



MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE,
DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE

n° CGEDD 010298-01

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE
DE L'AGROALIMENTAIRE ET DE LA FORET

n° CGAAER 15098

Les biocarburants aéronautiques en France

Perspectives de développement de leur production
et de leur usage à l'horizon 2020

établi par

Sylvie BANOUN, Pierre CAUSSADE, Claude ROY

Novembre 2015



Les auteurs attestent qu'aucun des éléments de leurs activités passées ou présentes n'a affecté leur impartialité dans la rédaction de ce rapport

Sommaire

Résumé.....	3
Liste des recommandations.....	6
Dans le domaine de la production.....	6
Dans le domaine de la réglementation et des normes.....	6
Dans le domaine aéronautique.....	6
Dans les autres domaines.....	7
Introduction.....	8
1. Malgré les efforts et les engagements des acteurs du transport aérien pour maîtriser ses impacts environnementaux, la croissance continue du trafic aérien rend nécessaire le recours à des mesures nouvelles, concertées au plan mondial, parmi lesquelles l’usage des biocarburants pourrait avoir une place importante.....	10
1.1. Les efforts engagés depuis des décennies par l’industrie aéronautique en vue d’améliorer son efficacité énergétique sont importants et ont porté leurs fruits.....	11
1.1.1. <i>L’amélioration continue de l’efficacité énergétique est notable.....</i>	<i>11</i>
1.1.2. <i>Les engagements pris par les acteurs méritent d’être salués.....</i>	<i>12</i>
1.1.3. <i>La croissance des émissions du transport aérien est continue en particulier du fait du poids croissant des liaisons avec les pays émergents.....</i>	<i>14</i>
1.2. La gouvernance du transport aérien international est mondiale et suppose une action concertée.....	17
1.2.1. <i>La gouvernance est mondiale et relève d’un organe de l’ONU.....</i>	<i>17</i>
1.2.2. <i>L’action de la France et de l’Union européenne devrait se hisser au niveau de celle d’autres acteurs.....</i>	<i>20</i>
2. Parmi les mesures permettant de contenir les émissions de GES du secteur aérien, le recours aux biocarburants est apparu comme nécessaire, à supposer qu’ils satisfassent à de nombreuses exigences.....	22
2.1. Seuls des biocarburants spécifiques auraient leur place.....	22
2.1.1. <i>Les mesures envisagées par le secteur du transport aérien en complément des innovations technologiques comprennent des mesures de marché et le recours à des biocarburants.....</i>	<i>22</i>
2.1.2. <i>Le carburéacteur et ses caractéristiques.....</i>	<i>24</i>
2.1.3. <i>Les filières de biocarburants aéronautiques et leur degré de maturité.....</i>	<i>28</i>
2.2. Les biocarburants dont les filières sont proches de la maturité industrielle ne répondent pas à l’ensemble de ces exigences.....	31
2.2.1. <i>Les différentes filières de biocarburants aéronautiques.....</i>	<i>33</i>
2.2.2. <i>... ne répondent pas à l’ensemble des critères.....</i>	<i>38</i>
2.2.3. <i>La preuve par l’expérience et ses limites.....</i>	<i>40</i>
3. Les propositions doivent s’inscrire dans un contexte plus large.....	41
3.1. Les politiques nationales de certains pays sont actives en matière de recours aux carburants alternatifs.....	42

3.1.1. Quelques éléments pour situer la politique française en matière de carburants alternatifs.....	42
3.1.2. Diverses politiques nationales explorent un panel de solutions plus large.....	44
3.1.3. Les enseignements qui peuvent être tirés de ces exemples.....	47
3.2. Les préconisations.....	47
3.2.1. Dans le domaine de la production.....	47
3.2.2. Dans le domaine de la réglementation et des normes.....	48
3.2.3. Dans le domaine aéronautique.....	49
3.2.4. Dans d'autres domaines.....	52
3.2.5. Dans le domaine de la recherche long terme.....	52
Conclusion.....	53
Annexes.....	56
1. Lettre de mission.....	57
2. Éléments génériques sur les biocarburants.....	59
3. Quelques filières de production de biokérosène.....	62
4. Bio-ressources, concurrences d'usage, durabilité.....	70
5. Projets financés par le programme cadre européen FP7 pour les carburants alternatifs pour l'aviation.....	73
6. Activité des aéroports français et prise de carburant sur ces aéroports.....	79
7. L'organisation de l'aviation civile internationale (OACI).....	80
8. Éléments d'appréciation des subventions implicites aux énergies fossiles.....	82
9. Présentation de diverses politiques nationales en matière de carburants alternatifs.....	83
9.1. L'Allemagne.....	83
9.2. Les États-Unis.....	85
9.3. Le Brésil.....	87
9.4. La Chine.....	88
10. Enjeu d'innovation et autres opportunités de marchés.....	90
11. L'initiative d'Air France : Lab'line for the future.....	91
12. Liste des personnes rencontrées.....	92
13. Glossaire des sigles et acronymes.....	97

Résumé

L'aviation utilise exclusivement, et pour encore de nombreuses décennies, un carburant liquide spécifique et certifié internationalement, le kérosène. Aujourd'hui d'origine fossile, il représente environ 6 % des produits de raffinage du pétrole.

Le trafic aérien augmente régulièrement, en particulier du fait des liaisons avec les pays émergents, et cette croissance est durablement supérieure aux gains d'efficacité énergétiques prévisibles, qui sont pourtant importants. La consommation de carburant et les émissions de gaz à effet de serre du transport aérien croissent donc continûment.

Conscients de leur responsabilité, les acteurs du transport aérien ont souscrit dans le cadre de l'OACI, l'institution spécialisée des Nations-Unies qui assure la gouvernance mondiale du secteur, un engagement de plafonnement de ces émissions au niveau qui sera atteint en 2020. Ils ont également affiché une cible de réduction de moitié des émissions à l'horizon 2050, par rapport à celles de 2005.

Pour respecter cet engagement, l'OACI prévoit de mettre en place un mécanisme mondial de mesures de marché (compensation) et de recourir à des biocarburants. Ceux-ci doivent être utilisables en toute sécurité par l'aviation commerciale, être faiblement émetteurs de gaz à effet de serre, en termes de bilan de cycle de vie, et satisfaire à des critères de durabilité reconnus.

Plusieurs filières de biocarburants ont déjà été certifiées et ont permis d'effectuer plus de 1 700 vols commerciaux, depuis 2011, à l'initiative d'une vingtaine de compagnies. S'il s'agit d'un chiffre marginal au regard du trafic aérien, la conformité du bio-kérosène aux exigences aéronautiques a ainsi été démontrée.

Dans ce contexte, de quelles ressources, de quelles technologies et de quels leviers peut-on disposer pour promouvoir une filière de production ?

1. Sur le plan des ressources et des technologies

Par convention et en référence aux biocarburants routiers, les biocarburants aéronautiques sont classés en trois générations, aux caractéristiques différentes.

Les carburants dits de première génération. À partir de cultures (colza ou palme, betterave ou canne à sucre...), c'est la filière de production principale des biocarburants routiers. Seule une réduction majeure de cet usage, à l'avenir, ouvrirait des opportunités nouvelles pour des bio-kérosènes.

Les carburants dits de deuxième génération. Trois filières existent, à partir de ressources dont les usages concurrents ne sont pas moins légitimes :

- à partir d'huiles de récupération : la technologie, analogue à celle de la première génération, est à maturité industrielle, mais la ressource est très faible ;
- à partir de résidus de bois (éventuellement de déchets urbains organiques) transformés par gazéification : la lourdeur des investissements induit des entités de très grande taille et le caractère hétérogène de la ressource suppose des pré-traitements complexes ;

- à partir du traitement biologique des sucres (betterave, canne à sucre, lignocellulose) : si la matière première est relativement abondante, la concurrence des usages n'est pas moins forte (énergie, matériaux, chimie verte à haute valeur ajoutée).

Sur le plan technique et aéronautique, ces filières ont pu démontrer leur aptitude à produire un carburant certifié, qui est miscible dans des proportions variables avec du kérosène d'origine fossile.

Les produits dits de troisième génération. Ils sont seulement au stade de la recherche et de l'essai en laboratoire, à partir de micro-algues autotrophes notamment, et ils sont, a priori, destinés à des produits à très haute valeur ajoutée.

2. Sur le plan des leviers réglementaire ou fiscal

Des outils réglementaires et fiscaux européens (mandats d'incorporation de biocarburants à hauteur de 7 à 10 % et taxe générale sur les activités polluantes), dont l'abandon est envisagé à un horizon assez rapproché (2020), ont permis à une filière de biocarburants routiers de se développer. Ils continuent d'en fonder le modèle économique.

De tels leviers ne sont pas utilisables, en l'état, pour les carburants aéronautiques. Ceux-ci sont en effet exempts de fiscalisation depuis la convention de Chicago de 1944 qui régit le transport aérien. Une obligation d'incorporation ne pourrait donc résulter que d'un mandat international émanant de l'OACI.

En conclusion :

Le constat fait par la mission est que les filières de production de biocarburants pour l'aviation, disponibles aujourd'hui ou en cours de développement, ne répondent pas pleinement aux caractéristiques recherchées. Elles sont en mesure de proposer un carburéacteur de qualité miscible, certifié ou susceptible de certification ; mais leur coût de production est durablement très supérieur, de l'ordre du double, à celui du carburant fossile, et il risque de plus d'évoluer, à terme, en corrélation positive avec celui-ci. En outre, elles reposent, pour l'essentiel, sur des bio-ressources limitées, parfois importées ou déjà en grande partie mobilisées par d'autres usages qui sont également légitimes.

Dans ces conditions, et malgré la présence en France d'acteurs majeurs et d'excellence dans le champ de l'aéronautique, de l'énergie, de la bio-économie, de l'innovation et de la recherche, la mission estime qu'il n'y a pas aujourd'hui d'opportunité significative de développement d'une filière française de production de biocarburants aéronautiques. Les acteurs manquent d'une visibilité à long terme, qui reposerait sur l'existence d'un marché et sur des leviers réglementaires ou fiscaux, à la main des autorités françaises ou européennes.

En revanche, les travaux en cours au sein de l'OACI pourraient conduire, lors des prochaines assemblées de 2016 et 2019, à l'adoption d'un système mondial de « mesures économiques de marché » pour le transport aérien, applicable à compter de 2020, et d'une politique volontariste de développement des biocarburants « aviation », dont la consommation serait prise en compte en qualité de « crédit carbone », pour les compagnies consommatrices.

De telles décisions, prises au niveau mondial, changeraient certainement la donne et seraient de nature à donner le signal attendu par les acteurs de la filière.

Elles seraient facilitées si les chefs d'État et de gouvernement, réunis pour la COP21, adoptaient une vision stratégique pour un « transport aérien responsable » et donnaient clairement à leurs représentants à la prochaine assemblée de l'OACI, le mandat de mener à bien, dans les délais prévus, l'ensemble des travaux en cours.

Dans un domaine connexe aux biocarburants, celui des projets de captation carbone, la mission suggère que, parmi les programmes de compensation auxquels le secteur aérien devra avoir recours pour plafonner ses émissions à compter de 2020, ceux dédiés à la lutte contre la déforestation, dits REDD+, soit examinés en priorité. Ces programmes sont en effet positifs en termes d'éthique (aide au développement des pays du sud) et d'engagement écologique (association entre transport aérien et protection de la forêt).

Enfin, au regard du potentiel de réduction des émissions qui découlerait d'un taux élevé d'incorporation des biocarburants aéronautiques, techniquement possible, la mission s'est interrogée sur d'autres perspectives. Dès lors qu'existent pour le transport routier et maritime d'autres solutions assez radicales de décarbonation, la question se pose, à terme, d'un transfert progressif des capacités actuelles de production de biocarburants routiers vers le secteur aérien, quant à lui tributaire de carburant liquide. Faute de rentabilité économique spontanée, ces filières n'auraient cependant un avenir que si des décisions politiques, arrêtées dans un cadre international, leur offraient une perspective de long terme

La mission recommande que les acteurs du secteur soient pleinement parties prenantes aux évolutions internationales qui se dessinent, et à ce titre :

- poursuivent, en France, l'effort de recherche et mènent à bien les projets en cours de démonstrateurs industriels ;
- renforcent, de façon très importante, la participation française et européenne aux travaux de l'OACI ;
- recherchent des partenaires, parmi les pays non européens membres du conseil permanent de l'OACI, pour lancer des initiatives communes et renforcer le pouvoir d'influence au sein du conseil.

Parmi les initiatives, pourrait être envisagée une version internationale de la *Lab'Line for the future*, opérée depuis septembre 2014 par Air France et ses partenaires, entre Toulouse et Paris.

Liste des recommandations

Pages

Dans le domaine de la production

Préserver les possibilités de développement de toutes les filières de production de biocarburants aéronautiques afin de favoriser l'innovation, mais en privilégiant à terme les voies de troisième génération. (DGPE) 48

Valoriser les filières de première génération à proportion des coproduits protéiques qu'elles génèrent en veillant à l'inscription des cultures et productions concernées dans le cadre d'objectifs agroécologiques. (Cabinet MAAF, DGPE) 48

Mobiliser le Comité 2B et l'observatoire « biomasse » de FranceAgriMer afin d'étudier le potentiel français de production supplémentaire d'apports protéiques pour l'alimentation animale. Un potentiel de co-production de biocarburants routiers et aéronautiques en résulterait. (DGPE) 48

Développer la recherche sur les filières de troisième génération : micro-algues, micro-organismes, dans le cadre du programme cadre de recherche européen FP7, et en s'appuyant sur le projet de « nouvelles ressources » engagé par l'État dans le cadre de la « Nouvelle France Industrielle ». (DGPE) 48

Dans le domaine de la réglementation et des normes

Renoncer, à court terme, à toute obligation d'incorporation de biocarburants aéronautiques en Europe (au contraire de ce qui a été fait pour les biocarburants routiers), au motif qu'elle entraînerait probablement un rejet par d'autres pays, comme cela a été le cas pour la directive EU-ETS, des surcoûts pénalisant la compétitivité des compagnies européennes et un recours probable à des filières d'importation peu durables. (Cabinet MEDDE, SGAE, RP, DGAC) 49

Dans le domaine aéronautique

Mettre en place un processus de certification européen (selon les normes ASTM) pour s'affranchir des contraintes opérationnelles de l'organisme américain en vue de permettre à des nouveaux entrants d'éviter les coûts et les délais d'un processus de certification exclusivement aux États-Unis. (DGAC) 50

Lancer, par appel d'offres, un programme de recherche destiné à mieux appréhender le rôle des différents composants des carburéacteurs, en vue d'en optimiser la formule chimique, tant du point de vue de l'efficacité énergétique que du point de vue de la réduction des pollutions induites. (DGAC) 51

Renforcer, de façon très significative, la participation française (DGAC, industrie, experts économiques et environnementaux...) aux travaux en cours au sein du CAEP de l'OACI sur les carburants alternatifs en s'appuyant sur l'expérience acquise lors de la coordination du programme européen SWAFEA, et en liaison avec les travaux du CORAC. (Cabinet MEDDE, DGAC) 51

Encourager également les contributions européennes aux travaux de l'OACI sur ces sujets, sous l'égide du centre commun de recherche (JRC), et en liaison avec les travaux de l'ACARE. (DGAC, SGAE, RP) 51

Élargir le champ du CORAC (conseil d'orientation de la recherche aéronautique civile) au domaine des biocarburants, en y associant les représentants de la filière de production. (DGAC) 51

Rechercher des partenaires, parmi les pays non européens membres du conseil permanent de l'OACI, pour développer une vision commune des enjeux environnementaux du transport aérien et renforcer le pouvoir d'influence au sein du conseil. (DGAC) 52

Dans les autres domaines

Pour le système, en cours d'élaboration, de « mesures économiques de marché », auquel les compagnies vont devoir faire appel, la COP 21 pourrait inviter l'OACI à promouvoir le financement de programmes de lutte contre la déforestation, dits REDD+, positifs en termes d'éthique (aide au développement de pays du sud) ainsi que d'engagement écologique (association entre le transport aérien et la protection de la forêt). (Cabinet MEDDE) 52

Travailler à l'optimisation d'appareils volant à des vitesses significativement inférieures, en vue de réduire la consommation de carburant, y compris pour des vols long-courriers. (DGAC) 52

Introduction

Par lettre du 22 juillet 2015, Madame la ministre de l'écologie, du développement durable et de l'énergie et Monsieur le ministre de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt ont confié au conseil général de l'écologie et du développement durable ainsi qu'au conseil général de l'agriculture, de l'alimentation et des espaces ruraux une mission de réflexion sur l'opportunité de mettre en place une filière française de production de biocarburants aéronautiques.

Au plan mondial, la croissance du transport aérien est dynamique. Le rythme d'accroissement annuel constaté depuis le milieu des années 1980 est de 5 à 6% l'an sauf en 2001 et en 2009 et l'étude projet européenne Alphabird¹ considère qu'elle continuera à un rythme de 4,7% l'an au moins jusqu'en 2025 même si elle est inégale selon les zones. On considère qu'en 2013, 1 397 compagnies aériennes ont utilisé une flotte de 25 000 avions civils pour desservir 3 864 aéroports, ce qui correspond à 29 millions de vols par an (plus de 80 000 par jour) soit en permanence entre 500 000 et un million de personnes en vol.

La contribution du transport aérien aux émissions de gaz à effet de serre est significative (entre 2% et 2,5%) ainsi que son empreinte écologique en général² et il consomme 8% du pétrole mondial (10% des carburants), l'agence internationale de l'énergie considérant que cette part devrait croître jusqu'à représenter 11% de la demande pétrolière mondiale en 2050 (scénario Blue Map – 530 M toe) et plus probablement 17% (630 M toe – scénario Baseline³). Or, malgré des progrès significatifs pour améliorer constamment l'efficacité énergétique et optimiser tant les cellules que les moteurs et l'organisation des vols, même l'objectif souscrit par les pays-membres de l'organisation internationale de l'aviation civile (OACI) d'un plafonnement des émissions de dioxyde de carbone en 2020 ne peut être atteint qu'en prenant en compte des mesures de marché permettant de racheter des quotas d'émission dans des conditions en cours de définition par l'organisation de l'aviation civile internationale, l'organe de l'organisation des Nations unies compétent, en vue d'une adoption probable lors de l'assemblée triennale de septembre 2016.

En outre, l'objectif affiché par les acteurs du transport aérien dans les divers documents, quand bien même il ne s'agit que d'un objectif souhaité (*aspirational goal*), d'une division par deux des émissions du transport aérien à l'horizon 2050, ne paraît ni suffisant au regard des scénarios permettant de contenir le dérèglement climatique moyen dans une limite de +2°C qui prévoient pour les pays développés une division par quatre de l'ensemble des émissions, ni susceptible d'être atteint sans un recours massif à des carburants de substitution très faiblement émetteurs de gaz à effet de serre.

Or le transport aérien est durablement dépendant de carburéacteurs liquides. Dans ce contexte, l'utilisation de carburants bio-sourcés est apparue depuis plusieurs années comme susceptible de contribuer significativement à la satisfaction des objectifs d'autant qu'elle paraissait également de nature à répondre à la raréfaction des

¹ Cf. annexe 5.

² Tant en pollution locale – oxydes d'azote, particules, hydrocarbures imbrûlés – UHC, qu'en pollution mondiale : ozone troposphérique, etc.

³ La demande en kérosène croissant entre 2008 et 2025 de 38% malgré une croissance de 32% de l'efficacité énergétique.

carburants fossiles, l'exploitation de nouveaux gisements pétroliers étant énergétiquement de plus en coûteuse.

L'expérience des biocarburants routiers et les vifs débats suscités par les stratégies et les mesures de promotion des biocarburants de première génération ont cependant éclairé les premiers travaux relatifs aux biocarburants aéronautiques : mise en place d'emblée de groupes de concertation associant les parties prenantes, dont les associations qualifiées, pour vérifier l'acceptabilité des solutions envisagées et exigence posée au préalable de biocarburants satisfaisant à des critères de durabilité à définir. La réflexion de la mission ne peut donc faire l'économie de ces pré-requis d'autant qu'ils paraissent nécessaires pour préserver une image positive du transport aérien.

Tous les interlocuteurs et interlocutrices contactés par la mission ont fait preuve d'une très grande disponibilité pour apporter avec rigueur et précision les éléments ou les éclairages demandés, le plus souvent dans des délais inconfortables. Qu'ils en soient remerciés vivement.

1. Malgré les efforts et les engagements des acteurs du transport aérien pour maîtriser ses impacts environnementaux, la croissance continue du trafic aérien rend nécessaire le recours à des mesures nouvelles, concertées au plan mondial, parmi lesquelles l'usage des biocarburants pourrait avoir une place importante

La substitution des énergies fossiles par des énergies renouvelables s'inscrit dans un contexte de ressources naturelles limitées et en danger.

Les ressources naturelles regroupent les matières premières, les espèces vivantes et leur diversité, l'eau, les sols et les énergies d'une part, les cycles du carbone, de l'azote et de l'eau, le climat et le fonctionnement des écosystèmes d'autre part. Leurs apports pour les économies, au même titre que le capital et le travail sont donc majeurs ; or, d'ici à 2050, les sociétés, pour répondre à une demande de 9,3 milliards d'habitants⁴, devront s'assurer de la disponibilité et du renouvellement équilibré de ces ressources, à toutes les échelles, par des actions spécifiques, d'efficacité, de substitution et de préservation, alors même que les ressources et régulations naturelles sont souvent déjà très utilisées et dégradées, voire surexploitées. Or, les pertes d'espèces vivantes et la raréfaction des habitats naturels en bon état, sur terre et dans les mers, ont des répercussions non seulement sur les activités qui en dépendent localement, mais aussi sur la capacité de la biosphère à assurer certaines fonctions générales telles que la pollinisation, la fourniture d'eau douce, l'entretien des sols ou encore le recyclage du carbone atmosphérique...

Les pertes susceptibles d'intervenir à l'horizon 2050 sont majeures (The Economics of Ecosystems and Biodiversity⁵) : 11% des aires naturelles du fait de la conversion en terres agricoles, du développement des infrastructures et du changement climatique, 60% des récifs coralliens (pêche intensive, pollution, maladies, réchauffement de la planète) et le coût annuel associé aux pertes de biodiversité et à la dégradation des écosystèmes serait compris en 2008 entre 2 500 et 3 500 Mds\$ par an au niveau mondial. L'ensemble des pertes de bien-être correspondantes cumulées d'ici à 2050 (14 000 Mds\$) serait de l'ordre de 7% du PIB global en 2050.

La responsabilité de la France, en termes de biodiversité ou de protection des écosystèmes (8% des espèces animales et végétales menacées dans le monde⁶), est particulière, tant en métropole qu'en Outre-mer avec le deuxième espace maritime au monde et la première place en Europe pour le nombre d'espèces d'amphibiens, d'oiseaux et de mammifères.

Les bénéficiaires de la préservation des écosystèmes et de la biodiversité pour leurs activités économiques, qui dépendent directement de la pérennité des ressources naturelles, sont nombreux (pêcheurs, agriculteurs, aquaculteurs, forestiers...) et ont intérêt à disposer d'un milieu en bon état, rendant le service escompté. Mais les modèles économiques de ces activités ne prévoient souvent ni rémunération de son maintien, ni pénalisation de sa dégradation. Pourtant les activités humaines dépendant

⁴ Scénario médian de la division « Population » des Nations unies.

