

## CONFÉRENCES DU SECOND SEMESTRE 2022

## L'hydrogène dans tous ses états

Par Jean Delacarte, le 13 septembre 2022

L'hydrogène, principal constituant des étoiles et des gaz interstellaires, fait l'objet de vifs intérêts dans un contexte où l'humanité recherche des solutions de substitution aux produits fossiles carbonés responsables de l'effet de serre et de dérèglements climatiques. Après avoir décrit les particularités de l'hydrogène, Jean Delacarte fera le point sur les gisements, les solutions d'obtention, les utilisations, les perspectives et répondra à vos questions.



Crédit AIRBUS

## La filière des lanceurs Ariane

Par Roger Vignelles, le 18 octobre 2022

Lancé en 1973 par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) pour donner à l'Europe les moyens de mettre en orbite ses propres satellites, Ariane devenait le lanceur de référence des satellites civils huit années après un premier lancement réussi. Roger Vignelles vous exposera les différentes étapes ayant conduit à ce succès.



Crédit CNES

## Propulsion Fusée Hybride

Par Jean-Yves Lestrade, le 15 novembre 2022

La propulsion hybride combine généralement un oxydant liquide avec un combustible solide. Bien qu'ayant des inconvénients comme la variation des performances propulsives au cours du temps, ce type de propulsion présente des avantages en termes de coûts et de flexibilité, la rendant ainsi compétitive vis-à-vis des moteurs fusée solide et liquide pour des applications comme le tourisme spatial ou les nano-lanceurs.

Crédit ONERA - Moteur hybride en fonctionnement.



# INFORMATIONS GÉNÉRALES

## Forum des Adhérents

La Gazette IdF est l'un des éléments fédérateurs du groupe Ile-de-France de la 3AF.

Pour que ce bulletin joue pleinement ce rôle, un échange convivial avec les adhérents est essentiel.

Le Forum des adhérents a pour but de **recueillir vos questions, vos informations et vos suggestions**, par courriel : [3af.idf@orange.fr](mailto:3af.idf@orange.fr).

## Appel aux adhérents

Suite à l'enquête "Adhérents" proposée au premier semestre 2020, le groupe Île-de-France et son Antenne Jeunes sollicitent leurs adhérents pour diversifier et élargir l'offre de **visites techniques**. Si vous avez des idées de visites, si vous connaissez des personnes qui pourraient proposer des visites, **n'hésitez pas à nous contacter à l'adresse email [3af.idf@orange.fr](mailto:3af.idf@orange.fr)**.

N'hésitez pas également à proposer des articles, des sujets de conférences et pensez à l'intérêt de **rejoindre les commissions techniques** de la 3AF.

## 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](mailto:gestionmembres@aaaf.asso.fr)

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

## Contact Groupe Ile-de-France

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

Email : [3af.idf@orange.fr](mailto:3af.idf@orange.fr)

Tél 01 80 38 62 01 - Fax 01 80 38 62 69

## SOMMAIRE

**03 Éditorial** : agression militaire en Ukraine.

### 04 Résumés de conférences

- **Explorer la surface de la Lune : les aspirations de l'Agence Spatiale Européenne.** 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...
- **Largage dans le ciel du CSG : les essais en vol du projet ALTAIR de lancement aéroporté.** 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...

**12 Dossier** : aviation légère électrique : pile(s) à combustible ou batteries ? ... le recours à l'hydrogène, souvent évoqué en aéronautique, nécessite de fournir quelques ordres de grandeur pour quantifier et relativiser son intérêt...

**19 Laboratoire - Organisme** : l'Institut Aérotechnique de Saint-Cyr-L'École, un centre d'essais public rattaché au Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris et à sa Direction déléguée à la Recherche.

### 22 Publications & Courriers des lecteurs

### 23 Rétro-Agenda

**24 Agenda** : conférences, séminaires.

## Les Commissions Techniques 3AF (voir le site en cliquant [ICI](#))

- |  |  |  |
|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Aérodynamique</li><li>• Aviation Commerciale</li><li>• Aviation Légère et Machines Dérivées</li><li>• Drones</li><li>• Énergétique</li><li>• Essais</li><li>• Hélicoptères et VTOL</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Intelligence Stratégique et Prospective (CISP)</li><li>• Matériaux</li><li>• Missiles Tactiques</li><li>• Propriété Intellectuelle</li><li>• Propulsion (aéronautique et spatiale)</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Phénomènes Aérospatiaux non identifiés (SIGMA2)</li><li>• Stratégie et Affaires Internationales (CSAI)</li><li>• Structures</li><li>• Systèmes Optroniques</li><li>• Transport Spatial</li></ul> |
|--|--|--|

**À VOIR, LE NOUVEAU SITE WEB DE L'ASSOCIATION AÉRONAUTIQUE ET ASTRONAUTIQUE DE FRANCE, UN SITE REVISITÉ POUR SIMPLIFIER LES ACCÈS À L'INFORMATION ET FACILITER LA COMMUNICATION.**

**Adhésions et paiement des cotisations 3AF** : n'oubliez pas de régler votre cotisation pour 2022. Ce règlement est nécessaire pour voter aux assemblées générales et recevoir toutes les publications proposées par l'Association (La Lettre...). Pour connaître les modalités de paiement de la cotisation ainsi que les barèmes ou mettre à jour vos coordonnées, vous pouvez accéder à votre compte 3AF en ligne sur le site : <https://www.3af.fr/espace-prive/paiement>. Le règlement s'effectue par carte bancaire sur le site 3AF qui vous permettra d'éditer une facture.

#### AGRESSION MILITAIRE EN UKRAINE

L'agression militaire lancée le 24 février 2022 par la Russie contre l'Ukraine est une tragédie humaine avec des conséquences importantes pour l'industrie, les transports et la recherche.

**Au niveau de l'industrie aéronautique**, les livraisons de pièces détachées Airbus pour les avions déjà livrés et des 13 A350 restant à livrer à Aéroflot (9 ont déjà été livrés) sont reportées. À ces mesures, s'ajoute la suspension de l'activité du centre d'ingénierie ECAR (Engineering Centre Airbus Russia) de Moscou [1].

**Côté transports**, l'espace aérien européen est fermé à tous les aéronefs de propriété russes et les exportations des biens et des technologies dans le secteur aérien, civil et militaire, sont suspendues [2-3].

**Concernant l'espace**, Moscou a suspendu ses lancements sur la base de Kourou et a rapatrié tout son personnel ; les lancements du satellite français CSO-3 prévu en décembre 2022, de 2 satellites Galiléo (lancements initialement prévus en avril et septembre 2022) et du satellite d'observation de la terre Earthcare sont reportés et le lancement du télescope Euclid par l'ESA, chargé de percer les mystères de l'énergie noire et prévue en février 2023, est remis en cause [4].

Les lancements 2023 du lanceur VEGA développé par la société italienne AVIO, équipé du moteur RD-869/VG143 de l'entreprise ukrainienne Youjnoye alimenté par des réservoirs fabriqués par la société russe Babakine, seraient compromis. Autre conséquence du conflit, la société OneWeb doit renoncer au lancement programmé de 36 de ses 648 satellites dotés d'une propulsion électrique développée par la société russe Fakel, une propulsion destinée à

leur permettre de rejoindre leur orbite finale située à 1200 km. Quant à la station spatiale internationale ISS, la Russie pourrait suspendre les impulsions fournies par les cargos de ravitaillement russes pour

maintenir son orbite basse de 400 km ; la NASA et SpaceX étudient des solutions de substitution. Quant aux activités spatiales développées en collaboration avec Roscosmos pour les missions Luna et ExoMars, celles-ci pourraient être remises en cause [4]. À noter enfin que le statut d'observateur de la Fédération de Russie est suspendu en accord avec la résolution adoptée par le Conseil du CERN du 8 mars 2022 [5].

Des conséquences qui restent toutefois à relativiser au regard des morts, des viols, des assassinats, des violences et autres destructions que nous aurions tous souhaités d'un temps révolu.



*Patrick Gilliéron*  
*Président du groupe Ile-de-France*

#### Références :

- [1] [https://actu.fr/occitanie/toulouse\\_31555/guerre-en-ukraine-airbus-suspend-les-livraisons-a-ses-clients-russes-une-commande-d-a350-paralysee\\_49220833.html](https://actu.fr/occitanie/toulouse_31555/guerre-en-ukraine-airbus-suspend-les-livraisons-a-ses-clients-russes-une-commande-d-a350-paralysee_49220833.html)
- [2] <https://www.consilium.europa.eu/fr/infographics/eu-sanctions-ukraine-invasion/>
- [3] <https://www.consilium.europa.eu/fr/policies/sanctions/restrictive-measures-against-russia-over-ukraine/>
- [4] <https://www.frstrategie.org/publications/notes/premier-bilan-consequences-guerre-ukraine-sur-liens-europe-avec-ukraine-russie-dans-spatial-2022>
- [5] <https://home.cern.fr/news/news/cern/cern-council-responds-russian-invasion-ukraine>

#### Pour en savoir plus :

- <https://www.economie.gouv.fr/ukraine-sanctions-economiques-russie-reponses-entreprises-affectees>  
<https://www.defense.gouv.fr/ukraine-point-situation>

## 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 longue durée 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 aînés, 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

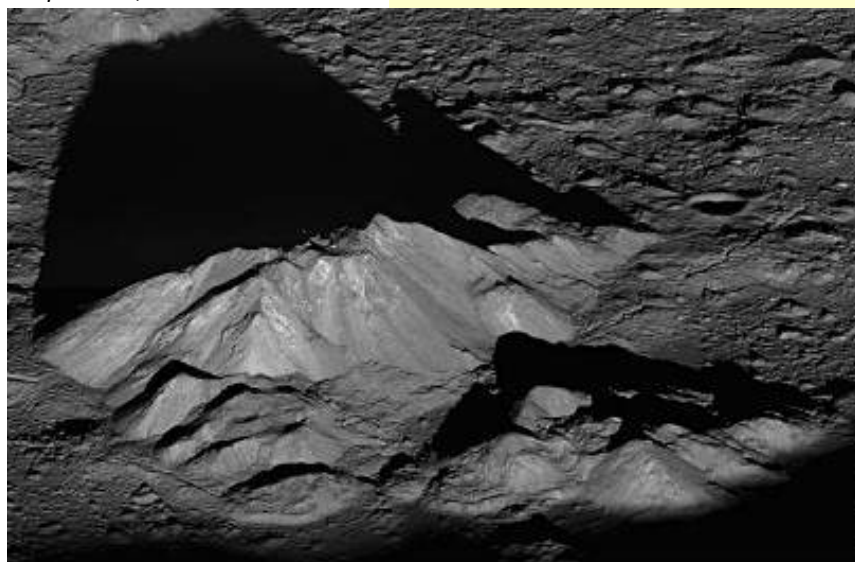


Fig. 2 - Sol lunaire au pôle sud, crédit ESA.

