

# Aerospace Valley et la mobilité aérienne légère décarbonée

**Par Philippe LAGARDE**

Chargé de mission Mobilité aérienne légère et décarbonée au sein du pôle de compétitivité d'Aerospace Valley

En matière d'aviation décarbonée, Aerospace Valley a pris le pari que le développement de technologies à l'échelle de l'aviation légère, régie par la certification CS23, sera plus rapide avec des entrées en service dans les prochaines années, et servira donc de tremplin à l'aviation commerciale (CS25) décarbonée, dont les premières réalisations n'apparaîtront que lors de la prochaine décennie.

La grande majorité des avions actuellement en service ont été produits dans les années 1970 ; la flotte est donc vieillissante, et la question se pose de son renouvellement. 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 sont drastiquement diminués (d'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 montrent l'existence d'un marché significatif pour peu que les nouveaux appareils soient climatiquement vertueux. Par ailleurs, de nouveaux marchés sont envisageables grâce à la forte densité européenne d'aérodromes et d'aéroports, qui permet de nouveaux usages pour du transport de passagers ou de fret, ainsi que le désenclavement de certains territoires.

Plusieurs technologies liées à la propulsion concourent à la décarbonation de l'aviation légère : électrique, hybride électrique, pile à combustible... Elles sont complémentaires, et beaucoup de paramètres interviennent quant à leur choix. 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 !

*Notification : cet article a fait l'objet d'une première publication pour La Revue de l'électronique et de l'électricité (REE). Il est publié ici avec son aimable autorisation et celle des auteurs au regard de son intérêt et de la cohérence avec l'ensemble du numéro.*

## 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, pour les régions Occitanie, Pyrénées-Méditerranée et Nouvelle-Aquitaine.

Au-delà de ses secteurs stratégiques, l'organisation d'Aerospace Valley comprend cinq « écosystèmes d'excellence », qui permettent une animation plus « technologique » de l'écosystème. Ces cinq « écosystèmes d'excellence » sont : Systèmes Embarqués et Communicants ; 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 performance 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 860 membres (entreprises, laboratoires de recherche, établissements de formation, universités et grandes écoles, collectivités, structures de développement économique), dont plus de 600 PME.

Aerospace Valley a lancé l'initiative MAELE fin 2020 (Mobilité Aérienne Légère et Environnementalement responsable), 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 enfin 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, ou les journées MAELE organisées à Bordeaux et Toulouse en 2022, ou encore les "Green Aérodays" organisés sur l'aéroport de Pau en décembre 2023 et qui abordent le marché, les technologies, et permettent des rencontres B2B et de l'écosystème (avionneurs, équipementiers, gestionnaires d'aéroport, énergéticiens, financeurs) ;
- des challenges entre écoles afin de faire émerger des projets innovants et développer l'entrepreneuriat.

En matière d'aviation décarbonée, Aerospace Valley a pris le pari que le développement de technologies à l'échelle de l'aviation légère, régie par la certification CS23, sera plus rapide avec des entrées en service dans les prochaines années, et servira donc de tremplin à l'aviation commerciale (CS25) décarbonée, dont les premières réalisations n'apparaîtront que lors de la prochaine décennie.

## L'enjeu climatique, une priorité pour l'aérien

La pandémie de Covid-19 a montré que quelques mois de confinement quasi planétaire n'étaient pas suffisants pour contrer des décennies de pollution. En ce qui concerne l'aviation, il faut savoir que grâce à des évolutions technologiques continues, les émissions de CO<sub>2</sub> par passager ont diminué de 80 % au cours des soixante-dix dernières années. En conséquence, les experts s'accordent sur un impact du transport aérien dans son ensemble équivalent à 2 % à 3 % des émissions globales de CO<sub>2</sub>. Bien qu'ayant une idée très vague, voire erronée, de la contribution du transport aérien aux émissions de CO<sub>2</sub>, une majorité

de la population occidentale est convaincue du caractère polluant de l'aérien, et estime que le secteur ne fait pas assez d'efforts pour réduire son impact environnemental.

