

Prototypage de l'aéronef Cassio proposé par l'entreprise française Voltaéro.

Aerospace Valley et la mobilité aérienne légère décarbonée

Philippe Lagarde

Chargé de mission Mobilité aérienne légère, Aerospace Valley

Comment la mobilité aérienne légère s'organise-t-elle pour relever le défi de la décarbonation ? le pôle de compétitivité Aerospace Valley a lancé fin 2020 une initiative qui rassemble une communauté d'environ 300 acteurs régionaux innovants. Des projets sont d'ores et déjà lancés pour que les aérodromes puissent alimenter les aéronefs avec les nouvelles énergies décarbonées.

Introduction

Aerospace Valley est le premier pôle de compétitivité européen de la filière aérospatiale, au service des secteurs stratégiques de l'aéronautique, du spatial et des drones, sur les régions Occitanie, Pyrénées-Méditerranée et Nouvelle-Aquitaine.

Avec ses cinq écosystèmes d'excellence - systèmes embarqués et communi-

cants - structures, matériaux et procédés - propulsion et énergie embarquée - économie des données et intelligence artificielle - solutions pour l'usine du futur - Aerospace Valley est le moteur d'une communauté solidaire, compétitive et attractive visant à favoriser l'innovation au service de la croissance.

Classé dans le trio de tête des pôles de compétitivité mondiaux pour la perfor-

mance de ses projets coopératifs de R&T (dont 619 ont été financés à ce jour), Aerospace Valley a pour mission d'animer un réseau dynamique de renommée internationale, composé de 807 membres (entreprises, laboratoires de recherche, établissements de formation, universités et grandes écoles, collectivités, structures de développement économique), dont 592 petites et moyennes entreprises.

“ Pour Aerospace Valley, le développement de technologies, ou des évolutions de l'écosystème à l'échelle de l'aviation légère, sera plus rapide avec des entrées en service dans les prochaines années. ”

Aerospace Valley a lancé fin 2020 l'initiative « Mobilité Aérienne Légère et Environnementalement responsable (MAELE) » qui rassemble une communauté d'acteurs régionaux innovants dans le domaine de la mobilité aérienne légère et décarbonée.

Avec cette initiative, l'ambition d'Aerospace Valley est multiple : dynamiser l'émergence des technologies en rupture, développer les compétences et positionner les acteurs des territoires comme pionniers de la transition écologique des filières aérospatiales pour en final contribuer à assurer la croissance et sécuriser le futur de nos filières régionales.

Ainsi plusieurs actions sont proposées :

- des appels à manifestation d'intérêt permettent d'initier des consortiums d'acteurs qui présentent des dossiers de projets innovants sur la thématique MAELE ;
- des événements comme la semaine de l'aviation légère réalisée en septembre 2021 qui adresse le marché, les technologies, des rencontres B2B et permet la rencontre de l'écosystème (avionneurs, équipementiers, gestionnaire d'aéroport, énergéticiens, financeurs) ; celle-ci sera reconduite dans chacune des régions fin 2022.
- des challenges entre écoles afin de faire émerger des projets novateurs et développer l'entrepreneuriat.

Pour Aerospace Valley, le développement de technologies, ou des évolutions de l'écosystème à l'échelle de l'aviation légère, sera plus rapide avec des entrées en service dans les prochaines années. Il

servira alors de tremplin à l'aviation commerciale décarbonée dont les premières applications apparaîtront lors de la prochaine décennie.

L'enjeu climatique, une priorité pour l'aérien

La pandémie du Covid-19 a montré que quelques mois de confinement quasi planétaire n'étaient pas suffisants pour contrer des décennies de pollution. Dans le domaine de l'aéronautique, les émissions de CO₂ par passager ont diminué de 80 % au cours des 70 dernières années pour ne plus représenter, avant la crise Covid-19, que 2 à 3 % des émissions globales. Bien qu'ayant une idée très vague, voire erronée, de la contribution du transport aérien aux émissions de CO₂, la majorité de la population est convaincue du caractère polluant de l'aérien et estime que le secteur ne fait pas assez d'efforts pour réduire son impact environnemental. Ainsi l'aviation subit

des attaques sans commune mesure avec son impact réel sur le climat, elle est devenue l'otage d'une idéologie prônant l'*avion-bashing* !

Dans ce contexte, les organisations internationales gouvernant l'aéronautique ont accéléré leurs réactions. L'objectif « pré-covid » qui était de stabiliser les émissions de CO₂ au niveau atteint en 2020, a été complètement revu. Lors du sommet de l'aviation consacré à la décarbonation du transport aérien qui s'est tenu les 3 et 4 février 2022 à Toulouse, la Commission européenne, les 27 États de l'Union européenne et les 10 États de la Conférence européenne de l'aviation se sont engagés sur un objectif de neutralité carbone du transport aérien d'ici 2050.

Pour la France, c'est un enjeu stratégique d'indépendance en matière de transport et de défense avec également un impact socio-économique car les activités aéronautiques représentent plus de 1,1 million d'emplois directs et indirects en France, et 4,3 % du PIB national.

Les émissions du transport aérien

Chaque segment du transport aérien n'a pas le même poids sur les émissions CO₂ comme le montre la figure 1. ●●●

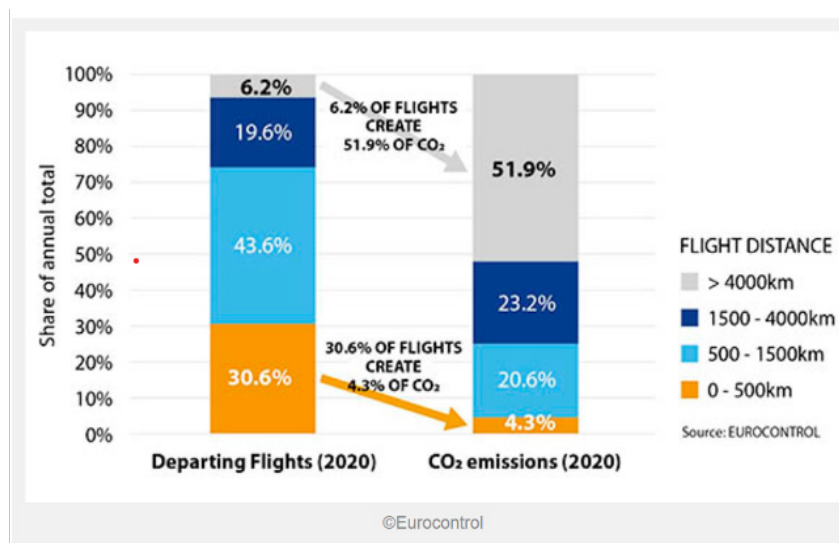


Figure 1: Proportion d'émissions de CO₂ en fonction des segments de vol (source : Eurocontrol).

●●● La moitié des émissions proviennent des vols long-courriers, qui ne représentent pourtant selon Eurocontrol que 6 % du trafic global. À l'opposé de l'échelle, les 31 % des vols de moins de 500 km n'ont qu'une part de 4 % des émissions de CO₂ (24 % de vols avec 3,8 % des émissions en 2019). Ce n'est pas pour autant que ces derniers seront négligés, chaque segment doit contribuer à l'objectif de neutralité carbone.

Les initiatives en faveur de la décarbonation

L'industrie aéronautique relève le défi climatique qui devient sa priorité absolue. Le challenge est immense puisqu'il s'agit de développer, dans la décennie en cours, des technologies en rupture alors que les performances et la sécurité des avions actuels sont le résultat d'évolutions continues depuis plus de 80 ans.

La trajectoire de décarbonation implique un effort financier sans précédent. Des appels à projets sont lancés, tant au niveau européen, national que régional. L'une des fonctions principales du pôle Aerospace Valley est de décrypter les différentes initiatives et d'accompagner les entreprises adhérentes au montage de

projets en proposant un guichet de financement adapté.

Au niveau européen, Horizon Europe est le 9^{ème} programme-cadre de l'Union européenne pour la recherche et l'innovation. Il a pris effet le 1^{er} janvier 2021, et couvre la période allant de 2021 à 2027. On citera notamment, le second appel à projets thématiques de l'EIC Accélérateur 2022 qui porte sur les technologies contribuant à l'atteinte de l'objectif « *fit for 55* », c'est-à-dire la réduction des émissions de gaz à effet de serre de 55 % au moins en 2030 par rapport à 1990, avec une thématique sur les solutions de mobilité zéro émission.