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 d'exploiter et de 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

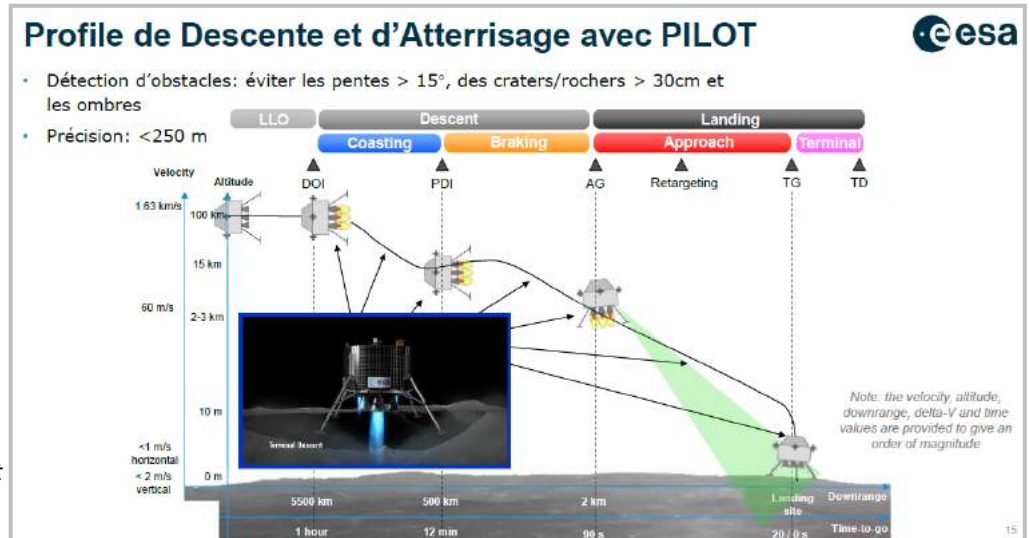


Fig. 4 - Profil de descente et d'alunissage avec PILOT, crédit ESA.

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-

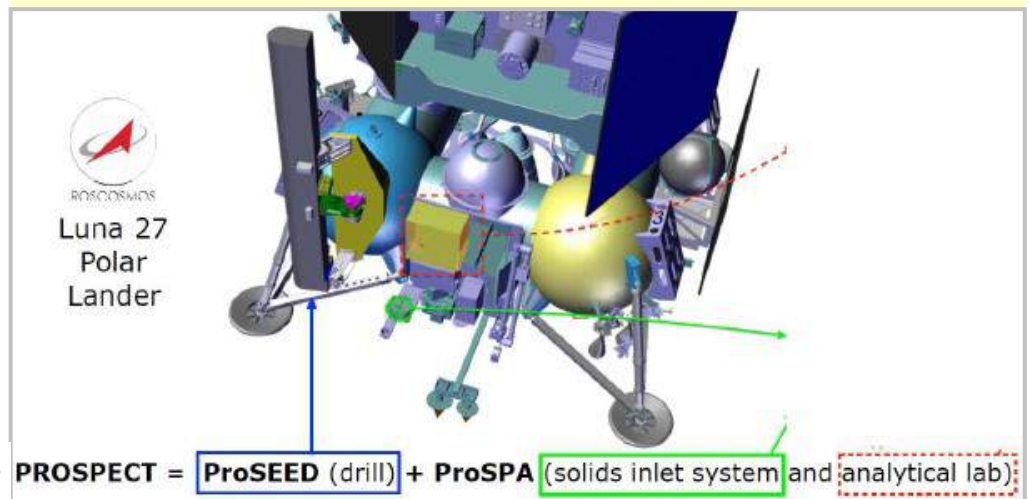


Fig. 5 - Projet PROSPECT, crédit ESA.

# 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, 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

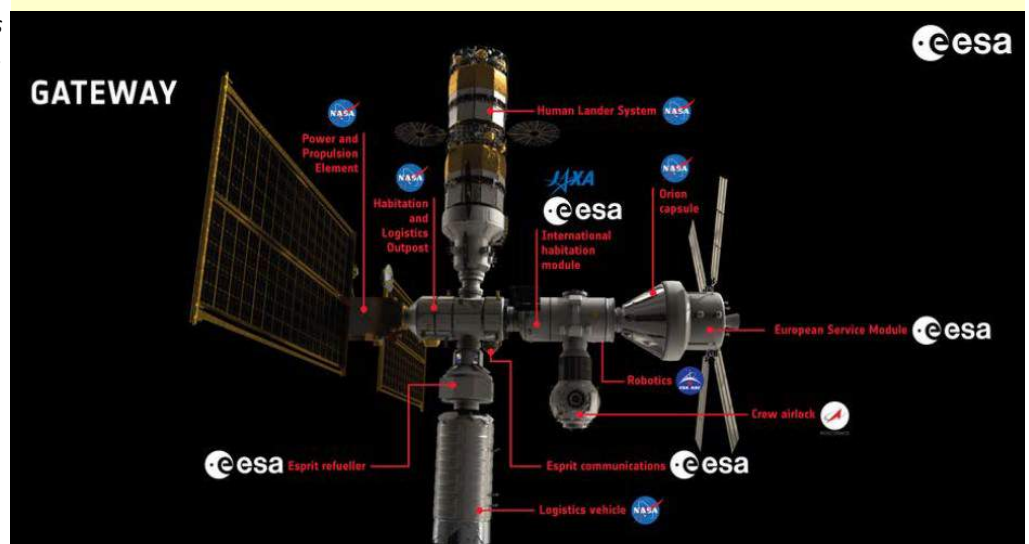
retenue pour une coopération centrée sur la mission Luna 27 qui devrait se poser en 2025 sur le pôle sud de la Lune. La caméra qui servira au repérage et à la détection d'obstacle sera testée sur la mission Luna 25 qui décollera en 2022. Cette coopération nécessite des adaptations réciproques aux méthodes 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](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.



## 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 m<sup>2</sup> 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 déchargée 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

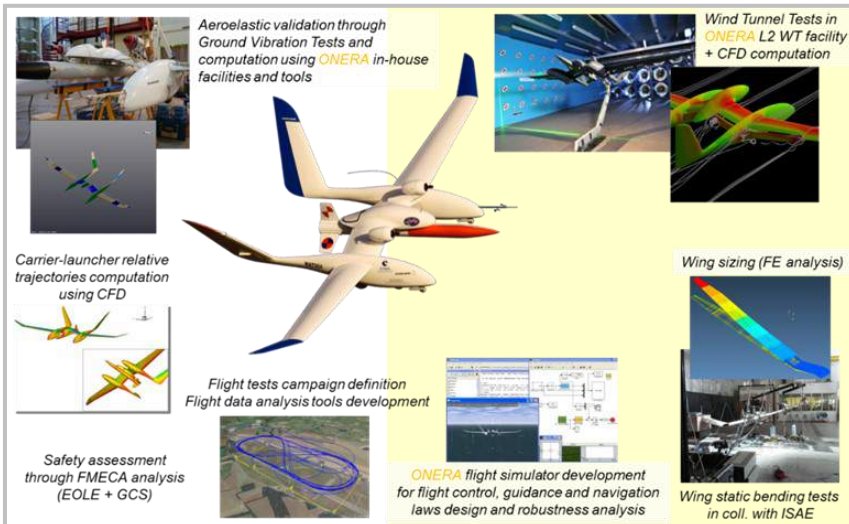


Fig. 3 - Les principales activités de développement ONERA sur le démonstrateur EOLE.

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).



# Aviation Légère Électrique Pile(s) à Combustible ou Batteries ?

Par Patrick Gilliéron, membre des commissions "Aérodynamique" et "Aviation Légère et Machines Dérivées"

**D**ans un contexte mondial où les émissions des produits de combustion des énergies fossiles augmentent<sup>1</sup> continûment [A] du fait de l'explosion industrielle des grands pays émergents (Inde, Brésil, Chine), où la concentration des gaz à effet de serre permettant de limiter l'augmentation de la température moyenne de surface planétaire à 2°C d'ici la fin du siècle sera probablement dépassée<sup>2</sup> [1-4, A], les partenaires des industries des transports mécaniques (aérien, ferroviaire, fluvial, routier, maritime) imaginent diverses solutions de substitution à l'utilisation des produits pétroliers. Parmi ces solutions, le recours à l'hydrogène, souvent évoqué en aéronautique, nécessite de fournir quelques ordres de grandeur pour quantifier et relativiser son intérêt.

