

# Réduire la consommation énergétique des avions

Par **Alain CASSIER**

Membre honoraire de l'Académie de l'Air et de l'Espace

Comme tous les secteurs de l'économie, le transport aérien doit faire face aux défis de la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Dans ce cadre, il doit absolument trouver les moyens de limiter sa consommation d'énergie ; et pour éviter que celle-ci ne soit obtenue qu'au travers d'une limitation du trafic, il n'a d'autre choix que d'augmenter son efficacité en termes d'énergie par passager et par kilomètre parcouru. Cette amélioration de l'efficacité énergétique peut être recherchée au niveau de l'utilisation des avions (optimisation des routes, du remplissage des avions, de la gestion du trafic), mais surtout au niveau de l'efficacité énergétique de l'avion lui-même (c'est-à-dire en réduisant l'énergie qu'il consomme pour voler).

Les principaux programmes de recherche en cours actuellement portant sur la réduction de consommation des avions en Europe et aux États-Unis sont "Clean Aviation", porté par la Commission européenne, "Transonic Truss Braced Wing" soutenu par la Nasa, et "Jetzero Z5 BWB" par l'US Air Force. Nous analysons dans cet article les évolutions de la conception de la cellule de l'avion qui pourraient en résulter, et les gains d'efficacité énergétique correspondants.

## Le transport aérien face aux défis de la décarbonation

Comme tous les secteurs de l'économie, le transport aérien doit faire face aux défis de la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ces défis sont particulièrement élevés du fait de la croissance prévue du trafic mondial et de sa conséquence sur l'accroissement de sa consommation en énergie, qui demande une réponse rapide et efficace, et de la difficulté d'intégrer dans un avion des systèmes de propulsion décarbonés comme ceux utilisant l'hydrogène ou les batteries électriques comme source d'énergie.

À court et moyen termes, les seules solutions réalistes trouvées pour remplacer le kérosène fossile pour les avions moyen-long-courriers (qui produisent l'essentiel des émissions de CO<sub>2</sub> du transport aérien) font appel aux SAF (*sustainable aircraft fuels*), qui sont des fuels synthétiques fabriqués à partir de la biomasse ou par synthèse à partir de l'hydrogène et du gaz carbonique.

Le problème est que la production des SAF est contrainte, soit par la disponibilité de la biomasse en quantité suffisante, soit par la quantité d'énergie verte requise pour sa fabrication, dont le rendement est de l'ordre de 40 %.

Dans ces conditions, le transport aérien doit absolument trouver les moyens de limiter sa consommation d'énergie ; et pour éviter que celle-ci ne soit obtenue qu'au travers d'une limitation du trafic, il n'a d'autre choix que d'augmenter son efficacité en termes d'énergie par passager et par kilomètre parcouru.

Cette amélioration de l'efficacité énergétique peut être recherchée au niveau de l'utilisation des avions (optimisation des routes, du remplissage des avions, de la gestion du trafic), mais surtout au niveau de l'efficacité énergétique de l'avion lui-même (c'est-à-dire en réduisant l'énergie qu'il consomme pour voler).

## Les voies d'amélioration de l'efficacité énergétique des avions

Les données relatives à l'évolution des performances des avions du fait des progrès de la technologie montrent une réduction de la consommation kilométrique par passager (pkt) très importante (division par 4) depuis les années 1950. Cette réduction provient pour moitié des gains sur l'efficacité des moteurs installés (c'est-à-dire incluant l'effet des prélèvements de puissance pour le fonctionnement des systèmes et la traînée des nacelles), et de gains sur l'aérodynamique de la cellule, des réductions de masse de la cellule équipée et de l'amélioration de l'efficacité des systèmes de l'avion.

Ces gains seront beaucoup plus difficiles à réaliser au fur et à mesure de la maturation de la technologie aéronautique, et ils risquent d'être plus coûteux en effort de développement ou en utilisation. Cependant, le renchérissement prévisible de l'énergie utilisable par le transport aérien devrait motiver l'intensification de la recherche de solutions, et permettre l'amélioration de l'efficacité énergétique du transport aérien va se poursuivre, voire s'intensifier.