Le partenariat européen Clean Aviation pour une aviation propre a été lancé le 30 novembre 2021. Clean Aviation est le partenariat public-privé de la Commission européenne pour une aviation climatiquement neutre. Ce consortium représente le programme de recherche et d'innovation le plus ambitieux au monde pour un secteur de l'aviation durable. Il contribue au Green Deal et à la stratégie industrielle de l'Union européenne.

Toujours au niveau européen, le programme SESAR constitue le volet techno-

logique de la construction du ciel unique européen. Il a pour objectif de moderniser le système de gestion du trafic aérien européen (ATM) en développant de nouveaux concepts opérationnels dans un environnement technologique de nouvelle génération et aux standards harmonisés.

Au niveau de l'état français, le CORAC (Conseil d'orientation pour la recherche aéronautique civile), a défini les feuilles de route des technologies à mettre en œuvre pour remplir l'objectif de zéro carbone en 2050. A partir de ces feuilles de route, plusieurs plans sont mis en œuvre :

- un premier plan, d'une durée de 3 ans, est né courant 2020 pendant la crise sanitaire liée au COVID-19. Ce plan de soutien concerne la « *supply-chain* » mais aussi la décarbonation du trafic aérien ;
- un second plan concerne l'investissement France 2030, porté par Bpifrance, avec un appel à projets « Produire en France des avions bas carbone ».

On peut citer aussi l'appel à projets « Développement d'une filière de production française de carburants aéronautiques

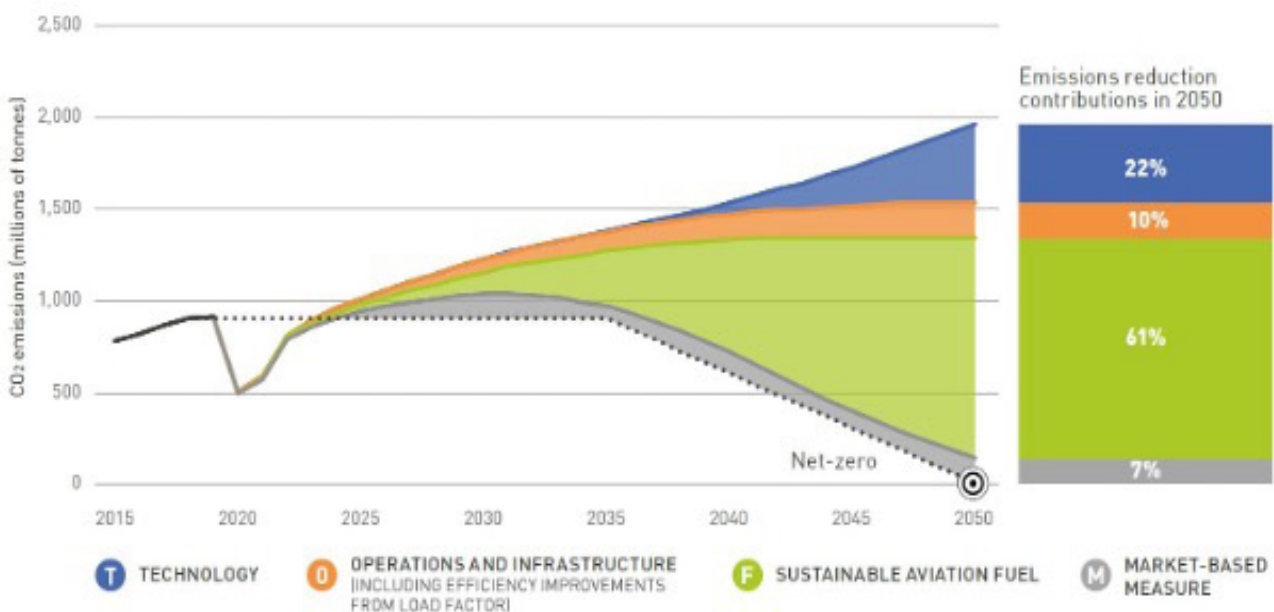


Figure 2 : Contributeurs à la neutralité carbone (Source : ATAG Waypoint 2050).

durables ». Celui-ci s'inscrit dans le cadre du 4^{ème} Programme d'investissements d'avenir (PIA4) et de la stratégie nationale « Produits biosourcés et biotechnologies industrielles – Carburants durables » financée par France Relance. L'Agence de la transition écologique (ADEME) propose aussi plusieurs appels à projets autour de la mobilité décarbonée.

Sur le plan régional, Aerospace Valley opère sur des appels à manifestation d'intérêt qui permettent d'initier des consortiums d'acteurs des territoires Néo-Aquitain et Occitanie proposant des dossiers de projets innovants sur la thématique MAELE pour être ensuite présentés aux deux régions pour d'éventuelles subventions.

Le marché de l'aviation légère, l'opportunité de nouveaux marchés

Une flotte vieillissante

En France, l'aviation légère se pratique à partir de 340 aérodromes ouverts à la circulation aérienne publique auxquels il convient d'ajouter 240 aérodromes agréés à usage restreint et 390 aérodromes à usage privé. Il existe par ailleurs 120 aéroports commerciaux. De fait, le réseau d'aérodromes est extrêmement développé sur le territoire national et proche des zones urbaines.

En parallèle, fin 2018, on comptait une flotte de 5750 avions légers, 1675 planeurs, 15797 ULM selon la DGAC [source Gama] et un peu plus de 28 000 pilotes privés. L'ensemble représente environ trois millions de mouvements d'aéronefs par an. Ce domaine vient d'atteindre un tournant, la moyenne d'âge de la flotte atteignant aujourd'hui les 46 ans. En effet, la grande majorité des appareils aujourd'hui en service ont été produits dans les années 70, avant la crise de « *product liability* » qui a stoppé la production d'avions légers pendant quasiment 15 ans. Les écoles, travaillant depuis des décennies avec des avions d'occasion robustes mais pas immortels, vont bientôt

“ En parallèle, fin 2018, on comptait une flotte de 5750 avions légers, 1675 planeurs, 15797 ULM selon la DGAC [source Gama] et un peu plus de 28 000 pilotes privés. L'ensemble représente environ trois millions de mouvements d'aéronefs par an.”

se retrouver exsangues car privées de leur moyen d'enseigner, faute de production entre les années 1980 et 1995. D'après les chiffres de la GAMA, on estime qu'un volume de 100 000 avions arriveront en fin de vie au cours de la prochaine décennie.

Quels sont les constructeurs pour les remplacer ?

A ce jour, les constructeurs historiques comme Cessna ou Piper se sont désintéressés de leur avions monomoteurs à piston (C172 & PA28) sans pour autant les remplacer. Cirrus Aircraft s'est positionné sur le très haut de gamme des avions privés. Les constructeurs d'Europe Centrale se sont orientés eux vers l'aviation non certifiée. Mais on voit que les choses commencent à évoluer avec l'annonce très récente du rachat de l'avionneur slovaque Pipistrel par Textron la maison mère de Cessna et de Bell aviation.

Le défi de la formation de pilotes

Une récente étude menée par le cabinet nord-américain Oliver Wyman alerte sur la pénurie de pilotes qui devrait impacter la reprise du secteur aérien de l'après covid-19. L'aviation commerciale manquera de 12 000 pilotes en 2023 atteignant 60 000 pilotes en 2029. La crise sanitaire a mis un frein brutal aux recrutements tout en réduisant ou suspendant de manière indéfinie les programmes de cadets. Les banques sont désormais plus frileuses pour octroyer des prêts pour une formation menant à une carrière qui semble désormais moins stable et moins lucrative qu'auparavant.

Un marché pour de nouveaux aéronefs vertueux

Rendre l'aviation légère plus écoresponsable et mieux acceptée par les citoyens, c'est aussi ouvrir la voie à de nouveaux usages. Cela est d'autant plus vrai que les coûts d'exploitation visés par les fabricants ont drastiquement diminué (dans un facteur 4) par l'introduction de nouvelles technologies. Ainsi, le remplacement de la flotte existante et le défi de la formation des futurs pilotes constituent un marché potentiel important. De nouveaux usages tels que les liaisons entre les petites villes via des liaisons régulières ou à la demande, tant pour du transport de passagers que du fret, le désenclavement de certains territoires, laissent envisager de nouveaux marchés.

