

Académie
des technologies

Académie
de l'air et de l'espace

Quel avenir pour les biocarburants aéronautiques ?

Rapport commun de l'Académie des technologies
et de l'Académie de l'air et de l'espace

26 juin 2014

Imprimé en France
ISBN : 978-2-7598-1795-5

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2015

PRÉFACE

C'est avec grand plaisir que nous ouvrons ce rapport sur l'avenir des biocarburants aéronautiques. Rédigé à l'issue d'un travail exemplaire réunissant au sein d'un même groupe des membres de nos deux Académies et des experts reconnus tant du domaine aéronautique que du domaine du kérosène et des biocarburants, industriels et chercheurs, ce rapport fait le point sur l'évolution du domaine sur les plans technologique, réglementaire et économique. Il présente également une « road-map » de ce que pourraient être les évolutions futures et souligne les différences d'appréciation entre les pays d'Amérique et l'Europe sur les prévisions de démarrage de la production et de l'utilisation industrielles du biojet-fuel.

Ayant bénéficié de l'apport des meilleurs experts du domaine, il représente la première étude française complète sur le sujet. Ce rapport démontre ainsi les grandes possibilités offertes par le travail commun entre des Académies à l'évidence complémentaires.

Nous nous en réjouissons !

Alain Bugat,
Président de l'Académie
des technologies

Philippe Couillard,
Président de l'Académie
de l'air et de l'espace

RÉSUMÉ

L'aviation commerciale utilise aujourd'hui exclusivement un carburant liquide, le jet fuel, qui est extrait à hauteur d'environ 6 % du pétrole (coupe kérosène). La croissance continue du trafic aérien, conduisant à prévoir son doublement entre 2030 et 2050, jointe à des objectifs ambitieux de réduction des émissions de gaz à effet de serre, a conduit le secteur aéronautique à s'intéresser aux biocarburants aéronautiques ou biojet fuels. Les États-Unis et l'Europe sont moteurs dans le domaine général des biocarburants, mais à ce jour aucun accord international n'a encore émergé et aucun mandat d'incorporation n'existe ; le soutien du secteur Défense aux États-Unis reste important, principalement pour des soucis de sécurité d'approvisionnement en carburant ; il est absent en Europe.

De nombreuses filières de biojet fuel ont été identifiées et sont en cours de développement et de certification. Les procédés de transformation de la biomasse font appel à des réactions thermochimiques ou biochimiques. Diverses ressources peuvent être exploitées : d'une part, les sucres, amidons et lipides et, d'autre part, la matière lignocellulosique terrestre. Les biojet fuels actuellement disponibles ne sont pas encore totalement fongibles dans le jet fuel commercial (concept *Drop-in*), aussi une étape intermédiaire de mélange 50/50 a-t-elle été décidée. L'établissement de spécifications par l'ASTM est fortement orienté par les acteurs américains. Le retour d'expérience concernant l'utilisation de ces

nouveaux carburants reste faible, la qualité de la *Supply chain* sur le long terme doit être précisée, l'émergence de nouvelles filières multiplie les interrogations. Si la totalité des vols de démonstration déjà réalisés ont été réussis, et donc la faisabilité de mélanges 50/50 acquise dans ces conditions, des questions subsistent ; le problème d'une production de masse à la hauteur des besoins, notamment, est loin d'être résolu. Différentes difficultés pour arriver au stade industriel ont été mises en évidence. La disponibilité de la ressource biomasse, hors de son utilisation prioritaire pour l'alimentation, n'est pas illimitée. Son utilisation peut en effet se faire sous trois formes principales, la production de chaleur, la production d'électricité et la production de carburants pour divers utilisateurs ; en outre, des perspectives se dessinent pour l'utilisation de la biomasse pour la chimie biosourcée (concept de bioraffinerie). Le gain environnemental apporté par l'utilisation de biojet fuels reste en outre l'objet de débats, notamment pour la prise en compte du CASI (changement d'affectation des sols indirect). Le coût du biojet fuel est aujourd'hui au minimum 30 % plus élevé que le biodiesel fossile. Les compagnies aériennes, dont l'équilibre financier est déjà très affecté par le coût élevé du jet fuel, peuvent difficilement prendre en charge un tel surcoût. L'évolution du prix des ressources de biomasse est, de plus, incertaine ; par exemple, le prix de l'huile s'avère fortement corrélé à celui du gazole. L'utilisation de déchets agricoles et forestiers et de cultures lignocellulosiques peut, certes, permettre de changer l'ordre de grandeur de la quantité de biomasse disponible, mais le prix de ces matières est difficile à prévoir. La prise en compte des aléas climatiques dans la modélisation de la disponibilité de la biomasse reste à faire.

Il existera une concurrence d'usage de la biomasse pour la production de biocarburants. L'aviation commerciale est un faible consommateur de carburants par rapport à d'autres secteurs économiques comme le transport routier. Il ne s'agit pas ici d'opposer le secteur aérien et le secteur routier, qui inévitablement partageront des ressources de biomasse, des installations de transformation et des circuits d'approvisionnement voire de distribution. Par contre, le secteur aéronautique souhaite que ses besoins spécifiques soient pris en considération à la hauteur de son poids économique.

La France possède toutes les forces pour être un acteur majeur du domaine des biojet fuels, un cadre précis et pérenne serait nécessaire afin de garantir la demande dans le temps et permettre aux industriels d'investir. Seul un cadre législatif et financier clair permettra le développement de filières de biojet fuel.

Une première étape pourrait être, par exemple, l'inclusion claire du domaine aéronautique dans la Directive énergies renouvelables. La mise en place de ce mécanisme de développement devra, de plus, se faire en tenant compte du caractère international du transport aérien et donc du risque de distorsion de concurrence induit par un mécanisme purement national.

TABLE DES MATIÈRES

01	Introduction
03	Les objectifs internationaux
05	Progrès technologiques et opérationnels : les engagements européens et français
05	Rôle des biocarburants et cycle carbone
09	Les contraintes techniques de l'aéronautique et la place des biocarburants
10	Le concept Drop-in
11	Organismes de spécifications
14	Les spécifications ASTM des carburants Drop-in
16	Au-delà des spécifications actuelles
17	Impacts énergétiques et environnementaux, démonstrations
20	Perspectives
23	Les biocarburants produits industriellement dans le monde en 2013

27	Les biocarburants aéronautiques
27	Introduction
29	Les principales filières d'obtention des biojet fuels
40	Les voies thermochimiques
43	Synthèse
47	Le contexte politique et les partenaires
47	Obstacles à passer
52	Alliances objectives
53	Le rôle des pouvoirs publics
55	Conclusions
57	Annexes
57	L'analyse de l'Académie de l'Air et de l'Espace
61	L'expertise de l'Académie des technologies
64	Fiches projets et start-up
71	Glossaire
73	Auditions et membres du groupe de travail
73	Personnalités auditionnées
73	Présentations des membres du groupe de travail
74	Membres du groupe de travail
75	Publications de l'Académie des technologies
83	Publications de l'Académie de l'air et de l'espace

INTRODUCTION

La plupart des avions de transport de passagers et de fret utilisent un carburant aéronautique, le carburéacteur ou jet fuel qui est une coupe issue de la distillation puis de différents procédés de traitement du pétrole, cette coupe kérosène se situe entre les essences et le diesel ; seuls les avions légers restent aujourd'hui équipés de moteurs à combustion interne à allumage commandé alimentés par de l'essence d'aviation (AvGas ou 100LL), le jet fuel étant quant à lui le carburant des turbomachines (turboréacteurs, turbopropulseurs, turbomoteurs). Le jet fuel représente environ 6 % de la production de produits pétroliers dans le monde et alimente l'ensemble des segments aéronautiques : aviation de transport de passagers, aviation de transport de fret, aviation d'affaires, aviation militaire¹. Le développement soutenu de l'aviation civile de transport, qui constitue le segment le plus important en terme de consommation de jet fuel, se traduit mécaniquement par une demande accrue de carburant ; les gains obtenus par les progrès technologiques, exprimés en consommation par

¹ Par souci d'efficacité logistique, dans certaines armées, comme les armées françaises, le jet fuel est également utilisé pour la propulsion navale et même les véhicules terrestres.

passager et pour 100 km, sont de l'ordre de 1,5 % par an en moyenne et, donc, ne compensent qu'incomplètement l'accroissement du trafic qui, lui, se situe actuellement autour de 5 %.

Le concept de carburant aéronautique alternatif, c'est-à-dire de carburant aéronautique pouvant se substituer à l'essence d'aviation ou au jet fuel est très ancien : de nombreux avions de l'entre-deux guerres ont été motorisés par des diesels alimentés par une huile végétale, les essences d'aviation de l'Allemagne étaient fabriquées à partir du charbon lors de la guerre 1939-1945 (technologie reprise ultérieurement par l'Afrique du Sud). Les organismes de recherche militaire ont étudié des combustibles plus énergétiques ou plus denses. La question des carburants alternatifs a été reposée après chaque choc pétrolier.

Ce qui a changé à partir de 2005 résulte de la prise de conscience accrue de trois problématiques générales :

- ▶ le développement économique des grands pays émergents, qui se traduit par une demande croissante d'énergies fossiles et, en particulier, de pétrole. Or, malgré des découvertes continues de nouveaux gisements, les réserves fossiles prouvées, potentielles ou ultimes sont limitées et ne permettront pas à un horizon de quelques décennies de satisfaire toutes les demandes. Ce constat a donné lieu aux travaux sur le *peak oil* pour les pétroles conventionnels ;
- ▶ la dépendance accrue des pays industrialisés vis-à-vis des importations de produits pétroliers. Cette question relève de la géopolitique, les États-Unis ont été extrêmement sensibles à cette question sous la présidence G.W. Bush, ce qui a conduit le législateur à promulguer l'*Energy Independence and Security Act* en 2007. De fait, ce sont les forces armées américaines et en particulier l'US Air Force qui, dès 2005, ont démarré un programme AFI (*Assured Fuels Initiative*), suivies en 2006 par le secteur civil avec le programme CAAFI (*Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative*), sous l'égide principale de la FAA (*Federal Aviation Administration*) ;
- ▶ l'impact des activités humaines, notamment au travers de l'utilisation des ressources fossiles, sur le changement climatique.

C'est principalement le GIEC/IPPC qui a alerté l'opinion internationale sur ce sujet. L'émission de gaz à effet de serre générée par la combustion des ressources fossiles (charbon, gaz naturel, pétrole) se traduit par un forçage radiatif additionnel

(le premier gaz à effet de serre est la vapeur d'eau) qui augmente la température moyenne au sol.

La consommation énergétique des différents moyens de transport a été en valeur relative de 13 % de la consommation énergétique globale en 2011, dont 74 % pour le transport routier et environ 6 fois moins pour l'aviation. Les émissions de CO₂ de l'aéronautique civile, directement proportionnelles à la consommation de kérosène aéronautique, ont été de 671 Mt en 2011, à comparer à l'ensemble des émissions anthropiques de 34 Gt (données Airbus). L'aéronautique civile intervient donc pour environ 2 % des émissions anthropiques de CO₂, ce qui peut paraître faible. Néanmoins, cette donnée est trompeuse pour deux raisons : d'une part, si l'accroissement du trafic aérien se maintient sur plusieurs décennies, l'impact relatif du trafic aérien va croître, d'autant qu'il y a espoir que d'autres consommations, comme le chauffage, diminuent ; d'autre part, les émissions ne se font pas exclusivement au sol, comme c'est le cas pour le trafic routier, mais surtout en croisière à haute altitude (au-delà de 10 000 m), ce qui pose des questions encore ouvertes comme la dégénérescence des traînées de condensation en cirrus.

Le contexte et les enjeux du développement des biocarburants aéronautiques présentent donc plusieurs aspects, mais la réduction des émissions de gaz à effet de serre émises par le transport aérien occupe une place centrale. Cette situation a conduit la communauté internationale à fixer des objectifs.

LES OBJECTIFS INTERNATIONAUX

Si la contribution de l'aviation aux émissions de gaz à effet de serre, et notamment de CO₂ d'origine humaine, est seulement de 2 à 3 %, elle progresse néanmoins de façon mécanique en raison de la croissance continue du transport aérien. Celle-ci est estimée aux alentours de 5 % par an pour les prochaines années avec, bien entendu, des variations d'une zone géographique à une autre.

Afin de garantir son développement de manière durable, le transport aérien se mobilise pour réduire son empreinte carbone. En 2009, IATA et ATAG (*Air Transport Action Group* réunissant les constructeurs, les compagnies aériennes, les aéroports et les services de navigation aérienne) ont proposé, ensemble et à l'échelle

mondiale – ce qui était sans précédent –, de s'engager sur des objectifs de réduction des émissions de l'aviation :

- ▶ d'ici à 2020, amélioration de la consommation passager/km de 1,5 % par an ;
- ▶ à partir de 2020, stabilisation et compensation intégrale de la croissance du trafic aérien (*Carbon neutral growth*) ;
- ▶ en 2050, réduction des émissions de CO₂ de 50 % par rapport au niveau de 2005.

Les deux derniers objectifs sont réputés *aspirational* : il ne s'agit pas d'engagements, mais de souhaits visant à faire participer de façon optimale le transport aérien à la limitation du changement climatique.

La résolution A37-19 de l'OACI, adoptée au niveau des États, propose un gain annuel d'efficacité de 2 % et un objectif de stabilisation des émissions à leur niveau de 2020 (*Carbon neutral growth*).

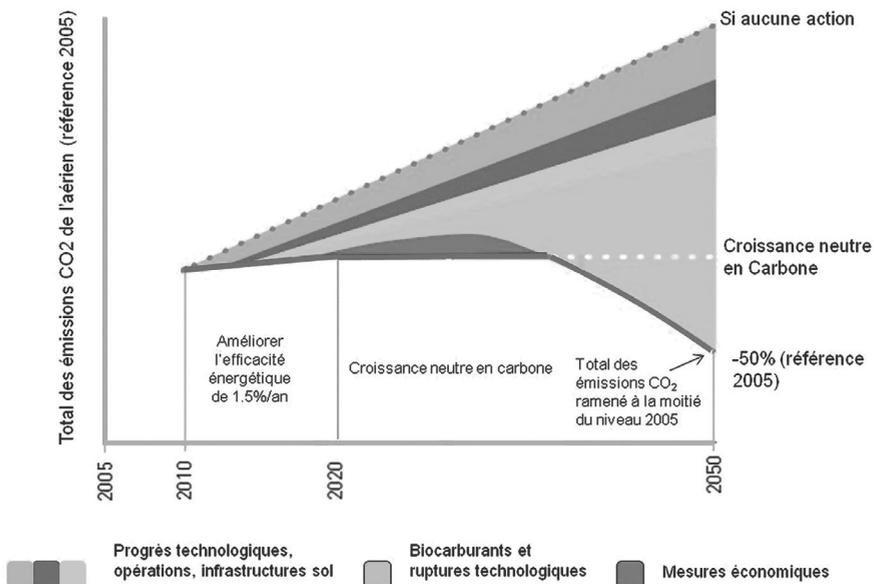


Figure 1.1 : La vision IATA pour la limitation des émissions de CO₂ du transport aérien.

Le premier levier disponible pour réduire les émissions de l'aviation réside dans les progrès technologiques et opérationnels ; le graphe ci-dessus issu des publications IATA distingue les progrès technologiques en cours (zones vert clair)

et les ruptures technologiques dont l'impact est par définition très difficile à estimer. Ces ruptures ont été incluses dans la zone bleu clair du graphique qui tient compte également de l'introduction progressive de biocarburants aéronautiques durables. Il importe de bien considérer de façon complémentaire ces différents leviers et de n'opposer à aucun prix la R&D sur les futurs appareils, procédures, infrastructures et celle sur le biocarburant : le meilleur carburant demeure celui qui n'est pas consommé.

PROGRÈS TECHNOLOGIQUES ET OPÉRATIONNELS : LES ENGAGEMENTS EUROPÉENS ET FRANÇAIS

Au niveau européen, les industriels de l'aéronautique se sont engagés depuis 2002 dans le cadre du programme ACARE 2020 (*Advisory Council for Research and Innovation in Europe*) à proposer les technologies qui permettront une réduction de 50 % des émissions de CO₂ d'un appareil produit à l'horizon 2020, par rapport à l'année de référence 2000. Il est à noter que cet engagement porte sur la consommation de l'avion le plus performant fabriqué en 2020 [généralement exprimé en g/passager/100 km] tandis que les objectifs IATA portent sur la consommation globale de la flotte mondiale, constituée d'avions de différentes générations. Les deux formes d'expression des objectifs sont cohérentes, mais doivent être distinguées. Le second plan stratégique dit ACARE 2050 (publié en 2011) prévoit une réduction de 75 % des émissions de CO₂ d'un appareil fabriqué en 2050, toujours par rapport à l'année de référence 2000.

Au niveau national, une convention d'engagements dans le cadre du Grenelle de l'environnement, a été signée entre le ministre de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables et les acteurs français du transport aérien réunis au sein du Conseil pour la recherche aéronautique civile (CORAC). Le CORAC, présidé par le ministre en charge des transports, réunit l'ensemble des acteurs (industrie aéronautique, compagnies aériennes, aéroports, centres de recherche et administrations concernées), pour coordonner les efforts de recherche français nécessaires à l'émergence des technologies qui permettront aux futurs aéronefs d'être plus performants, toujours plus sûrs et plus respectueux de l'environnement tout en maintenant le meilleur niveau de compétitivité.

RÔLE DES BIOCARBURANTS ET CYCLE CARBONE

Les travaux du CAEP² montrent que les seuls progrès techniques et opérationnels ne seront pas suffisants pour atteindre les objectifs de la résolution A37-19 de l'OACI, et *a fortiori* ceux des organisations IATA et ATAG. Il y a donc un écart qui peut être au moins partiellement comblé³ par l'introduction de biocarburants à empreinte CO₂ réduite.

En effet, les biocarburants présentent, en théorie, un bilan neutre des émissions en CO₂ car ils sont issus de plantes dont la croissance s'est effectuée par captation de CO₂ par le mécanisme de photosynthèse. Ce carbone est réémis sous forme de CO₂ lors du processus de combustion dans un moteur thermique, fermant ainsi un cycle théoriquement neutre sur une échelle temporelle de quelques mois ou années.

Néanmoins, les étapes de production de la biomasse utilisée et de transformation de celle-ci en carburant impliquent des opérations souvent gourmandes en énergie, sans compter les opérations de transport aux différentes étapes du cycle. Ces différentes étapes peuvent être plus ou moins largement émettrices de CO₂, selon les niveaux et les sources d'énergie utilisées. Les changements dans l'utilisation des terres que peut générer l'affectation des sols à la production de biomasse destinée aux biocarburants doivent être également pris en compte. La destruction de certains écosystèmes qui sont de puissants réservoirs de carbone et des capteurs de CO₂ (forêts par exemple) pour leur substituer des terres agricoles renvoie vers l'atmosphère une partie du carbone auparavant stocké dans le sol : cette émission intervient négativement dans le bilan carbone des biocarburants. Il faut donc veiller à une planification rigoureuse de l'affectation des sols afin de limiter cet effet appelé *Land Use Change* (LUC ou CASI). Des effets indirects peuvent également être à prendre en compte si la conversion de terres agricoles conduit à repousser ailleurs les limites des terres arables pour satisfaire malgré

² *Committee on Aviation Environmental Protection* : organe de l'OACI créé en 1983 pour structurer ses travaux sur l'environnement.

³ Des publications récentes indiquent que des mesures économiques (Market Based Measures) pourraient être nécessaires pour atteindre les objectifs de croissance neutre en carbone (voir l'article de Lee et al : <http://www.greenaironline.com/news.php?viewStory=1652>).

tout la demande, par exemple alimentaire : c'est l'*indirect Land Use Change* (iLUC). Ces effets restent à l'heure actuelle difficiles à estimer, certains se produisant en cascade.