Dans ce contexte, les organisations internationales gouvernant l'aéronautique ont accéléré la transformation technologique de la filière, et l'objectif « pré-Covid », qui était de stabiliser les émissions de CO<sub>2</sub> 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 vingt-sept États de l'Union européenne, et les dix États de la Conférence européenne de l'aviation se sont engagés sur un objectif de neutralité carbone du transport aérien d'ici à 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.

## Émissions du transport aérien

Chaque segment du transport aérien n'a pas le même poids sur les émissions de CO<sub>2</sub> comme le montre la Figure 1. 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'avaient qu'une part de 4 % des émissions de CO<sub>2</sub> (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.

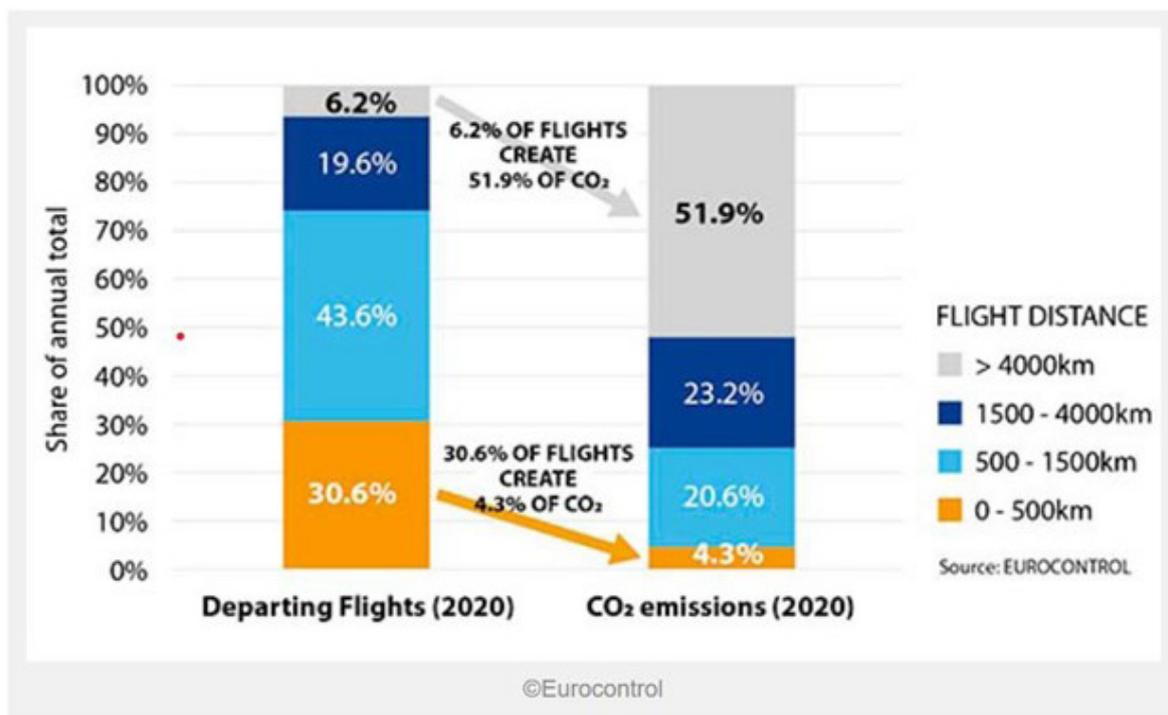
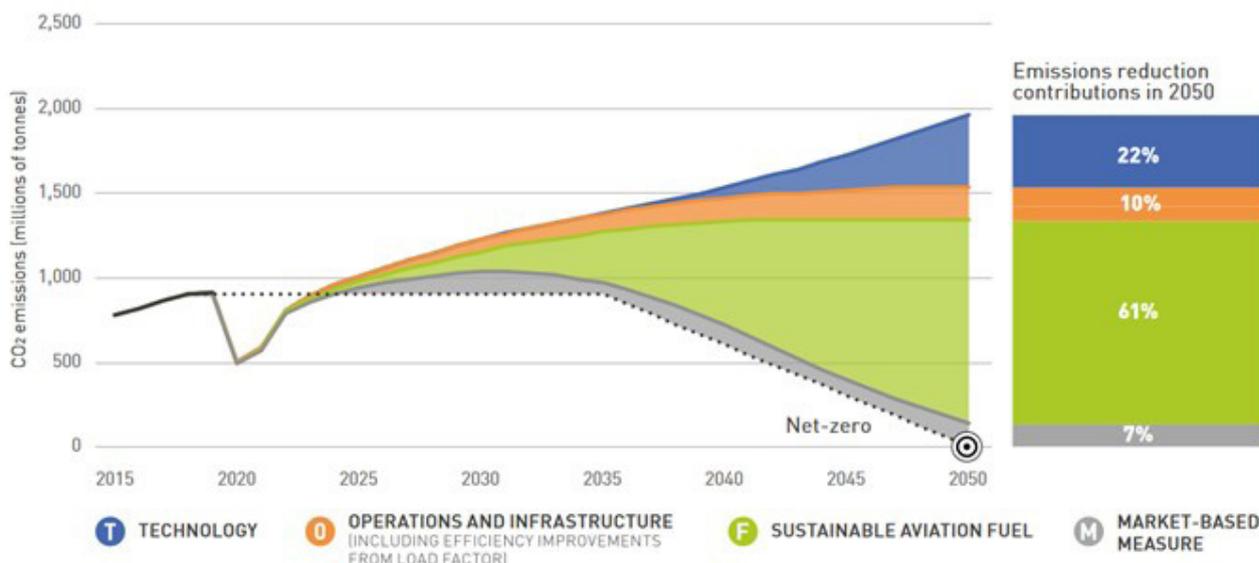