La flexibilité est la clé de voûte pour le déploiement de ces nouveaux modèles économiques avec le développement de services à la demande à partir des aérodromes.

De jeunes entreprises régionales (AuraAero, Elixir Aircraft, VoltAero, ...) et des start-ups (Beyond Aero, Blue Spirit Aero, ...) ont bien compris l'enjeu de ces nouveaux marchés. Elles développent de nouveaux aéronefs utilisant tout un écosystème local dédié à l'aéronautique et en partie aidé par des subventions régionales ou nationales pour le développement de ces technologies en rupture. Le passage à la commercialisation nécessitera encore beaucoup de fonds et le challenge sera de trouver des investisseurs.





Figure 3 : Nouvel aéronef léger à base de matériaux composites - Crédit-photo Elixir Aircraft.

●●● Elixir Aircraft a été pionnier en certifiant son avion de 4^{ème} génération selon le règlement EASA (CS-23, amendement 5), premier pas vers une solution complètement décarbonée (figure 3). Le modèle d'avion Elixir utilise principalement des matériaux composites, supprimant les assemblages complexes à base de rivets et vis. L'avion est plus léger et plus solide. Il est 50 % plus économe en carburant. Avec son Rotax 912iS (100 CV), l'Elixir utilise de l'essence non plombée moins nocive pour l'environnement et ne consomme qu'entre 10 et 15 l/h.

Nouvelles propulsions envisagées pour l'aviation légère décarbonée

Le segment aviation légère nécessite des puissances totales de quelques dizaines de kW à 1 MW pour la partie haute de la catégorie « avion à 19 places » (CS23) et des durées de vol relativement faibles (3 heures maximum). Ces caractéristiques

autorisent le développement de solutions innovantes basées sur la propulsion électrique, inenvisageables pour des applications plus contraignantes en autonomie ou en charge payante.

La propulsion électrique ou hybride-électrique

Pour une application aérospatiale, la masse est primordiale. Aujourd'hui toutes les solutions envisagées sont plus lourdes que les solutions conventionnelles basées sur les motorisations thermiques brûlant de l'énergie fossile.

Les nouvelles solutions à base de propulsions électriques sont architecturées autour d'un ou de plusieurs moteurs électriques entraînant la ou les hélice(s). L'électronique de puissance est alimentée par une source énergétique qui peut être soit une batterie, soit une pile à combustible, soit un système hybride (par exemple une source thermique combinée à une batterie).

“ Pour le système hybride, le défi consiste à trouver le bon compromis entre charge utile, autonomie et coûts afin de définir le ratio d'hybridation optimal, c'est-à-dire la répartition de puissance entre l'énergie thermique et l'énergie électrique stockée dans les batteries. ”

Pour le système hybride, le défi consiste à trouver le bon compromis entre charge utile, autonomie et coûts afin de définir le ratio d'hybridation optimal, c'est-à-dire la répartition de puissance entre l'énergie thermique et l'énergie électrique stockée dans les batteries.

La caractéristique énergétique de l'aéronautique est un besoin de puissance important en phase de décollage et de montée qui dimensionnent les composants du système propulsif. Les cellules des batteries seront choisies dans ce sens. Les piles à combustibles qui n'ont pas de dynamique seront couplées aussi à une batterie (ou super-capacité) dans cet objectif, offrant par ailleurs une meilleure autonomie et une capacité de recharge rapide. Enfin les propulsions hybrides seront destinées au segment de puissance moyen et haut, le moteur thermique restant la source principale, l'électrique réduisant les nuisances au sol ou près du sol. Le carburant conventionnel devrait être progressivement remplacé par des carburants issus de la bio masse.

L'avion de démonstration volant Cassio de VoltAero (figure 4) valide la configuration du groupe motopropulseur de Cassio (motorisation hybride thermique-électrique) ; Il devrait obtenir bientôt sa certification de navigabilité. Il a déjà parcouru 10 000 km.

Les perspectives sur les batteries

La technologie actuelle des batteries présente des densités d'énergie trop faibles pour les gros avions mais leur utilisation pour l'aviation légère est possible. L'autonomie est proche d'une heure et 150 km de rayon d'action. Mais une fois décomptées les réserves requises par les autorités de certification et les effets de vieillissement, le temps de vol « utile » tombe à 30 minutes, ce qui est encore trop peu pour la majorité des usages de ce segment.

Il faut être prudent par rapport aux effets d'annonce de densités mirobolantes, d'abord parce que bien souvent ces den-

sités sont obtenues à très faible échelle et donc difficilement transposables à de plus grandes échelles. D'autres facteurs rentrent aussi en compte, comme notamment la capacité de décharge et de recharge, le vieillissement, le besoin de fonctionnement à température chaude.

La technologie Li-ion liquide, universellement employée aujourd'hui, perdurera au moins jusqu'en 2030. Sa densité d'énergie massique est passée de 90 Wh/kg à 250 Wh/kg. Cependant son inconvénient majeur est sa réactivité et son inflammabilité due en partie à l'électrolyte liquide. Les autorités imposent des mécanismes de protection supplémentaires grevant fortement la masse. D'où l'intérêt du Li-ion gélifié et du Li-ion tout solide, qui devraient offrir une bien plus grande sécurité d'utilisation. La densité d'énergie massique n'excédera sans doute pas les 300 Wh/kg, mais il pourrait constituer un compromis intéressant entre performance et sécurité.

De leur côté, le Li-ion Solid State et le Lithium Metal, envisagés au-delà de la décennie, devraient afficher des densités d'énergie massique plus importantes que 400 Wh/kg. Les progrès des batteries embarquées sont lents et leur développement nécessite des investissements colossaux que seul le marché automobile peut assumer grâce aux volumes associés.

“ Le carburant conventionnel devrait être progressivement remplacé par des carburants issus de la bio masse. ”

Les perspectives sur les piles à combustible

La densité de puissance des piles à combustible est au moins trois fois celles des batteries. Elle offre un avantage indéniable sur le temps de recharge. Le temps de remplissage d'hydrogène est proche de celui des carburants conventionnels.

Plusieurs technologies existent. Parmi les plus connues on citera les piles avec membrane à échange de proton basse température (PEM-LT) et son pendant à haute température (PEM-HT) qui délivrent entre 1kW/kg aujourd'hui jusqu'à 3 kW/kg à horizon 2030.

La PEM LT est la technologie la plus mature technologiquement mais elle est très pénalisante au-delà des puissances supérieures à 10 kW car elle nécessite un refroidissement conséquent d'où un usage réservé aux faibles puissances (< 50 kW).

La PEM HT est une technologie moins mature mais elle offre l'avantage de fonctionner avec un hydrogène moins pur que celui destiné à la PEM-LT. Mais comme pour les batteries, le cœur de la pile ne

peut pas fonctionner sans des servitudes (stockage H2 gazeux 350 bar, 700 bar ou cryogénique, échangeur thermique, ...) qui pénalisent la densité.

La propulsion conventionnelle reste toujours d'actualité

Conserver les moteurs thermiques actuels a du sens car même si le rendement d'un moteur thermique est inférieur à celui d'une pile à combustible (30% contre 50%), la possibilité de réutiliser les architectures d'avion existantes présente un réel avantage. De plus le « *rétrofit* » de la motorisation permet de réduire les coûts, sachant que les aéroclubs ne pourront pas financièrement renouveler toute leur flotte même temps.

Le carburant d'origine fossile devrait être remplacé par des bio-carburants ou de l'hydrogène vert. Plusieurs adaptations seront nécessaires notamment au niveau de l'injection pour l'emploi des bio-carburants ou celui de l'hydrogène qui conduisent à une combustion beaucoup plus exothermique. La distribution entre le réservoir et le moteur devra être renforcée pour éviter les risques de fuites et d'explosion plus importants qu'avec un carburant classique. La fiabilité du moteur restera à démontrer car ces carburants alternatifs ne comportent pas d'aromatiques qui permettent la lubrification et la non dégradation des joints d'étanchéité en élastomère.

Enfin le stockage de l'hydrogène reste un problème à résoudre car la densité d'énergie gravimétrique de l'hydrogène est trois fois supérieure à celle du kérosène mais sa masse volumique est très faible (71 kg/m³ sous forme liquide, quatorze fois moins dense que l'eau), son énergie volumique est 3,7 fois plus faible que celle du kérosène. L'hydrogène sera ●●●



Figure 4: Avion de démonstration Cassio - Crédit-photo © VoltAero.

