusée dans le plan de symétrie au centre de gravité du composite, de façon à minimiser les effets inertiels de séparation des

moteurs placés à l'extrados de la voilure pour dégager au maximum la partie inférieure et un empennage en V pour limiter les risques de collision au largage et éloigner les surfaces du flux chaud des réacteurs.

Le développement s'est déroulé en 3 grandes étapes : conception préliminaire (2009-2010), conception détaillée et fabrication (2010-2012), enfin tests de qualification, au sol puis en vol (2012-2017). Enfin, EOLE a pu être exploité avec succès pour la campagne d'essais en vol du projet ALTAIR (2019).

Sur la base de conditions de largage de référence (largage à Mach 0.3, 4000 m et sous ressource à 3 g), la conception préliminaire a figé la définition du porteur :

- masse au décollage de 150 kg (pour une masse à vide de 107 kg), pouvant être accrue à 200 kg ;
- voilure de 6.70 m d'envergure dotée d'un profil laminaire ONERA, de surface 2.58 m² et d'un allongement de 17 ;
- deux turboréacteurs AMT Titan d'une poussée unitaire au sol de 40 daN ;
- une large zone d'emport centrale dégagée avec des points d'accrochage reprenant les efforts sur les longerons de voilure.

Ces choix lui confèrent une capacité d'emport allant jusqu'à 50 kg et un domaine de vol large : plafond opérationnel théorique supérieur à 6000 m, vitesse jusqu'à 100 m/s, endurance de l'ordre de 1 h de vol, facteur de charge maximal en manœuvre de 4 g.

Par ailleurs, le choix d'automatiser le vol pour toutes les phases en dehors du décollage et de l'atterrissage, qui restent manuels, et l'obligation de mener des vols hors vue du télépilote du fait des conditions de largage, ont abouti à la définition d'une architecture avionique robuste à la simple panne pour l'ensemble des systèmes et à la double panne pour ceux dévolus à la sécurité/sauvegarde du vol.

La figure 3 illustre le panel des travaux ONERA menés lors de la phase de conception détaillée et de fabrication, à laquelle ont été associés un grand nombre d'étudiants via le projet Perseus du CNES.

De son côté, Aviation Design s'est chargé de la conception détaillée de la cellule (entièrement en matériaux composites),



ALTAIR : largage dans le ciel du CSG

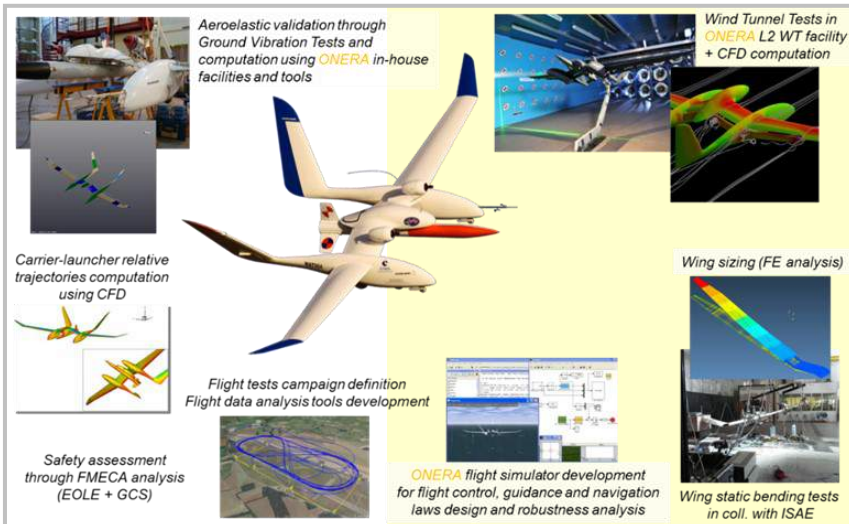


Fig. 3 - Les principales activités de développement ONERA sur le démonstrateur EOLE.

de l'avionique et de la station sol (en partenariat avec la PME luxembourgeoise LM Design) en se fondant sur son expérience issue de ses travaux passés, puis de la fabrication (2 cellules pour la disponibilité de rechanges) et de l'intégration de l'ensemble.

La mise au point d'EOLE est passée par un processus progressif d'exploration du domaine de vol puis de qualification, qui s'est étalé, à la fois pour des raisons programmatiques et techniques, de 2013 à 2019. Ce processus a démarré en 2013 avec des vols pilotés manuellement et en espace restreint à l'aérodrome de Saint-Yan (Saône-et-Loire), et il s'est achevé en 2019 avec des vols en vue puis hors vue au Centre Spatial Guyanais, permettant de valider l'ensemble de la chaîne d'équipements nécessaires à la campagne d'essais du projet ALTAIR, également réalisés en 2019.

Cette campagne d'essais fait intervenir 4 des partenaires du consortium ALTAIR : ONERA, CNES, GTD (Espagne) et Piaggio Aerospace (Italie), avec la participation

des PME Aviation Design (France) et LM Design (Luxembourg) et de l'Université de Rennes 1 (France). Elle est centrée sur deux domaines critiques pour le concept ALTAIR : l'avionique lanceur et la phase de séparation/largage, et son apport majeur réside dans la validation de la définition de ces deux éléments dans les conditions réelles du vol et avec la mise en œuvre d'équipements (hardware in the loop).

Pour le système embarqué du lanceur, l'objectif des essais consiste à valider les stratégies et algorithmes d'initialisation des instruments de navigation avant la séparation, valider les performances du système de navigation et enfin valider les procédures et algorithmes pour la gestion automatique de la sauvegarde (sécurité du vol du lanceur vis-à-vis des biens et des personnes). Pour la phase de séparation, l'objectif des essais consiste à valider le principe physique du système de séparation et valider la séquence complète de la manœuvre de séparation.

Pour ces essais, le démonstrateur EOLE emporte une maquette à échelle réduite (échelle 1/13) du lanceur ALTAIR (figure 4), laquelle est équipée d'un système embarqué représentatif de celui défini pour le lanceur ALTAIR échelle grandeur. La maquette de lanceur est accrochée sous EOLE via un système de séparation également représentatif de celui défini pour le porteur ALTAIR échelle grandeur. Enfin, les lois de navigation, guidage et pilotage permettant de reproduire une manœuvre de séparation représentative de celle définie pour le système ALTAIR sont implémentées dans l'autopilote du démonstrateur EOLE.

Le programme de vol des essais ALTAIR est divisé en deux grandes phases,



Fig. 4 - Démonstrateur EOLE équipé de la maquette de lanceur ALTAIR.

ALTAIR : largage dans le ciel du CSG

ou campagnes. Une première phase (réalisée à Saint-Yan) concerne la réalisation de vols à basses vitesses et altitude, dans des conditions en vue du télépilote. Une seconde campagne porte sur la réalisation de vols à plus hautes vitesses et altitude, dans des conditions hors-vue du télépilote, et allant jusqu'au largage de la maquette de lanceur. Cette campagne s'est tenue au Centre Spatial Guyanais de Kourou du 26 août au 7 septembre 2019.

La première semaine de la campagne a été entièrement dédiée à la préparation du système expérimental (EOLE équipé de la maquette de lanceur, station sol EOLE) des moyens mis en œuvre par le CSG pour assurer la réception des données de télémétrie (antenne de réception et retransmission des informations vers la station-sol EOLE) et la gestion de la sécurité des opérations (console sauvegarde suivant l'évolution du système expérimental dans le domaine autorisé).

Durant la seconde semaine, 3 vols ont été réalisés. Le premier vol s'est déroulé entièrement en vue du télépilote. Ensuite, le second vol a ouvert le domaine de vol du système expérimental dans des conditions de vol hors-vue du télépilote : altitude maximale de 1000 m et distance maximale de l'ordre de 15 km. A la fin de ce vol, un test de la manœuvre de séparation a été engagé (système de séparation désarmé). Enfin, le troisième et dernier vol a réalisé une manœuvre d'initialisation (Thach Weave comportant 3 répétitions) suivie de la manœuvre de séparation, avec activation du système de séparation.

La séparation relative entre le démonstrateur EOLE et la maquette de lanceur s'est déroulée de façon nominale (figure 5).

Les données collectées durant les campagnes à Saint-Yan et au Centre Spatial Guyanais ont été analysées et ont contribué à consolider la définition du système ALTAIR échelle grandeur.

Outre l'intérêt pour le projet ALTAIR et les études sur le lancement aéroporté, la campagne d'essai finale a constitué plus généralement une « première » pour le Centre Spatial Guyanais. C'était en effet la première fois qu'un véhicule automatique revenant au site de lancement y était opéré, dans le strict respect des procédures de sécurité et sauvegarde du site, comme pour n'importe quel lancement d'Ariane, Vega ou Soyouz.

**Nicolas Bérend, Jean Hermetz
et Julie Gauvrit-Ledogar,
février 2022.**

Fig. 5 - Vol final au CSG avec largage de la maquette de lanceur (7 Septembre 2019).



FROG : démonstrateur miniature pour la réutilisation des lanceurs

Par Stéphane Query, membre 3AF et société Polyvionics et Badr Rmili, CNES

En visiophonie le mardi 16 mars 2021 de 18h30 à 20h00

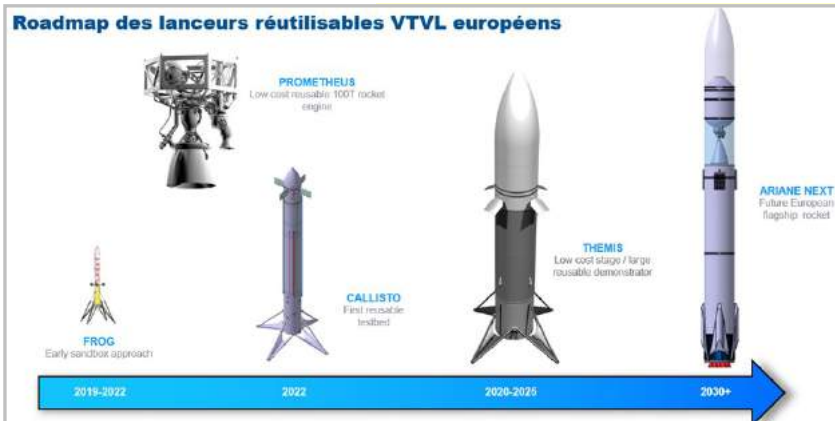


Fig. 1 - Feuille de route des lanceurs réutilisables européens.

Le CNES a initié, en collaboration avec ArianeWorks, le développement de différents démonstrateurs à petite échelle de concepts VTOL (Vertical Take-off, Vertical Landing, décollage vertical, atterrissage vertical) appelés FROG, et destinés à participer à la recherche dans le domaine des étages réutilisables de lanceur :

- FROG-E propulsé par une Turbine électrique ;
- FROG-T propulsé par un Turboréacteur ;
- FROG-H propulsé par un Moteur fusée à Peroxyde d'Hydrogène.

Les principaux objectifs de ces démonstrateurs sont les suivants :

- disposer d'une plateforme d'expérimentation à faible coût autour de la chaîne de contrôle de vol et de pilotage de poussée ;
- constituer un support pour tester des algorithmes du CNES, d'ArianeWorks ou d'étudiants pour les lanceurs réutilisables ;
- permettre de multiplier les vols à rythme rapide avec peu de revalidation et à faible coût ;
- avoir la capacité d'emport d'une petite charge utile expérimentale ;
- être évolutif en s'appuyant sur des building blocks et des composants COTS éprouvés issus des communautés Open Source.

Ces démonstrateurs FROG s'inscrivent par

ailleurs dans une roadmap de démonstrateurs et lanceurs réutilisables VTOL européens.

Le développement du démonstrateur FROG-T est basé sur une équipe pluridisciplinaire de bénévoles, d'étudiants, d'ingénieurs et d'enseignants/chercheurs issus en particulier :

- du CNES qui réalise la gestion de projet, la co-maîtrise d'œuvre, l'expertise système et technique ;
- de Planète Sciences qui est chargée de la co-maîtrise d'œuvre, des études systèmes, du design, de la réalisation de l'avionique, de la propulsion, des structures et des moyens sol ; viennent s'ajouter à ces tâches, l'intégration et les campagnes d'essais ;
- de Polyvionics, qui effectue les études systèmes, et particulièrement le design et la réalisation du GNC (Guidage, Navigation et Pilotage) et son implémentation dans le programme de vol, les simulations SITL/HITL (Software-In-The-Loop et Hardware-In-The-Loop), et un support technique aux campagnes d'essais (notamment dans le cadre de l'exploitation des données) ;
- de l'IUT de Cachan (Innovlab) et Senior Calorstat qui participent au design et à la réalisation de la structure du véhicule ;
- de Drones-Center et Sonatronic qui apportent leur expertise drone, et participent également à la réalisation de l'avionique et aux opérations à la BA 217.

Plateformes FROG-T et FROG-H - L'architecture mécanique de FROG-T est constituée d'un nombre important d'éléments, principalement : des longerons et viroles structurelles, des renforts par peau structurelle en aluminium (partie basse), une peau fine en composite (partie haute), des pieds carbonés et des vérins oléopneumatiques.

Sa propulsion est réalisée par un turboréacteur kérosène de 400 N, son contrôle d'attitude s'effectue par l'inter-

FROG : démonstrateur miniature

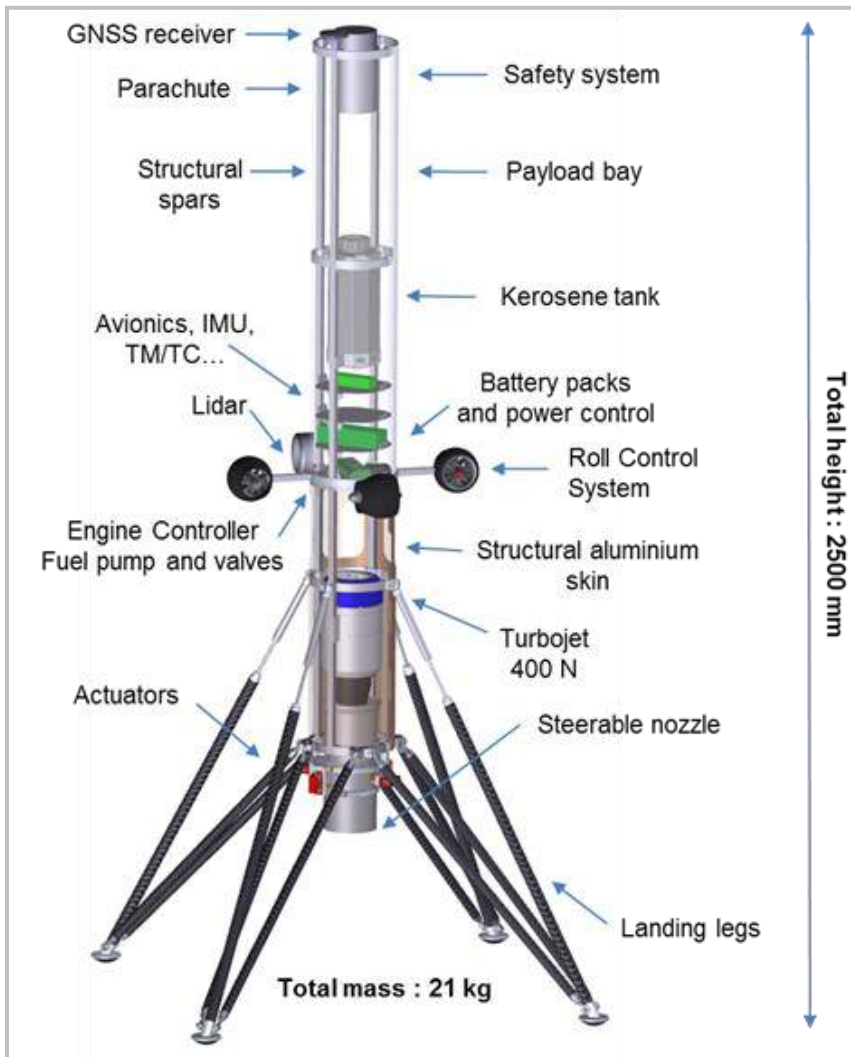


Fig. 2 - Design de FROG-T.

médiaire de la déflexion des gaz par une « tuyère » orientable par cardan pour les axes de tangage/lacet ainsi que grâce à 4 turbines électriques en opposition (4 x 13 N) pour le roulis.

La plate-forme dispose également d'un ordinateur de bord (OBC) open source

biprocasseur (ARM cortex M4 et M3), de contrôleurs moteurs pour le turboréacteur, les turbines du contrôle en roulis (RCS), des vannes et servo, et de 3 liaisons radios indépendantes pour TM/TC et SVG et 3 systèmes de terminaison (sauvegarde vol).

FROG-H lève les limitations/défauts de FROG-T (de par la propulsion Turboréacteur) et permet une meilleure représentativité. À ce titre, et dans le cadre du développement de FROG-H, des nouveaux partenaires ont rejoint le projet : Ariane-Works, l'ESA et l'Institut de l'Aviation de Varsovie (L-IOA).

Des bases restent communes avec FROG-T : le GNC, l'avionique, la station sol, les structures et pieds (principe), la sauvegarde du vol, etc.

Cette plate-forme est équipée d'un système propulsif H2O2 catalysé et non pyrotechnique (bicompatible 87,5 % et 98 %) d'une poussée variable de 150 à 1600 N, pour réaliser des missions types de 40 secondes de vol, à des vitesses supérieures à 20 m/s, et pour effectuer des atterrissages de précision, du « hard landing » ou même du « suicide burn ». Ses réutilisation et simplicité de mise en œuvre permettront jusqu'à 5 vols/jour.

GNC - Pour permettre à une plate-forme de suivre sa mission de manière autonome, on utilise des algorithmes mathématiques, issus de l'automatique, appelés dans le jargon GNC, à savoir Guidage, Navigation et Pilotage, qui permettent donc à un lanceur de suivre une trajectoire afin de mettre en orbite une charge utile (satellite, sonde, vaisseau ha-

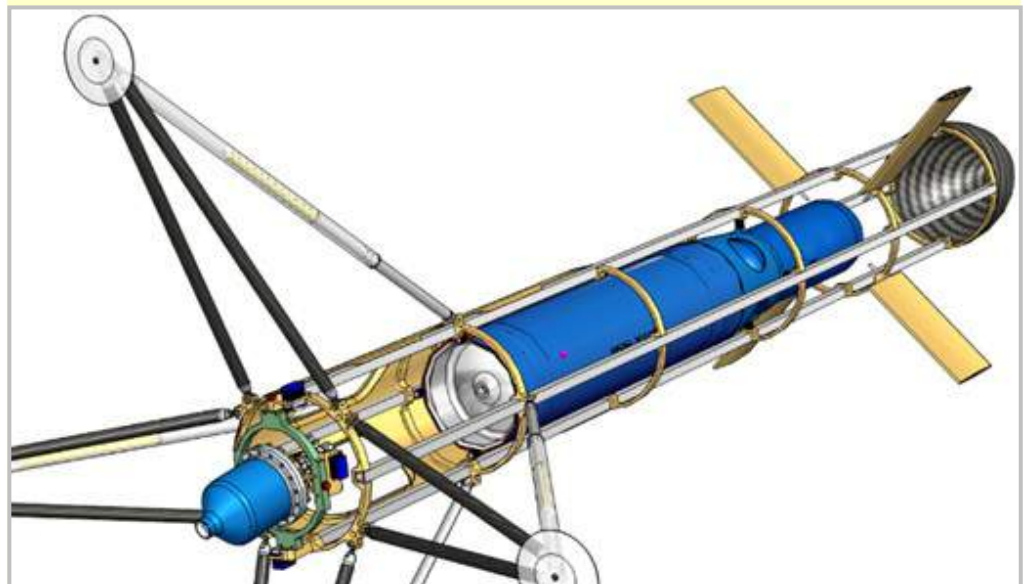


Fig. 3 - Dessin CAO préliminaire de FROG-H.