**LE GAZ HYDROGÈNE** - Le gaz hydrogène est le constituant principal des étoiles et des gaz interstellaires mais n'existe pas à l'état naturel sur la planète Terre. Sa production s'obtient par reformage de la vapeur de gaz naturel, à partir de charbon gazéifié, de naphtha<sup>3</sup> [5] ou par électrolyse de l'eau.

**ÉQUIVALENCE D'ÉNERGIE ENTRE L'HYDROGÈNE ET LES CARBURANTS USUELS** - La combustion de l'hydrogène ou des produits pétroliers fournit de la vapeur d'eau qui n'est généralement pas condensée pour récupérer la chaleur latente de changement de phases (vapeur/liquide). Cette énergie de condensation n'étant pas récupérée, il est usuel de quantifier la quantité d'énergie des carburants à partir de leurs pouvoirs calorifiques inférieurs (notation PCI). Le pouvoir calorifique inférieur de l'hydrogène, égal à 120.1 MJ.kg<sup>-1</sup>, est supérieur<sup>4</sup> aux pouvoirs calorifiques inférieurs [6-7, B] des carburants essences aviation (AVGAS, kérosène (Jet A et A1)) et automobile, de l'ordre de 44 MJ.kg<sup>-1</sup>. Il y a donc approximativement trois fois plus d'énergie dans un kilogramme d'hydrogène que dans un kilogramme d'essence. Ce rapport justifie à lui seul l'intérêt porté à la filière hydrogène.

**RENDEMENTS POUR LA PRODUCTION D'HYDROGÈNE** - Les rendements de production d'hydrogène sont fonction des techniques retenues [8]. Les deux principales techniques sont le reformage et l'électrolyse de l'eau.

**i. Reformage** - Le reformage par la vapeur de gaz naturel, de charbon gazéifié ou de naphtha produit du monoxyde de car-

bone qui s'oxyde rapidement pour devenir du dioxyde de carbone, gaz à effet de serre responsable avec le méthane d'une part importante du réchauffement climatique [1-3, 9]. Cette production s'effectue à partir de carburants fossiles sur des sites industriels dédiés ou à bord<sup>5</sup> et explique l'intérêt des grandes compagnies pétrolières pour la filière hydrogène. À ce niveau, il est intéressant de noter que la production d'une tonne d'hydrogène à partir de gaz méthane s'accompagne de la production de 5.5 tonnes<sup>6</sup> de gaz CO<sub>2</sub> (rapport de 1 à 6). La production s'effectue le plus souvent à partir du gaz naturel avec des rendements proches de 0.72 [10].

**ii. Électrolyse de l'eau** - L'électrolyse de l'eau consiste à utiliser un courant électrique pour décomposer l'eau liquide en oxygène et hydrogène gazeux. Le rendement du procédé est

1. Les émissions de CO<sub>2</sub> avaient en 2019 augmenté de 14% par rapport à 2008, année de crise financière, pour se réduire de 5.2% en 2020 par rapport à 2019 suite à la crise de la Covid-19 (source Global Carbon Atlas). En 2021, avec la reprise économique mondiale, ces émissions auront sans doute retrouvé leur niveau de 2019.

2. Cette perspective s'appuie sur les scénarii intermédiaires SSP2-4.5 et SSP3-7.0 [1-2] qui supposent l'engagement d'une politique climatique mondiale efficace quant à l'usage des énergies fossiles, politique encore difficile à mettre en œuvre dans le contexte international de 2022 malgré les alertes du GIEC émises depuis 1990.

3. Liquide transparent issu de la distillation du pétrole.

4. MJ.kg<sup>-1</sup>, M pour méga, soit 10<sup>6</sup>.

5. Projet Fuel Cell Based Power Generation pour l'automobile, FCGEN, 2011-2015 : production d'hydrogène à partir de gasoil / Projet NISSAN e-Bio Fuel-Cell, 2016, production d'hydrogène à partir d'éthanol contenu dans un réservoir.

6. Valeurs issues de l'équation stœchiométrique (CH<sub>4</sub> + 2 H<sub>2</sub>O à CO<sub>2</sub> + 4 H<sub>2</sub>).

7. Rendement pour les centrales à cycle combiné gaz = 0.60 [11] ; 0.62 pour la centrale de Bouchain (Nord). Ces centrales récupèrent la chaleur des gaz brûlés pour créer de la vapeur qui alimente un ensemble turbine/alternateur pour générer une production additionnelle d'électricité.

RENDEMENTS DE PRODUCTION d'H <sub>2</sub>	SOURCES D'ÉNERGIE		
	CENTRALE GAZ <sup>7</sup>	CENTRALE AÉRIENNE ou HYDROLIENNE	CENTRALE NUCLÉAIRE
Source à électricité	0.60	0.41	0.33
Électricité à production H <sub>2</sub>	0.70	0.70	0.70
Source à production H <sub>2</sub>	<b>0.42</b>	<b>0.29</b>	<b>0.23</b>

Tableau 1 – Rendements de production d'électricité par électrolyse à partir de courant alternatif et en fonction de la source d'énergie (gaz, hélices aériennes ou hydroliennes, centrales nucléaires). Les centrales nucléaires sont ici au plus des centrales de 2nd génération, voir "Sites Internet de référence" [C-D].

estimé à 0.75 en courant continu et à 0.70 en courant alternatif pour tenir compte des pertes en ligne et de la transformation du courant alternatif en courant continu [11]. L'électricité servant à l'électrolyse peut être produite à partir de la combustion de produits pétroliers (charbon, pétrole ou gaz naturel), d'un parc d'hélices aériennes ou hydroliennes ou encore produite<sup>8</sup> à partir d'une centrale nucléaire. Dans le cas de la combustion des produits pétroliers, le meilleur rendement égal à 0.6 s'obtient dans des centrales à cycle combiné gaz [12]. Le rendement des hélices éoliennes, fixé par la limite de Betz, ne peut pas dépasser 0.59 et la production d'électricité nécessite un multiplicateur, un alternateur, un transformateur, un redresseur et des batteries.

En pratique et en tenant compte des pertes en ligne, le rendement des hélices éoliennes ou hydroliennes<sup>9</sup> pour la production d'électricité ne peut pas dépasser 70% de la limite de Betz soit 0.41 [13]. Pour les centrales nucléaires en fonctionnement aujourd'hui, le rendement est proche de 0.33 (2/3 de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur) [14]. Ce rendement pourrait atteindre 0.45 avec le développement des centrales nucléaires de quatrième génération (concept de réacteur à très haute température, VHTR) [15]. Le rendement de la production de l'hydrogène varie alors respectivement de 0.42 à 0.23 pour les filières gaz et nucléaire, voir le tableau 1. Les productions à partir de la combustion du gaz ou à partir de la fission de matière nucléaire ne sont cependant pas satisfaisantes puisque respectivement liées à l'émission de 5.5 tonnes de gaz carbonique pour une tonne d'hydrogène produite.

D'un point de vue énergétique, la comparaison des sources de production d'hydrogène, par reformage ou par électrolyse de l'eau (gaz/hélice/nucléaire), montre l'intérêt de la production par reformage. Le rendement de production d'hydrogène par reformage est proche du double du rendement de production par électrolyse (0.72 à comparer avec 0.42, voir respectivement le §i. et le tableau 1 du §ii.).

**DISTRIBUTION DE L'HYDROGÈNE** - Le transport de l'hydrogène du lieu de production à grande échelle vers le lieu de distribution s'effectue en phase gazeuse ou liquide, par route ou par rail ou à partir d'un réseau de pipelines. La compres-

sion sans liquéfaction est généralement préférée à la liquéfaction (-253°C) pour réduire la dépense énergétique [16]. Le rendement de compression est estimé à 0.90.

Le transport routier s'effectue à l'aide de camions de 40 tonnes qui peuvent transporter et délivrer 30 m<sup>3</sup> d'essence ou de gazole. Dans le cas de l'hydrogène, ces camions peuvent transporter 320 kg d'hydrogène sous forme gazeuse mais délivrer<sup>10</sup> seulement 288 kg à la pression de 200 bar [17]. Sous forme liquide et compte tenu des installations nécessaires au transport, la quantité transportée ne peut excéder 3500 kg. Dans ces conditions, 28 camions d'hydrogène gazeux ou 2 camions<sup>11</sup> d'hydrogène liquide sont nécessaires pour disposer de l'équivalent énergétique d'un seul camion d'essence (voir respectivement les tableaux 2 et 3). L'évolution des technologies pourrait cependant permettre de délivrer 400 kg d'hydrogène gazeux [17] ; dans ces conditions, 20 camions<sup>12</sup> d'hydrogène seraient nécessaires pour délivrer l'équivalent énergétique d'un seul camion d'essence. Ces valeurs montrent déjà clairement le faible intérêt de la solution du transport par camion.

Le ravitaillement des camions s'effectue à partir de centres de distributions alimentés par des réseaux de gazoducs ou par réseaux ferrés, fluviaux et/ou maritimes. Le transport par gazoducs<sup>13</sup> doit et peut s'effectuer à partir du réseau existant de gaz naturel pour limiter les coûts. L'hydrogène est alors mélangé au gaz naturel dans une proportion de 1

**8.** D'autres formes de production existent mais sortent du cadre de cet article.

**9.** L'hydrolienne SeaGen (démonstrateur à 2 rotors de 16 m de diamètre) installée dans la baie de Strangford Lough et restée en activité de 2008 à 2016 a produit 11.6 GWh.