Compte tenu du cycle de développement des avions et de la maturité technique et industrielle requise pour toute nouvelle solution technologique, les technologies retenues pour les nouveaux avions qui seront introduits en 2030-2035 doivent être en développement aujourd'hui. Les programmes de recherche en cours donnent donc des indications sur les technologies considérées à cet horizon.

Les principaux programmes de recherche en cours actuellement portant sur la réduction de consommation en Europe et aux États-Unis sont "Clean Aviation" porté par la Commission européenne (CE), "Transonic Truss Braced Wing" soutenu par la NASA, et "Jetzero Z5 BWB" par l'US Air Force. Nous allons analyser dans la suite de l'article les gains qui pourraient en résulter.

Mais en premier, il est nécessaire de présenter les différents facteurs qui déterminent la consommation d'un avion. Il s'agit de :

- l'efficacité du système de propulsion ;
- de la traînée à portance nulle de l'avion complet, principalement due à la friction de l'air sur la cellule ;
- de la traînée induite par la portance équilibrant le poids de l'avion.

Pour réduire la consommation de carburants, il faut donc agir sur ces trois facteurs. Dans les lignes qui suivent, on traitera uniquement des solutions relatives à la conception de la cellule de l'avion, incluant l'intégration du système de propulsion mais excluant celles relatives à la conception de ce système.

## Les nouvelles configurations

Parmi les solutions pour réduire la consommation de carburants, celles relatives à la configuration générale de l'avion sont les plus visibles, et présentent un potentiel d'amélioration de l'efficacité énergétique important.

La configuration qui s'est imposée au cours du temps pour tous les avions de transport civils est celle du fuselage tubulaire, qui sert de compartiment pour la charge marchande (passagers et fret), et de l'aile, qui contient les réservoirs de carburants et assure la portance (configuration *tube and wing* en anglais : TAW). Cette solution s'avère efficace, car la cabine a la même architecture que celle des autres moyens de transport, et plaît aux passagers qui restent proches des hublots ; la masse du carburant logé dans l'aile est équilibrée directement par la portance aérodynamique ; et cette configuration permet de séparer les fonctions du fuselage et de l'aile. De plus, elle est efficace pour assurer le contrôle du vol, avec un couplage faible des gouvernes latérales (disposées en extrémité de voilure) et longitudinales disposées à l'arrière du fuselage sur les empennages.

Deux évolutions possibles de cette configuration font l'objet de programmes de recherche aux États-Unis et en Europe, et sont analysées ci-après.

## Aile volante

Dans la configuration traditionnelle TAW, le fuselage a un impact négatif sur l'efficacité aérodynamique, car il ne porte pas ou peu et il traîne. Dans la configuration aile volante (ou BWB : *blended wing body*), il n'y a pas de fuselage et la cabine est intégrée dans l'aile, ce qui conduit à une réduction de surface mouillée – d'autant plus qu'il n'y a pas d'empennage horizontal –, et ainsi à une réduction de la traînée de frottement.

La répartition de portance en envergure est plus uniforme et plus proche de la répartition théorique optimale elliptique, et ceci réduit la traînée induite par la portance.

Au total, les calculs théoriques prédisent un gain de l'ordre de 30 % sur la finesse maximale par rapport à la configuration TAW. Ce chiffre dépend évidemment de la définition détaillée des configurations TAW et BWB comparées.

L'idée de l'aile volante n'est pas nouvelle, mais n'a pas débouché sur des réalisations opérationnelles pour l'instant. Les raisons sont liées aux difficultés et risques à surmonter, dont les principaux sont :

- de nombreux sièges de la cabine sont éloignés des hublots, qui, de plus, offrent une vue d'intérêt limité car ils regardent à la verticale, soit vers le haut soit vers le bas ;
- le positionnement et le dimensionnement des issues est plus compliqué ;
- il y a une pénalité en masse du fait de la section non circulaire de la cabine pressurisée ;
- le dimensionnement de la partie centrale de l'avion sera complexe du fait des contraintes bidirectionnelles générées par la portance distribuée en envergure et la masse des passagers répartie longitudinalement ;
- le pilotage et la stabilité de l'axe longitudinal de l'avion sont délicats à assurer du fait de l'absence de stabilisateur horizontal ;
- la compatibilité avec les installations aéroportuaires doit être assurée ; or celles-ci sont optimisées pour la configuration TAW.



