

Les défis de l'électrification

Par Thomas DELSOL,

Responsable du programme FILAE, IRT Saint Exupéry

Lionel BOURGEOIS,

Directeur Technologique, IRT Saint Exupéry

Denis DESCHEEMAEKER,

Directeur général, IRT Saint Exupéry

Et Magali VAISSIERE,

Présidente, IRT Saint Exupéry

Dans une déclaration de l'Air Transport Action Group (ATAG) publiée en 2022, l'industrie aéronautique s'est engagée à ce que « les émissions nettes de carbone des vols de l'aviation civile internationale soient nulles d'ici 2050, grâce à l'accélération des mesures d'amélioration de l'efficacité, de la transition énergétique et des innovations dans l'ensemble du secteur et en partenariat avec les gouvernements du monde entier ». Le projet emblématique de R&T FILAE « FILière Aéronautique Électrique », porté par les instituts de recherche technologique (IRT) français, s'inscrit dans cette dynamique de décarbonation en s'attaquant aux verrous technologiques clés de l'électrification de l'aviation.

Introduction

Alors que la question du réchauffement climatique est au cœur des débats sociétaux, la réduction des émissions de gaz à effet de serre est devenue en quelques années un enjeu majeur au niveau international pour les industriels des filières de la mobilité.

Après le "dieselgate" (l'affaire Volkswagen), le secteur de l'automobile a été le premier à réagir, en entamant une transition énergétique autour des véhicules à propulsion électrique. Bien qu'initiée depuis de nombreuses années, cette transition vers des sources d'énergie plus vertes requiert toujours la levée de nombreux verrous technologiques.

L'industrie aéronautique a aussi une part de responsabilité en ce qui concerne le réchauffement climatique. Bien que sa contribution soit faible par rapport à d'autres industries (< 3 % des dégagements de CO₂, loin derrière les services Internet, par exemple), l'aviation civile est pointée du doigt, car visible et identifiable par le grand public.

En regard de ces enjeux, l'IRT Saint Exupéry, institut de recherche technologique pour l'aéronautique, le spatial et les systèmes embarqués, aux côtés de l'ONERA, le CEA Tech et l'ISAE-SUPAERO, a initié une réflexion pour identifier les besoins en recherche pour une aviation décarbonée, traduite en

un programme d'ambition baptisé FILAE pour FILière de l'Aéronautique Électrique. Considérant la perméabilité de l'utilisation des technologies dans les différentes filières automobile, ferroviaire, navale, FILAE s'inscrit dans une réflexion plus large avec une volonté de créer des synergies avec l'ensemble des filières de la mobilité.

État de l'art

Avec le concours d'experts du secteur de l'aéronautique (Airbus, Safran, l'ONERA, ISAE-SUPAERO...), l'IRT Saint Exupéry a fait un état des lieux des différents leviers à actionner pour contribuer à décarboner l'aviation avec leurs impacts sur les émissions CO₂ et non CO₂, sur l'emport et les rayons d'action, les opérations et infrastructures, et le coût pour les passagers. Ce travail est résumé dans la Figure 1 ci-après.

Trois types de source d'énergie se détachent, nécessitant une approche souverainiste du fait des enjeux économiques et des tensions prévisibles liées à leur futur approvisionnement :

- Les biocarburants et les électrocarburants sont des technologies qui sont actuellement en développement, avec des taux actuels maximums d'utilisation autorisés de 50 % et des perspectives pour passer à 100 % sur le moyen terme. Par contre,

7 leviers pour réduire les émissions CO₂ & non CO₂

Emissions = Fonction (Source d'énergie [1], Performance énergétique [2-6], Trafic aérien [7])

Leviers		Impacts	Emissions CO ₂ & non CO ₂	Emport & rayon d'action	Aéronef & aéroport	Coût passagers	
1. Source d'énergie	Batteries*			< 20 places	Recharge / A+E	Source d'énergie plus chère	
	H ₂ – PAC*		de -60% à -100%	< 120 places	H2 liquide / A+E		
	H ₂ – Combustion*				H2 liquide		
	Hybridation*				Mix énergétique		
	Electrocarburants*		de -30% à -60%				
	Biocarburants						
2. Trajectoire de vol	Eviter zones sursaturées en glace,...				Impact négligeable	Performance énergétique améliorée	
3. Propulsion	Architecture, thermodynamique		de 0% à -30%	Pas de limitation			
	BLI, hybridation électrique						
4. Aérodynamisme	Aile volante						
	Winglets, ailes laminaires						
5. Masse	Composites, process fabrication				Impact négligeable		
6. Systèmes	e-Taxi, avion plus électrique						
7. Trafic aérien	Réduction		Proportionnel à la réduction du trafic aérien				

