

## **SAF et efficacité énergétique, indissociables clefs de la décarbonation aéronautique**

La décarbonation du transport aérien est impérative. Certes celui-ci représente une part relativement modeste des émissions totales de gaz à effet de serre, environ 2,5% ( avec un impact équivalent atteignant jusqu'à peut-être 4% en raison des traînées de condensation , nous y reviendrons) . Mais sa croissance très forte (en moyenne 2 fois plus rapide que celle du PIB depuis 60 ans ) ne laisse planer aucun doute : ni sur la nécessité d'en maîtriser intégralement l'empreinte carbone ....ni sur l'appétence humaine pour cet exceptionnel outil de mobilité . Et nous rappelle au passage à quel point il serait dommageable, faute de solutions techniques, de devoir envisager d'en restreindre notre liberté d'usage. Or ces solutions techniques sont à notre portée, et très concrètement déployables dans les prochaines décennies. Selon toute vraisemblance elles reposeront sur l'association de deux leviers essentiels, le remplacement du carburant fossile par une source d'énergie neutre en carbone d'une part, et un saut quantitatif d'amélioration de l'efficacité énergétique des aéronefs d'autre part, car ces énergies alternatives seront inévitablement coûteuses et d'une disponibilité non infinie.

### **Le remplacement incontournable du kérosène fossile**

L'industrie aéronautique et du transport aérien n'a pas à rougir du parcours effectué jusqu'à présent en matière de réduction de ses émissions de CO<sub>2</sub> : depuis les débuts du transport aérien de masse dans les années 60/70, celles-ci , rapportées au nombre de passagers transportés et kilomètres parcourus , ont été divisés par plus de 4 . Peu de moyens de transport ont affiché une telle performance. Ces progrès ont certes été dictés en leur temps non pas directement par les enjeux climatiques mais par la recherche de gains de consommation en carburant, de façon à réduire les coûts et augmenter les rayons d'action, au bénéfice du développement de l'usage de l'aviation civile avec le succès que l'on a vu. Mais le résultat en émissions est bel et bien là lui aussi. A ceux qui parfois doutent de nos possibilités d'aller jusqu'à la neutralité carbone en aéronautique, l'histoire de ces cinquante années d'aviation civile témoigne de la capacité de notre communauté à mener de tels progrès, et ce dans le contexte exigeant qui lui est propre : dans le même temps, la sécurité des vols a été améliorée de plusieurs ordres de grandeur. Ces progrès technologiques peuvent et doivent, nous y reviendrons, se poursuivre. Toutefois ils ne pourront pas suffire à eux seuls : les lois de la physique limitent la résistance des matériaux, la viscosité de l'air est ce qu'elle est, les rendements thermodynamiques ne dépasseront jamais 100%.

Il n'y aura pas d'autre choix donc que de substituer de nouvelles sources énergétiques au traditionnel kérosène d'origine fossile :

L'électricité (au demeurant très émettrice de CO<sub>2</sub> pour son stockage comme on l'a parfois peut-être oublié) est pour l'aéronautique exclue, à l'exception d'applications marginales sur aéronefs d'autonomie extrêmement limitée. Plus lourds que l'air sommes-nous, mais pas trop lourds quand même...la densité énergétique des batteries d'aujourd'hui est 15 fois inférieure à celle des hydrocarbures et si les progrès de la recherche changeront sans doute un jour ce paradigme, ce ne sera vraisemblablement pas le cas dans un délai compatible avec les échéances de décarbonation. Pour en donner une image, le défi équivaldrait en quelque sorte à réaliser la supra conductivité à la température ambiante.