**10.** La totalité embarquée ne peut être totalement délivrée compte tenu des écarts de pression entre les réservoirs donneur et receveur.

**11.** 2.3 camions exactement.

**12.** Le rapport "The future of the hydrogen economy : bright or bleak ?" [17] donne 22 camions pour 400 kg de gaz hydrogène délivrés.

**13.** Les longueurs de gazoducs répartis sur la Terre dépassent le million de kilomètres [E].

#### TRANSPORT PAR CAMION DE 40 TONNES, CAPACITÉ 30 m<sup>3</sup>

Energie transportée si carburant essence en Joule :		95.6 10 <sup>10</sup>	
Energie transportée si carburant essence en kWh :		265625	
HYDROGÈNE EN PHASE LIQUIDE		HYDROGÈNE EN PHASE GAZEUSE	
Masse délivrée en kg / camion	3500	Masse délivrée en kg / camion	288
Energie délivrée en J / camion	42.00 10 <sup>10</sup>	Energie délivrée en J / camion	3.46 10 <sup>10</sup>
Energie délivrée en kWh / camion	116764	Energie délivrée en kWh / camion	9608
Nb camions H <sub>2</sub> / Nb camions essence	<b>2</b>	Nb camions H <sub>2</sub> / Nb camions essence	<b>28</b>
Tableau 2 – Transport en phase liquide (-253°C)		Tableau 3 – Transport en phase gazeuse (200 bar).	

ÉTAPE DE COMPRESSION		ÉTAPE DE TRANSPORT	
Pression de transport (bar) :	200	Consommation en l/100 km	40
Rendement du compresseur :	0.90	Distance AR stockage / distribution, en km	400
Volume après compression (m <sup>3</sup> ) :	30	Consommation totale gazole AR en kg	136
Energie dépensée (Joule) :	3.44 10 <sup>9</sup>	Energie consommée lors du transport en J.	5.85 10 <sup>9</sup>
Energie dépensée <sup>15</sup> (kWh) :	958	Energie consommée lors du transport en kWh	1624
Energie dépensée / délivrée en %	<b>10</b>	Energie dépensée/ délivrée en %	<b>17</b>
<b>RENDEMENT de compression</b>	<b>0.90</b>	<b>RENDEMENT lié au transport</b>	<b>0.83</b>
<i>Tableau 4 – Données et rendement pour la compression du gaz hydrogène. Résultats obtenus à partir d'évolutions adiabatiques réversibles.</i>		<i>Tableau 5 – Données et rendement pour le transport du gaz hydrogène du lieu de production aux lieux de distribution distants de 200 kilomètres.</i>	

volume d'hydrogène pour 10 volumes de gaz, des pressions comprises entre 4 et 100 bar (des pressions de 150 et 300 bar sont envisagées) et la récupération de l'hydrogène s'effectue en fin de circuit à partir de membranes poreuses [17]. L'Europe de l'Ouest possède un réseau de pipelines d'hydrogène d'environ 1 600 km [18] et le projet de dorsale hydrogène européenne (EHB) offrira en 2040 un réseau de 39 700 km destiné à relier 21 pays européens ; 69% du réseau serait constitué de reconversions de réseaux gaziers existants [19]. Les transports par rail ou par mer s'effectuent sous forme liquide ou gazeuse à des pressions proches de 700 bar. Quel que soit le mode de transport (route, fer ou mer), il est nécessaire de maintenir un certain niveau d'évaporation pour maintenir la pression dans les réservoirs de stockage. Cette évaporation est comprise entre 0.2 et 0.4% de la masse transportée. À ces transports, par gazoducs, réseaux ferrés, fluviaux ou maritimes<sup>14</sup> s'ajoutent cependant des dépenses d'énergie qui dégradent le rendement du puits d'énergie au système de traction ou de propulsion, hélice ou turbine. D'un point de vue économique, les lieux de production doivent être situés au plus près des centres de stockage pour que la distribution s'effectue au mieux par gazoducs et/ou par camion sur de courtes distances. Dans les développements qui suivent, le système de traction ou de propulsion (turbine(s)) sera indifféremment désigné par hélice.

**Rendement pour la distribution de l'hydrogène** - Le calcul des rendements doit prendre en compte l'énergie nécessaire à la compression ou à la liquéfaction pour le transport, l'énergie liée au transport des centres de production ou de stockage vers les centres de distribution puis l'énergie nécessaire pour alimenter les réservoirs des aéronefs.

Comme précédemment, la liquéfaction consommant plus d'énergie que la compression gazeuse, seule la compression gazeuse est ici analysée. Pour une compression à température constante, un rendement pour le compresseur égal à 0.90 (tableau 4, colonne de droite, 2ème ligne), une compression adiabatique progressive optimale à 200 bar et un volume final d'hydrogène de 30 m<sup>3</sup> correspondant à la capacité de stockage d'un camion citerne de 40 tonnes, l'énergie minimale nécessaire à la compression est estimée à 958 kWh, voir le tableau 4 pour des évolutions adiabatiques réversibles. Cette énergie représente<sup>16</sup> 10% de l'énergie délivrée (rendement de compression égal à 0.90).

Pour des trajets moyens de l'ordre de 200 km entre les centres de stockage et de distribution effectués à l'aide de tracteurs dont les moteurs consomment en moyenne 40 litres de gazole aux 100 km, l'énergie dépensée par le transport représente alors près de 17% de l'énergie transportée en phase gazeuse à 200 bar, voir le tableau 5, 7ème ligne. Arrivé à destination, l'hydrogène est stocké dans des réservoirs à 100 bar pour être de nouveau comprimé à 300 bar lors du remplissage des réservoirs des aéronefs. Cette compression (écart de pression de nouveau de 200 bar) nécessite une énergie estimée de nouveau à 10% de l'énergie transportée par camion (tableau 4, 7ème ligne).

Le rendement du lieu de stockage au centre de distribution

**14.** Puissance de l'Amoco Cadiz, 7.36 MWatt, 37.3 MWatt pour le Knock Nevis (le plus gros tanker).

**15.** Cette valeur serait égale à 979 kWh si l'évolution était isotherme.

**16.** Le rapport "The future of the hydrogen economy : bright or bleak ?" [17] donne 8%.

OPÉRATIONS POUR LA DISTRIBUTION	RENDEMENTS
Rendement compression 1 à 200 bar avant transport	0.90
Rendement transport par camion	0.83
Rendement compression 100 à 300 bar remplissage de l'aéronef	0.90
<b>RENDEMENT FINAL POUR LA DISTRIBUTION</b>	<b>0.67</b>
<i>Tableau 6 – Rendements intermédiaires et final pour les opérations de distribution de la filière hydrogène.</i>	

des aéronefs est donc égal aux produits  $0.90 \cdot 0.83 \cdot 0.90 = 0.67$ , voir le tableau 6. Dans ces conditions, 33% de l'énergie transportée est perdue entre le lieu de stockage et le centre de distribution. Dans le cas du transport de l'essence et une même distance du lieu de stockage vers le centre de distribution, le ratio entre l'énergie consommée (voir la 6ème ligne et la colonne de droite du tableau 5) et l'énergie transportée (voir la 3ème ligne des tableaux 2 et 3) est inférieure à 0.01. Le rendement de la distribution égal à 0.99 (à comparer avec 0.67) explique l'intérêt économique de la filière actuelle.

#### RENDEMENTS COMPARÉS POUR LES FILIÈRES BATTERIES ET PAC

- Les rendements du puits d'électricité à l'hélice puis du puits d'énergie à l'hélice pour l'électricité du réseau utilisée pour recharger une batterie ou produire de l'hydrogène destiné à alimenter une pile à combustible sont successivement déterminés puis comparés. Dans tous les cas, l'électricité produite alimente un même moteur électrique dont le rendement est estimé à 0.90. Le rendement de transmission entre le moteur et l'hélice, fonction de divers paramètres (pas, réducteur...) n'est pas pris en compte.

**Rendement du puits d'électricité à l'hélice** - Dans le cas du stockage de l'énergie électrique par batteries, les pertes entre la centrale de production<sup>17</sup> et la prise électrique puis de la prise à la batterie, en prenant en compte les processus successifs de charge et de décharge, peuvent respectivement être estimées à 0.10 et 0.05 fois la quantité d'énergie consommée. Le rendement de la centrale à la batterie est donc proche de  $0.90 \cdot 0.95$  soit 0.85, voir le tableau 7.

Dans le cas de la pile à combustible (PAC), l'hydrogène stocké dans le réservoir est produit par électrolyse à partir du réseau électrique puis distribué dans un réseau spécialisé. Le rendement du réseau électrique au réservoir d'hydrogène de l'aéronef est alors égal à 0.47 (le produit de  $0.70 \cdot 0.67$ , voir les paragraphes "Électrolyse de l'eau", tableau 1, et "Rendement pour la distribution de l'hydrogène", le tableau 6 et le tableau 7, colonne de droite, 5ème ligne à partir du haut). Quarante sept pour cent (47%) de l'énergie électrique utilisée pour produire l'hydrogène se retrouve alors dans le réservoir des aéronefs.