Figure 1 : Vue d'artiste de la configuration BWB de JetZero (Source : US Air Force).

La proposition de la *start-up* californienne JetZero (associée à Northrop Grumman) faite à l'US Air force vise à démontrer la faisabilité de dériver une version ravitailleur militaire d'un avion de transport civil. Le choix du contractant JetZero associé à Grumman vient d'être

fait avec un objectif de mise en vol d'un démonstrateur de ce ravitailleur à l'échelle 12,5 % en 2027. Jetzero prétend avoir trouvé des solutions aux problèmes cités plus haut, et pouvoir obtenir un gain d'efficacité de l'ordre de 50 % (qui semble surestimé) par rapport aux avions de la génération actuelle monocouloir. Leur objectif est de mettre en service une version de transport de passagers pouvant transporter 250 passagers sur 5 000 miles nautiques (environ 9 300 km) d'ici la fin des années 2030.

Cette configuration BWB présente en outre l'avantage de disposer de volumes importants, qui pourraient servir à l'installation de réservoirs d'hydrogène pour une future version utilisant l'hydrogène comme carburant : l'hydrogène nécessite en effet des volumes de réservoirs beaucoup plus importants que le kérosène.

Il est clair que les délais de développement et de certification d'une configuration aussi novatrice et l'atteinte des objectifs d'efficacité énergétique sont très incertains, d'autant plus que le financement de la version de transport de passagers ne semble pas assuré. Mais l'adossement à un programme militaire est une solution qui peut crédibiliser le projet et en réduire les risques, en particulier financiers.

### Augmentation de l'envergure

La traînée relative à la portance (égale au poids de l'avion) représente près de la moitié de la traînée totale de l'avion en vol de croisière. Cette traînée est inversement proportionnelle au carré de l'envergure ; il y a donc intérêt à augmenter l'envergure pour réduire la puissance nécessaire au vol, et donc réduire la consommation d'énergie.

Mais augmenter l'envergure a des inconvénients : ceci augmente les efforts dans l'aile qui devient plus difficile à dimensionner en résistance et en stabilité aéroélastique, avec répercussion sur la masse, et pose le problème de compatibilité avec les aéroports.

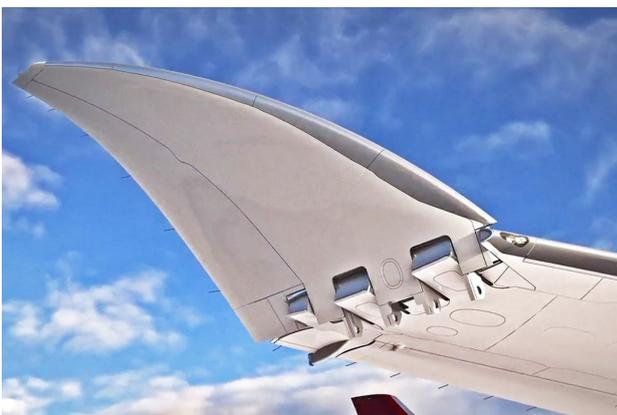


Figure 2 : Extrémité d'aile repliable B777X (Source : Boeing).

En effet, augmenter l'envergure tout en maintenant la surface de l'aile constante pour ne pas augmenter la traînée de frottement conduit à une réduction de la section de l'aile et corrélativement de la résistance et de la rigidité : les déformations sous les efforts de

portance augmentent, jusqu'à poser des problèmes de stabilité aéroélastique à grande vitesse. Une part importante des aéroports ont des taxiways limitant l'envergure à 65 m (taxiway code E) : c'est cette limitation qui a conduit Boeing à installer des extrémités d'aile repliables sur le B777X au prix d'une masse et d'une complexité supplémentaires. Les avions plus petits, en particulier les monocouloirs, ont une marge plus importante par rapport à cette limite, et l'augmentation de leur envergure est donc plus envisageable.

L'objectif du programme "Transonic Truss Braced Wing" (projet Boeing X66) est d'évaluer l'intérêt d'un doublement de l'envergure par rapport aux avions actuels.