“Plusieurs technologies concourent à la décarbonation de l’aviation légère. Elles sont complémentaires et beaucoup de paramètres entrent en jeu pour le choix, mais aucune de ces technologies n’est actuellement suffisamment mature.”

●●● certes trois fois plus léger que le kérosène, mais presque quatre fois plus volumineux, nécessitant donc des réservoirs plus difficiles à loger dans une architecture d’avion classique.

Conclusion sur la propulsion

Plusieurs technologies concourent à la décarbonation de l’aviation légère. Elles sont complémentaires et beaucoup de paramètres entrent en jeu pour le choix, mais aucune de ces technologies n’est actuellement suffisamment mature. Un premier pas a été fait avec la première certification l’avion électrique Velis Electro du fabricant Slovène Pipistrel, destiné principalement à la formation initiale des

pilotes. Reste la question économique. Ces nouvelles propulsions et surtout les carburants alternatifs durables, sont pour le moment 5 à 10 fois plus chers que les carburants conventionnels. Ce qui explique la recherche de massification des usages pour l’hydrogène, la création de filières bio-carburants et aussi des aides financières.

Les infrastructures aéroportuaires doivent aussi s’adapter

L’émergence des technologies embarquées doit être accompagnée par des adaptations des infrastructures aéroportuaires pour assurer le déploiement de

L’auteur

Philippe Lagarde occupe la fonction de chargé de mission mobilité aérienne légère et décarbonée au sein du pôle de compétitivité Aerospace Valley en détachement de Safran Helicopter Engines. Après 39 ans passés dans les technologies innovantes des turbines à gaz comme les systèmes carburant à FADEC (calculateur numérique) et dernièrement comme responsable R&T de la feuille de route de la propulsion hybride-électrique, il met son expérience au profit des adhérents d’Aerospace Valley.

systèmes de transport aérien opérationnels. En effet, il est aussi nécessaire de démontrer que l’avion électrique peut opérer de manière sûre et efficace depuis les aérodromes, et de mettre en place la logistique et les équipements dont il a besoin pour ses opérations au sol.



Figure 5 : Hub énergétique pour aérodrome selon Engie. Crédit-photo : Engie green.

Pour les batteries, il existe plusieurs solutions techniques pour assurer leur rechargement au sol. Tout d'abord, il est possible d'installer des chargeurs fixes au niveau des postes avions. En connectant l'avion au chargeur au début des opérations d'assistance au sol, les batteries peuvent se recharger pendant le temps de rotation. La fourniture de ce type d'équipement et de service n'est pas inconnue des aéroports, avec notamment l'alimentation 400 Hz des avions au poste. Afin de permettre le chargement des batteries en des temps compatibles avec les besoins opérationnels des exploitants d'aéronefs, la puissance électrique fournie par ces chargeurs devrait être comprise entre plusieurs centaines de kW et quelques MW. Les chargeurs mobiles, avec un système de batteries de forte capacité ou de piles à combustible montées sur un camion ou une remorque, sont une alternative possible aux chargeurs fixes. Enfin, une troisième option est le « *battery swapping* », consistant au remplacement au poste des batteries vides par des éléments préalablement rechargés.

Cette solution est séduisante, car elle peut théoriquement réduire l'impact du processus de chargement des batteries sur la disponibilité des avions. Néanmoins, les autorités de certification doivent définir les conditions nécessaires pour que ce remplacement puisse être réalisé comme une simple opération d'assistance en escale. Au niveau de l'aéroport, cette technique implique aussi la présence d'un inventaire de batteries compatibles, rechargées et prêtes à l'emploi.

Les avions à hydrogène, quant à eux, nécessiteront la mise en place de filières adaptées. À court terme, l'utilisation de chaînes logistiques existantes (livraison par camions-citernes spéciaux) ou le développement de nouvelles chaînes (livraison de containers ou *Pods* prêts au chargement dans l'avion) devrait pouvoir répondre aux besoins limités des premiers utilisateurs aéronautiques. Au-delà, les aéroports pourraient bénéficier du développement d'une économie hydrogène justifiant la création de chaînes logistiques livrant ce gaz en grandes quantités à nombre d'autres uti-

lisateurs – dont les avions turbopropulseurs et turboréacteurs à hydrogène qui pourraient émerger au-delà de 2035. Le premier défi est d'ordre réglementaire et sécuritaire. Introduire une molécule d'hydrogène dans un domaine ultra-normé, ultra-réglémenté comme celui de l'aéroportuaire est un sujet délicat. Il y a ensuite un défi opérationnel : l'hydrogène liquide se conserve à -253 °C, ce qui nécessite des précautions particulières.

Le développement de réponses adaptées aux petits terrains d'aviation générale est un prérequis au succès de l'aviation légère. Là aussi, Aerospace Valley a son rôle à jouer par la mise en relation et la fédération de tout l'écosystème.

Les énergéticiens commencent à développer des offres clés en main de « hubs énergétiques » à destination des aérodromes. C'est par exemple le cas de l'offre FLHY d'ENGIE Green qui associe production photovoltaïque et recharge électrique / avitaillement hydrogène (figure 5). ■

Résumé

La pandémie du Covid-19 et de façon concomitante les alertes venant du GIEC ont fait prendre conscience qu'il fallait accélérer les actions pour tenir les accords de Paris face au réchauffement climatique. L'aéronautique est prête à relever ce défi qui est stratégique pour la France en termes économiques. Dans ce contexte, le pôle de compétitivité Aerospace Valley a lancé fin 2020 une initiative MAELE (Mobilité AErienne Légère et Environnementalement responsable), qui rassemble une communauté d'environ 300 acteurs régionaux innovants dans le domaine de la mobilité aérienne légère et décarbonée. Issus de cette communauté naissent des consortiums qui génèrent des projets qu'Aerospace Valley oriente vers des guichets de financements appropriés. Les technologies de décarbonation de l'aviation légère sont d'excellents tremplins pour des applications sur des avions plus gros. Mais l'aviation légère décarbonée, si elle réussit à se faire accepter socialement, offrira aussi des perspectives de nouveaux marchés dont le transport régional. Après un balayage des technologies innovantes embarquées, l'article présente des projets d'ores et déjà lancés pour que les aérodromes puissent alimenter les nouveaux aéronefs avec ces nouvelles énergies. ■

Abstract

The Covid-19 pandemic and, concomitantly, the alerts from the GIEC have made people aware of the need to accelerate actions to meet the Paris agreements in terms of global warming. Aeronautics is ready to take up this challenge, which is strategic for France in economic terms. In this context, the Aerospace Valley competitiveness cluster launched a MAELE (Light and Environmentally Responsible Air Mobility) initiative at the end of 2020, which brings together a community of around 300 innovative regional players in the field of light and carbon-free air mobility. From this community arise consortia that generate projects that Aerospace Valley directs to appropriate funding windows. Light aviation decarbonization technologies are an excellent springboard for applications on larger aircraft, but low-carbon light aviation, if it succeeds in gaining social acceptance, will also offer prospects for new markets, including regional transport. After a scan of the innovative on-board technologies, we will see that projects have already been launched so that our aerodromes can supply these aircraft with these new energies. ■



Propulsion hybride et aérostatique : une alliance d'avenir pour le transport cargo

Comment Flying Whales, start-up française, va révolutionner le transport aérien de charges lourdes en proposant une solution à très faible émission de carbone grâce à la mise au point d'un ballon dirigeable faisant office de grue volante.

Introduction

Il n'est pas toujours facile de regarder au-delà de la norme et de penser différemment, mais dans le cas de l'aviation, cet effort est essentiel pour progresser. L'association internationale du transport aérien (IATA) a récemment convenu d'atteindre des émissions en carbone net-zéro d'ici à 2050, conformément

aux objectifs de l'accord de Paris visant à limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C. L'objectif actuel de l'organisation de l'aviation civile internationale (OACI) est de réduire les émissions nettes de carbone de l'aviation en 2050 à 50 % des niveaux de 2005. Dans le même temps, les échanges globaux restent importants et impliquent la mobilité des personnes et des biens toujours en croissance. Les pré-

Pierrot Guillou

Flying Whales – Chef de département
architecture physique

visions de l'OACI et de IATA indiquent une forte trajectoire de croissance d'ici à 2050 (généralement autour de 4,5 % de taux de croissance annuel composé [TCAC]).