L'hydrogène du réservoir alimente alors une pile à combustible dont le rendement de production d'électricité est proche de 0.50 et l'électricité produite est utilisée pour alimenter le moteur électrique de l'aéronef. Le rendement du réservoir d'hydrogène de l'aéronef à l'hélice est donc égal à  $0.50 \cdot 0.90 = 0.45$  (voir le tableau 7, colonne de droite, 8ème ligne). Ce rendement est supérieur de 50% à celui des aéronefs à combustion interne encore proche de 0.30. Cette valeur peut alors être utilisée pour arguer de l'intérêt de la PAC dans la mesure où l'électricité n'est pas produite à partir de produits carbonés fossiles et où l'autonomie permettrait de franchir des distances au moins équivalentes aux aéronefs à moteurs thermiques. Au final, entre le réseau électrique et l'hélice, le rendement est au plus égal à 0.21. Soixante-dix-neuf pour cent (79%) de l'énergie distribuée par le réseau électrique est ainsi dissipée sous forme de chaleur.

Dans le cas de l'aéronef tout électrique (batteries), le rendement du réservoir d'énergie de l'aéronef à l'hélice est égal à 0,76 ( $0.85 \cdot 0.90$ ), voir le tableau 7, 5ème ligne, 2ème colonne à partir de la gauche. Ce rendement représente deux fois et demie (2.5) le rendement des aéronefs à combustion interne proche de 0.30. Cette valeur confirme l'intérêt de la filière tout électrique et montre l'intérêt de consacrer des ressources suffisantes au développement de batteries à haute densité énergétique massive<sup>18</sup>.

Les rendements du puits d'électricité à l'hélice pour les filières batteries et PAC sont alors respectivement égaux à 0.76 et 0.21. Compte tenu des progrès réalisés sur les durées de vie de ces deux filières, près de 3000 heures [20-21], l'efficacité énergétique des aéronefs à stockage électrique d'énergie est donc au moins trois fois plus importante que l'efficacité énergétique de la solution pile(s) à combustible.

**Rendement du puits d'énergie à l'hélice** - Les résultats fournis au paragraphe précédent ne prennent pas en compte les

**17.** De préférence une centrale qui ne produit pas de gaz à effet de serre.

**18.** 5042 kg de batteries d'énergie massique 200 Wh/kg seraient nécessaires pour disposer de l'équivalent énergétique de 110 litres d'AVGAS ( $750 \text{ kg/m}^3$  et  $44 \text{ MJ/kg}$ ).

#### ÉLECTRICITÉ ISSUE DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE

ÉLECTRICITÉ à BATTERIES		ÉLECTRICITÉ à H <sub>2</sub> à PAC	
Rd réseau électrique à la batterie	<b>0.85</b>	Rd électricité à production H <sub>2</sub>	0.70
		Rd distribution à réservoir H <sub>2</sub>	0.67
		<b>Rd électricité à réservoir H<sub>2</sub></b>	<b><math>0.70 \cdot 0.67 = 0.47</math></b>
		Rd PAC (production d'électricité)	0.50
		Rd moteur électrique	0.90
Rd Moteur électrique	0.90	<b>Rd réservoir H<sub>2</sub> à hélice</b>	<b><math>0.50 \cdot 0.90 = 0.45</math></b>
<b>RENDEMENT À L'HÉLICE</b>	<b>0.76</b>	<b>RENDEMENT À L'HÉLICE</b>	<b>0.21</b>

Tableau 7 – Rendements comparés du puits d'électricité à l'hélice pour les solutions pile(s) à combustible (PAC) et batteries électriques destinées à alimenter un moteur électrique.

RENDEMENTS MOYENS MONDE ISSUS DE L'ÉNERGIE PRIMAIRE			
BATTERIES		PAC	
Rd moyen MONDE énergie primaire à électricité	0.47	Rendement moyen MONDE énergie primaire à électricité	0.47
Rd électricité à hélice*	0.76	Rd électricité à hélice*	0.21
RENDEMENT ÉNERGIE PRIMAIRE À L'HÉLICE	0.35	RENDEMENT ÉNERGIE PRIMAIRE À L'HÉLICE	0.09

Tableau 8 – Rendements comparés **monde** du puits d'énergie primaire à l'hélice pour les solutions pile(s) à combustible (PAC) et batteries électriques destinées à alimenter un moteur électrique. \* Voir tableau 7.

RENDEMENTS MOYENS FRANCE ISSUS DE L'ÉNERGIE PRIMAIRE			
BATTERIES		PAC	
Rd moyen FRANCE énergie primaire à électricité	0.43	Rendement moyen FRANCE énergie primaire à électricité	0.43
Rd électricité à hélice*	0.76	Rd électricité à hélice*	0.21
RENDEMENT ÉNERGIE PRIMAIRE À L'HÉLICE	0.32	RENDEMENT ÉNERGIE PRIMAIRE À L'HÉLICE	0.09

Tableau 9 – Rendements comparés **France** du puits d'énergie primaire à l'hélice pour les solutions pile(s) à combustible (PAC) et batteries électriques destinées à alimenter un moteur électrique. \* Voir tableau 7.

rendements de conversion des énergies primaires destinées à alimenter les centrales aérouniques, hydrauliques, thermiques à charbon, thermiques à gaz ou nucléaires. Un rendement moyen de conversion peut être estimé en prenant en compte la contribution de chacune d'elles dans les productions mondiale ou nationale d'électricité. Au niveau mondial, la contribution des centrales à énergie renouvelable (hydro, aéro, solaire), thermiques à flammes et nucléaire représente respectivement 23.6, 63.9 et 10.1% de la production totale d'électricité [F]. Le rendement de production d'électricité à partir des énergies renouvelables ne nécessitant aucune transformation ou manipulation lorsque l'installation existe, les rendements de production<sup>19</sup> sont pris égaux à l'unité. Pour les autres centrales, la conversion de l'énergie primaire en énergie électrique s'effectue pour des rendements<sup>20</sup> moyens respectivement estimés à 0.30 pour le charbon, le pétrole, le gaz<sup>21</sup> et le nucléaire<sup>22</sup>. Le rendement moyen de production mondiale d'énergie électrique pour les filières considérées est alors proche de 0.47, valeur<sup>23</sup> déterminée à partir de la relation  $(0.236*1 + 0.639*0.30 + 0.101*0.30) * 100/N$ . Estimés à partir des énergies primaires utilisées pour la production électrique, les rendements à l'hélice des filières batteries et pile(s) à combustible sont alors respectivement égaux à 0.35 ( $0.76*0.47$ ) et 0.09 ( $0.21*0.47$ ), tableau 8.

Pour la France en 2019, les centrales à énergies renouvelables, thermiques à flammes et nucléaire représentaient respectivement 40.6, 13.3 et 44.4% [G] mais leurs contributions à la production totale d'électricité s'élevaient respectivement à 19.7, 7.9 et 70.6% [F]. Pour les rendements rappelés au paragraphe précédent, le rendement moyen de production française d'énergie électrique pour les filières considérées est alors proche de 0.43<sup>24</sup>. Cette valeur est inférieure

à la valeur "monde" car la part du nucléaire en France est très supérieure à la part moyenne "monde" (respectivement 44.4 et 10.1%). Pour ce rendement moyen, les rendements à l'hélice pour les filières batteries et pile(s) à combustible sont alors respectivement égaux à 0.32 ( $0.76*0.43$ ) et 0.09 ( $0.21*0.43$ ), voir le tableau 9.

Disposer d'un parc important de centrales nucléaires ne constitue donc pas un avantage d'un point de vue rendement. Les avantages portent principalement sur la réduction nécessaire des émissions de gaz à effet de serre, sur la diminution progressive de la pollution atmosphérique et l'indépendance énergétique tant que l'approvisionnement en matières radioactives reste compétitif.

19. Ces énergies sont disponibles immédiatement mais aléatoires.

20. Les rendements de ces différentes opérations varient en fonction de la nature de l'énergie et de la situation géographique du site de production.

21. Valeur minimisée car ne prenant pas en compte l'augmentation des rendements rendue possible via la cogénération.

22. Une tonne de minerais composés de pechblende et de coffinite fournit entre 1 à 4 kg d'uranium.

23. Avec N= somme des contributions en % des filières énergies renouvelables, thermique à flammes et nucléaire soit 23.6, 63.9 et 10.1.

24. Sans prendre en compte l'amélioration des rendements (Rd=0.60) des centrales gaz à cycles combinés (11 centrales à gaz possèdent des tranches à cycles combinés en 2021) et le potentiel d'amélioration des rendements des centrales nucléaires de quatrième génération (Rd proche de 0.45).





Avion Alpha Electro en charge, avion électrique alimenté par batteries, crédit FFA.

**Le rendement des aéronefs électriques alimentés par des ensembles de batteries apparaît alors incontestablement supérieur au rendement de la filière hydrogène/pile(s) à combustible<sup>25</sup>** et justifie le succès de la société PIPISTREL. Cette société produit en série l'avion électrique Vélis Électro certifié EASA [H] et retenu par la Fédération Française Aéronautique (FFA) pour initier la transition énergétique dans les écoles de pilotage (formation de base et tours de piste) [22].

**CONCLUSION** - Dans un contexte de réduction nécessaire d'utilisation des réserves de pétrole pour limiter le réchauffement climatique lié aux activités humaines, le recours à l'hydrogène est souvent évoqué. Cette perspective nécessite alors de fournir des ordres de grandeur pour quantifier et relativiser son intérêt. Les équivalences énergétiques entre l'hydrogène et les carburants d'aviation sont, dans un premier temps, rappelées. Les rendements de production et de distribution de l'hydrogène puis les rendements des puits d'électricité et d'énergie à l'hélice pour la recharge de batteries et la production d'hydrogène par électrolyse sont étudiés. Les rendements de production d'hydrogène pour la pile à combustible des puits d'électricité à l'hélice puis des différents puits d'énergie à l'hélice sont enfin analysés.