FROG : démonstrateur miniature

bité, etc.), ou à un étage réutilisable de revenir sur Terre et d'atterrir en douceur.

Dans un premier temps, la navigation permet de déterminer la situation (ou état dynamique) de la plate-forme, à savoir sa position courante, sa vitesse (par rapport au sol) et son attitude (orientation), mais également d'autres paramètres importants pour la conduite de mission (comme aérodynamiques par exemple).

Une fois ces éléments déterminés, et comme le montre le schéma ci-dessous (fig. 4), une mission de référence a préalablement été optimisée et intégrée dans la boucle.

Cette trajectoire de référence est réalisée au sol, par un calculateur, avant la mission. Pour ce faire, est utilisé ce qu'on appelle un optimisateur de trajectoire : il consiste à prendre en compte la dynamique du lanceur (à travers son modèle mathématique, qu'on pourrait considérer comme un mini-simulateur), et trouver une trajectoire qui répond à plusieurs contraintes :

- des contraintes de départ et d'arrivée de mission : position/vitesse initiales, position/vitesse finales, etc. ;
- des contraintes de saturation de commande : poussée maximale du moteur, braquage maximal de la tuyère, etc. ; mais également d'état : altitude, vitesse, orientation ;
- des contraintes le long du parcours : en général, il s'agit d'une consommation minimale de carburant (ou d'ergols).

La situation dans laquelle doit alors se trouver la plate-forme dans cette mission de référence est comparée à la situation

courante par le guidage, qui détermine ainsi les orientation et poussée requises pour suivre la trajectoire de référence (attention, la détermination de l'orientation à suivre concerne un type de guidage, généralement non liée à l'aérodynamique, il en existe bien d'autres).

Une fois l'orientation requise calculée par l'algorithme de guidage, le pilotage détermine alors les commandes à exécuter (braquage de la tuyère et RCS) afin de suivre l'attitude qu'il a reçue en consigne.

La navigation a donc besoin d'un nombre important de capteurs de navigation embarqués dans les plates-formes FROG pour calculer son état dynamique ; dont une centrale inertielle composée de gyromètres mesurant les vitesses de rotation de la plate-forme et d'accéléromètres mesurant ses accélérations.

La centrale inertielle permet de réaliser ce qu'on appelle une navigation inertielle, qui consiste dans ses très grandes lignes, à réactualiser l'orientation de FROG par l'intermédiaire des gyromètres, puis les vitesse et position par l'intermédiaire des accéléromètres, essentielles à la conduite de mission, comme cela a été vu.

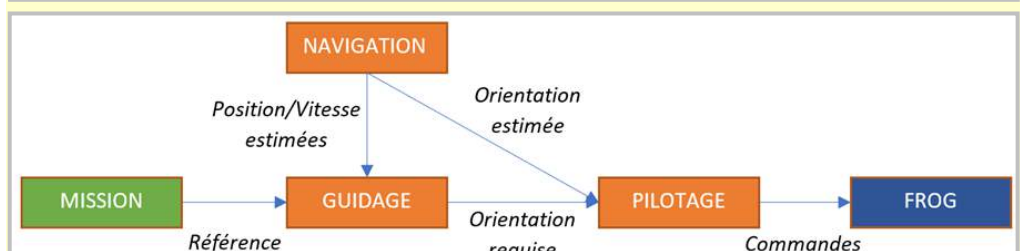
Le schéma ci-dessous (fig. 6) indique d'ailleurs que ce ne sont pas les seuls capteurs de navigation dont dispose FROG, puisque la plate-forme est également équipée d'autres senseurs qui permettent non seulement à la navigation inertielle de ne pas dériver, mais également de disposer d'informations supplémentaires :

- le magnétomètre se sert du champ magnétique terrestre pour déterminer le cap magnétique de la plate-forme ;
- l'utilisation de la localisation par satellite comme Galileo ou GPS (aidée par

Fig. 4 - Principe d'optimisation d'une trajectoire de référence.



Fig. 5 - Boucle GNC (Navigation, Guidage et Pilotage).



FROG : démonstrateur miniature

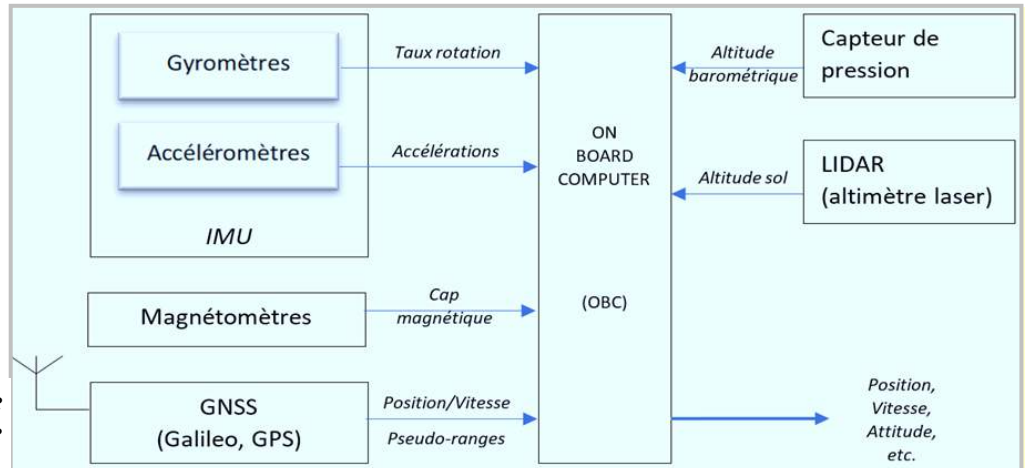


Fig. 6 - Architecture matérielle du système de navigation de FROG.

des balises de précision) permet d'obtenir une position et une vitesse brutes absolues (l'utilisation de balises RTK peut être effectuée en fonction des précisions requises) ;

- des capteurs de pression et télémètres laser permettent de disposer des altitudes (barométrique et sol).

Toutes ces informations font alors l'objet de ce qu'on appelle une fusion de données, à travers un observateur d'état non linéaire (filtre de Kalman étendu), qui permet :

- de prédire l'état dynamique courant de la plate-forme (Position, Vitesse et Attitude) par l'intermédiaire de la centrale inertielle à une fréquence importante ;
- de recalibrer ces informations, grâce aux autres capteurs de navigation, à un rythme un peu moindre (lorsque les informations sont disponibles) ;
- d'estimer les erreurs des capteurs (et donc de les compenser), ainsi que les erreurs d'estimation de l'état courant ;
- et enfin de disposer d'autres informations importantes.

Le pilotage - Le pilotage d'une plate-forme comme FROG requiert certaines précautions, dans le sens où elle est naturellement instable. En effet, on pourrait la comparer à un pendule inversé ou à un balai à l'envers qu'on tente de maintenir en équilibre au bout d'une main tendue.

Pour piloter FROG, et donc atteindre l'orientation requise par le guidage, le

GNC agit sur deux éléments : l'orientation de la tuyère pour les angles de tangage/lacet et les turbines électriques pour le roulis.

Comme le montre le schéma de la figure 7, le correcteur calcule les accélérations en tangage/lacet et roulis (p, q, r) dont doit faire l'objet la plate-forme pour atteindre son attitude cible, et un modèle inverse simplifié de FROG permet de calculer les braquages de la tuyère (δ_y, δ_z) requis ainsi que les poussées des moteurs des RCS pour atteindre les accélérations requises en tangage/lacet et roulis.

Logique de développement - Une chaîne complète de développement a été mise en place, afin de permettre de réaliser tous les travaux nécessaires dans les meilleures conditions possibles de fiabilité, validation, qualification, afin de minimiser au maximum tous les risques liés aux essais en vol, tout en disposant d'un système modulaire et agile, car pouvant intégrer de nouvelles fonctionnalités via un cycle court d'effort.

Cette chaîne, comme le montre le schéma de la figure 8, est constituée des maillons suivants :

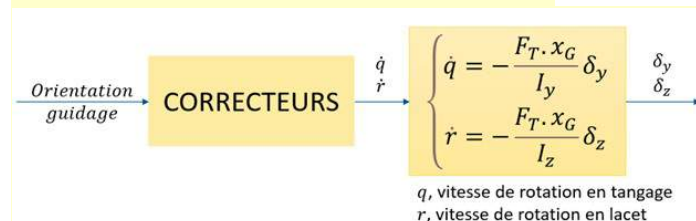
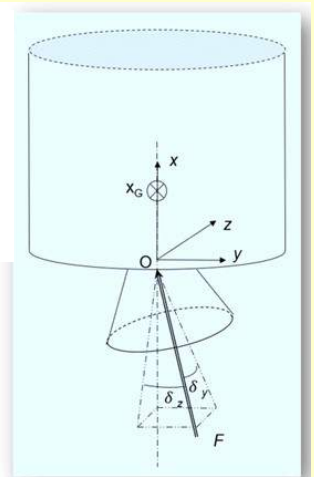


Fig. 7 - Principe du contrôle commande du pilotage en tangage/lacet.



FROG : démonstrateur miniature

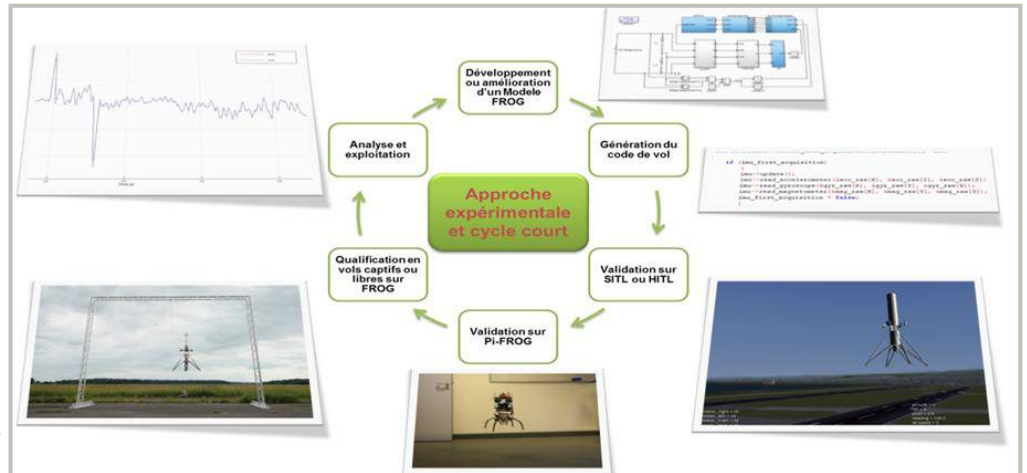
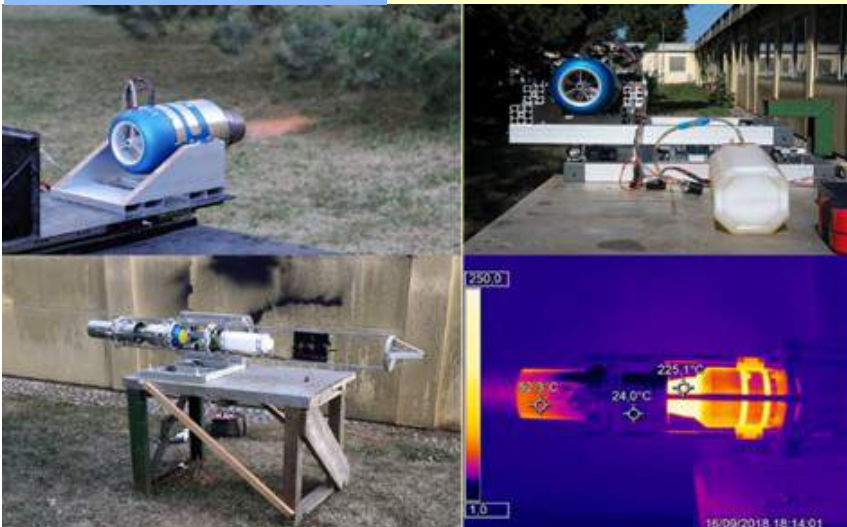


Fig. 8 - Chaîne de développement.

Fig. 9 - Campagnes d'essais du turboréacteur de FROG-T et premiers vols libres.



- implémentation Matlab/Simulink des modèles dynamiques des démonstrateurs FROG, qui font l'objet par ce biais, de la synthèse des correcteurs, et d'une première validation dans cet environnement de développement ;
- intégration des algorithmes de commande ainsi réalisés dans le Programme de Vol (PVOL) de l'ordinateur embarqué de FROG ;
- première validation du PVOL par l'intermédiaire d'un simulateur logiciel (SITL), ce qui permet de détecter d'éventuels bugs, ainsi que de s'assurer que les lois de commandes ont le comportement prévu, dans un code embarqué ; des essais HITL peuvent également être effectués, le PVOL n'étant alors plus compilé sur ordinateur fixe mais dans l'ordinateur de FROG, pour vérifier la bonne exécution du code dans son aspect Temps-Réel notamment ;
- une fois le PVOL validé, il est temps de le tester dans la réalité (un logiciel ne pouvant pas tout simuler), sur une petite plate-forme nommée PiFROG (et

bientôt FROG-E), afin de finaliser la qualification du code embarqué. Cette mini plate-forme a également pour objet de confirmer la viabilité des modèles théoriques, jusque là utilisés dans la chaîne de développement ;

- la réussite de toutes ces étapes donne le droit au PVOL d'être finalement embarqué sur une plate-forme comme FROG-T pour y réaliser les essais nécessaires, tout d'abord captifs, puis, après une revue d'aptitude, en vols libres ;
- une brique dédiée à l'analyse des essais en vol a également été réalisée, afin d'analyser chaque vol, et d'en tirer un maximum d'éléments destinés à améliorer tout le système.

Campagnes d'essais - De nombreuses campagnes d'essais, de tout types, ont été effectuées :

- des essais sur banc du turboréacteur pour la caractérisation du système de propulsion (modèle statique, modèle dynamique, moments et efficacité du système de tuyère) ;
- des essais en vol FROG-T : entre mai 2019 et septembre 2020, 40 vols captifs et 4 vols libres FROG-T ; le retour d'expérience a été extrêmement riche ; malgré les modélisations, le SITL/HITL et Pi-FROG, il y a toujours des imprévus : 5 anomalies en vol ont eu lieu durant la totalité des campagnes, mais toujours avec de mineurs dommages.

Comme mentionné précédemment, chaque vol fait l'objet d'une analyse détaillée des données en vol. Le vol a-t-il été nominal ? Les performances prévues ont-elles été au rendez-vous ? Le GNC a-t-il fait preuve de robustesse par rapport à l'environnement ou aux incertitudes du modèle ? Comment ont évolué les para-

FROG : démonstrateur miniature

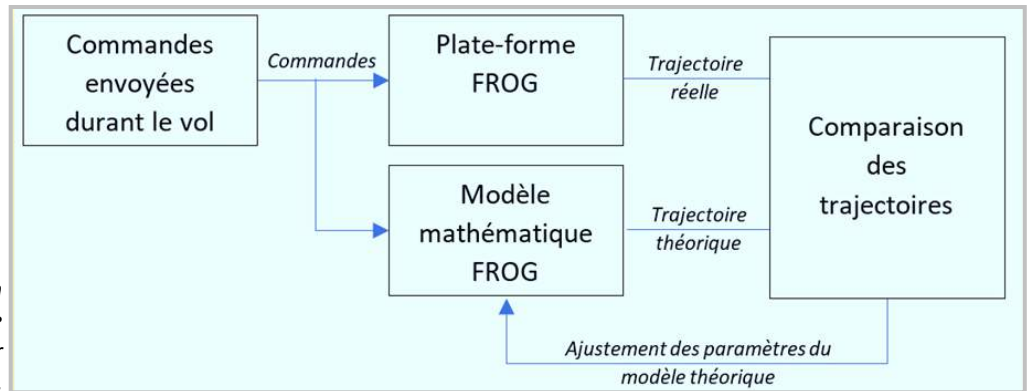


Fig. 10 - Logique d'identification des paramètres du modèle mathématique FROG, à partir des données en vol.

mètres de commande ou d'état ? Des valeurs habituelles ont-elles été observées ? Y-a-t-il eu des anomalies particulières (mécanique, capteurs, PVol, GNC, etc.) ? L'analyse des données en vol a également

pour objectif de réaliser une identification des paramètres du modèle pour une amélioration de la connaissance de la plateforme ainsi qu'une amélioration du GNC et des simulations.

Comme le montre le schéma de la figure 10, pour ce faire, la chaîne de développement s'appuie sur un algorithme classique d'optimisation, qui consiste à comparer les sorties d'un modèle théorique de FROG-T et les mesures réelles lors du vol (pour les mêmes entrées) et à régler les paramètres du modèle théorique pour la meilleure coïncidence possible.

Ainsi, une fois la connaissance du modèle perfectionnée, son implémentation est réalisée dans les différents modèles pour une nouvelle synthèse des correcteurs qui, alors, est plus efficace.

Ces travaux nous permettent d'obtenir une erreur moyenne de suivi d'attitude de 0.1° en tangage/lacet et de 0.8° en roulis.

L'erreur moyenne de suivi en guidage reste également raisonnable, ne dépassant rarement les 10 cm de précision, erreur notamment due aux incertitudes de connaissance du turboréacteur de la plateforme FROG-T.

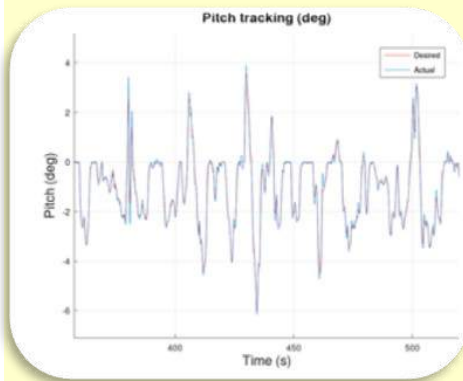


Fig. 11 - Courbes de suivi du tangage (rouge : référence, bleu : mesure).

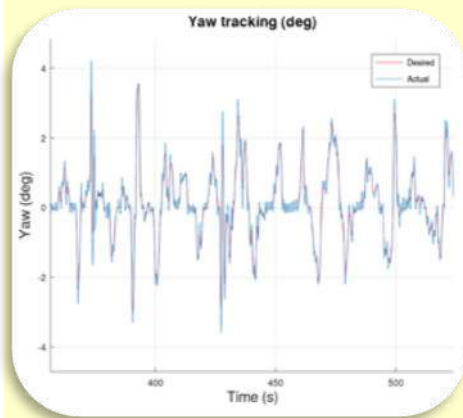


Fig. 12 - Courbe de suivi du lacet (rouge : référence, bleu : mesure).

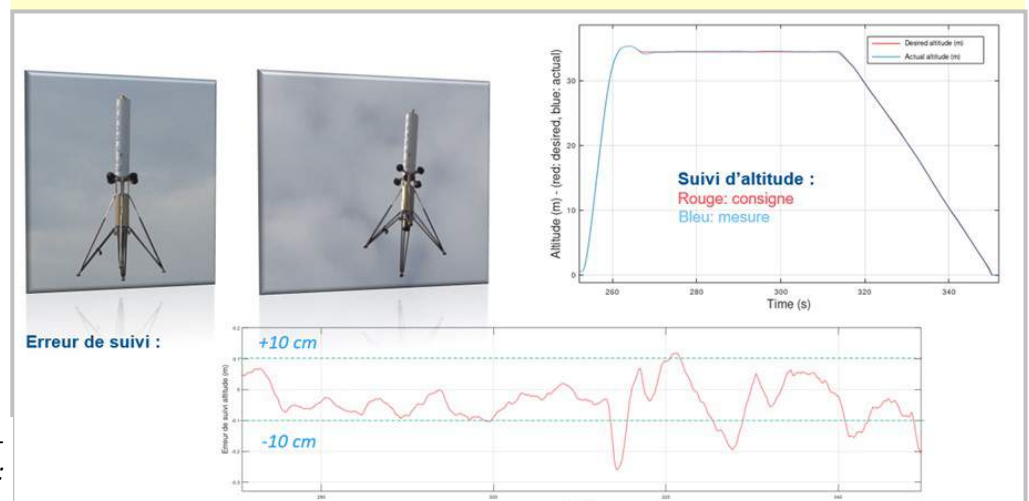


Fig. 13 - Courbes de suivi d'altitude (rouge : référence, bleu : mesure) et erreur de suivi.

