

## Aéronautique et carburants alternatifs

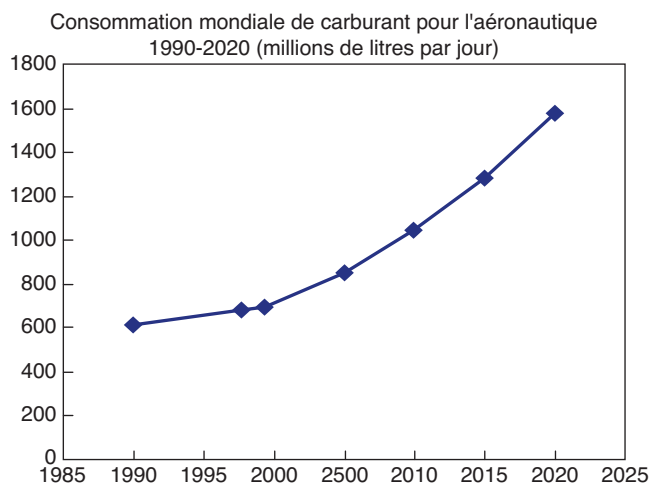
Diversification des ressources énergétiques, contrôle des consommations et réduction des émissions de gaz à effet de serre, réduction des émissions polluantes pour une amélioration de la qualité de l'air sont les axes majeurs de développement dans le domaine des transports. Tout comme le transport routier, 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<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, 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  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  en très haute altitude et près de  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$  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  $38\text{ }^{\circ}\text{C}$  pour le jet A1<sup>1</sup>,
- 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  $-47\text{ }^{\circ}\text{C}$  pour le jet A1<sup>1</sup>) et par la viscosité à  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (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 ( $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>1</sup>) puis à coter ce tube visuellement (couleur) et en fonction de la perte de charge engendrée par les éventuels dépôts (inférieure à  $25\text{ mmHg}$ <sup>1</sup>),
- 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  $42,8\text{ MJ/kg}$ <sup>1</sup>,

[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 <sup>2</sup> /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<sub>x</sub>, 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 GtL<sup>2</sup> ou CtL<sup>3</sup>. 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 EMHV<sup>4</sup>

	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 XtL<sup>5</sup> 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 synthèses 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.

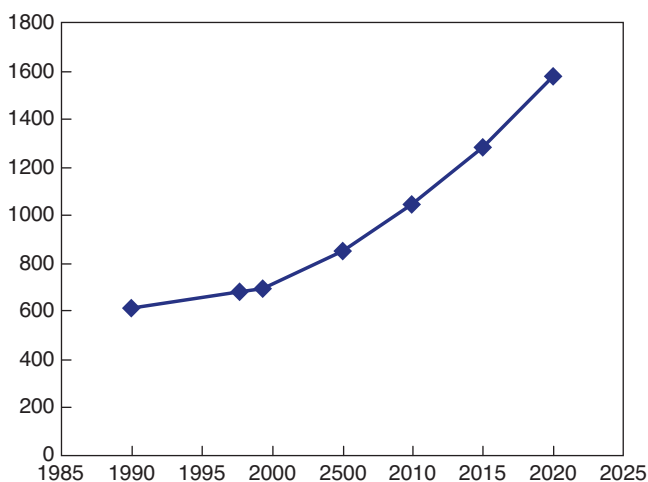
*Laurie Starck, Nicolas Jeuland & Xavier Montagne  
laurie.starck@ifp.fr - nicolas.jeuland@ifp.fr &  
xavier.montagne@ifp.fr  
Manuscrit remis en janvier 2009*

## Aviation and alternative fuels

Several key priorities have been targeted for development in the aviation industry: diversifying energy resources, keeping consumption levels under control and reducing polluting emissions to improve air quality. Like the road transport sector, the air transport sector is mounting a determined effort to reduce the level of its greenhouse gas emissions. Among the various solutions under consideration, alternative fuels are attracting particular attention. However, not all alternative solutions can be exploited, because of the constraints specific to the use of aircraft. A precise assessment should be made of all possible solutions to determine which ones should take preference.

The reduction of greenhouse gas (GHG) emissions is a top objective in the fight against global warming. A major source of emissions, the transport sector and all of its segments, including aviation, must work towards this goal. For the time being, the impact of air transport is not very large: the oil used to produce jet fuel only represents 8% of total consumption. But this is expected to change in future, because air traffic is expected to grow. It has been forecast that world jet fuel consumption will increase by about 60% by 2020 (Figure 1).