Pour répondre à cette problématique, il existe des possibilités d'innovation pour contribuer à la réduction des émissions, permettant au secteur de l'aviation de dépasser les objectifs actuels de l'OACI. Ces évolutions technologiques peuvent nécessiter ou favoriser des changements dans les réseaux de transport et permettre le remplacement des services existants et le développement de nouveaux services. En déployant rapidement ces innovations, il est possible d'améliorer les résultats globaux du secteur en matière d'émissions.

Un changement radical ne signifie pas et ne devrait pas signifier la fin du transport aérien. L'aviation est un élément essentiel de notre société et de notre économie. Elle permet le commerce, crée des millions d'emplois et, surtout, relie les gens et les cultures ; en tant que société, nous sommes mieux unis et connectés. Dans ce contexte, un changement radical signifie qu'il faut fournir aux transports des

“L'objectif actuel de l'organisation de l'aviation civile internationale (OACI) est de réduire les émissions nettes de carbone de l'aviation en 2050 à 50 % des niveaux de 2005.”

solutions qui maintiennent et renforcent les avantages offerts par l'aviation sans les impacts négatifs associés.

La vision de FLYING WHALES

Dans la droite ligne d'une industrie du transport qui s'est donné comme objectif de réduire significativement son empreinte carbone, FLYING WHALES a l'ambition de développer un système de transport cargo aérien plus sobre. L'enjeu étant de répondre aux besoins opérationnels de puissance, notamment pour effectuer des opérations de levage en vol stationnaire, tout en réduisant drastiquement l'impact environnemental et la consommation en carburant de l'aéronef en tirant le meilleur parti de la sustentation aérostatique.

Concrètement, cette vision s'incarne dans l'alliance entre une propulsion vertueuse et une capacité à transporter des charges lourdes, sans avoir besoin de se poser. Au niveau de la propulsion, la première étape passe par une chaîne hybride électrique, sujet de cet article. Elle est le préalable à l'avènement d'une chaîne de propulsion tout électrique, fondée sur la pile à hydrogène, capable de proposer une alternative sans émissions en vol.

Le projet de FLYING WHALES est le LCA60T : *Large Capacity Airship 60 Tons*. Il s'agit d'un aéronef capable de charger et décharger jusqu'à 60 tonnes de fret en vol stationnaire (figure 1). Ce dirigeable rigide est destiné aux marchés du débardage du bois, du fret et du transport exceptionnel. Le LCA60T représente une plateforme idéale pour accélérer l'évo- ●●●



Figure 1: Le projet LCA60T, cargo volant de FLYING WHALES – source FLYING WHALES.

●●● lution de ce type de technologie, et ce contrairement à un aéronef classique (avion ou hélicoptère). En effet, les dimensions de l'appareil, 200 m de long pour 50 m de diamètre ainsi qu'une soute de 96 m de long, offrent une place inédite aux tests de technologies. Par ailleurs, les conditions environnementales peu sévères renforcent cette facilité de test. En sommes, le LCA60T s'apparente aujourd'hui à un banc d'essai volant. S'ajoute à cela un fait rare en aéronautique : le cadre réglementaire dans lequel l'aéronef évoluera s'écrit en même temps que la solution est développée en interne, conférant à la conception un atout majeur.

Ce rôle de facilitateur et accélérateur d'innovation est applicable à différents systèmes. Celui de la propulsion en est un majeur.

La part belle à l'électricité

Dans le domaine aéronautique, de nombreuses architectures de propulsion, tout ou partiellement électriques, voient le jour. A la clé, un double bénéfice : d'une part réduire les émissions de CO₂ en opération et améliorer la fiabilité des systèmes et d'autre part garantir la disponibilité de la puissance électrique malgré un besoin de moindre vitesse de turbine pour les besoins de transport car il faut garantir une capacité de vol stationnaire suffisante.

Ceci implique de nombreuses ruptures telles que :

- des ruptures en architectures systèmes et lois d'automatisation mises en place ;
- des ruptures technologiques dans les domaines de la production électrique embar-

quée, du stockage, de la distribution et de la fonction propulsive.

C'est principalement sur cet aspect que FLYING WHALES travaille et innove. Mais, comme toujours en aéronautique, au-delà des défis technologiques, les enjeux de certification sont déterminants dans l'adoption d'une innovation. Ces aspects réglementaires sont très activement instruits par l'Agence européenne de sécurité aérienne (EASA). En ce domaine, FLYING WHALES constitue un programme phare.

Propulsion hybride : de quoi parle-t-on ?

Une propulsion hybride est une propulsion qui combine plusieurs sources d'énergie, principalement énergie électrique et énergie thermique. Il existe aujourd'hui plusieurs architectures d'hybridation (figure 2).

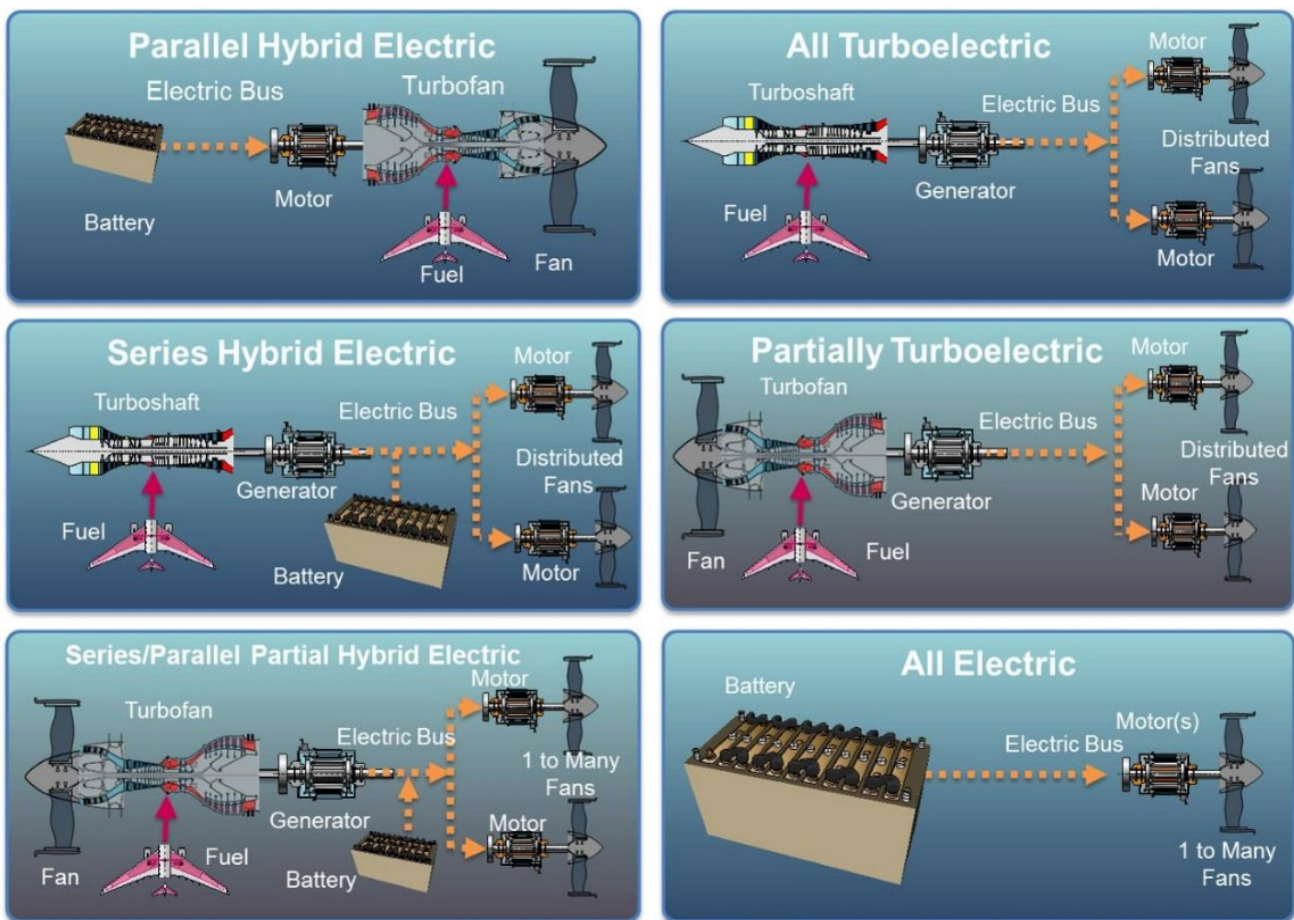


Figure 2 : Classification des différentes architectures de propulsion électrique appliquées aux véhicules aériens.