FROG : démonstrateur miniature

Conclusion - Le démonstrateur FROG-T a permis :

- la mise en place d'une approche expérimentale et itérative : "Failure is not an option" et "fail fast and fail often" ;
- une organisation hybride : diversité, expertise et implication de l'équipe ;
- un retour d'expérience sur les vols captifs et libres qui s'est avéré être riche d'enseignement !
- un alignement stratégique avec la roadmap sur la réutilisation VTVL.

Pour la suite du projet FROG et de ses démonstrateurs, sont en cours :

- une exploitation opérationnelle de FROG-E et FROG-T à venir pour des besoins potentiels CNES, ArianeWorks, ESA ou autres (ex : simulation de manœuvres proches du sol au profit de Callisto) ;
- un développement de FROG-H en collaboration avec l'ESA, ArianeWorks et l'loA, les premiers essais au banc ayant eu lieu.

**Stéphane Query et Badr Rmili,
octobre 2021.**



Explorer la surface de la Lune Les aspirations de l'Agence Spatiale Européenne

Par **Bérengère Houdou**, responsable du développement des systèmes lunaires de surface à l'Agence Spatiale Européenne (ESA)

En visiophonie le mardi 13 avril 2021 de 18h30 à 20h00



Fig. 1 - Exploration lunaire, crédit ESA.

Créée en 1975, l'Agence Spatiale Européenne (ESA) regroupe 22 états membres qui partagent des ressources financières et scientifiques pour l'exploration et l'utilisation pacifiques de l'espace et dispose d'un accès indépendant au Centre Spatial Européen de Kourou. Ses principales missions consistent à naviguer autour du globe, connecter le Monde, surveiller la Terre, développer des technologies de pointe, contribuer au développement de la connaissance, piloter des engins spatiaux, rendre l'espace plus sûr, explorer et voyager dans l'espace. L'ESA rédige des spécifications et assure le suivi technique de projets dont les développements sont confiés aux industries européennes en lien avec le monde académique. La préparation des vols habités de longue durée vers la lune s'intègre dans ses projets.

Objectif - L'objectif est d'explorer la Lune autrement. Maîtrisant dorénavant les orbites terrestres basses et les séjours de longues durées dans la station spatiale internationale, la prochaine destination de l'Agence, la plus simple et la plus proche, est la Lune, le satellite de la Terre. La dernière présence humaine lunaire date de 1972 et 37 années se sont écoulées

après Luna 24 (mission Russe) avant qu'une nouvelle sonde terrestre alunisse de nouveau en décembre 2013 avec Chang'E3 (mission chinoise). Les connaissances ont évolué grâce aux analyses des échantillons des missions Apollo et des données récoltées lors des missions orbitales passées et récentes. La présence d'eau glacée a ainsi pu être identifiée au niveau des pôles, au fond des cratères obscurs ou au sein de fines couches du sous-sol situées à quelques dizaines de centimètres de la surface. De nombreuses régions restent cependant à explorer et la proximité de la Terre présente l'intérêt de constituer une plateforme pour enrichir la connaissance et développer de nouvelles technologies pour accroître le champ d'exploration spatial, figure 1. À cette perspective sont enfin associées de nouvelles générations d'ingénieurs et de chercheurs qui disposent de moyens d'investigation et de simulation différents de ceux de leurs aînées, des moyens et des approches qui pourraient permettre d'élargir le champ des possibles.

Les difficultés - En décembre 2013, la Chine réussit à poser à la surface de la Lune la sonde Chang'E3, un atterrisseur et un rover, un succès pour une première



Explorer la surface de la Lune

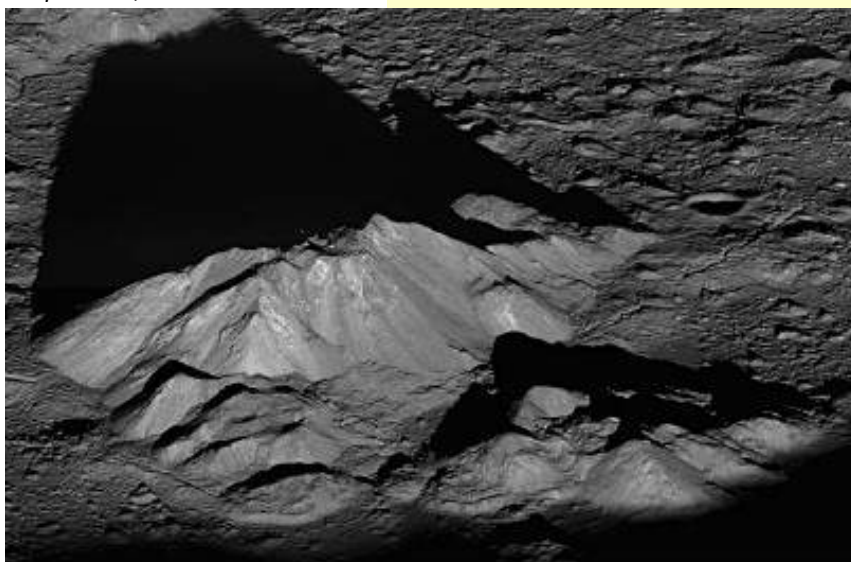


Fig. 2 - Sol lunaire au pôle sud, crédit ESA.

tentative compliquée en l'absence d'atmosphère (pas de parachute possible, pas de bouclier thermique). En janvier 2019, la sonde Chang'E4 équipée d'un autre rover réussissait un alunissage effectué pour la première fois sur la face cachée de la Lune via un satellite placé en orbite. Ces deux succès furent complétés par un troisième alunissage réussi en décembre 2020 dans le cadre de la mission Chang'E5, une mission qui a permis de ramener sur Terre des échantillons lunaires. En parallèle de ces missions, les missions israélienne et indienne respectivement dénommées Beresheet et Vikram lancées en avril et septembre 2020 ont toutes deux échoué. Ces échecs montrent sans conteste la difficulté de la mission.

Préparer les futurs vols habités – La préparation s'intègre dans un plan à long terme destiné à tester des technologies nouvelles en vue de s'installer durablement sur la Lune. Le projet est ainsi diffé-

Fig. 3 - Sol lunaire montagneux au pôle sud, crédit ESA.



rent de celui des années 60-70 et nécessite la définition d'installations et d'infrastructures inédites qui supposent exploiter et recycler les ressources locales telles que l'eau ou le dioxyde de carbone. Il s'agit également d'adapter ou de développer des technologies de collaboration entre l'humain et le robot ainsi que de trouver des solutions aux contraintes d'utilisation d'objets à manipuler dans l'environnement spatial. Tous ces développements nécessitent des compétences et des moyens internationaux dont l'exécution ne peut être qu'incrémentale et évolutive ; l'Europe ne peut s'engager seule.

Bien que l'intérêt commercial autour de la sphère lunaire ne soit pas encore totalement établi, les investissements et les technologies permettent aujourd'hui aux acteurs de nombreux pays tels le Japon, l'Inde ou la Corée du sud de s'engager sur des projets de mises en orbite ou d'alunisseurs. La compétition s'installe et favorise le développement des progrès technologiques. L'ESA s'intègre dans ce contexte, développe ses domaines d'expertise, travaille sur un concept d'atterrisseur lunaire polyvalent désigné EL3 et est partenaire sur plusieurs projets internationaux.

La cible géographique – Le pôle sud de la Lune est retenu car très accidenté, de type montagneux et soumis à un ensoleillement rasant, figures 2 et 3. Cette configuration génère une alternance de zones ensoleillées et d'ombres portées auxquelles sont associés des écarts importants de températures liés à l'absence d'atmosphère. Aux zones d'ombres correspondent des températures très basses qui favorisent la persistance d'eau glacée et d'autres éléments, tel l'oxygène, dans le régolite lunaire dont l'extraction pourrait répondre aux besoins d'une présence humaine durable. Ce relief accidenté nécessite cependant de développer de nouvelles solutions pour l'alunissage, la communication vers l'orbiteur ou la terre via l'alimentation en énergie solaire en intégrant la nécessaire régulation thermique des matériels recevant ou non les astronautes.

Les projets de l'ESA – Le pôle sud de la lune possédant des ressources aquifères et bénéficiant d'un ensoleillement constant favorable à l'installation d'une base lunaire, l'Agence développe deux projets

Explorer la surface de la Lune

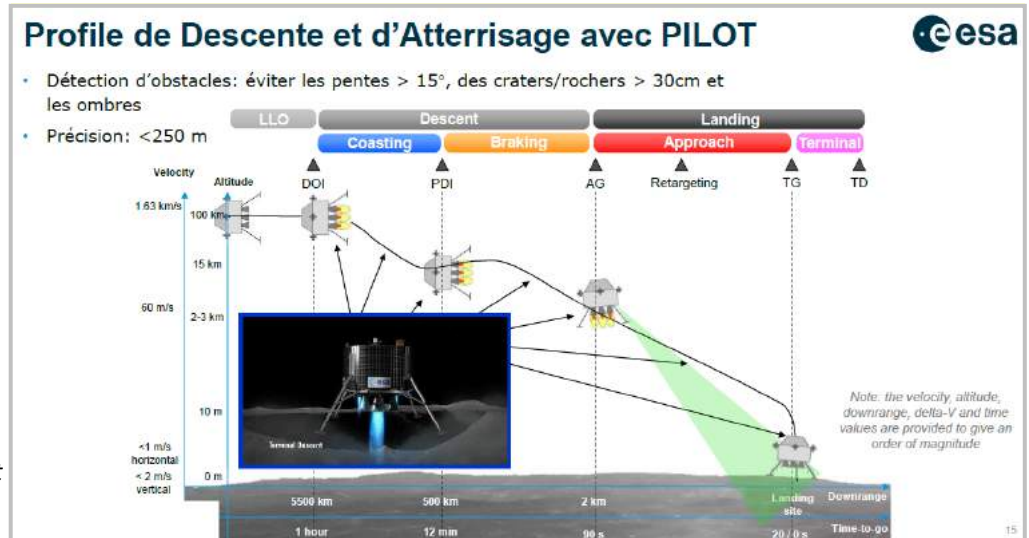


Fig. 4 - Profil de descente et d'alunissage avec PILOT, crédit ESA.

capables d'intéresser un partenaire international.

Le **premier projet lunaire** consiste à mettre au point des solutions pour alunir en sécurité à tous moments et endroits via des fonctions embarquées de navigation visuelle (absolue et relative) et de détection d'obstacles, sans contact avec le sol. Le projet désigné PILOT, pour "Precise Intelligent Landing using On-board Technology", s'appuie sur l'utilisation de deux caméras et d'un LIDAR (télé-détection et télémétrie basées sur des impulsions de lumière infrarouge). Ces fonctions de navigation et de détection s'inscrivent dans un processus qui dure 1 heure et comprend une phase de descente suivie d'une phase d'alunissage de 90 secondes durant lesquelles la vitesse évolue de 1630 m/s à moins de 2 m/s au voisinage du sol, figure 4. La précision d'alunissage, inférieure à 250 mètres, doit permettre d'éviter les cratères, les ombres, les pentes supérieures à 15 degrés et les rochers de diamètres supérieurs à 30 centimètres. La solution

de navigation doit s'intégrer dans le système de guidage, de navigation et de contrôle du partenaire (interfaces complexes). Elle nécessite de développer une avionique embarquée et un LIDAR capables de fonctionner dans un environnement inconnu (pôle sud lunaire) et des conditions incertaines de vol (vibrations, panache du moteur) pour une masse qui ne doit pas excéder 18 kg.

Le **second projet lunaire** porte sur l'analyse scientifique d'échantillons en vue d'utiliser les ressources locales pour fournir les éléments nécessaires à la vie d'une mission de longue durée, figure 5. Ce second projet désigné PROSPECT, pour "Platform for Resource Observation and in-Situ Prospecting in support of Exploration Commercial exploitation & Transportation", consiste à développer un appareil de forage lunaire (ProSEED) capable de prélever des échantillons des sols gelés, d'en extraire les gaz pour les analyser par différences spectrales de masses (ProSPA), d'identifier leurs origines (volcaniques, météorites) et d'esti-

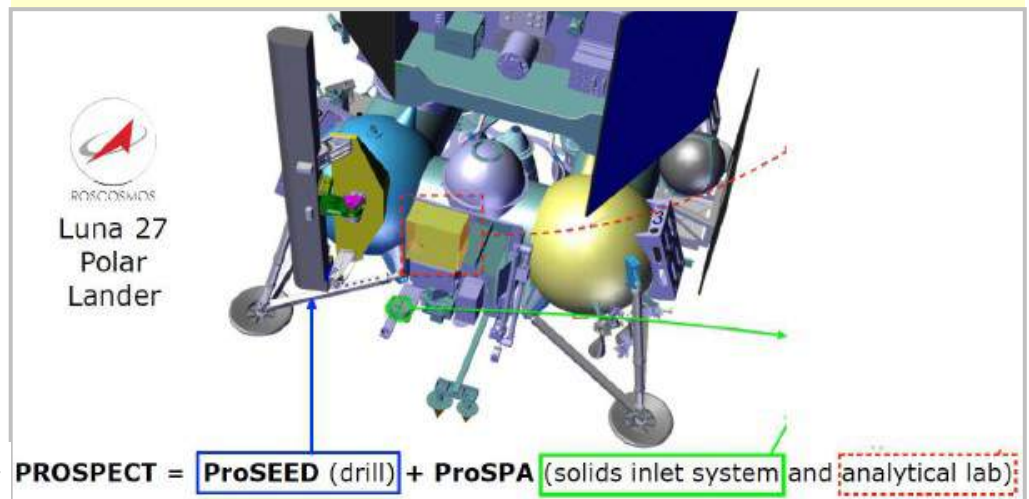


Fig. 5 - Projet PROSPECT, crédit ESA.

Explorer la surface de la Lune

mer leurs possibilités d'extraction. L'appareil devra forer le sol lunaire sans connaître la composition des matériaux (poussière ou rocher), prélever des échantillons pour alimenter les instruments d'analyse capables d'évoluer dans une large plage de températures ainsi que d'analyser, sans détruire ou perturber (mesures non intrusives) ces échantillons. Il s'agira également d'assurer la conservation des volatiles dans des conditions représentatives sachant que la masse de l'ensemble ne devra pas dépasser 41 kg. À ce projet sont associés plusieurs partenariats scientifiques pour valider la possibilité de sublimer le régolite glacé, de mettre au point des références, des systèmes d'imagerie et des capteurs de permittivité.

Une dizaine d'entreprises européennes et des académiques collaborent sur ces projets dont l'intégration sur des atterrisseurs développés en dehors de l'ESA nécessite un interfaçage important et précis. Ces projets nécessiteront de nombreuses simulations et expérimentations qui devront faire appel à l'utilisation de drones ou d'hélicoptères.

Le partenaire Lune - Forte de ses compétences développées avec Luna Orbiter Smart-1 (2003-2006), avec l'Atmospheric lander Huygens sur Titan (2005), avec l'Automatic Transfer Vehicle (ATV) vers l'ISS (2008-2014, Philae (2014))... mais ne pouvant développer seule un atterrisseur, l'ESA a recherché dès 2014 un partenaire capable de développer un atterrisseur sur lequel seraient embarqués les supports finalisés des projets PILOT et PROSPECT. La société Roscosmos, entreprise d'État

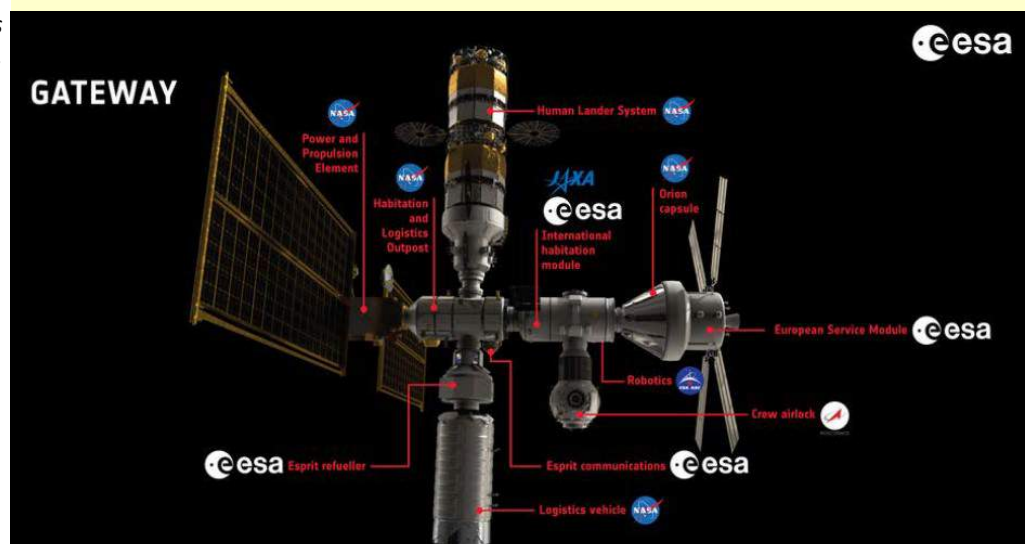
(Russie) pour les activités spatiales, a été retenue pour une coopération centrée sur la mission Luna 27 qui devrait se poser en 2025 sur le pôle sud de la Lune. La caméra qui servira au repérage et à la détection d'obstacle sera testée sur la mission Luna 25 qui décollera en 2022. Cette coopération nécessite des adaptations réciproques aux méthodes d'ingénierie. L'ingénierie européenne s'appuie en effet sur des spécifications incluant des vérifications et des engagements à chaque étape tandis que les ingénieries russes s'appuient plus sur le réel et les tests pour corriger et valider.

Les autres projets – En parallèle des projets précédents, l'ESA développe des modules ou des parties de modules pour le projet Luna Gateway de la NASA (figure 6), une petite station spatiale internationale qui sera mise en orbite autour de la Lune pour les futures missions d'exploration. L'ESA a déjà fourni le module destiné à transporter les astronautes "European Service Module", fournira les services de communications et réalisera les modules d'habitation et de repositionnement sur trajectoire (Esprit Refueiller). L'ESA travaille également sur un projet destiné au transport de masses importantes (1 tonne).

Site à consulter : https://www.esa.int/Space_in_Member_States/France

Résumé établi par P. Gilliéron en référence à l'exposé du 13/04/2021 de Bérengère Houdou (ESA).

Fig. 6 - Gateway, Contributions de l'ESA, crédit ESA.



ex-directeur technique du programme Rafale au sein de Dassault Aviation, concepteur de l'Hydroptère et membre de la commission technique "Aérodynamique" de la 3AF

En visioconférence le mardi 18 mai 2021 de 18h30 à 20h00



1906 - Hydrofoil de Forlanini - 38kt

Fig. 1 - Le premier bateau à foils de Forlanini (1905).

Il y a plus d'un siècle que des ingénieurs ont eu l'idée d'appliquer les principes de l'aviation naissante aux bateaux en faisant supporter leur poids non plus par la poussée d'Archimède mais par des ailes marines. Un des plus fameux engins est celui de l'ingénieur italien Forlanini qui atteint 38 kt (soit environ 70km/h ; $1 \text{ kt}^1 = 1.852 \text{ km/h}$) en « volant » sur le lac Majeur en 1905, figure 1. Ces ailes marines sont désormais connues sous le nom anglais de foil.