Fig. 1 - World jet fuel consumption between now and 2020 (Million liters per day)



Source: US Department of Energy

Moreover, polluting emissions and nuisance levels (e.g. NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, soot particles, VOCs and noise) must be very

strictly regulated to help preserve the quality of the local environment, including that of urban communities near airports. Today, the only fuels used by the aviation industry are oil-based. Since the oil price is likely to stay high over time and more effective regulation of total GHG emissions has become a global priority, it is imperative to identify, develop and offer alternative energies. Synthetic hydrocarbons and certain biofuels are looking like possible choices. In particular, the latter present a favorable “well to tank” GHG emissions balance. It is predictable that oil demand will eventually outstrip supply, which means that the aviation industry must tackle the technical challenge of adapting to alternative energies. Unlike the road transport sector, aviation still only uses replacement fuels to a very limited—not to say marginal—extent. These fuels are often used experimentally, sometimes in connection with applications for a distant future; in other words, they are still far from industrial application. The aviation sector is subject to major constraints: it must comply with a large number of very stringent safety criteria and may not consider any replacement solution to be satisfactory unless it is fully compliant.

### Jet fuel: criteria and constraints

Jet fuel possesses specific characteristics and is subject to specific logistical constraints, among them:

- jet fuel is distributed worldwide to ensure intercontinental air traffic. This means enforcing international quality criteria and taking local production capacity into account. The most widely used quality standards

## Aviation and alternative fuels

are the ASTM D1655 (US) and DEFSTAN 91/91 (UK Ministry of Defence). A number of other specifications also exist, such as DCSEA (France) and GHOST (Russia). To ensure the quality of products distributed worldwide, a number of fuel suppliers developed international specifications in the form of a document entitled "Aviation Fuel Quality Requirements for Jointly Operated Systems" (AFQRJOS), also known as the Check List. It enumerates the most stringent requirements of the DEFSTAN specifications.

Since jet fuel is distributed globally, local production capacity is also a factor. Product quality requirements must be met in all countries, even in those where refinery installations are not best suited for the production of jet fuel. This criterion will be vital in the selection alternative fuels, because it must be possible to produce fuels of constant quality worldwide,

- aircraft have a long life expectancy (more than 30 years, on average). Alternative fuels must be compatible with existing fuels and not require any fundamental change to engine or aircraft architecture,
- criteria relative to the overall safety and reliability of key engines. To ensure flight safety and reduce the risk of incidents, each element of the aircraft should be subjected to a series of tests before being certified. This is also true of the jet fuel which must, by undergoing a complex certification procedure, show full compatibility with all engine parts and any materials that come into contact with the fuel (from supply and distribution to combustion),
- conditions of use vary widely, placing great constraints on the use of jet fuel. Temperatures range from about  $-60^{\circ}\text{C}$  (at very high altitude) to nearly  $+50^{\circ}\text{C}$  (when the aircraft is parked on the taxiway). The pressure level varies, too, from atmospheric pressure on the ground to about 0.3 bar at high altitude. Also, the low heating value must be managed with very great accuracy.

Jet fuels must meet a number of quality criteria, including the following (Table 1):

- flash point: This is the temperature above which the fuel is likely to ignite in the presence of a flame. It is a critical factor in aviation safety. Knowing the flash point, one can ensure that fuel vapors cannot ignite, for instance, in the presence of a charge of static electricity inside fuel tanks. For Jet A-1, the flash point should be greater than  $38^{\circ}\text{C}$ <sup>1</sup>,
- cold resistance properties: Fuel pumpability should be preserved even at the extreme temperatures encountered at high altitude. A fuel's resistance to

cold is strictly monitored. It is characterized by its freezing point (maximum for Jet A-1:  $-47^{\circ}\text{C}$ <sup>1</sup>)—and by its viscosity at  $-20^{\circ}\text{C}$  (maximum:  $8\text{ mm}^2/\text{s}$ <sup>1</sup>),