⁵ The Economics of Ecosystems and Biodiversity, étude commanditée par les ministres de l'environnement du G8 en mars 2007 dirigée par Pavan Sukhdev, ancien responsable du département des marchés internationaux de la Deutsche Bank en Inde, en vue de définir un cadre conceptuel et méthodologique pour la prise en compte de la valeur de la biodiversité et des services écosystémiques au sein des activités économiques en vue d'enrayer leur dégradation.

⁶ Données de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN).

fortement de la qualité des écosystèmes représenteraient 7% de l'emploi total de l'Union européenne et 35% dans les pays en développement.

Les évolutions proposées en matière de systèmes ou de pratiques plus respectueuses de l'environnement permettraient de conjuguer une hausse des rendements (ex. polyculture-élevage autonome de bovins laitiers, agroforesterie) et une amélioration significative du bilan aujourd'hui assez médiocre de l'agriculture en matière d'émissions de gaz à effet de serre (ainsi les travaux prospectifs de l'INRA : Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? en juillet 2013 ou le rapport n°140056 d'octobre 2014 du Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux « Les contributions possibles de l'agriculture et de la forêt à la lutte contre le changement climatique »). Elles permettent de réviser l'image des cultures énergétiques dès lors que leur objectif premier est destiné à l'alimentation animale.

Il ne semble pas exister de panacée et il est d'autant plus nécessaire de travailler dans toutes les directions que l'épuisement des ressources fossiles, qui a pu apparaître comme un stabilisateur automatique dans la prévention du réchauffement climatique, est régulièrement retardé par le développement de nouveaux gisements de ressources fossiles non conventionnelles (gaz et pétrole de schistes, huiles lourdes, sables bitumineux...) alors même que leur combustion est la principale cause des émissions de gaz carbonique et que le budget carbone compatible avec le maintien de l'atmosphère en dessous de seuils critiques (les 2°C maximum d'augmentation des températures d'ici à la fin du Xxème siècle) limite les quantités totales d'hydrocarbures (pétrole, gaz et charbon) exploitables à moins du tiers des ressources connues.

La production et la consommation des énergies fossiles continuent en outre à bénéficier de soutiens publics pour des montants significatifs (523 Mds\$ en 2011 d'après l'AIE, 1 900 Mds\$ selon la définition plus extensive du FMI, et, selon l'OCDE, 45 à 75 Mds\$ par an dans les pays de l'OCDE ces dernières années et 410 Mds\$ dans les pays en développement en 2010, soit quatre fois plus que celles dont bénéficient les énergies alternatives), ces évaluations ayant été revues à la hausse par le travail d'avril 2015 du Fonds monétaire international⁷.

Faute de stabilisateur automatique et de perspectives établies de solutions techniques suffisantes pour faire face aux enjeux environnementaux évoqués, il ne paraît responsable d'exclure a priori aucune voie d'amélioration. Dans ce contexte, il convient d'examiner toutes les solutions visant à réduire les besoins en énergies fossiles. La réduction de l'empreinte du transport aérien ne peut être considérée isolément et doit s'inscrire dans une démarche d'ensemble.

1.1. Les efforts engagés depuis des décennies par l'industrie aéronautique en vue d'améliorer son efficacité énergétique sont importants et ont porté leurs fruits

1.1.1. L'amélioration continue de l'efficacité énergétique est notable

Les gains d'efficacité énergétique réalisés à chaque nouvel appareil, qu'il s'agisse de l'amélioration de la cellule ou de celle du moteur, sont importants : chaque nouvelle génération apporte une amélioration de l'efficacité énergétique d'environ 15 à 20% par

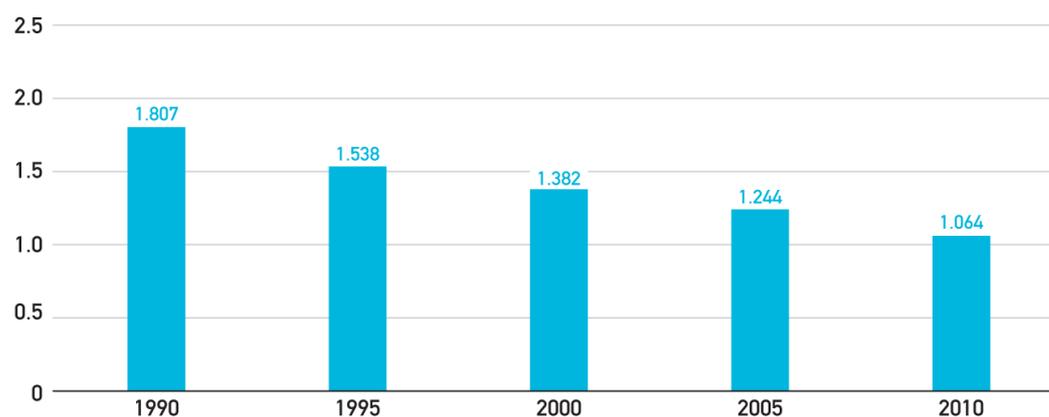
⁷ Cf. annexe n°8.

rapport à la génération précédente (l'efficacité énergétique en siège/km a ainsi été améliorée de 70% depuis l'avènement des premiers jets dans les années 1960).

Mais ce gain ne se diffuse que progressivement dans l'ensemble de la flotte en exploitation, la durée d'exploitation dépassant vingt ans, voire trente ans, même si certaines flottes (telle celle d'Air France, inférieure à quinze ans) sont plus récentes, le renouvellement plus rapide des appareils se justifiant notamment par le poids majeur du carburacteur dans le coût opérationnel d'un vol.

✈️ AVIATION CO₂ EFFICIENCY

Grams of CO₂ per tonne kilometre, 1990 to 2010



8

En 50 ans, la consommation de kérosène des avions et donc les émissions de CO₂ de l'aviation ont été réduites de près de 80% en passager/km transportés. Encore plus significatif, selon les prévisions établies par l'association des compagnies régulières (IATA), l'émission en équivalent carbone, exprimée en kg/km en 2050 devrait être de 0,22 g à comparer à 1,37 g en 2005.

On considère que l'efficacité énergétique croît de 1,5 % par an en carburant/passager/km. Cette amélioration est imputable pour une part à l'optimisation des cellules (aérodynamique et diminution de la masse par l'utilisation plus importante de matériaux composites), pour une autre part à celle des moteurs. S'y ajoute une efficacité accrue du contrôle aérien (optimisation des routes en plan et profil, augmentation des capacités aéroportuaires, etc.) évaluée à un gain potentiel complémentaire de 0,5% par an, l'ensemble se traduisant par une trajectoire d'amélioration de 2% par an en moyenne jusqu'en 2050.

1.1.2. Les engagements pris par les acteurs méritent d'être salués

Afin de limiter l'augmentation spontanée des émissions due à la progression constante du trafic, des objectifs ambitieux ont été définis, tant au niveau de la recherche (objectifs ACARE) qu'au niveau des compagnies aériennes elles-mêmes (objectifs IATA) et des engagements internationaux ont été approuvés par les États au sein de l'OACI lors des deux dernières assemblées de 2010 et 2013.

⁸ Source IATA, site internet, Aviation CO₂ efficiency.

La feuille de route d'ACARE (Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe⁹) élargie en 2011, vise dans son Strategic Research and Innovation Agenda que les appareils dotés des meilleures technologies disponibles en 2050 présentent par rapport aux technologies classiques de 2000 en passager/km une réduction de 75% des émissions de CO₂ associée à une réduction de 90% des oxydes d'azote (NO_x) et une réduction du bruit perçu¹⁰ de 65%.

Par ailleurs, cette feuille de route prévoit que les mouvements des appareils au sol devront être neutres en carbone et que les appareils devront être conçus et produits en vue d'être recyclables. Elle vise également à faire de l'Europe, dans le cadre d'une politique énergétique forte, un centre d'excellence de carburants alternatifs durables, dont des carburants aéronautiques, en même temps que l'initiatrice d'une recherche sur les questions atmosphériques pour porter un plan d'action environnemental charpenté et définir des normes environnementales mondiales. Cette vision stratégique paraît aller au-delà des possibilités d'action de ses promoteurs.

IATA (International Air Transport Association) vise pour la flotte en service une stabilisation des émissions de CO₂ à partir de 2020 (« Carbon Neutral Growth ») et une réduction globale des émissions de CO₂ de 50% en 2050 par rapport à leur niveau de 2005.

Enfin, l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) a adopté en 2010 une résolution A37-19 visant à plafonner les émissions nettes du transport aérien à l'horizon 2020 – dite Carbon neutral growth 2020, sans cependant que cette résolution comporte l'attribution d'objectifs spécifiques aux États ni aux compagnies. Cette décision a été complétée en 2013 par la résolution de recourir à des mécanismes de marché, susceptibles d'être arrêtés par l'assemblée triennale de l'organisation à l'automne 2016 pour une application à compter de 2020.

À titre d'illustration, l'inclusion en 2012 du trafic aérien dans le marché d'émissions européen (EU- ETS) a conduit les compagnies aériennes européennes à utiliser en 2012 11 Mt de crédits pour couvrir 13% de leurs émissions dont 5,3 Mt de crédits venant des projets dans des pays en développement (dans le cadre du « mécanisme pour un développement propre »- MDM), soit un flux de 4 à 22 millions d'euros vers ces pays.

L'OACI a également adopté une ambition non-contraignante (aspirational goal) qui vise à diviser par deux les émissions du secteur à l'horizon 2050, sans qu'il soit précisé si ce résultat pourrait être partiellement atteint par des mécanismes de marché. Il est à noter que cette résolution rejoint les objectifs IATA décrits ci-dessus.

Ces trois objectifs ne pourront être atteints par le seul déploiement et la synergie de technologies avancées, à la fois au niveau de l'aéronef (poids, aérodynamique), du moteur (rendement...) et de l'optimisation du trafic aérien. Les travaux menés au sein du CAEP (Committee on Aviation Environmental Protection) de l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) ont en effet montré que les seuls progrès techniques et opérationnels ne seront pas suffisants pour atteindre les objectifs de la résolution A37-19 de l'OACI. Il y a donc un écart conséquent dont les organisations

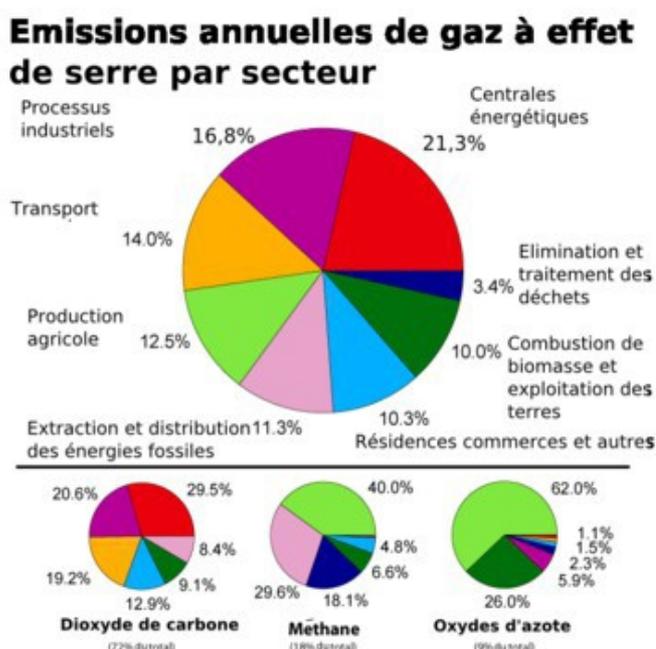
⁹ L'ACARE est une initiative lancée en juin 2001 par la Commission européenne. Ses premiers travaux ont débouché sur une "vision 2020" avec un objectif de réduction de 50 % par rapport à l'année 2000, de la consommation de carburant (et donc des émissions de CO₂) par passager /km transporté, de 80% sur les émissions de NO_x et de 50% sur l'énergie sonore émise. L'élargissement des objectifs et son prolongement jusqu'en 2050 représente donc plutôt un recul.

¹⁰ Effective Perceived Noise Decibel : notion utilisée pour la certification des avions à réaction.

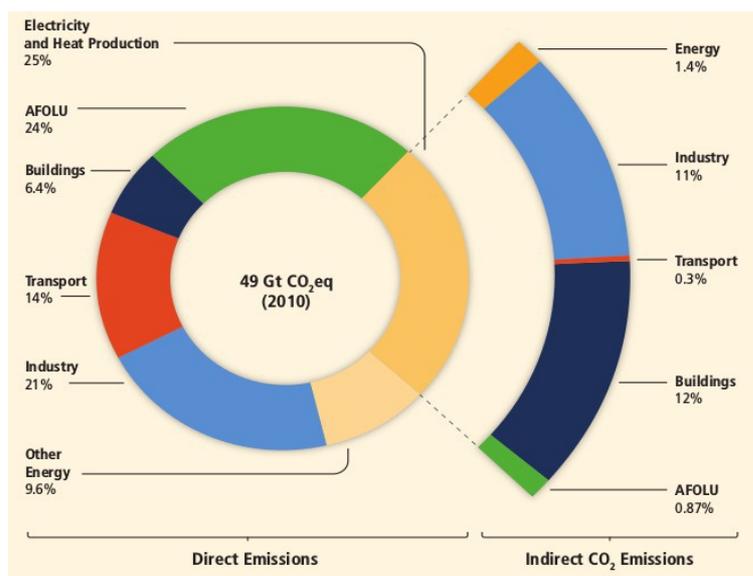
espèrent qu'il peut être au moins partiellement comblé par l'introduction de biocarburants à empreinte CO2 réduite.

1.1.3. La croissance des émissions du transport aérien est continue en particulier du fait du poids croissant des liaisons avec les pays émergents

On considère que le transport aérien est responsable aujourd'hui de 2% des émissions mondiales anthropiques de gaz à effet de serre et de 12% de celles du secteur des transports, lui-même gros contributeur d'émissions directes, avec notamment 20% des émissions de dioxyde de carbone. 0,5 % du commerce mondial se fait par voie aérienne mais cela correspond à 35% de sa valeur.



11



¹¹ Source Wikipedia – choisie pour sa lisibilité

Émissions annuelles mondiales de gaz à effet de serre en 2010 ¹²

La consommation annuelle totale des compagnies aériennes commerciales est ainsi de 230 Mt de kérosène, ce qui correspond à 724 Mt de CO₂ eq¹³ et elle s'inscrit dans une perspective de croissance continue à un rythme soutenu de près de 3% par an.

1.1.3.1. La croissance continue du transport aérien...

Le scénario le plus communément admis, établi par l'étude projet européenne Alhabird (dit scénario *Business as usual* ou *Baseline*) prévoit un doublement du trafic passagers aérien d'ici 2030, un triplement du fret aérien et un quadruplement du trafic portuaire de containers. Dans ce contexte, si le secteur aérien est responsable d'environ 2% des émissions de gaz à effet de serre aujourd'hui, il passerait à 3%, voire 4% en 2030 (scénario *Baseline*), soit une multiplication par cinq à sept du total des émissions de gaz à effet de serre en 2050 des émissions de 2010¹⁴. A titre de comparaison, le secteur maritime est pour sa part responsable d'environ 3 % des émissions globales de GES, et pourrait atteindre jusqu'à 5 % du total en 2050 malgré des changements opérationnels dont l'impact peut être significatif comme le "slow shipping" ou la réduction de vitesse.

Or, des mesures de ce type n'ont été prises par le secteur aérien que pour des courts courriers par l'utilisation d'appareils, tels des ATR inférieurs à 100 places, volant plutôt à 500 km/h qu'à un peu plus de 800 km/h ; il est rappelé que, quelle que soit l'optimisation des appareils, la consommation croît en fonction du carré de la vitesse. La diminution de consommation de tels appareils, bien que notable (division par deux), est toutefois peu sensible sur la performance de la flotte compte tenu de la faible proportion de vols concernés.

1.1.3.2. ... résulte de la baisse continue des tarifs

Le transport aérien¹⁵ a connu depuis 1978 des changements réglementaires majeurs qui se sont traduits par une libéralisation inédite, étudiée par les économistes au regard de leurs répercussions sur les échanges commerciaux, sur l'investissement direct étranger, le tourisme et le développement économique, faisant du transport aérien un acteur essentiel de la mondialisation. Pour mémoire, entre 1978 et 1988, aux États-Unis, soit pendant les dix premières années de la déréglementation, le nombre de passagers du transport aérien a augmenté de 55 pour cent et les passagers-miles des lignes régulières ont crû de 60 pour cent. Le prix réel d'un déplacement en transport aérien a dans le même temps diminué de 17 pour cent. Ceci est le résultat des gains d'efficacité des compagnies (optimisation de l'offre et de la tarification) qui s'est également traduit par la création d'emplois dans le secteur.

Les analyses ont montré que les transporteurs à bas coûts ont un effet considérable et durable en termes de baisses de prix dans un secteur dans lequel il n'existe pas de

¹² Source GIEC : Climate Change 2014 : Mitigation of Climate Change, IPCC Working group III. L'acronyme AFOLU – Agriculture, forestry, other land use sera utilisé plus tard dans le rapport, les émissions dues à l'agriculture au sens large étant prises en compte dans les propositions de la mission.

¹³ Source IATA, 2015.

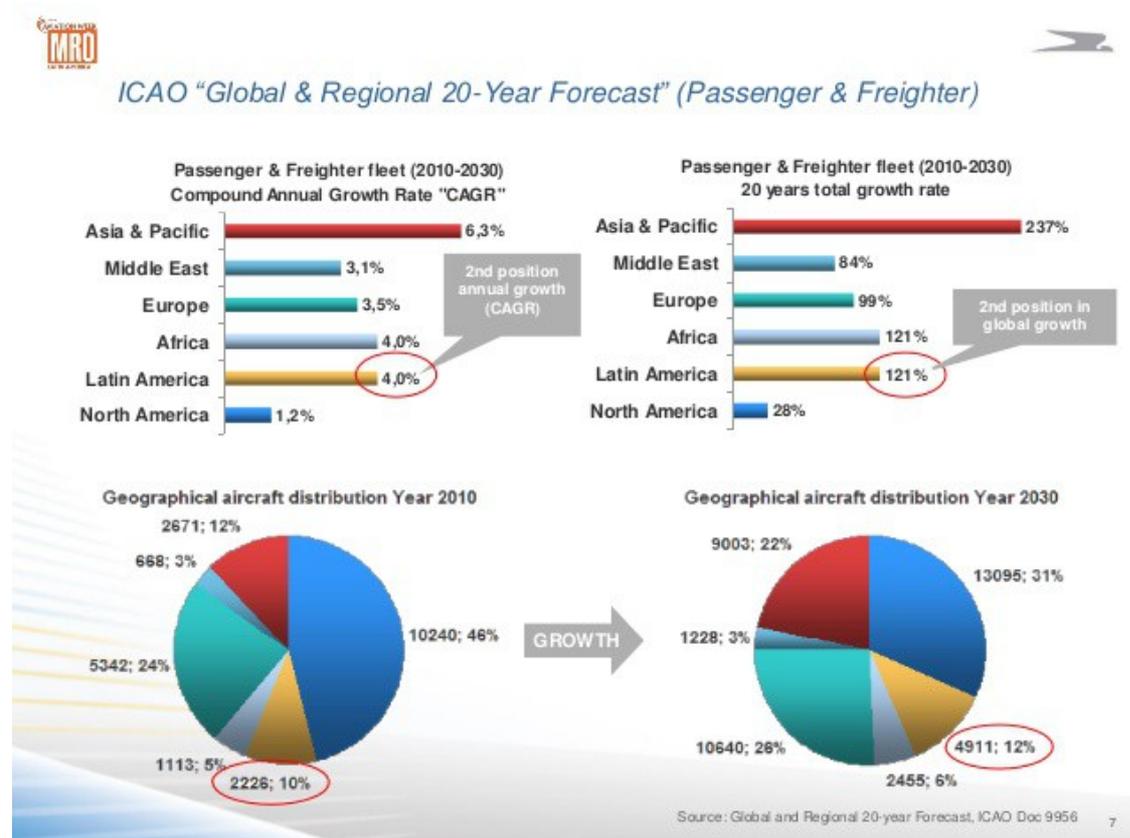
¹⁴ Source OACI, 2013, Environmental report. Destination Green, Montréal.

¹⁵ Air Transport Liberalization and its impacts on Airline competition and Air passenger Traffic, Tae Oum, Xiaowen Fu et Anming Zhang.

barrières à l'entrée, dès lors que les appareils peuvent être loués. Sur les routes où ils sont présents, les prix baissent de 20 à 50 pour cent par rapport à la situation préexistante. Un effet peut même être constaté sur les liaisons à proximité desquelles ils opèrent : des baisses de prix de l'ordre de 6 à 35 pour cent ont été constatées aux États-Unis en fonction du degré de substituabilité des relations. L'apparition de transporteurs à bas coûts, qui est l'une des évolutions du secteur aérien induite par la libéralisation, a ainsi été un puissant stimulant du développement du transport aérien.

1.1.3.3. ... et des liaisons avec les pays émergents

La croissance continue du trafic aérien n'est plus le fait des transports domestiques – intracommunautaires ou au sein du continent nord-américain, non plus qu'entre ces deux zones, le trafic étant constant ou en faible décroissance du fait des améliorations d'organisation, même si le stock des émissions leur est imputable. Elle est le fait des liaisons avec les pays émergents et du trafic aérien domestique de ces pays qui connaît un rattrapage accéléré, corrélé positivement avec la croissance de leur produit intérieur brut.



16

En outre, si les phases de décollage et d'atterrissage sont sources de pollution locale, près de 80% des émissions de gaz à effet de serre sont imputables aux liaisons de longue distance (plus de 1 500 km).

¹⁶ Source OACI.

La pollution locale, notamment lors des phases de décollage et d'atterrissage (bruit et émission de particules d'oxydes d'azote, d'oxydes de soufre et de monoxyde de carbone – notamment liées à la teneur en soufre des carburéacteurs et à un fonctionnement imparfait des turbines qui génère des hydrocarbures imbrûlés), pourrait être réduite par l'introduction de biocarburants sans soufre et par une amélioration du fonctionnement et de la technologie des turbines ainsi que par une meilleure insonorisation des appareils.

Mais les émissions ne se font pas exclusivement au sol, comme c'est le cas pour le trafic routier, mais surtout à haute altitude (autour de 10 000 m), ce qui pose des questions encore ouvertes comme la dégénérescence des traînées de condensation en cirrus. Or, la pollution mondiale, au-delà des seules émissions de gaz à effet de serre (ozone troposphérique, émissions acides...) est liée à la composition chimique des carburants eux-mêmes (notamment la proportion qu'ils contiennent d'aromatiques à impact suies...) mais elle est évidemment également fonction de la quantité de carburant consommée.

En conséquence, des mesures relatives aux vols intra-européens, qui ne constituent que 7 à 8% de l'ensemble des vols (et 16 à 18 Mt de carburant), ou même des dispositions portant les seuls vols en lien avec l'Europe, qui comptent pour 25 à 28% du total (et 57 à 64 Mt), aussi emblématiques qu'elles puissent être, auraient des répercussions limitées sur cette pollution mondiale puisque les autres vols constituent 64 à 68% de l'ensemble et correspondent à la consommation de 147 à 156 Mt. L'enjeu des réductions d'émissions porte donc sur des marchés sur lesquels l'Union européenne a peu de prise directe, la gouvernance du transport aérien étant mondiale.

