

Aéronautique et carburants alternatifs

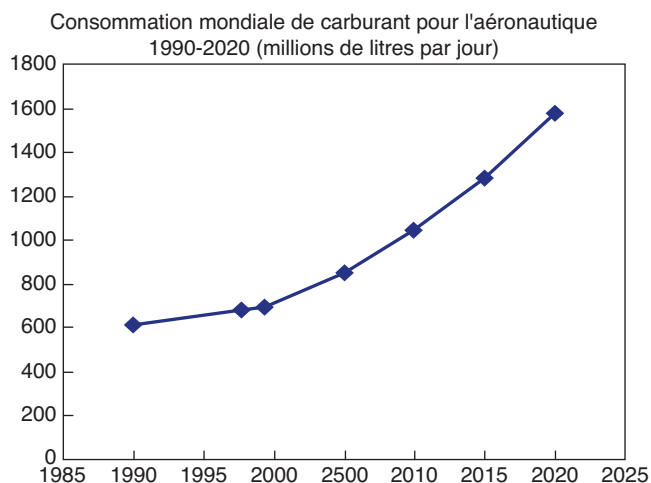
Diversification des ressources énergétiques, contrôle des consommations et réduction des émissions de gaz à effet de serre, réduction des émissions polluantes pour une amélioration de la qualité de l'air sont les axes majeurs de développement dans le domaine des transports. Tout comme le transport routier, le transport aérien s'est engagé dans une démarche volontariste de réduction de ses niveaux d'émissions de gaz à effet de serre. Parmi toutes les solutions étudiées, les carburants alternatifs occupent une place à part entière. Toutefois, les contraintes liées aux modes d'utilisation des aéronefs ne rendent pas toutes les filières alternatives possibles et une analyse précise des possibilités doit être réalisée pour identifier les solutions à privilégier.

Afin de faire face au réchauffement climatique, réduire les émissions des gaz à effet de serre est l'une des priorités. Le transport, tous modes confondus, fait partie des secteurs concernés et le transport aérien doit donc lui aussi s'inscrire dans cette démarche. Pour le moment, celui-ci a un impact modéré, puisque la consommation de pétrole pour l'aviation ne représente qu'environ 8 % de la consommation totale, mais cela devrait évoluer dans les années à venir avec un accroissement prévisible du trafic aérien qui pourrait conduire à un accroissement d'environ

60 % de la consommation mondiale de carburants pour l'aéronautique à l'horizon 2020 (figure 1).

Par ailleurs, la sauvegarde de la qualité de l'environnement local, telles que les zones urbaines situées à proximité des aéroports, nécessite également un contrôle très strict des émissions de polluants et des nuisances (NO_x, SO₂, particules de suies, COV, bruit, etc.). Aujourd'hui, le transport aérien utilise des carburants provenant exclusivement du pétrole. Ainsi, dans le contexte d'un pétrole durablement cher et d'une volonté de mieux contrôler les émissions globales de gaz à effet de serre, identifier, développer et proposer des énergies alternatives sont devenus une nécessité. Parmi ces alternatives, les hydrocarbures de synthèse et certains biocarburants peuvent s'afficher comme des choix envisageables, ces derniers offrant notamment un bilan des émissions de gaz à effet de serre favorable, pris du puits au réservoir. Le transport aérien doit donc relever le défi technologique d'une adaptation aux carburants alternatifs, poussé par une évolution prévisible de l'approvisionnement. Cependant, contrairement au transport terrestre, les utilisations de carburants de substitution restent encore très faibles, voire marginales, souvent expérimentales et dans certains cas très prospectives, donc encore loin d'applications industrielles. En effet, dans le cas de l'aéronautique, le contexte est particulièrement contraignant puisqu'il doit prendre en compte de nombreux critères liés notamment aux aspects sécurité très stricts et on ne pourra pas se satisfaire de solutions de remplacement n'offrant pas toutes les garanties.