Figure 1 : Proportion des émissions de CO<sub>2</sub> en fonction des segments de vol (© Eurocontrol).



### Comparison with industry -50% long-term goal set in 2009

In order to meet the industry long-term goal of -50% by 2050 compared to 2005 levels, Technology would contribute 26% of emissions reductions. Operations and infrastructure improvements 12%. A back-cast to meet the goal would require 320 Mt (400 billion litres) with a 100% emissions reduction factor by 2050 (62% of emissions reductions), or a mix of SAF and offsets in the form of carbon removals.

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

## Les initiatives en faveur de la décarbonation aéronautique

L'industrie aéronautique relève le défi climatique en en faisant sa priorité absolue. Le challenge est immense puisqu'il s'agit de développer, dans la décennie, des technologies en rupture alors que les performances et la sécurité de nos avions actuels sont le résultat d'évolution continue pendant plus de quatre-vingts ans.

La Figure 2 montre la part attendue des contributeurs à la neutralité carbone. Il faudra donc des progrès technologiques (aérodynamique, fuselage allégé, propulsion innovante...), des avancées sur le plan opérationnel comme l'optimisation des trajectoires, l'uniformisation du trafic aérien au niveau européen, mais c'est surtout l'adoption de carburants alternatifs durables (*sustainable aviation fuel* ou SAF) tels que les biocarburants ou le dihydrogène, qui permettra d'atteindre la cible. Pour ces derniers, au-delà de la mise en place des filières de production et d'acheminement, des technologies embarquées pour le stockage, l'injection et la combustion des moteurs devront aussi être développées.

La trajectoire de décarbonation implique un effort financier sans précédent. Conscients de l'effort à réaliser à court terme, les pouvoirs publics, régionaux, nationaux ou européens multiplient les appels à projets dans ce domaine.

L'une des actions principales du pôle Aerospace Valley est de décrypter les différentes initiatives et accompagner les entreprises membres du Pôle au

montage de projets, en proposant le guichet de financement adapté.