L'hydrogène est séduisant, tant qu'à l'inverse des batteries électriques, sa densité énergétique est élevée. Il y a environ 4 fois plus d'énergie dans un kilo d'hydrogène que dans un kilo de kérosène. L'hydrogène en est d'ailleurs quasi incontournable pour la propulsion des lanceurs spatiaux. Mais il est d'une mise en œuvre délicate et complexe, pas tant au niveau des moteurs eux-mêmes que des systèmes d'alimentation et de stockage : pour des impératifs d'encombrement et de sécurité il nous faut l'employer à l'état liquide et celui-ci requiert une température excessivement basse :  $-253^{\circ}\text{C}$ , tout juste  $20^{\circ}$  au-dessus du Zéro absolu ...la moindre trace d'humidité et c'est le colmatage des filtres, l'évaporation est une préoccupation constante (on complète le plein en hydrogène d'une fusée jusqu'à quelques secondes avant son décollage ...), l'isolation thermique et la maîtrise des fuites sont des contraintes fortes. Mais surtout, si l'hydrogène apporte énormément d'énergie au kilo, il est si peu dense massiquement qu'il demande des réservoirs d'un volume considérable, plusieurs fois supérieurs à ceux d'un appareil à kérosène dans des conditions équivalentes. Techniquement possible dans un futur proche pour des avions de transport à court rayon d'action, sa généralisation - qui seule générerait la neutralité carbone aéronautique dont nous avons besoin - ne semble pas aujourd'hui à notre portée. Là encore la physique impose ses lois, on ne changera pas la densité massique de l'hydrogène, fût-il à l'état liquide. Au demeurant, l'hydrogène (à condition qu'il soit vert donc issu d'électrolyse aqueuse) peut être précieux dans des moyens de transport moins contraints que l'avion, tel le transport routier, ferroviaire ou maritime ou occuper avec succès certains créneaux aéronautiques particuliers.

La solution de substitution énergétique qui aujourd'hui s'inscrit manifestement comme la plus efficace dans le temps qui nous est imparti pour la sauvegarde de notre planète, est celle des hydrocarbures de synthèse, connus sous l'acronyme de SAF (Sustainable Aviation Fuels). Certes ils émettront toujours du  $\text{CO}_2$ , mais celui-ci se recyclera en un temps court sans engendrer de déséquilibre de l'atmosphère, contrairement au carburant fossile qui y relâche instantanément le travail thermochimique accumulé par la Terre en des centaines de millions d'années. En outre, et c'est sans doute un point important bien qu'encore insuffisamment documenté au plan scientifique, ils doivent aussi permettre de contrôler la génération des traînées de condensation à haute altitude en ajustant les teneurs en impuretés qui sont les germes des cristaux de glace formant ces traînées à l'impact mal connu mais potentiellement néfaste. Les technologies pour réaliser ces carburants existent, certaines ont même été exploitées au cours de la seconde guerre mondiale. Le point de départ peut en être la biomasse, issue de cultures agricoles terrestres ou marines ou de déchets organiques, mais des limitations évidentes découlent des priorités en matière de ressources alimentaires et hydriques et feront que très vraisemblablement ce type de production sera loin de satisfaire le besoin à lui seul. Les sources principales seront les déchets industriels carbonés, les émissions de gaz industriels, la carbonation de l'hydrogène vert, voire la captation du  $\text{CO}_2$  atmosphérique. Rien ne s'oppose sur le plan scientifique à un développement à l'échelle industrielle mondiale de ces procédés au cours des prochaines années. Mon propos n'est pas ici d'en faire une revue détaillée, mais simplement d'en tirer une remarque de bon sens : tout cela demande des investissements conséquents et une politique publique volontariste et de long terme, et les SAF seront inévitablement, même produits à grande échelle, plus coûteux que le kérosène fossile et très consommateurs d'électricité - qui en l'occurrence sera notre énergie « primaire » le SAF n'étant en quelque sorte qu'un intermédiaire de stockage : on estime que pour couvrir les besoins de l'ensemble des compagnies aériennes par du SAF il faudra disposer d'une quantité d'électricité équivalente à celle produite par plusieurs centaines de centrales nucléaires (ou plusieurs milliers de parcs éoliens) Pas hors de portée, après tout la France a bien su construire une soixantaine de centrales en deux décennies, mais un investissement très considérable tout de même. La conclusion s'impose d'elle-même, les SAF peuvent effectivement nous

apporter la neutralité carbone aéronautique nécessaire, mais ce, si et seulement si nous parvenons en même temps à drastiquement réduire la consommation de carburant par de nouveaux gains majeurs sur l'efficacité énergétique de nos avions.