Depuis ces débuts de nombreux bateaux à foils, aussi appelés hydroptères, ont sillonné les plans d'eau tout autour du globe. Hydroptères à moteur dans un premier temps pour des applications militaires ou de transport de passagers puis à voile pour battre les records de vitesse. On trouvera un historique assez complet des hydroptères sur Wikipédia.

L'intérêt des foils pour des bateaux à grande vitesse est assez facile à comprendre. La poussée d'Archimède permet d'équilibrer le poids d'un bateau sans aucune dépense d'énergie. Une très faible poussée horizontale suffit donc à déplacer un bateau « archimédien ». Mais lorsque l'on veut augmenter la vitesse la résistance à l'avancement, appelée traînée pour les aéronefs, se manifeste principalement sous deux formes. La première est celle qui est due au frottement de l'eau à

la surface de la carène, de façon tout à fait analogue à ce qui se passe pour un aéronef. Il est connu que cette force est proportionnelle au carré de la vitesse. La seconde est très spécifique aux bateaux et provient des vagues créées à la surface par leur déplacement et que l'on appelle le sillage. Ces vagues ont une longueur d'onde principale directement liée à la vitesse et lorsque cette longueur d'onde dépasse celle du bateau celui-ci doit en quelque sorte « monter » sur sa vague d'étrave, ce qui produit une très forte augmentation de la traînée. On considère ainsi que les bateaux archimédiens ont une vitesse limite proportionnelle à la racine carrée de leur longueur. Pour un bateau de 10m cette vitesse limite est d'environ 8kt et la traînée est alors de l'ordre de 10% du poids.

Si la puissance de propulsion, à moteur ou à voile, est suffisante le bateau peut dépasser cette vitesse limite et entre alors en régime « planant ». La carène se comporte alors comme une aile dont seul l'intrados serait portant. La traînée dépend alors essentiellement de la surface mouillée, qui est généralement fortement réduite par rapport au régime archimédien, et de l'incidence de la carène qui permet d'équilibrer le poids. Si la forme de la carène est bien dessinée (forme planante), la traînée n'augmente presque plus en fonction de la vitesse au début de cette phase. Hélas, l'équilibre du centre de poussée hydrodynamique par rapport au centre de gravité fait que lorsque la vitesse augmente, l'incidence de la carène doit diminuer ce qui empêche de réduire la surface mouillée. De ce fait la traînée finit par revenir sur une loi sensiblement proportionnelle au carré de la vitesse.

Avec des foils, il est évident que leur surface mouillée augmente la traînée dans la phase archimédienne. Mais quand leur portance augmente ils soulagent la poussée d'Archimède et réduisent la traînée de vague. Mais leur bénéfice apparaît surtout « en vol » lorsqu'ils supportent tout le poids du bateau. Leur surface étant en gé-

1. kt : 1 nœud soit 1 mille marin (1852 mètres) à l'heure.

Les Hydroptères : ces bateaux qui volent

néral très inférieure à celle de la carène, le bénéfice en traînée de frottement est très important. En contrepartie apparaît une composante de traînée induite par la portance hydrodynamique. Et, comme pour les ailes des avions, il faut avoir le plus d'allongement possible des foils pour minimiser cette composante. Si de plus le foil traverse la surface avec un dièdre classiquement de l'ordre de 45° (voir illustration de L'Hydroptère), l'augmentation de la portance en fonction de la vitesse est compensée par une élévation du bateau qui réduit la surface immergée du foil sans avoir besoin de modifier l'incidence : plus le bateau va vite et plus il vole haut... donc avec une surface mouillée plus faible ! En contrepartie il y a quand même une légère augmentation de la traînée induite par la portance du fait de la réduction simultanée de l'allongement des foils. Mais, au bilan global, la traînée d'un hydroptère est pratiquement constante sur une large plage de vitesse au-delà du décollage, ce qui est très avantageux par rapport à une coque planante, figure 2.

La faible traînée à grande vitesse est donc l'avantage majeur des hydroptères. Mais la conception d'un tel bateau pose quand même des problèmes très spécifiques.

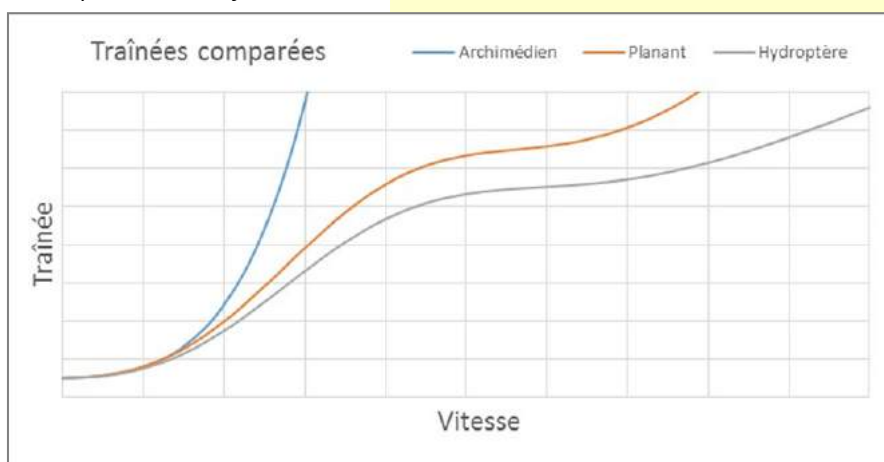
Un des premiers est le mode de propulsion. On comprend facilement qu'une hélice située au bout d'un arbre dans l'axe du moteur ne peut pas permettre au bateau de voler bien haut. D'ailleurs les premiers hydroptères étaient propulsés par une hélice aérienne. Pour des raisons d'encombrement et de sécurité il est évidemment préférable d'avoir une hélice marine. Mais alors la question se pose de la position du moteur : il peut être en pod immergé dans l'axe de l'hélice mais au prix d'une accessibilité très réduite et d'un

volume immergé source de traînée supplémentaire ; s'il reste dans la carène c'est au prix d'une transmission plus complexe et moins fiable. L'hydrojet est une autre solution qui nécessite une prise d'eau au niveau des foils pour remonter l'eau au niveau de l'hélice carénée placée dans la carène en face du moteur. Ce problème ne se pose évidemment pas pour les hydroptères à voile dont la propulsion est, par nature, aérienne !

Un autre problème spécifique des hydroptères est celui de la stabilité en vol, aussi bien en roulis qu'en tangage. En roulis, la hauteur du centre de gravité par rapport au plan des surfaces portantes actives, d'autant plus forte que le bateau vole haut, fait que la stabilité naturelle que l'on obtient sur un avion ne peut pas être obtenue avec des foils totalement immergés. Il faut alors soit ajouter des gouvernes sur les foils et créer de la stabilité artificielle par un asservissement, soit avoir des foils traversant la surface de façon à ce que leur portance varie avec leur enfoncement. On peut aussi noter une solution astucieuse qui permet d'asservir la profondeur d'un foil. Elle consiste à lier le calage d'une partie du foil (volet de bord de fuite par exemple) à un palpeur qui suit la surface libre par une simple tringlerie mécanique. Le calage augmente si le foil s'enfonce et réciproquement. Cette solution a été beaucoup utilisée pour résoudre les problèmes de stabilité. Elle a cependant les inconvénients d'ajouter une mécanique fragile et exposée à des débris de surface et de ne pas permettre la réduction de la surface mouillée lorsque la vitesse augmente, donc de limiter le potentiel de performance. En général la stabilisation en roulis conduit à faire des foils dont l'envergure dépasse la largeur de la carène. Pour des voiliers, un bateau comme l'Hydroptère obtient une stabilité naturelle en roulis avec des foils en V qui traversent la surface libre avec un dièdre de l'ordre de 40° et une largeur beaucoup plus importante qu'un catamaran de mêmes longueur et déplacement.

Concernant le tangage, les critères de stabilité en vol sont proches de ceux d'un avion. On retrouve en particulier la notion de foyer qui correspond à la position la plus arrière du centre de gravité qui assure la stabilité. Cette notion n'existe pas sur les bateaux archimédiens et peut

Fig. 2 - Diagramme comparé des traînées de bateaux archimédiens, planants ou à foils.



Les Hydroptères : ces bateaux qui volent

3AF Les Conférences du Groupe Ile-de-France
LES MARIS DE L'INFORMATIQUE ET DE L'ÉNERGIE
NATIONAL COORDINATION, RECHERCHE, ÉTUDES, ÉVALUATION
Association Aéronautique et Astronautique de France

LES HYDROPTÈRES : CES BATEAUX QUI VOLENT
Par Philippe Penier, ex-chercheur technique du programme Raptor au sein de Boeing Aquatic, concepteur de l'extrados et maître de la solution technique "aérohydrostat" de la 3AF. La conférence est en partenariat avec la Commission "Aéronautique" de la 3AF.

Une conférence en visioconférence organisée par le Groupe Ile-de-France de la 3AF en partenariat avec la Mairie du 15ème

MARDI 18 MAI 2021 de 18h30 à 20h
Il y a plus d'un siècle, les ingénieurs aéronautiques ont fait "voler" des bateaux avec des ailes repliées pour améliorer au maximum les performances en mer. Les constructeurs aéronautiques ont adapté ces hydroptères commerciaux pour le transport de passagers (Boeing 929) et recentré leur intérêt de pointe sur les aspects de pointe de la 3AF. Philippe Penier présentera un panorama des différents concepts d'hydroptères passés et présents, à mesure et à la fois, en un moment de aspects techniques très spécifiques.

INSCRIPTION OBLIGATOIRE sur le site 3AF <https://www.3af.fr/agenda/>

Suite à la crise sanitaire de la Covid-19, les conférences du groupe 3AF Ile-de-France sont exclusivement proposées en visioconférence sur le service de **Webconférence ZOOM**.

PROCHAINES CONFÉRENCES 3AF ILE-DE-FRANCE
Aérospatial et Informatique et systèmes d'aérospatial - par Patrick Farlati - le 19/05 - 18h30 - 20h00 - 15ème
Ballons-Stratosphère - par Philippe Théau - 02/06/2021 - 18h30 - 20h00 - 15ème
3AF - Association Aéronautique et Astronautique de France - 4 rue de la République - 75001 Paris - France - 3AF - La 3AF France - <https://www.3af.fr> - 01 47 37 22 00 - 3AF@3AF.FR

déstabiliser des marins qui craignent de plonger de l'avant en avançant trop le centre de gravité ou qui pensent qu'en le reculant on peut faire cabrer le bateau pour le faire voler plus haut. La variation de la portance des foils avec leur enfoncement participe également à cette stabilité. Enfin les foils sont soumis à deux phénomènes particuliers inconnus des aérodynamiciens : la ventilation et la cavitation.

La ventilation provient de la proximité de la surface libre avec les zones de faibles pressions à l'extrados des foils. En effet, en raison de la forte masse volumique de l'eau, la pression dans ces zones est souvent très inférieure à la pression atmosphérique, même en tenant compte de la composante hydrostatique apportée par la profondeur. On comprend alors que s'il existe une communication entre ces zones et la surface, elles peuvent être envahies par de l'air à la pression atmosphérique qui prend la place de l'eau à l'extrados à une pression qui peut être beaucoup plus faible. Il en résulte alors une forte chute instantanée de portance. Les foils traversant la surface sont évidemment plus sujets à la ventilation. Ce phénomène a été très peu étudié pour de tels foils et reste difficile à modéliser par CFD car il est généralement associé à deux états stables dans les mêmes conditions : avec et sans ventilation. Il dépend peu de la vitesse elle-même mais plutôt de la cartographie des zones à faible coefficient de pression ($P/\frac{1}{2}\rho V^2$ où P est la pression statique locale, ρ la masse volumique de l'eau et V la vitesse du bateau) par rapport à la surface.

La cavitation se manifeste de façon très semblable à la ventilation mais par une physique totalement différente. Le seul point commun est la dépression créée à l'extrados des foils. A grande vitesse cette dépression peut passer en dessous de la pression de vapeur saturante de l'eau. Celle-ci se vaporise alors et il se crée une bulle de vapeur d'eau à l'extrados du foil. Si l'on augmente la vitesse ou l'incidence du foil cette bulle s'étend progressivement à tout l'extrados et se peut même se prolonger assez loin en arrière en créant un effet de culot. Mais dans ces conditions l'extrados ne contribue plus à l'augmentation de portance l'effet de culot augmente fortement la traînée. La recondensation de la bulle a lieu de façon implosive au point de pouvoir sérieusement détériorer

la surface concernée. Ce phénomène est bien connu des fabricants d'hélices. Pour des foils, avec un coefficient de pression de 0,5 à l'extrados, on atteint le seuil de début de cavitation vers 40 kt. Pour atteindre des vitesses bien plus importantes il faut alors utiliser des profils « supercavitant » conçus pour fonctionner avec un extrados totalement à la pression de vapeur saturante. De tels profils ont leur zone de fonctionnement optimal pour des coefficients de portance et avec des finesses bien inférieurs à ceux des profils classiques. Bien que la physique soit totalement différente, il y a une certaine analogie de conséquences entre les écoulements supersoniques et la cavitation.

Tous les bateaux rapides font également face au problème de l'état de la mer : traverser un champ de bosse à toute vitesse est forcément éprouvant. Le comportement des bateaux est une combinaison de modes typiques. Dans un premier mode le bateau suit le profil de la mer : c'est le cas lorsque le bateau est sur une houle longue de grande période de rencontre, typiquement plusieurs secondes. Lorsque la période de rencontre diminue les accélérations verticales qui permettraient de suivre la mer augmentent rapidement au point que le bateau peut finir par décoller sur la crête des vagues, ce qui est une des figures favorites des planches à voile et des kite-surfs. Mais si le bateau est assez lourd il peut arriver dans un mode où il « traverse » les vagues avec peu de mouvement vertical. Le partage entre les deux modes dépend essentiellement de la raideur à l'enfoncement rapportée à la masse du bateau en fonction de la période de rencontre. Les coques planantes ont un très faible tirant d'eau donc une très forte raideur à l'enfoncement rapportée à la masse : un faible écart d'enfoncement induit une forte accélération de rappel. Avec un tirant d'eau de 20 cm, un bateau qui « traverserait » des vagues de 20 cm de creux subirait des accélérations verticales de +/-0,5 g. Sauf dans le cadre d'une compétition, le confort des passagers oblige à réduire la vitesse bien avant ce seuil. Pour un foil traversant la surface la variation de poussée verticale induite par les variations d'enfoncement se répartie sur l'envergure immergée et la raideur à l'enfoncement est beaucoup plus faible. De ce fait un hydroptère peut traverser des creux beaucoup plus impor-

Les Hydroptères : ces bateaux qui volent



Fig. 3 - 1976, Boeing 929, hydroptère, 400 passagers à 45 kt.

tants qu'une coque planante... à condition que la hauteur de vol de la carène soit suffisante. C'est ainsi que, dans la deuxième moitié du XXème siècle, un certain nombre d'hydroptères de transport de passagers ont été en service sur des plans d'eau plus ou moins abrités. On peut citer entre autres une liaison Ouessant-Continent, des liaisons entre les îles grecques ou Hawaï, autour de la mer Baltique ou sur de grands lacs intérieurs. Boeing en particulier a commercialisé le Boeing 929 propulsé par hydrojets qui pouvait transporter jusqu'à 400 passagers, figure 3. Cependant ce mode de transport n'a jamais supplanté les navires plus conventionnels, malgré sa vitesse, sans doute en raison des conditions de mer qui limitaient trop souvent son emploi.

Depuis quelques décennies l'usage des

Fig. 4 - L'Hydroptère à plus de 90 km/h.



foils est revenu d'actualité par le biais des voiliers de course. En effet les progrès des matériaux, composites en particulier, ont permis un allègement considérable des structures et une meilleure performance des voiles qui ont rendu possible le décollage d'hydroptères à voile. Les premiers hydroptères à voile ont été conçus pour les records de vitesse sur plan d'eau parfaitement calme. Ainsi dès 1956, l'hydroptère américain Monitor a été chronométré à plus de 30 kt. Mais le premier hydroptère à voile conçu pour des traversées océaniques est l'Hydroptère d'Alain Thébault, mis à l'eau en 1994, qui a traversé la Manche entre Douvres et Calais à 33,3 kt (61km/h) de moyenne et a battu le record absolu de vitesse à la voile sur 500 m en 2009 à plus de 51 kt (95km/h) en rade d'Hyères avec 30 kt de vent près de 1 m de clapot, figure 4. Bien qu'il n'ait pas pu battre le record de l'Atlantique pour lequel il avait été conçu avec le soutien d'Éric Tabarly, les performances et les images de l'Hydroptère ont marqué le milieu de la voile et les foils sont maintenant incontournables sur tous les voiliers de compétition. Parmi les plus spectaculaires, tout le monde a vu des images des deux dernières éditions de la Coupe de l'America avec des catamarans qui volent à 40 kt par 20 kt de vent réel. Leur configuration est cependant très différente de celle de l'Hydroptère pour des raisons de jauge qui limite strictement la largeur.

Les Hydroptères : ces bateaux qui volent



Fig. 5 - Vestas Sailrocket dans les conditions du record de vitesse à 121 km/h.

De ce fait les architectes ont été contraints de dessiner des foils qui traversent la surface verticalement (voir illustration). Le bateau n'a donc aucune raideur naturelle d'enfoncement en vol et le contrôle de la hauteur de vol est assuré par le pilotage des foils en incidence avec l'assistance d'équipiers qui « moulinent » les winches en permanence pour remplir l'accumulateur hydraulique de puissance.

Le record du monde de vitesse à la voile avait été repris à l'Hydroptère dès 2010 par Alex Caizergues en kite-surf. Mais il a depuis été pulvérisé par l'australien Paul Larsen à 65,45 kt (121km/h) avec Vestas Sailrocket, un engin dissymétrique original dont le foil fonctionne à l'envers en tirant le bateau vers le bas pour permettre de tirer plus de puissance de la voile, figure 5. Il est intéressant de noter que Paul Larsen a établi son record avec seulement 25 kt de vent réel ce qui illustre la finesse remarquable de son engin.

Du côté des hydroptères à moteur, plu-

Fig. 6 - 2017, Seabubble, 10 kt, 4 passagers.



sieurs équipes ont actuellement en projet des appareils de la taille d'une automobile destinés à transporter quelques personnes sur des plans d'eau calmes. La Ville de Paris s'intéresse en particulier au projet de Seabubble, à propulsion électrique pour servir de bateau-taxi sur la Seine, figure 6. Dans ce cas l'avantage des foils est de produire moins de traînée et moins de sillage qu'un bateau conventionnel de même capacité. Cependant sur la Seine dans Paris la vitesse des bateaux est limitée à 18km/h, ce qui ne permet pas de tirer le meilleur parti des foils. Mais il existe aussi de très nombreuses villes au monde situées autour d'un plan d'eau abrité sur lequel la limitation de vitesse est beaucoup moins stricte et où les foils pourraient être adaptés au mieux de leurs performances.

Ce sont bien les progrès technologiques tirés par l'industrie aéronautique, en particulier dans le domaine des matériaux, qui ont permis aux bateaux de voler et on peut dire que tous les projets innovants dans ce domaine ont été soutenus par cette industrie. Si, du point de vue de la Mécanique des Fluides, l'eau et l'air à basse vitesse ont des comportements tout à fait semblables, c'est surtout le fait de naviguer à l'interface entre ces deux éléments qui fait la spécificité des bateaux volants. Et les vagues qui agitent cette interface sont le principal défi à relever. Il est difficile d'imaginer un renouveau des hydroptères pour le transport de passagers sur des mers ouvertes. Mais les foils sont désormais incontournables pour les voiliers de compétition et il est assez probable que les hydroptères deviennent des moyens de transport communs sur des plans d'eau abrités. Et l'industrie aéronautique restera évidemment un acteur majeur de ces innovations.