Fig. 1 - Évolution de la consommation mondiale de carburant pour l'aéronautique jusqu'en 2020



Source : US Department of Energy

Aéronautique et carburants alternatifs

Le jet fuel et ses contraintes

Le jet fuel est un carburant spécifique tant par ses caractéristiques que par les contraintes logistiques associées. Parmi les points marquants, on peut notamment citer :

- une distribution mondiale liée aux vols intercontinentaux imposant à la fois la mise en place de critères de qualité au niveau international, mais également la prise en compte des capacités de production locales. Les normes de qualité les plus utilisées sont l'ASTM D1655 (US) et la DEFSTAN 91/91 (ministère de la Défense du Royaume-Uni). Cependant un certain nombre d'autres spécifications sont disponibles : DCSEA (France), GHOST (Russie), etc. Afin de garantir la qualité des produits distribués au niveau mondial, une norme intersyndicale a été mise en place par les acteurs du domaine, sous forme de « check-list », c'est-à-dire de certificat d'analyse. Ce document, appelé AFQRJOS (*Aviation Fuel Quality Requirement for Jointly Operated Systems*) reprend majoritairement les critères de qualité de la spécification DEFSTAN 91/91. La distribution mondiale du produit impose également une prise en compte des capacités de production locales : les spécifications de qualité des produits doivent pouvoir être atteintes dans tous les pays, même ceux dont l'outil de raffinage est moins bien adapté. Ce critère aura une importance capitale dans la définition de carburants alternatifs étant donné qu'il impose la capacité de produire ce carburant alternatif au niveau mondial avec une qualité constante,
- une durée de vie importante des avions (plus de 30 ans en moyenne) imposant une compatibilité des carburants alternatifs avec les carburants existants et aucune modification fondamentale de l'architecture du moteur ou de l'avion,
- des critères de sécurité globale et de fiabilité des moteurs fondamentaux : pour assurer la sécurité des vols et réduire les risques d'incidents, chaque élément de l'avion doit subir une série de tests avant certification. Il en est de même pour le carburant qui doit, par une procédure de certification complexe, démontrer sa totale compatibilité avec l'ensemble des organes moteur et des matériaux en contact avec le carburant (de la logistique-distribution à la combustion),
- un mode d'utilisation extrêmement contraignant : l'emploi des avions entraîne une grande variabilité des conditions d'utilisation du carburant : variabilité thermique (entre près de -60°C en très haute altitude et près de $+50^{\circ}\text{C}$ lors du stationnement sur le tarmac), variabilité de pression (pression atmosphé-

rique au sol, pression de l'ordre de 0,3 bar en haute altitude) et exige une parfaite maîtrise du contenu énergétique.

Ainsi, les jets fuels doivent satisfaire de nombreux critères de qualité parmi lesquels on citera plus particulièrement (tableau 1) :

- le point éclair : le point éclair représente la température au-dessus de laquelle le carburant est susceptible de s'enflammer en présence d'une flamme. Il représente donc un aspect fondamental de la sécurité aéronautique puisqu'il assure l'impossibilité des vapeurs du carburant à s'enflammer en présence, par exemple, de charges électrostatiques dans les réservoirs. Ce point éclair doit être supérieur à 38°C pour le jet A1¹,
- la tenue au froid : la pompabilité du carburant doit être assurée même aux températures extrêmes rencontrées en haute altitude. La tenue au froid des carburants est donc suivie de façon stricte. Elle est tracée par le point de disparition des cristaux (maximum -47°C pour le jet A1¹) et par la viscosité à -20°C (maximum $8\text{ mm}^2/\text{s}$),
- la stabilité thermique : le poids des avions est un aspect fondamental pour la consommation de carburant. Afin d'éviter tout surpoids lié à l'embarquement de fluides supplémentaires, le carburant est utilisé comme fluide caloporteur et fluide réfrigérant dans la plupart des cas. Ce carburant subit donc des cycles de chauffage/refroidissement particulièrement sévères vis-à-vis de sa stabilité thermique et à l'oxydation. Une oxydation de ce carburant pourrait en effet entraîner la formation de dépôts et de vernis pouvant conduire à une défaillance moteur. Ce paramètre est spécifié selon la méthode JFTOT (*Jet Fuel Thermal Oxidation Test*) consistant à faire circuler le carburant dans un tube calibré à une température donnée (260°C ¹) puis à coter ce tube visuellement (couleur) et en fonction de la perte de charge engendrée par les éventuels dépôts (inférieure à 25 mmHg),
- le pouvoir calorifique : le pouvoir calorifique inférieur (PCI) représente la quantité d'énergie dégagée par unité de masse du carburéacteur lors de la combustion. Cette grandeur revêt une importance primordiale pour le jet fuel car elle impacte directement le rayon d'action de l'avion. Ce pouvoir calorifique doit être supérieur à $42,8\text{ MJ/kg}$,