1.2. La gouvernance du transport aérien international est mondiale et suppose une action concertée

1.2.1. La gouvernance est mondiale et relève d'un organe de l'ONU

1.2.1.1. Les acteurs de la gouvernance mondiale : les États-membres de l'OACI¹⁷

Aussi important que soit le poids économique de certains ensembles étatiques, la gouvernance du transport aérien est évidemment mondiale. Elle relève d'une agence spécialisée de l'organisation des Nations unies au sein de laquelle prévaut la règle intergouvernementale (un État, une voix), sans qu'existe un dispositif analogue aux membres permanents du Conseil de sécurité (aucun État n'y dispose d'un droit de veto) et elle dispose d'un secrétariat général de 30 membres qui en assure la gestion au quotidien entre deux assemblées triennales.

Ainsi, alors que le transport domestique aérien a été comptabilisé à Kyoto dans les inventaires des pays qui sont astreints à des contributions asymétriques, les règles établies par l'organisation de l'aviation civile internationale (OACI ou ICAO en anglais) valent pour toutes les compagnies aériennes, chaque État-membre ayant les mêmes droits et les mêmes devoirs en vertu de la convention de Chicago, signée le 7 décembre 1944 par 52 pays, entrée en vigueur le 4 avril 1947, qui lie aujourd'hui 191 États.

¹⁷ cf. annexe 7.

L'OACI est chargée de la coordination et de la régulation du transport aérien international dans un souci premier de sécurité aérienne et de sécurité des pays. Cet impératif implique un certain contrôle sur les activités aériennes des États, activités qui représentent également des enjeux financiers, avec plus de 40 à 50 % du transport touristique et 35 % du commerce international en valeur (mais non en tonnage ou en nombre de personnes transportées).

C'est donc l'OACI qui précise les droits et devoirs des pays signataires en matière de droit aérien relatif au transport international par avion¹⁸. La convention confirme la primauté des États en matière de régulation du transport aérien¹⁹ et la souveraineté nationale en termes de réglementation aérienne. Elle n'exclut pas des concertations régionales ou des accords bilatéraux mais n'autorise pas qu'un pays ou un ensemble de pays mette en place unilatéralement des mesures susceptibles de concerner d'autres États. C'est ce qui a posé problème avec l'inclusion des liaisons avec l'Union européenne dans le dispositif communautaire d'échange de quotas d'émission (EU ETS).

1.2.1.2. Le CAEP – un lieu de préparation des décisions de l'OACI en matière de protection de l'environnement

L'OACI a constitué en son sein un Committee for Aviation Environmental Protection (CAEP). Le comité de pilotage du CAEP a créé en novembre 2013 un groupe de travail expert relatif aux carburants alternatifs (Alternative Fuel Task Force – AFTF) dont l'objet principal est d'évaluer l'apport potentiel de carburants alternatifs en matière de réduction d'émissions de gaz à effet de serre par le transport aérien à l'horizon 2050. Les résultats pourraient être inclus dans le rapport du CAEP relatif aux orientations environnementales en vue de l'horizon 2050. En matière de mécanismes de marché (Global MBM), les orientations en seront soumises à l'assemblée triennale de l'OACI en septembre 2016.

L'AFTF a mis en place plusieurs groupes de travail destinés à établir une évaluation des disponibilités de carburants aéronautiques alternatifs à court (2020), moyen (2050) et long terme (au-delà) (1er groupe), d'élaborer des critères d'analyse de leur cycle de vie (2e groupe) permettant de fonder un mécanisme de marché mondial (Market based measures) (3e groupe), en prenant en compte le total d'émissions du puits au sillage. Un quatrième groupe de travail s'y est adjoint pour s'attacher spécifiquement aux critères d'évaluation des carburants alternatifs sous l'angle de leur durabilité environnementale. Certains de ces groupes de travail sont co-présidés par un chercheur d'un institut reconnu (MIT, JRC²⁰) et un expert de l'aéronautique (IATA, Argonne national laboratory – US...).

Il en ressort qu'à l'horizon 2020, les disponibilités susceptibles d'être produites à titre additionnel aux productions existantes de biocarburants routiers en respectant l'ensemble des critères de durabilité souhaitables, ne pourraient couvrir au mieux qu'1% des besoins en carburants aéronautiques²¹, green diesel mis à part²².

¹⁸ Avec le cas particulier des avions militaires et plus récemment des drones militaires ou civils.

¹⁹ Un pays peut ainsi interdire le survol des centrales nucléaires et le Canada a pu créer des zones d'exclusion au-dessus des prisons, pour limiter le risque d'évasion par hélicoptère.

²⁰ Massachusetts Institute of Technology, Joint research center (UE) ou Centre commun de recherches.

²¹ La projection et les évaluations seront présentées au comité de pilotage en février 2016.

²² Contrairement aux biocarburants aéronautiques classiques, dont la composition est très proche du kérosène fossile et s'inscrit dans une logique de substitution, le green diesel, utilisé par Boeing, est proche d'une huile hydrogénée utilisée pour les poids lourds routiers et il ne peut constituer qu'un

1.2.1.3. L'échec de l'extension de l'inclusion des vols extra-communautaires dans l'EU-ETS porté par la seule Union européenne et ses enseignements

Dans le contexte OACI, les décisions, préparées en amont par des comités d'experts associant de nombreuses parties prenantes sont le plus souvent arrêtées par consensus. En 2013 cependant, l'Union européenne, dont les États-membres sont Parties à la convention de Chicago, et en tant que tels membres de l'OACI, a tenté d'obtenir la généralisation de l'inclusion du transport aérien dans le dispositif communautaire d'échange de quotas d'émission (European Union Emission Trading System – EU ETS) mis en œuvre au sein de l'Union européenne dans le cadre de sa ratification du protocole de Kyoto.

Le dispositif communautaire d'échange de quotas d'émission constituait lors de son lancement en 2005, le plus grand système d'échange de crédit-carbone dans le monde. Il couvrait en 2009 plus de 10 000 installations des secteurs énergétique et industriel collectivement responsables de près de la moitié des émissions de CO₂ de l'UE et de 40 % du total des émissions de gaz à effet de serre. L'EU ETS a permis de mettre en place une limitation des gaz à émettre en offrant la possibilité à chaque entreprise d'acheter ou de vendre son « droit à polluer ».

La directive 2008/101/CE du 19 novembre 2008 avait prévu l'inclusion dans l'EU-ETS à partir de 2012 des émissions de CO₂ de l'aviation civile. Les compagnies aériennes, quelle que soit leur nationalité, étaient supposées obtenir des quotas pour couvrir les émissions produites par leurs avions desservant des aéroports européens et acheter l'équivalent de 15% de leurs émissions de CO₂, les autres étant distribués gratuitement.

Elle s'est appliquée pour l'ensemble des vols intra-européens ou en lien avec l'Europe en 2012 par la mise en place du processus de « monitoring, reporting, verification » portant sur le trafic et les consommations de carburant, les compagnies européennes étant contrôlées par leur pays de référence tandis que les compagnies non européennes étaient rattachées au pays européen avec lequel elles avaient le trafic le plus important. Les éléments collectés ont permis d'allouer aux compagnies les crédits carbone gratuits en fonction du trafic effectué.

2013 était supposée être la première année de mise en œuvre du processus avec reporting complet pour 2013 à produire avant mars 2014 et crédits carbone à restituer le cas échéant avant la fin avril 2014, les crédits gratuits ayant été alloués au cours de l'année 2013. Mais l'inclusion de l'aviation dans le dispositif ayant été contestée par vingt-six États extérieurs à l'Union européenne devant le Conseil de l'OACI et la Chambre des représentants du Congrès des États-Unis ayant adopté le 24 octobre 2011 un projet de loi interdisant aux compagnies aériennes du pays de participer au système, l'assemblée triennale d'octobre 2013 a adopté une résolution interdisant aux pays de l'Union européenne d'appliquer le dispositif aux vols en provenance et à destination de l'Europe. La Commission européenne a alors annoncé une suspension de la directive pour ces vols : plus d'obligation de reporting, annulation des crédits déjà distribués, etc., la directive continuant néanmoins de s'appliquer à tous les vols intra-européens au sein de l'espace des 30 États participant au dispositif communautaire.

L'adoption le lendemain, à l'unanimité, par la même assemblée triennale d'une résolution donnant mandat au CAEP de définir un dispositif mondial de mesures de

additif à mélanger au kérosène fossile dans une proportion fixe de 5% au maximum. Il pose d'ailleurs une difficulté : l'additif contient de l'oxygène, a priori proscrit dans les carburants aéronautiques.

marché (Global MBM), en vue de son examen par l'assemblée triennale de 2016 n'a pas effacé la perte de légitimité qu'avait entraînée la démarche des États européens. Le souvenir en est encore vif chez les interlocuteurs et interlocutrices de la mission et il interdit aujourd'hui une nouvelle initiative unilatérale des États de l'Union européenne dès lors qu'elle concernerait les vols internationaux.

Il est possible cependant d'en tirer un enseignement : c'est au sein des groupes de travail et de la préparation très en amont des décisions que s'exerce l'influence efficace qui permet d'emporter l'adhésion en assemblée triennale. Elle suppose un investissement de longue durée dans une participation patiente et constante aux travaux préparatoires.

1.2.2. L'action de la France et de l'Union européenne devrait se hisser au niveau de celle d'autres acteurs

1.2.2.1. Un travail d'influence dans les groupes de travail qui ne semble pas à la hauteur des enjeux

Dans une instance comme l'OACI, qui élabore des prescriptions techniques pointues, il ne suffit pas d'une représentation permanente ; les États-Unis ou la Chine y orchestrent leur participation quand les États de l'Union européenne apparaissent comme moins présents.

Les États-Unis font ainsi appel sans retenue à de nombreux experts issus des plus grands instituts universitaires pour porter les positions qui leur paraissent essentielles dans le cadre de leur politique industrielle. Ce n'est pas le cas des Européens. À titre d'exemple, le contrat européen sur lequel était assis le coordonnateur français du projet européen SWAFEA²³, expert reconnu des questions de biocarburants aéronautiques, n'a pas été reconduit en 2014.

Les interlocuteurs et interlocutrices de la mission, quelle que soit leur nationalité, ont insisté sur l'importance du patient travail quotidien d'influence auquel seule la durée confère une efficacité, compte tenu du temps long de l'acquisition d'une légitimité dans les groupes de travail. La succession rapide de représentants y est contre-productive, à moins qu'elle ne soit calculée²⁴. Or, la seule figure identifiée comme permanente au sein des groupes de travail du CAEP est issue du CCR/JRC et elle-même ne peut faire appel à d'autres représentants pour l'appuyer sur les enjeux qui lui paraissent aller au-delà des questions techniques.

1.2.2.2. Des contributions européennes qui apparaissent comme éclatées et insuffisamment présentes au quotidien et dans la durée

La qualité des individus mandatés au sein de l'instance n'est pas en cause, mais le siège d'un État-membre au sein d'un groupe de travail ne peut, sans perte de légitimité, être tenu par un acteur économique partie prenante, aussi majeur soit-il. Or, c'est progressivement une tendance qui se dégage dans un contexte de réduction des budgets. Confrontés à des impératifs analogues, les autres États européens n'ont pas une autre politique, mais il en résulte un émiettement qui nuit à l'efficacité du travail. Hormis la personne déléguée par le CCR, on observe que l'autre permanent européen

²³ Sustainable Way for Alternative Fuels and Energy in Aviation (2011).

²⁴ Le remplacement d'une équipe de négociateurs par la Chine permet de considérer comme caducs les engagements ou prises de position de l'équipe précédente.

des groupes de travail est un représentant d'une association environnementale, Environmental Defense Fund²⁵ (New York), qui siège au titre du réseau des associations environnementales (l'ICSA – international coalition for sustainable aviation) en qualité d'observateur au sein du CAEP. Tous deux participent régulièrement aux travaux depuis plusieurs années et ont d'ailleurs été désignés pour co-présider un des groupes de travail constitués au sein de l'AFTF.

²⁵ L'acronyme EDF ne renvoie pas ici à un producteur d'électricité...

2. Parmi les mesures permettant de contenir les émissions de GES du secteur aérien, le recours aux biocarburants est apparu comme nécessaire, à supposer qu'ils satisfassent à de nombreuses exigences

Même si la part des émissions de gaz à effet de serre imputable au transport aérien est de 2% à 3%, la comparaison entre les émissions par passager / km en équivalent CO2 de différents modes de transport et la coïncidence de démarches volontaires ou orchestrées pour tenter de faire face à l'urgence de la dégradation des conditions d'équilibre du fonctionnement planétaire excluent évidemment que le transport aérien s'abstraie de tout effort. Les engagements pris par le transport aérien sont d'ailleurs tout à fait réels même s'ils ne sont pas à la mesure de ceux qui ont été résolus pour d'autres secteurs (réduction de 23% des budgets carbone d'ici 2018 et de 38% en 2023 par rapport à 2013 pour le résidentiel tertiaire ; 48% de réduction en 2023 par rapport à 1990 pour l'industrie manufacturière...). Pourtant même ces engagements ne sont pas réalisables sans la prise en compte de biocarburants faiblement émetteurs de GES.

2.1. Seuls des biocarburants spécifiques auraient leur place

2.1.1. Les mesures envisagées par le secteur du transport aérien en complément des innovations technologiques comprennent des mesures de marché et le recours à des biocarburants

2.1.1.1. Les ruptures technologiques possibles pour le transport aérien ne s'inscrivent pas dans un avenir suffisamment prévisible

Les interlocuteurs et interlocutrices de la mission le soulignent, chacune des avancées technologiques permet de faire progresser l'efficacité énergétique des appareils et les améliorations engrangées sont considérables, les nouveaux appareils A 350, Boeing 787 ou ATR 600 consommant moins de 3 l de carburéacteur pour 100 km/passager.

Le LEAP (Leading Edge Aviation Propulsion), est dans cette optique une nouvelle génération de turboréacteur conçu par le consortium CFM International (réunissant Snecma – groupe Safran et GE – General Electric), destiné à remplacer en 2016 la famille des CFM56, le moteur civil le plus vendu au monde ; la diminution annoncée de sa consommation est de 15 % (la référence étant le CFM56-4) et celle des NOx de 50%, le niveau sonore du moteur mesuré au sol étant diminué de 15 dB.

Dans le même temps émerge un avion plus électrique : il s'agit de remplacer progressivement, à bord des avions, les énergies hydrauliques et pneumatiques par le courant électrique. Le système de taxiage électrique EGTS (Electric taxiing system) permet par exemple de faire rouler un avion sur la piste sans utiliser ses réacteurs ; moins bruyant, le dispositif permet de limiter la consommation de carburant (jusqu'à 4 % par cycle de vol des avions « moyen courrier »), et de réduire d'environ 75 % les émissions de CO2 durant les phases de roulage.

Pour autant, des objectifs de réduction massive telle que la perspective, même simplement souhaitée, de division par deux à l'horizon 2050 ne peuvent être atteints

par des améliorations au fil de l'eau. Or, des innovations technologiques de rupture (avion à hydrogène, aile volante) ne sont pas susceptibles d'être mises en place à grande échelle à cet horizon, à supposer qu'elles se traduisent effectivement par les gains escomptés.

2.1.1.2. L'objectif de plafonnement des émissions à l'horizon 2020 repose donc principalement sur des mesures de marché et sur l'introduction progressive de carburants alternatifs

À court terme, et pour satisfaire l'objectif de plafonnement des émissions à l'horizon 2020, l'aviation civile internationale compte sur la mise en place d'un mécanisme de marché permettant de compenser l'insuffisance des réductions par l'achat de crédits carbone et l'introduction de carburants alternatifs faiblement émetteurs de gaz à effet de serre.

Les éléments transmis à la mission sur les projets de mécanisme mondial de marché susceptible d'être adopté par l'OACI font apparaître une grande cohérence avec les données issues des autres groupes de travail de l'AFTF : les mécanismes de marché préconisés sont d'autant plus contraignants (et coûteux) que les critères de durabilité imposés aux carburants alternatifs sont faciles à satisfaire, soit parce que l'analyse du cycle de vie ne prend pas en compte des changements d'affectation des sols, soit parce que des co-produits très élaborés (par exemple destinés à l'industrie chimique ou pharmaceutique, voire à la cosmétique) font l'objet d'une valorisation à leur prix de vente alors qu'ils constituent une fraction très faible de ces co-produits.

Si seuls des carburants alternatifs réputés avancés au regard des directives européenne ne pouvaient entrer en considération, il est probable que le niveau de prix acceptable par les États-Unis et le Brésil pour les mesures de marché serait plus bas.

Il convient, en tout état de cause, de s'assurer que les critères de durabilité applicables aux biocarburants soient identiques pour toutes les compagnies aériennes pour éviter toute distorsion de concurrence.

Le mécanisme de marché en cours d'élaboration au sein du CAEP : de nombreux points à éclaircir

Même si les projets de décision ne sont pas encore publics, les enjeux en sont pour l'essentiel connus : le mécanisme de marché à mettre en place doit-il s'inscrire dans la logique de la convention de Chicago, tous les acteurs ayant les mêmes obligations, ou dans celle de Kyoto avec une responsabilité particulière des acteurs des États historiquement contributeurs aux émissions ? l'ensemble de l'effort doit-il être reporté sur le prix des billets facturés aux passagers ? Les compensations doivent-elles s'inscrire dans d'autres mécanismes tels REDD+²⁶ notamment ?

²⁶ Le REDD est une initiative internationale et transnationale lancée en 2008. Elle vise à lutter contre le réchauffement climatique provoqué par les émissions de gaz à effet de serre induites par la dégradation, destruction et fragmentation des forêts. Elle est coordonnée par l'ONU qui a mis en place le programme UN-REDD. Elle s'appuie sur des incitations financières et est indirectement liée au marché du carbone.

REDD est l'acronyme anglais pour Reducing emissions from deforestation and forest degradation ou « reducing emissions from deforestation and forest degradation and the role of conservation, sustainable management of forests and enhancement of forest carbon stocks in developing countries » soit « réduction des émissions liées à la déforestation et à la dégradation des forêts dans les pays en développement et rôle de la conservation, de la gestion durable des forêts et du renforcement des stocks de carbone forestier dans les pays en développement », souvent résumée en français par « Réduire les émissions de CO2 provenant de la déforestation et de la dégradation des forêts ».

Le recours à des biocarburants est considéré par tous les acteurs du transport aérien comme devant jouer un rôle dans la décarbonation du transport aérien. Cependant, il semble que cette conviction se soit assise sur un malentendu : compte tenu de la raréfaction des énergies fossiles, il paraissait plausible que le prix du kérosène fossile augmente progressivement jusqu'à croiser à terme le prix de carburants alternatifs.

Sur ce point, et quand bien même les certitudes ne sont pas de mise, les analyses convergent pour identifier des courbes largement parallèles entre les prix des carburants fossiles et ceux des carburants alternatifs bio-sourcés au moins pour les première et deuxième génération, au-delà de leur composante de production (un tiers) en énergie fossile. Les cours montrent un parallélisme des évolutions, comme si l'utilisation d'une ressource agricole, même pour des quantités marginales, en substitution d'un carburant aboutissait à faire évoluer son prix sur les marchés internationaux comme celui du carburant. Le coût de revient d'un biocarburant étant constitué pour la plus grande part de la ressource, des gains d'industrialisation ne peuvent donc porter que sur une part réduite de la formation du prix.

Dans ces conditions, le recours à des carburants alternatifs ne peut avoir une motivation économique, sauf si le coût induit par les émissions de gaz à effet de serre, au travers des mesures de marché, était suffisant pour compenser l'écart de prix entre carburants fossiles et carburants alternatifs, dont le coût de production est durablement plus élevé²⁷.

2.1.2. Le carburéacteur et ses caractéristiques

Le carburéacteur est un carburant spécifique tant par ses caractéristiques que par les conditions logistiques qui s'y attachent.

2.1.2.1. Description d'un kérosène

Le kérosène est un carburant utilisé dans l'aviation comme carburéacteur pour alimenter les turboréacteurs et les turbopropulseurs du transport aérien. Son origine est ancienne puisque la distillation du pétrole permettant d'obtenir du pétrole d'éclairage date du Xe siècle, l'appellation kérosène ou « pétrole lampant » étant postérieure (au milieu du XIXe siècle).

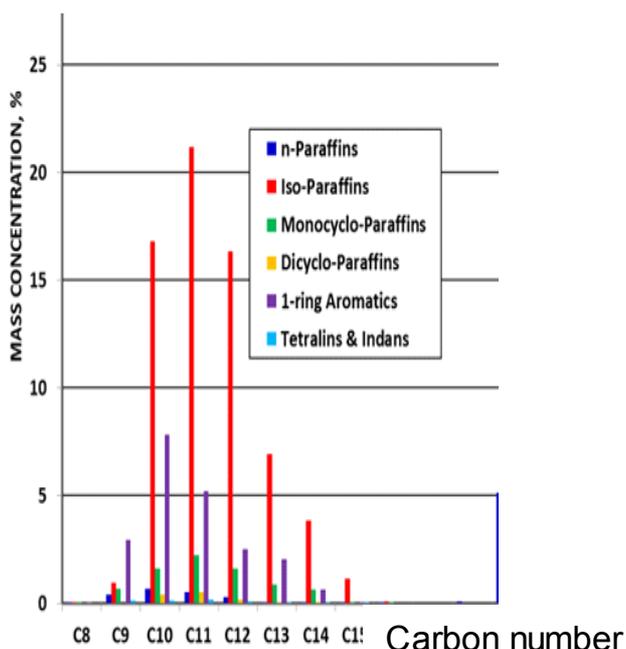
Il s'agit d'un mélange d'hydrocarbures issu du raffinage du pétrole d'une coupe pendant la distillation. Certaines coupes pétrolières sont cependant utilisables soit comme kérosène, soit comme essence (naphtas lourds) tandis que certains gazoles « légers » peuvent être utilisés comme kérosène ou comme gazole. Les coupes kérosène peuvent ainsi répondre à la demande soit en essence, soit en gazole ; en conséquence, une diminution de la demande en essence ou en gazole permettrait

Le mécanisme fait l'objet de nombreuses critiques, synthétisées notamment début 2011 dans un rapport d'experts présenté à l'ONU (*Global Forest Expert Panel on International Forest Regime*) en tant que ne prenant pas assez en compte les besoins locaux ni la demande croissante en terres agricoles et l'impact des biocarburants en termes de déforestation, ce qui a conduit l'Union européenne à mettre en place un programme analogue, le Plan d'action sur l'application de la législation forestière, la gouvernance et les échanges commerciaux (FLEGT), qui vise principalement, à partir d'accords de partenariat volontaire, à certifier l'origine légale du bois importé dans l'UE et ainsi à lutter contre l'abattage illégal.

²⁷ Compte tenu des marges d'incertitude liées aux prix de revient des biocarburants, la mission n'a pas été en mesure de modéliser le prix de la tonne de CO₂ évitée qui permettrait un équilibrage en fonction du coefficient d'abattement d'émissions de gaz à effet de serre du biocarburant considéré.

d'augmenter la part de kérosène dans la production de carburants, à capacité de raffinage constante.

