

Demain, l'aviation plus verte et plus autonome

Denis Chapuis a été vice-président d'Airbus, chargé d'un groupe de recherche et d'innovation. Il est aujourd'hui président d'ADAN consulting¹.

1 Les défis actuels de l'aéronautique

Parmi tous les défis de l'aéronautique, plus précisément de l'aviation de transport civil, deux sont particulièrement emblématiques :

– **l'aviation plus verte** : bien que le transport aérien ne représente que 2 % de la consommation mondiale de carburant fossile, la réduction de consommation est un objectif fort, qui fait l'objet d'engagements volontaires entre les industriels du transport aérien et les pouvoirs publics. Cette réduction se trouve donc au cœur des enjeux industriels et

commerciaux des prochaines années. L'industrie aéronautique, très visible du grand public, est soumise à la même pression écologique que tous les autres moyens de transport et se doit de diminuer son empreinte carbone (**Figure 1**), malgré l'augmentation constante du trafic aérien ;

– **l'aviation autonome** : après le pilote automatique, qui soulage les pilotes humains des tâches « de bas niveau », il est maintenant envisageable de rendre l'avion autonome, c'est-à-dire capable de se piloter seul et de gérer en sécurité les situations imprévues ou d'urgence. Cette évolution, rendue possible par les développements récents dans les domaines

1. www.adan-consult.fr



Figure 1

E-Fan, l'avion électrique expérimental d'Airbus, traverse la Manche cent ans après Blériot.



Figure 2

L'Europe et les constructeurs aéronautiques se sont engagés pour une réduction de la consommation, des polluants et du bruit.

des capteurs et des moyens de traitement, sera probablement lente mais elle n'en est pas moins inéluctable. Tout ou presque reste encore à inventer, à normaliser et à certifier, mais l'aventure, semblable à celle que vit l'automobile, est passionnante, tant par les développements à conduire que par ses conséquences révolutionnaires, à moyen et long terme.

2 Vers une aviation plus verte

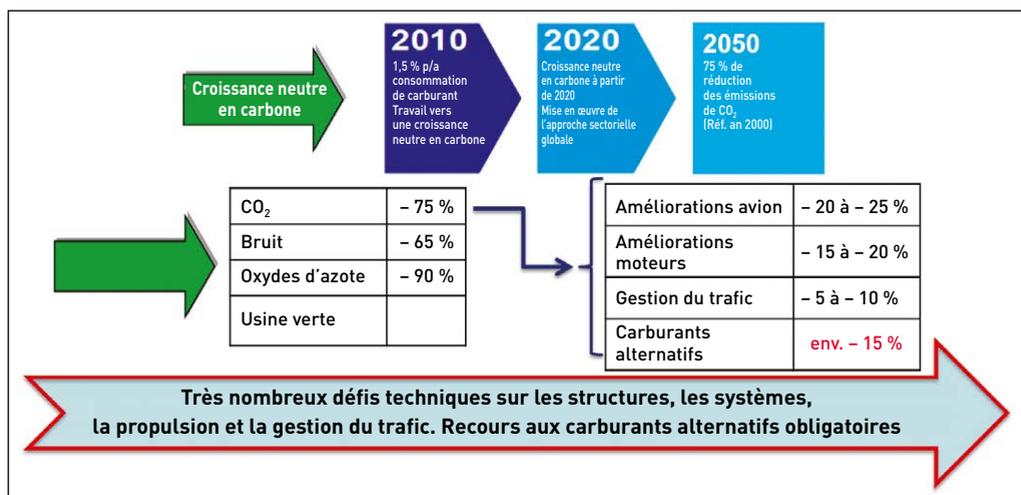
2.1. Les attentes environnementales

L'Europe et les industriels du transport aérien ont adopté conjointement une feuille de route (Flightpath 2050) visant à la réduction de la consommation (CO_2), des polluants (dont les oxydes d'azote NO_x), ainsi que du bruit, source de nuisance de plus en plus insupportable pour le grand public (**Figure 2**).

Cette démarche d'engagement volontaire conjoint est très semblable à celle qui a été conduite dans l'automobile et a abouti à l'adoption des normes Euro 1 à Euro 6.

« Flightpath 2050 » impose la **réduction de 75 % les émissions de CO_2** en masse, par rapport à l'an 2000, malgré l'augmentation constante du trafic aérien. Cet objectif très ambitieux ne pourra être atteint que par étapes, à la fois en améliorant tout ce qui peut l'être sur les avions actuels et en s'engageant dans des voies nouvelles, notamment vers de nouvelles architectures avions et de nouveaux systèmes de propulsion, tirant parti des possibilités offertes par le passage à l'énergie électrique (**Figure 3**).

L'Europe, précurseur dans le domaine de la protection de l'environnement, a depuis été suivie par les autres acteurs globaux, et des accords semblables ont été signés partout dans le monde.



2.2 Les différents moyens d'action

2.2.1. L'aérodynamique

Afin de diminuer la traînée parasite et réduire les pertes par frottement, il est nécessaire de poursuivre les efforts en cours depuis le début de l'aviation en vue d'améliorer l'aérodynamique de l'avion, en le rendant plus lisse, en regroupant et améliorant les entrées d'air, en ajoutant des appendices (« sharklets ») pour réduire les turbulences de bouts d'ailes comme sur l'A320 NEO (Figure 4), en appliquant des revêtements spéciaux qui permettent la réduction des phénomènes

de couche limite (revêtements microstructurés type « peau de requin », etc.). Les économies déjà réalisées sont substantielles. Par exemple, sur l'A320 NEO, la simple adjonction des sharklets de bouts d'ailes apporte un gain de consommation de 3,5 % !