## **L'indispensable révolution de l'efficacité énergétique dans les prochaines décennies**

Dans l'histoire de l'aviation les gains de performance sont venus à la fois d'améliorations incrémentales assez fréquentes car relativement aisées à développer, certifier et produire, et d'innovations en rupture, beaucoup plus rares, tel le passage des moteurs à pistons aux turbomachines. Pour rendre industriellement et économiquement viable la généralisation des SAF, clef de la neutralité carbone, on estime généralement qu'il nous faut engranger un saut d'efficacité énergétique d'au moins 30 à 35% voire à terme, de 50%. Ces objectifs semblent atteignables, les technologies sous-jacentes sont identifiées ou même présentent déjà des niveaux de maturité significatifs. Mais ils sont d'une ambition sans précédent, à comparer aux 10 à 15% d'amélioration habituellement réalisée d'une génération d'avion à la suivante. Nous les atteindrons donc vraisemblablement cette fois par une combinaison d'améliorations incrémentales et d'innovations en rupture.

Décrire dès aujourd'hui en détail ce que seront ces avions capables de la neutralité carbone relève de la science-fiction et ne souffrirait pas d'être relu dans dix ans d'ici ... Simplement parmi les améliorations plutôt incrémentales, susceptibles d'apporter chacune plusieurs %, peut-on citer l'optimisation des trajectographies, la poursuite de l'électrification des sous-systèmes, les progrès des matériaux, l'hybridation partielle- qui procurerait les indispensables marges de puissance occasionnelles de façon plus efficace que lorsqu'elles sont comme aujourd'hui incluses dans le cœur propulsif de base, ainsi que de la récupération d'énergie - mais moins qu'une automobile dans les embouteillages toutefois !. On peut penser aussi à des optimisations systémiques telles que les gains aérodynamiques substantiels qui peuvent être tirés de la réduction du volume des réservoirs nécessaires, qui autorise des voilures à épaisseur relative plus faible, sous réserve de disposer de matériaux appropriés. La liste est longue, et ces « petites rivières » formeront un grand fleuve.

A la frontière entre l'incrémental et la rupture technologique, avec un enjeu cette fois de l'ordre 20% à lui seul, verra le jour une toute nouvelle génération de turboréacteurs au taux de dilution considérablement augmenté. Le rendement thermodynamique de nos turbomachines actuelles est d'ores et déjà très élevé (plus de 2 fois supérieur à celui d'un moteur automobile, pénalisé par ses frictions internes et sa combustion discontinue) et offre seulement la perspective d'améliorations marginales. Inversement, le rendement dit de propulsion, celui de la transmission de l'énergie du moteur à l'avion est encore relativement modeste : on s'appuie sur l'air, pas sur une route ou un rail ! En termes plus techniques, ce rendement, qui est le rapport entre la quantité de mouvement et l'énergie cinétique fournies à l'air traversant la machine, ne saurait s'approcher des 100% que si la vitesse d'éjection de l'air tend vers la vitesse de l'avion lui-même ..... mais alors la force propulsive, qui varie comme la différence entre ces deux vitesses, serait excessivement faible ....sauf si en même temps le flux d'air accéléré atteint des niveaux extrêmement forts. D'où l'accroissement continuellement observé des flux secondaires et diamètres des turboréacteurs, qui ont fait une bonne part des progrès du passé.... et va d'une certaine façon continuer de le faire. D'une certaine façon seulement, car l'architecture des turboréacteurs devra cette fois être très profondément modifiée : la soufflante, à calage devenant probablement variable, sera trop grande pour être carénée sans une pénalité en masse et traînée par trop conséquente, la sécurité