Philippe Perrier, juin 2021.

Article publié en 2017 dans La Lettre 27 et remis en page au format du Recueil.

CONFÉRENCE

Contributions du Facteur Humain aux accidents d'Aéronefs et Astronefs dûs aux Ambiances Électromagnétiques

Par Patrick Farfal, ancien ingénieur à EADS Astrium (aujourd'hui ArianeGroup), 3AF, IMdR (Institut de Maîtrise des Risques).

En visiophonie le mardi 15 juin 2021 de 18h30 à 20h00



USS Forrestal, explosion du 29 juillet 1967, © Wikimedia Commons.

Le risque lié aux environnements électromagnétiques sévères que peuvent rencontrer aéronefs et astronefs, du fait de leur conception, de leur réalisation et surtout dans leur mise en œuvre, a été dans le passé quelquefois difficile à apprécier. Cette difficulté d'appréciation est à ranger au nombre des facteurs humains contribuant aux accidents.

La complexité des aéronefs et astronefs en tant que systèmes les rend d'autant plus vulnérables aux environnements électromagnétiques.

Cette complexité et la diversité des effets électromagnétiques induits pèsent même sur les analyses a posteriori au point qu'il est parfois hasardeux d'emporter la conviction que les incidents sont bien d'origine électromagnétique (« ElectroMagnetic Interference leaves no fingerprints »). Et dans certains cas, le retour d'expérience n'est pas exploité pour l'appréciation ultérieure des risques.

Divers incidents ou accidents ont été relatés de façon circonstanciée ; ils sont anciens mais emblématiques. Il est vrai que la relative rareté des accidents et la méconnaissance des ambiances électromagnétiques et de leurs effets rendent souvent difficile l'appréciation du risque par les décideurs. Bien plus, cette méconnaissance est source de crainte, souvent justifiée, parfois irraisonnée, et pas seulement

dans le grand public.

Mise en œuvre d'un aéronef ou d'un astronef - La mise en œuvre d'un aéronef ou d'un astronef, civil ou militaire, doit prendre en compte la complexité des systèmes embarqués électriques, électroniques et, pour certains, pyrotechniques, et la complexité des environnements, souvent sévères, parmi lesquels on trouve divers environnements électromagnétiques (ambiances radio-radar, foudre...) qui peuvent engendrer des effets destructifs ou au moins perturber le fonctionnement des systèmes.

Du fait que la mise en œuvre de ces véhicules implique le respect d'un certain nombre de processus décisionnels, en particulier le respect de procédures (dans les systèmes d'armes, les systèmes de commandement (aéronefs, missiles), les systèmes de conduite de tir (lanceurs spatiaux, missiles), l'homme est une partie du système entendu au sens large.

Dans la mise en œuvre opérationnelle de ces véhicules, et aussi plus rarement dans leur réalisation, on constate, au travers d'incidents et d'accidents, la difficulté d'appréciation du risque électromagnétique. L'analyse de ces incidents et accidents permet de mettre en évidence la contribution du facteur humain à ces événements, à savoir les attitudes qui sont à l'origine des décisions ayant conduit aux phénomènes observés, attitudes qui peuvent perdurer malgré l'expérience.

Complexité des systèmes embarqués - On trouve à bord d'un aéronef ou d'un astronef un nombre élevé d'équipements électriques et électroniques complexes de navigation, pilotage, communications..., et, pour les astronefs (lanceurs ou missiles) un grand nombre d'équipements pyrotechniques - commandés par les équipements électriques et électroniques - pour l'exécution des événements discrets du vol : allumages et séparations d'étages, largage des charges utiles (satellites, sondes), passivation (sécurisation des étages avant leur séparation)..., et aussi

3AF Les Conférences du Groupe Ile-De-France
LES BORDS DE L'AERONAUTIQUE ET DE L'ASTRONAUTIQUE
Association Aéronautique et Astronautique de France
www.3af.fr

CONTRIBUTION DU FACTEUR HUMAIN AUX ACCIDENTS D'AERONEFS ET ASTRONEFS DUS AUX AMBIANCES ELECTROMAGNETIQUES
Par Patrick Farfal, 3AF consultant et formateur en systèmes et ingénierie système. Ancien ingénieur à l'aérospatiale Europe et Defense, puis EADS Astrium.

Une conférence en visiophonie organisée par le Groupe Ile-De-France de la 3AF en partenariat avec la Mairie de 15ème
MARDI 15 JUIN 2021 de 18h30 à 20h

Divers incidents et accidents dus à des ambiances électromagnétiques sévères ont été relatés de façon circonstanciée : accidents d'aérospatiale, Space Shuttle (1981-1982), destruction de Ariane 2 (1984), échec du lanceur Atlas Centaur ST (2007), incendie du porte-avions américain Forrestal (1967). L'analyse des incidents et accidents permet de mettre en évidence la contribution du facteur humain à ces événements, à savoir les attitudes à l'origine des décisions ayant conduit aux phénomènes observés, attitudes qui peuvent perdurer malgré l'expérience.

INSCRIPTION OBLIGATOIRE sur le site 3AF

Accès gratuit sur inscription, membres et non membres 3AF

Prochaines conférences 3AF ILE-DE-FRANCE
Bordeaux le mardi 15 juin 2021 de 18h30 à 20h
Paris le mardi 22 juin 2021 de 18h30 à 20h
Nantes le mardi 29 juin 2021 de 18h30 à 20h

Contributions du Facteur Humain aux accidents...

dans tous ces véhicules des réseaux de câbles complexes.

Le lanceur Ariane 5 de première génération (premier vol commercial en 1998) comportait 40 équipements électriques ou électroniques, dont 14 calculateurs, plusieurs dizaines de kilomètres de câbles, plus de 400 connecteurs, plus de 80 fonctions pyrotechniques. L'Airbus A380 possède plus de 100 calculateurs, plus de 500 kilomètres de câbles électriques, plus de 40 000 connecteurs, 400 canaux TV dans l'In-Flight Entertainment System, etc.

Tous ces systèmes, câbles compris, sont susceptibles (sensibles) aux ambiances électromagnétiques.

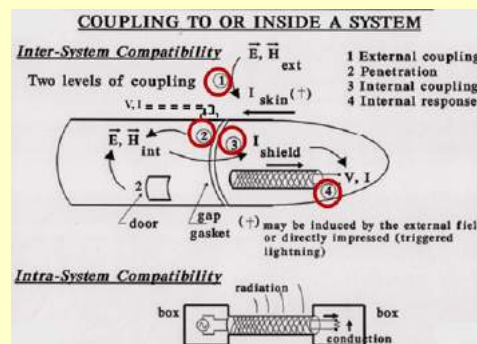
Les environnements électromagnétiques et leurs effets sur les Systèmes - À titre d'exemple, un lanceur type Ariane 5 est soumis :

- au sol, sur son pas de tir, aux effets électromagnétiques de la foudre, à l'ambiance électromagnétique engendrée par les radars du centre de lancement, aux effets électromagnétiques des systèmes avec lesquels il est en relation ; et en vol, durant les premières minutes, à l'ambiance radar du centre de lancement, et, durant tout le vol atmosphérique, du fait du frottement de l'atmosphère (effet triboélectrique), à des charges et décharges électrostatiques : c'est la question de la compatibilité électromagnétique inter-systèmes ;
- et enfin, pendant toute la durée de la mission en vol, aux champs électromagnétiques engendrés par le fonctionnement même de ses équipements électriques et électroniques : c'est la question de la compatibilité électromagnétique intra-système.

tique intra-système.

Pour mémoire, les effets électromagnétiques engendrés par une explosion nucléaire affectent les missiles stratégiques.

Les couplages - Plusieurs niveaux de couplage entre les ambiances électromagnétiques et le système peuvent être identifiés : couplage de l'environnement avec le système (1) se traduisant par la circulation de courants de peau sur la structure, couplage externe-interne par pénétration des champs (2) - via les courants de peau - dans le système (essentiellement par les défauts de la structure enveloppante : joints, trappes de visite...), couplage entre l'ambiance interne et les équipements et les câbles (3).

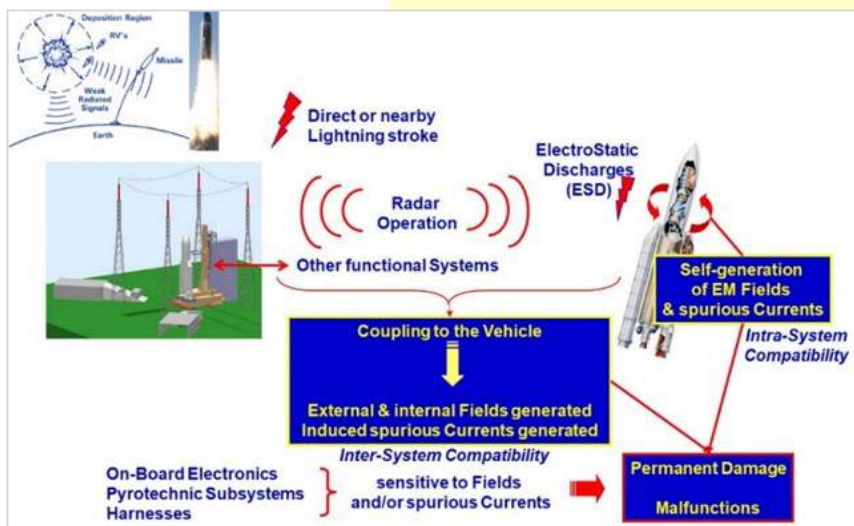


Couplages électromagnétiques sur et à l'intérieur un système.

Il en résulte in fine des champs parasites à l'intérieur des équipements, des tensions et courants parasites véhiculés par les câbles vers les entrées-sorties de équipements (4), aux effets dominants par rapport aux champs parasites internes aux équipements tant que le spectre de fréquences des champs ne s'étend pas aux micro-ondes.

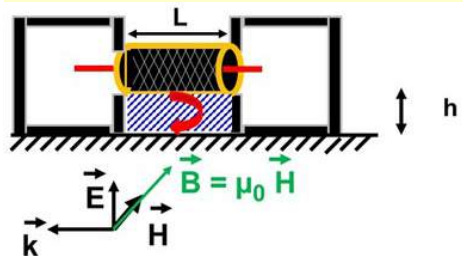
Les tensions parasites apparaissant alors aux entrées-sorties des équipements électriques et électroniques sont alors rapidement du même ordre de grandeur que les signaux utiles échangés par les équipements, et souvent bien supérieurs, d'où possibilité de destruction de composants électroniques, mais plus souvent seulement de perturbation des circuits, laquelle peut induire un comportement catastrophique du véhicule (dans certaines phases de vol, les lanceurs sont très instables aérodynamiquement). La sensibilité des composants pyrotechniques à l'énergie électromagnétique reçue peut provoquer leur fonctionnement intempestif.

Environnements électromagnétiques et leurs effets.



Contributions du Facteur Humain aux accidents...

Mécanismes d'interférence et ordres de grandeur - Une configuration d'étude typique très simple est la suivante : deux équipements, reliés à la masse (structure du véhicule) échangent des signaux par l'intermédiaire d'un câble relié à la masse (en général via les structures métalliques des équipements).



Configuration d'étude typique.

Soumis à un champ électromagnétique convenablement orienté (ici est représenté le cas pire), la boucle hachurée est affectée d'une force électromotrice induite de 2 volts (simplement calculée par la loi de Lenz) pour les valeurs suivantes :

| E V/m | L m | h cm | f MHz |
|-------|-----|------|-------|
| 10 | 10 | 10 | 10 |

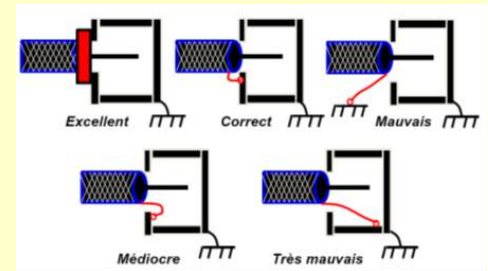
Valeurs typiques de L, h, rencontrées sur les systèmes.

Noter que 10 V/m et 10 MHz sont des valeurs assez faibles de champ et de fréquence respectivement.

Selon la valeur de l'impédance reliant le blindage du câble à la masse, la force électromagnétique induite détermine à l'entrée des équipements une tension parasite comprise entre 0 (théoriquement) si l'impédance est nulle et 2 V s'il manque une reprise de masse (impédance théoriquement infinie), donc du même ordre de grandeur que les signaux fonctionnels échangés entre les équipements ; et la force électromotrice induite est directement proportionnelle à E, L, h, f.

Différentes solutions de reprises de blindage (liaisons blindage - masse) peuvent être envisagées, des meilleures (le connecteur « durci », cher, assurant la continuité de l'étanchéité électromagnétique entre le blindage et la structure de l'équipement, ou la « queue de cochon » (pigtail) externe courte), aux plus mauvaises (queues de cochon longues et/ou rentrant à l'intérieur de l'équipement, et qui font « rentrer le loup - voire la

meute - dans la bergerie »).



Divers types de raccordement de blindages aux boîtiers d'équipements.

Autres ordres de grandeur - Les puissances des radars de surveillance du contrôle aérien atteignent jusqu'à plusieurs MW en régime impulsif. Les normes de « champs forts » ou DRAM (Dommages dus aux Rayonnements électromagnétiques sur les Armes et les Munitions) définissent des niveaux de sévérité pour le champ électrique moyen de quelques dizaines à quelques centaines de V/m entre 2 MHz et 40 GHz, et jusqu'à une vingtaine de fois plus en valeur crête.

Une électronique nue commence à être perturbée par un champ électrique de 10 V/m (soit quelques centaines de mW par m²) à haute fréquence, c'est-à-dire de quelques MHz à plusieurs centaines de MHz, ce qui justifie que l'on se préoccupe de la qualité des blindages d'équipements (boîtiers).

La foudre au sol peut atteindre (dans 2% des cas) 200 kA, déterminant un champ électrique de plusieurs centaines de kV/m. La foudre déclenchée en vol atteint couramment une intensité de 10 kA, courant qui circule sur la peau du véhicule ; tout défaut de structure entraînera la circulation de courants se chiffrant en kA à l'intérieur de la structure. Les courants de foudre, outre leurs effets électromagnétiques, engendrent des effets thermiques et mécaniques, dangereux pour les structures des véhicules (qu'elles soient métalliques ou composites) et pour les systèmes pyrotechniques.

Protections :

- par la structure du véhicule : mis à part à basse fréquence, la protection qu'elle assure est loin d'être parfaite ;
- par la structure des équipements : il faut se rapprocher de la « cocotte-minute » électromagnétique (au sens de l'étanchéité) ;
- par les blindages et sur blindages des

Contributions du Facteur Humain aux accidents...

câbles, ou par des filtres ou supprimeurs aux entrées-sorties des équipements (le choix est une affaire de compromis coût-efficacité (cost effectiveness trade-off) ;

- par « durcissement » actif : il s'agit d'une technique de « contournement », d'« échappatoire », à base de sauvegardes et de réinitialisation rapide des logiciels de bord.

Quelques accidents - Divers incidents ou accidents ont été relatés de façon circonstanciée, dans les domaines aéronautique et astronautique, il y a plusieurs années.

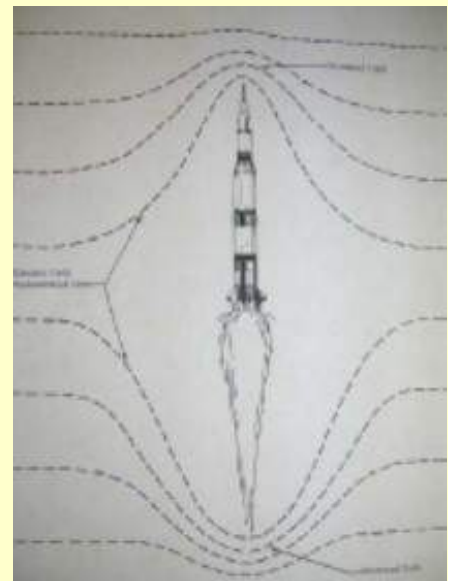
1. **Hélicoptère Sikorsky UH-60 BlackHawk (1981-1987)** : le BlackHawk UH-60, hélicoptère de transport tactique de l'US Army, équipé de « fly-by-wire » (transmission des ordres de pilotage par voie électrique (numérique), en lieu et place des tringleries ou câbles mécaniques traditionnels) a été victime de 5 « crashes » en volant à proximité d'émetteurs radio puissants : 22 personnes ont trouvé la mort, d'autres ont été blessées. Le système de stabilisation d'attitude a été affecté par des interférences créées par les HIRF (High Intensity Radiated Fields) ou champs forts. Les signaux numériques du fly-by-wire étaient hautement susceptibles aux HIRF. Et le BlackHawk n'était pas censé accomplir des missions à proximité de gros émetteurs.

Facteur humain : le manque de précision des spécifications d'emploi, l'incompréhension, le déni des effets électromagnétiques ont fait qu'après une suspension, les vols ont repris, puis, les explications se précisant, l'argument est devenu économique (le rajout de blindages n'est pas gratuit) ; in fine, l'Army a ordonné une investigation poussée.

2. **Apollo 12 (1969)** : à la sixième mission habitée et deuxième mission lunaire du programme Apollo, le 14 novembre 1969, le lanceur Saturn V a été frappé deux fois par la foudre, à 2 km et 4,2 km d'altitude, donc peu après le décollage, respectivement à 36,5 et 52 s ; les équipements de bord ont été perturbés plusieurs dizaines de secondes, certaines voies de télémétrie ont été perdues, mais l'équipage a réussi à

réinitialiser les équipements de bord et la mission s'est déroulée ensuite jusqu'au bout.

C'est le lanceur qui a déclenché la foudre, par le « pouvoir des pointes » qui renforce localement le champ électrique, typiquement d'un facteur 100 : même dans le cas où le risque de déclenchement naturel de la foudre n'existe pas (20 kV/m) la présence du lanceur et de son panache ionisé peut augmenter le champ jusqu'à 2 MV/m, seuil de déclenchement de la foudre à 2 km d'altitude.



Amplification locale du champ par le système.

Facteur humain : le « pouvoir des pointes » est connu depuis très longtemps (base du fonctionnement des parafoudres - faussement appelés paratonnerres). Ici, le renforcement du champ par le lanceur n'avait pas été pris en compte (phénomène pourtant prédit en 1950). Dans les procédures de lancement ont été introduits cinq Launch Commit Criteria relatifs à la foudre, dont un relatif à la foudre déclenchée.

3. **Atlas Centaur 67 (1987)** : dans les mêmes conditions, le 26 mars 1987, l'Atlas Centaur AC 67 a été lancé à Cap Canaveral, emportant un satellite FleetSatCom FLT-6 (satellite de télécommunications Navy/Air Force), plus cher d'ailleurs que le lanceur. Le lanceur a déclenché la foudre à la 49e seconde, ce qui a provoqué sa rupture, par effort excessif sur les structures du

Contributions du Facteur Humain aux accidents...

véhicule en raison d'un braquage maximum commandé par le calculateur de bord perturbé par le courant de foudre circulant sur les câbles, à la 51e seconde à l'altitude de 4,3 km.

Facteur humain : les « lessons learned » d'Apollo 12 n'avaient pas été prises en compte, la rédaction du Launch Commit Criterion étant peu claire.