[1] Valeur selon la norme DEFSTAN 91/91 issue 6.

Aéronautique et carburants alternatifs

- l'additivation : une des spécificités du carburéacteur concerne enfin l'utilisation d'additifs, utilisation particulièrement encadrée. Les additifs utilisés doivent avoir subi une série de tests d'homologation afin d'en garantir l'efficacité visée et l'innocuité vis-à-vis des organes de l'aéronef. Le type d'additif à utiliser, la référence des additifs homologués ainsi que le taux d'incorporation sont clairement indiqués dans les spécifications.

Tableau 1
Spécifications les plus courantes du jet A1
(valeur selon la norme DEFSTAN 91/91)

	Jet A1
Point éclair	38 °C min
Point de cristallisation	- 47 °C max
Viscosité à - 20 °C	8 mm ² /s max
Pouvoir calorifique inférieur	42,8 MJ/kg min

À ces contraintes doivent être ajoutées celles liées aux aspects environnementaux tels que les émissions de gaz à effet de serre ou les émissions de polluants (NO_x, particules, etc.) et les contraintes économiques (coûts des carburants alternatifs, concurrence avec le transport terrestre, etc.).

Les différentes voies de formulation de carburants alternatifs envisagées

De nombreuses études ont été menées ou sont encore en cours sur l'identification et la caractérisation de carburants alternatifs. Ces études ont pour l'instant principalement concerné le transport terrestre. Les principales filières alternatives identifiées se répartissent comme suit :

- les hydrocarbures de synthèse de type GtL² ou CtL³. Ils sont obtenus par synthèse Fischer-Tropsch,
- les biocarburants de première génération : éthanol provenant des plantes sucrières ou amylacées, biodiesel issu de la transestérification des huiles végétales (ce sont les esters d'acides gras). Ces produits sont issus de procédés matures,
- les biocarburants issus d'un hydrotraitement poussé des huiles végétales ou animales (HVO pour *Hydrotreated Vegetable Oil*), huiles végétales pouvant provenir de sources très diverses. Ces produits sont constitués majoritairement d'hydrocarbures dont les

propriétés seront voisines de celles des GtL. Des procédés sont aujourd'hui disponibles et en passe de l'être mais une large réflexion est en cours sur les ressources envisageables pour alimenter cette filière. Par exemple, les algues lipidiques représentent une source nouvelle possible d'acides gras qui pourront soit être transformés en biodiesel soit être hydrotraités,

- les biocarburants de seconde génération qui sont obtenus à partir de bois ou de déchets végétaux selon deux procédés : un procédé par voie biochimique qui conduit à de l'éthanol, un procédé par voie thermo-chimique qui conduit à des hydrocarbures comparables aux GtL et CtL et couramment appelés BtL : *Biomass to Liquids*,
- les molécules en provenance de la chimie de la biomasse. Parmi celles-ci, on peut citer les dérivés des acides succinique et lévulinique ou les molécules de type furanes, etc.,
- le gaz naturel et l'hydrogène.