À ce titre, la directive de 2009 de la Commission européenne destinée à promouvoir l'utilisation d'énergies renouvelables (*Renewable Energy Directive*) est en cours de révision depuis octobre 2012 afin de réduire les possibilités d'incorporation de certains biocarburants, en particulier de première génération (valeurs encore en discussion). Néanmoins la directive modifiée maintiendrait un mandat d'incorporation global de 10% d'énergies renouvelables à l'horizon 2020. En 2018, il sera exigé des filières utilisées qu'elles atteignent un niveau de réduction des émissions carbone de 60% par rapport aux carburants fossiles.

Des analyses complémentaires sont indispensables pour fiabiliser un véritable bilan CO₂ sur l'ensemble du cycle de vie des biocarburants et faire le choix des filières conduisant à une réduction maximale du CO₂ émis par rapport aux carburants fossiles.

LES CONTRAINTES TECHNIQUES DE L'AÉRONAUTIQUE ET LA PLACE DES BIOCARBURANTS

L'aéronautique a évolué progressivement vers deux caractéristiques : pour sa composante civile, il s'agit aujourd'hui d'un transport de masse [3 milliards de passagers en 2012] ; pour sa composante militaire, de plus en plus d'opérations intègrent différents pays, ce qui nécessite, notamment, un haut degré d'interopérabilité pour le carburant utilisé. La sécurité demeure et demeurera la priorité du transport aérien ; les progrès ont été constants et le transport aérien est aujourd'hui le plus sûr des moyens de transport⁴. Il s'agit aussi d'une activité en grande partie internationale, ce qui implique un haut niveau de communalité du carburant approvisionné sur les différents aéroports mondiaux. La recherche de

⁴ Le communiqué IATA n° 8 du 28 février 2013 annonce pour 2012 que le taux d'accidents des avions à réaction de fabrication occidentale (mesuré en pertes de coque par million de vols) a été de 0,20, ce qui représente un accident pour 5 millions de vols et une amélioration de 46% par rapport à 2011.

carburants aéronautiques susceptibles de se substituer au jet fuel⁵ issu du pétrole et la nécessité d'assurer une transition douce entre le jet fuel conventionnel et les carburants de substitution ont conduit la communauté aéronautique mondiale à adopter le concept de carburant fongible (*Drop-in*).

LE CONCEPT *DROP-IN*

Le carburant aéronautique issu du pétrole fossile est composé d'hydrocarbures majoritairement en C9-C13 avec un rapport H/C en nombres d'atomes de 1,9 à 2,1, dans les proportions suivantes :

- ▶ alcanes linéaires et ramifiées C_nH_{2n+2} : 50 à 65 % ;
- ▶ cyclohexanes : 20 à 30 % ;
- ▶ composés aromatiques : 8 à 25 % ;
- ▶ alcènes : moins de 3,5 %.

La définition d'un carburant aéronautique *Drop-in* est la suivante : il s'agit d'un carburant pouvant se substituer en partie ou en totalité au jet fuel conventionnel sans impact opérationnel (pas de modification des infrastructures, notamment au niveau des aéroports), ni modification des avions et des moteurs existants ou en cours de développement. Derrière ce concept se cachent deux réalités : d'une part, la mise au point d'un nouvel avion de transport de grande capacité nécessite une dizaine d'années et un investissement de l'ordre d'une dizaine de milliards d'euros, d'autre part, la durée de vie d'une famille d'avions peut dépasser soixante ans (par exemple le Boeing 747 a fait son premier vol en 1969 et sa dernière version, le 747-8, volera vraisemblablement encore trente ans).

Ainsi, les carburants *Drop-in*, qu'ils soient issus de ressources fossiles ou de la biomasse, doivent satisfaire certaines exigences, dont la première est de ne pas remettre en cause la certification des matériels, leurs manuels d'utilisation

⁵ On utilisera indifféremment les termes jet fuel, carburant aéronautique et carburé-acteur. On distinguera les carburants alternatifs des biocarburants aéronautiques aussi appelés biojet fuels.

et le processus de certification de nouveaux matériels annexes. Ce sont moins, pour les autorités de certification, de nouveaux carburants que des carburants standards produits autrement.

Il faut distinguer les autorités établissant les spécifications de celles de certification surveillant la conformité des carburants produits avec les spécifications établies.

ORGANISMES DE SPÉCIFICATIONS

Il existe dans le monde différents organismes de spécifications ; les spécifications pour le jet fuel les plus utilisées dans le monde sont celles de l'ASTM (autrefois *American Society of Testing and Materials*), au travers de ses sous-comités DO₂-J (*Aviation Fuels*) et DO₂-JL.06 (*Emerging Turbine Fuels*), indiquées dans la norme ASTM D1655 (*Standard Specifications for Aviation Turbine Fuels*) ainsi que celles issues du ministère britannique de la défense avec la spécification DEF STAN 91-91 (*Standard for Defence Turbine Fuel, Aviation kerosene type Jet A-1*). Les exigences les plus strictes de la DEF STAN 91-91 (Issue 7, Amendment 2 dated 7 December 2012) et de l'ASTM 1655-12 ont été reprises dans l'AFQRJOS (*Aviation Fuel Quality Requirements for Jointly Operated Systems*) Issue 7 de février 2013 pour le Jet A1.

Les jet fuels conventionnels civils les plus utilisés au monde sont le Jet A (USA) et le Jet A1 (autres pays), objet des spécifications D1655 citées à l'alinéa précédent. La Russie et les pays de la CEI possèdent un carburant standard, le SP1, de même que la Chine ; tous les carburants conventionnels mondiaux ont des caractéristiques très voisines. Le JP8 (US Air Force), F35 (OTAN) et AVTUR (UK Defence) sont proches, aux additifs près, du Jet A1.

Le processus d'agrément des nouveaux carburants est établi dans la norme ASTM D4054 (*Guideline for the Qualification and Approval of New Turbine Fuels and Fuel Additives*), qui décrit les moyens d'essai à mettre en œuvre pour mesurer les principales caractéristiques du carburant. Ce processus d'agrément précède l'émission des spécifications. Comme dans tout organisme international, à l'exemple de ce qui se fait dans les comités de l'OACI, tout membre peut s'exprimer et bloquer le processus jusqu'à l'obtention d'un consensus. Ce processus de

certification nécessite entre 10 000 et 100 000 gallons pour les essais requis, soit 38 000 à 378 500 litres, il peut durer 2 à 3 ans et coûter plus de 10 millions de dollars.

La figure 2.1 illustre la démarche.

Certification

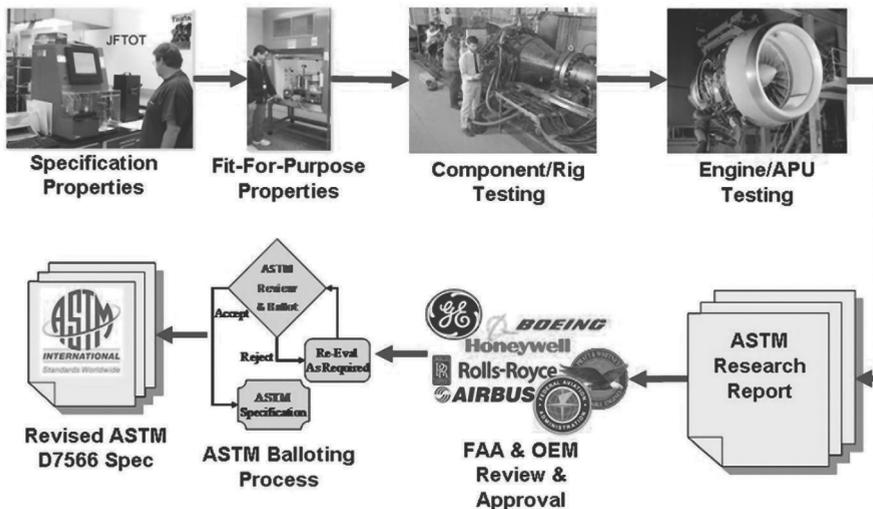


Figure 2.1 : Processus d'approbation d'un carburant aéronautique
(source : Mark Rumizen, FAA/CAAFI, May 5, 2010).

Les nouveaux carburants doivent satisfaire la norme ASTM D7566 (*Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthetized Hydrocarbon*) qui reprend les spécifications du jet fuel de l'ASTM D1655 avec des exigences étendues (comme une teneur en aromatiques minimum) et qui contient en annexe les spécifications des composés synthétiques.

Deux filières ont fait l'objet de spécifications :

- ▶ les SPK (*Synthetic Paraffinic Kerosene*) obtenus, par exemple, à partir du gaz naturel au moyen du procédé Fischer-Tropsch (GtL pour *Gas to Liquid*) ou de la biomasse (BtL pour *Biomass to Liquid*) ; les mélanges avec le jet fuel conventionnel peuvent contenir jusqu'à 50% de SPK ; cette filière a été certifiée en 2010 ;

- ▶ les HEFA (*Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*), auparavant appelés HRJ (*Hydrotreated Renewable Jet*) ou HVO (*Hydrotreated Vegetable Oils*) ; les mélanges avec le jet fuel conventionnel peuvent contenir jusqu'à 50 % d'HEFA/HRJ ; cette filière a été certifiée à mi-2011.

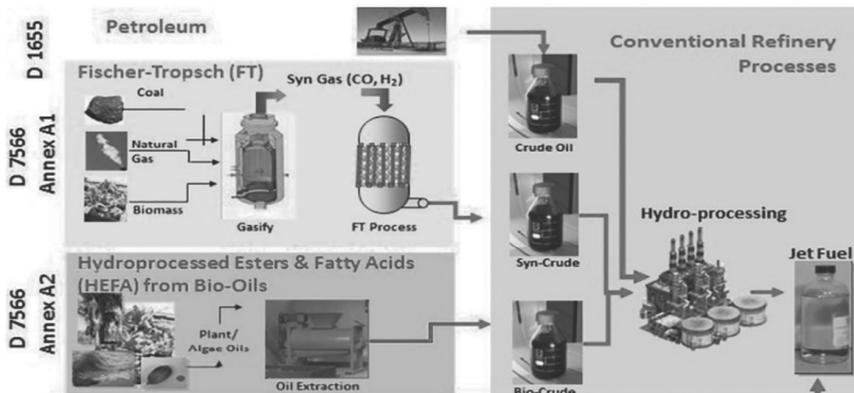


Figure 2-2: Mélanges de biocarburants aéronautiques spécifiés en 2010 et 2011 [source : Nate Brown, FAA, May 18, 2012].

La démarche ASTM est lourde, mais fiable, elle permet de vérifier qu'il n'y a pas de régression des caractéristiques certifiées par rapport au Jet A/ Jet A1 et que les exigences de sécurité seront satisfaites. Depuis 2011, il est donc possible d'utiliser un biocarburant aéronautique. Les spécifications sont strictes car elles exigent du biocarburant des caractéristiques semblables à celles du Jet A/ Jet A1, alors que des mélanges, par exemple à 20 % d'HEFA pourraient présenter des caractéristiques globales satisfaisantes sans que l'HEFA les satisfasse. Des travaux ont notamment été menés sur cette thématique par IFPEN et Shell dans le cadre du projet européen SWAFE⁶.

⁶ « New route for increasing the aviation alternative fuels production and optimizing the biomass usage: focus on HRJ », IFPEN/Shell, *IASH International Conference on Stability Handling and Use of Liquid Fuels*, 12th, Sarasota, USA, 16-20 October 2011.

L'ASTM couvre en fait tout ce qui impacte la sécurité des vols et les caractéristiques certifiées ; par contre, elle ne traite pas d'autres sujets importants pour l'utilisation comme l'assurance qualité de la *Supply chain* carburant, qui est à la charge des producteurs de carburants et des sociétés chargées de l'avitaillement des avions.

LES SPÉCIFICATIONS ASTM DES CARBURANTS *DROP-IN*

Les fonctions du carburant

La fonction première du carburant aéronautique est de fournir, par combustion avec l'air, l'énergie nécessaire à la propulsion. Des fonctions secondaires, souvent méconnues, sont aussi à remplir :

- ▶ lubrifier les équipements comme les pompes à carburant et quelquefois les paliers et roulements ;
- ▶ servir comme fluide pour la commande d'actionneurs (vérins) ;
- ▶ refroidir l'huile moteur par l'intermédiaire d'un échangeur thermique.

En conséquence, le carburant doit rester stable dans un large domaine de température, pratiquement de -47°C à $+300^{\circ}\text{C}$ pour le Jet A1. La limite inférieure de température est liée au vol à haute altitude, la limite supérieure au risque de cokéfaction dans les injecteurs du moteur. Il faut aussi assurer le démarrage à froid et le rallumage en vol.

Les spécifications ASTM

Ces spécifications ne portent pas sur des valeurs précises à respecter par des grandeurs physicochimiques, mais sur des intervalles et des seuils, ceci afin que les différents jet fuels produits dans le monde, qui peuvent avoir de légères différences de composition chimique, soient utilisables. La miscibilité totale d'un nouveau carburant avec le jet fuel conventionnel est un élément central du concept *Drop-in*. Voici les grandeurs physicochimiques spécifiées :

Contenu énergétique

Le contenu énergétique du carburant est donné par le PCI (Pouvoir calorifique inférieur), qui correspond à la chaleur de réaction du carburant avec l'air. Le PCI minimum standard est 42,8 MJ/kg. Le PCI d'un nouveau carburant ou d'un mélange ne doit pas être inférieur à cette valeur, sous peine d'avoir une incidence éventuellement négative sur le rayon d'action des avions. Il a été observé en pratique que le PCI des SPK est légèrement supérieur à celui du jet fuel conventionnel, en raison d'une plus forte proportion d'alcanes dans leur composition (et donc d'un rapport H/C plus élevé). À titre de comparaison, l'hydrogène a un PCI de 120 MJ/kg et le gazole de 42,9 MJ/kg.

Densité

Le volume des réservoirs étant fixé, la densité du carburant joue un rôle sur l'énergie embarquée. La densité doit être comprise dans l'intervalle [0,775-0,840]. Celle des SPK est proche de la limite inférieure.

Stabilité thermique

Le carburant doit rester liquide à basse température et ne pas se décomposer jusqu'à +300°C. La limite inférieure de température est liée aux conditions de vol en croisière ; en atmosphère standard, la température de l'air à 11 000 m est -56,3°C. En ce qui concerne la stabilité à haute température, les cyclages de température auxquels est soumis le jet fuel imposent une grande stabilité à l'oxydation afin d'éviter toute dégradation pouvant entraîner la formation de produits d'oxydation solides (gommes, vernis, dépôts...). Cette propriété est suivie par une mesure normalisée (JFTOT). Des questions se posent cependant sur l'évolution future de cette mesure.

Viscosité

Pour pouvoir être pompé des réservoirs, le carburant doit conserver une viscosité inférieure à 8 mm²/s à -20 °C.

Point éclair

Le point éclair correspond à la température à laquelle les vapeurs s'enflamment en présence d'une source d'allumage (flamme, étincelle...). Le seuil minimum retenu est +38 °C, il est essentiel pour la sécurité ; il est plus élevé

pour les carburants de l'aéronavale (+60 °C), en raison des contraintes spécifiques liées à leur stockage dans les soutes de navire et aux opérations de pompage associées.

Qualités de lubrification

Il s'agit d'un point qui n'est pas toujours renseigné quantitativement. Le carburant participe à la lubrification de certains organes des lignes d'alimentation et des moteurs. Il a été constaté que les SPK pouvaient poser des problèmes en raison d'une moindre teneur en aromatiques. Le taux d'aromatiques moyen dans le jet fuel conventionnel est autour de 15 % (il n'y a pas de spécification minimum pour le jet fossile, mais 25 % en volume maximum), aussi il a été rajouté dans l'ASTM D7566 une teneur minimum en aromatiques de 8 % en volume pour les jet fuels contenant des hydrocarbures synthétiques. Par ailleurs, un seuil minimal de pouvoir lubrifiant est introduit dans la spécification des carburéacteurs de synthèse.

Compatibilité du carburant avec les matériaux moteurs et systèmes carburant

Les principaux problèmes se posent au niveau des filtres et des joints élastomères qui gonflent en présence du carburant, ce qui élimine les risques de fuite.

Comportement au stockage

Sont requis : une faible toxicité, une faible sensibilité à l'oxydation naturelle et une faible sensibilité à la contamination bactérienne et fongique.

AU-DELÀ DES SPÉCIFICATIONS ACTUELLES

Certaines caractéristiques du carburant intéressent au premier chef les constructeurs :

- ▶ les caractéristiques de combustion du carburant qui peuvent être liées à la courbe de distillation du mélange constituant le carburant. Le processus ASTM stipule que pour satisfaire le concept *Drop-in*, il faut garantir l'absence de régression des caractéristiques certifiées sur les paramètres

spécifiés, dont les émissions polluantes. Par contre, l'ASTM ne vérifie pas l'intégralité des caractéristiques de combustion, en particulier, les émissions de particules fines (non certifiées jusqu'à aujourd'hui) et les émissions d'espèces chimiques potentiellement sensibles pour les turbines (durée de vie « long terme ») ;

- ▶ la température d'auto-inflammation ;
- ▶ les capacités d'allumage et de rallumage en vol. Le processus ASTM demande de démontrer, par analyse ou essai, l'absence de régression, mais mériterait plus de précisions pour les moteurs civils ;
- ▶ la tension de vapeur du carburant. Elle fait partie des paramètres mesurés dans les essais *Fit for purpose* de l'ASTM D4054. Il n'est pas imposé de valeurs spécifiées, mais demandé de vérifier que les valeurs mesurées sont « comparables » à celles relatives aux kérosènes d'origine fossile (*CRC Handbook of Aviation Fuel Properties*) ;
- ▶ la compressibilité du carburant qui intervient dans certains phénomènes transitoires d'écoulement donnant lieu à des coups de bélier dans les canalisations d'alimentation ;
- ▶ les effets d'encrassement, les phénomènes chimiques à cinétique lente ou très lente, la sensibilité à des contaminants ;
- ▶ la sécurité des systèmes d'avitaillement au sol ;
- ▶ les risques de non-qualité. Une *task force* baptisée *Into Plane Quality* et un groupe de travail *To Ensure the New Fuel Handling Standard Will Work with D1655* ont été récemment mis en place à l'ASTM. La question de la responsabilité des différents acteurs de la chaîne d'approvisionnement reste ouverte en cas d'accident.

IMPACTS ÉNERGÉTIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX, DÉMONSTRATIONS

L'expérience accumulée depuis cinq ans, les nombreux essais réalisés au sol et les démonstrations en vol ont apporté beaucoup d'informations résumées ci-dessous.

Impact énergétique

Comme le PCI des SPK est un PCI légèrement supérieur à celui du jet fuel conventionnel et une densité légèrement inférieure, on s'est interrogé sur leur impact en terme de consommation. Les vols réalisés par Air New Zealand ont démontré un gain de consommation se situant autour de 1 %. Le caractère paraffinique de ces biojet fuels contribue à une légère baisse de la consommation (PCI plus élevé malgré une énergie volumique plus faible).

Impacts environnementaux

La composition chimique des mélanges spécifiés étant différente de celle du jet fuel conventionnel, il en résulte quelques modifications des émissions. Les résultats expérimentaux indiquent que :

- ▶ les émissions de CO₂ sont peu affectées, sauf très légèrement par la réduction de la consommation. Le rapport H/C plus élevé des SPK tend cependant à diminuer ces émissions de CO₂ ;
- ▶ les données concernant les émissions polluantes : les données concernant les émissions de CO et HC sont rares, mais sembleraient favorables. Concernant les émissions de SO₂/SO₃ et de PM (*Particulate Matters*), les indications sont plus franchement positives. Les biocarburants aéronautiques (SPK, HEFA...) ne contenant pas de soufre, à la différence du jet fuel conventionnel qui n'est pas totalement désulfuré (concentration massique moyenne autour de 300 ppm), les mélanges produisent moins d'oxydes de soufre responsables de pluies acides. La question des émissions de particules ultrafines par l'aéronautique sera vraisemblablement un enjeu important des prochaines décennies, en raison de leur impact potentiel sur la santé. Le gain apporté par l'utilisation de biojet fuels paraffiniques provient de leur moindre teneur en aromatiques, ces derniers ayant été identifiés comme des précurseurs de suie, susceptible d'agir aussi sur la formation des traînées de condensation.