Figure 3 : Vue d'artiste projet X66 de Boeing (Source : Boeing/NASA).

Pour réduire les efforts d'aile et faciliter son dimensionnement aéroélastique, des haubans contribuant à la portance aérodynamique sont installés comme indiqué sur la représentation ci-dessus ; les extrémités d'aile sont repliables. Cette solution permettrait de réduire la consommation en croisière de 15 % selon Boeing.

Le programme de recherche européen "Clean Aviation" comprend également une partie dédiée aux ailes de grand allongement, avec un objectif de gain de consommation de 10 % à 13 % pour une solution de motorisation UltraFan (Turbofan à grand taux de dilution, donc Fan de très grand diamètre) et jusqu'à 17 % pour une solution Open Rotor (ces chiffres incluent les gains provenant de la motorisation). Ce programme permettra de réduire la marge d'incertitude importante sur les gains réalisables.

### Aérodynamique des composants et intégration propulsive

Une part importante de l'amélioration de l'efficacité aérodynamique peut provenir de changements d'architecture avion comme expliqué au paragraphe précédent. Des solutions relatives à l'aérodynamique des composants de l'avion sont cependant possibles avec des gains plus modestes. Une de ces solutions faisant partie du programme "Clean Sky" consiste à essayer de conserver un écoulement le plus possible laminaire à la surface de l'aile et des empennages et dérive de l'avion, de manière à minimiser le coefficient de traînée de frottement de l'air.

Ceci peut être obtenu de deux façons : de façon passive en jouant sur la géométrie des composants – pour éviter les re-compressions trop rapides, génératrices de décollements et de turbulences –, et sur leur état de surface. Des gains de l'ordre de 1,5 % de traînée globale ont pu être démontrés sur un A340 avec aile laminaire ; mais le problème actuellement non résolu est de maintenir la qualité d'état de surface en opération, ce qui nécessite des qualités de revêtement anti-adhérent et des dispositifs de nettoyage des salissures, en particulier celles dues à l'écrasement d'insectes.

La deuxième façon est active et fait appel à l'aspiration de la couche limite avant qu'elle ne devienne turbulente, et est plutôt envisagée pour les fuselages ; il faut dans ce cas accepter une pénalité en masse, coût et consommation d'énergie du dispositif d'aspiration. Une solution consiste à installer les moteurs à l'arrière du fuselage, où ils aspirent tout ou partie de l'écoulement de surface du fuselage (couche limite). Dans ce cas, il y a malgré tout une pénalité de performance pour les moteurs, qui aspirent un écoulement ralenti et turbulent affectant les performances du compresseur du moteur.

On peut également chercher à réduire la surface mouillée de l'avion sans remettre en cause son architecture : c'est l'objectif de l'Innovative Empennage Project inclus dans le programme "Clean Sky", concernant une géométrie d'empennage compacte.

L'intégration de la propulsion a un impact important sur l'efficacité aérodynamique de l'avion. En fait, les performances de la motorisation installée sont toujours inférieures à celle de la motorisation isolée, en raison de l'effet des interactions avec la cellule et les prélèvements de puissance nécessaires au fonctionnement des systèmes de l'avion.

L'intégration de la motorisation est d'abord un problème de choix d'architecture avec deux solutions possibles : moteur sous l'aile ou à l'arrière du fuselage. Le choix de solution doit prendre en compte l'effet de l'interaction aérodynamique entre le moteur et la cellule de l'avion, principalement la voilure dont l'écoulement est perturbé par celui du moteur, mais fait intervenir d'autres paramètres que celui de l'efficacité aérodynamique, tels que bruit au sol et en cabine, et la protection contre l'éclatement turbine et l'éjection de parties de pales dans le cas d'un Open Rotor. L'augmentation de la taille du moteur en complique l'intégration, notamment dans le cas d'une installation sous l'aile où l'obtention d'un jeu suffisant entre le moteur et le sol peut conduire à augmenter la longueur du train d'atterrissage et / ou à modifier la forme de l'aile.

Des travaux d'installation sont menés avec Airbus dans le cadre de "CleanSky2", afin de définir le meilleur couple moteur-avion. Il s'ensuivra une phase de démonstration pour une entrée en service envisagée après 2030. Des études ont également été lancées avec les autorités de certification pour faire évoluer la réglementation des architectures de moteur non carénées.