vis à vis d'une perte d'aube devra être fondamentalement revue, ainsi que la maîtrise de la signature acoustique en croisière. Le retour pur et simple au turbopropulseur n'est pas l'optimum pour le domaine de vol considéré, et différentes formules sont proposées (dont le RISE de CFMI). Toutes demanderont un travail en profondeur pour leur intégration avec l'avion, qui peut aller jusqu'à de nouvelles architectures. Enjeu majeur donc, mais très logiquement aussi, évolution technologique majeure, qui nous est accessible à un horizon de l'ordre de la dizaine d'années.

S'il faut - et il le faudra sûrement - aller plus loin, des ruptures technologiques complètes seront inéluctables. Encore plus difficile de lire dans la boule de cristal à un tel horizon, mais pour rester dans l'exploitation du filon de l'optimisation du rendement de propulsion, on peut penser à une ultime augmentation du débit d'air propulsif en augmentant non plus la taille des propulseurs mais leur nombre, et ce dans des proportions considérables. Cette « propulsion distribuée » ne se fera pas, pour des raisons de coûts de maintenance et de masse évidentes, par une multiplication des turbomachines thermiques, ni par des transmissions de puissance mécaniques. Sa mise en œuvre reposera sur une architecture hybride, où le ou les générateurs thermiques seront centralisés et distribueront leur puissance à des moteurs électriques actionnant les soufflantes distribuées. Ce n'est pas une pure vue de l'esprit : certains des VTOL urbains ou périurbains en cours de développement reposent dès aujourd'hui sur une architecture analogue. Et ça marche ! l'ATEA d'Ascendance Flight Technologies (8 soufflantes électriques de sustentation et 2 de propulsion, illustration 2) apportera une réduction de 50% de consommation énergétique par rapport à un hélicoptère classique de mêmes performances, à mission identique ... Et en poursuivant le rêve - mais ce n'est pas qu'un rêve - pourquoi ne pas associer la propulsion distribuée à la formule aérodynamique de l'aile volante, aux performances incomparables ? Sous réserve bien sûr de résoudre un certain nombre de problèmes pratiques mais pas triviaux, comme l'évacuation des passagers.

*Point n'est besoin d'alourdir la démonstration. La décarbonation de l'aviation est indispensable, ET possible. Formidable défi à la fois pour le monde de l'aéronautique et celui de l'énergie, puisse ce défi attirer en grand nombre jeunes et brillants chercheurs et ingénieurs. Celles et ceux qui oseront le relever en retireront la satisfaction personnelle et collective d'avoir contribué à cette « cathédrale de demain »*

*Ces défis sont structurants -voire existentiels - pour les grands acteurs du secteur. Mais ils sont aussi l'affaire de tous : organismes de recherche, agences de certification et régulation, institutions financières, grands industriels ou même start-ups, réels leviers d'exploration et d'accélération technologique comme on l'a vu.*

*Enfin bien sûr rien de tangible ne se fera sans la volonté et le soutien résolu des puissances publiques : la décarbonation dépasse la pure logique de marché. Les enjeux sont immenses, climatiques évidemment mais aussi sociaux, économiques et souverains. Ils sont aisés à comprendre mais pas nécessairement à partager, coordonner et traduire en solutions cohérentes. Or si l'avion ne trouve pas le carburant adéquat pour son retour, si les incitations à la substitution et à l'efficacité énergétique engendrent biais de concurrence et freins économiques, nos efforts resteront vains. La gouvernance mondiale a elle aussi une pierre - la clef de voûte - à apporter, comme elle a si bien su le faire en 1944 avec la création de l'OACI.*