La comparaison des pouvoirs calorifiques inférieurs de l'hydrogène avec les carburants aéronautiques justifie à lui seul l'intérêt de l'hydrogène mais les contraintes de transport et de distribution réduisent de manière considérable l'intérêt de la filière. Un tiers de l'énergie transportée est ainsi consommé entre les centres de stockage et les réservoirs des aéronefs. S'agissant de la filière électrique utilisée pour produire

l'hydrogène, l'efficacité du stockage d'énergie par batteries est au moins trois fois plus importante que l'efficacité de la solution pile(s) à combustible. En choisissant enfin de prendre en compte les rendements de conversion des énergies primaires destinées à alimenter les centrales électriques (aérauliques, hydrauliques, thermiques à flammes et nucléaires), l'efficacité du stockage d'énergie par batterie s'affirme de nouveau. Les rendements "Monde" du puits d'énergie à l'hélice pour les filières batteries et pile(s) à combustible sont ainsi respectivement proches de 0.35 et 0.09, resp. 0.32 et 0.09 pour la France. Les rendements de production de l'hydrogène à l'hélice puis du puits d'énergie à l'hélice pour la pile à combustible confirment l'intérêt de la solution par reformage, montrent l'intérêt provisoire des centrales à gaz de nouvelle génération et relativisent l'intérêt de la filière nucléaire par rapport aux énergies éoliennes ou hydroliennes. Les résultats confirment que le rendement des aéronefs électriques alimentés par des ensemble de batteries reste très largement supérieur au rendement de la filière pile(s) à combustible. Le choix de la filière devra cependant prendre en compte l'énergie massique de l'hydrogène 222 fois plus élevée que celle des batteries Lithium-ion actuelles ; un avantage considérable pour l'autonomie et la puissance.

**25.** Les rendements de la production d'hydrogène à l'hélice puis du puits d'énergie à l'hélice pour la pile à combustible sont successivement analysés pour chaque source primaire d'énergie dans l'article *Aviation légère électrique - Pile à combustible ou batteries ? Janvier 2022*, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03509424>

## RÉFÉRENCES

- [1] Climate Change 2021, The Physical Science Basis ; Working Group 1 Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ; IPCC, 2021.
- [2] Synthèse du rapport AR6 du GIEC publié le 9 août 2021, synthèse vulgarisée du résumé aux décideurs du groupe de travail de l'AR6 – The Shifters.
- [3] Jean Jouzel & Baptiste Denis ; Climat, parlons vrai, éditions François Bourin, Harmoni Mundi livre, ISBN 979-10-252-0482-5, 2020.
- [4] Boucher O., Braconnot P., Masson-Delmotte V. et Salas y Mélia D. ; Changement climatique : les résultats des nouvelles simulations françaises, CNRS – Météo France et CEA, 17 septembre 2019.
- [5] Leprince P. et collectif Technip ; Le raffinage du pétrole, procédés de transformation, tome 3, publication de l'Institut Français du Pétrole, Éditeur Tehnip, ISBN 978-2-7108-0730-8, 1998.
- [6] J.-P. Wauquier ; Le raffinage du pétrole, pétrole brut, produits pétroliers, schémas de fabrication, tome 1, publication de l'Institut Français du Pétrole, Éditeur Tehnip, ISBN 978-2-7108-0668-4, 1994.
- [7] EU-ETS : liste des facteurs d'émission CO<sub>2</sub> et PCI.
- [8] Bricault et al ; L'hydrogène décarboné : un défi pour la transition énergétique, éditeur Lavoisier, ISBN 978-2-7430-2477-2, 2019.
- [9] Dessus B., Laponche B. ; association Global Chance ; Réduire le méthane : l'autre défi du changement climatique, Agence Française de Développement (AFD), document de travail, août 2008.
- [10] Production d'hydrogène à partir de combustibles fossiles, Association française pour l'hydrogène et les piles à combustibles, Mémento de l'hydrogène, fiche 3.1.1, source IFP-AFHYPAC, révision septembre 2014.
- [11] Langlois P. ; Rouler sans pétrole, Éditions Multi Monde, ISBN 978-2-89544-130-4, 2008.
- [12] Schroeder C. ; Électrotechnique des centrales électriques, EDF, collection EDF R&D, édition Lavoisier, ISBN 978-2-7430-2351-5, septembre 2018.
- [13] Le Gourières D. ; Les éoliennes, théorie, conception et calcul pratique, Éditions du Moulin Cadiou, Diffusion Eyrolles, GEODIF/SODIS, ISBN13 978-2-953004-10-6.
- [14] Normand T., Andreani J. et Tejedor V. ; Les cycles thermodynamiques des centrales nucléaires, Éditeur Transvalor – Presses des Mines, Collection Technologies, Diffusion GEODIF, 2010.
- [15] Rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques sur l'énergie nucléaire du futur et les conséquences de l'abandon du projet de réacteur nucléaire de 4e génération « Astrid » ; rapport déposé sur le bureau de l'Assemblée Nationale par Cédric Villani, président de l'Office, et Gérard Longuet, premier vice-président de l'Office ; 8 juillet 2021.
- [16] Bose T. and Malbrunot P.; Hydrogen, facing energy challenges of the 21st century, Editor John Libbey, diffusion Geodif, ISBN 978-2-74-200639-7, 2007.
- [17] The Future of the Hydrogen Economy : Bright or Bleak; Final Report of 15 April 2003 with foreword Ulf Bossel, Baldur Eliasson and Gordon Taylor European Fuel Cell Forum, 26 February 2005.
- [18] Boucher S. et T. Alleau T. ; AFHYPAC, Transport hydrogène, Fiche 4.1, 2016.
- [19] Extending the European Hydrogen Backbone ; A European Hydrogen Infrastructure Vision Covering 21 Countries, April 2021.
- [20] ADEME ; Panorama et évaluation des différentes filières d'autobus urbains, Expertise, 2018.
- [21] ADEME ; Les potentiels du véhicule électrique, Les avis de l'ADEME, avril 2016.
- [22] Jean-Luc Charron ; Vers l'aviation légère électrique, Gazette 3AF IdF n°32, janvier-juin 2022.

## SITES INTERNET DE RÉFÉRENCE

- [A] <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>
- [B] [https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD\\_DOC\\_FR/index.htm?pci\\_et\\_masse\\_volumique.htm](https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?pci_et_masse_volumique.htm)
- [C] <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/nucleaire/essentiel-sur-generations-reacteurs-nucleaires.aspx>
- [D] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/les-differents-types-de-reacteurs-nucleaires>
- [E] <https://globalenergymonitor.org/projects/global-fossil-infrastructure-tracker/>
- [F] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-nucleaire-en-chiffres>
- [G] <https://www.rte-france.com/eco2mix/les-chiffres-cles-de-lelectricite>
- [H] <https://www.pipistrel.ad/fr/pipistrel/entrainement/velis-electro>

Ce document est extrait du document : Aviation légère électrique - Pile à combustible ou batteries ? Janvier 2022, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03509424>



Crédit Awaipales - Ecole de pilotage d'Annecy

Conf. 3AF-CRAIF du 24 mars 2022



Crédit CNAM-IAT : maquette de l'avion CASSIO de Voltaéro

**L** Institut AéroTechnique (IAT) est un centre d'essais public qui est rattaché au Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris et à sa Direction déléguée à la Recherche. L'IAT fait aussi partie de l'Institut Carnot ARTS qui regroupe des équipes de recherche et des moyens et savoir-faire expérimentaux dans les domaines notamment de l'énergétique et de la mécanique des fluides.

L'IAT a été fondé en 1909 grâce à une donation d'Henry Deutsch de la Meurthe, mécène de l'aéronautique naissante, pour y poursuivre des recherches théoriques et pratiques tendant au perfectionnement des engins de la locomotion aérienne sous toutes ses formes. Cette longue histoire, qui fera l'objet d'un prochain article, a vu la création et le développement de multiples moyens expérimentaux qui, aujourd'hui, permettent à l'IAT d'offrir aux entreprises des essais en aérodynamique, thermique et sciences associées, avec un souci de précision, d'efficacité et avec des capacités industrielles en termes de taille et de temps d'essais. Les missions de l'IAT sont le développement et l'exploitation de moyens expérimentaux en aérodynamique, la réalisation d'essais et d'études pour le compte d'entreprises, la poursuite d'activités de recherche en partenariat avec des entreprises privées et des laboratoires de recherche publique et la formation.

### Les moyens d'essais actuels de l'IAT.

- **Les grandes souffleries aérodynamiques S4 & S10.** Les veines d'essais font 5 mètres de largeur, 3 mètres de hauteur et 10 mètres de longueur, et les vitesses maximales sont de 40 m/s pour la première et 55 m/s pour la deuxième. La soufflerie S4 est principalement dédiée aujourd'hui au sport et à la formation. Elle permet notamment l'optimisation de la position des coureurs cyclistes de l'équipe de France dans le cadre de partenariats de recherche avec la FFC et l'école Polytechnique. La soufflerie S10 est l'installation la plus versatile et la plus automatisée. Différents montages, rapidement interchangeable, permettent de tester toutes sortes d'objets dans des positions et mouvements variés (rotations autour des trois directions), avec des vitesses de vent jusqu'à 55 m/s, de la pluie...
- **La grande soufflerie aérothermique S6.** La veine d'essais est équipée de parois ajustables jusqu'à 6 mètres de largeur, 6 mètres de hauteur et 17 mètres de longueur et la vitesse du vent peut y atteindre jusqu'à 20 m/s. Son plan d'installation et ses capacités permettent son accès à des véhicules de grandes dimensions comme des poids lourds et des véhicules blindés. La température peut y être ajustée, de la température ambiante extérieure jusqu'à 55 °C. Un ensoleillement artificiel jusqu'à 1200 W/m<sup>2</sup> peut être créé par 180 lampes IR sur portique, placées sous le plafond. Un banc à rouleaux, réglable en position, équipe le plancher de haute capacité, et permet de contrôler des puissances jusqu'à 315 kW. Cette soufflerie S6 est principalement utilisée pour tester les systèmes de refroidissement et de climatisation des véhicules.
- **La soufflerie à veine longue SVL.** Cette installation possède une veine d'essais de 2,2 mètres de largeur, 1,7 mètre de hauteur et 15 mètres de longueur qui est équipée d'un tapis roulant de 6 mètres de longueur et d'un système d'aspiration de la couche limite en amont du tapis. Cette soufflerie est principalement dédiée aux études de la résistance à l'avancement des trains.