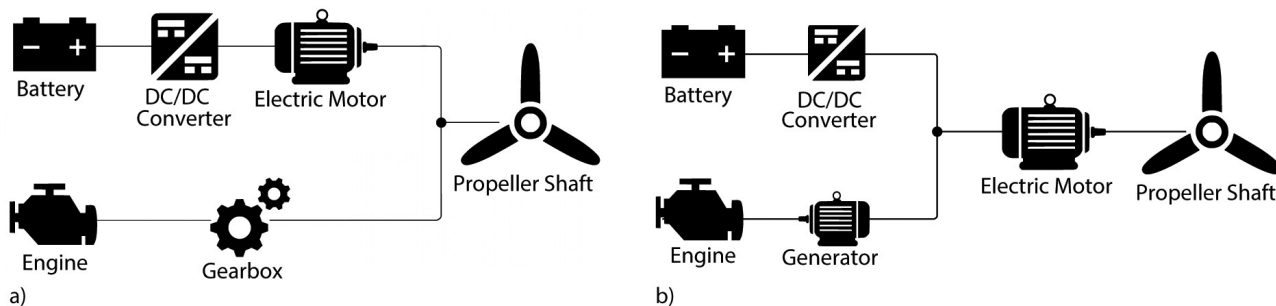


Figure 3 : Présentation des architectures hybrides parallèle (a) et série (b).

Nous en présentons deux ci-dessus.

La première est une *architecture hybride série*, c'est-à-dire que le moteur thermique ne permet que d'alimenter des batteries et des moteurs électriques. Il n'est pas en prise directe avec l'entraînement du véhicule ; seuls les moteurs électriques entraînent les systèmes propulsifs, constitués le plus souvent des hélices (figure 3).

La seconde est une *architecture hybride parallèle*. Dans cette architecture, le moteur produit directement tout ou partie de la force d'entraînement du véhicule. Un ou plusieurs moteurs électriques assurent également tout ou partie de l'entraînement du véhicule, en parallèle du moteur thermique, dans certaines phases de vol. Les moteurs électriques sont alimentés par batteries préchargées avant le vol et éventuellement rechargées par les moteurs thermiques en cours du vol (figure 3).

Différentes combinaisons des deux architectures peuvent également être développées.

La propulsion hybride est déjà courante dans l'industrie automobile, portée initialement par les industriels japonais Toyota et Honda. Elle l'est aussi désormais chez les grands constructeurs européens.

Pour l'aéronautique, la propulsion électrique est utilisée aujourd'hui sur quelques petits avions de tourisme, avec des moteurs alimentés par batterie (pro-

“ La propulsion hybride est déjà courante dans l'industrie automobile, portée initialement par les industriels japonais Toyota et Honda. Elle l'est aussi désormais chez les grands constructeurs européens. ”

pulsion non hybride). Des projets d'avion ou de véhicules multi-rotors urbains apparaissent actuellement, utilisant la propulsion électrique ou électrique-hybride, le plus souvent avec une architecture série. Les grands motoristes aéronautiques étudient également des systèmes de propulsion électriques-hybrides parallèles, pour augmenter les performances des moteurs d'avions ou d'hélicoptères dans certaines phases de vol.

Architecture de propulsion du LCA60T

La motorisation du LCA60T est constituée de sept points de propulsion, eux-mêmes composés de propulseurs à hélices, répartis sur la carène du dirigeable (figure 4). Les propulseurs sont orientés sur les trois axes horizontal, latéral et vertical afin de contrôler le vol en croisière et le vol stationnaire dans toutes les conditions de

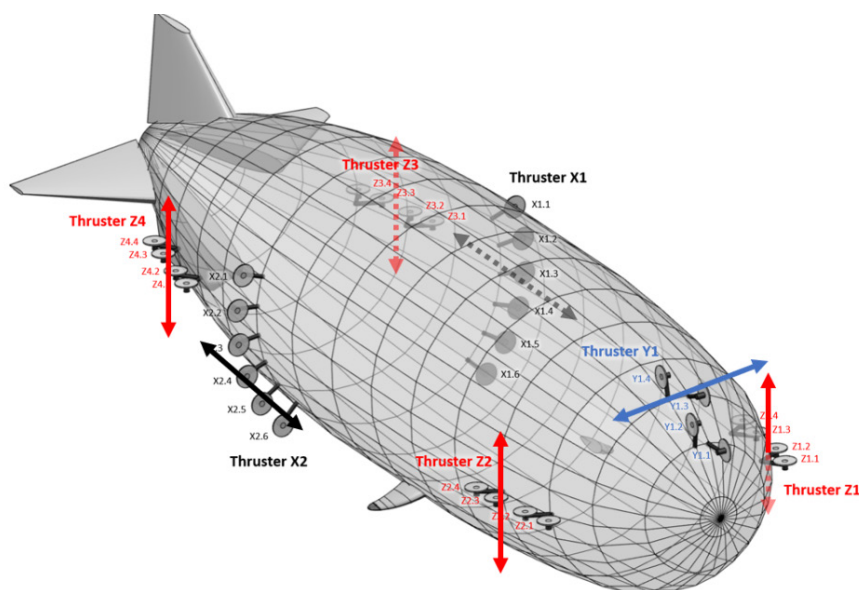


Figure 4 : Présentation des architectures hybrides parallèle (a) et série (b).

A propos de FLYING WHALES

FLYING WHALES est une entreprise française dont le siège social est situé à Suresnes (Hauts-de-Seine). Créée en 2012, l'entreprise développe grâce à ses innovations et à la qualité de ses équipes et de son consortium industriel, un programme ambitieux et unique au monde : le LCA60T, un dirigeable rigide pour le transport de charges lourdes doté d'une capacité d'emport de 60 tonnes.

Conçu originellement pour répondre aux besoins de débardage de la ressource renouvelable de bois en zone difficile d'accès, le LCA60T a vocation, grâce à ses caractéristiques uniques de chargement et déchargement en vol stationnaire, à apporter des réponses aux nombreux problèmes de logistique et d'enclavement à travers le monde avec une très faible empreinte environnementale. Cette solution permettra, à bas coût, de s'affranchir de toutes contraintes au sol pour le transport de point à point de charges lourdes ou volumineuses, car il n'est pas besoin de se poser pendant les opérations. FLYING WHALES développe parallèlement FLYING WHALES SERVICES, la société d'opération des LCA60T.

- vent. Chaque propulseur est équipé de moteurs d'inverseurs de poussée et d'hélices à faible bruit.

Différentes architectures possibles

Deux architectures ont été envisagées pour réaliser cette motorisation. La première consistait en une motorisation thermique et la seconde une motorisation hybride-électrique.

La première solution, purement thermique, prévoyait l'installation d'un moteur à combustion interne (turbine ou moteur à piston) entraînant directement chaque hélice. Cette solution se heurtait à plusieurs inconvénients. Les moteurs à piston, notamment Diesel, dans la gamme de puissance désirée (800 kW par hélice) n'existent pas. Ensuite, ce sont des problèmes de coût qui entrent en jeu. En

effet, le développement et la certification de nouveaux moteurs représenterait un processus long et coûteux. En outre, avec un minimum de huit turbines nécessaires au bon fonctionnement du système, une solution à turbine affichait un coût trop important. Enfin, le coût de maintenance du système s'avérait prohibitif. Cette motorisation thermique, qu'on peut qualifier de classique, n'a donc pas été retenue pour le projet LCA60T.