* périmètre de l'avion uniquement, en considérant l'électricité produite 100% à partir d'énergie décarbonée

Figure 1 : Liste des différents leviers pouvant être actionnés pour le développement d'un avion décarboné (Référentiel ISAE-SUPAERO aviation-climat - Scott Delbecq, Jérôme Fontane, Nicolas Gourdain, Hugo Mugnier, Thomas Planès et Florian Simatos, septembre 2021).

la question de la disponibilité des matières premières reste à résoudre pour alimenter à la fois l'ensemble de la flotte aéronautique et les autres secteurs de la mobilité.

- Les technologies de batteries actuelles ne permettent pas de faire voler de gros porteurs en raison de leur densité de puissance encore trop faible. Hybridées avec une autre source, comme les SAF (*sustainable aviation fuels* : biocarburants ou électrocarburants), elles peuvent néanmoins contribuer à décarboner les avions. Une bonne gestion de l'hybridation prenant en compte les différentes phases de vol et les puissances associées permettra d'optimiser l'autonomie des aéronefs (cf. la Figure 2 ci-après).
- Enfin, l'hydrogène peut être, à plus long terme, une source d'énergie alternative intéressante. Les problématiques de stockage d'hydrogène (volume de l'hydrogène, stockage cryogénique à - 253°C), de masse et de performance des piles à combustible seront des obstacles préalables à franchir.

Des travaux de recherche sont également menés sur la propulsion, qui est un vecteur central de la décarbonation. Ainsi, le concept de propulsion distribuée, étudié par l'ONERA, permettrait une diminution des pertes d'énergie liées aux frottements, un décollage et un atterrissage sur de plus courtes distances, une participation des moteurs au pilotage de l'avion, ou bien encore une amélioration de la sécurité du vol. Le développement de nouveaux moteurs, tels que l'Open Rotor de Safran, permet également d'envisager des économies de carburants par passager kilomètre de l'ordre de 10 % à 20 %.

D'autres améliorations comme l'optimisation de l'aérodynamisme permettraient aussi de faire baisser la consommation des aéronefs de 10 % à 25 %, selon le type d'amélioration considéré (*winglet*, aile volante hybride).

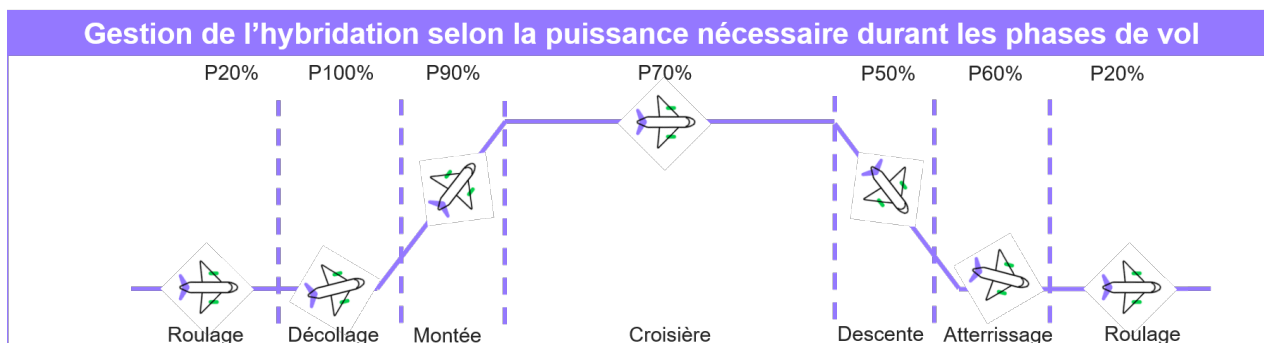


Figure 2 : Gestion de l'hybridation selon la puissance nécessaire durant les phases de vol (Px % : pourcentage de puissance mise en œuvre instantanément par rapport à la puissance maximale).

