Les défis de la propulsion aéronautique décarbonée

Par Thibaud NORMAND
Directeur de programme au sein de Safran Nacelles

Et Éric DALBIES
Directeur de la Recherche, de la Technologie et de l'Innovation de Safran

L'engagement du secteur aérien d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 suppose un effort sans précédent sur l'efficacité énergétique des avions, en complément de l'usage des carburants durables. Ce défi est à l'origine d'un foisonnement d'innovations en cours dans le domaine de la propulsion aéronautique. La propulsion électrique ou hybride, sous des formes variées, va irriguer tous les segments aériens : l'aviation générale sert ainsi de terrain d'expérimentation pour des technologies qui contribueront à réduire la consommation des prochains moteurs d'avions commerciaux. D'un point de vue climatique, l'enjeu principal réside dans la propulsion de la prochaine génération d'avions court-moyen-courriers, succédant à l'Airbus A320neo et au Boeing 737 MAX. Safran et son partenaire GE Aerospace s'y préparent au travers du programme technologique RISE, qui recouvre le développement de nombreuses innovations de rupture et permet d'initier la mobilisation de toute la filière.

Si l'échéance de l'engagement du secteur d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 peut paraître lointaine, l'ampleur de ce défi impose de poursuivre toutes les pistes d'innovation de rupture, et explique en particulier le foisonnement actuel des initiatives dans le domaine de la propulsion aéronautique.

L'efficacité énergétique, premier levier de toute politique de décarbonation

Dans le secteur aérien comme dans d'autres secteurs, l'efficacité énergétique est le premier levier d'une stratégie de décarbonation, pour réduire la pression sur les ressources, accompagner la transition vers des énergies décarbonées et limiter les coûts de la transition.

L'amélioration technologique des avions, et en parti culier de leur propulsion, a généré l'essentiel des gains d'efficacité durant les dernières décennies. Ainsi, grâce au renouvellement des flottes, la consommation de carburant par passager et par kilomètre a-t-elle été réduite de moitié sur les trente dernières années.

L'entrée en service du moteur LEAP de Safran et General Electric, en 2016, illustre les progrès technologiques réalisés sur les moteurs d'avion : apportant 15 % de réduction de consommation par rapport à la génération précédente des CFM56, il a permis le développement d'une nouvelle génération d'avions court-moyen-courriers (A320neo, Boeing 737 MAX), dont l'introduction en flotte s'étendra encore sur la dizaine d'années à venir.

Les progrès technologiques en matière de propulsion, et plus généralement pour améliorer l'efficacité énergétique des avions, seront encore plus cruciaux à l'avenir. En 2023, l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) a adopté un objectif de neutralité carbone d'ici à 2050. Pour atteindre cet objectif, toutes les variantes possibles des trajectoires de décarbonation du secteur aérien reposent sur l'utilisation massive de carburants aériens durables. Compte tenu des enjeux spécifiques à la biomasse et des quantités majeures d'électricité nécessaire pour produire des électrocarburants[1], ces carburants présenteront un coût élevé, des impacts environnementaux non nuls et une forte concurrence entre secteurs pour accéder à ces énergies décarbonées. Par ailleurs, il n'apparaît pas possible d'atteindre 100 % de carburants durables dans le secteur aérien avant le milieu du siècle, dans la tendance actuelle de croissance du trafic. Réduire la consommation de carburant demeure donc, plus que jamais, la clé de voûte de la décarbonation du secteur, et une ambition accrue est nécessaire : la flotte d'avions de 2050 sera largement constituée d'avions livrés dans la décennie 2030 ; l'enjeu est donc bien de franchir une rupture dans l'efficacité énergétique des avions dès les prochains programmes lancés.

[1] Voir notamment Académie des technologies (2023), « La décarbonation du secteur aérien par la production de carburants durables ».

Ligne de montage du moteur LEAP (crédit : Adrien Daste / Safran).

Enfin, cette exigence de réduire fortement la consommation de carburant demeure essentielle même dans le cas d'une transition vers la propulsion à hydrogène : les enjeux de faible densité volumique de ce carburant renforcent l'intérêt d'une consommation très optimisée, pour favoriser le rayon d'action accessible à ces futurs aéronefs.

L'électrification, une tendance de fond aux applications multiples pour la propulsion aéronautique

L'électrification des systèmes non propulsifs est une tendance de fond qui s'est développée sur les dernières générations d'avions. Elle s'étend désormais à l'actionnement des inverseurs de poussée des nacelles, au freinage, voire au déploiement du train d'atterrissage avant, au système de dégivrage, et sur le Boeing 787 au système d'air conditionné. La substitution de systèmes hydrauliques, pneumatiques ou mécaniques, par des systèmes électriques, peut permettre de réduire la masse des appareils par la suppression de réseaux. Mais elle est aussi un facteur d'optimisation de la propulsion, en réduisant certains prélèvements sur le moteur (air par exemple).