Au niveau européen, Horizon Europe est le 9<sup>e</sup> programme-cadre de l'Union européenne pour la recherche et l'innovation. Il a pris effet le 1<sup>er</sup> janvier 2021, pour la période allant de 2021 à 2027. On citera, notamment, le second appel à projets thématique 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. Il s'agit du partenariat public-privé de la Commission européenne pour une aviation climatiquement neutre. Il représente le programme de recherche et d'innovation le plus ambitieux au monde pour un secteur de l'aviation durable qui contribue au "Green Deal" de l'UE et à la stratégie industrielle de l'UE.

Toujours au niveau européen, le programme SESAR constitue le volet technologique de la construction du « ciel unique européen » ; il a pour objectif de moderniser le système de gestion du trafic aérien (ATM) européen, en développant de nouveaux concepts opérationnels dans un environnement technologique de nouvelle génération 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 au niveau national pour remplir l'objectif de

zéro carbone en 2050. À partir de ces feuilles de route, plusieurs plans sont mis en œuvre :

- un premier plan, d'une durée de trois ans, est né courant 2020 pendant la crise sanitaire liée au Covid-19. Ce plan de soutien concerne la chaîne d'approvisionnement mais aussi la décarbonation du trafic aérien ;
- ce premier plan est poursuivi par un second plan, le plan d'investissement France 2030.

Bpifrance a lancé en 2022 plusieurs appels à projets « Produire en France des aéronefs bas carbone » et « première usine », dont sept des neuf lauréats de la première édition sont membres d'Aerospace Valley. Une seconde édition est planifiée en 2024.

Coté carburants, on peut citer aussi l'appel à projets « Développement d'une filière de production française de carburants aéronautiques durables ». Il s'inscrit dans le cadre du 4<sup>e</sup> Programme d'investissements d'avenir (PIA4) et de la stratégie nationale « Produits biosourcés et biotechnologies industrielles – Carburants durables », financé aussi par France Relance.

Opéré par l'ADEME, Elyse Energy, membre du pôle et pilote d'un consortium d'industriels a été lauréat pour le projet bioTjet.

Sur le plan régional, Aerospace Valley opère par 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 (aviation légère), pour être ensuite présentés aux deux régions en vue d'éventuelles subventions.

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

### Une flotte vieillissante à remplacer

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 5 750 avions légers, 1 675 planeurs, 15 797 ULM selon la DGAC (source GAMA - General Aviation Manufacturers Association), et un peu plus de 28 000 pilotes privés. L'ensemble représente environ 3 millions de mouvements d'aéronefs. Ce domaine vient d'atteindre un tournant, la moyenne d'âge de la flotte approchant aujourd'hui les 46 ans. En effet, la grande majorité des appareils actuellement en service ont été produits dans les années 1970, avant la crise de *product liability* ayant stoppé la production d'avions légers pendant quasiment quinze ans. Les écoles, vivant depuis des décennies sur ces avions d'occasion robustes mais pas immortels, vont bientôt se retrouver en difficulté car privées de leur moyen d'enseigner, faute

de production entre les années 1980 et 1995. D'après les chiffres de la GAMA, un volume de 100 000 avions arrivera en fin de vie au cours de la prochaine décennie. Qui alors pour les remplacer ?

À 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 propriétaires privés, et les constructeurs d'Europe centrale se sont orientés 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 toucher la reprise du secteur aérien de l'après Covid-19. L'aviation commerciale pourrait manquer de 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 à octroyer des prêts pour une formation menant à une carrière qui semble désormais moins stable et 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 sont drastiquement diminués (d'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 montrent l'existence d'un marché significatif pour peu que les nouveaux appareils soient climatiquement vertueux. Par ailleurs, de nouveaux marchés sont envisageables grâce à la forte densité européenne d'aérodromes et d'aéroports, qui permet de nouveaux usages tels que les liaisons entre les petites villes *via* des lignes régulières ou à la demande, pour du transport de passagers ou de fret, ainsi que le désenclavement de certains territoires.