Pour donner un ordre de grandeur, sur un A320 NEO, ces 3,5 % correspondent à une économie de 700 tonnes de CO₂ par an et par avion. Le gain en consommation autorise par ailleurs un accroissement de la distance franchissable et/ou de la charge utile, au profit des compagnies utilisatrices et des voyageurs.

Figure 3

Les industriels de l'aéronautique cherchent à améliorer les performances des avions selon plusieurs axes afin de diminuer les dépenses en kérosène et ainsi atteindre les différents objectifs européens sur la diminution de l'émission de CO₂ et du bruit émis par les avions.

ACARE : Advisory Council for Aeronautics Research in Europe.



Figure 4

Un A320 NEO équipé de moteurs basse consommation et de sharklets.

La prochaine étape sera l'adoption des nouveaux profils aérodynamiques permettant des écoulements laminaires au niveau des ailes en croisière, réduisant toujours plus les frottements et donc les pertes énergétiques. Ces profils, connus au niveau des laboratoires, sont en cours d'industrialisation et devraient apparaître sur les avions commercialisés d'ici quelques années seulement.

2.2.2. La réduction des masses : alléger, alléger, alléger...

La masse est une donnée essentielle dans la conception d'un avion. Très simplement, plus un avion est lourd, plus il faudra de puissance pour le faire décoller et le faire voler, et plus il consommera. Et le cercle est vicieux ! Pour économiser l'énergie, il faut donc s'efforcer d'alléger les équipements et les structures tout en préservant ou améliorant leurs caractéristiques essentielles, à savoir la résistance mécanique, la tenue à la

foudre, l'étanchéité, le confort des passagers, etc. Ce combat intemporel de l'industrie aéronautique contre la masse est facilité par l'apparition de nouveaux matériaux aux propriétés étendues comme les composites² ou par la généralisation de l'emploi de matériaux très hautes performances, comme le titane.

L'emploi de matériaux composites se généralise depuis des années (**Encart : « L'introduction progressive des matériaux composites »**) et offre encore un large potentiel de gain, mais au prix de difficultés de fabrication, d'une augmentation de la complexité du système avion et d'un risque coût.

L'emploi de matériaux multifonctionnels et de matériaux biosourcés apportera également un plus dans la dizaine d'années à venir. Il est important de noter que le choix

2. Composite : matériau composé d'un assemblage de plusieurs éléments chimiques non miscibles et dont les propriétés se complètent.

INTRODUCTION PROGRESSIVE DES MATÉRIAUX COMPOSITES

Dans les années 1970, la masse de matériaux composites embarqués représentait environ 10 % de la masse totale des avions. Les composites étaient essentiellement employés pour les pièces extérieures ne supportant que peu d'efforts, comme les « belly fairings », sortes de carénages assurant la continuité de formes du dessous de l'avion.

Aujourd'hui, l'A350 XWB, le dernier modèle de la gamme Airbus, embarque 53 % de matériaux composites (**Figure 5**). Pour la première fois dans la gamme Airbus, le fuselage de l'avion est également réalisé en composite (**Figure 6**). Cette évolution, qui peut apparaître comme un simple changement de matériau, est en fait très profonde, les matériaux métalliques et les matériaux composites présentant notamment des caractéristiques électriques très différentes, obligeant à reconcevoir de nombreux systèmes vitaux comme la distribution électrique ou la protection foudre.

La proportion de titane dans les avions est également en augmentation constante depuis quarante ans, augmentant ainsi la dépendance des constructeurs aéronautiques mondiaux vis-à-vis des fournisseurs de ce métal.

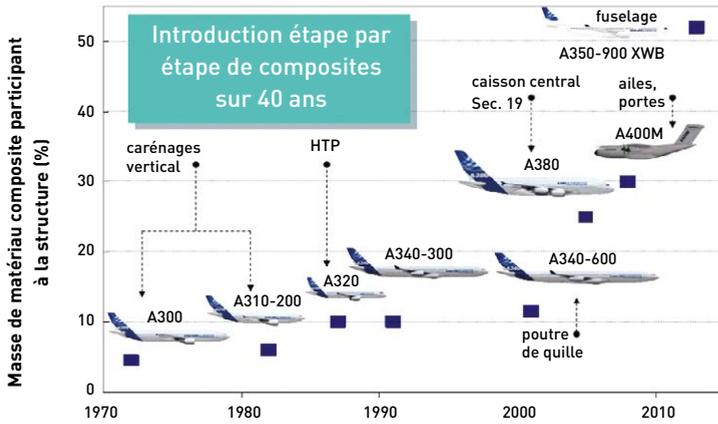


Figure 5

Évolution du pourcentage de matériaux composites utilisés dans chaque modèle d'avion en fonction du temps.