L'essentiel des enjeux de l'électrification se situe toutefois au niveau de la propulsion, avec le développement de moteurs électriques de puissance qui permet d'envisager différents modèles d'hybridation, voire une électrification totale, des aéronefs selon leur taille. Safran a ainsi développé la famille des moteurs ENGINeUS™, de puissance comprise entre 50 kW et 750 kW, dont les premiers modèles devraient être certifiés par l'EASA en 2024.

Compte tenu des enjeux de densité massique des batteries, la propulsion intégralement électrique demeurera largement limitée à des aéronefs de faible masse : VTOL[2], comme les projets des sociétés Joby Aviation et Volocopter, et aviation légère. Dans cette dernière catégorie, le développement des avions électriques pour les écoles de pilotage suscite un fort intérêt, comme le montrent les projets de Bye Aerospace aux États-Unis et d'Aura Aero en France.

Dépasser la centaine de kilomètres ou quelques dizaines de passagers nécessite toutefois de s'affranchir des limites des batteries et développer des propulsions hybrides. Cette hybridation prend des formes variées selon les projets : propulsion électrique distribuée comme sur le démonstrateur Ecopulse d'Airbus, Daher et Safran, sur le segment de l'aviation générale ; combinaison de turbogénérateur et d'un moteur électrique de forte puissance (jusqu'à 1 MW), pour le segment des avions régionaux d'une trentaine de passagers ; utilisation de piles à combustible à hydrogène en appoint de batteries, également dans le domaine de l'aviation régionale ; ou encore hybridation d'hélicoptères bimoteurs, afin de permettre la mise en veille d'un moteur en croisière (projet ECOMODE de Safran embarqué dans l'hélicoptère RACER d'Airbus Helicopter).

Le fort investissement observé actuellement dans l'hybridation trouve son explication au-delà des seuls marchés de l'aviation générale ou régionale : les briques technologiques explorées devraient en effet contribuer à l'efficacité accrue des turbines à gaz équipant les avions court-moyen-courriers et long-courriers.

[2] *Vertical take-off and landing.*

Vers une propulsion ultrasobre pour les futurs moyen-courriers – le programme RISE

Pour atteindre l'objectif de neutralité carbone de l'aviation d'ici 2050, la prochaine étape technologique et industrielle clé est l'entrée en service d'une nouvelle génération d'avions court-moyen-courriers à l'horizon 2035, succédant aux programmes remotorisés A320neo et Boeing 737 MAX. Ce segment d'appareils, décliné en plusieurs variantes de capacité, représente en effet de l'ordre de 45 % des émissions de CO_2 du secteur, et une part croissante du trafic avec l'augmentation de capacité et de rayon d'action des appareils (notamment les A321neo, A321LR et XLR, Boeing MAX10).

C'est dans ce contexte que Safran et son partenaire GE Aerospace ont lancé en 2021 le programme RISE, pour *Revolutionary innovation for sustainable engines*. Programme de démonstration technologique, RISE vise à conduire à maturité l'ensemble des briques technologiques innovantes déjà identifiées et qui pourraient contribuer à la prochaine génération de moteurs d'avions court-moyen-courriers, en visant une réduction de consommation de carburant de 20 % au niveau du moteur.

Mobilisant plus de 1 000 ingénieurs chez Safran et GE Aerospace, le programme RISE comprend environ 400 essais et se concrétisera par des essais en vol vers 2026, sur un Boeing 747 de GE et sur un A380 en partenariat avec Airbus.

Certaines des technologies identifiées s'inscrivent dans la continuité des travaux engagés pour le moteur LEAP, comme l'utilisation accrue de matériaux composites (notamment les matériaux composites à matrice céramique), ou le recours à des alliages métalliques résistant à des températures de plus en plus élevées. D'autres concernent les procédés de fabrication, comme la fabrication additive qui permet d'alléger des pièces tout en contribuant à des chaînes d'approvisionnement plus courtes. Trois axes d'innovation illustrent toutefois la spécificité du programme RISE par rapport aux générations précédentes de moteurs.