- thermal stability: Aircraft weight is key to fuel consumption. To avoid taking on extra weight in the form of additional fluids, aviation fuel usually serves as a heat transfer fluid and a coolant. Fuel is subject to particularly severe heating and cooling cycles with respect to thermal stability and oxidation. Fuel oxidation could cause deposits and varnish to form, which in turn could cause engine failure. The specification test method used to measure this parameter is known as the Jet Fuel Thermal Oxidation Tester (JFTOT). The jet fuel is sent through a tube at a given temperature  $260^{\circ}\text{C}$ <sup>1</sup> and the tube is assessed visually (color) and as a function of the head loss caused by deposits, if any (lower than  $25\text{ mmHg}$ <sup>1</sup>),
- low heating value: This represents the amount of energy liberated per unit mass of jet fuel at combustion. It is a critical parameter with a direct impact on aircraft range. It should be higher than  $42.8\text{ MJ/kg}$ <sup>1</sup>,
- additives: The use of jet fuel additives is strictly regulated. They must first undergo tests to certify that they offer the desired efficiency and do not have any negative impact on the safety, durability or performance of the aero-engine or any aircraft components. The specifications clearly indicate the type of additive to use, the references of certified additives and the percentage concentration.

Tableau 1

The most common requirements for Jet A-1 as per DEFSTAN 91/91

	Jet A1
Flash point	$38^{\circ}\text{C}$ min
Crystallization (freeze) point	$-47^{\circ}\text{C}$ max
Viscosity at $-20^{\circ}\text{C}$	$8\text{ mm}^2/\text{s}$ max
Low calorific value	$42.8\text{ MJ/kg}$ min

There are other constraints as well. Some are environmental, relative to GHG emissions and polluting emissions such as  $\text{NO}_x$  or particulates, and others are economic in nature (e.g. the cost of alternative fuels and the competition with land-based modes of transport).

### Methods of formulating alternative fuels

The object of many studies, already carried out or still underway, is to ascertain which alternative fuels have potential and characterize them. Until now, most

(1) As per the DEFSTAN 91/91 specification, Issue 6.

## Aviation and alternative fuels

research has borne on land-based modes of transport. The following alternative fuels have been identified:

- synthetic hydrocarbons of the GtL<sup>2</sup> or CtL<sup>3</sup> type obtained using the Fischer-Tropsch process,
- first-generation biofuels, including ethanol derived from sugar- or starch-producing plants and biodiesel derived from the transesterification of vegetable oils (fatty acid esters). The production processes for these products have reached maturity,
- biofuels yielded by the intensive hydrotreatment of vegetable oils, which can come from very different sources, or animal oils. These fuels are primarily composed of hydrocarbons whose properties close to those of GtL. Processes already exist or have reached an advanced stage of development, but researchers are also exploring various other resources that could be used to supply this pathway. Algae, which produce lipids, may be a possible new source of fatty acids suitable for conversion into biodiesel or hydrotreatment,
- second-generation biofuels produced from wood or vegetable waste, via two processes. One is a biochemical process that yields ethanol. The other is a thermochemical conversion process known as BtL ("biomass to liquids") used to obtain hydrocarbons comparable to GtL and CtL,
- molecules originating in biomass chemistry, including derivatives of succinic acid and levulinic acid as well as furan molecules,
- natural gas and hydrogen.

However, alternative fuels were originally developed for land-based transport and incorporating them directly into aviation fuels raises a number of problems:

- biodiesels show interesting potential as far as availability is concerned, but fail to meet several jet fuel specification requirements, especially regarding energy content, density and cold resistance (Table 2). Oxidative stability is also a problem, owing to the degree of unsaturation within the molecules in biodiesel. The product could be optimized by carefully selecting (oil-type) feedstocks with the most favorable characteristics in terms of chain length and degree of unsaturation. In addition, product purity must be guaranteed to avoid any risk of contamination, which could adversely affect the flash point of the product,
- both XtL<sup>5</sup> and hydrotreated vegetable oil (HVO) molecules offer high potential as far as energy content is concerned (Table 3), but research still needs to be

done on density and cold resistance properties to optimize the chain length and branching rate. The choice of feedstock is also key to obtaining a favorable environmental balance (total GHG emissions over the entire life cycle of the product).

Tableau 2

Density, distillation and low calorific value: Jet A-1 versus VOMEs<sup>4</sup>

	Jet A-1	Rapeseed oil methyl ester	Soybean oil methyl ester
Density (kg/l)	0.775-0.840	0.885	0.883
Distillation (°C)	200-300	320-350	300-350
Low calorific value (MJ/kg)	42.8 min	37.3	37

Tableau 3

Density and low calorific value: Jet A-1 versus XtL

	Jet A-1	XtL
Density (kg/l)	0.775-0.840	0.775-0.785
Low calorific value (MJ/kg)	42.8 min	≈ 44

- the advantage of ethanol is that it can be produced in large quantities on a global scale by means of first- or second-generation processes. But its flash point and energy content make it unsuitable for use in aircraft ensuring medium- or long-distance flights (Table 4). However, avenues of research are opening up to explore the potential of longer-chain alcohols that can feature branching to optimize the trade-off between cold-flow properties, flash point and energy content.