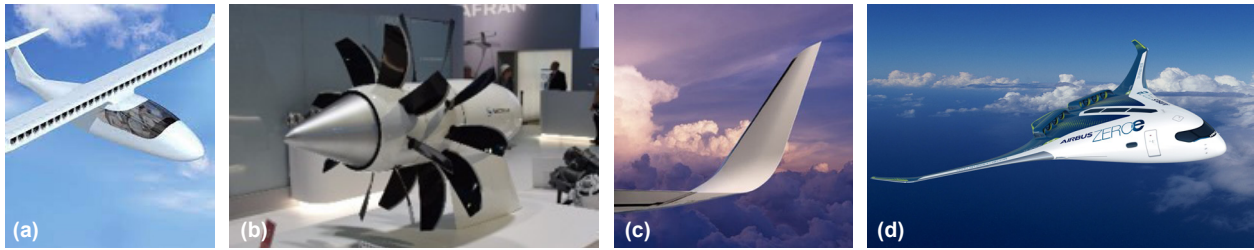


Figure 3 : (a) Propulsion distribuée (ONERA) ; (b) Moteur Open Rotor développé par Safran / (c) Winglet / (d) Aile volante hybride.

De plus, la réduction de la masse des aéronefs est un autre levier à actionner pour réduire la consommation, avec notamment :

- Une plus grande utilisation des matériaux composites – l'A350 utilise déjà plus de 50 % de matériaux composites. Mieux comprendre et modéliser le comportement des composites permettrait un déploiement encore plus massif, en intégrant leur recyclabilité.
- Le développement des procédés de fabrication additive, qui permettrait de concevoir et produire des pièces très complexes aux géométries inenvisageables jusque-là, entraînant une diminution du recours aux matériaux métalliques (nickel, titane et aluminium), et une réduction très significative de la matière engagée.
- La diminution de la masse des systèmes embarqués : printed electronics¹, ...

Le choix de la source d'énergie va également fortement affecter les architectures et les systèmes avions, sachant qu'ils peuvent représenter entre 5 % et 10 % de la consommation totale de carburants.

Parmi les autres leviers qu'il conviendra d'actionner pour permettre l'avion décarboné de demain, citons :

- l'intelligence artificielle explicable et embarquable (qualifiable, certifiable) ;
- des outils d'optimisation certifiés ;
- la logistique pour permettre la recharge des batteries ou l'approvisionnement en carburants (SAF, hydrogène) ;
- l'adaptation des infrastructures aéroportuaires aux nouvelles formes d'avions et aux sources d'énergie à approvisionner ;
- la prise en compte de l'impact des nouvelles technologies sur la maintenance ;
- la prise en compte du bruit dans les développements à venir ;
- le développement de moyens d'essais multi-contraintes.

Enfin, une optimisation des trajectoires de vol permettrait notamment d'éviter les zones sursaturées en glace, et réduire ainsi les traînées de condensation responsables du forçage radiatif (cf. le programme européen SESAR – European Sky Air Traffic Management Research).