Figure 4 : Étude d'installation du moteur Open Fan  
(Source : CFM International).

### Masse et autres facteurs

La masse de la structure et des systèmes de l'avion joue un rôle important dans l'énergie nécessaire pour le vol, au travers de la traînée induite par la portance, qui représente près de la moitié de la traînée totale. Cet effet est augmenté par le phénomène dit « effet boule de neige » qui correspond au fait que lorsque l'on ajoute de la masse à un avion, celui-ci doit être redimensionné (par exemple la surface de la voilure doit être accrue pour augmenter sa portance), ce qui induit une masse supplémentaire : il y a donc un effet multiplicateur sur l'augmentation de la masse totale, qui va de 2 pour les court-courriers à 4 ou 5 pour les long-courriers (l'écart provient de la différence de masse de carburant).

Des gains de masse doivent donc être recherchés au niveau de la structure et des systèmes.

Pour la structure, on peut jouer sur les caractéristiques en résistance des matériaux et sur la réduction des efforts. Cependant, les performances des matériaux ont beaucoup progressé dans le passé, et le potentiel d'amélioration supplémentaire est limité à quelques pourcents. La part du programme "Clean Aviation" dédiée à la structure concerne plutôt des concepts structuraux plus efficaces (empennages arrière compacts par exemple), l'intégration structure cabine et systèmes et les nouveaux procédés de fabrication permettant des gains de masse et de coûts (composites thermoplastiques soudés).

La réduction des efforts de dimensionnement offre un potentiel de gains *via* la réduction des marges qui pourrait s'envisager du fait d'une meilleure connaissance des charges de vol, en particulier grâce aux systèmes de surveillance type HUMS (*health and usage monitoring systems*). Ceci nécessitera un changement des règles de certification des avions, et ne semble pas pouvoir être mis en pratique à court terme. La réduction des efforts peut également être obtenue par des lois de commandes de vols atténuant les charges dues aux turbulences et optimisant la répartition des charges de manœuvre : ces solutions sont déjà en pratique sur la dernière génération d'avions, mais leur effet pourrait être renforcé.

Pour les systèmes, on doit rechercher simultanément des réductions de masse et des réductions d'énergie consommée, et le bilan des gains doit être fait en liaison avec le système propulsif qui est le seul système (en

dehors de l'APU, *auxiliary power unit*) à générer de l'énergie à bord. La tendance actuelle est de remplacer les systèmes fonctionnant à l'énergie hydraulique et à l'énergie pneumatique (système de pressurisation et de conditionnement d'air) par des solutions utilisant l'énergie électrique. Les gains de telles solutions ne peuvent être évalués que sur la base d'un projet complet comprenant le système propulsif et les autres systèmes de l'avion. En effet, le résultat obtenu dépend des compromis qui sont faits entre des répercussions positives et négatives. Par exemple, le remplacement du système de conditionnement d'air cabine utilisant de l'air prélevé sur le compresseur des moteurs par une solution utilisant l'énergie électrique a un effet positif très important sur le rendement des moteurs, mais il est partiellement compensé par la masse et la consommation d'énergie des systèmes électriques qu'il faut installer en remplacement.

## Conclusion

Les progrès de la technologie aéronautique ont permis une division par 4 de la consommation d'énergie des avions pour le transport d'un passager par kilomètre parcouru au cours des soixante-dix dernières années. La tenue des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre impose que cette réduction de consommation se poursuive, même si les gains deviennent de plus en plus difficiles à obtenir au fur et à mesure de la maturation de la technologie.

Les gains qui peuvent être obtenus par des modifications de l'architecture des avions et de leur voilure sont les plus importants, mais sont ceux qui sont les plus risqués financièrement et techniquement, en raison de l'importance des travaux de développement nécessaires et des incertitudes concernant l'atteinte des objectifs de performance et opérationnels.

Les améliorations en cours de développement dans le cadre des programmes de recherche en aéronautique européens et américains devraient permettre d'obtenir une amélioration de l'efficacité énergétique des avions de transport de passagers de l'ordre de 30 % de la nouvelle génération d'avions à la fin des années 2030.