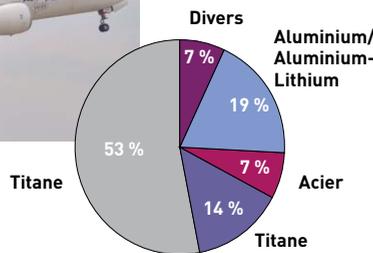


Figure 6

Proportion des matériaux utilisés dans l'A350, premier avion de la gamme Airbus à incorporer plus de 50 % de matériaux composites.

des matériaux composites utilisables est contraint par les réglementations environnementales (RoHS, REACH³, etc.), qui interdisent ou limitent l'emploi de certaines substances (les nanomatériaux par exemple).

L'industrie chimique a ici toute sa place, notamment pour apporter des solutions innovantes comme des matériaux moins chers, aux propriétés

adaptées. Le domaine des résines conductrices est particulièrement important.

2.2.3. Maîtriser et optimiser la production et la distribution de l'énergie

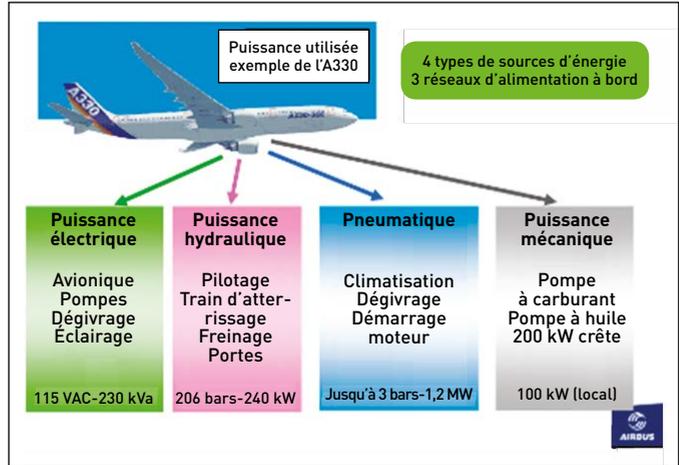
Toujours dans le but de diminuer les pertes énergétiques, les industriels travaillent à la redéfinition et à l'optimisation de la production et de la distribution d'énergie à bord.

Aujourd'hui, une partie de la puissance des moteurs est prélevée pour produire de l'énergie électrique. On y prélève également de l'air chaud, essentiellement pour assurer le dégivrage des bords d'attaque des ailes. Une partie de

3. Directive REACH : règlement du Parlement européen et du Conseil de l'Union européenne qui met en place un système intégré unique d'enregistrement, d'évaluation et d'autorisation des substances chimiques dans l'Union européenne depuis 2007.

Figure 7

Les différentes formes d'énergie dans un avion et leurs utilisations actuelles. L'objectif est de réduire les pertes énergétiques en rationalisant production, distribution et utilisation de l'énergie à bord (avion plus électrique).



l'électricité générée est utilisée directement sous cette forme (éclairage, calculateurs de vol, etc.) mais l'autre partie est à son tour transformée, sous forme de pression hydraulique par exemple.

Ces multiples transformations s'accompagnent de multiples chutes de rendement. Afin de diminuer les pertes, les industriels s'efforcent d'utiliser directement l'électricité à bord sans la retransformer, en allant vers un « avion plus électrique » (Figure 7).

Les compromis sont actuellement difficiles à trouver, en raison de difficultés technologiques mais également d'évolutions importantes des coûts et des changements induits dans la chaîne de valeur. Une boucle d'optimisation globale, en cours, permettra

de trouver le meilleur compromis dans les quelques années qui viennent. Les premiers changements importants, comme le « bleedless » (renoncement au prélèvement d'air chaud dans les moteurs pour conserver un meilleur rendement à ceux-ci), sont déjà apparus sur le marché.

Il est également nécessaire de réduire ou si possible d'annuler l'empreinte carbone des servitudes au sol (Figure 8). Les multiples véhicules nécessaires au sol, lorsque l'avion est nettoyé, avitaillé, déplacé d'un point de parking à un autre, sont tous électrifiés ou en cours d'électrification. Des solutions sont également à l'étude pour électrifier le taxiing des avions, c'est-à-dire leurs déplacements entre le point d'embarquement ou

Figure 8

Tous les appareils utilisés dans un aéroport (bus pour amener les passagers dans l'aéroport, camions citernes pour alimenter les avions en carburant...) deviennent électriques.



de débarquement des passagers et la piste avant décollage ou après atterrissage. Ces déplacements se font aujourd'hui avec les moteurs en marche, dans des conditions de mauvais rendement.

2.2.4. Bilan partiel

Une vision volontariste permet d'estimer que les améliorations portant sur l'avion pourraient apporter un gain de consommation de l'ordre de 20 à 25 % à moyen terme.

2.2.5. Amélioration du rendement des moteurs

L'amélioration des rendements des turboréacteurs actuels est constante. D'immenses progrès ont déjà été accomplis par les industriels au cours des quarante dernières années et, même s'il reste encore des économies potentielles à réaliser, les asymptotes sont maintenant proches et les technologies à mettre en œuvre sont de plus en plus coûteuses.