Démonstrations en vol

Le tableau 2.1 donne un aperçu des vols commerciaux de démonstration réalisés jusqu'à mi-juin 2012 avec des mélanges contenant des HEFA.

Airline	Aircraft	Fuel Stock	Route
Aeroméxico	B777	Jatropha	Mexico City - Madrid
Aeroméxico	B737	Camelina	Mexico City - San Jose
Aeroméxico	B777	Jatropha, camelina and used cooking oil	Mexico City - São Polo
Air Canada	A319	Used cooking oil	Toronto Pearson - Mexico City
Air France	A321	Used cooking oil	Toulouse - Paris
Alaska Airlines	B737	Used cooking oil	Seattle - Washington
Alaska Airlines	Q400	Used cooking oil	Seattle - Portland
Finnair	A319	Jatropha	Amsterdam - Helsinki
Iberia	A320	Camelina	Madrid - Barcelona
Interjet	A320	Jatropha	Mexico City - Tuxtla Gutierrez
Jetstar Airways	A320	Used cooking oil	Melbourne - Hobart
KLM Royal Dutch Airlines	B737	Used cooking oil	Amsterdam - Paris
KLM Royal Dutch Airlines	B777	Used cooking oil	Amsterdam - Rio de Janeiro
LAN Airlines	A320	Used cooking oil	Santiago - Concepcion
Lufthansa	A321	Jatropha, camelina and animal fats	Hamburg - Frankfurt
Lufthansa	B747	Jatropha, camelina and animal fats	Frankfurt - Washington
Porter Airlines	Q400	Camelina	Toronto City - Ottawa
Porter Airlines	Q400	Camelina	Montreal - Toronto City
Qantas Airways	A320	Used cooking oil	Sydney - Adelaide
Thai Airways International	B777	Used cooking oil	Bangkok - Chiang Mai
Thomson Airways	B757	Used cooking oil	Birmingham - Arrecife

Tableau 2.1 : Compagnies aériennes ayant réalisé des vols commerciaux utilisant un biocarburant (source : RIO + 20 ICAO Briefing).

L'expérimentation la plus significative, car de moyenne durée, a été celle menée par Lufthansa au deuxième semestre 2011 sur la ligne Francfort-Hambourg dans le cadre du projet BurnFAIR (Lufo IV). Sans trahir de secret, le démarrage de cette campagne d'essais a été affecté par un problème de non-conformité des biocarburants utilisés. L'expérience acquise ultérieurement n'a pas mis en évidence de problèmes particuliers.

Le tableau 2.2 donne un aperçu des vols de démonstration réalisés jusqu'à octobre 2013 avec des mélanges contenant des carburants alternatifs.

Compagnie	Avion	% Biojet fuel	Trajet
ANA	B787 dreamliner	HEFA-used cooking oil – 10 %	Everett-Tokyo
AZUL	Embraer E196	DSHC-sugar cane – 50 %	Vols de démonstration
CNRC	Falcon 20	HEFA-brassica carinata – 100 %	Vols de démonstration
China Eastern	A320	HEFA-used cooking oil+palm oil – 50 %	Vols de démonstration Shanghai-Hongqia
KLM	B777	HEFA- used cooking oil – 25 %	Amsterdam-New York
Air France	A320	DSHC- sugar cane – 10 %	Toulouse-Paris
LAN	A320	HEFA-camelina – 30 %	Bogota-Santiago
GOL	B737	HEFA-corn+used cooking oil – 25 %	Sao Paulo-Brasilia

Tableau 2.2 : Vols de démonstrations civils récents.

PERSPECTIVES

La faisabilité de mélanges jet fuel conventionnel-biocarburant satisfaisant le concept *Drop-in* a été démontrée. De nouvelles normes ASTM pour de nouvelles filières de production de biokérosènes sont en préparation.

Il reste néanmoins des progrès à faire sur des points techniques comme :

- ▶ les effets à long terme : on manque de recul sur ce point ;
- ▶ la sensibilité à des contaminants ou à des espèces chimiques présentes sous forme de traces, pouvant affecter certaines propriétés critiques du mélange, provoquer des dépôts dans les canalisations de l'avion voire dans les pipelines d'approvisionnement ;

- ▶ l'adaptation des systèmes de jaugeage des réservoirs ;
- ▶ la représentativité des essais à basse température.

La principale difficulté semble porter sur le manque d'expérience des nouveaux acteurs et le contrôle qualité de la *Supply chain* carburant. Les quelques problèmes rencontrés lors des phases de démonstration ont été liés à la non-conformité des carburants utilisés ; cette non-conformité a pu être attribuée à une purification insuffisante du carburant (notamment par des surfactants) ou à une pollution accidentelle sur le site de production. Ces incidents ne remettent pas en cause la robustesse des filières utilisées, mais sont plutôt la conséquence de la faiblesse des quantités produites dans des installations préindustrielles. Aussi le renforcement des contrôles de qualité constitue-t-il une nécessité dans la perspective d'une utilisation croissante des biocarburants aéronautiques.

LES BIOCARBURANTS PRODUITS INDUSTRIELLEMENT DANS LE MONDE EN 2013

L'incorporation de biocarburants dans le transport terrestre n'est pas récente et date de plus de 100 ans. Ainsi Henry Ford déclarait-il dès 1906 « il y a de l'essence dans chaque matière végétale qui peut être fermentée⁷ ».

À la suite des crises pétrolières des années 70, les biocarburants ont été perçus dans de nombreux pays comme une solution réaliste, bien que partielle, au problème de la dépendance aux ressources pétrolières. Leur utilisation en mélange avec les carburants traditionnels permettait, de plus, d'envisager une réduction des niveaux d'émission de polluants (particules, NO_x, etc.) des véhicules. Le contrechoc pétrolier de 1986 et leur coût de production trop élevé ont ralenti leur développement. Le contexte a évolué au moins sur quatre points :

- ▶ la pression de l'opinion publique en faveur de la lutte contre le réchauffement climatique pousse les pouvoirs publics à trouver des solutions pour réduire les émissions de CO₂, gaz à effet de serre (GES), notamment

⁷ Cité par Wikipedia, entrée biocarburant.

dans le domaine des transports. Or, l'emploi des biocarburants pourrait permettre une réduction des émissions de GES par rapport aux solutions conventionnelles ;

- ▶ les incertitudes concernant l'approvisionnement en pétrole brut conventionnel ont amené les gouvernements à mettre en place des politiques énergétiques. À ce titre, les biocarburants apparaissent comme une option intéressante, d'autant plus qu'ils sont la seule alternative « renouvelable », voire durable, aux carburants pétroliers pour le secteur des transports qui soit aujourd'hui mise en œuvre industriellement et commercialement. Leur introduction est également plus facile que celle des carburants de substitution gazeux que sont le GPL et le GNV, car les biocarburants peuvent être utilisés directement en mélange à l'essence ou au gazole (au moins pour des teneurs inférieures à 10 %) sans nécessiter d'adaptation du réseau de distribution ou des véhicules ;
- ▶ la hausse continue des cours du pétrole depuis le début des années 2000 entraîne un regain d'intérêt pour les biocarburants dont les coûts de production sont cependant encore très élevés en comparaison des carburants pétroliers ;
- ▶ dans le cadre de la politique agricole, les biocarburants peuvent représenter un moyen efficace de trouver de nouveaux débouchés pour l'agriculture nationale.

Les deux principaux biocarburants aujourd'hui produits industriellement en Europe et dans le monde sont les esters méthyliques d'huile végétale (EMHV) et l'éthanol. Les capacités de production et la consommation de ces produits n'ont cessé de croître dans le monde depuis le début des années 90, avec en tête de file l'Europe pour la filière biodiesel et le couple Brésil / USA pour la filière éthanol.

Les figures suivantes montrent une évolution importante de la production de biocarburants pour le transport terrestre ces dernières années, même si la proportion de ceux-ci dans le pool global de carburants reste faible (2 % du carburant total, un peu plus de 3 % du carburant pour transport terrestre).

Le développement de ces filières s'est fait, quel que soit le pays concerné, sous l'impulsion des pouvoirs politiques, via un panel de moyens d'aide ou d'incitation : quotas d'incorporation plus ou moins contraignants, défiscalisation, taxes, aide à la mise en place de capacités de production, soutien à la filière agricole ...

En France, plusieurs mécanismes complémentaires ont été mis en place afin d'aider au développement de ces filières. Ces différents mécanismes ont été utilisés de façon séquentielle ou complémentaire : aides aux cultures énergétiques, défiscalisations. Le mécanisme actuellement mis en avant est l'inclusion des biocarburants dans le mécanisme général de la TGAP (taxe générale sur les activités polluantes), couplé à des objectifs chiffrés d'incorporation.

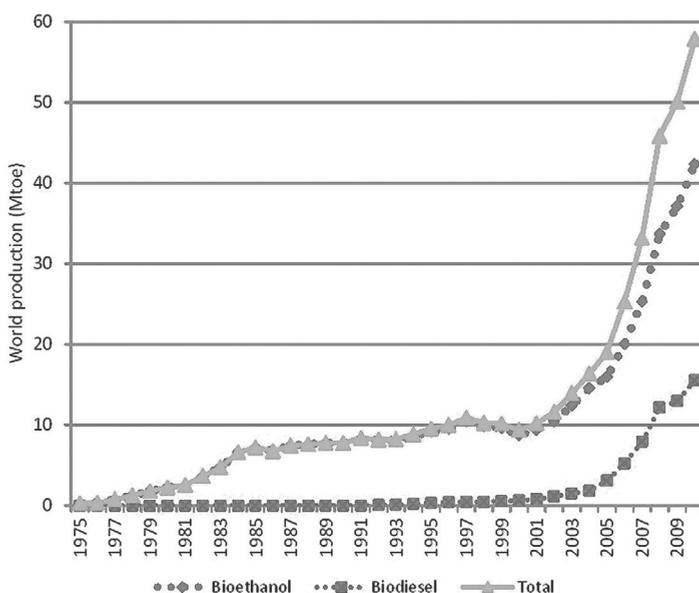


Figure 3.1 : Evolution de la production d'éthanol et de biodiesel dans le monde (INRA 2011, d'après plusieurs sources).

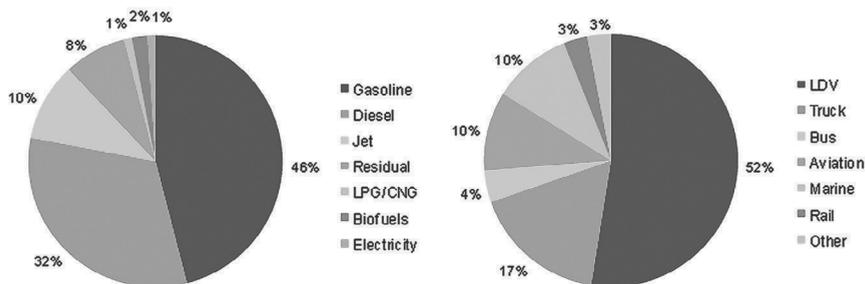


Figure 3.2 : Répartition des sources d'énergie par modes pour le transport (Total: environ 2200 Mtoe, sources : WEF, Repowering Transport 2011).

Dans le cas de l'aéronautique, comme souligné dans les paragraphes précédents, les mécanismes déjà cités sont difficilement applicables, en raison des fortes spécificités de ce mode de transport :

- ▶ le jet fuel n'est pas taxé au niveau international depuis la convention de Chicago⁸. Des mécanismes de défiscalisation sont donc sans objet ;
- ▶ la mise en place de mécanismes locaux à l'échelle d'un pays ou d'un groupe de pays présente de forts risques de distorsion de concurrence vis-à-vis des compagnies aériennes possédant des « hubs » dans ces pays ;
- ▶ les mécanismes basés sur la fiscalisation des émissions de CO₂ peuvent présenter un intérêt, mais là aussi il convient d'éviter la mise en place d'initiatives locales qui risqueraient de provoquer des distorsions de concurrence.

C'est notamment en raison de ces spécificités que des discussions intenses ont lieu au sein de l'OACI, notamment sur les MBMs (*Market Based Measures*). En janvier 2012, l'Union européenne a été la première à intégrer les avions de ligne dans le système communautaire d'échange de quotas d'émission (EU-ETS). Les émissions de CO₂ liées à l'ensemble des vols arrivant et quittant l'Espace économique européen (EEE) devaient entrer dans un mécanisme d'échange EU-ETS dès 2012. Face à cette décision unilatérale de l'EU, une levée de boucliers au niveau international a eu lieu. La plupart des membres de l'OACI se sont opposés au système EU-ETS. La Chine, soutenue par les USA et l'Inde, a menacé de mesures de rétorsion contre Airbus. En conséquence, l'EU-ETS aviation a été suspendu le 30 avril 2013 pour les vols long-courriers et pour une durée de un an, en attendant que l'OACI mette en place un marché mondial du carbone aérien. La Commission européenne se résout donc à suspendre l'inclusion des vols intercontinentaux sur le marché de l'EU-ETS, la décision 377/2013/EU est nommée *Stop the Clock*. Le but est de permettre aux États de l'OACI de parvenir à un accord global sur les MBM régionaux et internationaux d'ici 2017.

Le 4 octobre 2013, lors de la trente-huitième assemblée générale de l'OACI, les 191 États membres se sont mis d'accord sur une feuille de route qui conduira en 2016 à décider, ou non, de mettre en place un MBM international pour le secteur de l'aviation, pour une mise en place éventuelle à l'horizon 2020.

⁸ Convention signée à Chicago le 7 décembre 1944 et créant l'OACI.

LES BIOCARBURANTS AÉRONAUTIQUES

INTRODUCTION

Comme indiqué dans le chapitre précédent, les carburants aéronautiques présentent un certain nombre de contraintes, liées principalement à la nécessité d'assurer un très haut niveau de sécurité, mais aussi de pouvoir fonctionner sur une gamme de conditions opérationnelles très large, tant dans des zones désertiques très chaudes que dans des zones où la température externe peut descendre en deçà de -50°C . Ils doivent donc respecter strictement certaines spécifications pour être compatibles avec les missions des avions actuels.

Parmi les contraintes qui ont été mises en avant au chapitre 2, on peut souligner celles du tableau ci-dessous :

Paramètre	Spécification	Impact sur le fonctionnement de l'avion et sur le vol
Pouvoir calorifique (PCI, en MJ/kg)	> 42,8	Distance franchissable, rayon d'action, capacité d'emport
Masse volumique (kg/m ³)	Entre 775 et 840	Distance franchissable, rayon d'action, capacité d'emport
Viscosité à -20°C (mm ² /s)	<8	Température minimale d'utilisation dans les réservoirs, « pompabilité » des carburants à basse température, capacité de démarrage à froid et de réallumage en vol
Point éclair (°C)	> 38	Sécurité au stockage, à la distribution et dans les réservoirs des aéronefs
Point de disparition des cristaux (°C)	<-47	Température, « pompabilité » des carburants à basse température, capacité de démarrage à froid et de réallumage en vol

Tableau 4.1 : Principales propriétés physiques critiques de carburants aéronautiques.

Les quelques critères physiques cités dans le tableau montrent immédiatement l'impossibilité de recourir aux filières biocarburants actuellement majoritaires dans le domaine du transport terrestre :

- ▶ l'éthanol, à cause de son pouvoir calorifique faible (28,9 MJ/kg) et de son point éclair inférieur à la limite (13 °C) ;
- ▶ le biodiesel, en raison de sa tenue à froid très limitée pour les filières actuelles ;
- ▶ dans tous les cas, le concept du jet *drop-in* impose une composition chimique des biojet fuels similaires à celle d'un jet classique, c'est-à-dire sans présence d'oxygène, ce qui élimine *de facto* les deux filières éthanol et biodiesel.

Afin de répondre à ces contraintes extrêmement sévères, il est donc nécessaire de développer de nouvelles filières, dont les principales sont décrites dans le paragraphe suivant.

LES PRINCIPALES FILIÈRES D'OBTENTION DES BIOJET FUELS

Le schéma ci-dessous résume les principales filières actuelles ou en développement de production de biojet fuels :

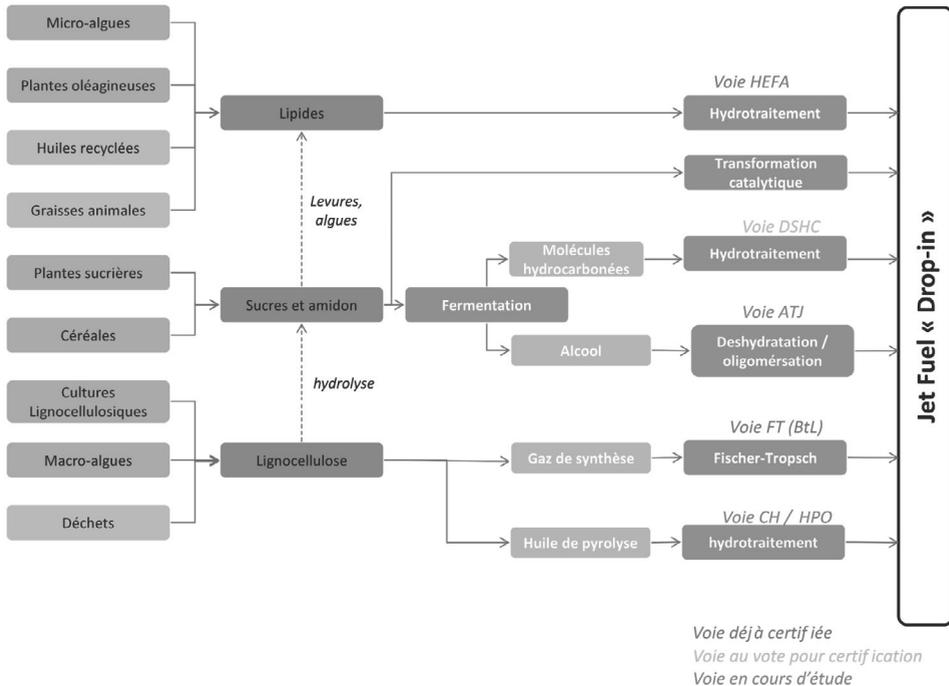


Figure 4.1 : Résumé des principales filières de production de biojet fuels (source : IFPEN / ICAO).

Cette figure propose une structuration en trois grandes voies de production de biojet fuels définies par le type de ressource biomasse, voies déjà développées ou en cours de développement (comme indiqué dans le schéma des ponts existent entre les ressources et donc entre les trois filières) :

- ▶ la voie « hydrotraitement d'huiles » (HEFA) ;
- ▶ la voie « fermentation ou conversion catalytique des sucres » :
 - ▷ transformation de sucres en alcanes (DSHC pour *Direct Sugar to HydroCarbon*) par voie fermentaire ou catalytique,
 - ▷ transformation par la voie alcool (AtJ pour *Alcohol to Jet*) ;

- ▶ les voies thermochimiques :
 - ▷ via le gaz de synthèse (BtL pour *Biomass to Liquid* et procédé FT pour *Fischer-Tropsch*),
 - ▷ via une bio-huile ou huile de pyrolyse (CH pour *Catalytic Hydrothermolysis* et HPO pour *Hydrotreated Pyrolysis Oil*).

L'intérêt prospectif des filières doit s'évaluer suivant trois critères principaux : le coût de production prospectif (compétitivité par rapport au carburant fossile à terme), le bénéfice environnemental prospectif (contenu carbone à terme) et le volume potentiel de production (lié principalement au volume de ressources potentiellement accessible).

Le bénéfice économique au travers du soutien au secteur agricole ou rural en général pourrait également être pris en compte comme critère d'intérêt de chaque filière, mais il est plus délicat à évaluer.

La maturité des différentes filières doit s'évaluer principalement sur quatre critères :

- ▶ la maîtrise de la technologie (les technologies sont-elles au niveau industriel, pilote ou laboratoire ?) ;
- ▶ la compétitivité telle qu'évaluée à ce jour (écart de coût de production par rapport au jet fuel fossile calculé sur des données existantes) ;
- ▶ la disponibilité actuelle de la ressource ;
- ▶ la performance environnementale actuelle.