Tableau 4

Flash point and low calorific value: Jet A-1 versus ethanol

	Jet A1	Ethanol
Flash point (°C)	38 min	9
Low calorific value (MJ/kg)	42.8 min	26.8

In the medium term, the biofuel pathways most likely to supply base oils for the formulation of jet fuels are BtLs and products obtained through the intensive hydrotreatment of vegetable oils (Table 5). These pathways yield paraffinic hydrocarbons containing no aromatics or sulfur

[2] GtL: Gas to liquids, hydrocarbons obtained from natural gas through Fischer-Tropsch synthesis.

[3] CtL: Coal to liquids, hydrocarbons obtained from coal through Fischer-Tropsch synthesis.

[4] D. Ballerini, *Les biocarburants - État des lieux, perspectives et enjeux du développement*, Éditions Technip, 2006.

[5] The term XtL designates all synfuels obtained using the Fischer-Tropsch process, including CtL (coal to liquid), GtL (gas to liquid) and BtL (biomass to liquid).



## Aviation and alternative fuels

which, after a hydroisomerization step, could be blended with conventional jet fuels or used pure, provided that their formulas are optimized with respect to key criteria such as lubricity, cold resistance and compatibility with materials.

Energies like natural gas and hydrogen will be candidates for use in a more distant future. This will entail a complete overhaul of basic aircraft design as well as the procurement, distribution, logistics and safety of jet fuels. A great deal of research will be called for. One project, the Cryoplane Project, has been undertaken to assess the technical feasibility, safety, environmental compatibility and economic viability of using liquid hydrogen as an aviation fuel. Coordinated by EADS Airbus and funded by the European Commission, it will probably take more than 20 years of research and development to bring the technology to maturity. Other solutions (e.g. heavy alcohols or fuels obtained by biomass chemistry) may also have long-term or specific applications.

Tableau 5

Alternative fuels and their potential for aviation applications.  
Green: Similar to Jet A-1. Orange: Needs to be optimized.  
Red: Does not comply with the parameters specified for Jet A-1)

	Biodiesel	XtL or HVO	Ethanol
Oxidative stability	Red	Green	Green
Cold resistance	Red	Orange	Green
Low calorific value	Red	Green	Red
Flash point	Green	Green	Red
Density	Red	Orange	Green

### Research and demonstration projects underway or planned

A number of research programs, along with a few demonstration projects, have been launched in different

countries to study alternative aviation fuels. In France, industrial partners like Airbus and Snecma have teamed up with research laboratories (IFP, Onera, Cerfacs, LCSR-CNRS, Insa-LBB, LMGM and MMP) on the Calin Project, seeking to find ways to optimize operation of new low-NOx injection systems. At European level, the Alfa-Bird program, set up under the Seventh Framework Programme for research and technological development (FP7), will study the impact of new fuels on how aircraft turbines operate, including fuel properties, compatibility with materials, and combustion). Again, industrial firms (e.g. Airbus, Snecma, Shell and Rolls-Royce) have joined forces with research laboratories (e.g. IFP, Onera, DLR and CNRS). Another FP7 project, Dream, aims to design, integrate and validate new engine concepts based on open rotor contra-rotating architectures. Dream also calls for the demonstration of selected alternative fuels in aero-engines.

All over the world, initiatives are underway. In 2005, the Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative started in the United States. In 2006, the IATA set up a task force on alternative fuels (AATF). At home, the French Civil Aviation Authority (DGAC) is overseeing the *Futurs Carburants Aéronautiques* initiative. A number of ground and flight demonstrations have taken place: Snecma tested a 30% VOME fuel in a CFM58 engine; Airbus ran a test flight in which one engine of an Airbus A380 ran on a 40% GtL fuel; and Air New Zealand and Continental Airlines recently carried out further demonstrations. In addition, the South African company Sasol obtained certification for a semi-synthetic jet fuel containing 50% Jet A-1 and 50% CtL then, in April 2008, for a fully synthetic jet fuel.

Laurie Starck, Nicolas Jeuland & Xavier Montagne  
laurie.starck@ifp.fr - nicolas.jeuland@ifp.fr &  
xavier.montagne@ifp.fr

Final draft submitted in January 2008