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 comme la toulousaine AuraAéro, la rochelaise Elixir Aircraft, ou la rochefortaise VoltAero, ou encore des *start-up* comme Beyond Aero ou Flight Ascendance Technologies, ont bien compris l'enjeu de ces nouveaux marchés, et développent de nouveaux aéronefs. Ce développement se fait en utilisant tout un écosystème dédié à l'aéronautique en partie aidé par des subventions régionales, nationales pour le développement de ces technologies en rupture. Le passage à la commercialisation nécessitera encore beaucoup d'argent, et le challenge sera alors de trouver des investisseurs !



Figure 3 : Elixir Aircraft a été pionnier en certifiant son avion de quatrième génération selon le règlement EASA CS-23 amendement 5, premier pas vers une solution complètement décarbonée (© Elixir Aircraft).

## 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 CS23 « avion à 19 places », et des durées de vol relativement faibles (maximum de trois heures).

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

### La propulsion électrique ou hybride électrique

Dans une application aérospatiale, la masse est clé. Aujourd'hui, toutes les solutions décarbonées envisagées sont plus lourdes que les solutions conventionnelles utilisant des motorisations thermiques brûlant de l'énergie fossile.

Les solutions de nouvelles propulsions électriques sont architecturées autour d'un ou de plusieurs moteurs électriques entraînant une ou plusieurs hélices, dont

l'électronique de puissance est alimentée soit par une source énergétique, batterie ou pile à combustible, soit par un système hybride (par exemple source thermique combinée à une batterie).

Trouver le bon compromis entre charge utile, autonomie et coûts est dimensionnant afin de définir le ratio d'hybridation, c'est-à-dire la répartition de puissance entre énergie thermique et énergie électrique stockée dans les batteries.

La caractéristique de l'aéronautique est un besoin de puissance important en phase de décollage et de montée, dimensionnant 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, mais offrant 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 et l'électrique réduisant les nuisances au sol ou près du sol. Le carburant conventionnel sera progressivement remplacé par des carburants issus de la biomasse.



Figure 4 : L'avion de démonstration Cassio de VoltAero valide la configuration du groupe motopropulseur de Cassio (motorisation hybride thermique-électrique), et dé-risque sa viabilité en vue d'obtenir la certification de navigabilité. Il a déjà parcouru 10 000 km (© VoltAero).

### 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. Pour des avions totalement électriques, elles présentent aujourd'hui une autonomie proche d'une heure et 150 km de rayon d'action. Mais une fois décomptés les réserves requises par les autorités de certification et les effets de vieillissement, le temps de vol « utile » n'est plus que de trente minutes, encore trop peu pour la majorité des usages de ce segment.

Il faut être prudent par rapport aux effets d'annonce de densités de puissance significativement élevées à court terme, premièrement parce que bien souvent ces densités sont obtenues à très faible échelle, et donc difficilement transposables à de plus grandes. Par ailleurs, d'autres facteurs entrent aussi en compte, comme la capacité de décharge et recharge, le vieillissement, le besoin de fonctionnement à température élevée...

La technologie Li-ion liquide, que tout le monde emploie aujourd'hui, perdurera au moins jusqu'en 2030 ; sa densité d'énergie massique est passée de 90 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 pénalisant fortement la masse. D'où l'intérêt du Li-ion gélifié et du Li-ion tout solide (*solid state*), qui devraient offrir une bien plus grande sécurité d'utilisation. Leur densité d'énergie massique n'excédera sans doute pas les 300 Wh/kg, mais ils pourraient constituer un compromis intéressant entre performance et sécurité.

De leur côté, le Li-ion *solid state* et le Lithium métal, envisagés au-delà de la décennie, devraient afficher des densités d'énergie massique respectives meilleures que 400 Wh/kg.

Les progrès des batteries embarquées sont lents, et leur développement nécessite des investissements très importants que seul le marché automobile par ses volumes peut assumer.