- 4. USS Forrestal (1967)** : le 29 juillet 1967, le porte-avions USS Forrestal CV-59, se trouve au large du Golfe du Tonkin, pendant la guerre du Vietnam. Un avion atterrissant sur le pont lance intempestivement un missile air-sol Zuni qui va frapper un avion armé et ravitaillé, se préparant à décoller, en attente de catapultage. L'incendie de l'avion se communique aux munitions entreposées sur le pont, qui explosent : 17 heures d'incendie, 134 morts, 161 blessés, 21 avions de l'Attack Carrier Air Wing 17 détruits et jetés à la mer, 7 mois de réparations du Forrestal ; coût pour la Navy (hors coût des avions détruits) : 72 M\$ - de 1967.

Facteur humain : il a été établi après investigations que l'avion qui atterrissait a été illuminé par les radars du Forrestal, créant des interférences électromagnétiques sur le câblage du système d'arme de l'avion, et que le blindage d'un des câbles électriques de commande présentait une mise à la masse dégradée (négligence de fabrication ? détérioration par suite d'interventions de maintenance ?). Et l'effet domino a joué une fois de plus.

Cet accident a déclenché pour la première fois la prise de conscience de la dangerosité des MFP (Micro-ondes de Forte Puissance) ou HPM (High Power Microwaves), signaux hyperfréquences intenses type radar, champs forts... ;

on ignorait à l'époque les effets dévastateurs potentiels des MFP. D'où la révision, au niveau système, des spécifications de compatibilité électromagnétique relatives aux dispositifs pyrotechniques, ainsi qu'une incitation forte au respect des procédures (stockage des munitions...) par les marins : « Sailors, learn or burn ».

Les leçons à tirer - L'analyse des incidents et accidents permet de dégager la contribution du facteur humain à ces événements, à savoir les attitudes à l'origine des décisions ayant conduit aux phénomènes observés, et aussi les raisons pour lesquelles le retour d'expérience n'est pas toujours exploité :

- méconnaissance des effets (méconnaissance de la phénoménologie, comportement des systèmes) donc du risque (Blackhawk, Apollo 12, Forrestal), méconnaissance des risques associés au non-respect des procédures (Forrestal) ;
- négligence de réalisation (Forrestal), des règles de fonctionnement (Atlas Centaur), de surveillance de l'application des consignes (Forrestal), non-acceptation des règles de conception ;
- autres ingrédients classiques (défauts de logique collaborative (Forrestal), défauts de communication, (Atlas Centaur), « détail(s) qui tue(nt) » (Forrestal) ;
- défiance, peur, préjugés (les ondes, qu'est-ce que c'est ?) ;
- déni (refus d'une explication inconnue (Blackhawk)) ;
- répulsion passive (« mal nécessaire »).

Le cloisonnement résiduel des disciplines, qui demeure malgré la diffusion des principes de l'Ingénierie Système, et la complexification sans cesse croissante des systèmes, font de la difficulté d'appréciation du risque électromagnétique une question toujours actuelle. Il contribue, comme la défiance, à la difficulté de légiférer : « prouve-moi que ça ne marchera pas si je n'applique pas les règles de conception que tu imposes ». Seule une pédagogie bien pensée peut contribuer au décloisonnement.

Les leçons vues par quelques spécialistes du risque - L'accident est inévitable, il finira par se produire, il est « normal » (Charles Perrow) ; d'autres parlent d'incubation, ou de terrain prépa-

USS Forrestal, Naval History & Heritage Command, Public domain, © Wikimedia Commons.



Contributions du Facteur Humain aux accidents...

-ré (Barry Turner, Dave Woods) ; certains mettent l'accent sur le facteur humain : l'organisation et la complexité des facteurs dans les organisations hautement fiables (Karl Weick), la « normalisation de la déviance », acceptation de petits écarts dont l'accumulation va conduire à l'incident ou à l'accident (Diane Vaughan).

Pistes de progrès - Il faut mettre en œuvre une pédagogie efficace afin que le cloisonnement inévitable entre les disciplines puisse se réduire, pas seulement par une formation mais par une sensibilisation continue, fondée sur des modèles simples (loi de Lenz ou autre) ; le recours à la démonstration sur maquette numérique, outil maintenant répandu chez les grands systémiers, constituant une définition du système commune et partagée à tout moment du cycle de vie du système, peut servir avantageusement cette pédagogie. Même dans les entreprises dont ce n'est pas la culture dominante, la communication (physique), formelle et informelle, entre les membres des équipes doit être développée et entretenue.

Il convient de définir clairement les rôles

et responsabilités de chacun : managers, personnels de terrain..., en désignant un chef d'orchestre (« chacun son métier »), sans disséminer les responsabilités.

Enfin, ne pas oublier que, selon l'AFIS (Association Française d'Ingénierie Système), l'Ingénierie Système est « un processus coopératif et interdisciplinaire de résolution de problèmes s'appuyant sur les connaissances, méthodes et techniques issues de la science et de l'expérience » : l'Ingénierie Système s'enrichit de ses succès et de ses erreurs, en actionnant la roue de Deming : Plan-Do-Check-Act (Planifier - Réaliser, Exécuter - Vérifier - (Ré)Agir, Corriger).

Patrick Farfal, septembre 2021.

La roue de Deming.



**Plan
Do
Check
Act**

**Planifier
Réaliser, Effectuer
Vérifier
(Ré)Agir, Corriger**



USS Forrestal, explosion le 29 juillet 1967,
© Wikimedia Commons.

DIRISOLAR, le dirigeable tous temps à énergie solaire

Par **Philippe Tixier**, ingénieur, ancien de la SNECMA, de FRAMATOME, de GIAT Industrie et président de DIRISOLAR

En visiophonie le mardi 21 septembre 2021 de 18h30 à 20h00

Le marché commercial des dirigeables civils est quasiment bloqué, et ce depuis 1910. Actuellement, dans le monde entier, on dénombre seulement une cinquantaine de dirigeables à air chaud en service commercial ou en exploitation dans des clubs. Et l'on dénombre moins de dix dirigeables à gaz en service commercial. En revanche, environ 10 000 montgolfières sont en service dans le monde entier. Il est donc justifié de parler de « blocage du marché des dirigeables ».

Le groupe de travail "Aérostation" - À l'initiative de la 3AF, un groupe de travail a rassemblé en 2020 la majorité des acteurs français de l'aérostation. Son rapport, intitulé « panorama de l'aérostation étape 1 », publié début 2021, est accessible via le lien hypertexte suivant : [panorama aérostation étape 1](#). Ce rapport a identifié les principaux « verrous » qui bloquent le marché des dirigeables.

Le verrou principal (ou verrou n° 1) est constitué par la combinaison de deux faits :

- le dirigeable a besoin d'une importante équipe au sol pour se poser, voir la vidéo accessible via le lien : [atterrissages de dirigeables classiques](#) ;
- le dirigeable ne peut décoller et surtout atterrir que si le vent ne dépasse

pas 15 km/h pour les dirigeables classiques et 25 km/h pour le dirigeable Zeppelin NT. Cette limite réduit la disponibilité à 30 % pour les dirigeables classiques, et à 50 % pour le Zeppelin NT. En d'autres termes, un vol programmé d'avance pour un dirigeable classique est annulé ou reporté dans 70 % des cas et dans 50 % des cas pour le Zeppelin NT.

Cinq pistes d'innovation sont en conception avancée ou en expérimentation pour tenter de lever ce verrou.

- « **La vectorisation** ». Ce terme, spécifique au domaine des dirigeables, consiste à doter le dirigeable de moteurs et d'hélices plus puissants pour contrer les forces aérodynamiques très importantes qui s'appliquent sur la grande surface extérieure du dirigeable quand le vent forcé. Ces hélices actionnent le dirigeable sur trois axes, en propulsion selon l'axe longitudinal, en propulsion selon l'axe vertical et en rotation selon l'axe de lacet. Comme la puissance nécessaire pour un effet donné sur le dirigeable est proportionnelle au cube de la vitesse relative de l'air et qu'en première approche le poids d'un système de propulsion est proportionnel à sa puissance, on comprend que cette piste atteint rapidement ses limites.
- « **L'hybridation** ». Le dirigeable est maintenu volontairement en déséquilibre entre sa portance statique, c'est-à-dire la poussée d'Archimède résultant du gaz porteur emprisonné dans le dirigeable et de son poids. Ce « déséquilibre », ou poids résiduel apparent, peut varier entre 20% et 50 %, ce qui permet (théoriquement) de faire varier le poids embarqué, et ainsi de faire du transport de charges sans avoir besoin d'ajuster la poussée d'Archimède quand le poids total varie. Plusieurs prototypes ont volé en appliquant ce principe, mais aucun n'a débouché sur une commercialisation du produit. La conclusion de cette piste, qui ambitionnait au départ de



Fig. 1 - Atterrissage classique, extrait, crédit WDL/YouTube.



Dirisolar : le dirigeable tous temps à énergie solaire

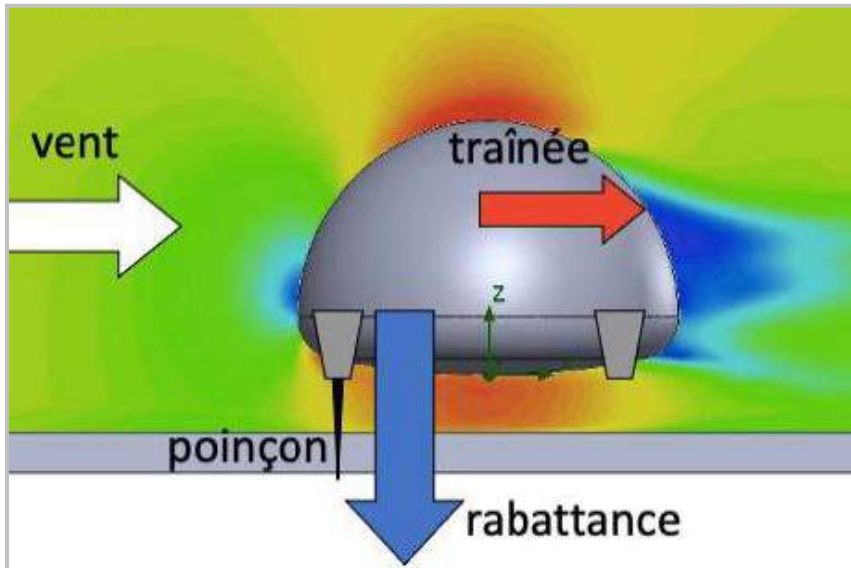


Fig. 2 - Effet de sol.

combiner les avantages des avions et ceux des dirigeables, se révèle finalement combiner les inconvénients des avions et ceux des dirigeables.

- « **La compression du gaz porteur** ». Le gaz porteur à bord est aspiré par un compresseur embarqué qui confine ce gaz porteur sous pression dans un réservoir embarqué. Plusieurs prototypes ont volé en appliquant ce principe, mais aucun n'a débouché sur une commercialisation. Le poids du réservoir sous pression est trop important.
- « **Le drone en guise de singe** ». C'est le brevet de la société Flying Whales. Sur les dirigeables classiques, un des opérateurs au sol saisit l'élingue (ou le câble) d'amarrage et monte au mât d'ancrage pour passer l'élingue dans le treuil qui va ensuite tracter le dirigeable jusqu'au mât. Dans le jargon des aéroliers, cet opérateur est appelé le « singe » parce qu'il grimpe en haut du mât. Le brevet de Flying Whales consiste à embarquer à bord du dirigeable un drone qui amène le câble d'arrimage depuis le dirigeable jusqu'au treuil situé en haut du mât d'ancrage. Ce concept n'a pas encore fait l'objet d'un prototype physique ni d'une expérimentation.
- « **Le fond plat** ». C'est le brevet de la société Dirisolar. La forme traditionnelle du dirigeable est modifiée et son fond inférieur est proche d'un plan. Cette forme génère à l'atterrissage un couple piqueur au lieu d'un couple cabreur sur les dirigeables classiques. De ce fait le besoin d'une équipe au sol disparaît, le dirigeable est plaqué au

sol par l'effet venturi qui apparaît sous le dirigeable. Le dirigeable peut s'ancrer dans un dispositif qui ne dépasse pas du sol, à l'inverse de tous les mâts d'ancrage nécessaires pour les dirigeables classiques. Cette configuration supprime également le risque de choc entre le dirigeable et le mât d'ancrage. Ce concept a fait l'objet d'un démonstrateur physique à échelle réduite (2 m de long) qui a emporté le prix d'innovation au salon du Bourget en 2011. Les très nombreuses simulations numériques effectuées depuis ont confirmé sans aucune exception l'efficacité de cette forme qui lève totalement ce verrou. [L'expérimentation sur deux maquettes de petite taille](#) met également en évidence cette propriété avantageuse et décisive du fond plat.

Les autres verrous - En supposant ce verrou « principal » enfin levé, après plus de cent ans de blocage du marché pour cette raison (depuis 1910), plusieurs verrous « secondaires » existent et sont susceptibles de grever la capacité du dirigeable à assurer de façon efficace et rentable sa mission. Ces verrous « secondaires » sont au nombre de six.

- **Verrou n° 2 : l'instabilité en vol à cause des turbulences et de variations de vitesse du vent, surtout près du sol.** La très grande prise au vent du dirigeable le rend extrêmement sensible aux légères variations de vent. Il s'ensuit des mouvements indésirables du dirigeable, notamment si la mission exige une position stationnaire précise. C'est le cas pour le chargement ou le déchargement sans atterrir, par exemple pour le LC60T de Flying Whales. C'est également le cas si le dirigeable doit approcher des cibles de près sans prendre le risque de les percuter. C'est l'exemple du diridrone de CNIM Air Space, qui ambitionne de surveiller les lignes à haute tension de RTE/EDF.

La solution qui tente les porteurs de projets français de dirigeables est d'embarquer des appareils appelés « lidar ». Ces appareils mesurent les variations de vitesse du vent à distance. Plusieurs lidars seraient ainsi capables de neutraliser les effets d'une variation de vent sur le dirigeable en commandant par anticipation les hélices du dirigeable.

Dirisolar : le dirigeable tous temps à énergie solaire

De telles commandes existent sur les bateaux de croisière modernes, elles anticipent et atténuent dans une certaine mesure les effets de roulis, sources d'inconfort pour les passagers.

- **Verrou n° 3 : l'émission de CO₂ et la consommation d'énergie non renouvelable.** Les dirigeables traditionnels utilisent des combustibles fossiles, les plus utilisés actuellement étant le gazole et l'essence. Le recours à l'énergie solaire pour les avions et les hélicoptères se heurte à la nécessité d'une grande surface de capteurs, qui est peu compatible avec l'architecture des avions ou des hélicoptères. L'exploit de l'avion Solar Impulse reste une démonstration technologique sans application commerciale probable.

Dans le cas du dirigeable, le recours à l'énergie solaire se présente de façon beaucoup plus favorable. En effet, la puissance nécessaire au vol d'un dirigeable n'a aucun rapport avec la puissance nécessaire au vol d'un avion ou d'un hélicoptère. La comparaison chiffrée de ces puissances nécessaires pour trois appareils de capacité d'emport comparable est illustrée sur le tableau ci-dessous. Les trois appareils comparés sont le Cessna 172, avion quadriplace pour le tourisme aérien (courbe grise), l'hélicoptère Écureuil (courbe orange), de cinq ou six places, largement utilisé pour le tourisme aérien (hors Europe, où la réglementation bride énormément l'usage des hélicoptères pour le tourisme) et enfin de DS 1500 de Dirisolar (courbe bleue), cinq personnes, pour le tourisme aérien. La très faible puissance nécessaire au DS 1500 dans les basses vitesses en fait un appareil idéal pour les survols touristiques, et du même coup un appareil volant avec zéro émission de CO₂ et zéro consommation

d'énergie non renouvelable.

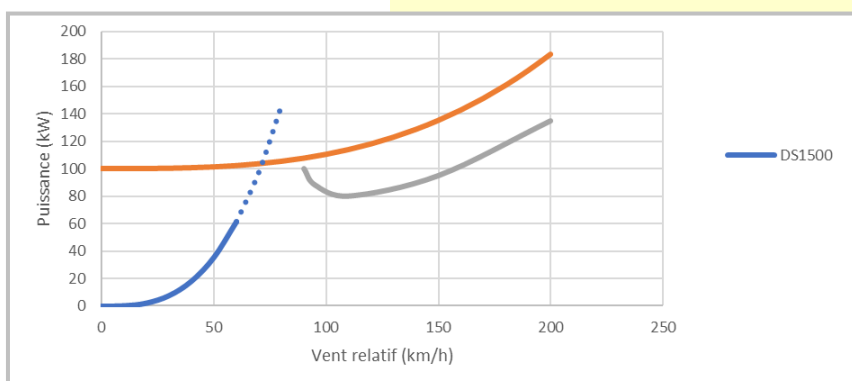
- **Verrou n° 4 : le risque panne sèche avant d'atteindre le but ou avant de pouvoir regagner la base.** Ce risque est depuis toujours inhérent à tous les appareils volants dans l'atmosphère. La conséquence de la panne sèche est le crash plus ou moins violent au sol ou en mer.

Dans le cas du dirigeable solaire, ce risque disparaît. En effet, ce dirigeable n'a pas besoin d'énergie pour rester en l'air, car il est en équilibre poids portance grâce au gaz porteur. Cet équilibre n'est cependant assuré qu'à 2 ou 3% près. En effet la poussée d'Archimède est égale au poids d'air déplacé, et ce poids varie légèrement avec la température locale. La température moyenne du gaz porteur ne s'égalise pas instantanément avec la température de l'air extérieur, qui elle peut varier assez rapidement, par exemple en passant d'une zone à l'ombre vers une zone ensoleillée. Mais le besoin en énergie pour compenser par vectorisation les écarts poids/portance est largement couvert par l'apport énergie solaire sur le long terme. L'appareil peut dériver si le vent dépasse la valeur avec laquelle la puissance captée ne peut plus contrer le vent, mais le dirigeable solaire ne « tombe jamais ». Bien évidemment, les passagers à bord ne supporteront pas une dérive très longue, et cette capacité à « ne jamais tomber » ne prend son intérêt que dans le cas d'un dirigeable solaire dronisé, c'est-à-dire pour des applications autres que le tourisme.

Ainsi peut-il être envisagé un drone dirigeable dont la durée de vol est illimitée, à condition toutefois d'admettre que ce drone puisse dériver indéfiniment, et « router » pour rejoindre n'importe quel but assigné au bout d'un temps long, temps incalculable à l'avance mais certainement fini.

Quand on examine les régimes de vent à basse altitude, avec une vue suffisamment large, on constate que les zones de vent fort sont toujours des grands tourbillons, c'est-à-dire des systèmes dans lesquels l'air fait à peu près un tour complet. Une magnifique représentation de tous les vents actuels et leur prévision à court terme

Fig. 3 - Puissances nécessaires au vol entretenu.