L'hybridation électrique des turbines à gaz

Au sein du programme RISE, Safran travaille à intégrer une capacité d'hybridation électrique dans des turbines à gaz : l'une des configurations envisagées repose sur l'intégration d'un moteur et d'un générateur électrique sur chacune des lignes d'arbre de la turbine, ouvrant la voie à des échanges de puissance entre corps haute pression et corps basse pression. L'avantage d'une telle configuration est d'améliorer le domaine d'opérabilité du moteur, en couvrant notamment les besoins de certaines phases transitoires de vol : par exemple des besoins électriques pour le dégivrage lors d'une phase de montée, très consommatrice de puissance ; ou encore la gestion des ralentis en phase de descente, où la soufflante est entraînée par la vitesse relative et pourrait transférer de l'énergie pour maintenir une vitesse suffisante de la partie haute pression du moteur. Ce type d'hybridation électrique, légère et sans stockage d'électricité, permettrait d'optimiser le dimensionnement du moteur pour son fonctionnement en croisière, et ainsi gagner quelques pourcents de consommation.

L'introduction d'un réducteur pour améliorer le taux de dilution

L'un des principaux facteurs de réduction de la consommation de carburant, dans les dernières générations de moteurs, a été l'augmentation du taux de dilution. Ce taux est le ratio entre la quantité d'air qui passe par la soufflante et génère l'essentiel de la poussée, et la quantité d'air qui passe par la chambre de combustion et participe donc de la consommation de carburant. Initialement de 1 (tout l'air entrant passait par la combustion), ce taux s'est progressivement élevé jusqu'à 10 pour le moteur LEAP de CFM.

Atteindre un tel taux de dilution suppose d'augmenter la taille de la soufflante, et dans le même temps de réduire la taille de la partie haute pression en visant des températures de combustion de plus en plus élevées. L'une des difficultés rencontrées est la taille croissante des aubes de soufflante, qui entraîne une hausse de leur masse[3] et de la vitesse en bout d'aube.

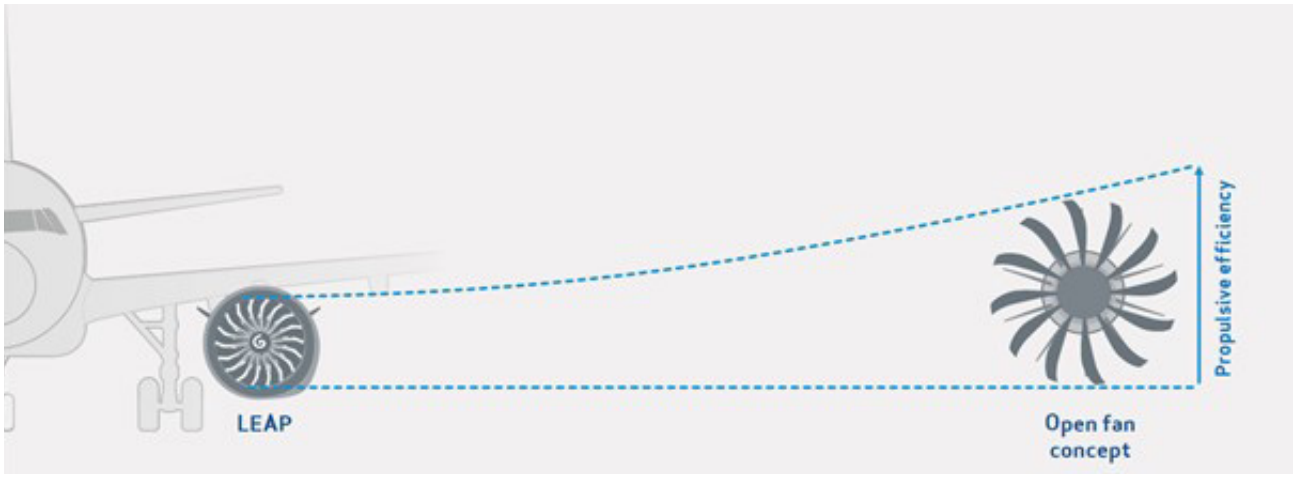
Pour poursuivre l'augmentation du taux de dilution, il apparaît nécessaire de dissocier le régime de rotation de l'aube de soufflante de celui du reste du moteur, au travers d'une boîte de vitesse. Ce principe, bien connu sur les avions turbopropulsés, a été mis en œuvre pour la première fois à grande échelle sur une turbine à gaz par le motoriste américain Pratt&Whitney, sur le Geared Turbo-Fan introduit en 2013 sur l'Airbus A220. Tous les motoristes mondiaux envisagent un tel système, même si les architectures pourraient varier : Rolls-Royce avec son démonstrateur Ultrafan, et Safran et GE *via* le programme RISE.