Le mélange d'hydrocarbures qui constitue les kérosènes est variable : les hydrocarbures eux-mêmes contiennent de 8 à 15 atomes de carbone, pour l'essentiel des paraffines (alcane, comprenant un nombre pair d'atomes d'hydrogène, deux de plus que le double du nombre d'atomes de carbone) – 75 % à 90 %, appréciées pour leur contenu énergétique. Pour l'usage aéronautique, on préfère des iso-paraffines ou cyclo-paraffines, dont la stabilité au froid est importante, au contraire des paraffines longues. Les autres molécules sont des alcènes ou oléfines ($C_n H_{2n}$), molécules instables et non souhaitées dont la teneur doit être faible (inférieure à 5%). S'y ajoutent enfin des aromatiques de faible efficacité énergétique dont la proportion est variable (5 % à 25%). Il semble qu'il s'agisse de précurseurs de particules.



28

Trois points sont à souligner :

- à bord d'un appareil, le kérosène n'est pas utilisé seulement comme carburant mais également comme fluide caloporteur et réfrigérant, alimentation du moteur auxiliaire ou équilibrage de l'aéronef ;
- la quantité de soufre contenue dans le kérosène n'a pas fait l'objet d'une analyse précise, mais il semble qu'il ait un effet lubrifiant (comme le soufre l'avait dans le diesel) ; lui substituer un carburant totalement dépourvu de soufre poserait donc question. En revanche, il n'existe pas encore de travaux permettant d'évaluer la quantité minimale nécessaire au fonctionnement optimal ;
- le rôle des aromatiques, nécessaire au gonflement des joints d'étanchéité, n'a pas non plus pour l'instant été modélisé. Un taux minimal de 8% est actuellement requis ; ce taux résulte d'une observation pragmatique du bon comportement de carburants de ce type.

²⁸ Source : documentation remise à la mission lors du rendez-vous avec le groupe Safran.

2.1.2.2. La certification : un processus complexe, long et coûteux

Le processus de qualification est tenu pour à la fois complexe et rigoureux. Son premier objectif est de vérifier que la nouvelle filière proposée ne risque pas de faire régresser la sécurité du transport aérien.

Les critères

Variable dans sa composition, le carburéacteur doit satisfaire des normes précises, sachant que ses propriétés évoluent de façon importante avec la température. Ces normes concernent :

- le point éclair – température au-dessus de laquelle le carburant est susceptible de s'enflammer en présence d'une flamme ; il doit être supérieur à 38°C ;
- la tenue au froid, essentielle puisque le carburant doit pouvoir être pompé (donc liquide) en haute altitude où les températures sont extrêmes ; elle est suivie par le point de disparition des cristaux (au maximum – 47°C) et la viscosité à – 20°C (au maximum de 8 mm²/s) ;
- la stabilité thermique sans oxydation lui permettant de subir des cycles de chauffage/ refroidissement sévères, mesurée précisément par le passage dans un tube calibré à 260°C ;
- le pouvoir calorifique – quantité d'énergie dégagée par unité de masse lors de la combustion ; elle induit le rayon d'action de l'appareil. Il doit être supérieur à 42,8 MJ/kg.

Par ailleurs les additifs doivent être homologués et leur taux d'incorporation précisé. Ces critères ne mentionnent pas de taux de soufre ou d'aromatiques.

Les modalités

La distribution mondiale du carburéacteur, du fait des vols intercontinentaux, impose à la fois la mise en place de critères de qualité au plan international mais également la prise en compte des capacités de production locales. Il en résulte l'usage de normes de qualité compatibles entre elles.

La limitation des moyens de production de jet-fuels à quelques procédés précis et la mise en place de spécifications sur les produits distribués permettent d'assurer la totale compatibilité des carburants distribués avec les infrastructures et matériels existants.

Les principales sont l'ASTM²⁹ D1655 et la DEFSTAN³⁰ 91/91 mais d'autres spécifications sont également disponibles quoique moins utilisées : DCSEA³¹ (France) ou GOST (Russie), etc. La norme, élaborée sous forme de certificat d'analyse (Aviation Fuel Quality Requirement for jointly operated Systems), reprend pour l'essentiel les critères de spécification du DEFSTAN 91/91 qui correspond au Jet A1.

²⁹ Organisme de normalisation fondé en 1898 aux États-Unis sous la direction de Charles Benjamin Dudley (*American society for testing and material* – société américaine pour les essais et les matériaux) qui associe des représentants des industriels, des utilisateurs, des gouvernements et des universités de plus de cent pays et comprend aujourd'hui plus de 12 000 normes à son catalogue.

³⁰ Defense standards.

³¹ Direction centrale du service des essences des armées.

Les biocarburants aéronautiques font l'objet d'une norme spécifique d'approbation distincte des kérosènes fossiles : ASTM D4054 («Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons») ; la certification en 2009 de premiers carburants Fischer-Tropsch était intervenue également sous une certification spécifique : D7566.

La procédure de certification est un processus par étapes visant à assurer le maintien d'un niveau de sécurité optimal ; il est long, complexe et potentiellement très coûteux, assis sur une matrice d'essai exhaustive et une revue par tous les utilisateurs.

On s'assure d'abord que le carburant à certifier vérifie les caractéristiques de base du Jet A-1 (table 1 de l'ASTM D1655) et répond aux exigences fonctionnelles (pour ces deux étapes il faut environ un an et 500 000 €). Ensuite s'ajoutent des essais des composants (qui sont optionnels mais exigent de 1 000 à 10 000 litres de carburant, 2 ans et environ 3 M€) puis des essais moteur (également optionnels mais qui exigent à nouveau 1 an, 3 M€ et 1 million de litres de carburant).

Ce sont les filières qui sont certifiées, c'est-à-dire le mode de production du carburant et non la chimie du carburant. Le processus de certification ne vise pas à expliquer les phénomènes ; il est factuel et s'appuie sur des travaux de recherche permettant à la fois de prévoir les comportements mais aussi éventuellement d'aider à la compréhension des résultats obtenus.

Le processus de certification, nécessaire au maintien d'une sécurité optimale des vols, est cependant largement dépendant de l'expertise de quelques personnes dans chaque société, dont l'expérience permet d'identifier les éventuelles divergences de comportement que pourrait avoir un carburant avec les propriétés classiquement rencontrées pour les carburants fossiles.

Malgré la complexité de la procédure, de nombreuses filières sont à l'étude.

2.1.2.3. La position des forces armées : « one fits all »

Dans un contexte d'interventions militaires à l'extérieur, la capacité de projection suppose de minimiser les contraintes logistiques et de maximiser l'interopérabilité des forces. Le recours à un carburant unique pour les véhicules terrestres, les navires et l'aéronautique s'est imposé depuis une vingtaine d'années. Il ne peut dès lors s'agir que d'un carburéacteur qui s'inscrit dans une stratégie de convergence des spécifications militaires et civiles.

Il convient de noter que les forces armées, y compris dans le cadre de l'OTAN, utilisent en fait du Jet A1 auquel est ajouté un additif anti-glace, notamment pour l'usage dans les hélicoptères. L'enjeu quantitatif est faible : environ 8% des carburants aéronautiques consommés en France.

2.1.2.4. Des questions émergent, non prises en compte par la réglementation, et donc non résolues à ce jour

Le soufre et les aromatiques ne sont pas uniquement des sources de pollution

Alors que le soufre apparaissait comme un composant non souhaité, la comparaison avec les carburants bio-sourcés sans soufre a conduit à une analyse complémentaire dans laquelle il a été identifié comme lubrifiant nécessaire.

Il apparaît dès lors utile d'apprécier ses effets dans les différents processus qui font intervenir le carburéacteur pour en apprécier le taux minimal en vue d'un fonctionnement satisfaisant du moteur et permettre le cas échéant son remplacement par un additif moins polluant aux propriétés lubrifiantes analogues.

La proportion des aromatiques, à laquelle il n'avait pas été prêté attention puisqu'elle paraissait indifférente, fait de même l'objet d'une étude complémentaire consécutivement à la confrontation avec des carburants alternatifs dépourvus d'aromatiques. Leur rôle dans le gonflement des joints pour en assurer l'étanchéité a ainsi été mis en évidence. Il reste à explorer le taux minimal souhaitable pour un fonctionnement optimal de l'appareil.

L'hétérogénéité du kérosène fossile est-elle une qualité ou une nécessité ?

Un graphique a été présenté pour indiquer la répartition approximative des différentes molécules d'hydrocarbures (notamment d'alcanes). Il se trouve que certains modes de production de carburants bio-sourcés peuvent aboutir à la reproduction d'une seule molécule, par exemple, une iso-paraffine à 12 atomes de carbone. Le carburéacteur qui en résulterait présenterait dès lors une déformation significative du spectre. Cette déformation serait-elle source de vulnérabilité ou au contraire d'optimisation ? Des études complémentaires paraissent là-aussi nécessaires.

2.1.3. Les filières de biocarburants aéronautiques et leur degré de maturité³²

En résumé, les carburants recherchés devraient dans l'idéal être totalement miscibles, en proportion indifférente (dits « drop'in »), peu coûteux, durables / acceptables et avoir des perspectives de production en quantité suffisante. Il se trouve que la mission n'a pas rencontré de carburant bio-sourcé correspondant à cette description.

Est considéré comme drop'in un carburant totalement transparent en termes d'utilisation par rapport au carburéacteur classique. Il peut 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.

2.1.3.1. L'enjeu du drop'in

La durée de vie des aéronefs (plus de 30 ans en moyenne) et leur mode d'utilisation sont contraignants pour les carburants : variabilité thermique entre près de - 60°C en haute altitude et près de + 50°C en stationnement sur le tarmac, variabilité de pression (0,3 bar en altitude, pression atmosphérique au sol).

Malgré la circonstance particulière favorable liée au fait que 80% des prises de carburéacteur s'effectuent dans 190 aéroports (à comparer au 11 000 stations-services en France), il n'a pas été envisagé de retenir des carburants alternatifs qui ne seraient pas substituables en quantité variable aux carburants homologués fossiles. Les certifications portent en conséquence sur des proportions très supérieures à celles qui pourraient être obtenues en moyenne aujourd'hui compte tenu de la disponibilité de la ressource en carburants alternatifs, le taux de proportion certifié étant au reste plus conservatoire que modélisé.

³² Cf. annexes 2, 3 et 4.

En d'autres termes, un carburant alternatif drop'in pourrait être présent à 50% sur un aéroport et inexistant sur d'autres sans occasionner de difficulté d'emploi.

Il est rappelé à ce stade que les biodiesel ne répondent pas aux spécifications en termes de contenu énergétique, masse volumique et tenue au froid et que la présence d'insaturations sur leurs molécules constitutives pose un problème de stabilité à l'oxydation ; la démarche du green diesel de Boeing, qui s'inscrit dans une logique d'additivation, ne répond donc pas aux objectifs de drop in³³.

2.1.3.2. La disponibilité quantitative

Dans la mesure où l'incorporation de carburants alternatifs est supposée permettre aux acteurs du transport aérien de réduire significativement leur empreinte en termes de gaz à effet de serre, un taux d'incorporation faible, à l'image du transport routier, n'a pas été considéré comme satisfaisant au regard des engagements souscrits. En matière de carburants routiers, il ne semble pas possible d'aller au-delà de 10% d'incorporation de carburants bio-sourcés sans mobiliser de nouvelles terres et modifier de façon importante les moteurs. Or, si on considère la moyenne de réduction des émissions de GES des biocarburants, qui est de 65%³⁴, cet objectif conduit à un gain net maximal en GES de 6,5%. De ce point de vue, le taux d'incorporation de biocarburants aéronautiques ouvre des perspectives plus intéressantes : à 50% d'incorporation, l'abattement des émissions de gaz à effet de serre est significatif – plus de 30%.

Dans la perspective d'une réduction des émissions du secteur aérien sans remettre en cause sa forte croissance, la question de la quantité de ressource disponible pour une production importante est donc un facteur essentiel d'acceptabilité par les acteurs.

2.1.3.3. L'acceptabilité, voire la durabilité, des carburants alternatifs est une condition de leur prise en considération

Les acteurs du transport aérien s'estiment tributaires de leur image de pollueur convoyant des personnes très favorisées dans un paradis fiscal mondial. Les engagements volontaires souscrits par les acteurs visaient à éviter que ne leur soient appliquées des normes de réduction comparables à celles évoquées par les États dans le cadre des négociations internationales face à l'urgence des dérèglements climatiques.

Dans ce contexte, il ne s'agissait pas d'ouvrir un nouveau front médiatique dans lequel on aurait pu opposer la volonté de mobilité de quelques-uns et la survie alimentaire d'un grand nombre. La question de l'acceptabilité a donc été inscrite d'emblée dans les objectifs – ainsi le Livre blanc transport de 2011 qui prévoit 40% de substitution du kérosène fossile par des carburants à faibles émissions de GES en 2050 doit être articulé avec d'autres règles : les biocarburants ne doivent pas être produits à partir de matières premières provenant de terres de grande valeur en termes de diversité biologique, ou présentant un important stock de carbone ou qui sont des tourbières depuis 2008. En outre, les carburants éligibles doivent présenter un potentiel de

³³ En outre, il n'est pas sûr que l'additif ne conduise pas à une modification radicale des propriétés du fait de la présence d'oxygène.

³⁴ D'après l'étude ADEME/DIREM *Bilans énergétiques et gaz à effet de serre des filières de production de biocarburants en France* de 2002 considérée comme assez optimiste.

réduction des émissions de GES d'au moins 50% par rapport à la référence fossile en 2017 et de 60% en 2018 pour les nouvelles installations.

Dans cette optique, les acteurs du transport aérien ont choisi d'associer des organisations non gouvernementales du secteur de l'environnement pour apprécier en amont les critères à retenir, comme en témoigne la présence d'observateurs des associations environnementales au CAEP, membres pleins des groupes de travail de l'AFTF.

L'exemple des biocarburants routiers est ici aussi éclairant. Les différents États ou ensembles d'États ont élaboré des référentiels de durabilité, parfois proches, tels celui de la directive européenne relative aux énergies renouvelables (RED) et le Renewable Fuel Standard américain (RFS2). Il en existe bien d'autres : le Biomass Biofuel Sustainability Voluntary Scheme (2BSVs), le Bonsucro EU, l'International Sustainability & Carbon Certification System (ISCC), la table ronde pour des biomatériaux durables (RSB) et la Table ronde pour l'huile de palme durable (RSPO).

La certification de la table ronde sur les biocarburants durables (RSB) est dans cet esprit une initiative internationale des parties prenantes pour garantir la durabilité des biocarburants. Les producteurs de biocarburant et les processeurs qui effectuent une démarche volontaire pour certifier leurs opérations selon la norme RSB affichent leur compréhension et leur acceptation de la table ronde sur les biocarburants durables vis-à-vis des parties prenantes et des consommateurs.

En fait, la norme de certification s'entend à plusieurs niveaux : simple témoignage de la prise de conscience de la provenance des carburants utilisés, engagement volontaire à une vérification par ses propres soins, acceptation d'une vérification des engagements souscrits par des observateurs certifiés.

La durabilité des biocarburants est alors mesurée tout au long de la chaîne d'approvisionnement en vérifiant la conformité aux exigences de durabilité des matières premières, produits intermédiaires et produits finis, pour que chaque étape de la chaîne, du champ à la distribution, soit couverte. La norme RSB prend en compte plusieurs éléments en sus du taux de réduction des émissions de GES : la légalité des opérations, les droits de l'homme et du travail, la sécurité alimentaire locale, les effets sur le développement rural et social, la planification, le contrôle et l'amélioration des opérations de biocarburants, la conservation, l'utilisation de la technologie et la gestion des déchets et enfin les effets sur l'eau, le sol et l'air.

L'initiative, plus sectorielle, de la certification RSPO (Roundtable on Sustainable Palm Oil), est bien plus ancienne et a semble-t-il modelé la RSB ; l'organisation regroupe depuis janvier 2003 des producteurs, des distributeurs, des associations de protection de l'environnement, etc. ; elle est issue d'une coopération d'entreprises (dont Unilever) avec le WWF en vue d'utiliser la démarche de certification comme une solution à la culture intensive d'huile de palme, notamment sur les îles de Bornéo et Sumatra.

Ses résultats sont intéressants : si 35% des plantations ont obtenu l'approbation de la RSPO, celle-ci ne représente avec 3 millions de tonnes par an, que moins de 8% de la production mondiale totale d'huile de palme mais plus du tiers des importations européennes.

Les acteurs privilégient très majoritairement le niveau le moins contraignant de certification. Comme pour la RSB, la certification comprend en effet trois niveaux

d'exigence³⁵ ; en l'espèce pour 68% des ventes d'huile certifiée, l'utilisateur se borne à acheter des certificats à hauteur de la quantité d'huile de palme non durable utilisée, le produit allant aux producteurs d'huile de palme durable.

Une tout autre démarche serait possible : l'élaboration d'un méta-standard pour les biocarburants aéronautiques, dont les critères seraient vérifiés par l'OACI.

2.2. Les biocarburants dont les filières sont proches de la maturité industrielle ne répondent pas à l'ensemble de ces exigences

Des politiques publiques en faveur des biocarburants routiers, mises en place dans les années 1970 au Brésil et aux États-Unis, ont été élargies à un grand nombre de pays depuis le début des années 2000.

Elles poursuivent habituellement un triple objectif :

- sans remettre en cause les modes de vie et de consommation ni les choix de mobilité individuelle, tenter de diminuer un peu les émissions nettes de gaz à effet de serre issues du transport – même avec un bilan faisant apparaître une réduction de l'ordre de 60% des GES, un taux d'incorporation de 10% génère une réduction de 6,5% ; ce n'est donc pas une voie d'amélioration permettant d'atteindre des objectifs significatifs d'abattement ;
- réduire faiblement la dépendance aux importations de carburants fossiles et diversifier les sources d'approvisionnement énergétique ;
- soutenir le revenu agricole et revitaliser les zones rurales par la création nette d'emplois dans l'agro-industrie et les biofilères.

Ces politiques, qui portaient sur des déterminants localement maîtrisables, au moins à l'échelle de l'ensemble européen, se sont appuyées sur divers outils de défiscalisation, en cours d'abandon, et de mandat d'incorporation de bioéthanol dans l'essence et de biodiesel dans le gazole ; le défaut d'incorporation se traduit par une taxation – taxe générale sur les activités polluantes, qui a abouti à solvabiliser la demande.

Comme il ressort des annexes 2, 3 et 4, elles ont favorisé une croissance rapide, en 10 ans, de la production de biocarburants, et des lourds investissements notamment en France, assurés surtout par les opérateurs agricoles. La part de marché des biocarburants reste faible : à peine plus de 3 % de la consommation mondiale de carburants (en équivalent énergie) dans les transports routiers, 5 % au sein de l'Union européenne et aux États-Unis, 10% en France et environ 20 % au Brésil.

Depuis la fin des années 2000, le soutien des États aux biocarburants est remis en question, même si les controverses initiales sur leur bilan énergétique³⁶ ont été en partie tranchées³⁷, au regard de leur impact sur l'utilisation des terres en encourageant la déforestation et en réduisant la biodiversité.

³⁵ En fonction de la traçabilité de l'huile durable utilisée et de sa proportion dans la quantité achetée.

³⁶ La valeur de référence fossile pour le carburéacteur fossile, calculée dans le cadre ICAO/AFTF, est de 89 gCO₂eq/MJ. Cette valeur est une valeur moyenne monde pour 2020 et 2050, les résultats ayant montré que ce bilan Well To Wheel (fly) – du puits à la roue, ne varie pas beaucoup entre ces deux dates. Cette valeur, non encore publiée, est considérée à l'IFPEN comme la plus juste.

Les travaux conduits par l'institut national de la recherche agronomique en 2013³⁸ et leur reprise partielle dans le rapport n° 14056 du CGAAER de septembre 2014³⁹ démontrent que, si le secteur des terres (agriculture et forêt) se révèle un important émetteur de gaz à effet de serre (notamment des oxydes d'azote et de méthane, aux pouvoirs de réchauffement mondial très élevés) avec des émissions en forte hausse entre 2001 et 2011, sa part relative dans les émissions totales planétaires de GES s'est réduite, passant de 30,7% (GIEC 2007) à 24% (GIEC 2014) et leur bilan pourrait être notablement amélioré par des mesures pragmatiques.

Le chiffre des émissions est le résultat de tendances divergentes : les émissions relatives à l'agriculture et à l'élevage sont en forte hausse (+14%, de 4,7 GtCO₂eq en 2001 à 5,3 GtCO₂eq en 2011) du fait de l'expansion des productions agricoles dans les pays en développement. Elles représentent 11% du total des GES, du fait de la fertilisation azotée et de l'élevage principalement mais également de la riziculture, et des émissions de CO₂ qui résultent de la consommation d'énergie et de carburants fossiles dans les exploitations agricoles (0,87% du total mondial de GES). S'y ajoutent les émissions liées à l'usage des terres et à ses changements (total de 4,3 à 5,5 GtCO₂eq/an, soit un total de 10% des GES mondiaux émis) du fait de la déforestation (conversion agro-industrielle des forêts en terres cultivées), du recul des prairies et de l'artificialisation des sols du fait de l'étalement urbain.

Dans ce contexte, les travaux, qui portent sur la France, les émissions de GES y étant de 18,8% du total (2e contributeur après les transports)⁴⁰ proposent de développer le potentiel d'atténuation des émissions de GES d'ici 2030 par une politique résolue de restauration des terres dégradées et des sols organiques cultivés, une réduction de la déforestation, une bonne gestion forestière et du reboisement ainsi qu'une évolution radicale des pratiques agricoles en France. Celle-ci associe préservation des prairies, relance des systèmes herbagers et mixtes (agriculture/ élevage), justification d'un taux minimal de surfaces d'intérêt écologique dans les grandes cultures, réduction de moitié du rythme des surfaces artificialisées ou de prairies retournées, et s'inscrit donc dans l'optique d'une modification en profondeur des pratiques et des itinéraires agronomiques dans une perspective d'agroécologie pour passer d'une logique de silos à une logique de système.

Il est rappelé dans ces travaux que :

« L'augmentation des rendements agricoles dans l'UE, notamment en France, s'est traduite par l'utilisation intensive d'intrants, par la simplification des itinéraires culturaux, par la spécialisation des régions de

³⁷ Selon l'analyse de cycle de vie réalisée par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), comparant la consommation d'une unité d'énergie de biocarburant et celle d'une unité d'énergie de carburants d'origine fossile, la réduction des émissions de GES de bioéthanol de blé, de maïs ou de betterave à sucre est d'environ 50 % par rapport à l'essence, celle de biodiesel fabriqué à partir d'huile de colza, de tournesol ou de soja de 65-70 % par rapport au gazole. ADEME (2010). *Analyses de Cycle de Vie appliquées aux biocarburants de première génération consommés en France*. Étude réalisée pour le compte de l'Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer, du Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche, et de France Agrimer par BIO Intelligence Service.

³⁸ Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques, (2013) INRA pour le compte de l'ADEME, du MAAF et du MEDDE.

³⁹ Les contributions possibles de l'agriculture et de la forêt à la lutte contre le changement climatique.

⁴⁰ Source ; rapport CGAAER évoqué ; pour mémoire : résidentiel tertiaire :16,3%, transports : 27,2%... Les émissions de l'agriculture étant dues pour moitié à la fertilisation, pour 40% à l'élevage et aux rizières et pour 10% à l'énergie de mécanisation.

production ainsi que par une mécanisation très poussée, à la sources d'émissions croissantes de GES ».