La seconde solution est une propulsion électrique-hybride série distribuée. C'est elle que l'on voit actuellement émerger sur des projets d'innovation aéronautique. La production de puissance électrique est centralisée et réalisée par quatre turbines entraînant des générateurs, avec une puissance installée totale de 3 800 kW. Cela permet, d'assurer les besoins en puissance du dirigeable, moteurs et systèmes

compris. Les excursions d'appels de puissance en crêtes transitoires sont eux garanties par l'utilisation de batteries lithium servant de tampon. Cette solution utilise un réseau de distribution et de stockage électrique à haute tension, de 800 V en courant continu. Cette architecture permet de stocker momentanément l'énergie et de l'acheminer à l'ensemble des points de propulsion en fonction des besoins du système de navigation, tout en minimisant les pertes électriques par effet Joule. Enfin, des hélices entraînées par des moteurs électriques de forte puissance, 2 fois 100 kW chacun, viennent compléter le dispositif.

Cette motorisation électrique-hybride série, qui présente de nombreux avantages, a donc été retenue pour le LCA60T.

Les avantages de la motorisation électrique-hybride série

En premier lieu, cette motorisation nécessite d'une part une puissance installée totale plus faible que pour la solution classique, et d'autre part un plus petit nombre de turbines (quatre lignes indépendantes). Cette installation permet de réduire les coûts de production et les coûts de maintenance tout en assurant le niveau de sécurité et de fiabilité exigé. Les moteurs électriques ont par ailleurs un coût très inférieur aux moteurs à turbine et permettent de faciliter les actions de maintenance, notamment préventive. De plus, ces moteurs sont peu ou pas sensibles à des cycles d'utilisation fortement variables. L'hybridation a également un avantage très intéressant de décorrélation des différents éléments de la chaîne. Elle permet en effet de décorréliser les appels de puissance des propulseurs (*thrusters*) vis-à-vis de la turbine et ainsi de limiter ses excursions en régimes transitoires. Cela a deux effets majeurs : le premier est de limiter la consommation de la turbine qui surconsomme en transitoires et le deuxième est d'allonger la durée de vie des turbines et donc de limiter les actions de maintenance et les coûts directs d'opération de la machine.

“ L'hybridation a également un avantage très intéressant de décorrélation des différents éléments de la chaîne. Elle permet en effet de décorréliser les appels de puissance des propulseurs (*thrusters*) vis-à-vis de la turbine et ainsi de limiter ses excursions en régimes transitoires. ”

A noter que certains projets proposent d'utiliser des cellules photovoltaïques. Cependant, les rendements des cellules photovoltaïques actuelles sont insuffisants pour en faire une source d'énergie utile.

Des enjeux inédits

Malgré une relative avancée technologique sur la propulsion hybride électrique série, le niveau de performances attendu pour le système de propulsion du LCA60T a exigé d'importants développements et de nombreuses mises au point, permettant la certification de tous les sous-ensembles du système propulsif. Ces développements sont au cœur des partenariats que FLYING WHALES construit depuis 2017 avec les partenaires de son consortium.

Une puissance électrique inhabituelle

Dans un premier temps, il faut être à même de répondre à une production électrique de forte puissance. Les puissances électriques habituellement embarquées dans un avion sont de l'ordre de 300 kW (anciennes générations) jusqu'à 1000 kW pour le Boeing 787 par exemple. Pour le LCA60T, la puissance installée est de l'ordre de 3 800 kW, ce qui constituera un record aéronautique mondial à la date visée pour le 1^{er} vol (courant 2024). Pour les coupler à des turbines d'hélicoptères tournant aux environs de 20 000 tr/mn, il sera nécessaire de concevoir, développer et certifier des boîtes d'accessoires à haute vitesse et forte puissance, des générateurs triphasés à forts voltages et des convertisseurs AC/DC de forte puissance permettant la production de courant continu haute tension sur le réseau de l'aéronef. Ces générateurs permettent de satisfaire les limites de masse pour la puissance demandée. En pratique, un réducteur à faible taux de réduction sera utilisé pour ajuster la vitesse de bon fonctionnement de la turbine aux vitesses d'entrées requises pour le générateur. Il s'agira de générateurs de forte puissance, la production totale d'électricité nécessitant quatre générateurs d'environ 1 000 kW. Enfin, le niveau de tension

“ Les moteurs électriques les plus puissants actuellement disponibles pour l'aéronautique sont de 260 kW. Toutefois, la mise en vol et surtout la certification de ces moteurs restent à définir.”

souhaité est de 800 V en courant continu, ce qui est très au-dessus des générateurs électriques actuellement utilisés en aéronautique, généralement limités à 230 V en courant alternatif. Ce niveau de tension n'est en revanche pas optimal, il correspond à la limite technologique actuelle des composants qualifiés en aéronautique et disponibles sur le marché. En termes de performance, notamment de puissance massique, il faut noter que le rendement électrique et le système de refroidissement sont extrêmement ambitieux et conduisent à sélectionner des produits intégrant les derniers développements technologiques. Les systèmes actuels sont bien souvent refroidis par le moteur. Cette architecture n'est pas envisageable sur le LCA60T car le système de refroidissement des turbines sélectionnées atteint les limites de ses capacités. Il est donc nécessaire d'introduire un système de gestion du refroidissement du turbogénérateur.

Un niveau de tension peu commun

Le réseau de puissance utilisé pour la propulsion sera un réseau continu de 800 V. Ce niveau de tension n'est aujourd'hui utilisé que sur des prototypes. La gestion des excursions de tension en cas de pannes, les modes de protections et limiteurs pour la production électrique alimentant le réseau sont autant d'éléments à considérer pour pouvoir intégrer ces systèmes à bord. Les verrous à lever concernent le développement et la qualification des composants électriques de forte puissance, tels que les redresseurs, les onduleurs et les contacteurs notamment.

Par ailleurs, le besoin d'équilibrage du réseau lors des phases transitoires en crête de puissance étant confirmé, il est néces-

saire d'intégrer des batteries dans le système électrique qui fonctionnent à 800 V et sont capables d'absorber et de délivrer de fortes puissances dans des temps très courts. Ces batteries seront fortement sollicitées et soumises aux différents environnements thermiques. Elles auront donc de fortes réjections thermiques qu'il faudra pouvoir maîtriser si l'on souhaite garantir leur durée de vie, les taux de disponibilité de la machine et les coûts réduits de maintenance.

Une puissance qui doit suivre au niveau des moteurs

Les moteurs électriques les plus puissants actuellement disponibles pour l'aéronautique sont de 260 kW. Toutefois, la mise en vol et surtout la certification de ces moteurs restent à définir. De plus, la recherche d'une adéquation entre puissance, couple et régime de rotation est délicate. Cela nécessite le développement de solutions spécifiques pour intégrer la chaîne de puissance. Le refroidissement de ces systèmes et la certification au feu sont également des points d'attention car les solutions sur étagère n'existent pas. Les hélices sont de grandes dimensions et doivent tourner relativement lentement (1000 tr/min +/- 200 tr/min suivant la dimension retenue).

Etant donné les technologies des moteurs électriques du marché et les prix pratiqués par certains fournisseurs, le choix des moteurs est assez restreint. Les moteurs doivent tourner très vite (environ 8000 tr/min) et imposent l'utilisation d'un réducteur de vitesse pour fournir à l'hélice un niveau de couple/régime cohérent avec les performances de poussée attendues. Le grand nombre ●●●

●●● de propulseurs, leur distribution et leurs comportements variés imposent des contraintes fortes sur la lubrification des ensembles de réduction. Grâce à des études poussées, une configuration optimale est recherchée pour minimiser la masse et la complexité des systèmes embarqués.

Des hélices aux spécifications inhabituelles

Le LCA60T est un dirigeable charges lourdes conçu pour être une sorte de grue volante. Le cahier des charges impose donc des précisions de positionnement en vol stationnaire jamais atteintes pour ce genre de machine.

De ce fait, les hélices présentent des spécifications inhabituelles. Le rendement propulsif recherché (plus un rotor est grand, plus il est efficace) et le nombre de mach en bout de pale, pour limiter le niveau de bruit, imposent des hélices de grande dimension, d'environ quatre à cinq mètres de diamètre, amenant leur nombre à trente-deux. Par ailleurs, les hélices latérales et verticales doivent pouvoir fournir la même force de poussée dans les deux directions, ce qu'une hélice classique conçue pour fonctionner à des vitesses d'avance élevées et donc vrillée non symétrique ne peut pas faire (la poussée inversée est typiquement 50 % à 70 % plus faible que la poussée vers l'avant en vol). Ce besoin conduit à des contraintes de conception aérodynamique très particulières, afin d'offrir un rendement propulsif de haut niveau, tout en minimisant les contraintes mécaniques dans les pales.