Dirisolar : le dirigeable tous temps à énergie solaire

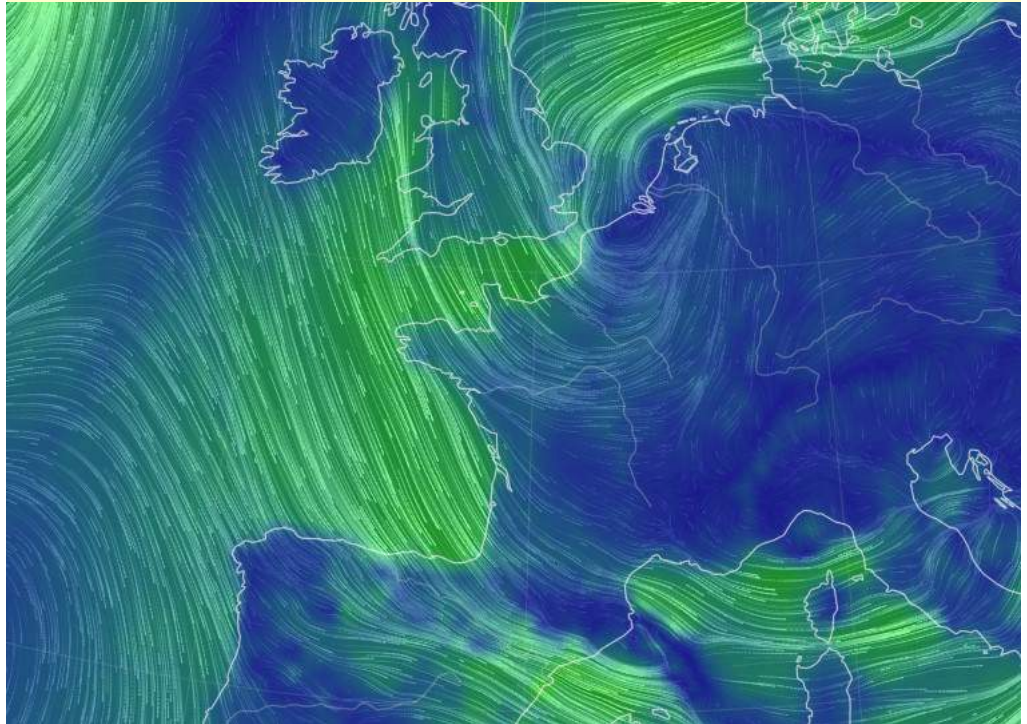


Fig. 4 - Crédit GFS / NCEP / US National Weather Service.

est fournie par le site de la NASA, via le lien suivant : <https://earth.nullschool.net/fr/>

Ce site permet de comprendre comment un dirigeable drone solaire peut naviguer indéfiniment en choisissant à chaque instant intelligemment son cap pour rejoindre in fine n'importe quelle destination. Pour le drone dirigeable solaire, lutter contre un vent trop fort pour garder une position fixe est vain, se laisser emmener par le tourbillon est la solution intelligente.

- **Verrou n° 5 : la fuite du gaz porteur.**

Le gaz porteur d'un dirigeable à gaz peut être l'hydrogène, inflammable, ou l'hélium, ininflammable. Ces deux gaz ont une molécule très petite, qui passe à travers tous les réseaux atomiques faits d'autres molécules, dont les tissus ou films des enveloppes. Les progrès importants réalisés sur les enveloppes de dirigeables ne pourront cependant probablement jamais rendre ces enveloppes exactement étanches au passage d'hydrogène ou d'hélium. Au bout d'une durée plus ou moins longue, il faut « recharger » en gaz porteur.

L'innovation consiste à recharger en hydrogène tout en volant. En effet, à basse altitude, l'atmosphère contient toujours de la vapeur d'eau, sèche quand on ne la voit pas (ciel sans nuages), saturée quand elle se mani-

feste sous forme de nuage. Mais la teneur en vapeur d'eau n'est jamais nulle à basse altitude, même au-dessus des déserts. Capter cette vapeur d'eau avec une paroi froide est un procédé connu depuis très longtemps. Aujourd'hui une paroi très froide est obtenue avec l'effet Peltier, qui nécessite une faible puissance électrique. L'eau ainsi récupérée est électrolysée à bord, et donne donc de l'hydrogène qui peut alors être réinjecté dans l'enveloppe et compenser les fuites de gaz porteur. Le dimensionnement de ce dispositif a été calculé par Air Liquide dans le cas du DS 1500. Le poids total du système est inférieur à 30 kg. Ce poids est totalement acceptable pour le devis de poids d'un DS 1500 solaire, qui est de 2000 kg.

- **Verrou n° 6 : le bruit.** Tous les appareils « plus lourds que l'air » sont régulièrement critiqués pour le bruit généré par leurs propulseurs et leurs hélices. Le malheur veut qu'une hélice soit d'autant plus bruyante que son rendement est élevé. Pour les plus lourds que l'air, la performance, et notamment la distance franchissable, est directement liée au bon rendement des hélices. Des niveaux de bruit de 70 à 95 db sont les plus courants sur les « plus lourds que l'air ».

Il existe des hélices à bas rendement qui sont peu bruyantes. Par exemple,

Dirisolar : le dirigeable tous temps à énergie solaire

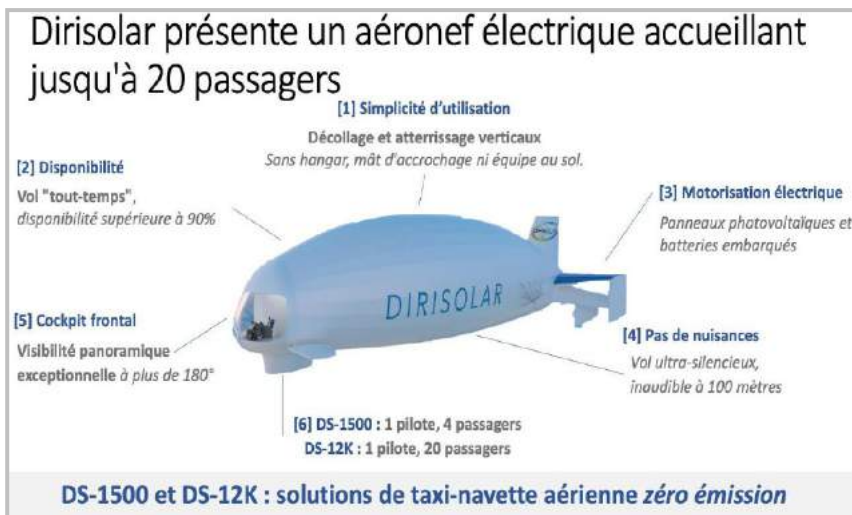


Fig. 5 - Projet Dirisolar.

Électrivia a conçu des hélices dont le bruit ne dépasse pas 47 db. Sur le dirigeable solaire, un rendement élevé des hélices n'est pas une nécessité, puisqu'il suffit d'avancer moins vite pour rester toujours en excédent d'énergie embarquée. En outre les moteurs électriques brushless sont peu bruyants. Ainsi équipé, le DS 1500 est inaudible à 200 mètres. Même d'assez près, on le voit, énorme, mais on ne l'entend pas.

- **Verrou n° 7, un verrou économique : le prix de l'heure de vol.** Le prix des billets pour un vol sur les rares dirigeables en service commercial est très élevé, entre deux cents et quatre cents euros. Ceci résulte surtout du verrou n°1. En effet une équipe au sol nombreuse a un coût élevé, et les aléas de disponibilité génèrent aussi des coûts importants. À cela il faut ajouter le désagrément de l'annulation des vols, et les coûts indirects générés par ces annulations. Les opérateurs annulant les vols reportent ces vols, mais ne les remboursent pas, en règle générale.

Avec la levée du verrou n°1, le coût d'utilisation du DS 1500 chute significa-

tivement.

De plus, le coût récurrent de l'énergie nécessaire est faible, c'est le coût de l'énergie solaire captée une fois amorti le système de capteurs solaires. Les batteries ont une durée de vie limitée, et donc un coût de remplacement qui doit s'amortir et qui contribue donc au coût de l'heure de vol. Mais l'ensemble de ces coûts est limité.

Le calcul complet de l'heure de vol pour une dirigeable solaire type DS 1500 est inférieur à 100 €, alors qu'il est supérieur à 1000 € pour un hélicoptère de capacité comparable.

Conclusion - Rarement dans l'histoire des machines volantes, un problème a suscité autant d'efforts que la problématique des dirigeables. Aujourd'hui, les débats sur l'intérêt des dirigeables sont toujours aussi passionnés. Or le plus souvent ces débats ne portent pas sur les verrous, mais sur l'usage possible de ces machines. Et donc ces débats sont et resteront stériles tant que l'identification des verrous ne fait pas d'abord l'objet d'une analyse rationnelle et partagée, et ensuite l'objet d'une recherche très méthodique sur les possibilités de les faire sauter. Tel était l'objectif de cette présentation.

Le dirigeable solaire est la concrétisation du rêve de Jules Verne en 1886. Aujourd'hui, la faisabilité de cet appareil extraordinaire est certaine. Nous espérons que sa réalisation viendra très vite.

Philippe Tixier, novembre 2021.



En visiophonie le mardi 16 novembre 2021 de 18h30 à 20h00

1. Bonny Simi, Joby's head of air operations and people, <https://www.mckinsey.com/industries/aerospace-and-defense/our-insights/rideshares-in-the-sky-by-2024-joby-aviation-bets-big-on-air-taxis>.

2. Etude "Out-of-the-Box" et projet Create <https://www.acare4europe.org/sites/acare4europe.org/files/document/Create-Final-Report-October-2010.pdf>.

" *Imaginez-vous vous réveiller le matin et penser que vous pourriez utiliser votre voiture pour vous rendre à votre travail, mais cela peut prendre une heure, une heure et demie. Au lieu de cela, vous ouvrez simplement une application. Une voiture vient vous chercher et vous conduit à un hélicoptère à cinq minutes. Vous volez dans l'un de nos avions électriques à décollage et atterrissage verticaux (eVTOL). Le vol dure dix minutes. A l'autre bout, une voiture vous attend. L'ensemble du trajet est fluide, pratique et abordable"*.

Ce court extrait d'un entretien de Bonny Simmi de Joby Aviation avec Robin Riedel de McKinsey en novembre¹ 2021 donne une idée des points forts, des contraintes et des faiblesses du transport intra-urbain par eVTOL pour les années à venir.

Plusieurs types de mobilité aérienne peuvent être envisagés, à l'intérieur d'une ville (Urban Air Mobility), en régional (Regional Air Mobility) ou en interurbain, mobilités globalement dénommées « Advanced Air Mobility (AAM) ». Dans l'exemple de Simmi, le vol considéré d'une durée de 10 minutes est un vol intra-urbain pour lequel il est nécessaire d'utiliser un avion à décollage et atterrissage verticaux qui ne pourra être opéré qu'à partir d'infrastructures spécifiques telles

qu'un hélicoptère, aussi utilisé par des hélicoptères, ou d'infrastructures dédiées UAM appelées vertiports. Les segments de voyage complémentaires au vol sont faits en véhicule terrestre.

L'idée de l'aéromobilité urbaine n'est pas nouvelle. Dès 2007, la Commission Européenne a lancé un programme d'études² pour générer des idées sur l'évolution du transport aérien futur.

Le transport aérien porte à porte VTOL était au nombre des idées proposées par l'étude Out-Of-The-Box (Figure 1) et deux projets de transport aérien personnel furent lancés (PPlane et Mycopter) en 2009 et 2011. En 2010, la conclusion de la conférence « Aviation Unleashed » organisée par la NASA et qui réunissait au Langley Research Center à Hampton (VA, USA) de nombreux chercheurs et industriels américains et européens, dont les équipes des projets MyCopter et PPlane, soulignait que « les nouvelles technologies étaient en mesure d'augmenter considérablement l'utilisation de l'espace aérien en permettant le fonctionnement sûr, productif et efficace d'avions ayant divers niveaux d'automatisation et utilisés soit à la demande, soit à horaire fixe à l'avance ». La mobilité aérienne avancée était née.

Fig. 1 - Etude Européenne "Out-Of-The-Box".



eVTOL et autres taxis aériens

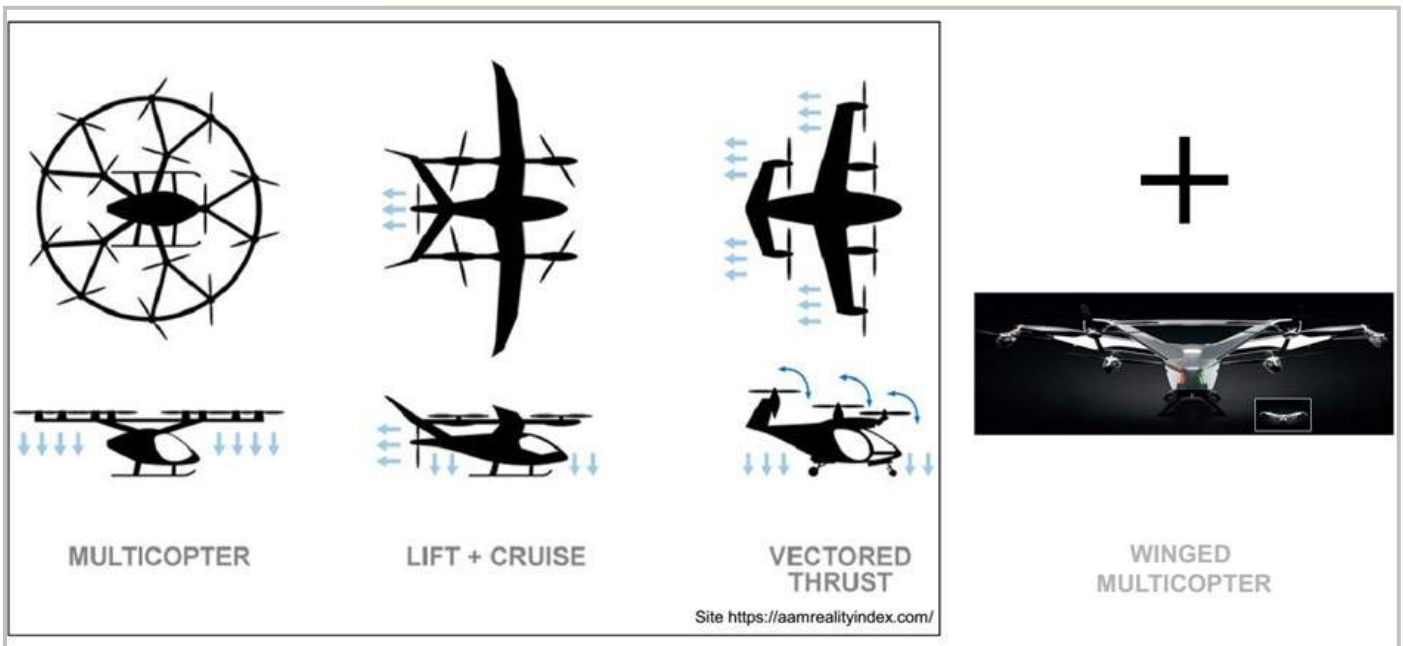


Fig. 2 - Variantes d'eVTOL.

En 2016, la société UBER publie le Livre Blanc « Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation », document fondateur pour la mobilité aérienne urbaine. Le constat que les Progrès technologiques rendent possible la construction d'une nouvelle classe d'aéronefs VTOL électriques, les "eVTOL", ouvrait la voie aux opérations d'aéronefs en environnement urbain. Ces eVTOL, moins bruyants, moins polluants et plus sûrs que les hélicoptères classiques, promettent d'être les vecteurs de ce nouveau mode de transport moyennant la mise en place d'infrastructures urbaines de décollage et d'atterrissage équipées d'installations pour recharger leurs batteries, la définition d'un concept d'opérations pour leur vol à basse hauteur en milieu urbain et l'entraînement de pilotes en attendant qu'ils puissent être entièrement automatisés.

La publication de ce document, suivie de trois Uber Elevate Summits en 2017, 2018 et 2019, a généré un enthousiasme frénétique pour l'UAM, ce qui a conduit bon nombre d'industriels à proposer un continuum d'approches de concepts d'aéronefs multirotores fixes, multirotores orientables, avec des ailes ou sans aile, faisant passer le nombre de projets d'eVTOL de 150 à plus de 500 entre 2018 et 2021. Un événement important survient en décembre 2020, Uber vend sa division UAM au constructeur Joby Aviation. Le domaine UAM perd alors son systémier resté indépendant des solutions de vecteurs aériens et assurant une vision d'ensemble

du système, il s'ensuit un foisonnement de propositions d'eVTOL, sans cahier des charges commun.

Les projets d'aéronefs se classent en quatre catégories (Figure 2). Dans la première, les propulseurs sont utilisés à la fois pour la sustentation et pour la propulsion horizontale (poussée orientable). Dans la deuxième, les propulseurs utilisés pour le vol horizontal sont complètement indépendants de ceux utilisés pour la sustentation, il n'y a pas de poussée orientable et une aile contribue à la portance en croisière. Les multicoptères sans voilure constituent la troisième catégorie, ils n'ont pas de propulseur spécifique pour le vol horizontal, les propulseurs assurent une sustentation tandis que le vol horizontal est obtenu par changements d'assiette et d'inclinaison de la cellule. La quatrième et dernière catégorie d'eVTOL est constituée des multicoptères équipés d'une voilure qui contribue à la sustentation en croisière.

La plupart des eVTOL ont une capacité de 3 ou 4 passagers et un pilote, ce qui leur permet de correspondre aux conditions spéciales émises par l'EASA valides pour une masse maximale au décollage de 3175 kg.

Les autorités aéronautiques chargées d'assurer la sécurité (FAA et EASA notamment) ont en effet défini les exigences de navigabilité et environnementales pour atteindre une certification et ont détaillé comment se conformer à ces exigences. Certains constructeurs ont pris en compte ce premier cadre réglementaire pour leur

eVTOL et autres taxis aériens



projet.

En parallèle aux études d'aéronefs, d'autres acteurs tels que Skyports se sont attachés à proposer des concepts de vertiport tandis que des recherches étaient menées pour définir des concepts d'opération dans l'espace aérien. La FAA en a notamment proposé une première version en juillet 2020 et prévoit la publication d'une version 2.0 au premier trimestre 2022. De son côté, l'Europe a lancé le projet Corus-XUAM en janvier 2021 pour identifier les services U-Space utiles aux opérations UAM et UAS dans l'espace aérien.

L'acceptabilité sociale de l'UAM est aussi une préoccupation majeure des autorités dans la mesure où il faut s'assurer que les citoyens ont une attitude positive vis-à-vis de ce nouveau moyen de transport et qu'ils y trouvent un intérêt. L'étude menée par l'EASA sur ce sujet montre que la notion d'intérêt général est un facteur déterminant pour son acceptation. Les principaux bénéfices attendus sont une connectivité plus rapide, plus propre et plus étendue tout en limitant l'exposition des utilisateurs et de la population aux risques (sécurité, bruit, sûreté et impact environnemental). L'espoir des citoyens est que l'UAM soit une bonne option pour améliorer l'empreinte environnementale locale grâce à la réduction de la congestion du trafic urbain et à une meilleure qualité de l'air local sans pour autant que l'UAM ait un impact négatif sur la faune. Les citoyens européens ont par ailleurs une confiance limitée dans la sû-

reté et la "Cyber Security" et sont exigeants : ils souhaitent que l'intégration de l'UAM dans les infrastructures aériennes et terrestres existantes respecte la qualité de vie des habitants et le patrimoine culturel des vieilles villes européennes. L'UAM ne laisse donc pas indifférent, les résidents et les autorités locales se sentent directement concernés par son déploiement et souhaitent s'engager et jouer un rôle actif dans sa mise en œuvre.

Pour ce qui concerne le marché, la NASA a commandé deux études sur la mobilité aérienne, elles se sont terminées à la fin de l'année 2018. L'étude de Booz Allen Hamilton a conclu que le marché était viable pour une navette aéroport et pour le taxi aérien mais qu'il ne l'était pas pour l'usage ambulance aérienne. La deuxième étude, dirigée par Crown Consulting Inc. (avec McKinsey & Co) a conclu à la viabilité en 2030 de la livraison de colis (dernier kilomètre) et du métro aérien sur des routes prédéterminées à horaire régulier. En revanche, le taxi aérien (trajet à la demande, "porte à porte") est considéré comme improbable en 2030 dans cette étude.