Le fait que les filières soient plus ou moins avancées dans le processus de certification complète l'évaluation de la maturité.

Le niveau de maturité et l'intérêt prospectif varient fortement d'une filière à l'autre. Par exemple, les voies BtL et HEFA sont déjà certifiées pour un mélange à hauteur de 50 %, mais la voie HEFA est industrielle alors que la voie BtL n'en est qu'au stade pilote. De même leur bénéfice environnemental est assez différent.

À noter enfin que la figure 4.1 résume les principales filières et ne reflète en rien le foisonnement de solutions actuellement à l'étude, plus ou moins proches de ces filières principales, et permettant de produire des jets de qualité extrêmement variées en utilisant des ressources biomasse elles-mêmes variées. On peut, à titre d'exemple, citer des développements sur la production d'aromatiques par voie HEFA ou BtL, dans le but de produire à terme un jet 100 % d'origine biomasse.

Les paragraphes suivants résument les principales caractéristiques de ces filières.

La filière HEFA

La filière d'huiles hydrotraitées a été approuvée par l'ASTM à l'été 2011. Le principe de cette filière est basé sur une hydrogénation d'acides gras en provenance d'huiles végétales (HV) ou de graisses animales (figure 4.2). Après une étape de finition visant à atteindre les propriétés voulues, notamment en terme de tenue au froid, le produit obtenu, constitué uniquement de paraffines plus ou moins ramifiées, est parfaitement compatible avec une utilisation en mélange jusqu'à 50% dans du jet fuel fossile.

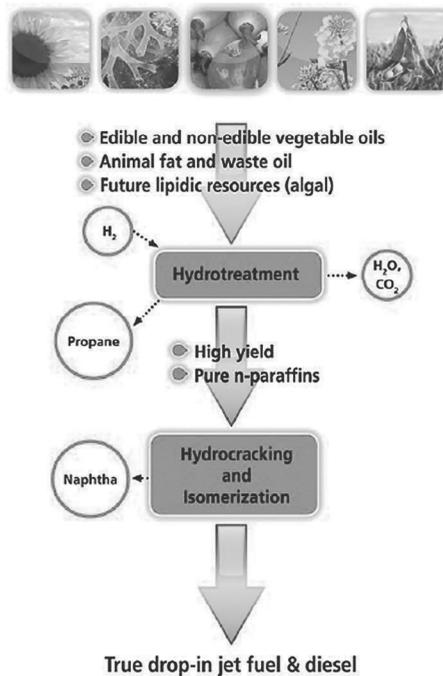


Figure 4.2: Description synthétique de la filière de production HEFA (source : Axens).

Cette filière possède un certain nombre d'avantages extrêmement intéressants, parmi lesquels on peut notamment citer :

- ▶ un procédé industriel connu et d'ores et déjà maîtrisé industriellement ;
- ▶ une coproduction de gazole et de jet fuel ;
- ▶ un potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre d'environ 60 % ;

- ▶ en France, cette filière peut s'appuyer sur le système industriel de récolte et de prétraitement de l'huile déjà en place pour la production de biodiesel. Sur toute la chaîne, la France présente des acteurs de référence organisés en filière : agriculture, traitement des graines, valorisation des tourteaux, distribution et négoce. La baisse progressive de la consommation de carburant routier associée aux perspectives de limitation des incorporations de biodiesel amènent aujourd'hui cette filière à considérer les besoins de l'aérien comme une opportunité de développement ;
- ▶ en outre, le développement à court terme de cette filière est tout à fait compatible avec celui des nouvelles sources oléagineuses, telles que les micro-algues / macro-algues / levures dont il pourrait favoriser un essor rapide. Les micro-algues et levures comme source oléagineuse font aujourd'hui l'objet de nombreux travaux de recherche et semblent prometteuses en termes de rendement, de durabilité et de bilan CO₂.

En revanche, le coût de production étant très majoritairement lié à celui de la ressource, cette filière n'est pas aujourd'hui compétitive par rapport au carburant fossile : le prix de l'huile végétale est, en effet, voisin de celui du jet fuel fossile.

En attendant la disponibilité industrielle des nouvelles filières de production de lipides, la durabilité de la production de la biomasse végétale nécessaire à l'émergence en France d'une production de biocarburants aéronautiques issus de l'hydrotraitement d'huiles végétales constituera un point de vigilance. La production oléagineuse répond en effet à une logique de marché mondiale. La production française sert des usages nationaux, mais aussi des marchés à l'export. Ainsi, la biomasse nécessaire pour produire du biodiesel à usage de carburant routier est pour partie produite en France et pour partie importée. Pour un futur carburant aéronautique issu de cette filière, l'un des enjeux résidera dans la pérennité des filières d'importation.

La filière HEFA est donc une filière mature, industriellement éprouvée, pouvant s'appuyer sur un réseau industriel en place et ayant une forte synergie avec les futures ressources oléagineuses en cours de développement. Les acteurs nécessaires au développement de cette filière sont présents au niveau français.

La filière fermentation ou conversion catalytique des sucres

Les filières à partir de sucre, AtJ, DSHC et STA (pour *Sugar to Alkanes*), n'ont pas encore été qualifiées par l'industrie aéronautique, mais l'ASTM a mis en place des groupes de travail afin d'initier ce processus qui devrait aboutir à très court terme (2014 pour certains).

Aujourd'hui, le sucre est la matière première renouvelable la plus abondante dans le monde, si l'on prend en compte les sucres issus de la déconstruction de la cellulose.

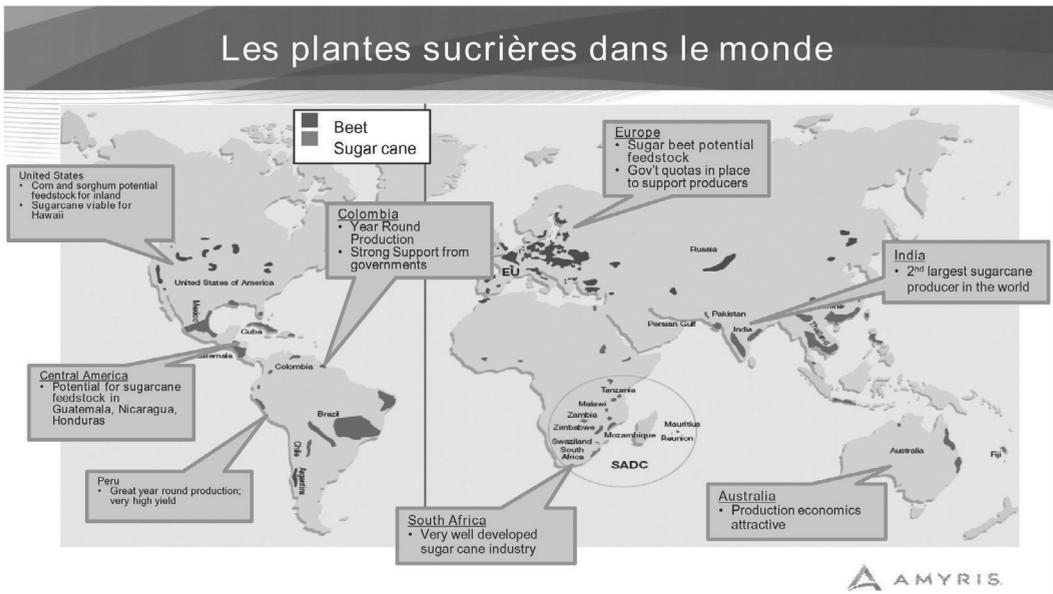


Figure 4.3: Répartition mondiale des ressources sucrières (source: Amyris).

De plus, son utilisation comme matière première de filières biotechnologiques permet de respecter les contraintes de durabilité les plus sévères, en raison de (i) un excellent rendement énergétique des plantes sucrières (figure 4.4), limitant les surfaces nécessaires, et (ii) de la faible empreinte carbone des résidus agricoles ou forestiers. Par ailleurs la consommation énergétique des procédés de fermentation reste faible.

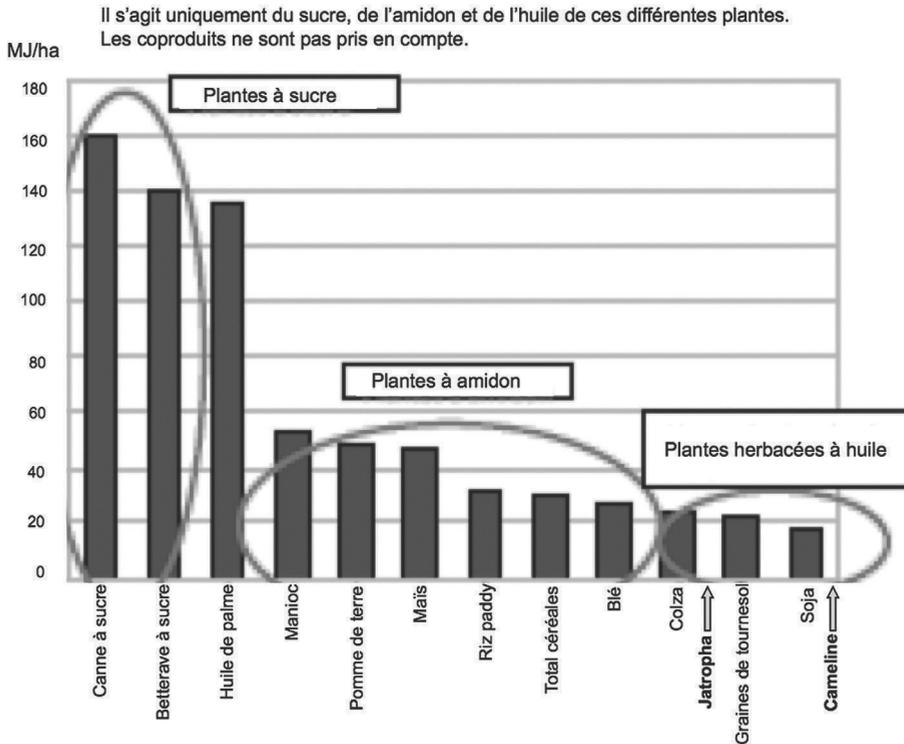


Figure 4.4: Rendement énergétique des plantes
 [source : RM/STD/RMMB d'après FAO Stats].

En France, les capacités agricoles de la filière betteravière sont sous-exploitées et pourraient être rapidement mobilisées pour produire d'importantes quantités de sucre pour un usage non alimentaire. En outre, les infrastructures existantes de transformation du sucre pour produire et distribuer du biocarburant essence (éthanol) sont en surcapacité⁹. Elles avaient en effet été dimensionnées en anticipation d'une augmentation de la demande d'éthanol pour le carburant routier, qui ne s'est jamais réalisée du fait de la baisse du marché de l'essence. Ces capacités

⁹ En 2005, l'UE a perdu un contentieux devant l'OMC pour ses exportations de sucre alimentaire. Une des premières conséquences a été la réduction de la production de betterave.

sous-utilisées pourraient être exploitées en les modifiant pour produire des biocarburants aéronautiques. À plus long terme, la mobilisation de résidus agricoles ou forestiers permettrait de produire des biocarburants d'origine lignocellulosiques pour l'aviation, dont le bilan environnemental serait encore meilleur. La lignine, troisième composant principal de la biomasse serait utilisée avant tout pour satisfaire aux besoins en énergie du procédé de conversion et/ou être valorisée sur les marchés de la chimie et des matériaux (figure 4.5).

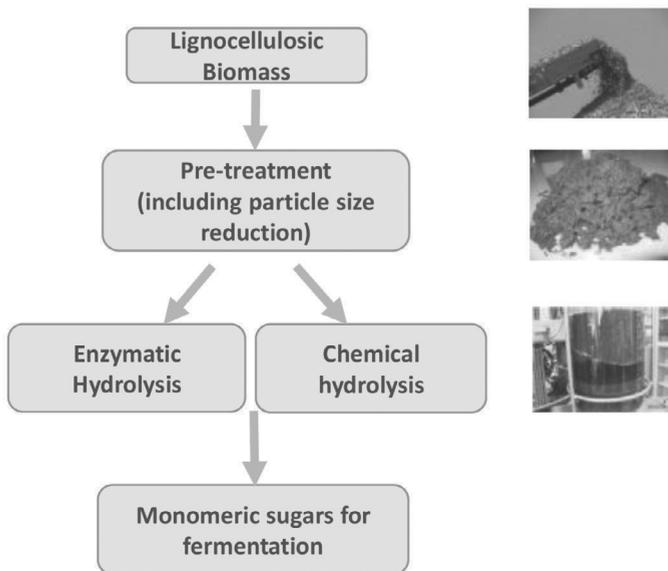


Figure 4.5: Description des étapes de transformation de la lignocellulose en sucres [source: Total].

Le premier défi de cette voie est l'accès à des matières premières diversifiées, en quantité suffisante pour alimenter des usines en continu et avec un coût d'approvisionnement maîtrisé.

Le prétraitement de la matière lignocellulosique et son hydrolyse constituent ensuite des verrous techniques et économiques qu'il convient de lever afin d'obtenir des sucres fermentescibles pour les étapes ultérieures à des coûts concurrentiels. Le défi technico-économique de la production de sucres ex-lignocellulose est cependant en passe d'être relevé puisque l'éthanol de deuxième génération voit les grands projets de R&D se finaliser (CLARIANT, FUTUROL...)

et les premières unités industrielles se lancer [CHEMTEX, DUPONT, GRANBIO, ABENGOA...]. Le succès d'un développement industriel de production de carburants par voie biologique à partir de biomasse lignocellulosique repose sur une démarche systémique intégrant les différents procédés à la chaîne de valorisation du végétal, sur la valorisation la plus complète possible de la biomasse ainsi que sur la validation technico-économique et environnementale des différentes briques technologiques.

La filière DSHC fermentaire

Cette filière est portée par la société Amyris, dont Total détient 20% : elle a construit sa première unité de niveau industriel au Brésil, démarrée fin 2012, avec un potentiel de production de biojet fuel de 30 à 50 millions de litres par an.

Amyris Technology

ENGINEERED MICROBES CAN PRODUCE HUNDREDS OF INDUSTRIALLY VALUABLE MOLECULES

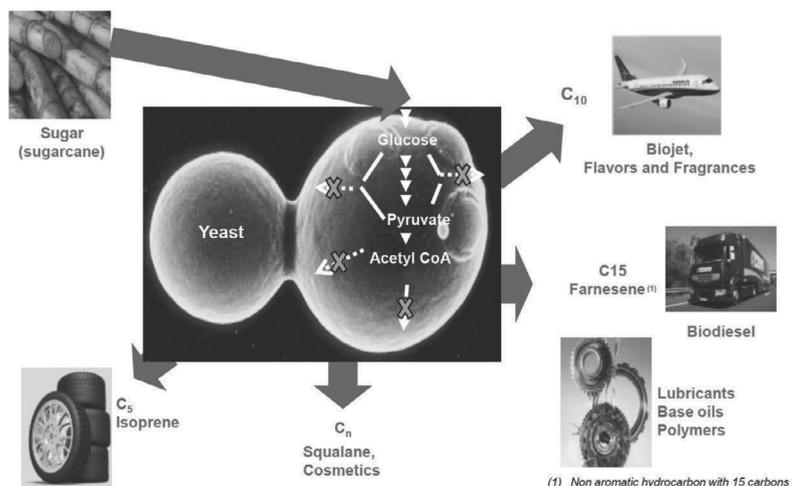


Figure 4.6 : Fermentation du sucre ou de ressources lignocellulosiques : exemple de la technologie Amyris, DSHC [source : Total].

Le procédé consiste en une étape de fermentation de sucre, aujourd'hui issu de la canne au Brésil, demain en provenance de la lignocellulose, qui produit une molécule hydrocarbonée de type oléfinique, le farnésène. Cette molécule est hydrotraitée ensuite en conditions douces pour produire une isoparaffine,

incorporable dans les carburants aviation ou dans le biodiesel. Cette isoparaffine en C15, appelée farnésane, peut être utilisée comme composant du diesel ou du biojet fuel selon la sévérité du traitement de finition. Ce biojet fuel est aujourd'hui en cours de certification ASTM pour une incorporation de 10 % au jet fuel conventionnel. Le choix de 10 % a été fait pour faciliter l'acceptabilité technique par les motoristes et équipementiers ainsi que pour minimiser l'impact environnemental (utilisation de sucres de canne ou de betterave dans un premier temps, avant de pouvoir utiliser des sucres cellulosiques) et pour minimiser le surcoût pour les utilisateurs de ce biojet fuel. Des études sont en cours pour produire une isoparaffine en C10. Les études d'incorporation au jet fuel fossile ont montré qu'une incorporation jusqu'à 20 % était envisageable, améliorant significativement le contenu thermique, la tenue à froid et la stabilité thermique du carburant aviation. En complétant par un C10, une incorporation à hauteur de 40 % est donc envisageable à terme quand les conditions économiques le permettront.

Les premières analyses de cycle de vie montrent une réduction¹⁰ des émissions de CO₂ à hauteur de 70 à 80 % sur sucre de canne, proches de 60 % sur sucre de betterave. Ces performances seront encore meilleures sur sucres cellulosiques.

Compte tenu du prix actuel du sucre, la compétitivité avec le jet-fuel d'origine fossile n'est pas possible aujourd'hui et une cible de deux fois le prix actuel est envisageable quand le programme de recherche et développement sera terminé, en 2016. Le surcoût devrait être réduit quand on pourra substituer des sucres cellulosiques aux sucres traditionnels, issus de la canne ou de la betterave, avant la fin de cette décennie.

La filière catalytique

Il s'agit de convertir les sucres par voie catalytique suivant les procédés de type Bioforming™. Les produits primaires obtenus doivent être recombinaison chimiquement pour converger vers des carburants. Cette voie permet de produire des aromatiques.

Le nombre important d'étapes de conversion nécessite une maîtrise de l'intégration et peut laisser penser que le coût industriel de cette filière ne sera pas négligeable.

¹⁰ Au sens des accords de Kyoto.

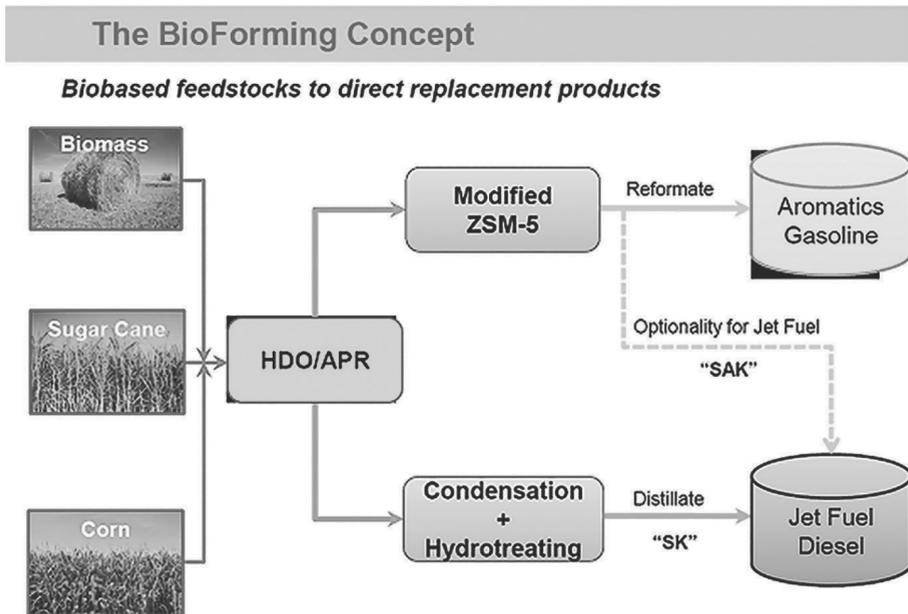


Figure 4.7 : La filière DSHC catalytique (source : Shell).