# L'Institut Aérotechnique Saint-Cyr-l'École (IAT)



Crédit CNAM-IAT : Mercedes AMG GT3 de l'équipe allemande HRT

Par ailleurs, l'IAT possède des bancs d'essais modulables de plus petites tailles et dispose des installations annexes nécessaires aux activités de soutien aux essais comme :

- un atelier de fabrication mécanique largement équipé de machines-outils classiques et numériques, de postes à souder et une menuiserie, pour la fabrication de maquettes, de montages d'essais ou la maintenance des souffleries ;
- un laboratoire de métrologie dédié à la conception et à l'étalonnage de balances aérodynamiques et de capteurs, incluant une petite soufflerie d'étalonnage pour sondes.

Crédit CNAM-IAT : Essai FFC avec la coureuse de l'équipe de France Coralie Demay (préparation JO Tokyo)



**Les projets** - Plusieurs projets de développement des installations sont actuellement en cours comme un banc instationnaire pour maquette d'avion permettant d'imposer des rampes d'accélération ou des oscillations (un axe de rotation en tangage ou en roulis) et l'amélioration des performances de la soufflerie SVL, notamment pour la vitesse maximale et la longueur de tapis roulant.

Les moyens de mesures suivants sont utilisés en fonction des besoins des essais dans les différentes souffleries :

- capteurs de pressions simples ou scanners (PSI) stationnaires, capteurs instationnaires miniatures (Kulite) ;
- balances de mesures de forces (nombreux choix de dimensions et capacités) ;
- sondes de température ;
- système pour fils chauds ;
- système d'acquisition instationnaire (20 kHz) ;
- un système PIV stéréo ;
- des rampes de simulation de pluie ;
- capteurs acoustiques ;
- matériel de visualisation d'écoulement (générateurs de fumées, huiles colorées...) ;
- caméras vidéo ;
- scanner 3D pour relevé de géométrie de grande capacité ;
- autres capteurs variés (position, vitesse de rotation...)...

**Les moyens humains** - L'équipe de l'IAT se compose de 18 personnes dont 10 ingénieurs et 4 techniciens assurant toutes les activités de l'administration, des essais aux métiers de soutien comme l'informatique, le bureau d'études, la fabrication, la maintenance, l'électronique et la métrologie. L'IAT accueille très régulièrement des stagiaires ingénieurs et techniciens.



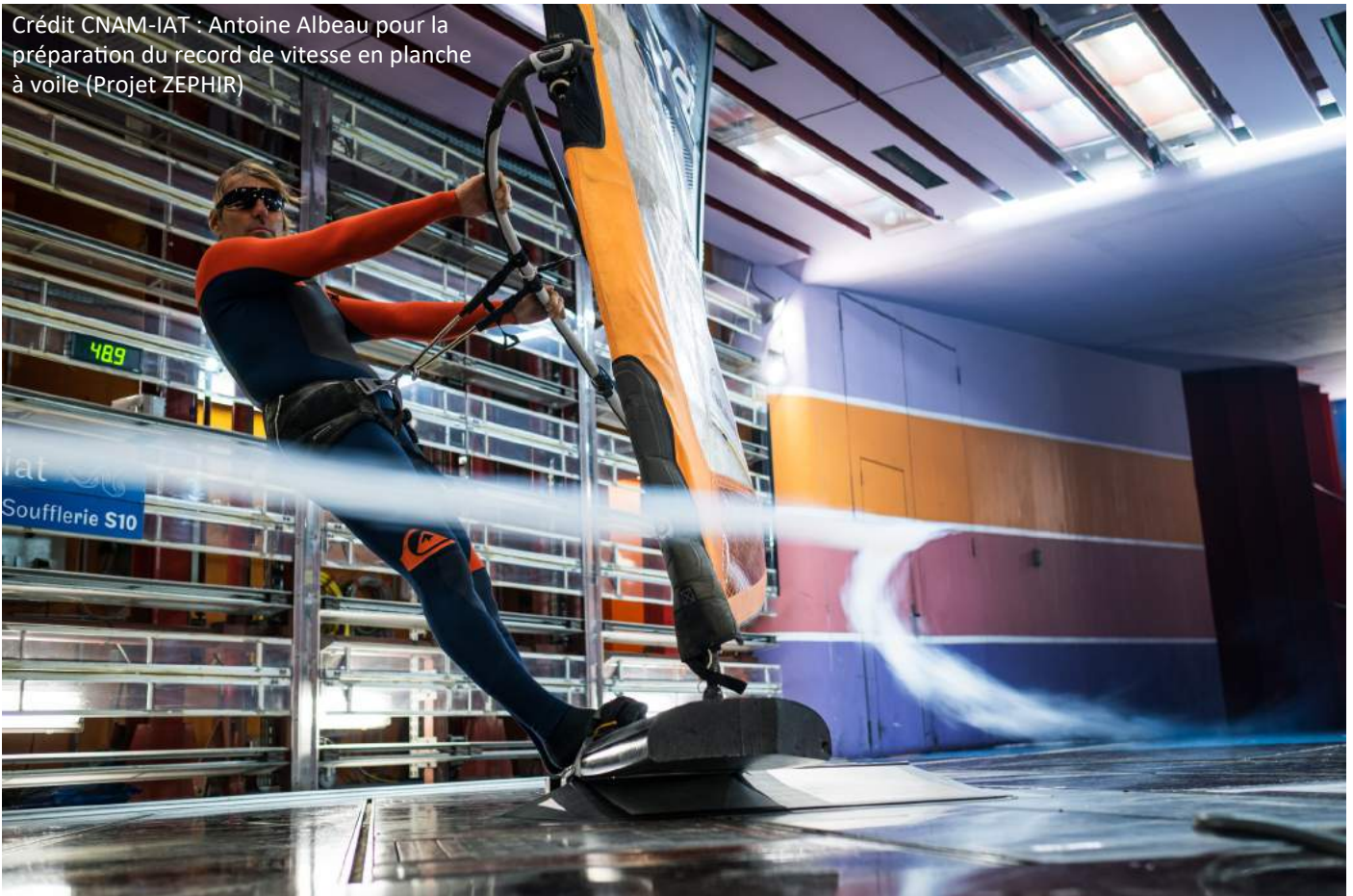
Crédit CNAM-IAT : Maquette de l'avion ATEA d'Ascendance Flight Technologies

**Les principales activités** - Les principales activités en fort développement au cours de ces dernières années sont :

- le sport de haut niveau, avec la collaboration de l'IAT à des programmes de recherche financés par l'ANR pour les JO de Paris pour les fédérations françaises de cyclisme, d'aviron et de voile ;
- l'étude de systèmes de propulsion éolienne pour navires commerciaux avec comme client principal Total Énergies ;

# L'Institut Aérotechnique Saint-Cyr-l'École (IAT)

Crédit CNAM-IAT : Antoine Albeau pour la préparation du record de vitesse en planche à voile (Projet ZEPHIR)



- des programmes de développement de projets aéronautiques comme les avions hybrides Atea de la société Ascendance Flight Technologies, Cassio de la société Voltaéro, ou des essais pour les grands groupes aéronautiques comme Dassault Aviation, Thalès, Safran et drones pour les sociétés Thalès et Sensefly.

Lien\* : <https://iat.cnam.fr/>

Video\* : <https://www.dailymotion.com/video/xku1za>

Actualités\* : en cliquant [ICI](#)

Adresse IAT : 15 rue Marat, 78210 Saint-Cyr-L'École

Tel : 01 30 45 00 09

\* Accessible uniquement en version numérique.



Crédit CNAM-IAT : extrait dailymotion.com/video/xku1za

le **cnam**  
IAT

Institut aérotechnique



*L'expertise et des moyens  
d'essais aérodynamiques au  
service des entreprises et de la  
recherche*

PRÉSENTATION PRESTATION INDUSTRIELLE RECHERCHE APPLIQUÉE

# PUBLICATIONS COURRIERS



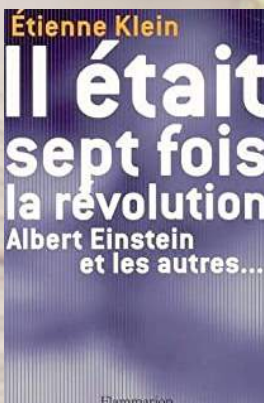
**D'Apollo à Artemis** par Lukas Viglietti, René Cuillierier, éditions de Boeck, livre numérique EPUB, ISBN 978-2-807-34331-3. Les auteurs nous relatent les différentes missions du programme Apollo. Un chapitre est également consacré au programme Artemis.



**Compétences non techniques et TEM — Explications et cas concrets**, par Pascal Berriot, éditions Cépaduès. ISBN : 978-2-364-93925-7. Pour découvrir les concepts du "Threat and Error Management", de la conscience de la situation, de la gestion du stress et de la prise de décision.