Les deux sources de gain sont l'augmentation de la température des parties chaudes des turbines (mais on atteint ici les limites de la technologie des matériaux) et l'augmentation

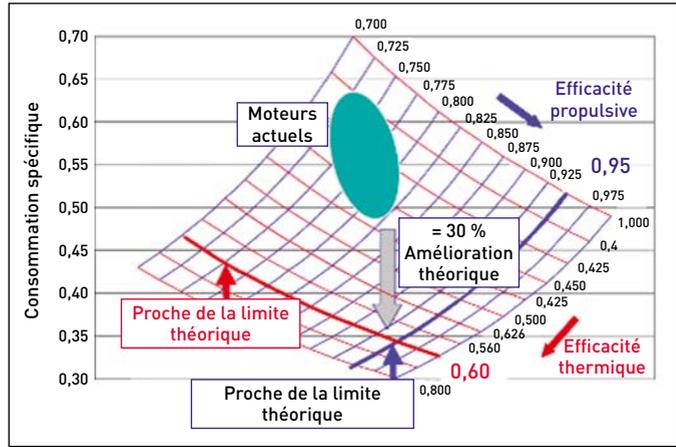


Figure 9

Consommation de carburant en fonction de l'efficacité propulsive et de la température.

du « bypass ratio », grossièrement le rapport entre le débit massique total d'air qui rentre dans le moteur et le débit massique d'air qui alimente la turbine (Figures 9 et 10). Cet accroissement du bypass ratio augmente globalement le diamètre des moteurs, qui doivent cependant pouvoir être intégrés en sécurité dans une architecture avion existante, en conservant une garde au sol suffisante.

Malgré la proximité des asymptotes, des économies de carburant de l'ordre de 15 à 20 % seraient ainsi encore potentiellement réalisables, mais au prix de difficultés techniques importantes, avec

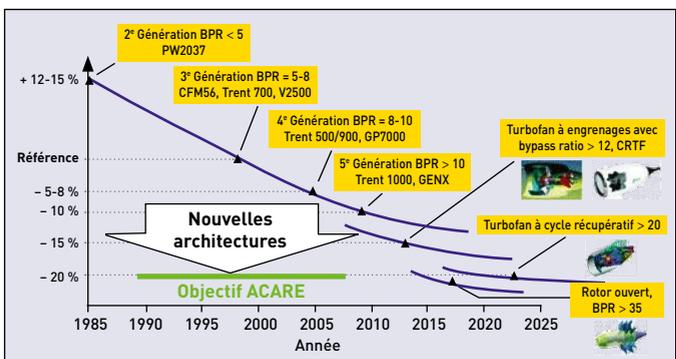
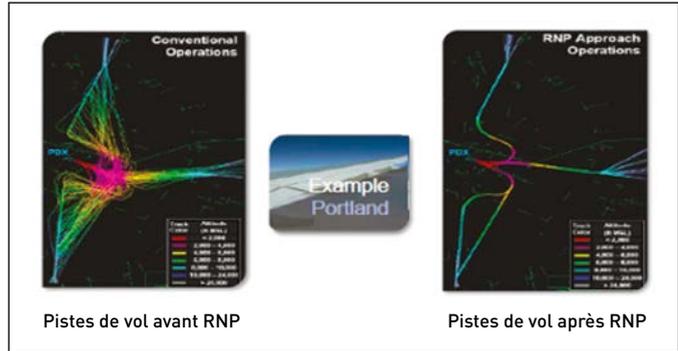


Figure 10

Effet du taux de by-pass sur la consommation de carburant.

Figure 11

Modélisation des trajectoires empruntées par les avions pour atterrir avant l'utilisation des procédures RNP et après. Ces procédures ont permis de réduire les temps d'approche et les nuisances aux riverains (bruit) aux abords des aéroports.



un risque notable sur les coûts. L'industrie automobile, sous la pression réglementaire, a ainsi vu s'envoler les coûts de ses groupes motopropulseurs.

2.2.6. Optimisation des temps de vol

Un certain nombre d'outils ont été développés et sont maintenant en cours de déploiement pour optimiser les plans de vols (Figure 11). L'introduction de procédures de navigation plus précises, les RNP (« Required Navigation Performance »), a permis de réduire considérablement l'espacement entre avions à l'approche des aéroports, de fluidifier les approches et globalement de réduire

d'environ un tiers les temps d'accès.

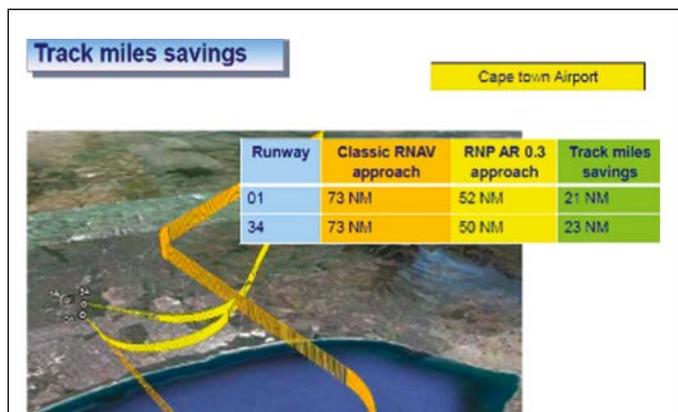
Les RNP permettent également d'adopter des trajectoires qui réduisent les nuisances aux riverains à l'approche des aéroports (Figure 12).

L'optimisation des temps de fonctionnement des moteurs, et donc des temps pendant lesquels ils consomment, passe également par la rationalisation des mouvements des avions au sol et par le taxi en mode électrique, déjà évoqué plus haut.