Il conviendrait de garder présents à l'esprit ces éléments pour éviter que le bilan d'atténuation des biocarburants n'en soit fortement affecté et donc inscrire la production de ces biocarburants dans une agriculture climato-intelligente et agro-écologique volontariste.

Les travaux financés par la DGAC (convention 2012 – 93 0805), dans le cadre du CAER (carburants alternatifs pour l'aéronautique) et diffusés en août 2015 quant à l'évaluation environnementale des filières du puits au sillage (Well to Wake) confirment que c'est l'étape de la culture qui est déterminante sur le bilan GES du total ; pour la filière des huiles hydrogénées à base de colza par exemple, cette étape constitue entre 71% et 79% de contribution sur le total.

2.2.1. Les différentes filières de biocarburants aéronautiques⁴¹

Parmi les solutions étudiées pour produire des carburants alternatifs au kérosène fossile, certaines sont déjà opérationnelles, d'autres sont à développer mais toutes sont confrontées au même défi de disponibilité de la ressource. Ces éléments sont explicités dans les annexes 2, 3 et 4.

On distingue trois générations de carburants bio-sourcés : les biocarburants qui utilisent les réserves amidonnées ou oléagineuses des plantes (le grain), les biocarburants issus de la conversion des tissus de soutien formés de cellulose et de lignine (la paille) et enfin les micro-organismes photosynthétiques comme les algues, capables de synthétiser de grandes quantités de molécules carbonées notamment des huiles.

2.2.1.1. La première génération est industriellement à maturité et certifiée en ce qui concerne les matières premières lipidiques : huiles et graisses hydrogénées

L'une des techniques utilisées permet de transformer des huiles végétales ou des graisses animales, riches en structures triglycérides ou en acides gras en coupes kérosènes paraffiniques. Le procédé consiste à hydrogéner ces huiles de manière à éliminer l'oxygène qu'elles contiennent et produire ainsi des huiles végétales hydrotraitées purement paraffiniques, sans soufre ni aromatiques. Il est nécessaire ensuite de les soumettre à une hydro-isomérisation pour transformer les paraffines en iso-paraffines ; le même procédé peut ainsi produire en fonction des besoins, soit une coupe kérosène avec stabilité à froid, soit un produit de type gazole.

Cette filière est industriellement à maturité et déjà certifiée⁴² pour un taux d'incorporation à 50% pour l'aéronautique (exemple de Neste oil).

Le coût en est cependant durablement élevé, puisqu'il est fonction à près de 80% du prix de l'huile. En outre, si l'utilisation d'huiles de récupération en ferait une filière « avancée », la ressource en la matière est réduite – environ 50 000 tonnes par an en France.

⁴¹ Cf. annexe 3 notamment.

⁴² Exemple du procédé Vegan, développé par l'IFPEN avec Axens, mis sur le marché en 2011.

Les bio-ressources à dominante alimentaire, importées ou non, et les huiles de récupération dont les gisements limités sont déjà largement mobilisés sont également convoitées pour les biocarburants routiers (biodiesel) et la chimie. Le projet de reconversion d'une raffinerie conduit par Total à la Mède semble s'inscrire dans cette perspective : en présence de la concurrence des gaz de roche mère sur l'éthane et le méthane, l'adaptation technique des raffineries est coûteuse ; leur reconversion en bioraffinerie présente l'avantage de faire l'économie d'une dépollution préalable du site et d'un développement industriel. Mais les quantités à traiter induites par le modèle économique ne paraissent pas permettre d'exclure le recours à des importations d'huile dont la certification serait relative.

2.2.1.2. Les procédés de gazéification-synthèse et leurs substrats possibles (FT)

La voie Biomass to liquids (BtL) consiste à convertir la biomasse lignocellulosique (résidus de bois, pailles de céréales, déchets forestiers...) en carburants de synthèse. Elle est certifiée depuis longtemps (*par référence aux carburants à base de charbon et de gaz déjà certifiés*) pour un taux d'incorporation de 50%.

La chaîne de traitement comprend quatre étapes : le prétraitement de la biomasse (pour la concentrer), la gazéification, la purification du gaz de synthèse et la synthèse Fischer-Tropsch, qui permet de produire des cires hydrocarbonées, lesquelles doivent ensuite faire l'objet d'une hydro-isomérisation pour orienter la production vers des coupes kérosène, diesel ou naphta. La fraction kérosène obtenue est de très bonne qualité, sans soufre ni impuretés.

Les technologies correspondant aux trois premières étapes existent, mais elles doivent être adaptées aux spécificités de la biomasse – projet BioTFuel⁴³. Cette filière est au stade pilote dans le monde entier, pour développer notamment la production de biodiesel. Les installations de traitement supposent des investissements industriels très élevés qui ne s'équilibrent que par la production de grandes quantités (+1Mt/an), ce qui pose évidemment un problème d'alimentation et le cas échéant de déséquilibre sur les usages locaux préexistants de la biomasse.

Elle pourrait être considérée comme « durable » sous certaines réserves, dans la mesure où elle s'appuierait sur des gisements excédentaires de sous-produits de la forêt ou de l'industrie du bois) mais elle entre en concurrence avec une utilisation énergétique directe.

2.2.1.3. Les procédés biologiques de conversion des sucres, xyloses et alcools

La transformation de l'éthanol ou d'autres alcools en kérosène (Alcool to Jet) est également possible, l'éthanol étant produit, soit par fermentation de sucres ou d'amidon (1ère génération de carburants bio-sourcés, par exemple à partir du sucre de canne ou du maïs, Direct sugar to hydrocarbon process – DHSC), soit à partir de lignocellulose préalablement transformée en sucres. La production d'éthanol à partir des sucres issus de macro-algues pourrait également être étudiée.

⁴³ Projet en cours de finalisation (horizon 2017) pour ses démonstrateurs, qui rassemble l'IFPEN, le CEA, Axens, Sofiprotéol - Avril, Total et Uhde. Le prétraitement de la biomasse intervient près du lieu de collecte sous forme d'une torréfaction.

Le projet Amyris en est un exemple : lancé en 2010 dans le cadre d'un partenariat avec Total (17,2 % dans le capital d'Amyris), Amyris vise à développer des voies biologiques pour produire, puis commercialiser, des carburants (biodiesel, biokérosène – début de production industrielle de farnésène pour du biodiesel et du biokérosène en 2013 dans l'état de São Paulo) et des produits chimiques issus de matières premières réputées renouvelables, avec fabrication et commercialisation du Biofene®, nom commercial de la molécule Farnésène au Brésil.

Cette production industrielle pourrait être poursuivie à plus grande échelle d'ici 2020, en mettant à profit la plate-forme de biologie de synthèse industrielle d'Amyris qui permet d'améliorer et optimiser des micro-organismes capables de transformer des sucres en molécules visées par fermentation et en s'appuyant sur un laboratoire de recherche et des unités pilote en Californie et au Brésil. Le Farnésène a été certifié pour un taux d'incorporation de 10% sans qu'il soit possible de savoir si cette limitation était provisoire ou le résultat d'une réserve quant au mode de fabrication.

Ces filières ne sont pas pleinement à maturité industriellement et ne paraissent pas compétitives. Si les ressources brutes à l'hectare sont potentiellement importantes, les filières investissent principalement dans de nouveaux marchés rémunérateurs comme la cosmétique et la chimie. Au moins un projet de certification en cours pour l'utilisation aéronautique a été cependant porté à la connaissance de la mission dans le domaine, celui de GlobalBioénergie⁴⁴.

La transformation des sucres peut également être effectuée directement par voie chimique catalytique, mais la diversité des produits obtenus et le faible rendement matière constituent des obstacles à la transformation en kérosène. De même des procédés de pyrolyse rapide de la biomasse existent qui permettent de la liquéfier directement, mais le liquéfiat, très instable, doit faire l'objet d'un post-traitement qui ne paraît ni durable ni économique.

2.2.1.4. La filière « déchets urbains », qui doit encore prouver sa faisabilité

Le projet Solena qui utilise la même technologie Fischer-Tropsch à partir de déchets organiques urbains (dont le taux de matière organique est supérieur à 80%) semble faire reposer son modèle économique sur la co-génération d'électricité revendue à un prix lui permettant de générer un sous-produit de bio-kérosène dans des quantités à déterminer, en association avec British Airways. Les observateurs s'étonnent toutefois de l'absence dans le tour de table industriel du projet de grands acteurs du traitement des déchets dont l'hétérogénéité est connue pour être un obstacle important à tout procédé industriel classique.

Dans une démarche analogue, mais avec un grand partenaire du traitement des déchets, United Airlines et Fulcrum BioEnergy ont conclu un accord qui prévoit le développement conjoint de projets situés près des hubs de United, avec un potentiel de production de près de 680 millions de litres de carburant par an. L'investissement d'United Airlines est de 30 millions de dollars dans Fulcrum BioEnergy et Fulcrum affirme que sa première usine de carburant alternatif débutera son exploitation commerciale en 2017.

La technologie de Fulcrum et supposée convertir les ordures ménagères solides en carburant aérien renouvelable par un processus thermo-chimique tout en détournant des déchets des sites d'enfouissement et en créant de nouveaux emplois au sein des

⁴⁴ Cf. annexe 3.

communautés situées à proximité des installations de Fulcrum. Les projets de Fulcrum ont également reçu le soutien et la participation de l'U.S. Air Force et de l'U.S. Navy pour la production future de carburant répondant aux caractéristiques militaires.

United Airlines accompagne l'investissement d'une communication : « *Nous avons conscience que les carburants alternatifs sont une industrie émergente vitale pour l'avenir de l'aviation et ceci est juste l'une de nos initiatives pour aider à rendre ces carburants commercialisables et évolutifs* », déclare Brett Hart, Vice-président Exécutif et Conseiller Juridique de United. « *Investir dans des carburants alternatifs n'est pas seulement bon pour l'environnement, c'est un choix judicieux pour notre compagnie alors que les biocarburants ont le potentiel de nous prémunir contre la volatilité des prix du pétrole et les réglementations carbone* ». Star Alliance a également négocié un accord d'approvisionnement à long terme avec Fulcrum et, sous réserve de disponibilité, aura la possibilité d'acheter au moins 340 millions de litres de carburant durable par an pendant au moins 10 ans « à un prix compétitif par rapport au carburant aérien classique ».

On peut constater dans cet exemple que les compagnies aériennes ne s'engagent pas à acquérir des carburants bio-sourcés à leur prix de revient, qui sera en tout état de cause très supérieur aux carburants fossiles.

Dans le même ordre d'idées, les boues de station d'épuration, qui constituent une ressource plus homogène, ont un pouvoir calorifique trop faible pour justifier d'un séchage gourmand en énergie et le gisement est réduit également : 9 Mt soit environ 1.5 Mt de matière sèche.

2.2.1.5. Les autres filières sont encore tout à fait expérimentales

Des ressources huileuses actuellement non commercialisées sur les marchés (caméline, jatropha) seraient potentiellement cultivables sur des terres non agricoles mais leur potentiel de développement est lié à la mise en état et à la valorisation de terres dites marginales ou abandonnées. Or, ces terres représentent des surfaces modestes dans l'Union européenne (1,3 million d'hectares, soit nettement moins que les surfaces aujourd'hui utilisées en France pour des cultures énergétiques - 2 millions d'ha). Et leur identification dans des pays en développement se heurte à des jeux d'acteurs qui aboutissent à chasser de leur habitat des populations déjà fragilisées.

Les micro-algues lipidiques en milieu aquatique ont une productivité théorique en huile près de vingt fois plus élevée que celle des plantes terrestres mais supposent une quantité significative en eau et en intrants ainsi qu'une énergie lumineuse importante. En outre, le passage du laboratoire à la culture industrielle fera sans doute apparaître des fragilités non anticipées qu'il faudrait traiter. La maturité de la filière est donc encore incertaine même si certains des interlocuteurs et interlocutrices de la mission l'estiment à 2025.

2.2.1.6. Les emplois associés aux productions actuelles de biocarburants en France

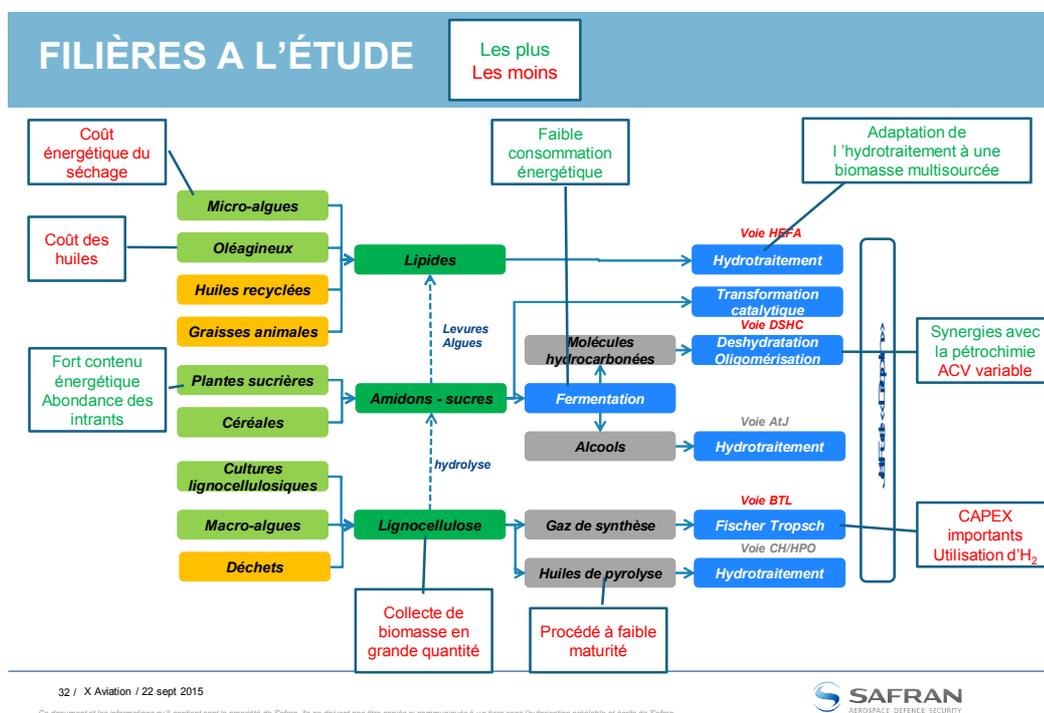
L'un des objectifs poursuivis par la constitution d'une filière française de biocarburants routiers était le soutien à l'emploi agricole et agro-alimentaire. Il est donc utile de faire un point rapide sur les emplois associés à cette production.

Les chiffres disponibles montrent une progression entre 2005 (étude ADEME) : 3 900 emplois, 2012 (études Price Waterhouse Coopers et Deloitte) : respectivement 9 000 et 10 600 emplois et un chiffre avancé par le directeur général de Sofiprotéol dans les Échos en juillet 2013 : 20 000 emplois. Cette valeur apparaît comme un majorant difficile à documenter.

Contribuent à la production de biodiesel – diester en France en 2012 sept usines pour une production totale de 2 200 kt⁴⁵, soit une production moyenne par usine de 250 000 t et en moyenne 40 salariés pour un taux d'incorporation de 7%. Le passage à 5% menacerait 120 emplois.

Une mission de clarification, de méthodologie et de prospective relative à la dynamique de création d'emplois dans les bio-filières est en cours au CGAAER à la demande du Ministre chargé de l'agriculture.

2.2.1.7. Récapitulatif des filières



2.2.2. ... ne répondent pas à l'ensemble des critères

En substance la profusion d'initiatives et de programmes est manifeste, sans que se dégage une option clairement supérieure aux autres.

⁴⁵ Source Rapport d'activité développement durable 2012 de Diester industrie France.

2.2.2.1. L'enjeu économique

Même si un chemin d'apprentissage peut limiter les coûts de traitement nécessaires à la production de biocarburants aéronautiques, il reste que toutes les filières sont fortement dépendantes du coût de la ressource, qu'il s'agisse d'huile, de sucre ou de ligno-cellulose.

Or, cette ressource est d'autant plus coûteuse que le kérosène fossile est quant à lui particulièrement bon marché – pour simplifier, quand un baril de brut se négocie à 100 \$, le litre de kérosène est à 1 \$, la proportion se conservant quel que soit le prix du brut. Le coût très faible résulte de l'interdiction de taxation inscrite d'emblée dans la Convention de Chicago en 1944.

Comme en outre les cours des produits agricoles suivent le cours du brut, une baisse ou une hausse n'entraîne pas de déconnexion entre les deux prix.

Par ailleurs, les instruments utilisés pour promouvoir l'usage de biocarburants routiers ne sont pas utilisables dans le cas du transport aérien qui est interdit de taxation. Les compagnies aériennes ont pu assumer des variations énormes du prix du carburant parce que ces variations étaient imposées à toutes les compagnies. En revanche, elles ne pourraient faire face à des chocs asymétriques tels des règles qui ne s'appliqueraient qu'aux compagnies d'une zone géographique. Il est donc exclu de concevoir un mandat d'incorporation qui ne serait pas d'emblée mondial. En conséquence, il n'est pas approprié de proposer une mesure, même minime, qui ne s'appliquerait qu'à une partie des acteurs.

2.2.2.2. L'enjeu écologique

Les discussions au sein des groupes de travail du CAEP en témoignent, les critères de durabilité ont un contenu politique. Il importe d'en expliciter les enjeux.

À titre d'exemple : quand la durée de référence prise en compte pour l'analyse du cycle de vie⁴⁶ est de 30 ans, la déforestation se justifie davantage que si elle est de 20 ans, la durée d'amortissement des émissions générées ne permettant pas le lissage. De même, en fonction de ce qui sera considéré comme produit principal visé par une production et de ce qui apparaîtra comme un co-produit ou un sous-produit, l'affectation des allocations d'émissions sera différente. Il en va de même pour le mode de valorisation des produits et des co-produits ou sous-produits : si cette valorisation est fonction du prix de vente plutôt que du volume, les molécules susceptibles d'être utilisées en chimie déséquilibrent le bilan et justifient une dégradation importante du milieu, etc.

C'est pourquoi il est utile de disposer d'effets de cliquet : ne peuvent être pris en compte que les biocarburants dont le bilan se traduit au moins par une réduction des émissions supérieure à un certain seuil. La référence peut être celle de la directive européenne ENR.

En matière de biocarburants aéronautiques intervient en outre un autre facteur : si la demande en la matière est faible au regard de la demande en biocarburants routiers, il est fait l'hypothèse d'une demande additionnelle, qui donc ne remet pas en cause les équilibres. Mais les objectifs de réduction des émissions du transport aérien supposent

⁴⁶ Cf. les travaux financés par la DGAC dans le cadre de convention 2012 93 0805 – CAER (carburants alternatifs pour l'aéronautique) diffusés en août 2015 quant à l'évaluation environnementale des filières du puits au sillage (Well to Wake).

des taux d'incorporation à terme élevés et de ce fait une demande qui n'est plus résiduelle (de l'ordre de la demande en biocarburants routiers). Il convient donc d'examiner précisément les effets de seuil qui résultent de la mise en évidence de besoins qui excèdent les marges de manœuvre.

2.2.2.3. L'enjeu de la ressource disponible et des concurrences d'usage

L'enjeu écologique se double des pressions sur le milieu qui résultent de la rareté des ressources susceptibles d'être mobilisées pour la production de biocarburants aéronautiques.

L'évaluation de la ressource disponible doit être en conséquence fonction de l'optimisation des usages qui prend en compte le caractère plus ou moins long de sa résilience : une ressource qui se renouvelle quotidiennement comme l'énergie solaire sur une parcelle n'a pas le même potentiel qu'une ressource dont la durée de restauration d'un an comme une récolte ou de vingt ans comme une forêt.

Pour les biocarburants de première génération, la production de la ressource doit prendre en compte les impératifs d'agro-écologie sous peine d'en déséquilibrer gravement le bilan. Il est rappelé que le volume des biocarburants routiers consommés au sein de l'UE a crû de 38% entre 2008 et 2010 pour atteindre 4,27 % du total de l'énergie consommée dans les transports (13 Mtoe), utilisant en 2010 5,7 Mha de terres, dont seulement 57% au sein de l'UE. En l'absence de politique précise, il paraît évident que de nouvelles terres seront mobilisées sans qu'un projet général n'en cerne l'ampleur⁴⁷.

Or, les objectifs nationaux portant sur la proportion d'énergies renouvelables, tels qu'ils figurent dans la loi relative à la transition énergétique, conduisent également à exercer une pression sur la ressource éventuellement disponible pour la deuxième génération de biocarburants, qu'il s'agisse de lignocellulose ou de résidus agricoles.

Une fois déduits tous les usages existants, il resterait à l'horizon 2030 une disponibilité pour l'ensemble des usages additionnels :

- 139 Mt de tonnes par an de résidus agricoles (en 2015 : 122Mt),
- et moins de la moitié des résidus forestiers, sachant que ceux-ci sont aussi convoités en qualité de bois-énergie.

Les terres disponibles résiduelles sont trop faibles pour apporter une contribution significative en termes de production d'énergie totale (0,5 à 1% du total des transports) alors que le même potentiel apporterait une contribution significative en termes de chauffage : entre 5,3% et 11,4% de la production de chaleur⁴⁸.

Il en résulte que l'usage de la lignocellulose pour la fabrication de biocarburants ne paraît ni efficient en termes énergétiques par rapport à un usage en bois-énergie ni judicieux au regard du temps long de restauration de la ressource. La « deuxième génération » ne paraît en conséquence pas apporter un gain manifeste par rapport à la première génération dans la mesure où elle entre en concurrence avec d'autres usages au moins aussi légitimes.

⁴⁷ Source Institute European Environmental Policy, mai 2014 Space for energy crops – assessing the potential contribution to Europe's energy future.

⁴⁸ Idem.

Quant à la ressource éventuellement disponible pour une troisième génération, il est bien difficile de l'évaluer compte tenu du caractère très prospectif de ces estimations.

2.2.3. La preuve par l'expérience et ses limites

En somme, il est tout à fait possible de produire des biocarburants aéronautiques et aujourd'hui plus de 1 700 vols commerciaux en ont fait la preuve dans le monde, à l'initiative d'une vingtaine de compagnies aériennes, avec des biocarburants issus de différentes filières (huile, sucre, Fischer-Tropsch...) mais ce chiffre est modeste au regard des millions de vols annuels.

Cependant l'équation économique (le surcoût de production est évidemment énorme, de l'ordre de trois fois le prix du carburant fossile) et l'équation écologique (ressource disponible quantitativement respectant des critères de durabilité exigeants) ne sont pas résolues, d'autant que la question du changement direct ou indirect d'usage des sols est un facteur difficile à quantifier sans risque de contestation.

En outre, les différences d'acceptabilité entre les générations de biocarburants sont en fait assez ténues : la production de biocarburants directement issue d'huile ou de sucres, en tant que co-produits d'alimentation animale (tourteaux oléagineux ou pulpes), à proportion des besoins en matière d'alimentation animale, n'est pas plus problématique que la production à partir de ligno-cellulose, dite de deuxième génération, une ressource qui fait l'objet de concurrence d'usages pas moins légitimes.

3. Les propositions doivent s'inscrire dans un contexte plus large

Indépendamment des filières, il paraît utile d'utiliser les ressources disponibles le mieux possible. Un des premiers éléments à considérer dans cette optique est l'efficacité énergétique de l'option retenue. Cet aspect permet une comparaison des différentes options pour la fourniture d'énergie aux activités économiques à partir d'une même variable : la puissance, c'est-à-dire la quantité d'énergie disponible en un temps donné.