La filière AtJ (Alcohol to Jet)

La filière AtJ se différencie de la filière DSHC par le passage par une étape « alcool » et l'utilisation de procédés catalytiques afin de transformer ces alcools en chaînes carbonées de longueur maîtrisée pouvant être incorporées dans le jet fuel. La figure 4.8 présente les principales étapes de ce procédé.

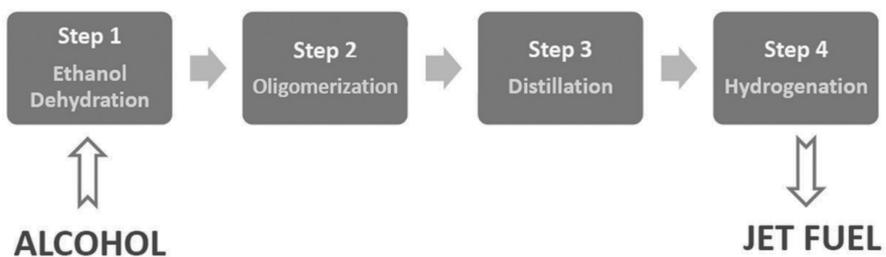


Figure 4.8 : Principales étapes de production de la filière AtJ (source : GEVO).

La matière première de départ est l'alcool, lui-même produit par une filière biologique, et qui s'appuie sur la même ressource que la filière DSHC avec, donc, le même potentiel de production actuel (filière sucre) et future (filière lignocellulosique).

La première étape consiste en une déshydratation de l'alcool afin de produire l'oléfine correspondante.

Les principaux avantages de cette filière sont donc :

- ▶ une matière première abondante et avec un potentiel de production important (sucre et voie lignocellulosique) ;
- ▶ des procédés catalytiques déjà connus et utilisés, notamment dans l'industrie pétrochimique ;
- ▶ la possibilité, en choisissant l'alcool de départ, de jouer sur les propriétés du produit final et ainsi d'optimiser les différentes étapes. De nombreux travaux sont ainsi menés visant à utiliser du bio-butanol ou isobutanol (GEVO, UOP) ;
- ▶ les premières étapes (déshydratation/oligomérisation) permettent une synergie intéressante avec la pétrochimie et l'ensemble des travaux actuels sur la production, par exemple, de biopolymères. Les fractions lourdes de l'oligomérisation (molécules à longue chaîne) peuvent être également valorisées en tant que biolubrifiant de synthèse.

Le principal challenge de cette filière reste l'enchaînement de nombreuses étapes nécessitant chacune une optimisation poussée. Une parfaite intégration de toutes ces « briques » est donc fondamentale afin d'assurer la rentabilité énergétique et économique de la filière.

Parmi les acteurs présents sur ce domaine, on peut notamment citer les sociétés GEVO ou *Swedish Biofuels*, souvent associés à des producteurs d'alcool (*Cobalt* par exemple).

Le coût de production est probablement élevé : coût de production de l'alcool auquel s'ajoute celui des nombreuses étapes du procédé.

Concernant les analyses de cycle de vie (ACV), et en sus du bilan GES associé à la production de l'alcool, l'hydrogénation finale, nécessaire également pour la voie DSHC, implique un apport hydrogène qui peut avoir un impact GES non négligeable, positif ou négatif, suivant l'origine de cet hydrogène.

LES VOIES THERMOCHIMIQUES

Les voies thermochimiques ont pour principe la transformation, par des procédés avancés, d'une matière première préalablement préparée par un traitement thermique. On peut distinguer deux voies, actuellement à l'étude, en fonction du produit issu de l'étape de traitement thermique : la voie dite *Fischer-Tropsch* basée sur l'utilisation de gaz de synthèse (c'est-à-dire un mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène) et la voie « hydrotraitement d'huiles de pyrolyse » basée sur l'utilisation d'une matière première sous forme liquide (bio-huile).

La voie Fischer-Tropsch (BtL)

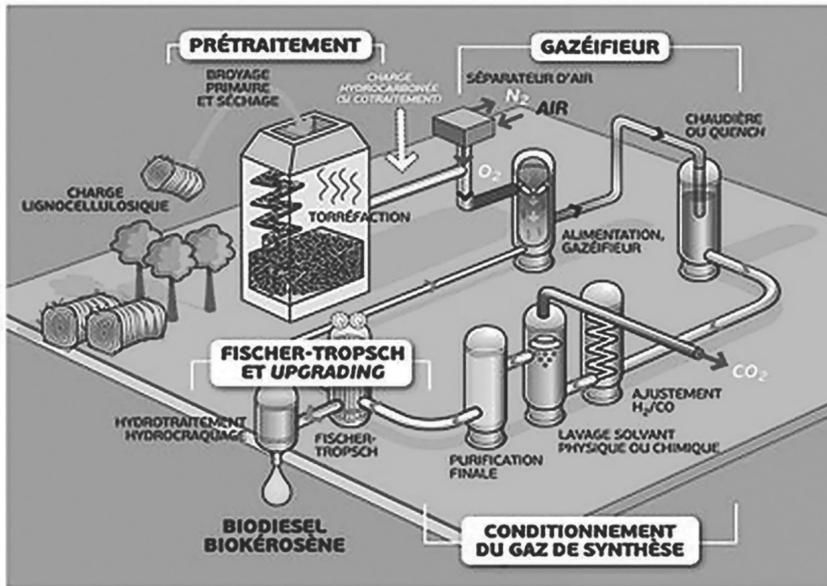
Le procédé Fischer-Tropsch complet peut être décomposé en trois étapes principales : la gazéification, la synthèse et les traitements de finition.

La première étape du procédé, dite étape de gazéification, qui peut être appliquée à partir de différentes matières premières carbonées, produit un mélange de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène (H₂) appelé « gaz de synthèse¹¹ ». Ce gaz de synthèse est ensuite purifié et envoyé vers une unité de synthèse (réacteur chimique Fischer-Tropsch), puis, étape de finition, vers une unité d'hydroisomérisation d'une technologie proche de celle utilisée pour la filière HEFA précédemment décrite.

Les points-clés de l'application de ce procédé à la biomasse sont la collecte et la préparation de la biomasse, qui est dispersée et dont le contenu énergétique est modéré, nécessitant des étapes de préconditionnement, l'étape de gazéification et de purification des gaz et, enfin, le rendement de conversion en biocarburant ainsi que le rendement énergétique du procédé.

Les performances en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre sont extrêmement intéressantes : les études s'accordent sur une valeur de réduction de l'ordre de 80 à 90 %.

¹¹ C'est, par exemple, le très classique gaz de coke, très longtemps utilisé comme gaz de ville.

Chaîne de production de biogazole et biokérosène de 2^e génération

IFPEN

Figure 4.9: Procédé Fischer-Tropsch (Biomass to Liquid) [source : IFPEN, projet BioTFuel].

De même que pour la filière HEFA, la filière FT permet une coproduction de gazole et de biojet fuel et, ainsi, un meilleur ajustement à la demande et donc une taille optimale des unités de production.

Par ailleurs, le cotraitement de tout ou partie de la biomasse en mélange avec d'autres matières premières carbonées comme les charbons, les résidus pétroliers ou encore les déchets organiques, peut constituer une solution intermédiaire de moyen terme si la disponibilité de la biomasse n'est pas suffisante. Ce cotraitement permet par ailleurs d'augmenter les capacités et de profiter à plein de l'effet d'échelle. C'est un point-clé car une grande partie du coût de cette filière est liée aux investissements.

La voie « pyrolyse » (HPO)

La première étape du procédé d'hydrotraitement d'huiles de pyrolyse consiste en un traitement thermique de la charge lignocellulosique afin d'obtenir un produit liquide, appelé liquéfiat ou biohuile. Ce produit intermédiaire est ensuite traité par

des unités dites d'hydrotraitement afin d'aboutir à un produit fongible. Le schéma ci-dessous résume les principales étapes de ce type procédé :

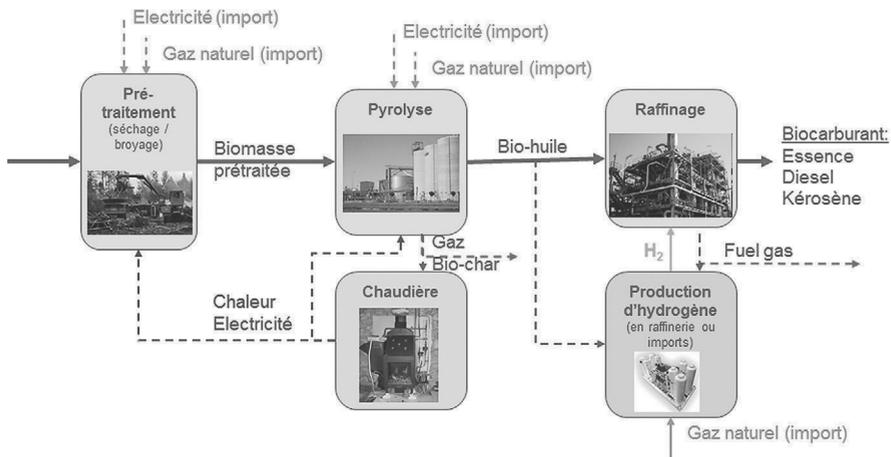


Figure 4.10 : Description des principales étapes HPO (source : IFPEN).

Les principaux avantages de ce type de procédé résident dans la possibilité de procéder de façon déportée à l'étape de pyrolyse de la biomasse. Les unités de prétraitement et de pyrolyse pourraient en effet être positionnées à proximité des ressources de biomasse, permettant ainsi de n'avoir à transporter sur des distances importantes que la biohuile, produit liquide plus facilement transportable et d'un volume très réduit. Ces unités sont également caractérisées par la flexibilité de la biomasse utilisable (lignocellulose en provenance de cultures dédiées, de déchets de l'industrie papetière ou du bois, de résidus agricoles...).

Il est également intéressant de noter, comme le montre le schéma ci-dessus, que des co-produits tels que des gaz de pyrolyse ou des charbons (biochar) sont également produits, qui pourraient permettre la production de chaleur et d'hydrogène ou d'engrais à partir des charbons, améliorant ainsi le bilan global de l'unité.

Les travaux menés sur ce type de filière montrent un potentiel très intéressant de réduction des émissions de gaz à effet de serre (> 60%), avec des potentiels d'optimisation principalement au niveau de la logistique biomasse et de la valorisation des co-produits (gaz, biochar...).

Enfin, ces filières pourraient permettre la production de carburants routiers (gazole, mais aussi essences), ce qui autoriserait une synergie extrêmement

intéressante en terme de valorisation locale des produits et donc de taille d'unité.

En terme économique, les projections faites montrent là aussi un potentiel fort de ce type de procédés pour permettre la production de biojet fuels à un coût acceptable vis-à-vis des filières fossiles.

Un certain nombre d'acteurs développent actuellement ce type de filières. Ainsi, IFPEN a signé en 2013 un accord avec la société canadienne *Dynamotive* afin de développer la partie hydrotraitement des produits en provenance de ses unités industrielles de pyrolyse. On peut également citer parmi les acteurs le groupe américain *UOP* ou encore *VTT* en Finlande. Un groupe de travail a également été créé au sein de l'ASTM afin de certifier dans les années à venir cette filière.

SYNTHÈSE

Les filières de production de biojet fuels sont donc multiples et possèdent des caractéristiques différentes, aussi bien en terme de type de biomasse utilisable, de type de produits fournis (biojet fuels, mais aussi carburants routiers ou produits de spécialités) que de maturité. Le tableau ci-dessous tente de qualifier chacune des filières suivant les critères clés expliqués plus haut suivant une notation allant de 1 à 5, 5 étant la meilleure note.

Filières	Maturité Technologique actuelle	Disponibilité immédiate de la ressource	Volume potentiel de la ressource	Compétitivité économique actuelle (vs. fossile)	Performance environnementale prospective	Certification
HEFA et HV	5	5	2	3	2	5
HEFA ex levures/ algues	2	1	3	1	3	5
DSHC fermentation sur sucres	4	5	3	3	2	4
DSHC fermentation sur BLC	2	2	4	1	3	1
DSHC catalyse sur sucres	3	5	3	3	2	3
DSHC catalyse sur BLC	2	2	4	1	3	1
ATJsur sucres	3	5	3	2	2	3
ATJ sur BLC	2	2	4	1	3	1
BTL	3	2	4	3	4	5
HPO	2	2	4	3	4	2

Tableau 4.2 : Synthèse des nouvelles filières (BLC = biomasse lignocellulosique).

Ce tableau peut être utilement complété par le tableau 4.3 donnant le rendement de conversion massique des principales filières.

Filière	Matière première	% massique maximal théorique de conversion en biocarburants liquides (par rapport à la matière première)	% massique maximal théorique de conversion en biojet fuel (par rapport à la matière première)
BtL	Bois sec (sans apport de chaleur et d'hydrogène)	~ 25 % m	~ 10 % m
HEFA <i>Hydrotreated Esters and Fatty Acids</i>	Huile végétale	~ 85 - 87 % m	~ 65 - 70 % m
DSHC <i>Direct Sugar to. HydroCarbons</i>	Sucres	~ 25 % m	~ 25 % m
	Biomasse lignocellulosique (sèche, à 30% de lignine)	~ 18 % m	~ 18 % m
AtJ <i>Alcohol to jet</i>	Sucres	≈ 50 % m (éthanol) ≈ 41 % m (butanol)	~ 25 % m (quel que soit l'alcool intermédiaire)
	Biomasse lignocellulosique (sèche, à 30% de lignine)	≈ 35 % m (éthanol) ≈ 28 % m (butanol)	~ 18 % m (quel que soit l'alcool intermédiaire)

Tableau 4.3 : Rendements massiques théoriques maximaux de conversion (sources : groupe de travail, entretiens).

La figure 4.11 issue du tableau 4.2 visualise le tableau ci-dessus pour les filières dont la maturité technologique est la plus avancée.

Au-delà de la classification de ces différentes filières les unes par rapport aux autres, il ressort un handicap commun qui est la compétitivité économique par rapport au fossile. C'est la raison majeure de la difficulté rencontrée par les acteurs pour développer une filière biocarburant aéronautique.

Le schéma ci-dessous propose un scénario de déploiement temporel des différentes filières en supposant que le handicap de coût puisse être comblé par des mesures publiques *ad hoc* (au niveau mondial et neutre en termes de filière) et que chaque filière trouve sa place. La première hypothèse (mesure publique) est

relativement compromise par les discussions récentes à l'OACI qui ne dégagent aucune certitude. La seconde hypothèse (non compétition entre filières) est probablement trop optimiste ; certaines filières s'avèreront moins compétitives et moins performantes que les autres et seront donc vouées à disparaître.

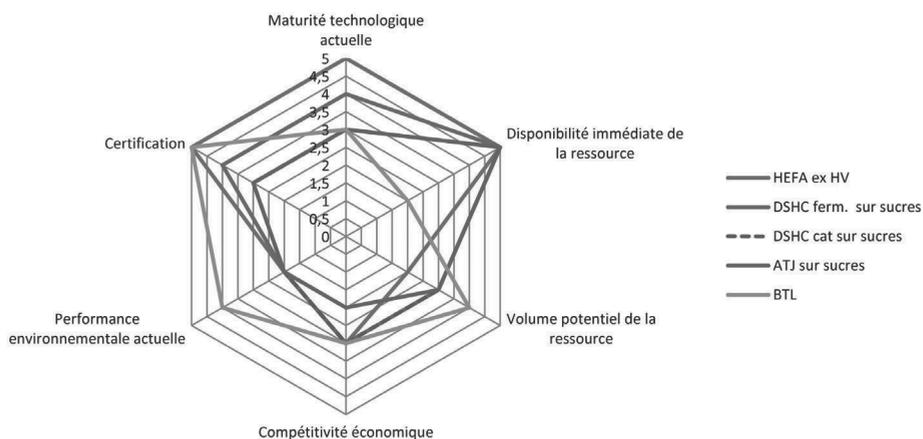


Figure 4.11 : Comparaison des filières les plus matures (source : IFPEN).

Déploiement temporel des filières biojet

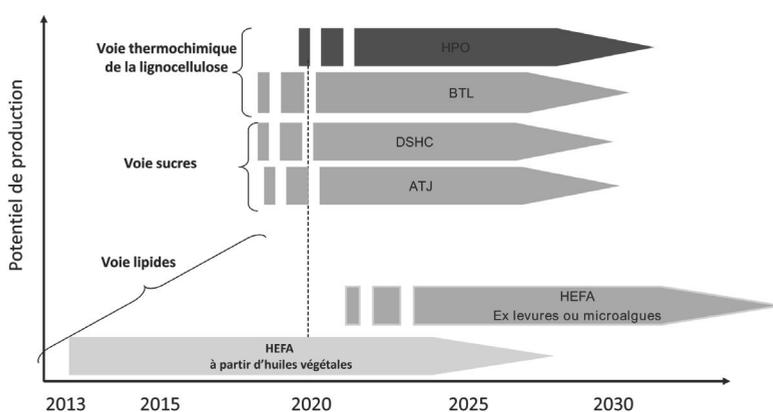


Figure 4.12 : Proposition de classement des différentes filières en termes de maturité/capacité de production (source : IFPEN).

LE CONTEXTE POLITIQUE ET LES PARTENAIRES

OBSTACLES À PASSER

Disponibilité de la biomasse

L'article L211-2 du code de l'énergie, issu de la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, considère que la biomasse est une source potentielle d'énergie. Il la définit comme : « la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales issues de la terre et de la mer, de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers ». L'accent porté à la biodégradation est restrictif dans la mesure où la biomasse peut être transformée par des moyens thermochimiques (filrière BtL, filières par pyrolyse).

Il existe donc quatre secteurs économiques susceptibles de produire de la biomasse :

- ▶ l'agriculture ;
- ▶ la sylviculture ;
- ▶ l'aquaculture ;

- les industries ayant traité de la matière organique vivante, y compris du bois, et générant des co-produits et des déchets organiques.

Toute biomasse est le résultat de la photosynthèse qui produit essentiellement des sucres, elle est par nature renouvelable. La production annuelle de biomasse dans le monde a donné lieu à diverses estimations. Le total de la production annuelle de biomasse terrestre se situerait autour de 120 Gt de matière sèche par an, ce qui est considérable, mais seulement une fraction, environ 21 Gt de matière sèche est effectivement récupérée aujourd'hui, ce qui correspond à un potentiel énergétique de 9 000 Mtep (PCI de la matière sèche estimée à 0,43 tep/t). Cette biomasse peut prendre différentes formes, ce peut être une biomasse naturelle ou une biomasse provenant d'une culture ; pour cette dernière, on doit distinguer le produit direct de la culture et les résidus agricoles valorisables dont le potentiel mondial est estimé à 5 Gt/an.

La biomasse récupérée est déjà affectée à différents usages traditionnels dans nombre de pays : alimentation, chauffage, éclairage et production d'électricité. En France, par exemple, la ressource bois-énergie sert au chauffage domestique et à la production de chaleur ou d'électricité. Si l'allocation de la biomasse est préférentiellement orientée vers la chaleur et l'électricité, comme cela paraît être le cas en France (32 projets sélectionnés en janvier 2010 par le Grenelle de l'environnement), la part disponible pour la production de biocarburants, tous moyens de transport confondus, risque d'être faible. Si l'allocation précédente tourne autour de 70 % et si l'on tient compte des rendements de conversion de la biomasse sèche en biocarburants, la production mondiale de ces derniers avoisinera 450 Mt/an (projection Total). Et si le poids relatif du transport routier reste constant, les biojet fuels représenteront au mieux 60 Mt/an. Les avions arriveront difficilement dans ces conditions à tous voler avec du biojet fuel !