Notons que l'automatisation totale de l'aéronef paraît être indispensable à la viabilité économique de l'UAM. En effet, selon une étude de McKinsey, la présence à bord d'un pilote double le coût du voyage. L'exploitation des eVTOL se fait à partir d'infrastructures dont il va falloir financer la construction et l'exploitation tandis que leur circulation aérienne va faire appel à un système de gestion de

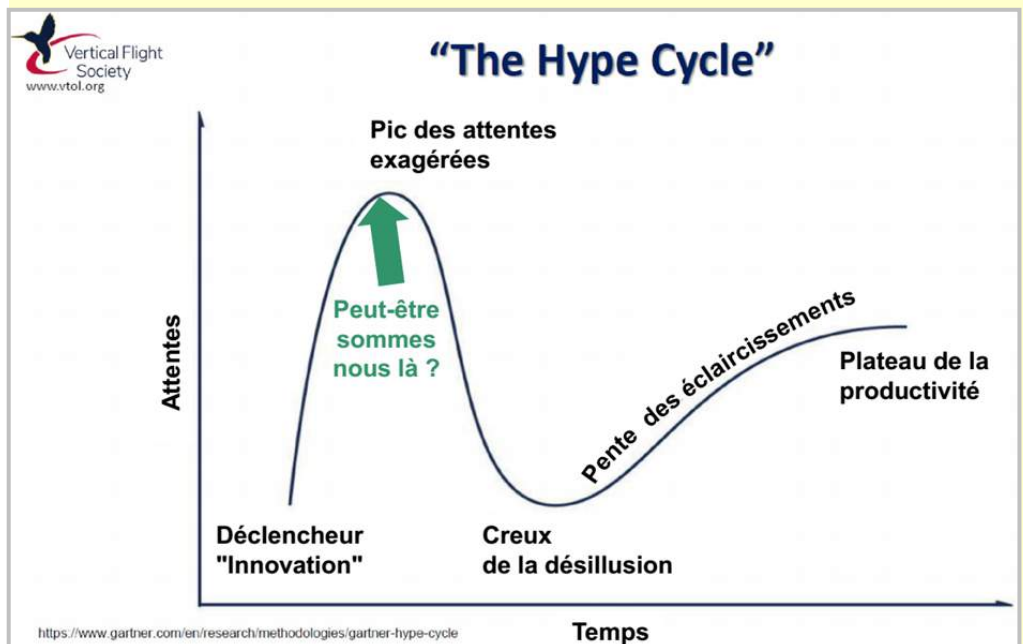
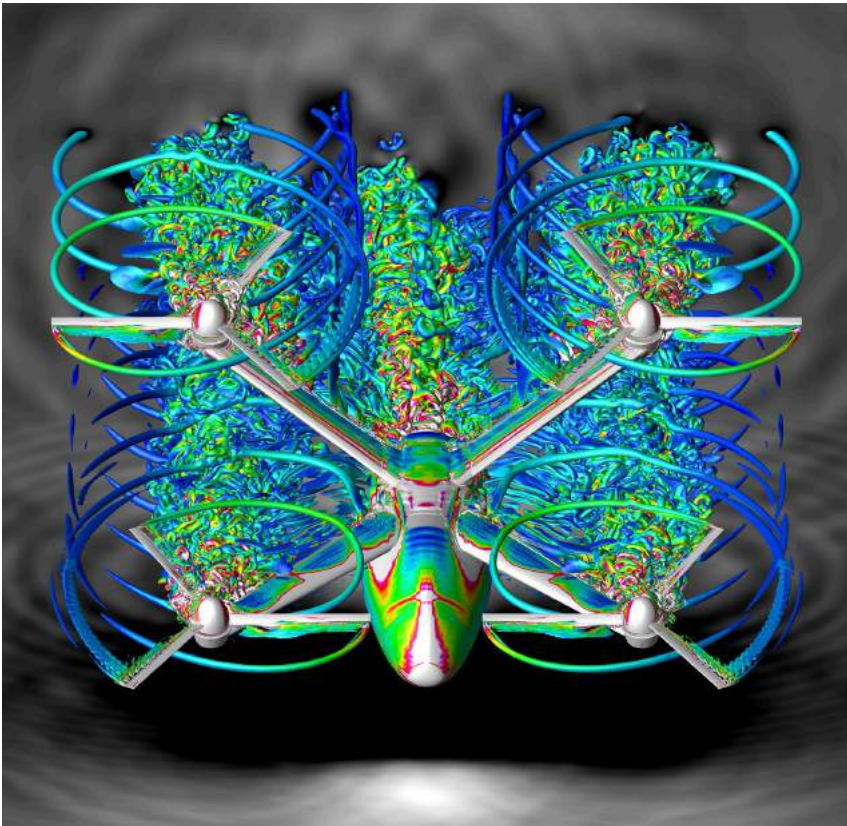


Fig. 3 - Le Cycle Hype.

eVTOL et autres taxis aériens



© NASA/Patricia Ventura Diaz.

© Volocopter.

trafic aérien qu'il faudra également financer, vraisemblablement au moyen de redevances. La viabilité économique est à analyser avec soin, elle constitue, avec le débit maximal possible de passagers de l'UAM, un frein voire un obstacle au développement de ce mode de transport.

En novembre 2021, nous pourrions bien

être au sommet du cycle du Hype, au bord d'un fossé de désillusion (figure 3) pour les eVTOL. En effet, la lecture attentive du texte du début de cet article nous suggère qu'il « suffit » d'habiter et d'avoir son bureau à cinq minutes en voiture d'un vertiport et d'accepter deux correspondances dans son trajet quotidien domicile-travail pour bénéficier pleinement de la mobilité aérienne urbaine...

Terminons par une note d'optimisme, la mobilité aérienne avancée ne concerne pas seulement les eVTOL, il est aussi possible de concevoir des avions électriques à décollage et atterrissage conventionnels (CTOL) ou courts (STOL) opérés économiquement à partir d'aérodromes existants pour des trajets interurbains courts.

**Claude Le Tallec,
novembre 2021.**



Fédération RSA : l'aviation populaire toujours bien vivante

Par Dominique Simon, président de la fédération RSA
En visiophonie le mardi 14 décembre 2021 de 18h30 à 20h00



Fig. 1 - HM 14, Henri Mignet et le Pou du Ciel d'avant-guerre.
Crédit collection Christian Noël-Brochet (Planeurs et avions Maurice Brochet, Cépaduès).

L'aviation populaire des années 1930 est une page de l'histoire aéronautique française qui continue à s'écrire. Les quelques dizaines de pionniers constructeurs amateurs regroupés autour de Henri Mignet dans le "Réseau des Amateurs de l'Air" en ont rédigé à l'époque le premier chapitre avec leurs "avionnettes" et ils ont eu des centaines de successeurs qui ont fabriqué et restauré des milliers d'aéronefs.

Leur existence n'a pas été facile dans l'immédiat après-guerre, car alors la priorité n'était pas aux loisirs mais à la remise sur pieds du pays ; les constructeurs amateurs d'aéronefs se virent alors imposer des règles de certification draconiennes, similaires à celles des aéronefs industriels, ce qui mit le mouvement pratiquement à l'arrêt en 1946. En réaction, les constructeurs se groupèrent dans une association qu'ils appelèrent le "Réseau du Sport de l'Air" avec pour objectif de revenir à des règles bien plus adaptées, comme celles dont ils bénéficiaient avant-guerre. Grâce à un travail de construction bien mené avec les autorités de l'aviation civile, ils y parvinrent en 1951 et dès lors l'aviation amateur reprit son essor interrompu par la guerre, symbolisé par la série des fameux Jodel de Joly et Delemontez que l'on trouve encore sur tous les terrains, accompagnés de beaucoup d'autres : les Druine, Gatard, Piel, Jurca... dont plu-

sieurs ont été produits en série ou ont eu une descendance industrielle.

Parallèlement, d'autres passionnés commencèrent à remettre en état des machines historiques pour les faire revivre en vol ; une réglementation propre aux aéronefs de collection vit le jour dans les années 1970. Les collectionneurs se groupèrent au sein de la Ligue Française des Aéronefs de Collection, qui rejoignit le Réseau du Sport de l'Air en 2004, formant ainsi la Fédération RSA, aujourd'hui forte de 2400 membres.

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, il n'y a pas de formalités complexes à remplir pour construire et faire voler son propre aéronef en France, à condition de respecter le principe simple, qui régit la réglementation des aéronefs de construction amateur ou restaurés : le constructeur ou le restaurateur, s'il possède la connaissance, la compétence et les moyens nécessaires, est autorisé à construire, restaurer ou entretenir l'aéronef de ses rêves.

Pour la construction sur plans d'un modèle d'aéronef qui a déjà volé, il faut simplement indiquer quel numéro de licence a été accordé par le concepteur et s'engager à respecter les plans. Ensuite, il suffit d'un peu d'habileté manuelle, de quelques économies, de beaucoup de patience et d'énormément de passion.

Il est même possible de concevoir son propre aéronef, d'ailleurs l'histoire du RSA compte des dizaines de concepteurs qui ont imaginé et réalisé une grande variété de machines volantes, leur permettant parfois de tester des formules originales. Il faut bien sûr posséder de bonnes connaissances en matière de résistance des matériaux et d'aérodynamique, et la Direction Générale de l'Aviation Civile demande au concepteur du prototype de fournir un dossier de calcul de la machine.

Durant la construction ou la restauration, le contrôle de l'Autorité se limite à vérifier que les critères de capacité de l'amateur sont remplis à l'occasion d'une ou deux visites d'inspection, la dernière ayant lieu

RSA - L'aviation populaire toujours bien vivante



en fin de travail lorsque l'aéronef est prêt pour son premier vol. Si l'inspecteur juge la réalisation satisfaisante, il délivre un laissez-passer permettant de procéder aux premiers essais de la machine. Après avoir réalisé quelques "sauts de puce" sur la piste pour tester les commandes et confirmer qu'il n'y a pas d'anomalie, l'amateur effectue le premier vol de son aéronef, qui restera pour toujours un moment d'émotion intense ! Les vols suivants permettent de faire les réglages et les petits ajustements qui peuvent se révéler nécessaires. À la fin du programme d'essais, un rapport est établi qui sera inclus dans le dossier technique de la machine.

Le constructeur reçoit alors son certificat de navigabilité restreint, document par lequel l'Autorité certifie que l'aéronef est navigable (c'est-à-dire apte à circuler dans l'espace aérien) mais que toutefois son utilisation est soumise à quelques restrictions, notamment l'interdiction d'utiliser l'aéronef pour effectuer du travail aérien ou du transport public. Cette certification étant nationale, le franchissement des frontières nécessite l'accord des pays étrangers survolés, mais de nombreux accords bilatéraux ont été établis entre les états européens.

Beaucoup de passionnés dans le monde nous envient cette réglementation "adaptée" ou "proportionnée", soit parce que leur pays leur impose les mêmes règles complexes que pour les constructeurs industriels, soit parce que cette activité y est tout simplement interdite.

La belle vitalité de la construction amateur et de la restauration d'aéronefs en France s'est traduite en près d'un siècle

par la mise en vol de milliers de machines, dont il reste une flotte en état de vol parmi les plus importantes en Europe :

- 2200 aéronefs construits sur plan ou à partir de kits, du petit monoplace de 80 kg à vide au 5 places de voyage à train rentrant, en passant par des avions de voltige, des ballons ou des hélicoptères ;
- 400 aéronefs restaurés, du petit biplan des débuts de l'aviation au mythique DC3 (figure 2) du débarquement, en passant par des planeurs de type ailes volantes ou des avions de chasse à réaction de la guerre froide.

Ces 2600 aéronefs représentent une proportion importante de la flotte française d'aviation légère qu'on peut estimer à environ 10 000 machines. D'ailleurs, beaucoup d'aéro-clubs disposent d'un avion de construction amateur, typiquement un Jodel, biplace économique, qui sert à la formation des élèves pilotes.

Une question souvent posée au constructeur concerne le temps qu'il lui a fallu pour achever son aéronef : la réponse peut varier de quelques années à plus de 10 ans, selon le temps disponible et la complexité de la machine. On peut compter une moyenne de 5 ans pour un avion biplace mais on peut trouver certains perfectionnistes qui travaillent depuis 20 ou 30 ans sur leur chef d'œuvre. La construction peut être accélérée par l'achat d'un "lot matière", voire de kits à assembler, qui facilite la fastidieuse recherche des matériaux ou la réalisation de pièces mécaniques complexes.

Une autre question fréquente concerne le prix de revient : les constructeurs ont coutume de dire que leur avion leur a

Fig. 2 - Douglas DC3 restauré par les mécanos d'Air France, crédit association France DC3.



RSA - L'aviation populaire toujours bien vivante



Fig. 3 - Le Rutan Long-Ez, F-PRDS de Dominique Simon, crédit photo RSA.



coûté le prix d'une voiture neuve : bien sûr, la fourchette est large en fonction de la taille et la complexité de la machine, de son équipement, de la possibilité d'utiliser des éléments récupérés. On peut équiper son tableau de bord d'instruments d'occasion classiques pour quelques centaines d'euros, mais il est aussi possible de jouer la modernité en installant un "glass cockpit" moderne qui peut coûter à lui seul le quart du prix de revient de l'aéronef.

La Fédération RSA est depuis peu un établissement d'utilité publique, en reconnaissance pour le bénéfice social de ses activités et de ses actions en faveur des jeunes : chantiers de construction en milieu scolaire, cours du Brevet d'Initiation Aéronautique, ou des handicapés,

conception et construction d'avions adaptés au pilotage pour des paraplégiques. La construction amateur et la restauration d'aéronefs sont avant tout une passion qui permet aux petits et grands enfants de concrétiser leurs rêves. Ce sont aussi des écoles de rigueur et de responsabilité qui contribuent à l'accomplissement des passionnés qui les pratiquent. Combien de jeunes ont trouvé leur équilibre personnel et leur voie professionnelle grâce à cette passion !

Dans le contexte actuel de prise de conscience de la finitude des ressources et de la dégradation de notre environnement, les amateurs passionnés du RSA ne se résignent pas à abandonner leurs rêves d'aviation, bien au contraire ils travaillent à imaginer et expérimenter de nouveaux concepts ou de nouvelles formes de propulsion économes en énergie, plus silencieuses. Le cadre réglementaire français de la construction amateur va certainement permettre la mise au point de nouveaux aéronefs, dont certains auront peut-être une descendance industrielle, comme cela a souvent été le cas dans le passé.

L'aviation populaire est toujours bien vivante en 2022 !

**Dominique Simon,
février 2022.**

Site RSA : <https://www.rsafrance.com/>



Fig. 4 - Le Colombar Cri-Cri aux couleurs du RSA, crédit photo RSA.



Les Conférences du Groupe Ile-de-France

LES MARDIS DE L'AÉRONAUTIQUE ET DU SPATIAL
RECHERCHE, CONCEPTION, FABRICATION, PROJETS, ETUDES, ESSAIS...

Association Aéronautique et Astronautique de France

www.3af.fr

AÉRODYNAMIQUE DES CONFIGURATIONS PARTICULIÈRES*

Par Gilles Joubert, consultant et Aérodynamique, membre 3AF

Une conférence organisée par la 3AF à la Mairie du XV^e le **MARDI 14 JANVIER 2020** à 18h30
31 rue Pécelet - 75015 Paris

Les configurations aérodynamiques (domaines de vol ou de fonctionnements...) et sont le plus souvent à simuler. Leurs études constituent un défi pour le simulateur et les modèles aérodynamiques destinés à mieux comprendre les phénomènes.

INSCRIPTION OBLIGATOIRE
<https://www.3af.fr/evene>



Les Conférences du Groupe Ile-de-France

LES MARDIS DE L'AÉRONAUTIQUE ET DU SPATIAL
RECHERCHE, CONCEPTION, FABRICATION, PROJETS, ETUDES, ESSAIS...

Association Aéronautique et Astronautique de France

www.3af.fr

EXPLORER LA SURFACE DE LA LUNE : LES ASPIRATIONS DE L'AGENCE SPATIALE EUROPÉENNE

Par Bérengère Houdou, responsable des opérations lunaires de surface à l'Agence Spatiale Européenne

Une conférence en visio organisée par la 3AF Ile-de-France de la 3AF le **MARDI 13 AVRIL 2021** à 18h30

La Lune est de nouveau dans l'actualité des acteurs privés de par le monde. La NASA s'appuyant sur les technologies développées par la Russie, sur la mission robotique Artemis prévoit de tester prochainement des échantillons de sol lunaire.



Les Conférences du Groupe Ile-de-France

LES MARDIS DE L'AÉRONAUTIQUE ET DU SPATIAL
RECHERCHE, CONCEPTION, FABRICATION, PROJETS, ETUDES, ESSAIS...

Association Aéronautique et Astronautique de France

www.3af.fr

eVTOL ET AUTRES TAXIS AÉRIENS

Par Claude Le Tallec, ingénieur ex-chargé de mission à l'ONERA.

Une conférence en visio organisée par le Groupe Ile-de-France de la 3AF en partenariat avec la Mairie du 15^e le **MARDI 16 NOVEMBRE 2021** de 18h30 à 20h

Les aéronefs électriques à décollage et atterrissage verticaux ou eVTOL seraient-ils une solution pour désengorger les transports terrestres urbains ? Cette conférence permettra d'évaluer la faisabilité technique de ces aéronefs pilotés ou autonomes, d'analyser les perspectives d'intégration dans le trafic aérien actuel ainsi que d'étudier leur viabilité socio-économique dans la perspective des JO 2024.

INSCRIPTION OBLIGATOIRE sur le site 3AF <https://www.3af.fr/agenda/evtol-et-autres-taxis-aeriens-2150>

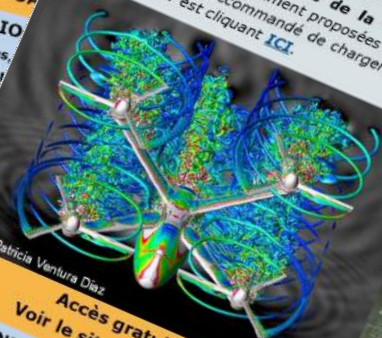
Suite à la crise sanitaire de la Covid-19, les conférences du groupe 3AF Ile-de-France sont exclusivement proposées en visio via le service de téléconférence ZOOM. Il est recommandé de charger préalablement l'environnement ZOOM sur votre ordinateur en cliquant ICI.



Accès gratuit
Voir le site 3AF

PROCHAINES VISIOS
Hydrofoils et hydroptères,
Ambiances électromagnétiques

3AF - ASSOCIATION AÉRONAUTIQUE ET ASTRONAUTIQUE DE FRANCE



© NASA/Patricia Ventura Diaz



© Volocepter

Accès gratuit sur inscription, membres et non membres 3AF
Voir le site 3AF à l'adresse : <https://www.3af.fr/evene>

PROCHAINES CONFÉRENCES 3AF ILE-DE-FRANCE
La construction amateur, par Dominique SIMON, Président de la Fédération RSA, mardi 14 décembre 2021, 18h30/20h.
L'histoire de l'hydrogène, par Jean Delacarte, ancien directeur d'Air Liquide, janvier 2022, 18h30/20h.
3AF - ASSOCIATION AÉRONAUTIQUE ET ASTRONAUTIQUE DE FRANCE, 8 RUE GAULLE, 75118 PARIS - GROUPE 3AF ILE-DE-FRANCE
<https://www.3af.fr> - <https://www.3af.fr/groupe-regional/idf>

Les Conférences du Groupe 3AF Ile-de-France à la mairie du 15^e



Venez enrichir et partager vos compétences

**Au sein de nos Commissions Techniques, des Groupes Régionaux et du Comité Jeunes
Avec nos colloques et conférences au meilleur niveau mondial. Avec nos publications
régulières : études thématiques, Lettre 3AF, Gazettes régionales**

3AF, Association Aéronautique et Astronautique de France

La société savante de l'aéronautique et de l'espace

Plus de 70 ans de passion

L'association française de référence internationale

Venez vivre votre passion avec nous

Rejoignez plus de 1500 membres et 60 sociétés ou institutions aérospatiales

Partagez et échangez avec des passionnés d'aéronautique et d'espace

Vous êtes étudiant ? 3AF vous introduit dans le milieu aéronautique et spatial