Les biocarburants se situent dans la zone des rendements les plus faibles, parce qu'ils sont de fait limités par le rendement de la photosynthèse (<1%). Même la troisième génération, qui prévoit l'utilisation d'algues, dont la productivité théorique est vingt fois supérieure à celles des plantes à huile, est destinée à rester bien moins efficace que la production d'électricité par l'utilisation de l'énergie solaire, alors même que la faiblesse du rendement photovoltaïque est souvent évoquée pour critiquer ce mode de production d'énergie, pourtant une source d'électricité très rentable en termes de surface mobilisée⁴⁹⁵⁰.

En revanche, les biocarburants sont en mesure de fournir un carburant liquide utilisable pour les transports en substitution des carburants d'origine fossile, parce qu'il s'agit d'une solution de stockage d'une forte quantité d'énergie pour une masse et un volume relativement faibles.

La mise au point d'une solution fiable, rentable et de masse raisonnable pour le stockage de l'énergie électrique, serait donc une meilleure solution pour tous les cas dans lesquels le recours à des carburants liquides n'est pas absolument nécessaire. Les véhicules hybrides à stockage d'énergie font de ce fait partie des solutions technologiques envisageables. Par ailleurs, toute solution qui permettrait le transfert des flux de véhicules individuels vers des transports électriques guidés sera potentiellement plus efficace que l'utilisation de biocarburants. Ainsi, si le système de transport permet à la fois des déplacements à grande distance par la voie ferroviaire, des déplacements urbains au sein de réseaux de transports en commun efficaces et des déplacements locaux, surtout collectifs, essentiellement électriques, les économies d'émissions de gaz à effet de serre sont potentiellement considérables, sans commune mesure avec ce qui peut être obtenu par l'incorporation de biocarburants.

Des véhicules hybrides capables de stocker suffisamment d'énergie électrique pour les usages les plus courants sont à la portée des évolutions technologiques envisageables sans révolution. Il paraît donc important de garder à l'esprit l'importance des économies d'énergie et des modes alternatifs et surtout du couplage de l'ensemble.

⁴⁹ Cf. par exemple : Agrocarburants et environnement, rapport final du séminaire organisé à Grenoble en janvier 2009 par le Commissariat général au développement durable et le Conseil Scientifique du Patrimoine Naturel et de la Biodiversité, coordonné par Jean-Marc Salmon, ETOS/Telecom & Management Sud Paris.

⁵⁰ Pour avoir 10% de biocarburants à partir de cultures dans les carburants automobiles, il faut deux millions d'ha de cultures pour produire en France 4 millions de tonnes d'équivalent pétrole, 1 ha produisant donc 2 millions de tep de biocarburants. Selon l'Agence internationale de l'énergie, une tonne d'équivalent pétrole représente 11,6 mégawattheure, 1 ha produit en conséquence 23,2 MWh annuellement. Or, l'irradiation solaire annuelle globale horizontale (IGH) en France est en moyenne de 1 274 kWh/m² ; un hectare représentant 10 000 m². l'hectare reçoit donc 12 740 MWh par an. Le rendement de la production de biocarburant (division de l'énergie produite par l'énergie incidente) est donc de 23,2/12 740 soit 0,18%. Un panneau solaire a un rendement de 20%. Pour obtenir de l'hydrogène, il faut en outre une électrolyse dont le rendement est de 70 à 85%. En conséquence, avec un ha de panneaux solaires, on peut produire : 12 740 x 0,2 x 0,7 = 1 784 MWh soit 153 millions de tep. Le rendement est donc de 14% pour l'hydrogène solaire et de 0,18% pour un biocarburant mais il s'agit d'un carburant liquide, qui est indispensable dans certains usages.

Tout cela ne saurait être dissocié des recherches sur la mobilité en général et sur les différentes sources de diminution des émissions de gaz à effet de serre en vue d'éclairer les décisions politiques par une vision générale du système. Il s'agit de passer d'une vision environnementale par filière à une approche de développement durable, nécessairement inscrite dans une vision de système.

En revanche, les biocarburants sont la seule alternative aujourd'hui aux carburants fossiles liquides pour les usages qui en sont durablement dépendants sans alternative, tels le transport aérien et les actions de projection des opérations militaires.

3.1. Les politiques nationales de certains pays sont actives en matière de recours aux carburants alternatifs

3.1.1. Quelques éléments pour situer la politique française en matière de carburants alternatifs

La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) prévoit de réduire de 40% les émissions de GES en 2030, de les diviser par quatre en 2050 par rapport à 1990 et de réduire de moitié la consommation d'énergie à l'horizon 2050 par rapport à 2012, sans décliner ces objectifs par secteurs. Elle porte la part des énergies renouvelables à 23% de la consommation finale brute d'énergie en 2020 et à 32% en 2030 et prévoit en outre que la part de l'énergie produite à partir de sources renouvelables dans tous les modes de transport en 2020 soit égale au moins à 10% de la consommation finale d'énergie dans le secteur des transports.

L'objectif sectoriel inscrit dans la loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement en matière de transports est de réduire les émissions du secteur des transports de 20% d'ici 2020 par rapport à 2005, afin de revenir au niveau de 1990.

Pour atteindre cet objectif d'ensemble, la première loi de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement prévoyait plusieurs objectifs chiffrés dont la réduction des émissions moyennes de CO₂ de l'ensemble du parc des véhicules particuliers en circulation de 176 gCO₂/km à 120 gCO₂/km en 2020.

L'Union européenne⁵¹ s'est également fixée des objectifs ambitieux en la matière en limitant à 95 gCO₂/km les émissions des véhicules neufs à l'horizon 2020 et celles des véhicules utilitaires légers à 147 gCO₂/km avec un mécanisme de sanction à l'encontre des constructeurs en cas de dépassement des limites d'émissions⁵².

L'objectif fixé par le plan gouvernemental en faveur du véhicule électrique, adopté en 2009, est de voir circuler 2 millions de véhicules de ce type d'ici 2020. La LTECV prévoit comme objectif l'installation d'ici 2030, d'au moins 7 millions de points de charge installés sur les places de stationnement des ensembles d'habitations et autres types de bâtiments ou sur des places de stationnement accessibles au public.

La LTECV prévoit que la programmation pluriannuelle de l'énergie fixe un objectif d'incorporation de biocarburants avancés (c'est-à-dire produits à partir de matières premières ne créant pas de besoin de terres agricoles supplémentaires) dans la consommation finale d'énergie. Elle précise que l'objectif en matière de développement

⁵¹ Règlements (CE) n° 443/2009 et n°510/2011.

⁵² Rien n'est précisé cependant quand le dépassement est organisé frauduleusement.

des énergies renouvelables à l'horizon 2030 pourra être atteint en portant la part des biocarburants à 15% de la consommation finale de carburants, la part des autres biocarburants (ceux qui ne sont pas « avancés ») ne pouvant excéder 7% d'incorporation. Aucun objectif ne porte sur le développement des filières hydrogène, GNV, GPL-C ou autres motorisations.

La loi de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement affiche une démarche transversale de soutien à la décarbonation des véhicules :

« L'État soutient et promeut les innovations technologiques réduisant la pollution et la consommation des véhicules, en veillant à ce que ces innovations concourent également à la réduction des polluants locaux, comme les particules ou les oxydes d'azote. Il mettra en œuvre un programme de recherche en faveur du développement industriel des véhicules propres et économes. Il favorisera les recherches sur des véhicules utilisant des matériaux plus sûrs et plus légers. Il incitera les collectivités territoriales, les établissements publics et les entreprises disposant d'un parc automobile à usage professionnel important à procéder à des achats groupés de tels véhicules. »

Diverses mesures ont été mises en œuvre pour améliorer l'efficacité environnementale et énergétique du mode de transport routier : bonus-malus, étiquette CO2 des véhicules particuliers neufs à la vente, taxe sur les véhicules de société en fonction du taux d'émissions de gaz à effet de serre, obligation d'acquisition de véhicules électriques, hybrides rechargeables, etc. lors du renouvellement du parc pour l'État et ses établissements publics ainsi que pour les collectivités territoriales et leurs groupements et les entreprises nationales, etc.

Un plan adopté en 2009 était destiné à favoriser les véhicules électriques et hybrides rechargeables (mise en place de batteries, infrastructures de recharge, recherche, industrialisation) en vue d'intégrer les véhicules décarbonés dans les nouvelles solutions de mobilité et de participer à l'émergence d'une filière française offensive (filiale batterie à Flins, intégration de prises de recharge dans les bâtiments, parkings et entreprises...), déployer des infrastructures de recharge publique, seconde vie des batteries... Cependant, et même si les ventes de véhicules électriques à batterie ont fortement progressé en 2012 et 2013, aussi bien en véhicules particuliers que véhicules utilitaires, les résultats sont modestes (respectivement 8 781 et 5 227 immatriculations), le parc étant évalué à environ 18 000 et 11 000 véhicules. En outre, l'offre en termes de véhicules hybrides rechargeables reste limitée. Apparus en 2011, les premiers modèles restent onéreux en comparaison des véhicules hybrides classiques ou électriques.

Dans le cadre des Investissements d'Avenir, l'État a confié à l'ADEME le rôle d'opérateur du programme « véhicule du futur », pour promouvoir le développement de technologies et de solutions innovantes et durables en matière de déplacements terrestres et maritimes et notamment en ce qui concerne les véhicules routiers faiblement émetteurs de CO2 et les solutions de mobilité décarbonée.

Parallèlement aux filières actuelles, la recherche sur les biocarburants de deuxième et troisième génération est privilégiée. Outre les efforts menés par des centres de recherche, des financements sont mis en place par l'Agence nationale de la Recherche (ANR), tel que le programme Bioénergies 2010 qui a pour objectif la valorisation énergétique de tous les constituants de la biomasse (sous forme de chaleur, d'électricité, de gaz de synthèse et biocombustibles liquides, utilisables en substitution des énergies fossiles).

Il ressort de cette présentation d'ensemble que la France s'était engagée depuis 2009 dans la promotion de véhicules et de mobilité décarbonée mais que les initiatives de 2009 n'ont pas été poursuivies, la France investissant désormais davantage dans les biocarburants que dans d'autres voies de décarbonation du transport routier.

Lors de ses entretiens avec la mission, la Commission européenne a rappelé que les incitations dont bénéficient aujourd'hui les biocarburants routiers seront remises en cause à compter de 2020. Or le modèle économique de la filière en est aujourd'hui dépendant.

3.1.2. Diverses politiques nationales explorent un panel de solutions plus large

Il ressort d'une étude éditée par la direction générale du Trésor en mars 2015⁵³ relative à la comparaison des politiques nationales relatives au développement des carburants alternatifs dans huit pays (Allemagne, Brésil, Chine, Corée du Sud, Danemark, États-Unis, Japon et Suède), dont certains éléments sont présentés plus précisément en annexe 9, que certains pays privilégient ouvertement une filière tandis que d'autres ont une politique répartissant les moyens pour explorer différentes voies de décarbonation, notamment pour les transports.

Les biocarburants sont surtout utilisés dans le transport routier, à des pourcentages peu significatifs sauf au Brésil ; l'usage dans l'aérien est marginal ou inexistant.

L'exemple **allemand** est particulièrement instructif : les investissements dans l'hydrogène et les piles à combustible ont été initiés par un programme national d'innovation en 2006 d'une durée de dix ans avec un budget total d'1,4 Mrd d'€ avec comme objectif de mettre sur le marché des technologies de pointe dont la chaîne de valorisation doit s'effectuer le plus possible en Allemagne avec des démonstrateurs à grande échelle. Le programme a été doté en 2008 d'une organisation nationale dédiée pour assurer l'interface entre l'État fédéral, l'industrie et la recherche.

Cette orientation n'est pas exclusive d'un plan national pour l'électromobilité (véhicules électriques et véhicules hybrides rechargeables) doté d'1,5 Mrd d'€ en vue de faire de l'Allemagne le fournisseur et le marché leader de l'électromobilité à l'horizon 2020 tant sur les véhicules particuliers électriques que sur les hybrides plug'in.

Pour autant, l'Allemagne n'a pas négligé les biocarburants en transposant les deux directives sur les énergies renouvelables et la qualité des carburants, les mesures incitatives sur le biodiesel et les huiles végétales ayant été supprimées en 2012 et celles concernant les biocarburants de 2e génération arrivant à échéance en 2015. Un projet relatif au développement de biocarburants de troisième génération pour le transport aérien à partir de micro-algues cultivées en photobioréacteurs (Aufwind) était supposé parvenir au lancement d'une installation pilote d'ici la fin 2015.

Au contraire le développement de carburants alternatifs au **Brésil** se concentre quasi exclusivement sur la production de bioéthanol à partir de canne à sucre avec un taux d'incorporation élevé dans l'essence et distribué pur à la pompe pour les véhicules flex fuel (essence-éthanol)⁵⁴ ; s'y ajoute également une production marginale de biodiesel (à base de soja et de graisses animales). Les actions de recherche, de développement

⁵³ Politiques en faveur du développement de carburants alternatifs, Analyse comparative dans huit pays.

ou d'innovation en matière de production d'hydrogène et de piles à combustible se heurtent à une insuffisance de capital humain et de savoir-faire.

Les objectifs de réduction adoptés par la **Chine** pour 2020 en vue de limiter sa dépendance à l'égard des énergies fossiles (pétrole et charbon) sont très ambitieux puisqu'elle vise par unité de PIB une réduction de 40 à 45% des émissions par rapport à la référence 2005, en parallèle d'une augmentation de la couverture forestière massive et d'une cible de 15% d'énergies non fossiles. Cela se traduit notamment par la production volontariste de bio-méthane pour les usages domestiques (40 millions de foyers). Elle souhaite également promouvoir activement l'utilisation de biocarburants aéronautiques et de technologies d'économie de carburants pour réduire les émissions en passager/km d'environ 11% en 2020 par rapport à 2010.

Un programme pilote est en développement pour augmenter résolument la production de véhicules électriques, hybrides, rechargeables et à pile à combustible mais l'objectif de 5 millions à l'horizon 2020 (et 2 millions par an à compter de 2020) paraît peu réaliste. L'incorporation de biocarburants routiers (10% de bioéthanol, 5% de biodiesel) aboutit à des objectifs de production qui se heurtent à une réglementation stricte : les plantations à vocation énergétique, interdites sur les terres agricoles et les zones de protection de la biodiversité, ne sont autorisées que sur les terres marginales. En revanche, s'agissant de bioéthanol cellulosique, des sites industriels de démonstration à partir de litières agricoles avec des technologies de prétraitement et de production d'enzymes.

Les ambitions **coréennes** (réduire de 9% les émissions par rapport à 2005) paraissent assez modestes : elles combinent à cette date une progression spectaculaire des transports publics (+60%) et une part de biocarburants de 10%. En revanche, la position des industriels coréens dans la fabrication de batteries de véhicules électriques se conjugue avec les investissements des constructeurs automobiles dans le développement de véhicules hybrides ou à pile à combustible (Hyundai mise sur cette filière depuis près de 15 ans) avec des subventions publiques conséquentes mais des résultats modestes de pénétration du marché, d'autant que le développement de véhicules utilisant des carburants alternatifs ne fait pas partie des 13 moteurs de croissance nationaux identifiés en 2014.

Le contexte **danois** avec 2,3 millions de véhicules particuliers pour 5,6 millions d'habitants explique une orientation politique volontariste d'indépendance aux énergies fossiles en 2050, toutes les énergies du transport et de l'industrie devant être renouvelables à cet horizon. De ce fait, les cibles 2020 sont déjà ambitieuses : diminution de 40% des émissions de gaz à effet de serre (référence 1990), réduction de 12% de la consommation totale d'énergie (référence 2006). Même si la consommation de biocarburants a été multipliée par huit entre 2010 et 2013, le Danemark mise sur l'électricité comme carburant pour l'ensemble du transport terrestre.

En matière de recherche, il privilégie les biocarburants (y compris l'analyse de leurs aspects climatiques et énergétiques) et les solutions utilisant l'hydrogène et les piles à combustible. Parmi les projets financés, certains sont originaux tels un centre de test sur la liquéfaction hygrothermique ou un projet de conversion du biogaz de CO₂ en méthane grâce à l'hydrogène.

⁵⁴ On note la mise en place de deux usines de production de bioéthanol de deuxième génération (gazéification) en 2014.

Tous secteurs confondus, la **Suède** vise la neutralité carbone en 2050 et a réduit ses émissions de gaz à effet de serre de 23% entre 1990 et 2013. Elle s'est fixé un objectif de réduction de 40% des émissions dans les secteurs ne faisant pas partie du système européen d'échange de quotas (EU-ETS). Comme elle cible l'indépendance de la flotte de véhicules à l'égard des énergies fossiles d'ici à 2030, les biocarburants (éthanol, biodiesel et biométhane notamment pour les transports en commun et les véhicules lourds) y bénéficient d'exonérations fiscales et l'accent a été mis en matière de recherche-développement sur les véhicules électriques et hybrides.

La politique des **États-Unis** paraît s'inscrire dans une autre logique : l'objectif étant celui de l'indépendance énergétique, il s'agit de produire des biocarburants moins coûteux pour les transports militaires et commerciaux avec un soutien au mandat d'incorporation (pour un coût total évalué à 45 milliards de \$ depuis 1977) et le cas échéant des objectifs locaux additionnels, soit focalisés sur la réduction des émissions, soit concernant le développement d'énergies renouvelables, de transports alternatifs ou de mesures d'efficacité énergétique des bâtiments.

Le dispositif normatif américain est original : seule la Californie est autorisée à édicter des normes plus strictes que le niveau fédéral, les autres états pouvant ensuite choisir de suivre les standards fédéraux ou ceux de la Californie. Elle a par exemple mis en place des aides additionnelles importantes en vue de promouvoir l'acquisition de véhicules à hydrogène ou à pile à combustible⁵⁵ (au-delà de l'aide à l'achat, bonus par gallon, aide à l'installation des infrastructures de recharge...) et développe un programme de véhicule dit à zéro émission.

Les dispositifs d'incorporation (Renewable Fuel Standard mandates) se heurtent au « mur du mélange » (Blend Wall), la réglementation limitant à 10% le taux d'incorporation⁵⁶, mais la production de biocarburant aux États-Unis est en tout état de cause constituée essentiellement d'éthanol de maïs⁵⁷, dont l'impact est réputé nul ou négatif en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Les critères de durabilité en vigueur dans l'Union européenne ne seraient pas respectés. Il en résulte une posture de négociation significativement différente des États de l'Union européenne dans les groupes de travail de l'OACI.

Le **Japon** s'est pour sa part fixé un seul objectif, celui de la réduction de ses émissions de gaz à effet de serre de 80% à l'horizon 2050 sans objectif chiffré pour le secteur des transports. Il a cependant adopté en 2010 une stratégie pour les véhicules de nouvelle génération qui fixe des objectifs pour plusieurs filières et dont les biocarburants sont exclus. Ce choix s'explique aussi par la présence des constructeurs automobiles japonais en matière de véhicules électriques ou hybrides rechargeables avec une stratégie ambitieuse et partagée pour l'hydrogène dans le cadre d'une feuille de route intégrée en 2014 (production, transport, utilisation) et une recherche-développement très fortement subventionnée. Les jeux de Tokyo en 2020 devraient ainsi faire de la ville un démonstrateur de la société de l'hydrogène.

Il s'intéresse en revanche à titre expérimental à la production de biocarburants à partir de micro-algues autotrophes dans le cadre de la conversion d'une usine de traitement des eaux usées.

⁵⁵ Le succès en est pour l'instant modeste : un peu plus de 8 000 dans l'industrie (chariots élévateurs..) et 560 véhicules sur les routes (surtout des bus), soit un million de passagers transportés.

⁵⁶ Au-delà de 15% d'éthanol, apparaissent des obstacles techniques.

⁵⁷ Même si trois installations de biocarburants cellulose sont entrées en production en 2014.

3.1.3. Les enseignements qui peuvent être tirés de ces exemples

Le choix qu'a fait la France de s'engager précocement dans la recherche en matière de pile à combustible et de délaissier le sujet ensuite n'est pas partagé par les autres politiques nationales. L'investissement dans les biocarburants n'est pas exclusif d'autres voies en France, mais il paraît plus marqué que dans les autres pays de l'OCDE. Hormis le Brésil et les États-Unis, les investissements dans les autres solutions de décarbonation des transports sont très importants.

La grande palette des acteurs de premier plan rencontrés par la mission a donné le sentiment d'une réelle effervescence et d'une floraison d'initiatives. Mais, de la même façon que les programmes lancés en 2009 sur les piles à combustible semblent aujourd'hui au point mort alors qu'il s'agit d'un axe majeur dans d'autres pays, cette effervescence pourrait de même s'éteindre rapidement s'il n'était pas possible de donner une visibilité aux acteurs en annonçant une politique construite et cohérente. C'est dans cette optique que sont formulées quelques recommandations.

Il a paru utile, dans cette optique, au-delà de la commande, de s'interroger sur les gains escomptés de l'utilisation de biocarburants dans différents contextes, en cohérence avec la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte et les engagements français et européens de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Le gain en termes de réduction des émissions étant strictement proportionnel au taux d'incorporation dans le carburant fossile sans dégradation de l'efficacité énergétique⁵⁸, les biocarburants aéronautiques, qui sont miscibles jusqu'à 50% dans le cadre des actuelles certifications⁵⁹ constitueraient une meilleure solution en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre, le coefficient d'abattement étant de 30% avec des biocarburants dotés d'une capacité de réduction des émissions de 60%, ce qui est le cas de la première génération. Une telle perspective ne peut cependant s'envisager qu'à l'horizon 2040 ou 2050, dans le cadre d'un transfert de la production des biocarburants routiers en cohérence avec les objectifs de décarbonation des transports.

3.2. Les préconisations

3.2.1. Dans le domaine de la production

Aucune filière de production de biocarburants aéronautiques ne paraît s'imposer comme évidemment préférable. Toutes sont limitées par la disponibilité de la ressource et la concurrence d'autres usages, soit plus efficaces en termes énergétiques, soit spontanément plus rémunérateurs. Le cas des filières de troisième génération est à réserver, en fonction des résultats des recherches en cours, en s'appuyant sur des projets identifiés allant des filières de la pharmacie et de la chimie aux filières bioénergétiques.

Les filières de troisième génération ne sont sans doute pas des filières de production immédiate non plus qu'à grande échelle de biocarburants aéronautiques, mais elles

⁵⁸ Une difficulté à laquelle se heurte la politique conduite au Brésil – comme l'efficacité énergétique des biocarburants routiers est significativement inférieure aux carburants fossiles, ils ne sont achetés qu'à condition que leur prix soit inférieur à 70 % du prix du fossile.

⁵⁹ Sans qu'il puisse être déterminé par la mission si cette limitation est technique ou conservatoire en attendant un suivi permettant un recul plus important.

disposent d'un potentiel d'innovation transposable assez directement à d'autres secteurs, soit dans le cadre de la chimie moléculaire, soit dans celui de l'efficacité énergétique de procédés de captation ou de stockage d'énergie.