L'architecture disruptive de l'Open Fan

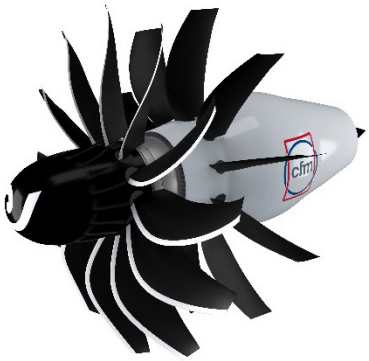
Outre la nécessité d'un réducteur, augmenter la taille de la soufflante conduit à une nacelle plus grande, donc plus lourde et générant une traînée aérodynamique plus élevée. Franchir une rupture sur l'augmentation du taux de dilution suppose donc de repenser le moteur, et se passer de nacelle : c'est le sens de l'architecture non carénée, dite Open Fan, présentée par Safran et GE Aerospace dans le cadre du programme RISE.

Cette architecture reposerait sur des aubes de soufflante surdimensionnées, à calage de pas variable et assurant la fonction d'inverseur de poussée actuellement assurée par la nacelle, ainsi que sur un second étage d'aubes permettant de redresser le flux aérodynamique et réduire le bruit. Outre les défis spécifiques de conception des aubes de soufflante, dont la taille sera très supérieure à celles du LEAP, une telle architecture présente notamment des enjeux en termes de maîtrise des nuisances sonores, ainsi que pour l'intégration des moteurs sur l'avion compte tenu de

[3] Le moteur LEAP répond à ce défi en intégrant des aubes en composite carbone tissé en 3D.



Comparaison entre le concept CFM RISE – Open Fan et le moteur LEAP actuel (Crédit : CFM International).



CFM RISE – Open Fan, moteur à architecture non carénée (Crédit : CFM International).

EcoENGINE (démonstrateur 1/5e de l'Open Fan RISE) dans la soufflerie S1MA de l'ONERA à Modane.

son diamètre doublé par rapport au LEAP. En 2023, Safran et l'ONERA ont engagé une campagne d'essais à haute vitesse dans la soufflerie de Modane, afin de valider les travaux de conception déjà menés sur ces sujets.

Quels enjeux pour la propulsion aéronautique française du futur ?

Face au défi climatique, la prochaine génération de moteurs d'avion devra embarquer un éventail très large de solutions innovantes pour franchir une rupture en termes de consommation de carburant. Pour répondre à un tel défi, de nombreux éléments devront être réunis :

- L'alignement des acteurs au sein de la filière, tant au niveau d'ambition que sur les grandes options technologiques pour l'atteindre. À titre d'exemple, l'intégration de l'Open Fan sur un avion pourrait nécessiter une architecture spécifique de l'avion, et donc une difficulté pour l'avionneur à proposer plusieurs moteurs aux compagnies aériennes si les autres motoristes ne suivent pas cette voie. Cet inconvénient, pour l'avionneur et les compagnies aériennes, n'est envisageable que si l'architecture Open Fan apporte un gain de consommation décisif, attendu et valorisé par l'ensemble de la filière.
- Le soutien des pouvoirs publics, en France et en Europe, aux travaux de R&T qui précèdent le lancement des futurs programmes. Le soutien des pouvoirs publics français a été réaffirmé mi-2023 à l'occasion du Salon du Bourget.
- L'attractivité de la filière pour recruter, en particulier des ingénieurs : si celle-ci demeure forte à court terme, il s'agit de l'entretenir malgré un contexte actuel de critiques sur l'aviation, mais aussi face à la forte concurrence à venir du secteur nucléaire avec la relance du programme de construction de centrales en France.

- La préparation très en amont des enjeux liés à la certification : les accidents des 737MAX intervenus en 2019 et les difficultés encore récentes de Boeing ont conduit à fortement renforcer les exigences de certification des programmes d'avions commerciaux. Cette phase de certification sera d'autant plus critique que les prochains programmes seront innovants, et elle se prépare donc très en amont, par exemple pour la démonstration de la maîtrise des risques associés au cas de perte d'une aube de soufflante sur l'architecture Open Fan.
- La préparation, anticipée elle aussi, des capacités industrielles et des chaînes d'approvisionnement : l'exigence climatique suppose en effet d'introduire le plus rapidement en flotte un nouveau programme d'avions. Le rythme de montée en cadence industrielle est donc clé – cela a constitué une grande réussite du programme LEAP. Dans un contexte post-Covid marqué par des évolutions géopolitiques, une relative fragmentation des chaines d'approvisionnement et la recherche d'une résilience accrue, les enjeux industriels doivent être pensés très en amont par la filière, en lien avec les pouvoirs publics.

Conclusion

Face à l'ampleur du défi climatique, la propulsion aéronautique constitue un levier majeur de décarbonation du secteur aérien. La rapidité de la transition à mener impose de multiplier les innovations qui embarqueront dans les prochains programmes : science des matériaux, électrification, ingénierie système, les domaines scientifiques et techniques mobilisés sont variés, et offrent une opportunité aux ingénieurs de participer concrètement à cette nouvelle aventure de la propulsion aéronautique.