### Les perspectives sur les piles à combustible

La densité de puissance des piles à combustible, générant de l'énergie en « brûlant » de l'hydrogène, est au moins trois fois celle des batteries, et offre donc un avantage indéniable sur le temps de recharge. Le temps de remplissage en hydrogène est, de plus, proche de celui des carburants conventionnels. Plusieurs technologies de piles à combustible 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), proposant des densités de puissance de 1 kW/kg aujourd'hui, jusqu'à 3 kW/kg à horizon 2030. La PEM-LT est la plus mature technologiquement, mais elle est très pénalisante au-delà des puissances supérieures à 10 kW car elle nécessite un refroidissement important, d'où un usage réservé aux faibles puissances (< 50 kW). La PEM-HT est moins mature, mais elle offre l'avantage de fonctionner avec un hydrogène moins pur que la PEM-LT. Cependant, comme pour les batteries, le cœur de

la pile ne peut pas fonctionner sans des servitudes (stockage H<sub>2</sub> gazeux 350 bars, 700 bars ou cryogénique, échangeur thermique...) qui pénalisent finalement la densité de puissance du système complet.

### La motorisation thermique reste toujours d'actualité

Conservé les moteurs thermiques existants a un sens même si le rendement d'un moteur thermique est inférieur à une pile à combustible (30 % *versus* 50 %). Son avantage est de ne pas casser les architectures d'avion existantes et d'autoriser un rétrofit de la motorisation. Les aéroclubs ne pourront, par exemple, pas financièrement renouveler toute leur flotte en même temps ! Le carburant d'origine fossile pourrait donc avantageusement être remplacé par des biocarburants ou de l'hydrogène décarboné. Plusieurs adaptations seront nécessaires notamment au niveau de l'injection, et pour l'hydrogène, l'adaptation à une combustion beaucoup plus exothermique. La distribution entre le réservoir et le moteur devra être renforcée par rapport aux risques de fuites et d'explosion supérieurs à celui d'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 une problématique, 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/m<sup>3</sup> sous forme liquide, quatorze fois moins dense que l'eau !) ; et son énergie volumique est 3,7 fois plus faible que celle du kérosène. L'hydrogène sera « 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.

### En conclusion sur la propulsion

Plusieurs technologies liées à la propulsion concourent à la décarbonation de l'aviation légère ; elles sont complémentaires, et beaucoup de paramètres interviennent quant à leur choix. Aucune technologie n'est encore mature mais un premier pas a été réalisé avec la première certification de l'avion électrique Velis Electro du fabricant Slovène Pipistrel, ou celle de l'Elixir, destinés principalement à la formation initiale des pilotes.

Ces avancées, ou celles de VoltAero, d'Aura Aero ou de Flight Ascendance Technologies, illustrent bien le caractère de « laboratoire d'essais » que constitue l'aviation légère en matière de décarbonation. Ces avions sont d'ores et déjà en vol, et testent à leurs limites les nouvelles technologies propres. Reste une problématique économique : ces nouvelles propulsions et surtout les carburants alternatifs durables sont pour le moment de cinq à dix fois plus chers que les carburants conventionnels, d'où la recherche de massification des usages (hydrogène), la création de filières biocarburants et potentiellement des aides financières.

## Les infrastructures aéroportuaires doivent aussi s'adapter

L'émergence des technologies embarquées doit être accompagnée au niveau des infrastructures aéroportuaires pour assurer le déploiement de 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.

En ce qui concerne les batteries, il existe plusieurs solutions techniques pour assurer leur recharge au sol. Premièrement, il est possible d'installer des chargeurs fixes au niveau des postes avions. Si l'avion est connecté 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 *process* de chargement des batteries sur la disponibilité des avions. Néanmoins, les autorités de certification doivent définir les conditions nécessaires pour que le remplacement puisse être réalisé comme une simple opération d'assistance en escale. Au niveau de l'aéroport, cela implique aussi la présence d'un inventaire de batteries compatibles, rechargées et prêtes à l'emploi.

Concernant les avions à hydrogène, ils 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) devraient 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 utilisateurs – 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 réglementé, comme celui de l'aéroportuaire est un sujet délicat. Il y a ensuite un défi opérationnel : l'hydrogène liquide se conserve à  $-253^{\circ}\text{C}$ , 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 !



Figure 5 : 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 (© ENGIE Green).