Dès lors que les objectifs d'incorporation de biocarburants routiers sont atteints, la capacité de production disponible pourrait utilement être orientée vers les biocarburants aéronautiques, à condition de trouver un accord dans le cadre de l'OACI pour qu'une taxation de la production de carburants fossiles permette de subventionner les biocarburants aéronautiques à la hauteur des émissions évitées.

Les filières de première génération : colza, betterave, soja ne se révèlent pas très efficaces en production de biocarburants, mais elles permettent de générer des co-produits utiles ; en même temps qu'on produit une tonne de biocarburant à partir de colza, on produit une tonne de tourteaux destinés à l'alimentation animale, ce qui réduit d'autant les importations nécessaires. À partir du soja, la part de biocarburant est d'à peine 18%. Il est donc préconisé d'utiliser ces filières à hauteur des besoins en tourteaux protéagineux et en pulpes (betterave), les biocarburants étant dès lors des co-produits bienvenus mais pas les produits recherchés.

Il convient dans cette optique de charger le comité 2B et l'observatoire FranceAgriMer d'étudier les besoins de production supplémentaire pour remplacer les importations d'apports protéiques pour l'alimentation animale.

Pour éviter cependant que le bilan de réduction des émissions de gaz à effet de serre ne soit réduit par des pratiques intensives en intrants et des assolements insuffisants, il convient cependant d'appliquer à ces cultures les principes d'agroécologie.

1. Préserver les possibilités de développement de toutes les filières de production de biocarburants aéronautiques afin de favoriser l'innovation, mais en privilégiant à terme les voies de troisième génération. (DGPE)

2. Valoriser les filières de première génération à proportion des coproduits protéiques qu'elles génèrent en veillant à l'inscription des cultures et productions concernées dans le cadre d'objectifs agroécologiques. (Cabinet MAAF, DGPE)

3. Mobiliser le Comité 2B et l'observatoire « biomasse » de FranceAgriMer afin d'étudier le potentiel français de production supplémentaire d'apports protéiques pour l'alimentation animale. Un potentiel de co-production de biocarburants routiers et aéronautiques en résulterait. (DGPE)

4. Développer la recherche sur les filières de troisième génération : micro-algues, micro-organismes, dans le cadre du programme cadre de recherche européen FP7, et en s'appuyant sur le projet de « nouvelles ressources » engagé par l'État dans le cadre de la « Nouvelle France Industrielle ». (DGPE)

3.2.2. Dans le domaine de la réglementation et des normes

Les filières à maturité industrielle aujourd'hui ne permettraient de satisfaire un mandat d'incorporation à la hauteur de ce qui figure dans Biofuel Flypath de l'Union européenne (3,5%) qu'en dédiant une part importante de nouvelles surfaces ou en effectuant une ponction déjà significative des productions d'huile de palme indonésienne (5,6%) ou de canne à sucre brésilienne (6,2% de la production), donnant un signal contradictoire avec les démarches de certification des filières pour favoriser les plus durables.

5. Renoncer, à court terme, à toute obligation d'incorporation de biocarburants aéronautiques en Europe (au contraire de ce qui a été fait pour les biocarburants routiers), au motif qu'elle entraînerait probablement un rejet par d'autres pays, comme cela a été le cas pour la directive EU-ETS, des surcoûts pénalisant la compétitivité des compagnies européennes et un recours probable à des filières d'importation peu durables. (Cabinet MEDDE, SGAE, RP, DGAC)

3.2.3. Dans le domaine aéronautique

Soumettre un nouveau biocarburant aéronautique à une procédure de certification est une procédure lourde, longue et coûteuse, qui exclut la démarche d'un acteur de dimensions modestes, quand bien même il aurait élaboré un produit riche d'innovation. La norme de référence implicite pour le Jet A1 étant une norme des forces armées britanniques, une institution européenne publique s'appuyant sur l'ensemble des acteurs européens du transport aérien peut initier une procédure de certification analogue à la procédure ASTM, le cas échéant en coopération avec l'ASTM. Les acteurs européens verraient leurs coûts réduits d'autant.

Il existe aujourd'hui une instance de normalisation des carburants au niveau européen, dont l'animation est plutôt britannique, la DEF STAN (pour standard de défense) (rattachée à l'OTAN, donc plutôt d'émanation militaire). Cette instance, reposant sur la bonne volonté de ses participants comme l'ASTM, qui est une structure associative, est peu active et sa norme n'a pas été actualisée depuis longtemps. Elle ne prend donc pas en compte les dernières évolutions technologiques. De ce fait, la majorité des candidats font certifier leur carburant par l'ASTM plutôt que par la norme européenne. En soi, ce n'est pas un problème, le carburant devant être interopérable mondialement.

Par ailleurs, les industriels et l'ASTM elle-même se mobilisent aujourd'hui pour faciliter ce processus de certification et en réduire les coûts. Au niveau national, la DGAC soutient un projet visant à modéliser le comportement des carburants aéronautiques classiques et alternatifs, afin notamment de permettre de réduire les essais à réaliser. Au-delà de la norme elle-même, qui n'est pas nécessairement différente puisque la référence en est mondiale, il peut y avoir un intérêt à développer une capacité d'essais de certification propre à l'Europe, qui est limitée aujourd'hui. Si un industriel majeur peut s'accommoder des délais et contraintes induits par la nécessité de faire réaliser ces essais aux États-Unis, de telles modalités peuvent constituer une barrière réelle à l'entrée pour des acteurs européens des carburants alternatifs de dimensions plus modestes (tels Global BioEnergies par exemple) aux dépens de leur capacité d'innovation.

6. *Mettre en place un processus de certification européen (selon les normes ASTM) pour s'affranchir des contraintes opérationnelles de l'organisme américain en vue de permettre à des nouveaux entrants d'éviter les coûts et les délais d'un processus de certification exclusivement aux États-Unis.* (DGAC)

Accoutumés à disposer d'un carburant fossile très performant, les motoristes n'en ont en fait pas exploré l'ensemble des composantes pour tenter d'en optimiser la formule chimique qu'ils n'avaient pas de raison particulière de chercher à modifier. L'arrivée potentielle sur le marché de kérosènes de synthèse dotés de caractéristiques accessoires différentes (absence de soufre et d'aromatiques, plutôt spontanément sources de pollution) permet d'envisager l'utilisation de carburants au sein desquels le taux de ces composants pourrait être réduit et optimisé en fonction des nécessités effectives de fonctionnement. Une telle démarche suppose cependant une modélisation précise.

Le processus de certification, nécessaire au maintien d'une sécurité optimale des vols, est un processus complexe qui peut être coûteux et il est dépendant de l'expertise et de l'expérience de quelques personnes dans chaque société. La démarche de certification actuelle est contraignante, mais elle a montré sa fiabilité pour les éléments qui ont des répercussions sur la sécurité des vols et les caractéristiques certifiées.

Afin de permettre le développement de filières de biocarburants aéronautiques, il convient de comprendre parfaitement les interactions potentielles entre le carburant et les différents organes de l'aéronef (circuit carburant, turbine...). Cette compréhension accrue permettrait d'accéder à des modélisations de ces impacts qui pourraient offrir un gain significatif dans le développement de ces filières, tant pour le producteur (orientation des développements vers les molécules à plus fort potentiel) que pour l'équipementier ou l'avionneur (cahier des charges de développement et travaux amont de la certification).

Ces travaux, qui doivent réunir l'ensemble des acteurs du domaine, sont nécessaires pour mieux prévoir les impacts éventuels de l'évolution future des carburants en lien avec les évolutions des technologies aéronaves et faciliter le processus de certification de nouveaux carburants en orientant les essais sur les points critiques. Des modélisations permettraient d'apprécier en amont les propriétés en fonction de la composition chimique du carburant. Elles ouvriraient la voie à un processus de certification davantage lié à la chimie des carburants qu'au procédé de fabrication en ayant une meilleure connaissance de l'impact du carburant sur la combustion et les émissions polluantes, afin d'ajouter aux critères liés à la sûreté des vols des critères supplémentaires liés à l'impact environnemental (émissions de particules, impact sur la qualité de l'air locale au niveau aéroportuaire, impact en altitude...)

Le projet MOCCASSIN (modélisation du comportement des carburants aéronautiques classiques et alternatifs)⁶⁰, vise à permettre le développement de modèles de comportement du carburant et à terme l'accélération du processus de certification, mais il ne suffira pas pour améliorer la connaissance et la modélisation des interactions entre la chimie du carburant et les différents organes moteur, alors que ces recherches sont nécessaires pour aider au développement des carburants alternatifs.

⁶⁰ Soutenu par la DGAC, ce projet de trois ans qui devrait débuter en décembre 2015 sous la coordination de Safran (Safran Tech), réunit Airbus, Total, IFPEN, ONERA, Zodiac Aerospace, Snecma, Turbomeca et Safran Tech.

7. Lancer, par appel d'offres, un programme de recherche destiné à mieux appréhender le rôle des différents composants des carburéacteurs, en vue d'optimiser la formule chimique, tant du point de vue de l'efficacité énergétique que du point de vue de la réduction des pollutions induites. (DGAC)

La participation des États européens membres de l'OACI aux groupes de travail est insuffisamment régulière et charpentée. Elle devrait être renforcée de façon conséquente par une coopération entre les États-membres de l'UE et sans doute officiellement coordonnée par la fonctionnaire du JRC/CCR qui assume aujourd'hui la co-présidence d'un de groupes de travail. Il devrait être envisagé de remettre à disposition de l'organisation, dans la durée, un expert à demeure sur ces questions en vue de porter les préoccupations européennes sur les critères de durabilité et l'analyse du cycle de vie.

8. Renforcer, de façon très significative, la participation française (DGAC, industrie, experts économiques et environnementaux...) aux travaux en cours au sein du CAEP de l'OACI sur les carburants alternatifs en s'appuyant sur l'expérience acquise lors de la coordination du programme européen SWAFEA, et en liaison avec les travaux du CORAC. (Cabinet MEDDE, DGAC)

9. Encourager également les contributions européennes aux travaux de l'OACI sur ces sujets, sous l'égide du centre commun de recherche (JRC), et en liaison avec les travaux de l'ACARE. (DGAC, SGAE, RP)

Le CORAC est le Conseil pour la recherche aéronautique civile, créé en juillet 2008 à partir d'engagements pris à la fin 2007 lors du « Grenelle de l'Environnement ».

Établi sur le modèle de l'ACARE (Advisory Council on Aeronautics Research in Europe) européen, il regroupe sous l'impulsion de la DGAC et du Groupement des industriels français de l'aéronautique et du spatial (GIFAS,) l'ensemble des acteurs français du secteur du transport aérien : les grands donneurs d'ordre, avionneurs et équipementiers, les utilisateurs, compagnies aériennes et aéroports, les centres de recherche et les ministères.

La mise en place du CORAC s'inscrit dans une volonté de mise en cohérence des efforts de recherche et d'innovation dans le domaine aéronautique, y compris pour la préservation de l'environnement et le développement durable.

Il doit identifier les technologies qui permettront une réduction de 50 % de la consommation de carburant et des émissions de CO₂ des aéronefs, de 80 % de leurs émissions de monoxyde d'azote et de 50 % du bruit perçu⁶¹ d'ici à 2020.

Sa feuille de route technologique pour la recherche aéronautique, constitue la base de la mise en œuvre d'une stratégie de recherche coordonnée autour d'objectifs de maîtrise de l'empreinte environnementale du transport aérien, à l'horizon 2020 et 2050.

10. Élargir le champ du CORAC (conseil d'orientation de la recherche aéronautique civile) au domaine des biocarburants, en y associant les représentants de la filière de production. (DGAC)

⁶¹ Cf. note 10.

Dans la mesure où une initiative européenne orchestrée par l'Union européenne risquerait d'être mal reçue compte tenu du précédent de 2013, il serait utile de rechercher des partenariats bilatéraux au sein de l'OACI sur des dossiers ponctuels ou des initiatives.

Parmi les initiatives envisageables, pourrait être lancée avec les acteurs concernés (DGAC, Air France, Airbus, Safran, Total et leurs homologues du pays partenaire) une version internationale de la *Lab'Line for the future* opérée par Air France, entre Toulouse et Paris.

11. Rechercher des partenaires, parmi les pays non européens membres du conseil permanent de l'OACI, pour développer une vision commune des enjeux environnementaux du transport aérien et renforcer le pouvoir d'influence au sein du conseil.
(DGAC)

3.2.4. Dans d'autres domaines

L'assemblée triennale de l'OACI de 2013 a mandaté le CAEP pour élaborer un dispositif de mesures économiques de marché destiné à compléter les gains d'efficacité énergétique pour permettre au secteur d'aérien de plafonner les émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2020.

Le dispositif doit être présenté à la prochaine assemblée triennale à l'automne 2016 en vue de son adoption espérée par l'assemblée pour une mise en œuvre effective à compter de 2020.

12. Pour le système, en cours d'élaboration, de « mesures économiques de marché », auquel les compagnies vont devoir faire appel, la COP 21 pourrait inviter l'OACI à promouvoir le financement de programmes de lutte contre la déforestation, dits REDD+, positifs en termes d'éthique (aide au développement de pays du sud) ainsi que d'engagement écologique (association entre le transport aérien et la protection de la forêt).
(Cabinet MEDDE)

3.2.5. Dans le domaine de la recherche long terme

Même si les perspectives de ruptures technologiques sont, par nature, incertaines, il est essentiel de ne pas interrompre les recherches. Par ailleurs, la consommation de carburant étant fonction du carré de la vitesse, il serait judicieux de concevoir des appareils optimisés pour voler à une vitesse significativement inférieure aux modèles actuels.

13. Travailler à l'optimisation d'appareils volant à des vitesses significativement inférieures, en vue de réduire la consommation de carburant, y compris pour des vols long-courriers.
(DGAC)

Conclusion

Quelques unités de production opérationnelles, de par le monde, sont en mesure techniquement de proposer un carburéacteur bio-sourcé, substituable au kérosène d'origine fossile, et pouvant être mélangé avec celui-ci dans des proportions variables, selon les critères de sa certification. En revanche, le développement d'une filière de production se heurte à des difficultés qui ne sont pas résolues, que ce soit en termes économiques ou de disponibilité de la ressource :

- le coût de production sera durablement très supérieur, de l'ordre du double au minimum, à celui du carburant fossile ;
- le processus de production repose largement sur des ressources en biomasse limitées, déjà sollicitées pour d'autres usages, également légitimes, et parfois importées de pays lointains.

En outre, les outils réglementaires et fiscaux (mandat d'incorporation et taxe générale sur les activités polluantes), qui ont permis le développement, en Europe, de la filière de biocarburants routiers, ne sont pas utilisables en l'état pour le transport aérien, régi par des règles internationales, dont celle de la non taxation du carburant.

Dans ces conditions, et malgré la présence incontestable en France d'acteurs majeurs et d'excellence, dans tous les secteurs concernés, les conditions d'un développement durable et économiquement viable d'une filière française de production ne semblent pas réunies aujourd'hui.

Il convient néanmoins de s'appuyer sur la dynamique actuelle des acteurs pour accroître l'influence de la France dans ces domaines, compte tenu des travaux en cours au plan international et de l'implication de grands pays sur ces sujets, tels les États Unis et le Brésil.

Il est donc préconisé de :

- poursuivre l'effort de recherche et mener à bien les projets de démonstrateurs industriels ;
- renforcer, de façon importante, la participation d'experts français et européens aux travaux de l'organisation de l'aviation civile internationale (OACI), portant sur ces sujets ;
- rechercher des partenaires, parmi les pays non européens membres du conseil de l'OACI et producteurs de biocarburants, pour lancer des initiatives communes.

Parmi les initiatives, pourrait être envisagée une version internationale de la *Lab'Line for the future*, opérée depuis septembre 2014 par Air France et ses partenaires, entre Toulouse et Paris

Dans un domaine connexe aux biocarburants, celui des projets de captation carbone, la mission suggère que, parmi les programmes de compensation auxquels le secteur aérien devra avoir recours pour plafonner ses émissions à compter de 2020, ceux dédiés à la lutte contre la déforestation, dits REDD+, soit examinés en priorité. Ces programmes sont en effet positifs en termes d'éthique (aide au développement des pays du sud) et d'engagement écologique (association entre transport aérien et protection de la forêt).

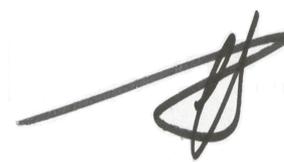
Enfin, au regard du potentiel de réduction des émissions qui découlerait d'un taux élevé d'incorporation des biocarburants aéronautiques, techniquement possible, la mission s'est interrogée sur d'autres perspectives. Dès lors qu'existent pour le transport routier et maritime d'autres solutions assez radicales de décarbonation, la question se pose, à terme, d'un transfert progressif des capacités actuelles de production de biocarburants routiers vers le secteur aérien, qui reste tributaire de carburant liquide. Faute de rentabilité économique spontanée, ces filières n'auraient cependant un avenir que si des décisions politiques, arrêtées dans le cadre international, leur offraient une perspective de long terme.

Sylvie BANOUN

Pierre CAUSSADE

Claude ROY

coordonnateur



CGEDD

Administratrice civile
hors classe

CGEDD

Ingénieur général
des ponts, des eaux
et des forêts

CGAAER

Ingénieur général
des ponts, des eaux
et des forêts

Annexes

1. Lettre de mission



biocarburants + biod

Paris, le 22 JUIL. 2015

**La ministre de l'Ecologie, du
Développement durable et de
l'Energie**

**Le ministre de l'Agriculture,
de l'Agroalimentaire et de la Forêt,
Porte-parole du Gouvernement**

à

Monsieur le vice-président du
Conseil Général de l'Environnement
et du Développement durable

Monsieur le vice-président du
Conseil Général de l'Alimentation, de
l'Agriculture et des Espaces Ruraux

Objet : lettre de mission sur les biocarburants aéronautiques en France

Nous vous confions, par la présente, la réalisation d'une étude sur les perspectives de développement de la production et de l'usage des biocarburants aéronautiques « avancés » en France à partir de 2020.

Le remplacement progressif des carburants fossiles par des carburants renouvelables et durables constitue un levier incontournable de l'amélioration du bilan carbone de l'activité aéronautique, en complément des progrès continus des technologies, du renouvellement des flottes, de l'amélioration de la gestion du trafic aérien et des mesures économiques pouvant accompagner et accélérer les réductions de consommation de carburant et donc des émissions de CO₂.

Si les solutions techniques permettant l'usage de biocarburants aéronautiques commencent à émerger, leur coût actuel, bien supérieur à celui des carburants d'origine fossile, constitue un obstacle majeur à leur déploiement à grande échelle. Contrairement aux biocarburants routiers qui peuvent bénéficier d'une exonération de taxes par rapport aux carburants d'origine fossile, les carburants aéronautiques, qu'ils soient d'origine fossile ou issus de la biomasse, ne peuvent pas faire l'objet d'une incitation fiscale en raison des règles régissant le transport aérien international.

Tout d'abord, nous demandons que l'étude établisse un état des lieux de la production et de l'usage des biocarburants aéronautiques en France, prenant en compte les aspects techniques, environnementaux et économiques.

...

Elle devra notamment :

- faire l'inventaire des biocarburants aéronautiques disponibles ;
- préciser les approvisionnements en biomasse et matière organique utilisés pour la production de ces biocarburants aéronautiques ;
- dresser un état des lieux international de la production et de l'usage des biocarburants aéronautiques ;
- décrire les conditions économiques actuelles du développement de la production et de l'usage des biocarburants aéronautiques.

Par ailleurs, la mission analysera l'opportunité de développer plus massivement les biocarburants aéronautiques en France à partir de 2020, identifiera les mesures à mettre en œuvre pour y parvenir et présentera au gouvernement les recommandations utiles, le cas échéant, à un déploiement vertueux de ces nouveaux carburants.

L'étude devra préciser :

- les contraintes techniques relatives au développement de l'usage de biocarburants aéronautiques « avancés », notamment au regard des exigences des moteurs ;
- les ressources et les acteurs à mobiliser afin de proposer des solutions durables ;
- les mesures qui peuvent être prises pour diminuer les coûts de production (biomasse, raffinage, logistique...) ;
- les conditions dans lesquelles des biocarburants aéronautiques pourraient constituer un débouché pour les déchets de cultures et autres produits de la biomasse sans empiéter sur la vocation alimentaire des espaces agricoles ;
- les bénéfices, en termes de créations d'emplois, du développement d'une filière de production de carburants aéronautiques en France ;
- les synergies possibles entre la production de biocarburants à usage routier et les biocarburants aéronautiques ;
- les coûts et avantages environnementaux d'un développement plus massif des biocarburants aéronautiques, notamment en matière d'émissions globales de gaz à effet de serre.

La mission pourra rencontrer tous les acteurs qu'elle jugera utiles, en particulier dans les milieux économiques et scientifiques de l'agriculture, de la chimie verte, des transports et de l'énergie. Elle proposera une articulation avec la stratégie énergétique nationale traduite dans la programmation pluriannuelle de l'énergie créée par la loi de transition énergétique pour la croissance verte.

La sollicitation par la mission du Conseil général de l'économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies (CGIET) permettra de prendre en compte de façon complémentaire les enjeux industriels. Des échanges avec la direction générale de l'énergie et du climat, la direction générale de la performance économique et environnementale des entreprises et la direction générale de l'aviation civile seront organisés, pour s'appuyer sur les travaux et réflexions déjà menés par ces différents services sur le sujet.

Le rapport final est attendu avant le 15 novembre 2015. Celui-ci pourra ainsi être utilement valorisé lors de la COP21.


Ségolène ROYAL


Stéphane LE FOLL

2. Éléments génériques sur les biocarburants

Sources *FARM* et *ADEME*

Les politiques publiques en faveur des biocarburants routiers, mises en place dans les années 1970 au Brésil et aux États-Unis, se sont considérablement renforcées et élargies à un grand nombre de pays depuis le début des années 2000.

Elles ont en général un triple objectif :

- lutte contre le changement climatique, grâce à la baisse des émissions nettes de gaz à effet de serre (GES, du champ à la roue) émanant des véhicules de transport ;
- réduction de la dépendance aux importations de pétrole et diversification des sources d'approvisionnement ;
- soutien du revenu agricole et revitalisation des zones rurales par la création nette d'emplois dans l'agro-industrie et les biofilières ;

Ces politiques se sont traduites par diverses mesures, comprenant essentiellement des obligations d'incorporation de biocarburants (bioéthanol dans l'essence, biodiesel dans le gazole, avec par exemple un mandat d'incorporation associé à une TGAP en France), et des réductions de taxes (limitées dans le temps, et désormais caduques en France). Elles ont favorisé une croissance rapide, en 10 ans, de la production de biocarburants, et de lourds investissements, assurés surtout par les opérateurs agricoles. Cependant, la part de marché des biocarburants est faible : à peine plus de 3 % de la consommation mondiale de carburants (en équivalent énergie) dans les transports routiers, 5 % dans l'Union européenne (UE) et aux États-Unis, et quelque 20 % au Brésil.

Depuis la fin des années 2000, le soutien des États aux biocarburants est cependant remis en question. Les controverses initiales sur leur bilan énergétique étant, pour partie, tranchées, un nouvel élément déclencheur de critiques contre les biocarburants a été, en 2007/2008, la flambée des prix alimentaires mondiaux et les « émeutes de la faim » qui ont suivi. À peu près à la même époque, le débat relatif à l'effet de serre a rebondi et s'est lui aussi retourné contre les biocarburants.