La capacité d'extension des cultures destinées à la production de biocarburants continue à faire débat. Deux questions sont souvent abordées :

- y a-t-il une compétition entre la production de matières premières pour la nourriture et la production de matières premières pour les biocarburants ? En ce qui concerne la concurrence éventuelle avec l'alimentation, la production d'aliments en 2010 permettrait, selon la FAO, de nourrir 12 milliards d'êtres humains et peut encore progresser. Les maux que constituent les famines et la malnutrition sont indéniablement la

conséquence de problèmes d'accès et non d'offre. En outre, en mai 2013, un rapport de la Banque mondiale¹² démontre que l'impact des biocarburants sur les prix de l'alimentation a été très exagéré dans le passé : les variations des prix proviennent essentiellement du prix de l'énergie (plus de 50 %) et des taux de change qui représentent au total les 2/3 des variations ;

- l'impact sur le changement climatique. Les premières analyses de cycle de vie (ACV) ne prenaient pas en compte le changement indirect d'affectation des sols (CASI ou iLUC, *indirect Land Use Change*), qui correspond au déplacement, au bénéfice d'un biocarburant, d'une production alimentaire sur un autre sol. Des études ont été menées pour estimer ces effets. La Commission européenne a choisi de s'appuyer sur une étude de l'IFPRI (*International Food Policy Research Institute*) pour construire sa proposition de nouvelle Directive sur les énergies renouvelables d'octobre 2012. La Commission européenne proposait d'abaisser l'objectif actuel de 10 % d'énergies renouvelables dans les transports en 2020 à seulement 5 %. L'étude de l'IFPRI a été remise en cause, notamment par l'INRA¹³, en juillet 2013, qui estime que la progression des rendements a été insuffisamment prise en compte, ce qui conduit à une surestimation des effets indirects d'un facteur 5 pour l'étude IFPRI. En septembre 2013, le Parlement européen a proposé de relever le plafond à 6 %. En décembre 2013, le Conseil européen n'a pas trouvé d'accord sur la proposition de la Présidence lithuanienne de l'UE. Cette proposition comprenait un plafond relevé à 7 %, mais certains pays souhaitaient plus que 7 % et d'autres moins de 7 %.

Cette incertitude impacte fortement les sociétés françaises spécialisées qui se sont organisées pour atteindre l'objectif de 10 % en 2020.

¹² Policy Research Working Paper – Long-Term Drivers of Food Prices: http://www-wds.worldbank.org/servlet/WDSContentServer/WDSP/IB/2013/05/21/000158349_20130521131725/Rendered/PDF/WPS6455.pdf

¹³ INRA « Le changement d'affectation des sols induit par la consommation européenne de biodiesel: une analyse de sensibilité aux évolutions des rendements agricoles », juin 2013, <http://prodinra.inra.fr/ft?id=%7B7858309A-82DB-4D52-9B5C-966887EBDEC3%7D>

Pour le secteur aéronautique, l'objectif européen de 2 Mt de biojet fuels en 2020, qui correspond à un modeste 3,5% de la consommation prévue, n'est pas remis en cause, mais reste très ambitieux.

Concurrences d'usage de la biomasse

Au-delà des problèmes évoqués précédemment d'affectation des terres et d'utilisation de la biomasse pour la production de chaleur et d'électricité, il existe des compétitions émergentes ou classiques pour l'usage de la biomasse.

Une compétition récente vient de l'utilisation de la biomasse pour créer des produits de spécialité. Le concept de bioraffinerie (L'écosystème bioraffinerie, Daniel Thomas, Conférence Prospective 2100, 4 avril 2013), qui bénéficie de l'appui des pouvoirs publics, des experts des biotechnologies et des responsables du monde agricole, est fondé sur le principe d'une valorisation économique optimale des produits et déchets agricoles. Il vise donc, outre la bioénergie et les biocarburants, trois marchés en développement : celui des biomolécules (colles et adhésifs, intermédiaires chimiques, solvants, biolubrifiants, surfactants...), celui des biomatériaux (fibres, polymères, textiles, plastiques, packaging...) et celui des bio-ingrédients (produits cosmétiques, compléments nutritifs...). Le nombre de bioraffineries européennes croît, qu'il s'agisse de bioraffineries exploitant de la biomasse importée (cas de la Belgique et des Pays-Bas) ou de bioraffineries utilisant une biomasse locale (en France, bioraffinerie de Pomacle-Bazancourt rebaptisée Institut européen de la bioraffinerie Reims – Champagne-Ardenne). Certaines bioraffineries réorientent leur production vers des molécules biosourcées qui présentent un meilleur potentiel économique que les biocarburants (par exemple GEVO et Chemtex). Certaines filières potentielles de biocarburant comme celle de Global Bioénergies, dont la principale production intermédiaire est l'isobutène, visent une optimisation comparable.

Une seconde compétition, plus ancienne, est celle des moyens de transport pour l'utilisation des biocarburants. La consommation de carburant par le transport routier est plus importante que celle du transport aérien : le rapport est voisin aujourd'hui de 6,5 en France. Le développement des biocarburants routiers (biocarburants de première génération) a été entamé depuis plus de quinze ans et a donné naissance à une industrie structurée ; cette industrie

prépare sa mue vers les biocarburants de seconde génération. Si le rapport entre les consommations respectives du routier et de l'aérien se maintient dans l'avenir, l'aérien restera un client mineur avec toutes les conséquences que cela implique.

Une conclusion partant de ces considérations est que la biomasse récupérable n'étant pas en quantité illimitée et que ses usages étant nombreux, il manque peut-être un arbitrage clair au niveau des pouvoirs publics pour définir les priorités d'usage. Certains rapports comportent cependant des recommandations : le rapport du CGEDD sur les usages non alimentaires de la biomasse indique par exemple la hiérarchie suivant des usages : matériaux, recyclage, transports, chaleur, électricité.

Aspects économiques

L'économie des biojet fuels comprend au moins deux aspects : d'une part, le coût récurrent de production et, d'autre part, le coût fixe des investissements à réaliser pour leur production.

Concernant le coût récurrent, il existe de nombreuses informations contradictoires. Les documents relevant de la communication laissent espérer des coûts comparables à celui du jet fuel conventionnel. Les productions effectives en quantité limitée, à fin de démonstrations, de biojet fuels spécifiés (BtL et HEFA) indiquent plutôt un coût deux à trois fois supérieur à celui du jet fuel. Les projections pour la production de masse utilisent des modèles et aboutissent à une conclusion situant le coût des biojet fuels légèrement au-dessus de celui du jet fuel ; par exemple, pour la filière HEFA partant du soja (Market Cost of Renewable jet fuel Adoption in the United States, PARTNER Project 31 report, March 2013), il est indiqué que l'huile de soja devrait atteindre 172 \$/bl en 2020, à comparer à 144 \$/bl pour le jet fuel. Pour une production conjointe de biodiesel et de biojet fuel, IFPEN estime que le biojet fuel sera plus coûteux de 30 % que le biodiesel, en raison des caractéristiques plus exigeantes du biojet fuel. La compétitivité économique des biojet fuels n'est donc pas acquise ; elle dépendra dans l'avenir de deux facteurs : les progrès technologiques des procédés de transformation susceptibles de faire baisser le coût des biojet fuels, l'évolution du prix du pétrole et celle corrélative du prix du jet fuel.

Des estimations ont été réalisées dans différents programmes comme SWAFEA pour les investissements à réaliser pour la production de masse. Si tous les besoins de l'aéronautique devaient être couverts par les biojet fuels, ce sont des centaines de milliards de dollars qu'il serait nécessaire d'investir. Les chiffres obtenus sont le résultat d'une modélisation.

La situation présente est donc complexe et peut se résumer comme suit : les biojet fuels seront chers, il n'y a pas aujourd'hui de marché et, par conséquent, pratiquement pas d'investissements financiers.

ALLIANCES OBJECTIVES

La position des compagnies aériennes et des constructeurs

Les compagnies aériennes font face à deux défis simultanés qui devraient perdurer dans l'avenir : réduire l'impact de l'aviation sur le changement climatique, ce qui a amené l'IATA à définir d'ambitieux objectifs pour 2050, et maintenir une santé financière fragile. Les biojet fuels sont considérés par les compagnies aériennes comme l'un des facteurs permettant de réduire les émissions chimiques de l'aviation de façon significative. Par contre, le coût des biojet fuels constitue un obstacle sérieux. La part du carburant dans le coût opérationnel dépend du type d'avion et de mission, mais peut représenter jusqu'à 40% ; l'équilibre financier est fortement impacté par le prix du carburant, comme cela a été le cas en 2008 lorsque le cours du jet fuel a atteint momentanément 170 \$/bl. Aucune compagnie aérienne ne souhaite devenir producteur de biojet fuels ni même de jet fuel, si l'on excepte Delta Airlines qui a acheté une raffinerie pétrolière.

Tous les grands constructeurs comme Airbus, Boeing, Bombardier et Embraer manifestent un réel intérêt pour les biojet fuels. Cet intérêt se manifeste par leur participation à de nombreux groupes de travail internationaux et à la plupart des programmes de recherche coopératifs, ainsi que par la signature d'accords avec des universités et des producteurs de biojet fuels. Ces constructeurs ont adopté une position de « catalyseur » ou de facilitateur en vue de favoriser l'essor des biojet fuels dans des conditions techniquement satisfaisantes de qualité.

Les questions de production de masse et de compétitivité économique subsistent néanmoins.

Quelles organisations à mettre en place ?

Les grands acteurs du transport aérien n'ont pas vocation à fabriquer de nouveaux carburants et n'ont pas de relation profonde avec l'agriculture. Toute organisation doit donc s'appuyer sur les structures et sociétés existantes dont la spécialité est l'étude et la production de carburant. Ces structures et sociétés sont déjà fortement impliquées dans les biocarburants routiers et ont tissé des réseaux avec les fournisseurs de biomasse. En outre, pour ce qui concerne les pétroliers, il est apparu que la production de biojet fuels s'accompagnera de celle de biodiesel et de bionaphta. Il faut aussi signaler la proposition d'une voie originale récente consistant à mélanger un faible pourcentage de biodiesel Green Diesel TM (UOP) avec le jet fuel conventionnel.

Un préalable à toute organisation est de faire admettre que l'aéronautique a des besoins spécifiques qui appellent une réponse sur le moyen/long terme ; cette idée semble progresser. Une action devrait porter sur la sensibilisation du secteur amont produisant la biomasse à la problématique aéronautique. Le secteur aéronautique peut en effet constituer une opportunité pour compenser, par exemple, une éventuelle baisse des objectifs européens relatifs aux carburants routiers.

Une initiative appelée *Biofuel Initiative France* a été mise sur pied par Airbus, Air France, Safran et Total en juin 2013. Son extension aux principales sociétés françaises s'investissant dans la biomasse pourrait être utile, à l'image de ce qui existe aux États-Unis (*Farm and Fly Initiative 2012*).

LE RÔLE DES POUVOIRS PUBLICS

Le rôle des pouvoirs publics est double : réaliser de difficiles arbitrages entre les besoins et dégager les moyens financiers cohérents avec la politique définie. La situation est très variable suivant les pays.

Les États-Unis bénéficient d'une réglementation stable, d'une coordination forte entre exploitants agricoles et producteurs de biocarburants et du dynamisme reconnu des sociétés industrielles. Une estimation des aides gouvernementales annuelles aux biocarburants s'établit à deux milliards de dollars. Des objectifs sont fixés pour 2020 tant pour l'aviation militaire que pour l'aviation commerciale (*PARTNER Project 31 report*, déjà cité).

L'Europe s'est organisée en matière de biocarburants pour l'aéronautique autour de l'*European Advanced Biofuels Flightpath* qui se donne pour objectif une production de deux millions de tonnes de biojet fuels par an en 2020. Des programmes de recherche tels que SWAFEA ont permis de cerner les besoins et d'ébaucher les solutions. Le programme ITAKA (*Initiative Towards sustAinable Kerosene for Aviation*) démarré fin 2012 vise l'établissement d'une *Supply chain* complète partant de la culture de cameline pour arriver au biojet fuel; une production de 4 000 tonnes est prévue par Neste Oil.

Le développement des biocarburants routiers de première génération a été aidé par une aide fiscale, la réduction de la TICPE (taxe intérieure de consommation des produits énergétiques). Les aides permettant de promouvoir les biocarburants de deuxième génération peuvent prendre plusieurs formes. Les projets français *Syndièse* et *BioTfuel*, qui ont vocation à déboucher au cours de la prochaine décennie sur des unités de production de biodiesel et de biojet fuel, ont reçu des aides R&D; *BioTfuel* a, par exemple, bénéficié d'une aide de 30 millions d'euros de l'Ademe, à laquelle s'est ajouté un apport régional (Picardie/FEDER) de 3,2 millions d'euros. La TGAP (taxe générale sur les activités polluantes) pourrait ultérieurement intervenir.

Le rôle des pouvoirs publics est essentiel: il doit se traduire par une vision long terme, un cadre réglementaire stable et, si possible, des incitations économiques. Ce sont les conditions indispensables pour attirer les investissements privés.

CONCLUSIONS

Le biojet fuel est la solution mise en avant par l'aviation commerciale pour répondre à sa double problématique de raréfaction des ressources fossiles et à l'indispensable réduction de ses émissions chimiques contribuant au changement climatique. Du fait des quantités requises, qui sont relativement faibles si on les compare aux quantités correspondantes des transports terrestres, les nécessités d'investissement et d'infrastructures pourraient être assez progressives, même si elles correspondent à des sommes considérables. L'implication des constructeurs et des compagnies aériennes sera essentielle pour parvenir à maîtriser la part du coût du carburant dans le prix du billet.

Des efforts considérables ont été réalisés dans le domaine des technologies : de nombreuses voies de production de biojet fuels, parfaitement compatibles avec les impératifs de spécification et d'opérabilité de jet fuel fossile, ont été développées. Plusieurs d'entre elles sont certifiées (SPK, HEFA) ou sont en voie de l'être.

Le verrou pour la production de masse de biojet fuels est essentiellement économique pour les raisons suivantes :

- ▶ les technologies de production de biojet fuel sont plus complexes que celles utilisées aujourd'hui pour les carburants routiers. La nécessité pour les biojet fuels de reproduire les propriétés du jet fossile impose une conversion plus poussée de la biomasse pour obtenir un carburant sans

oxygène ; ceci rend les biojet fuels structurellement plus coûteux que les carburants routiers ;

- ▶ dans un secteur d'activité internationale, dans lequel le jet fuel n'est pas taxé, les leviers réglementaires (mandat d'incorporation, défiscalisation) des carburants routiers sont inopérants.

De plus, la ressource en biomasse, qu'il s'agisse d'huile végétale, de sucre ou de lignocellulose, n'est pas illimitée. La biomasse est aussi soumise à des concurrences d'usage dans les secteurs énergétiques et non énergétiques. La contribution des biojet fuels à l'offre de jet fuel alternatif risque donc d'être limitée, même si le verrou économique à leur industrialisation parvenait à être surmonté. Le développement du biojet fuel apparaît davantage probable dans les pays disposant de ressources massives de biomasse et en croissance.

Il convient de noter que la France et d'autres pays européens disposent de tous les acteurs et de toutes les compétences qui leur permettraient de se positionner favorablement sur ces filières si elles devaient déboucher industriellement.

ANNEXES

L'ANALYSE DE L'ACADÉMIE DE L'AIR ET DE L'ESPACE

L'Académie de l'air et de l'espace a créé en 2009 une commission Prospective (devenue depuis commission aéronautique civile) qui s'est donné pour objectif de prévoir à l'horizon 2050 l'état du transport aérien. Les travaux synthétisés dans plusieurs rapports ont donné lieu à l'organisation d'une conférence internationale fin mai 2011 à Toulouse *Comment volerons-nous en 2050 ?* et à un dossier bilingue (dossier 38) en novembre 2013. Parmi les différents groupes de travail de la commission Prospective, l'un d'entre eux a travaillé sur l'énergie, c'est-à-dire sur la disponibilité d'un carburant aéronautique à la hauteur des besoins. Les principaux défis auxquels l'aéronautique civile de transport sera inévitablement confrontée d'ici à l'horizon 2050 (énergie, impact sur l'environnement, économie) ont été pris en compte. On se limitera ici à la présentation de la démarche et des principaux résultats obtenus.

a.

La première étape a consisté à estimer quelle sera en 2050 la demande en carburant pour l'aviation civile de transport. Cette étape a comporté deux volets: d'une

part, une prévision de l'évolution du trafic aérien et, d'autre part, une prospective sur les progrès technologiques envisagés. En ce qui concerne le trafic aérien, une corrélation a été établie pour les années passées entre le PIB et le trafic aérien, cette corrélation, assez classique, a été supposée applicable à l'avenir : tout se ramène donc à des hypothèses sur la croissance du PIB au niveau mondial, au niveau européen et au niveau français. On constate ici que l'exercice suppose le recours à des connaissances économiques qui sortent du périmètre propre à l'AAE, ce qui a été fait par une analyse bibliographique. L'AAE est, par contre, plus légitime en ce qui concerne les technologies et une prolongation des tendances passées a été effectuée ; en moyenne, la consommation par passager et 100 km diminue de 1,5 % par an, c'est une vision statistique qui trahit un peu la réalité car on observe plutôt des discontinuités de consommation en passant d'un modèle d'avion à un autre plus récent, ou d'un avion à une variante améliorée (par exemple, on prévoit un gain de 15 % en passant de l'A320 classique à l'A320 neo, ou du 737 NG au 737 MAX).

Les principaux résultats sont les suivants pour le trafic mondial :

- ▶ le nombre de passagers transportés sera multiplié par trois et atteindra 7,7 milliards en 2050 ; les PKT (passagers kilomètres transportés) seront multipliés par 3,1, ce qui signifie que la distance moyenne parcourue par un passager sera légèrement augmentée ;
- ▶ la consommation de jet fuel sera multipliée par deux, elle atteindra 450 à 500 Mt par an en 2050 en intégrant les différents segments aéronautiques (240 à 250 Mt en 2010) ;
- ▶ le nombre d'avions de transport, compte tenu du renouvellement des flottes et des avions de fret, sera multiplié par deux pour atteindre 43 000 ;
- ▶ les émissions de CO₂ seront, sauf rupture technologique jugée improbable, multipliées par 1,6, les émissions de NO_x seront stabilisées et les émissions sonores diminuées de 15 à 20 %.

Ces prévisions sont plus modestes que celles publiées par les grands constructeurs Airbus et Boeing qui établissent chaque année une prévision pour les vingt ans à venir (Airbus : *Global Market Forecast*, Boeing : *Current Market Outlook*). Il a été en effet observé que, par le passé, ces prévisions avaient été quelquefois optimistes et que le marketing pouvait influencer les résultats. Les prévisions de l'AAE sont aussi celles du rapport de l'Académie des sciences (*La recherche scientifique face aux défis de l'énergie*, Éditions EDP Sciences - Décembre 2012).

b.

La seconde étape s'est intéressée aux différentes possibilités permettant de faire face à la demande à l'horizon 2050. Elle s'est orientée suivant plusieurs directions :

- ▶ une synthèse des documents disponibles touchant la prospective pétrolière, en particulier ceux de l'IEA (*International Energy Agency*), de l'EIA (*US Energy Information Agency*) et de l'ASPO (*Association for the Study of Peak Oil*). Les prévisions sont très dispersées, même à l'horizon 2030 : la fourchette est de 3 000 à 6 500 Mt (ou 65 à 140 Mbl/j). Il a paru raisonnable de tabler sur un plafond de production entre 2030 et 2040 se situant entre 90 et 100 Mbl/j, suivi d'une lente décroissance ;
- ▶ si la fraction de pétrole convertie en jet fuel reste inchangée, une pénurie pourrait se manifester dès 2030, ce qui conduit à étudier d'autres voies de production. L'élargissement à 10 % de la coupe kérosène serait possible sans modification importante des raffineries existantes (source IFPEN). Dans cette hypothèse, il faudrait produire autour de 100 Mt/an (ou 2,2 Mbl/j) de carburant aéronautique alternatif, soit 20 % de la demande du transport aérien. L'élargissement à 15 % et au-delà est techniquement envisageable par hydrocraquage de coupes lourdes, mais au prix d'une augmentation sensible du prix résultant de l'adaptation des raffineries et de la production en quantité d'hydrogène. Ces solutions « pétrolières » induisent donc des concurrences d'usage et/ou des augmentations significatives de prix et n'apportent aucun gain environnemental pour les émissions de CO₂, il faut donc envisager d'autres voies de production ;
- ▶ les voies de production à partir de diverses ressources fossiles (pétroles extra-lourds, schistes bitumineux, charbon, gaz naturel) ont été étudiées. La quasi-totalité de ces solutions se heurtent à la question environnementale, surtout pour les pétroles extra-lourds, les schistes bitumineux et le charbon, du moins en l'absence de capture et séquestration du CO₂ lors de la production. Le GTL (*Gas To Liquid*) se présente un peu mieux, sa production de CO₂ ne serait que de 15 % supérieure à celle du jet fuel conventionnel, la technologie est bien maîtrisée (pilote ENI-IFP, usines du Qatar) ; mais la production de 100 Mt/an de GTL nécessiterait de mobiliser 8 % de la production actuelle de gaz naturel, ce qui induit une concurrence

d'usage. Les gaz et pétrole de schistes et les gaz de houille ont été envisagés, mais sans approfondir la question en raison des sérieux problèmes environnementaux que leur utilisation semble poser ;

- les biocarburants sont apparus de manière assez naturelle comme les seuls carburants alternatifs car à la fois sérieusement envisageables et susceptibles d'être renouvelables.