¹ <https://www.irt-saintexupery.com/printed-electrics/>

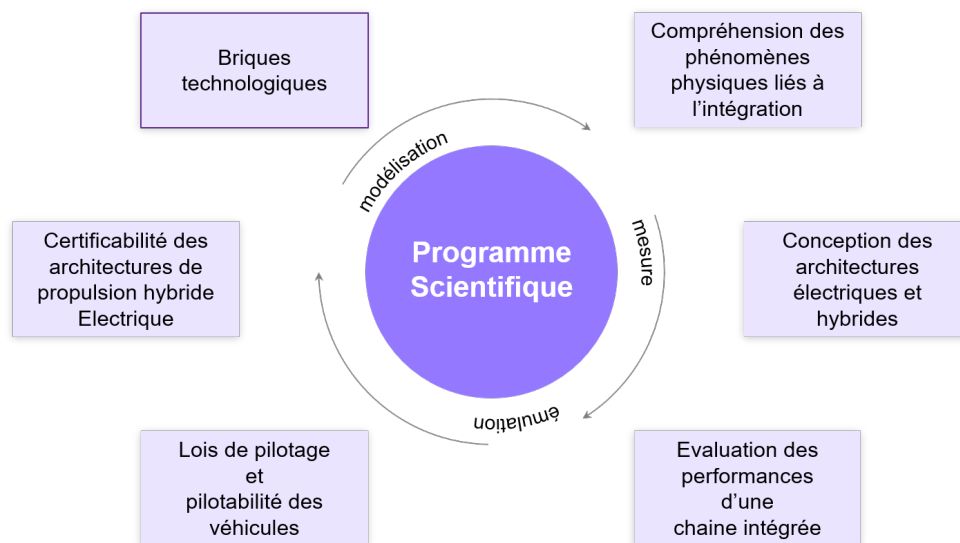


Figure 4 : Programme scientifique issu des travaux conjoints ONERA, ISAE-SUPAERO, IRT SAINT EXUPERY.

Genèse du programme FILAE

En 2020, tandis que le secteur aéronautique connaissait une crise sans précédent liée à la pandémie de Covid-19, l'IRT Saint Exupéry, l'ISAE-SUPAERO et l'ONERA ont initié une réflexion commune, avec pour objectif de proposer un programme ambitieux permettant d'accélérer la transition vers l'avion du futur et de permettre à la France de conserver son statut de pionnière en matière de développement d'aéronefs. Ces réflexions ont abouti au lancement de la démarche FILAE (Filière de l'Aéronautique Électrique) à laquelle ont adhéré des acteurs incontournables du paysage de la recherche française, comme le CEA, le LAPLACE et le LAAS.

La première tâche a consisté à définir trois piliers sur lesquels s'agrégerait l'écosystème académique et industriel :

- les véhicules et chaînes de propulsion hybride électrique ;
- les sources et stockages électrochimiques ;
- l'autonomie, les data et la communication.

Ces trois piliers sont communs à l'ensemble des usages de l'aéronautique de demain : avion de voltige électrique, VTOL (*vertical take-off and landing*) électrique, 10 places hybride, 19 places hybride, dirigeable charge lourde hybride, régional hybride, *new short range* hybride, etc.

Une étape importante de cette initiative a été franchie en 2021 avec la mise en place d'un programme scientifique ayant reçu l'aval des membres industriels du CORAC. Ce programme scientifique est composé de six volets, comme décrit *infra*.

Principaux objectifs du programme FILAE

Trois objectifs principaux sont couverts dans le cadre de FILAE.

Compétitivité :

- contribuer à structurer une filière française et européenne en électronique de puissance (SIC/GAN) compatible avec l'environnement aéronautique ;
- développer les activités de R&T en support de la gamme d'avions CS23 ;
- développer des briques technologiques clés pour une chaîne électrique propulsive.

Ressourcement :

- contribuer à la création d'une EUR (école universitaire de recherche) sur la mobilité électrique pour l'automobile et l'aéronautique ;
- contribuer à la mise en place de Mastères spécialisés ;
- contribuer à la mise en place de modules de formation pour les industriels ;

- amplifier l'écosystème de recherche avec le lancement de 30 thèses de doctorat, 30 à 50 post-doctorats, et 50 stages et alternances.

Coopération :

- positionner l'IRT Saint Exupéry comme un opérateur capable d'activer les synergies entre le secteur aéronautique et d'autres secteurs (électronique, automobile, ferroviaire, etc.), entre acteurs publics et privés, avec le soutien d'autres IRT / ITE de France : Railenium (pour le rail), Vedecom (pour l'automobile), SuperGrid (pour les fortes tensions), Nanoelec (pour l'électronique de puissance).

Principaux verrous adressés

Une étape importante de la démarche FILAE a consisté à lister l'ensemble des leviers à actionner, du plus haut niveau au plus bas, afin de rechercher les verrous technologiques et méthodologiques concernant l'avion électrique du futur. Le programme FILAE a ainsi été décomposé en trois thématiques dont les principaux verrous sont décrits ci-après.

Électronique de puissance embarquée à base de composants à grand gap :

- absence de modèles de fiabilité des composants à grand gap et des assemblages ;
- absence de standards de tests adaptés ;
- environnement normatif global insuffisant ;
- technologies d'assemblage dense non matures ;
- difficulté à optimiser l'utilisation de ces composants au maximum de leur capacité (thermique, fréquence, tension et décharges...) ;
- volume de l'aéronautique ne permettant pas une solution dédiée.