Un système de contrôle de la propulsion inédit

Le système de contrôle de la propulsion devra être développé de telle sorte qu'à chaque instant du vol les points de fonctionnement de chaque hélice soient adaptés (sélection du pas), en fonction des besoins du pilotage de l'aéronef. Le contrôle des moteurs de-

tra lui aussi permettre de fonctionner à couple constant, via l'adaptation permanente du couple consommé par le point de propulsion et de puissance au point de fonctionnement de l'hélice.

La stabilité du réseau électrique devra également être garantie. Il faudra ajuster le calcul de la puissance totale consommée et le contrôle des générateurs afin qu'ils délivrent la puissance nécessaire directement aux propulseurs et aussi qu'ils puissent alimenter des batteries haut voltage au lithium.

Des logiques de contrôles spécifiques devront être développées dans le système de commandes de vol. Il sera ainsi possible de gérer la distribution des besoins de poussée sur les différents points de fonctionnement, la gestion et distribution de la puissance à bord et les modes de reconfiguration pour assurer le niveau de sûreté. Ceci permettra de s'assurer du bon fonctionnement des systèmes de protection et de reconfiguration du réseau électrique.

Le nombre de moteurs nécessaires à la propulsion de la machine est important et la gestion d'une propulsion multipoint est jusqu'à présent relativement méconnue. Aussi une attention toute particulière devra être apportée, notamment au niveau de l'interface avec le système de gestion du vol. La mise en place de modèles physiques fins représentant les comportements des systèmes devrait permettre de consolider le comportement du dirigeable en vol et ainsi d'affiner les spécifications et les opérations.

L'auteur



Formé en génie des systèmes mécaniques intégrés à l'Université de Technologie de Compiègne, **Pierrot Guillou** complète son cursus avec un master

en aérodynamique à Cranfield University (UK). Il rejoint ensuite Safran, où il occupe différentes fonctions en installation et avionique de systèmes propulsifs. Il se tourne ensuite vers l'architecture de systèmes propulsifs chez Safran Aircraft Engines avant de devenir manager de projet.

Pierrot a finalement rejoint FLYING WHALES en 2020 en tant que Propulsion & Equilibrium IPT leader. Il est aujourd'hui chef de département architecture physique au sein de la Direction technique de FLYING WHALES.

Le rôle crucial du buffer électrique

Le buffer est basé sur des batteries dont la taille et le positionnement dans l'architecture sont hors normes et à ce jour non utilisées en aéronautique, ou de façon marginale. L'usage de batteries comme moyen principal de fourniture de puissance propulsive est une première. Le développement d'un pack de batteries lithium destiné à la fourniture de puissance permet de faire tampon entre d'une part les appels de puissance des propulseurs et d'autre part la fourniture de puissance vers le turbogénérateur. L'un des défis associés est la gestion de l'équilibre thermique de cet ensemble qui a tendance à chauffer énormément. Sur des véhicules plus classiques comme les avions, hélicoptères et VTOLs (*Vertical Take-Off and Landing*), il est nécessaire

“ Il faudra ajuster le calcul de la puissance totale consommée et le contrôle des générateurs afin qu'ils délivrent la puissance nécessaire directement aux propulseurs et aussi qu'ils puissent alimenter des batteries haut voltage au lithium. ”

d'avoir toujours une poussée positive pour le maintien en vol ; il y a donc un écoulement qui peut servir à l'évacuation calorifique des éléments chauffants. Hélas, l'opération du dirigeable ne permet pas de bénéficier d'un tel flux d'air « frais ». En effet, le vol est assuré par la fonction dirigeable et, en phase de vol stationnaire, il n'y a pas de flux de refroidissement naturellement exploitable. La gestion des aspects thermiques est donc un des enjeux majeurs de cette plateforme afin d'assurer le fonctionnement optimal, tout en restant dans un domaine de sécurité des packs de batterie.

L'intégration de ces différents systèmes au sein du dirigeable est enfin l'un des points qui va demander un effort d'apprentissage élevé. En effet, la cohabitation de réseaux de carburant, d'huile et des réseaux électriques haute tension au sein des mêmes environnements va nécessiter d'appliquer des stratégies de ségrégation, d'installation et de protection spécifiques aux technologies employées et implique de définir une stratégie particulière de certification. Les études d'intégration de ces systèmes au sein de l'aéronef est également un défi. En effet, les

longueurs de câbles et les distances entre actionneurs et calculateurs deviennent rapidement très grandes (plus de 3 kms de câble haute tension seront installés).

Conclusion

La stratégie de FLYING WHALES pour décarboner sa solution de transport est en grande partie axée sur la chaîne propulsive et intervient en deux temps. Dans un premier temps, une chaîne hybride-électrique série est implémentée. La production d'électricité fournira de la puissance à partir d'une ressource fossile. Ce design modulaire permet d'envisager dès que possible (entre 2028 et 2030) de retirer la brique thermique et de la remplacer par une brique électrique générant de l'énergie grâce à une pile à hydrogène vert. Evidemment, des enjeux technologiques et réglementaires sont le corollaire à l'intégration de cette chaîne de propulsion inédite. De nombreuses activités de recherche ainsi que des partenariats sont ainsi menés par les équipes de FLYING WHALES. Le développement du LCA60T est un formidable atout industriel et opérationnel. Concevoir un appareil capable de charger et décharger jusqu'à

60 tonnes en vol stationnaire représente un intérêt certain pour participer au désenclavement de régions et participer à la poursuite du développement humain, en cherchant néanmoins à minimiser l'impact environnemental du transport cargo dans ce développement.

D'un point de vue industriel, c'est une aventure quotidienne, faite de défis passionnants et d'immenses opportunités. Ce programme offre en effet une action stratégique inégalable à nombre d'industriels. Car cette plateforme volante sûre et certifiable en toute sécurité, permet une intégration dans de très bonnes conditions et déploie une architecture préfigurant celle de toutes les plateformes aéronautiques à venir, pour l'intérêt du secteur de l'environnement dans lequel nous vivons tous. ■

Glossaire

IATA : Association du Transport Aérien International
 OACI : Organisation de l'Aviation Civile Internationale
 AESA : Agence Européenne de la Sécurité Aérienne
 LCA60T : Large Capacity Airship 60 tonnes

Résumé

L'aéronautique a toujours été synonyme d'innovation. Une innovation au service du lien entre les êtres humains, entre les territoires. C'est bien dans cette tradition que FLYING WHALES s'ancre, résumé par sa raison d'être : désenclaver les zones isolées et participer à la réduction de l'impact environnemental du transport cargo. Car les enjeux environnementaux des décennies à venir sont immenses. L'aéronautique a toutefois encore un rôle à jouer. Parmi d'autres actions, FLYING WHALES a choisi d'apporter des innovations sur la chaîne de propulsion du LCA60T, étant donné le poids considérable du kérozène dans l'analyse du cycle de vie de la solution. Ainsi, une propulsion hybride électrique sera développée pour répondre aux besoins propres à l'aéronef et à ses opérations inédites. Cette architecture propulsive représente une avancée technique majeure en soi aux vues des contraintes importantes. Toutefois, elle n'est qu'un moyen temporaire, facilitant la mise en place, dès que possible, d'une propulsion entièrement électrique, non émettrice de CO₂ en vol. C'est d'ailleurs toute la force de cet aéronef : une incroyable plateforme de test volante, accélératrice d'innovation. ■

Abstract

Aeronautics has always been synonymous with innovation. An innovation that serves the link between human beings, between territories. FLYING WHALES is rooted in this tradition, summarized by its raison d'être: to unlock isolated areas and help reduce the environmental impact of cargo transport. The environmental challenges of the coming decades are immense; however, aeronautics still has a role to play. Among other actions, FLYING WHALES has chosen to innovate on the LCA60T propulsion chain, given the considerable weight of kerosene in the life cycle analysis of the solution. Thus, a hybrid electric propulsion, crucial to meet the needs of the aircraft and its new kind of operations will be implemented. This propulsion architecture represents a major technical advance, in view of the significant constraints. However, it is only a temporary means, facilitating the implementation, as soon as possible, of an entirely electric propulsion, not emitting CO₂ in flight. This is the strength of this aircraft: an incredible flying test platform, accelerating innovation. ■