Les économies potentielles liées à ce domaine sont réelles, même si elles restent probablement assez faibles en valeur absolue.

Figure 12

Modélisation de la trajectoire optimale pour l'aéroport du Cap (Afrique du Sud) permettant une économie de carburant d'environ 30 % pendant l'approche.



2.2.7. Les carburants alternatifs

Pour atteindre les objectifs de Flightpath 2050, les constructeurs et les équipementiers travaillent simultanément sur tous les domaines à la fois. Mais il est fort probable qu'il sera impossible ou trop coûteux de réaliser tous les gains envisagés. Il faudra trouver des moyens complémentaires de réduire l'empreinte carbone. Pour ce faire, deux solutions sont envisagées aujourd'hui. La première repose sur le développement des carburants alternatifs, qui fourniraient l'énergie manquante tout en présentant une empreinte carbone nulle. La seconde consiste en l'étude d'un changement radical des systèmes de propulsion pour en augmenter largement le rendement, opération de longue haleine qui entraînerait également une refonte complète de l'architecture des avions, aujourd'hui proche de son optimum.

Les carburants alternatifs sont très attrayants sur le papier mais la voie vers leur généralisation n'est aujourd'hui pas établie

(Figure 13). Il n'existe pas encore de filière qui permette de produire industriellement et à coût maîtrisé de grandes quantités de carburant.

Du point de vue fonctionnel, un carburant liquide à température ambiante, avec un point de congélation de l'ordre de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ et un point éclair de l'ordre de $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ représente une solution quasi idéale. Le carburant liquide permet d'embarquer de façon « simple » une très grande quantité d'énergie, nécessaire pour développer les puissances importantes au décollage et pour voler longtemps.

Un carburant alternatif destiné à remplacer le Jet Fuel A1 (kérosène) devrait présenter des caractéristiques très proches de celui-ci et répondre aux mêmes exigences réglementaires. Un changement significatif de carburant serait très coûteux et particulièrement difficile à mettre en place. Le carburant alternatif recherché est dit « drop-in », c'est-à-dire qu'il doit pouvoir remplacer goutte pour goutte le kérosène sans modification ni des avions, ni des installations au sol.

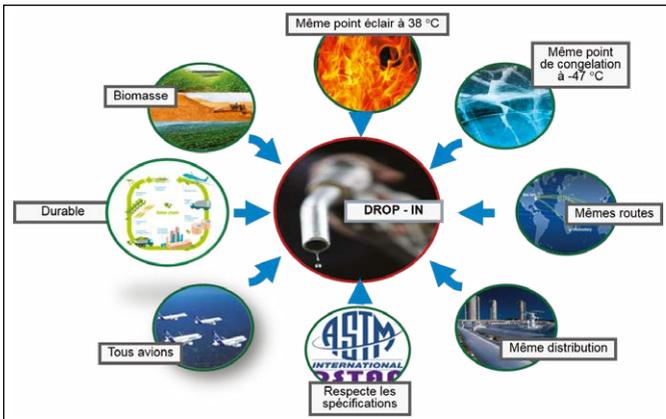


Figure 13

Toutes les conditions, tant chimiques que réglementaires, que doit respecter un carburant alternatif pour être utilisé dans le domaine de l'aéronautique.

Figure 14

Remplissage des réservoirs droits d'un A320 avec du biofioul avant un vol d'essai.



Il n'existe pas de solution industrielle à ce jour mais des expérimentations ont déjà été conduites et ont donné d'excellents résultats. Par exemple, un Airbus A320 de la compagnie Air France a réalisé le vol commercial le plus vert du monde (Figure 14). L'un des deux moteurs était alimenté par du biocarburant et le vol a été optimisé. Le vol s'est parfaitement déroulé, les économies d'énergie au rendez-vous, mais le coût prohibitif et l'absence de disponibilité du carburant utilisé ne permettent pas d'envisager une mise en œuvre

commerciale. L'équation technico-économique des carburants alternatifs pour l'aviation reste totalement à consolider, un beau domaine d'investigation pour les chimistes !

3 Les idées innovantes pour une aviation plus verte

Comme expliqué plus haut, les améliorations incrémentales apportées aux avions et à leurs systèmes ne permettront sans doute pas d'atteindre les objectifs de Flightpath 2050. En parallèle

Figure 15

Arrivés à maturité, les avions se ressemblent...



avec ces études, qui restent indispensables pour le court et moyen terme, il est nécessaire d'envisager d'autres solutions, plus disruptives, qui permettraient de faire un saut quantique en termes de rendement.

Aujourd'hui, vus de l'extérieur, les avions se ressemblent (**Figure 15**). Ce n'est pas le fait du hasard mais plutôt une conséquence normale de l'évolution. Au fil des années, les constructeurs sont tous arrivés à des solutions optimisées, techniquement proches les unes des autres.

Deux réacteurs sous les ailes pour assurer la redondance, des bras de levier et des surfaces actives qui permettent d'assurer le vol et la manœuvrabilité en cas de perte d'un des deux réacteurs, une silhouette adaptée au vol légèrement subsonique, là où les rendements propulsifs sont les meilleurs,

les même causes produisent les mêmes effets et tous les avions se ressemblent peu ou prou.