Si, donc, les biocarburants apparaissent comme prometteurs, ils posent cependant nombre de questions non encore pleinement résolues.

Caractère durable et gain environnemental

La preuve du gain environnemental en terme d'émissions de CO₂ et de GES ne peut être obtenue qu'à l'aide d'analyses de cycle de vie WTW (*Well To Wake*). Les différentes études de référence (PARTNER, SWAFEA...) ne s'accordent pas totalement sur les gains ; d'autres projections semblent faire preuve d'un grand optimisme. Ces divergences s'expliquent par au moins deux raisons : les ACV n'intègrent pas toutes les mêmes postes d'émission (en particulier en ce qui concerne les changements d'affectation des sols directs et indirects, de la forte dépendance de la productivité des sols aux conditions climatiques et du recours à des intrants et à l'irrigation).

Disponibilité de la biomasse

La disponibilité d'une quantité de biomasse à la hauteur de la demande suppose celle de surfaces mobilisables à cette fin et pose le problème de la productivité des surfaces utilisées pour les plantes dédiées. Des projections ont été réalisées pour quelques plantes « à la mode » (jatropha, curcas, cameline, salicorne), les déchets forestiers et les micro-algues. La production de 100 Mt/an de biojet fuel ne paraît pas hors de portée à condition d'utiliser des terres cultivables non utilisées aujourd'hui et une agriculture intensive. Il est cependant à craindre une concurrence d'usage de la biomasse, notamment dans le cadre des bioraffineries.

Prix

Une synthèse bibliographique a à aussi été effectuée. Les biocarburants aéronautiques sont plus chers d'un facteur 2 à 3, selon les modèles utilisés, que le jet fuel conventionnel. Or le poste carburant pèse aujourd'hui environ 30% dans le coût d'exploitation des avions de transport et la santé financière des compagnies aériennes est très sensible au coût du carburant (le coût actuel du jet fuel est proche de 125 \$/bl). Il sera difficile d'utiliser dans un proche avenir les biocarburants aéronautiques et il faut souhaiter, d'une part, que les investissements énormes à faire pour leur production de masse attirent des investisseurs, et, d'autre part, que l'optimisation des voies de production des biocarburants aéronautiques puisse les rendre économiquement compétitifs.

L'AAE n'a en conséquence pas vraiment conclu sur l'avenir des biocarburants aéronautiques, sauf sur la nécessité d'approfondir les différentes questions soulevées.

L'EXPERTISE DE L'ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES

Héritière du Conseil pour les applications de l'Académie des sciences (CADAS), l'Académie des technologies, la plus jeune des grandes Académies françaises, a été créée en 2000. Elle tire son originalité de la diversité de ses membres : ingénieurs, chercheurs, chefs d'entreprise, médecins, ergonomes, urbanistes, économistes... admis à l'issue d'une procédure rigoureuse. L'Académie des technologies est aujourd'hui forte de 270 membres. Elle peut ainsi aborder les grands sujets technologiques sous tous leurs angles : techniques et technologiques bien sûr, mais aussi sociétaux, environnementaux et économiques. Parmi les douze commissions permanentes constituées en son sein (<http://www.academie-technologies.fr>), deux travaillent sur des sujets connexes au thème du présent rapport

La commission *Énergie et changement climatique* s'intéresse tout particulièrement à la question de la transition énergétique et à l'émergence des énergies renouvelables. Dans le rapport de l'Académie *Vecteurs d'énergie : un guide pérenne pour les choix énergétiques* – éditions Le Manuscrit, 2012, elle

compare les données économiques de production des biocarburants de seconde génération à celles des autres vecteurs d'énergie. L'ambition de ce rapport est ainsi présentée :

« Comment éclairer les choix politiques en matière d'énergie, en prenant en compte à la fois les aspects techniques, économiques et climatiques, notamment l'objectif d'une réduction d'un facteur 4 des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050 ? Quels sont les choix les plus judicieux par rapport aux transitions qui marqueront profondément le paysage de l'énergie dans les cinquante prochaines années : plafonnement prévisible de l'extraction du pétrole et du gaz, accélération du changement climatique ... ? Face aux enjeux majeurs et structurants pour notre société que sont les choix énergétiques, l'Académie des technologies a constitué un groupe de travail au sein de sa commission « Énergie et changement climatique » qui publie un guide pérenne des choix énergétiques. Fondé sur un nouveau paradigme énergétique, cette étude introduit, entre l'offre et la demande, un facteur clef rarement pris en compte jusqu'ici : les vecteurs d'énergie ».

La commission *Biotechnologies* travaille, comme son nom l'indique, sur les applications présentes et futures des biotechnologies. Cet ensemble, issu du foisonnement des connaissances fournies par le développement des sciences du vivant, couvre des domaines très larges selon le secteur de l'industrie qu'il entend irriguer. Dans le domaine de l'environnement, elle a publié *Biotechnologies et environnement* – éditions Le Manuscrit, 2010, qui porte sur la question de l'appréhension de risques, particulièrement sensible auprès du public dans l'application des technologies. L'ambition de ce rapport est ainsi présentée :

« Les biotechnologies tirent parti des propriétés des micro-organismes, des cellules animales et végétales, notamment des enzymes, pour créer de nouveaux produits, de nouvelles méthodes de production et de nouveaux services : elles sont souvent associées aux seuls organismes génétiquement modifiés (OGM) et ont, de ce fait, une image globalement négative. Face à la difficile appréhension des risques et au rejet des technologies qui s'appuient sur ce qui apparaît comme une instrumentalisation du « vivant », il n'est pas facile de redonner confiance aux usagers dans les avancées des technologies dérivant des sciences de la vie. Pourtant les biotechnologies sont à l'œuvre dans notre vie quotidienne et ce depuis toujours avec des produits aussi usuels que la bière,

le vin ou le pain et, plus récemment, avec les possibilités qu'elles offrent dans des secteurs aussi divers que la santé, l'agriculture, l'alimentation, l'industrie chimique, la production d'énergie renouvelable et le traitement des déchets. Bien loin d'exercer des effets négatifs sur l'environnement, les biotechnologies sont l'un des nombreux atouts des entreprises pour assurer un développement respectueux de l'environnement. Sans chercher à faire un plaidoyer pro domo en faveur des biotechnologies, et en se limitant aux seules retombées environnementales de leur mise en œuvre, les exemples rapportés dans cette communication à l'Académie des technologies illustrent à quel point les biotechnologies peuvent avoir un impact favorable sur la préservation, voire la restauration, de notre environnement dans des domaines aussi divers que l'agriculture, le traitement des déchets et des eaux résiduelles, les industries de santé et les industries chimiques ».

La même année, la commission *Biotechnologies* s'est intéressée aux développements en cours pour préparer la deuxième génération des biocarburants. Elle a publié le rapport *Les biocarburants : le développement de la deuxième génération technologique, état d'avancement et scénarios à l'horizon 2030* (éditions Le Manuscrit, 2010), avec le programme suivant :

« Dans un contexte prévisible de raréfaction et, par conséquent, d'augmentation du prix des carburants d'origine fossile, les biocarburants présentent le double avantage d'une production renouvelable et d'un gain énergétique net. De plus, de par leur origine végétale, ces biocarburants permettent une réduction nette des rejets de gaz à effet de serre par rapport aux produits fossiles correspondants. La France s'est engagée de façon volontaire dès le début du ^{xxi} siècle dans la construction de filières industrielles complètes, du champ à l'usine. Celles-ci intègrent les cultures et le stockage de céréales et de betteraves pour la production d'éthanol et celles de colza et de tournesol pour la production de l'huile végétale ; ces matières premières d'origine agricole se substituent, après transformation chimique, respectivement à l'essence et au diesel. Afin d'élargir la palette des matières premières utilisables et, en particulier, de pouvoir utiliser des déchets agricoles, sylvicoles ou ménagers, qui par leur nature n'entreront plus en compétition avec des produits agricoles utilisés également dans l'alimentation, de nouvelles technologies sont actuellement en phase de développement dans plusieurs pays dont la France. L'Académie des technologies fait état de l'avancement de ces développements et esquisse

les scénarios qui, d'ici 2030, au moment où le prix des carburants fossiles deviendra réellement problématique, positionneront les biocarburants comme un élément important, mais sûrement partiel, du bouquet énergétique dédié aux transports terrestres ».

Plus récemment, des groupes de travail des deux commissions ont travaillé sur les sujets suivants : *Méthane* (2012) ; *Biologie de synthèse et biotechnologies industrielles* (2012) ; *Biogaz* (en cours) ; *Pétrole et gaz* (en cours).

FICHES PROJETS ET START-UP

Projet Syndièse

Le projet Syndièse vise à construire une chaîne complète de production de biocarburants de deuxième génération BtL (*Biomass to Liquid*) de taille préindustrielle permettant la transformation de 75 000 tonnes par an de matières lignocellulosiques sèches en 23 000 tonnes de biocarburant, notamment biojet fuel. L'enjeu est de faire la démonstration de la faisabilité industrielle et de la viabilité économique de cette filière dont la production n'entrera pas en concurrence avec les ressources destinées à l'alimentation humaine ou des usages industriels autre que l'énergie. En tant que maître d'ouvrage, le CEA a initié en décembre 2009 des études de conception détaillée de ce projet, mais en 2012, au moment de les finaliser, la société bailleur du procédé de transformation de la biomasse en gaz de synthèse a été mise en liquidation judiciaire, obligeant le CEA à reconfigurer le projet. En collaboration avec la société Air Liquide, le CEA a choisi de se mobiliser pour développer une technologie innovante basée sur un prétraitement mécanique et non thermique de la biomasse. La première phase consiste à tester et optimiser les composants technologiques constitutifs de la chaîne de transformation de la biomasse en gaz de synthèse (BtS) à une échelle représentative de 1 t/h, en utilisant la plate-forme technologique de prétraitement de la biomasse en cours de réalisation à Bure-Saudron (Meuse et Haute-Marne). Dans un second temps, la validation de la chaîne BtS intégrée sera entreprise. À ce point, le programme rejoindrait alors le scénario initial de réalisation du démonstrateur préindustriel de production de biocarburants de

deuxième génération. Suite à la décision du Gouvernement du 4 février 2013 autorisant le CEA à lancer la première phase, les travaux d'aménagement du site retenu par le CEA à Bure-Saudron, la construction de la plate-forme technologique de prétraitement de la biomasse et la réalisation du programme de R&D associé, ont été initiées. La plate-forme technologique de prétraitement de la biomasse sera opérationnelle au second trimestre 2014. Au-delà de répondre aux besoins du projet Syndièse, la volonté du CEA est d'ouvrir l'ensemble de ces infrastructures, des équipements de prétraitement mécanique et thermique et des moyens d'analyse et de caractérisation de la biomasse prétraitée aux communautés académiques et industrielles menant des programmes de R&D dans le domaine du prétraitement de la biomasse à des fins d'usages industriels et commerciaux agrosourcés.

Projet Global Bioenergies

L'émergence de biokérosène est une volonté affichée par de nombreux États et institutions internationales. Les contraintes techniques associées au carburant d'aviation n'ont cependant permis à ce jour l'émergence que d'un petit nombre d'options techniques.

Le procédé Fischer-Tropsch (FT) est utilisé à grande échelle pour convertir le charbon et le gaz naturel en carburant liquide. L'adaptation de ce procédé à l'utilisation de matière première végétale est en cours de développement. Le déploiement de cette approche à grande échelle reste un challenge.

L'hydrogénation d'huiles végétales (voie HEFA) est à ce jour la seule voie biosourcée certifiée. Les huiles végétales sont caractérisées par de faibles rendements à l'hectare, sauf dans le cas de l'huile de palme qui pose des questions environnementales aigües.

La majorité des procédés de bioproduction repose sur des organismes et des voies métaboliques naturelles. La voie *Alcohol to Jet* (AtJ), qui repose sur la conversion de sucres en isobutanol, puis sur la conversion thermochimique de l'isobutanol en isobutène et enfin en carburant jet, a été promue récemment. Sa compatibilité avec les turboréacteurs a été démontrée en mélange 50/50. La compétitivité de ce procédé sera par contre amputée par le poids des nombreuses conversions nécessaires en aval de la fermentation.

Global Bioénergies a été fondée en 2008 pour développer des nouvelles voies métaboliques et permettre la production d'oléfines légères par fermentation directe de sucres. Cette innovation de rupture pourrait permettre de répondre au challenge de la production fermentaire de biojet fuel. On entend par « directe » la production d'isobutène (un hydrocarbure gazeux) par le microorganisme dans le bioréacteur. Cela est à comparer à celle d'un intermédiaire liquide tel que l'isobutanol qui doit être purifié et converti en hydrocarbure par voie thermo-chimique dans le procédé AtJ. Deux avantages opérationnels clés en découlent : une fermentation sans limite de titre et une purification plus facile. Ces avantages permettraient des coûts de production inférieurs et une compétitivité accrue.

L'isobutène peut être converti en divers oligomères et, notamment, en iso-octane (8 carbones), isododécane (12 carbones) et isocétane (16 carbones). L'iso-octane, est le carburant de référence pour les moteurs à essence (indice d'octane de 100). L'isododécane et l'isocétane constituent le carburant AtJ dont la compatibilité a déjà été démontrée. Global Bioenergies développe donc un procédé qui serait plus efficace et plus économique et qui permettrait la production d'un carburant jet de nature similaire à l'AtJ.

Le procédé de Global Bioenergies serait avantageux par rapport aux trois solutions décrites plus haut :

- ▶ il n'aurait pas les coûts opérationnels importants, notamment comparés à la consommation d'énergie du procédé Fischer-Tropsch ;
- ▶ il ne souffrirait pas de la faible productivité à l'hectare des procédés basés sur les huiles végétales ;
- ▶ beaucoup plus direct que l'approche AtJ, il est attendu qu'il serait aussi moins coûteux.

De plus, ce procédé exploite les sucres industriels (une ressource à haut rendement par hectare) et sera compatible avec les ressources de seconde génération (déchets agricoles et forestiers) une fois que les techniques de traitement de ces matières auront été pleinement industrialisées.

L'industrialisation du procédé isobutène est en cours : un premier pilote, installé sur la plate-forme BioDémono opérée par ARD sur le site agroindustriel de Pomacle-Bazancourt sera opérationnel au second semestre 2014. Il aura une capacité de 10 tonnes par an d'isobutène qualité oxydation (additif aux peintures et verre organique) et sera composé d'un fermenteur de 500 l et d'un module de

purification dédié à cette qualité de produit. Le second pilote sera installé dans la plate-forme du Fraunhofer CBP située sur la raffinerie de Leuna en Allemagne et sera opérationnel au second semestre 2015. Ce pilote sera constitué de plusieurs fermenteurs de 5 000 l et d'un module de purification visant l'isobutène haute pureté. D'une capacité annuelle de 100 tonnes il sera compatible avec les autres applications de l'isobutène, dont les carburants.

Ces pilotes constituent l'ultime étape du développement du procédé isobutène avant le lancement de son exploitation commerciale à l'horizon 2017.

Projet KEROSALG

Le projet KEROSALG a pour objectif la réalisation d'un pilote de production de biocarburant aéronautique à partir de lipides d'origine microalgale à l'horizon 2015.

Vision

Les enjeux du projet KEROSALG reposent sur la démonstration de la faisabilité technico-économique de la production de biokérosène d'origine microalgale et de sa pertinence environnementale.

Cette vision se nourrit :

- ▶ d'un principe fort, celui du pragmatisme technico-économique : optimisation des technologies existantes en vue de leur efficacité économique ;
- ▶ d'un parti pris structurant, celui de la covalorisation, basée sur l'intégration de solutions technologiques aux procédés des filières déjà existantes et sur la multi-exploitation des biomasses utilisées.

Son but est d'installer des systèmes de production sur des terres impropres à toute culture en France et dans le monde, en privilégiant dans un premier temps des applications à moyenne valeur ajoutée, mais répondant à des marchés captifs et prioritaires dans un avenir proche (protéines végétales).

État de la technologie

Par voie de conséquence, le projet KEROSALG s'appuie sur un ensemble de technologies pour beaucoup détenues et maîtrisées par les partenaires industriels du projet.

En particulier, le programme de développement met l'accent sur :

- ▶ un procédé intégré de production de microalgues, éco-conçu et visant une valorisation optimale des productions au travers d'une recherche systématique de voies de covalorisation ;
- ▶ un mélange symbiotique de souches microalgales (fort degré de cultivabilité, fort niveau de covalorisation) ;
- ▶ une méthodologie transposable et aisément déployable et contrôlable en vue d'élargir le panel de microalgues cultivables et les zones géographiques exploitables (dont, notamment, une automatisation poussée et des systèmes déportés).

Il s'articule autour des composantes technologiques suivantes :

- ▶ la production d'un mélange adapté d'espèces de microalgues, avec le développement d'un pilote de 50 m³. Le procédé est conçu de manière à optimiser l'efficacité des échanges à moindre coût selon des méthodologies d'optimisation de production extensive ;
- ▶ l'extraction des lipides selon des procédés permettant une transformation économiquement viable ;
- ▶ l'hydrogénation des huiles produites en vue de leur qualification aéronautique, en estimant, d'une part, l'impact économique et énergétique des opérations « conventionnelles » d'hydrogénation et, d'autre part, la faisabilité d'hydrogénation par voie biologique.

Un pilote a été réalisé et qualifié. Des études ainsi que des travaux d'optimisation sont en cours. L'opération du procédé doit permettre la réalisation d'un bilan environnemental précis. Un cas d'application est actuellement à l'étude sur la filière betteravière française.

Investissements

D'une durée de 36 mois, le projet KEROSALG, lancé en mars 2012, dispose d'un budget total de 1,4 millions d'euros dont 0,7 million de subventions supportées par le FEDER. Le projet a reçu un très fort soutien de l'agglomération de Cergy-Pontoise, du département du Val-d'Oise et de la région Île-de-France. Les années 2014 et 2015 ont pour objectif l'optimisation du pilote de production, la qualification des lipides produits et la validation du modèle économique. Une exploitation initiale

est envisagée fin 2015 par l'installation d'une unité de production d'un hectare sur un site producteur de CO₂.

Partenaires

Projet labellisé pôle de compétitivité ASTECH, le projet KEROSALG implique deux PME (PRONOVALG ET PHYCOSOURCE, ainsi que sa filiale PHYCOENERGY), deux laboratoires universitaires (le laboratoire SOSCO de l'université de Cergy-Pontoise, et le laboratoire réactions et génie des procédés de l'ENSIC à Nancy). Par ailleurs, il dispose du support de la Confédération générale des betteraviers (CGB). Enfin il bénéficie de l'appui scientifique de l'IFPEN, du groupe SAFRAN, de l'ONERA et du groupe Airbus.