Cependant, l'utilisation directe dans les jet fuels des carburants alternatifs initialement développés pour le transport terrestre pose un certain nombre de difficultés :

- les biodiesels ont un potentiel intéressant en termes de disponibilité mais ne répondent pas aux critères des spécifications du carburéacteur sur plusieurs points : contenu énergétique, masse volumique et tenue au froid notamment (tableau 2). De plus, la présence d'insaturations sur les molécules constitutives de ces biodiesels pose problème en termes de stabilité à l'oxydation. Une optimisation du produit pourrait cependant être envisagée notamment par un choix judicieux des matières premières (type d'huile) afin de trouver un optimum en termes de longueur de chaîne/nombre d'insaturations. La pureté du produit doit de plus être garantie afin d'éviter tout risque de contamination pouvant fortement dégrader le point éclair du produit,

Tableau 2

Quelques caractéristiques du jet A1 comparées à celles des EMHV⁴

	Jet A1	Ester méthylique de colza	Ester méthylique de soja
Masse volumique (kg/l)	0,775-0,840	0,885	0,883
Distillation (°C)	200-300	320-350	300-350
Pouvoir calorifique (MJ/kg)	42,8 min	37,3	37

(2) GtL : Gas to liquids, hydrocarbures obtenus par synthèse Fischer-Tropsch à partir du gaz naturel.
(3) CtL : Coal to liquids, hydrocarbures obtenus par synthèse Fischer-Tropsch à partir du charbon.

(4) D. Ballerini, "Les biocarburants - État des lieux, perspectives et enjeux du développement", Éditions Technip, 2006.

Aéronautique et carburants alternatifs

- les molécules du type XtL⁵ ou HVO ont un potentiel important en termes de contenu énergétique (tableau 3). Des travaux restent cependant à mener en ce qui concerne la masse volumique du produit ainsi que sa tenue au froid *via* une recherche d'un optimum longueur de chaîne/taux de ramification. Le choix de la matière première est également fondamental pour garantir un bilan environnemental positif (émissions globales de gaz à effet de serre sur le cycle de vie),

Tableau 3

Comparaison de la masse volumique et du PCI pour jet A1 et XtL

	Jet A1	XtL
Masse volumique (kg/l)	0,775-0,840	0,775-0,785
Pouvoir calorifique (MJ/kg)	42,8 min	≈ 44

- l'éthanol, s'il possède l'avantage de pouvoir être produit en grande quantité au niveau mondial par des procédés de première ou de seconde génération, n'est pas adapté pour une utilisation dans les avions moyen et long courriers, en raison notamment de son point éclair et de son contenu énergétique (tableau 4). Des voies de recherche sont cependant envisagées pour étudier le potentiel d'alcools à plus longue chaîne pouvant être ramifiés afin d'optimiser le compromis tenue au froid/point éclair/contenu énergétique.

Tableau 4

Comparaison du point éclair et du PCI pour le jet A1 et l'éthanol

	Jet A1	Éthanol
Point éclair (°C)	38 min	9
Pouvoir calorifique (MJ/kg)	42,8 min	26,8

Ainsi, à moyen terme, les filières biocarburants les plus probables pour fournir des bases de formulation pour les carburants aéronautiques sont les BtL et les produits issus de l'hydrotraitement poussé des huiles végétales (tableau 5). Ces filières conduisent à des hydrocarbures paraffiniques exempts de composés aromatiques et de soufre qui, après une opération d'hydroisomérisation, pourront être utilisés en mélange dans des jets fuels conventionnels ou bien purs, moyennant des optimisations des formulations, notamment vis-à-vis de certains critères clés, tels que le pouvoir lubrifiant, la tenue au froid ou la compatibilité avec les matériaux.