3.1. Des architectures en rupture

Pour faire des économies d'énergie significatives, il faut changer de paradigme et imaginer des solutions radicalement différentes. Nous sommes aujourd'hui arrivés au plus près des limites de nos architectures avion. La créativité des industriels de l'aéronautique a produit de nombreux concepts, dont certains ont donné naissance à des prototypes. La **Figure 16** en présente quelques-uns, qui ont tous en commun d'être équipés d'une propulsion non conventionnelle, différente des habituels deux réacteurs sous les ailes.

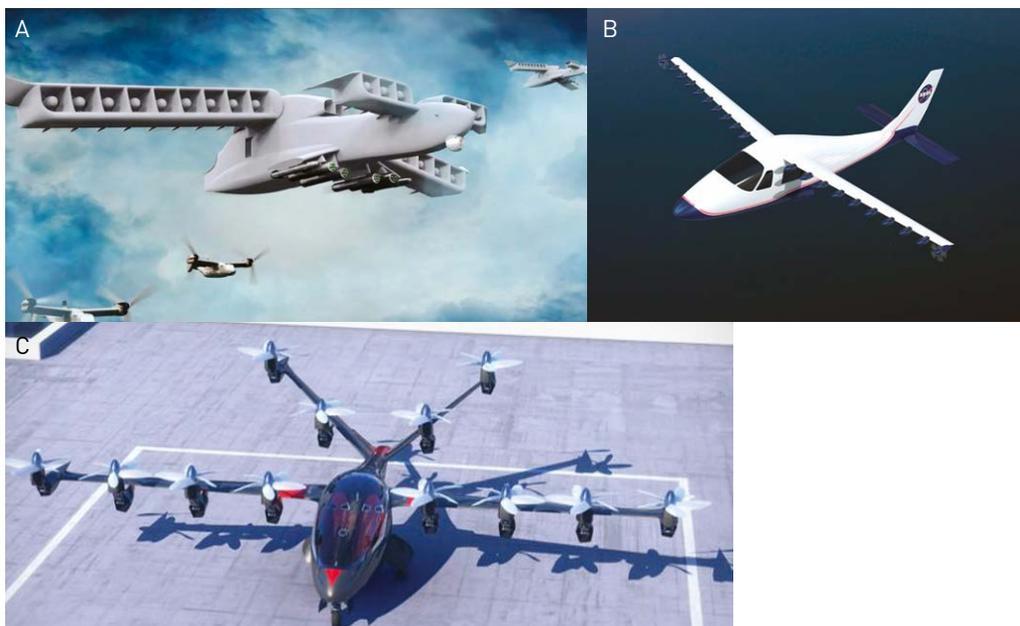
Parmi les solutions en rupture envisageables, celle qui

Figure 16

A) Prototype du VTOL (aéronef à décollage et atterrissage vertical) Aurora, capable d'atterrir et de décoller verticalement ; B) Spector, le laboratoire volant développé par la NASA pour l'étude de la propulsion distribuée, qui vise à diviser par cinq la consommation de carburant ; C) Le S2, le prototype à décollage vertical et rotors basculants développé par Joby Aircraft.

Source : B) NASA ;

C) www.aeronewstv.com



semble vraiment porteuse d'avenir est la « propulsion distribuée ». Le concept est simple : au lieu de pousser sur l'avion en deux points seulement, on répartit les points de poussée en de multiples endroits de l'avion, pour assurer une efficacité maximum et une maîtrise plus facile des situations incidentelles, la perte d'une source de poussée par exemple. Ce nouveau type de propulsion est utilisé par tous les concepts présentés sur la **Figure 16**.

La multiplicité des propulseurs impose qu'ils soient électriques. Les transmissions mécaniques sont trop lourdes, trop complexes à installer et risquent de ne pas pouvoir fournir les prestations désirées, comme le contrôle individuel de la poussée de chaque propulseur. La puissance électrique nécessaire aux propulseurs doit pouvoir être produite à bord, les solutions de stockage électrique envisageables, comme les batteries d'accumulateurs, étant trop lourdes et ne présentant pas des performances suffisantes pour une utilisation opérationnelle sur moyens et longs courriers. Cette génération de puissance électrique doit être réalisée avec un rendement nettement accru. De l'ordre de 30 % aujourd'hui, ce rendement devrait être porté à plus de 60 %, probablement en utilisant des dispositifs de récupération de chaleur, comme ceux qui existent dans les centrales de production à turbine à gaz, mises en œuvre en cas de besoin par des distributeurs comme EDF.

Enfin, il est également nécessaire de pouvoir distribuer en sécurité toute cette énergie électrique, dans l'environnement particulier d'un avion en altitude, soumis à des phénomènes extérieurs parfois extrêmes, comme la foudre par exemple. Les circuits de distribution devront être alimentés en haute tension (kiloVolts, mégaVolts ?) afin de réduire les pertes par effet Joule dans les conducteurs et surtout réduire la masse de ceux-ci. L'installation de ces circuits devra faire l'objet de précautions particulières pour éviter les arcs et réduire les risques de claquage, surtout en altitude.

En résumé, le passage à la propulsion distribuée impose la mise au point de générateurs électriques à haut rendement qui alimenteront, au travers de circuits de distribution haute tension adaptés, une nouvelle génération de moteurs électriques commandés par de nouvelles électroniques de puissance, sûres et présentant des pertes réduites. Ce type de propulsion hybride (fioul-électrique) devrait permettre une augmentation significative du rendement propulsif, à condition d'être adapté à une nouvelle architecture avion, spécialement conçue pour le recevoir (**Figures 17 et 18**).