**Gérer les situations délicates en vol**, par Pascal Berriot, éditions Cépaduès. ISBN 978-2-364-93855-7. L'auteur aborde une dizaine de situations qui s'inspirent d'événements et incidents récurrents, issus des retours d'expériences de la FFA, de la FFPLUM, ainsi que des rapports d'enquêtes du BEA.



**Il était sept fois la révolution - Albert Einstein et les autres**, par Etienne Klein, éditeur Flammarion, ISBN 978-2-082-10343-5. L'auteur rend hommage à des physiciens ayant révolutionné la physique entre 1925 et 1935 : Dirac, Ehrenfest, Einstein, Gamow, Majorana, Pauli, Schrödinger...

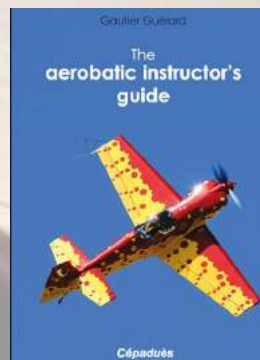
**Un ouvrage aéronautique ou spatial à caractère technique ou scientifique qui vous a plu ? N'hésitez pas à le faire connaître via cette rubrique.**



**Le Guide du Futur Pilote de Ligne**, par Gautier Guérard, ISBN 978-2-364-93936-3, éditions Cépaduès. Ce guide aborde chaque étape du parcours de pilote de ligne, les aspects réglementaires, des conseils pratiques du mûrissement post-PPL au CPL... à la formation au pilotage des avions bimoteurs.



**Petite excursion dans le Cosmos**, par Neil de Grasse Tyson, éditeur Belin, ISBN 978-2-410-02298-8. Avec humour et pédagogie, l'auteur rend accessible les principes de l'astrophysique et l'essentiel des grands mystères du cosmos. Sont évoquées les exoplanètes, l'origine du vivant, de la vie...



**Guide de l'Instructeur Voltige et du Voltigeur** par Gautier Guérard, éditions Cépaduès, ISBN 978-2-364-93740-6. Un canevas pédagogique complet pour l'instructeur de voltige et le voltigeur avec notamment une liste des erreurs fréquemment rencontrés et des pièges associés à chaque figure.

## Questions / réponses

**Quel état des lieux et quels enjeux pour les débris spatiaux ?**

**Réponse Gr IdF :** le nombre d'objets spatiaux augmente exponentiellement, avec plus de satellites qui seront lancés dans les 3 prochaines années qu'il n'en a été lancé dans les 6 dernières décennies. Selon les modèles de l'ESA, il y a probablement plus de 1 million d'objets spatiaux de plus de 1 cm en orbite. À terme, ceci peut créer un effet cascade, chaque collision créant des débris, augmentant la possibilité de collisions ultérieures.

Au fil des années, [CleanSat](#) a développé des technologies pour prévenir la création de débris en supprimant par exemple les fusées des orbites basses. La mission [ClearSpace](#) devrait aussi démontrer des technologies de nettoyage actif des orbites.

Néanmoins le nombre de missions réalisant des opérations réussies de fin de vie reste encore inférieur à l'objectif de 90% fixé par l'ISO 24113.

## CONFÉRENCES, VISITES & MATINALES ILE-DE-FRANCE

### Invitations à participer à/au :

- Introduction à la mobilité aérienne : GIACRE, 27/01/2022 ;
- Les méga constellations : AAE, 09/02/2022 ;
- La sécurité aérienne et l'ingénierie de la résilience : GIACRE, 17/02/2022 ;
- Vers un expansionnisme chinois dans le système solaire : Planète MARS, 12/03/2022 ;
- Callisto, démonstrateur multinational de premier étage réutilisable, commission "Transport Spatial", 30/03/2022 ;
- La décarbonation de l'aéronautique, AAE, 18/05/2022 ;
- Les mathématiques et défis d'ingénierie - L'exemple de Solar Impulse : association des docteurs et doctorants de l'ONERA, 9/06/2022.

### Jeudi 13 Janvier

**COMITÉ JEUNES 3AF - Les 1001 métiers de l'aéronautique et du spatial** par Gérard Laruelle, membre Émérite de la 3AF, titulaire de l'Académie de l'Air et de l'Espace (AAE), ancien directeur du pôle ASTech Paris-Région et de EADS Space School, ancien vice-président Recherche d'Astrium (Airbus, Space & Défense) et vice-président du Groupe 3AF Ile-de-France.

### Mercredi 9 Mars

**GROUPE ILE-DE-FRANCE / COMMISSION AÉRODYNAMIQUE** - Visite de l'aéroport d'Orly, une occasion de pénétrer au cœur d'un aéroport international situé aux portes de Paris pour découvrir son histoire et son fonctionnement.

### Jeudi 24 Mars

**GROUPE ILE-DE-FRANCE & CRAIF - Moteurs électriques pour l'aviation légère** par Bernard Riou, président de la société NovPower ; une société qui développe et commercialise des systèmes de propulsion électrique à haut niveau de fiabilité pour l'aviation légère. Un état de l'art sur les systèmes de propulsion électrique, leurs limitations et les perspectives de développement.

### Mardi 19 Avril

**GROUPE ILE-DE-FRANCE - Surveillance médicale et espace** par Philippe Arbeille, directeur de l'UMPS-CERCOM (Unité de Médecine Physiologie Spatiale), faculté de médecine de Tours . Une conférence pour évoquer l'échographie spatiale, seule méthode d'imagerie disponible à bord des engins spatiaux.

### Mardi 17 Mai

**GROUPE ILE-DE-FRANCE - Assemblée Générale du groupe Ile-de-France** en visiophonie. Le support de présentation est disponible à la rubrique "Documents" de la page Web du groupe IdF sur le site 3AF en cliquant\* [ICI](#).

### Jeudi 2 Juin

**GROUPE ILE-DE-FRANCE / COMMISSION AÉRODYNAMIQUE** - Visite du musée SAFRAN, aérodrome Melun-Villaroche, une occasion de revivre un siècle d'aventure humaine et technologique au fil d'un magnifique parcours.

### Mardi 14 Juin

**GROUPE ILE-DE-FRANCE - La sauvegarde du patrimoine aéronautique volant** par Christian Ravel, fondateur et président du musée de l'air d'Angers désigné "Espace Air Passion", membre du Ré-

seau du Sport de l'Air et de l'Académie de l'Air et de l'Espace, et Frédéric Simon, président du Réseau du Sport de l'Air.

### Jeudi 16 Juin

**GROUPE ILE-DE-FRANCE & CRAIF - La réserve aérienne de l'armée de l'air et de l'espace** par le capitaine (R) Perig, pilote de ligne et réserviste dans la Section Aérienne de Réserve de l'Armée de l'Air et de l'Espace (SARAAE) de la base aérienne 105 d'Évreux depuis 2006. Une conférence pour évoquer les petites unités aériennes flexibles et peu onéreuses au service des forces aériennes françaises.

### Mardi 21 Juin

**LES MATINALES du GROUPE ILE-DE-FRANCE** - Une Matinale sur le transport aérien et le climat avec Nicolas JEULAND, SAFRAN Innovation, expert du groupe carburants du futur et responsable environnement et carburants bas carbone ; Éric MAURY, AIRBUS, responsable énergies et environnement, bureau d'études architecture et intégration ; Philippe NOVELLI, ONERA, directeur propulsion aéronautique et environnement.

\* Document réservé aux membres.

# AGENDA

## CALENDRIER DES CONFÉRENCES 3AF Ile-de-France\*

- **MARDI 13 SEPTEMBRE\*\* 2022 de 18h30 à 20h**, « *L'HYDROGÈNE DANS TOUS SES ÉTATS* » par *Jean Delacarte*, ingénieur, ex-directeur de la société Air Liquide, titulaire de l'AAE et membre émérite de la 3AF.
- **MARDI 18 OCTOBRE\*\* 2022 de 18h30 à 20h**, « *LA FILIÈRE DES LANCEURS ARIANE* » par *Roger Vignelles*, chef de projet Ariane de 1976 à 1982 puis directeur des lanceurs de 1982 à 1991, CNES.
- **MARDI 15 NOVEMBRE 2022 de 18h30 à 20h**, « *LA PROPULSION FUSÉE HYBRIDE* » par *Jean-Yves Lestrade*, ONERA.
- **MARDI 13 DÉCEMBRE 2022 de 18h30 à 20h**, « *ESSAIS DE CERTIFICATION AÉRONAUTIQUE* » par *Laurent Jablonski*, SAFRAN.

\* En partenariat avec le Groupement des Ingénieurs et Cadres Supérieurs de l'Aviation Civile (GIACRE).

\*\* Conférences initialement programmées en début d'année mais reportées suite à la reprise de la Covid-19.

## Avec le Comité Régional Aéronautique d'Ile-de-France#

- **JEUDI 22 SEPTEMBRE 2022 DE 18h30 à 20h**, « *NAVIGATION SDVFR* » par *Pierre Devaux*, pilote privé avion et ULM.
- **JEUDI 8 DÉCEMBRE 2022 DE 18h30 à 20h**, « *LES PEINTRES DE L'AIR* » par *Céline Manetta*, pilote privée avion, designer et peintre de l'air.

# Comité régional rattaché à la Fédération Française Aéronautique (FFA).

Les conférences sur le premier trimestre 2023 sont ou seront proposées sur le site Internet de 3AF à la rubrique "Évènements" en cliquant [ICI](#).

### Venez enrichir et partager vos compétences

Au sein de nos Commissions Techniques et de nos Groupes régionaux

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

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