Densification des systèmes électriques :

- phénomènes physiques associés à la haute tension (décharges partielles, arcs électriques) mal maîtrisés ;
- repousser les limites des systèmes d'isolation électrique ;
- masse et volume des filtres trop élevés ;
- système de refroidissement à cœur complexe ;
- systèmes de coupure haute tension trop lourds et trop volumineux ;
- problème CEM lié à l'utilisation de composants à grand gap ;
- machines électriques (moteurs, générateurs) trop lourdes ;
- marché des aimants à base de terres rares incertain ;
- batteries et piles à combustible actuelles trop lourdes et volumineuses.

Durée de vie des systèmes électriques :

- méconnaissance des physiques de défaillance ;
- méconnaissance des marqueurs de vieillissement ;
- limite des systèmes de détection associés ;
- absence des modèles de vieillissement.

Planification

Issus du programme scientifique FILAE co-construit avec les partenaires, 12 projets multi-filières seront lancés entre 2023 et 2030 pour un montant global de 60 M€.

Deux projets de ce programme ambitieux ont déjà démarré en 2023 : SiCRET+ dont l'un des objectifs est l'établissement de recommandations pour une conception robuste de modules SiC adaptée aux profils de missions des utilisateurs finaux ; et GRINHELEC, qui vise à développer des matériaux isolants pour les câbles destinés à la propulsion électrique plus respectueux de l'environnement.

Conclusions

Les résultats des activités de R&T dans le cadre de FILAE devraient avoir plusieurs impacts :

- impacts scientifiques : compréhension des phénomènes physiques en environnement aéronautique, levée de verrous à la densification des systèmes électriques et augmentation de leur durée de vie, développement de méthodes et outils d'aide à la conception ;
- impacts environnementaux et sociétaux : contribution à la maturation de solutions de propulsion à émissions réduites, contribution à la structuration d'un pôle de recherche d'ampleur nationale sur les architectures de propulsion électrique, contribution à la conversion des métiers vers l'électrique ;
- impacts économiques : soutien à la filière par la maîtrise des défis scientifiques et l'accompagnement des industriels, soutien aux PME et TPE du domaine, renforcement de la supply chain, maîtrise des coûts des solutions développées en utilisant les synergies multi-filières, formation dans des domaines nouveaux aux frontières de plusieurs disciplines, rayonnement national et international.

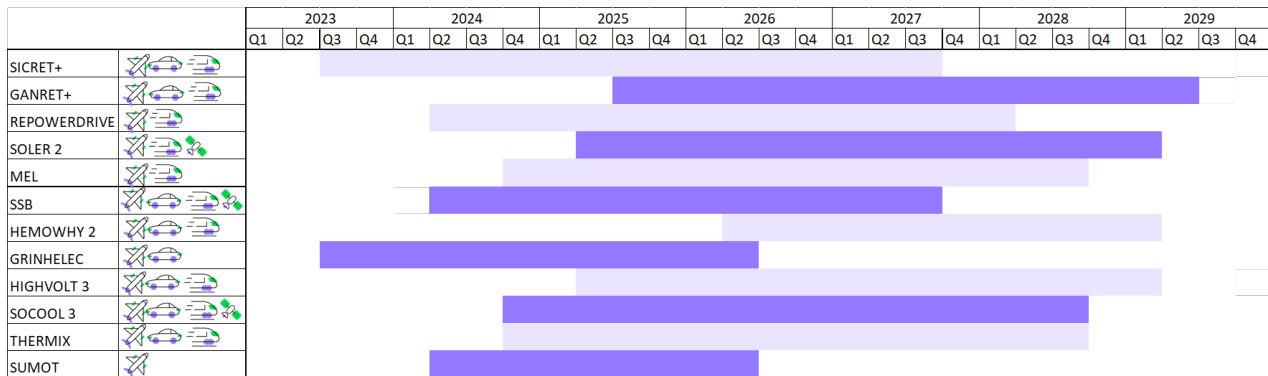


Figure 5 : Planification du programme FILAE.