Les études nécessaires sont en cours mais prendront du temps avant d'aboutir à une nouvelle génération d'avions de transport de passagers, tellement la révolution envisagée est profonde. Toutes les étapes présentées ci-dessus devront être franchies une par une.

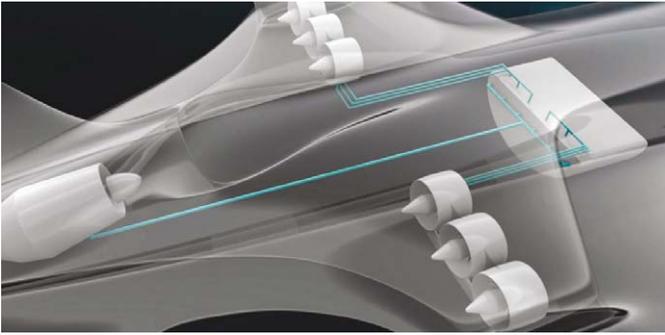


Figure 17

Concept d'architecture hybride à propulsion distribuée. Une turbine centrale produit de l'électricité qui charge une batterie qui alimente à son tour six propulseurs électriques indépendants

Pour s'engager sur ce chemin et commencer à comprendre les tenants et les aboutissants de la propulsion électrique et en particulier les problèmes de compatibilité électromagnétique (CEM⁴), Airbus a commencé par développer E-Fan, un avion-laboratoire volant tout électrique, alimenté par batteries (**Encart : « E-Fan, un avion laboratoire volant ! »**).

Bien sûr, d'autres études à plus grande échelle sont déjà en cours et devraient aboutir à la réalisation de prototypes hybrides dans les quelques années à venir.

4 Un autre défi pour l'aviation de demain, l'autonomie

La tendance qui a toujours prévalu dans l'aéronautique comme partout ailleurs est de délivrer l'homme des tâches inutiles, répétitives ou

qui nécessitent des moyens qu'il ne possède pas (force, précision, capacité à affronter des environnements dangereux...). Ainsi, depuis très longtemps, des systèmes automatiques performants ont été développés, comme les pilotes automatiques sur les avions, qui prennent en charge la presque totalité des actions courantes, autrefois dévolues aux pilotes.

L'évolution des technologies relatives aux capteurs, aux moyens de calcul et à l'analyse des données permet aujourd'hui d'envisager d'aller plus loin et de donner à l'homme un rôle de superviseur qui n'agira plus lui-même sauf en cas d'anomalie, voire même de supprimer purement et simplement l'homme de la boucle. Parmi les mille et une définitions de l'autonomie, on peut retenir celle-ci, qui reste simple et accessible, et couvre la majeure partie du problème. L'autonomie est, pour un système, la capacité à réaliser une mission sans intervention humaine.

Dans l'autonomie intervient la notion de prise de décision : le système doit décider des actions qu'il va entreprendre face à une situation qu'il aura évaluée lui-même, afin de

4. CEM (Compatibilité électromagnétique) : aptitude d'un appareil ou d'un système électrique ou électronique à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante, sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques gênantes pour tout ce qui se trouve dans cet environnement.



Figure 18

Aile volante intégrant partiellement une propulsion distribuée.

E-FAN, UN AVION-LABORATOIRE VOLANT !

Ce laboratoire volant ne préfigure évidemment pas une solution adaptée aux avions du futur mais permet le franchissement d'une marche importante dans la compréhension des phénomènes physiques à prendre en compte pour le développement.

L'avion a prouvé ses qualités en franchissant la Manche en mode électrique pur, cent ans après Blériot, en empruntant la même trajectoire que lui. Capable d'une endurance en vol d'une heure, E-Fan a surpris ceux qui l'on vu voler par son silence, un atout maître pour l'aviation générale et les écoles de pilotage, souvent en conflit avec les riverains des aéroports qui souffrent des nuisances sonores.



Figure 19

E-Fan, laboratoire volant destiné à la compréhension du vol en électrique pur.

Source : Wikipédia, licence CC-BY-2.0, Bernd Sieker.

réaliser la mission qui lui a été impartie. Les systèmes automatiques vont au contraire réagir, de façon parfois très sophistiquée, à des situations préprogrammées : si telles et telles conditions sont réunies, alors je fais ceci ou cela.

Un système autonome doit connaître sa mission, connaître *a priori* son environnement et percevoir les changements qui lui sont liés, élaborer des stratégies d'action pour maximiser la probabilité de succès de la mission, décider des actions à conduire et les conduire, un peu comme le joueur d'échecs

qui réfléchit toujours avec plusieurs coups d'avance pour battre son adversaire.

La véritable autonomie repose toujours sur les mêmes piliers, grossièrement décrits ci-après :

- avant tout, quelle est la mission ? Si je suis un avion de transport de passagers, ma mission est de partir d'un point A, arriver à un point B avec tous mes passagers à bord, en complète sécurité, dans le meilleur état mécanique possible, en consommant le moins de carburant possible, etc. Cette mission est relativement simple et assez facile



Figure 20

Toutes ces machines appartiennent-elles vraiment à la même catégorie ?