(5) Le terme XtL représente l'ensemble des carburants de synthèse produits par procédé Fischer-Tropsch (CTL (Coal to Liquid), GTL (Gas to Liquid), BtL (Biomass to Liquid), etc.).

Tableau 5

Potentiel des carburants alternatifs pour une application aéronautique (Case verte : propriété similaire au jet A1 / Case orange : reste à optimiser / Case rouge : hors spécification par rapport au jet A1)

	Biodiesel	XtL ou HVO	Éthanol
Stabilité à l'oxydation	Red	Green	Green
Tenue au froid	Red	Orange	Green
Pouvoir calorifique	Red	Green	Red
Point éclair	Green	Green	Red
Masse volumique	Red	Orange	Green

Dans un avenir à plus long terme, les carburants tels que le gaz naturel ou l'hydrogène sont des candidats, mais il s'agit de filières qui demandent de repenser entièrement la conception des avions, ainsi que tous les circuits d'approvisionnement et de distribution, la logistique et la sécurité. Un important travail en recherche et développement est donc ici nécessaire. Par exemple, le Cryoplane utilisant de l'hydrogène liquide — étude coordonnée par EADS-Airbus Industrie et financée par la Commission européenne — demandera vraisemblablement plus de 20 ans de recherche et développement avant de parvenir à maturité technologique.

Des solutions telles que les alcools lourds ou certains carburants en provenance de la chimie de la biomasse pourraient également être envisagées, mais dans une optique long terme ou pour des applications spécifiques.

Les travaux de recherche et de démonstration en cours ou prévus

De nombreux programmes de recherche et parfois de démonstration ont vu le jour au niveau mondial sur le thème des carburants alternatifs pour l'aéronautique. Aux niveaux français et européen, plusieurs programmes ont été lancés, tels que Calin (Carburants alternatifs et systèmes d'injection innovants — programme français réunissant des industriels (Airbus, Snecma) et des laboratoires de recherche (IFP, Onera, Cerfacs, LCSR-CNRS, Insa-LBB, LMGM, MMP) dans le but d'étudier les carburants alternatifs permettant un fonctionnement optimal de nouveaux systèmes d'injection de type bas-NOx), Alfa-Bird (programme européen - FP7) dont le but est d'étudier l'impact de nouveaux carburants sur le fonctionnement des turbines aéronautiques (propriétés des produits, compatibilité des matériaux, combustion, etc.). Là aussi, un grand nombre d'acteurs sont associés au projet, industriels (Airbus, Snecma, Shell, Rolls-Royce, etc.) ou laboratoires de

Aéronautique et carburants alternatifs

recherche (IFP, Onera, DLR, CNRS, etc.), ou encore le programme Dream (programme européen - FP7) visant à développer une nouvelle turbine innovante. Dans le cadre de ce dernier exemple, une démonstration de fonctionnement à l'aide d'un carburant alternatif est envisagée).

Au niveau mondial, de nombreuses initiatives sont également en cours, telles que le groupe de travail lata sur les carburants alternatifs créé en 2006, l'initiative Caafi (*Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative*) lancée en 2005 aux USA ou bien encore l'initiative française FCA (Futurs carburants aéronautiques), pilotée par la DGAC. Par ailleurs, des démonstrations au sol ou

en vol ont été menées par Snecma (30 % d'ester d'huiles végétales, essai sur un moteur CFM58), par Airbus (vol d'un Airbus A380 dont l'un des réacteurs était alimenté par un carburant contenant 40 % de GTL), ou très récemment par Air New Zealand ou Continental Airlines. On peut également citer la certification d'un mélange semi-synthétique constitué de 50 % jet A1 et de 50 % CTL, puis d'un carburant 100 % synthétique en avril 2008 par la société sud-africaine Sasol.

*Laurie Starck, Nicolas Jeuland & Xavier Montagne
laurie.starck@ifp.fr - nicolas.jeuland@ifp.fr &
xavier.montagne@ifp.fr
Manuscrit remis en janvier 2009*