GLOSSAIRE

ACV	Analyse de cycle de vie
AFI	Assured Fuel Initiative
AFQRJOS	Aviation Fuel Quality Requirements for Jointly Operated Systems
ASTM	Autrefois American Society of Testing and Materials
ACARE	Advisory Council for Research and Innovation in Europe
AtJ	Alcohol to Jet
ATAG	Air Transport Action Group
BLNC	Biomasse lignocellulosique
BtL	Biomass to Liquid
CAAFI	Commercial Aviation Alternative Fuel Initiative
CAEP	Committee on Aviation Environmental Protection
CASI	Changement d'affectation des sols indirect (LUC)
CEI	Communauté des États Indépendants
CH	Catalytic Hydrothermolysis
CORAC	Conseil d'orientation pour la recherche aéronautique civile
CtL	Coal to Liquid
DSHC	Direct Sugar to HydroCarbons
EEE	Espace économique européen

EMHV	Ester méthylique d'huile végétale
EU-ETS	European Emissions Trade Scheme
GtL	Gas to Liquid
FT	Fischer-Tropsch (procédé)
HEFA	Hydroprocessed (ou Hydrotreated) Esters and Fatty Acids
HPO	Hydrotreated Pyrolysis Oil
HV	Huile végétale
IATA	International Aviation Transport Association
IFRI	International Food Policy Research Institute
ITAKA	Initiative Towards sustainable Kerosene for Aviation (projet FP?)
MBM	Market Based Measure
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
OACI	Organisation de l'aviation civile internationale (ICAO)
OEM	Original Equipment Manufacturer
PM	Particulate Matters
RED	Renewable Energy Directive
RFS2	Renewable Fuel Standard 2
SK	Synthetic Kerosene
SKA	Synthetic Kerosene with Aromatics
StA	Sugars to Alkanes
SPK	Synthetic Paraffinic Kerosene
SWAFEA	Sustainable Way for Alternative Fuels and Energy for Aviation
TICPE	Taxe intérieure de consommation des produits énergétiques
TGAP	Taxe générale sur les activités polluantes

AUDITIONS ET MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL

PERSONNALITÉS AUDITIONNÉES

17.04.13	Mme Sylvie Alexandre, <i>CGEDD/CGEJET/CGAAER</i>
22.05.13	M. Chems Chkioua, <i>DGAC</i>
22.11.13	Mme Sabrina Bringtown, <i>Air France</i>
	M. Bernard Bigot, <i>CEA-EA</i>
	M. Marc Delcourt, <i>Global Bioenergies</i>
	MM. Rémi Bernard et Patrick Hivin, <i>Deinove</i>
	M. Nicolas Pasquet, <i>Kerosalg</i>

PRÉSENTATIONS DES MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL

20.03.13	Paul Kuentzmann, <i>AAE</i>
17.04.13	Philippe Marchand, <i>Total</i>
22.05.13	Isabelle Lombaert-Valot, <i>Airbus Group Innovations</i>
28.06.13	Michel Boucly, <i>Sofiprotéol</i>
	Nicolas Kurtsoglou, <i>SNPAA</i>
25.10.13	Marc Gillmann, <i>Total</i>

MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL

Jean Botti, *Académie des technologies*

Jean-Pierre Burzynski, *IFPEN*

Michel Combarnous, *Académie des technologies*

Pascale Demoment, *Total*

Marc Gillmann, *Total*

Bruno Jarry, *Académie des technologies, coprésident du groupe de travail*

Nicolas JEULAND, *IFPEN*

Paul Kuentzmann, *ONERA, Académie de l'air et de l'espace,*
coprésident du groupe de travail

Nicolas Kurtsoglou, *SNPAA*

Isabelle Lombaert-Valot, *Airbus Group Innovations*

Philippe Marchand, *Total*

Pierre Monsan, *Académie des technologies*

Pierre Porot, *IFPEN*

Marc Pélegrin, *Académie des technologies, Académie de l'air et de l'espace*

Jacques Renvier, *Snecma, Académie de l'air et de l'espace*

Julien Rousseau, *Sofiprotéol*

Thierry Stadler, *Pôle IAR*

Benoît Trémeau, *Procethol 2G*

PUBLICATIONS DE L'ACADÉMIE

Les travaux de l'Académie des technologies sont l'objet de publications réparties en quatre collections¹ :

- ▶ Les rapports de l'Académie : ce sont des textes rédigés par un groupe de l'Académie dans le cadre du programme décidé par l'Académie et suivi par le Comité des travaux. Ces textes sont soumis au Comité de la qualité, votés par l'Assemblée, puis rendus publics. On trouve dans la même collection les avis de l'Académie, également votés en Assemblée, et dont le conseil académique a décidé de la publication sous forme d'ouvrage papier. Cette collection est sous couverture bleue.

¹ - Les ouvrages de l'Académie des technologies publiés entre 2008 et 2012 peuvent être commandés aux Éditions Le Manuscrit (<http://www.manuscrit.com>). La plupart existent tant sous forme matérielle que sous forme électronique.

- Les titres publiés à partir de janvier 2013 sont disponibles en librairie et sous forme de ebook payant sur le site de EDP sciences (<http://laboutique.edpsciences.fr/>). À échéance de six mois ils sont téléchargeables directement et gratuitement sur le site de l'Académie.

- Les publications plus anciennes n'ont pas fait l'objet d'une diffusion commerciale, elles sont consultables et téléchargeables sur le site public de l'Académie www.academie-technologies.fr, dans la rubrique « Publications ». De plus, l'Académie dispose encore pour certaines d'entre elles d'exemplaires imprimés.

- ▶ Les communications à l'Académie sont rédigées par un ou plusieurs Académiciens. Elles sont soumises au Comité de la qualité et débattues en Assemblée. Non soumises à son vote elles n'engagent pas l'Académie. Elles sont rendues publiques comme telles, sur décision du Conseil académique. Cette collection est publiée sous couverture rouge.
- ▶ Les « Dix questions à ... et dix questions sur ... » : un auteur spécialiste d'un sujet est sélectionné par le Comité des travaux et propose dix à quinze pages au maximum, sous forme de réponses à dix questions qu'il a élaborées lui-même ou après discussion avec un journaliste de ses connaissances ou des collègues (Dix questions à ...). Ce type de document peut aussi être rédigé sur un thème défini par l'Académie par un académicien ou un groupe d'académiciens (Dix questions sur ...). Dans les deux cas ces textes sont écrits de manière à être accessibles à un public non-spécialisé. Cette collection est publiée sous une couverture verte.
- ▶ Les grandes aventures technologiques françaises : témoignages d'un membre de l'Académie ayant contribué à l'histoire industrielle. Cette collection est publiée sous couverture jaune.
- ▶ Par ailleurs, concernant les Avis, l'Académie des technologies est amenée, comme cela est spécifié dans ses missions, à remettre des Avis suite à la saisine d'une collectivité publique ou par auto saisine en réaction à l'actualité. Lorsqu'un avis ne fait pas l'objet d'une publication matérielle, il est, après accord de l'organisme demandeur, mis en ligne sur le site public de l'Académie.
- ▶ Enfin, l'Académie participe aussi à des co-études avec ses partenaires, notamment les Académies des sciences, de médecine, d'agriculture, de pharmacie ...

Tous les documents émis par l'Académie des technologies depuis sa création sont répertoriés sur le site www.academie-technologies.fr. La plupart sont peuvent être consultés sur ce site et ils sont pour beaucoup téléchargeables.

Dans la liste ci-dessous, les documents édités sous forme d'ouvrage imprimé commercialisé sont signalés par une astérisque. Les publications les plus récentes sont signalées sur le site des éditions. Toutes les publications existent aussi sous forme électronique au format pdf et pour les plus récentes au format ebook.

AVIS DE L'ACADÉMIE

1. Brevetabilité des inventions mises en œuvre par ordinateurs : avis au Premier ministre – juin 2001
2. Note complémentaire au premier avis transmis au Premier ministre – juin 2003
3. Quelles méthodologies doit-on mettre en œuvre pour définir les grandes orientations de la recherche française et comment, à partir de cette approche, donner plus de lisibilité à la politique engagée ? – décembre 2003
4. Les indicateurs pertinents permettant le suivi des flux de jeunes scientifiques et ingénieurs français vers d'autres pays, notamment les États-Unis – décembre 2003
5. Recenser les paramètres susceptibles de constituer une grille d'analyse commune à toutes les questions concernant l'énergie – décembre 2003
6. Commentaires sur le Livre Blanc sur les énergies – janvier 2004
7. Premières remarques à propos de la réflexion et de la concertation sur l'avenir de la recherche lancée par le ministère de la Recherche – mars 2004
8. Le système français de recherche et d'innovation (SFRI). Vue d'ensemble du système français de recherche et d'innovation – juin 2004
 - Annexe 1 – La gouvernance du système de recherche
 - Annexe 2 – Causes structurelles du déficit d'innovation technologique. Constat, analyse et proposition.
9. L'enseignement des technologies de l'école primaire aux lycées – septembre 2004
10. L'évaluation de la recherche – mars 2007
11. L'enseignement supérieur – juillet 2007
12. La structuration du CNRS – novembre 2008
13. La réforme du recrutement et de la formation des enseignants des lycées professionnels – Recommandation de l'Académie des technologies – avril 2009
14. La stratégie nationale de recherche et l'innovation (SNRI) – octobre 2009
15. Les crédits carbone – novembre 2009
16. Réduire l'exposition aux ondes des antennes-relais n'est pas justifié scientifiquement : mise au point de l'Académie nationale de médecine, de l'Académie des sciences et de l'Académie des technologies – décembre 2009
17. Les biotechnologies demain – juillet 2010

18. Les bons usages du Principe de précaution – octobre 2010
19. La validation de l'Acquis de l'expérience (VAE) – janvier 2012
20. Mise en œuvre de la directive des quotas pour la période 2013–2020 – mars 2011
21. Le devenir des IUT – mai 2011
22. Le financement des start-up de biotechnologies pharmaceutiques – septembre 2011
23. Recherche et innovation : Quelles politiques pour les régions ? – juillet 2012
24. La biologie de synthèse et les biotechnologies industrielles (blanches) – octobre 2012
25. Les produits chimiques dans notre environnement quotidien – octobre 2012
26. L'introduction de la technologie au lycée dans les filières d'enseignement général – décembre 2012
27. Évaluation de la recherche technologique publique – février 2013
28. L'usage de la langue anglaise dans l'enseignement supérieur – mai 2013

RAPPORTS DE L'ACADÉMIE

1. Analyse des cycles de vie – octobre 2002
2. Le gaz naturel – octobre 2002
3. Les nanotechnologies : enjeux et conditions de réussite d'un projet national de recherche – décembre 2002
4. Les progrès technologiques au sein des industries alimentaires – Impact sur la qualité des aliments / La filière lait – mai 2003
5. *Métrologie du futur – mai 2004
6. *Interaction Homme-Machine – octobre 2004
7. *Enquête sur les frontières de la simulation numérique – juin 2005
8. Progrès technologiques au sein des industries alimentaires – la filière laitière, rapport en commun avec l'Académie d'agriculture de France – 2006
9. *Le patient, les technologies et la médecine ambulatoire – avril 2008
10. *Le transport de marchandises – janvier 2009 (version anglaise au numéro 15)
11. *Efficacité énergétique dans l'habitat et les bâtiments – avril 2009 (version anglaise au numéro 17)
12. *L'enseignement professionnel – décembre 2010

13. *Vecteurs d'énergie – décembre 2011 (version anglaise au numéro 16)
14. *Le véhicule du futur – septembre 2012 (publication juin 2013)
15. *Freight systems (version anglaise du rapport 10 le transport de marchandises) – novembre 2012
16. *Energy vectors – novembre 2012 (version anglaise du numéro 13)
17. *Energy Efficiency in Buildings and Housing – novembre 2012 (version anglaise du numéro 11)
18. *Les grands systèmes socio-techniques / Large Socio-Technical Systems – ouvrage bilingue, juillet 2013
19. * Première contribution de l'Académie des technologies au débat national sur l'énergie / First contribution of the national academy of technologies of France to the national debate on the Future of energies supply – ouvrage bilingue, juillet 2013
20. Renaissance de l'industrie : construire des écosystèmes compétitifs fondés sur la confiance et favorisant l'innovation - juillet 2014
21. Le Méthane : d'où vient-il et quel est son impact sur le climat? – novembre 2014
22. Biologies blanches et biologie de synthèse (à paraître, 2015)
23. Impact des TIC sur la consommation d'Énergie à travers le monde (à paraître, 2015)

COMMUNICATIONS À L'ACADÉMIE

1. *Prospective sur l'énergie au XXI^e siècle, synthèse de la Commission énergie et environnement – avril 2004, MàJ décembre 2004
2. Rapports sectoriels dans le cadre de la Commission énergie et environnement et changement climatique :
 - Les émissions humaines – août 2003
 - Économies d'énergie dans l'habitat – août 2003
 - Le changement climatique et la lutte contre l'effet de serre – août 2003
 - Le cycle du carbone – août 2003
 - Charbon, quel avenir ? – décembre 2003
 - Gaz naturel – décembre 2003
 - Facteur 4 sur les émissions de CO₂ – mars 2005
 - Les filières nucléaires aujourd'hui et demain – mars 2005
 - Énergie hydraulique et énergie éolienne – novembre 2005
 - La séquestration du CO₂ – décembre 2005

- Que penser de l'épuisement des réserves pétrolières et de l'évolution du prix du brut ? – mars 2007
- 3. Pour une politique audacieuse de recherche, développement et d'innovation de la France – juillet 2004
- 4. *Les TIC : un enjeu économique et sociétal pour la France – juillet 2005
- 5. *Perspectives de l'énergie solaire en France – juillet 2008
- 6. *Des relations entre entreprise et recherche extérieure – octobre 2008
- 7. *Prospective sur l'énergie au XXI^e siècle, synthèse de la Commission énergie et environnement, version française et anglaise, réactualisation – octobre 2008
- 8. *L'énergie hydro-électrique et l'énergie éolienne – janvier 2009
- 9. *Les Biocarburants – février 2010
- 10. *PME, technologies et développement – mars 2010.
- 11. *Biotechnologies et environnement – avril 2010
- 12. *Des bons usages du Principe de précaution – février 2011
- 13. L'exploration des réserves françaises d'hydrocarbures de roche mère (gaz et huile de schiste) – mai 2011
- 14. *Les ruptures technologiques et l'innovation – février 2012
- 15. *Risques liés aux nanoparticules manufacturées – février 2012
- 16. *Alimentation, innovation et consommateurs – juin 2012
- 17. Vers une technologie de la conscience – juin 2012
- 18. Les produits chimiques au quotidien – septembre 2012
- 19. Profiter des ruptures technologiques pour gagner en compétitivité et en capacité d'innovation – novembre 2012 (à paraître)
- 20. Dynamiser l'innovation par la recherche et la technologie – novembre 2012
- 21. La technologie, école d'intelligence innovante. Pour une introduction au lycée dans les filières de l'enseignement général – octobre 2012 (à paraître)
- 22. Renaissance de l'industrie : recueil d'analyses spécifiques – juillet 2014
- 23. Réflexions sur la robotique militaire – février 2015
- 24. Le rôle de la technologie et de la pratique dans l'enseignement de l'informatique (à paraître, 2015)

DIX QUESTIONS POSÉES À...

1. *Les déchets nucléaires – 10 questions posées à Robert Guillaumont – décembre 2004

2. *L'avenir du charbon – 10 questions posées à Gilbert Ruelle – janvier 2005
3. *L'hydrogène – 10 questions posées à Jean Dhers – janvier 2005
4. *Relations entre la technologie, la croissance et l'emploi – 10 questions à Jacques Lesourne – mars 2007
5. *Stockage de l'énergie électrique – 10 questions posées à Jean Dhers – décembre 2007
6. *L'éolien, une énergie du XXI^e siècle – 10 questions posées à Gilbert Ruelle – octobre 2008
7. *La robotique – 10 questions posées à Philippe Coiffet, version franco-anglaise – septembre 2009
8. *L'intelligence artificielle – 10 questions posées à Gérard Sabah – septembre 2009
9. *La validation des acquis de l'expérience – 10 questions posées à Bernard Decomps – juillet 2012
10. Les OGM - 10 questions posées à Bernard Le Buanec - avril 2014

GRANDES AVENTURES TECHNOLOGIQUES

1. *Le Rilsan – par Pierre Castillon – octobre 2006
2. *Un siècle d'énergie nucléaire – par Michel Hug – novembre 2009

HORS COLLECTION

1. Actes de la journée en mémoire de Pierre Faure et Jacques-Louis Lions, membres fondateurs de l'Académie des technologies, sur les thèmes de l'informatique et de l'automatique – 9 avril 2002 avec le concours du CNES
2. Actes de la séance sur "Les technologies spatiales aujourd'hui et demain" en hommage à Hubert Curien, membre fondateur de l'Académie des technologies – 15 septembre 2005
3. Libérer Prométhée – mai 2011

CO-ÉTUDES

1. Progrès technologiques au sein des industries alimentaires – La filière laitière. Rapport en commun avec l'Académie d'agriculture de France – mai 2004

2. Influence de l'évolution des technologies de production et de transformation des grains et des graines sur la qualité des aliments. Rapport commun avec l'Académie d'agriculture de France – février 2006
3. *Longévité de l'information numérique – Jean-Charles Hourcade, Franck Laloë et Erich Spitz. Rapport commun avec l'Académie des sciences – mars 2010, EDP Sciences
4. *Créativité et Innovation dans les territoires – Michel Godet, Jean-Michel Charpin, Yves Farge et François Guinot. Rapport commun du Conseil d'analyse économique, de la Datar et de l'Académie des technologies – août 2010 à la Documentation française
5. *Libérer l'innovation dans les territoires. Synthèse du Rapport commun du Conseil d'analyse économique, de la Datar et de l'Académie des technologies. Créativité et Innovation dans les territoires Édition de poche – septembre 2010 – réédition novembre 2010 à la Documentation française
6. *La Métallurgie, science et ingénierie – André Pineau et Yves Quéré. Rapport commun avec l'Académie des sciences (RST) – décembre 2010, EDP Sciences.
7. Les cahiers de la ville décarbonée en liaison avec le pôle de compétitivité Advancity
8. Le brevet, outil de l'innovation et de la valorisation – Son devenir dans une économie mondialisée – Actes du colloque organisé conjointement avec l'Académie des sciences le 5 juillet 2012 éditions Tec & doc – Lavoisier
9. Quel avenir pour les biocarburants aéronautiques ? (à paraître 2015)

ACADÉMIE DE L'AIR ET DE L'ESPACE

DOSSIERS DES ONZE DERNIÈRES ANNÉES

- n°39 Les Matériaux aéronautiques d'aujourd'hui et de demain, 2014
- n°38 Comment volerons-nous en 2050 ?, 2013
- n°37 Le Traitement des situations imprévues en vol, 2013
- n°36 Quel avenir pour l'industrie aéronautique et spatiale européenne ?, 2013
- n°35 Trafic aérien et météorologie, 2011
- n°34 Une stratégie à long terme pour les lanceurs spatiaux européens, 2010
- n°33 Les Aéroports face à leurs défis, 2010
- n°32 Prise de risque : conclusions et recommandations, 2009
- n°31 Pour une approche européenne à la sécurité dans l'espace, 2008
- n°30 Le Rôle de l'Europe dans l'exploration spatiale, 2008
- n°29 Le Transport aérien face au défi énergétique, 2007
- n°28 La Sécurité des compagnies aériennes, 2007
- n°27 L'Europe de l'Espace ; enjeux et perspectives, 2006
- n°26 Compagnies de transport aérien à bas prix, 2006
- n°25 La Révolution des drones, 2005
- n°24 L'Impact du trafic aérien sur l'environnement, 2004

- n°23 La Menace balistique : quelle politique pour la France et l'Europe ?, 2004
- n°22 L'Europe et les débris spatiaux, 2003
- n°21 Retour d'expérience dans l'aviation civile, 2003

Ces dossiers au format pdf sont accessibles et téléchargeables sur le site de l'Académie de l'air et de l'espace :

<http://www.academie-air-espace.com/publi/newlist.php>