- A) R2D2, célèbre droïde de la série La guerre des étoiles, un exemple de robot autonome ; B) prototype de la voiture autonome de Google ; C) drone de reconnaissance militaire Predator utilisé par de nombreux pays ; D) un robot chirurgical ; E) un robot d'exploration sur Mars.

Sources : B) Wikipédia, licence CC-BY-SA-4.0 : Michael Shick ; C) Wikipédia, licence CC-BY-SA-3.0, Nimur.

à décrire, mais certaines missions peuvent se révéler beaucoup plus compliquées, comme par exemple des missions de combat qui doivent prendre en compte la présence d'événements imprévus ;

– dans quel environnement se déroule la mission ? Il n'est pas obligatoire de le connaître *a priori* si l'on dispose suffisamment de capteurs et de puissance de calcul embarquée pour le découvrir, mais cela simplifie notablement l'établissement du référentiel dans lequel le système autonome devra évoluer. Bien entendu, la perception de l'environnement doit être continue et alimenter le système en temps quasi réel. Par exemple, de façon évidente, il doit être possible de détecter un autre avion en route de collision et de prendre les mesures d'évitement nécessaires ;

– dans la masse de données fournies par les capteurs, seul un petit nombre d'entre elles sont pertinentes pour la mission. Le système autonome doit réduire les données d'environnement sur lesquelles il travaille aux seules données utiles pour la mission et établir une représentation synthétique unique du monde environnant. L'unicité de la représentation est importante et n'a rien de trivial. En effet, chaque capteur comme un radar ou une boule opto-électronique⁵ est équipé de ses propres moyens de localisation/positionnement

et fournit des données relatives à ce référentiel, qu'il faut fusionner et transférer dans le référentiel avion.

Dans le cas de l'automobile, qui évolue dans un environnement très riche, cette réduction des données est particulièrement complexe. L'aéronautique est, quant à elle, dans une situation plus favorable, l'environnement étant moins riche et très réglementé ;

– enfin, il faut calculer des scénarios. Aujourd'hui, sur un système automatique, les choix sont simples : devant un jeu de données, un jeu de situations, le système partira par exemple à droite, et partira toujours à droite, même si d'autres variables d'environnement pousseraient plutôt un système qui aurait une vision globale à partir à gauche. Un système autonome, lui, calculera des scénarios. Le mode d'analyse est simple en théorie : « *si je pars à droite, quelle influence cela a-t-il sur ma mission ? Et si je pars à gauche ?* » En réfléchissant de cette manière à la prochaine manœuvre mais également et simultanément à celles qui vont suivre, le système cherche à optimiser la probabilité de succès de la mission qui lui a été confiée. Il exécutera alors la chaîne d'actions jugée la plus porteuse de succès.

Tout ou presque reste à inventer et de très nombreux points difficiles ne sont pas encore résolus. Ensuite, il faudra normaliser et certifier ces systèmes essentiellement non déterministes avant de pouvoir penser à une utilisation opérationnelle

5. Boule opto-électronique : ensemble de capteurs optiques sensibles en visible et en infra-rouge, souvent montés dans une « boule » orientable sur le nez ou le ventre de l'appareil.

généralisée, qui n'advendra probablement pas avant deux ou trois dizaines d'années.

Trois grandes voies d'accès à l'autonomie sont possibles :

- l'approche classique, qui consiste à tout modéliser et tout préparer à l'avance. Cette approche présente une combinatoire explosive et ne pourra jamais être complète. Pour des systèmes devant présenter un haut degré de sécurité, elle est condamnée ;
- l'approche plus expérimentale, aujourd'hui pratiquée par Tesla, par exemple, introduit dans le logiciel du véhicule un certain nombre de scénarios prédéfinis et met le véhicule en clientèle. Le logiciel recueille ensuite toutes les données pertinentes provenant des situations de conduites réelles rencontrées par l'utilisateur.

Ces données expérimentales sont ensuite analysées et conduisent à des évolutions régulières du logiciel de véhicule. Il est clair que cette méthode ne peut s'appliquer dans le monde de l'aéronautique ;

- d'autres approches sont en cours d'élaboration, essentiellement par le milieu académique dans le cadre de programmes de R&D en coopération. Certaines voies apparaissent très prometteuses, en particulier celle, complètement originale et déjà testée sur des systèmes de robotique spatiale, du « Jet Propulsion Laboratory⁶ » à Pasadena en Californie.

6. Jet Propulsion Laboratory : coentreprise entre la NASA et Caltech, chargée de la construction et de la supervision des vols non habités de la NASA.

Vers de nouveaux matériaux, de nouvelles architectures, de nouvelles fonctionnalités

Un énorme champ d'investigation est ouvert en R&D autour des thèmes matériaux et procédés pour l'aviation (**Figure 21**), notamment pour tout ce qui concerne les composites, les résines, les générateurs électriques à haut rendement, les moteurs électriques à masse réduite et rendement élevé, les réseaux de distribution électrique haute tension et les isolants nécessaires, etc. Le stockage électrique est également un domaine d'investigation très important, et pas seulement pour l'aéronautique.

De grandes évolutions sont en préparation, l'aéronautique est en train de changer d'ère ! Un métier passionnant pour un avenir plus vert !

Figure 21

De nombreux champs d'investigation sont ouverts à l'aviation aujourd'hui.