Les biocarburants sont ainsi supposés :

- diminuer la sécurité alimentaire, en faisant monter les prix des denrées,
- nuire à l'environnement, en encourageant la déforestation et en réduisant la biodiversité, sans parvenir en fait à diminuer les émissions nettes de GES voire en les accroissant du fait de « changements indirects d'affectation de terres » non maîtrisés.

Sur ces deux points, le débat est éminemment complexe.

Selon l'analyse de cycle de vie réalisée par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), comparant la consommation énergétique pour la production d'une unité d'énergie de biocarburant et pour celle d'une unité d'énergie de carburants d'origine fossile, l'utilisation de bioéthanol de blé ou de betterave à sucre permet, de la graine à l'essieu, de réduire la consommation nette d'énergie d'environ 50 % par rapport à l'essence.

Les biocarburants absorbent par exemple 40 % de la récolte de maïs aux États-Unis (pour la production de bioéthanol) et 60 % de la production d'huile de colza dans l'UE (pour la fabrication de biodiesel). Cependant la progression rapide des biocarburants de première génération n'a pas empêché l'accroissement des utilisations alimentaires de céréales et d'huiles végétales dont la production s'est accrue. Au total, la production des biocarburants mobilise en fait 1 % de la surface agricole utile (SAU) dans le monde (et 3 à 4 % de la surface arable).

Les surfaces consacrées aux biocarburants sont aujourd'hui du même ordre de grandeur que celles dévolues au coton dans le monde. Historiquement, avant l'avènement de la motorisation, une part non négligeable des surfaces cultivées était réservée à la production de fourrages ou de céréales destinés aux chevaux et animaux de trait.

Les biocarburants ont bien sûr un effet possible sur le niveau des prix agricoles, mais ils ne constituent qu'un des multiples facteurs de la hausse des prix alimentaires, qui est liée à l'augmentation du prix de l'énergie, lequel conditionne en particulier le coût des intrants, du transport, de la transformation, du stockage et de la distribution des produits agricoles ainsi que certains événements climatiques régionaux.

L'impact du développement de la production de biocarburants sur la sécurité alimentaire doit être relativisé ; la part de la population mondiale souffrant de la faim n'a cessé de diminuer depuis le début des années 2000, alors même que les prix alimentaires ont augmenté comme la production de biocarburants.

Les transports représentent environ 15 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre et cette part continue d'augmenter. Ils constituent donc un enjeu fort dans la lutte contre le dérèglement climatique. Les biocarburants de première génération affichent des performances directes correctes en la matière (hors effet ILUC source : ADEME).

Mais ces chiffres ne tiennent pas compte de l'impact plausible des biocarburants sur les changements d'affectation des sols du fait du développement de ces cultures non alimentaires. Ces changements sont « directs » lorsque les cultures destinées à des usages non-alimentaires sont implantées sur des terres déjà utilisées à d'autres usages et qui, auparavant, pouvaient stocker plus de carbone par hectare dans la matière organique stable des sols (pâtures, forêts). Les changements d'affectation des sols dits « indirects » (CASI ou ILUC en anglais) résultent, quant à eux de la mise en culture indirecte de prairies, de tourbières, de forêts...

En tout état de cause, l'estimation de l'effet CASI est incertaine, car elle est appréhendée au moyen de modèles économiques théoriques qui donnent des résultats très différents selon leur fonctionnement propre et selon les hypothèses considérées. C'est une des raisons pour lesquelles l'UE vient notamment de décider de stabiliser à un niveau de 5% et 7% ses objectifs d'incorporation de biocarburants qui ne peuvent que rester raisonnablement limités, à l'aune des ressources disponibles et de leurs concurrences d'usages.

La question centrale qui caractérise la bioéconomie est de savoir comment, avec 10Mds d'habitants sur Terre en perspective, on peut concilier l'augmentation limitée, de la production biosourcée pour l'énergie, les matériaux ou la chimie avec le renforcement des politiques et des plans d'action de développement durable, incluant en particulier l'amélioration de la sécurité alimentaire, la baisse de la pauvreté rurale et la lutte contre le dérèglement climatique.

Deux conditions s'imposent :

- Il faut investir massivement dans la recherche et l'innovation. Au niveau agricole, l'enjeu est d'accroître la productivité durable des agriculteurs (efficacité, sobriété, diversité) tout en réduisant en même temps l'empreinte environnementale des biocarburants. Au niveau industriel, beaucoup d'espoirs sont mis dans l'émergence de biocarburants dits de deuxième génération. Ces produits, dont la production s'amorce à peine, sont élaborés à partir de plantes entières (y compris pour l'aéronautique), de résidus de récolte ou de sous produits du bois, qui devraient en principe avoir de meilleures performances énergétiques et environnementales et devraient permettre aussi de réduire la concurrence avec les débouchés alimentaires. Encore faut-il surmonter les obstacles qui s'opposent toujours à leur développement industriel, en termes notamment de rendements et de coûts de production, de logistique et de distribution, mais aussi quant à la visibilité politique insuffisante donnée par l'UE à ces filières aux investissements lourds.
- Il faut aussi, en effet, mettre en place un cadre de politique publique qui garantisse la durabilité économique, sociale et environnementale des biocarburants, et qui fixe clairement des objectifs et des limites selon la situation spécifique de chaque pays ; c'est le cas depuis 2009 dans l'Union européenne avec la mise en place obligatoire des « critères de durabilité » appliqués aux biocarburants produits ou importés en Europe (bilans GES, promotion des biocarburants avancés, protection des sols riches en carbone, protection des zones riches en biodiversité...). Ce cadre politique doit être le plus stable possible, pour encourager et sécuriser dans la durée les investissements lourds et à risque qui caractérisent toutes ces filières.

Un effort concerté et cohérent, impliquant à la fois les acteurs publics et privés, y compris les organisations agricoles, peut faire des biocarburants une chance réelle dès lors que leur développement restera limité en favorisant le potentiel d'innovation dans notre pays.

3. Quelques filières de production de biokérosène

La France consomme environ 75 Mtep/an de pétrole, pour l'essentiel importé (NB 1 tep est plus ou moins équivalente à 7,3 barils de pétrole). Les usages énergétiques représentent, en France, 85 % de cette consommation (transport et fioul combustible), le carburant comptant pour 60 %.

La consommation totale de pétrole est en légère régression depuis les années 2000, du fait notamment de la crise et de la réduction tendancielle de la consommation des transports.

Le jet-fuel pour l'aviation (i.e. coupe kérosène dans la distillation du pétrole, entre la coupe essence et la coupe gazole) représente en France 6,5 Mtep/an, soit 8,5 % de la consommation de pétrole française. Cette part est en augmentation régulière et marquée (+/- 5% par an) malgré les efforts d'efficacité énergétique.

Contrairement à d'autres secteurs, l'aviation n'aura pas avant longtemps d'alternative aux carburants liquides. Pour réduire ses émissions de gaz à effet de serre et sécuriser son développement, le transport aérien a donc besoin de biocarburants ou de carburants alternatifs dont le bilan CO₂ sur le cycle de vie soit favorable, seuls appropriés à ce stade pour remplacer les carburants fossiles.

Pour le transport aérien, le seul dispositif incitatif actuel est celui de la réglementation ETS européenne (système d'échange de quotas d'émissions) qui prévoit d'exonérer la consommation de carburant d'origine renouvelable de l'assiette de calcul des émissions des compagnies aériennes. Mais cette réglementation ETS est limitée aux seuls vols intra-européens (faute d'accord au sein de l'OACI). Son effet d'incitation est en outre trop modeste aujourd'hui (environ 10€ la tonne de CO₂, soit environ 40€ par tonne de carburant) pour rendre les biocarburants aéronautiques compétitifs.

Cette situation n'est donc pas favorable à la valorisation de biomasse (renouvelable) dans la production de carburant pour le transport aérien, alors même que d'autres débouchés sont accessibles aux producteurs de ces biomolécules. Les partenaires français du transport aérien et de l'industrie ont travaillé au développement de trois types de filières possibles de biocarburants aéronautiques qui pouvaient, sous certaines conditions, mobiliser des ressources (biomasse, infrastructures) ou des savoir-faire déjà disponibles sur le territoire national.

Pour mémoire, les programmes de développement des biocarburants automobiles à se poursuivent pour atteindre en Europe des taux d'incorporation de 7 à 10%.

Le kérosène est un carburant aux spécificités normées ; il doit en particulier être diffusable dans le monde entier, s'adapter à tous les avions, conserver toutes ses propriétés entre à des températures extrêmes, ne pas contenir d'oxygène et avoir un PCI élevé (> 43 MJ/kg). Son prix commercial est de l'ordre de 0,5 à 1€ / litre, très variable selon le prix du pétrole. Contrairement aux carburants routiers, qui sont taxés à environ 80%, le kérosène ne supporte que la TVA. La fluctuation des prix du pétrole se répercute donc sur son prix.

Plusieurs voies existent pour la production de biokérosène, ou biojet-fuel. Mais ces voies ne sont pas toutes certifiées, ni développées, ni durables. Aucune de ces voies ne peut d'ailleurs atteindre une compétitivité économique vis-à-vis du kérosène. Le

rapport de coût de production serait en effet de l'ordre de 2 à 3 entre biokérosène et kérosène, sans beaucoup de perspectives d'amélioration, même avec un prix élevé du pétrole....

Pour être certifié, le biokérosène doit correspondre aux mêmes spécifications fonctionnelles que le kérosène et doit être miscible (« drop-in »). C'est le cas pour Air France avec un vol hebdomadaire Paris-Toulouse utilisant du kérosène intégrant 10% de Farnesène (dérivé du sucre fourni par la société Amyris, filiale de Total).

Trois grandes familles de biojet-fuel sont à considérer :

À court terme, il peut s'agir de la filière d'hydrotraitement d'huiles végétales ou d'huiles de récupération ainsi que des filières diverses de conversion de sucre, d'alcool et de xylose (cellulose non alimentaire), dont l'une, le Farnesène, est également certifiée.

À plus long terme il pourrait s'agir de filières BtL-FT (Biomass to Liquid / Fischer-Tropsch) de gazéification, puis de synthèse (ressources ligno-cellulosiques), qui pourraient également participer à la réponse apportée aux besoins en biocarburants.

- Les HEFA (hydrotraitement d'huiles ou de graisses végétales). Cette filière est industriellement à maturité et déjà certifiée ASTM pour un taux d'incorporation jusqu'à 50% pour l'aéronautique (e.g. groupe Neste oil), mais elle n'est pas compétitive. Sa durabilité doit être encore validée selon les bio-ressources transformées (huiles alimentaires, huile de palme, huiles de récupération...en attendant l'hypothèse d'acides gras dérivés d'algues ou de micro-organismes).

Cette filière doit clarifier sa stratégie face à l'utilisation des bio-ressources à dominante alimentaire, importées ou non, ou face aux huiles de récupération dont les gisements limités sont déjà largement mobilisés. Les bio-ressources oléagineuses sont, en tout état de cause, limitées et chères, largement prospectées, y compris pour les biocarburants routiers (biodiesel) et pour la chimie dans la sphère non alimentaire.

Le cas particulier du projet Total à la Medde se situe dans ce champ de contraintes.

- Les BtL-FT (voie thermochimique appelée « biomass to liquid », avec gazéification de lignocellulose suivie d'une synthèse Fischer-Tropsch). Cette filière en est au stade pilote dans le monde entier, pour développer notamment la production de biodiesel (l'objectif biokérosène, faute de marché, restant toujours subordonné).

N'ayant pas atteint sa maturité industrielle à ce stade, et devant s'appuyer des unités industrielles de taille de raffineries, pour sa compétitivité (+1Mt/an de capacité, soit +3MT/an d'approvisionnements par unité), cette filière est certifiée ASTM pour une incorporation jusqu'à 50% (par référence aux filières CtI/charbon et GtL/gaz déjà certifiées). La voie BtL-FT s'appuierait sur des approvisionnements en ressources excédentaires de sous-produits de la forêt ou de l'industrie du bois.

Le programme pilote français bio-T-fioul est en développement progressif avec des partenariats dans le domaine de l'énergie et de l'agro-industrie.

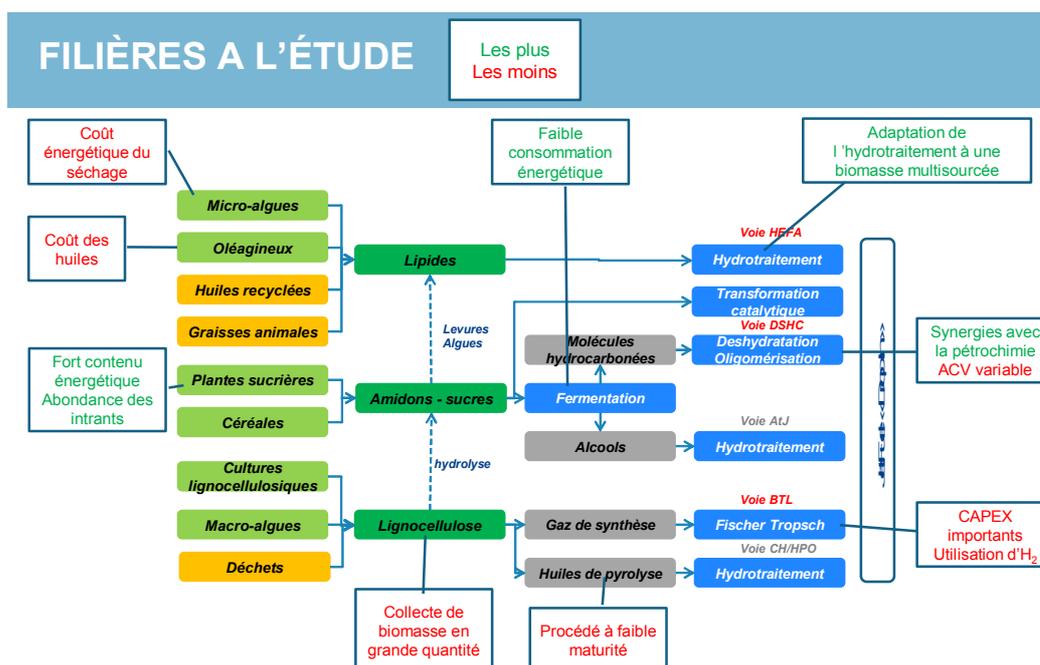
À terme, la deuxième génération de biocarburants d'origine lignocellulosique, obtenue par voie biologique ou par voie thermochimique devrait pouvoir

compléter les filières de première génération existantes, en réduisant la concurrence directe avec les filières alimentaires, mais avec des rendements et des coûts encore inconnus au stade de développement actuel (programmes FUTUROL et BIO-T-Fioul en France). En outre, ces filières ne peuvent garantir la production parallèle des coproduits alimentaires actuellement générés pour l'alimentation animale par la première génération (tourteaux oléagineux, pulpes...).

NB. la filière de pyrolyse / liquéfaction / hydrotraitement de la biomasse, souvent citée également, reste pour l'instant très hypothétique, du fait de l'instabilité physico-chimique rédhibitoire des huiles de pyrolyse.

- Les DSHC et AtJ (y compris à terme d'origine bois / lignocellulose / xylose via la 2e génération) regroupent une famille de technologies utilisant la fermentation ou la conversion catalytique de sucres ou d'alcool. Ces filières ne sont pas pleinement à maturité industrielle, et ne sont pas certifiées ASTM sauf le Farnesene certifié pour une incorporation jusqu'à 10% (Sté Amyris / Total avec Air France comme partenaire).

Ces filières ouvrent sur la valorisation possible de ressources potentiellement plus importantes que les huiles végétales, (la nature produit, à l'hectare, plus de sucres, d'amidons ou de cellulose que d'acides gras), de bio-ressources lignocellulosiques (voie biochimique) mais investissent principalement dans de nouveaux marchés rémunérateurs comme la cosmétique et la chimie.



Les filières qui pourraient par ailleurs découler de la transformation d'acides gras ou de sucres issus de la culture d'algues ou de micro-organismes ne sont pas encore maîtrisées, ni compétitives (sauf pour des productions spécifiques, de niche, comme en cosmétique et en pharmacie). Elles affichent en effet des coûts rédhitoires pour la fourniture d'énergie.

Dans les trois filières principales évoquées, une évaluation des ressources et des rendements amont de production doit être établie pour mesurer l'accessibilité d'un objectif de production de biocarburants aéronautiques. Cette vérification doit tenir compte des filières concurrentes qui utilisent et valorisent ces mêmes ressources, en matériaux comme en chimie. De même, doivent être vérifiés les rendements massiques de conversion, les bilans CO₂ sur l'ensemble du cycle de vie et le respect des critères de durabilité agréés par les acteurs du transport aérien.

S'agissant particulièrement des résidus agricoles ou forestiers, ou des productions ligno-cellulosiques, supposés non concurrents des productions alimentaires, les conditions de prélèvement de la ressource en forêt, ou en aval de la filière bois, constituent les enjeux principaux. À ce titre, le « statut » des sous-produits fatals d'une part, et des productions dédiées d'autre part (e.g. cultures cellulosiques ou taillis à courte révolution, peu susceptibles d'être rentables à ce jour pour les producteurs) doivent être différenciés en termes de durabilité.

La filière HEFA

La filière d'huiles hydrotraitées, certifiée en 2011, repose sur une hydrogénation d'acides gras en provenance d'huiles végétales (vierges ou de récupération) ou de graisses animales. Elle se répartit en biodiesel, biokérosène et naphta. Le biojet-fuel obtenu est constitué uniquement de paraffines et il est compatible avec une utilisation en mélange jusqu'à 50 % dans du kérosène.

Cette filière peut bénéficier en France d'une infrastructure agricole et industrielle. La France dispose en effet d'un système de production agricole, (dont le colza et le tournesol), de traitement, de distribution et d'opérateurs de référence (ex. groupe Avril) dans le domaine des oléagineux. Ces opérateurs pourraient être mobilisés pour participer au développement d'une biofilière aéronautique, si les conditions économiques et d'acceptabilité étaient réunies. Mais la concurrence d'usages entre les productions oléagineuses non alimentaires et alimentaires est déjà fortement marquée, d'autant que les rendements de production oléagineuse à l'hectare sont limités (sauf pour l'huile de palme importée).

L'option d'importation d'huile de palme, moins coûteuse, sera toujours prise en considération tandis que la valorisation d'huiles de récupération (friture) ou de corps gras animaux (équarrissage), aux prix devenus élevés, considérée comme fondant une technologie « avancée », reste limitée par l'insuffisance évidente de ces gisements, déjà collectés et utilisés par ailleurs (combustibles, biocarburants routiers).

Néanmoins, le procédé est industriellement à maturité et des usines sont opérationnelles (Nestlé Oil) tandis que d'autres sont en projet (Total / La Medde). Et les principaux atouts résident dans la maîtrise des procédés avec une réduction sensible des émissions de CO₂ comparée à celles des carburants fossiles (-60%) hors ILUC. À plus long terme, le développement de cette filière HEFA pourrait être compatible avec celui des carburants à base de micro-algues, qui font l'objet de nombreux travaux de recherche et pourraient se distinguer par leur bilan CO₂. Mais ces technologies restent aujourd'hui cantonnées à des productions à très haute valeur ajoutée (ex. pharmacie),

où les débouchés énergétiques n'ont pas économiquement leur place à un horizon visible.

En résumé :

Atouts :

- Un procédé industriel connu et d'ores et déjà maîtrisé industriellement.
- Une coproduction possible de gazole et de jet fuel.
- Un potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre d'environ 60 %.
- Un système industriel intégré de production, de récolte et de prétraitement de l'huile déjà en place pour la production de biodiesel, avec une importante coproduction de tourteaux protéiques pour l'alimentation animale.
- Un développement éventuel compatible (avec un horizon plus lointain) de valorisation des micro-algues et micro-organismes.

Faiblesses :

- Un coût de production élevé, et majoritairement lié à celui de la ressource agricole (le prix de l'huile est équivalent à celui du kérosène),
- Une concurrence d'usage directe avec l'huile alimentaire, dont la production à l'hectare est très limitée (sauf pour l'huile de palme),
- Des gisements limités et déjà collectés et valorisés pour les huiles de récupération
- Des fortes contraintes de durabilité et de certification pour les huiles de palme importées.

En attendant, l'acceptabilité et la durabilité de la production de biomasse végétale lipidique nécessaire à l'émergence en France d'une filière de biocarburants aéronautiques issus de l'hydrotraitement d'huiles végétales, devra constituer un point de vigilance. La production oléagineuse répond en effet à une logique de marché mondiale. Ainsi la satisfaction de la demande de biomasse pour incorporer du biodiesel dans le carburant routier s'appuie déjà sur des ressources nationales et sur des importations. Pour un biocarburant aéronautique qui serait issu de cette filière, l'un des enjeux résidera donc dans la capacité à attester du caractère durable des bio-ressources transformées. Le projet Total à la Medde entre dans ce champ de contraintes.

p.m. Les gisements « libres » d'huiles et de corps gras de récupération sont très limités, et ils sont déjà valorisés pour l'essentiel, soit pour le biodiesel, soit comme biocombustible. Pour la filière biodiesel, ils bénéficient d'un premium de prix du fait du « double comptage » carbone établi au titre de la TGAP, suite à la Directive UE 2009 sur les énergies renouvelables.

Les filières de gazéification-synthèse

- Le principal procédé thermochimique concerné a pour effet, d'abord, la transformation, par des procédés de « cracking » (gazéification haute température), d'une matière première lignocellulosique (ou organique) en un gaz de synthèse, ou syngaz (CO+H₂). Le procédé de synthèse « Fischer-Tropsch » (maîtrisé notamment par IFPEN/Axens) se fonde ensuite sur la transformation de ce même gaz de synthèse en un biocarburant, appelé couramment BtL (biomass to liquid). Ce biocarburant (valorisable également comme biodiesel) a été certifié comme biocarburant aéronautique dès 2010.

A noter : le développement de ce procédé BtL-FT pourrait bénéficier de synergies en provenance des secteurs pétrolier et charbonnier. En effet, la gazéification-synthèse peut avantageusement mêler des matières premières carbonées d'origine biomasse avec du charbon ou des résidus pétroliers, ce qui favoriserait la faisabilité de grosses unités (ex. pilote Bio-T-Fioul)

- Un autre procédé thermochimique envisageable pour le biojet-fuel, et qui est à l'état de recherche, consiste en une pyrolyse à moyenne température de lignocellulose ou de résidus organiques (procédé dérivant plus ou moins de la fabrication du charbon de bois). Cette pyrolyse est suivie d'un « hydrotraitement des huiles de pyrolyse », ou biohuiles, qui résultent du procédé précédent. Toutefois l'instabilité physico-chimique de ces huiles de pyrolyse ne permet pas d'envisager sérieusement le développement de ce procédé à ce stade.
- Parallèlement, à titre d'exemple, un projet britannique, SOLENA, lié à British Airways, viserait à décliner le process BtL-FT pour traiter des déchets organiques urbains.

Les points-clés qui conditionnent le développement possible, en France, d'une filière de gazéification-synthèse de type BtL sont la logistique de mobilisation et de collecte des bio-ressources, ainsi que leur préparation préalable pour concentrer sa teneur en carbone et pour en faciliter la concentration géographique à l'amont d'une unité de gazéification, ces unités industrielles de gazéification devant être de grande taille, (environ 1Mt/an de capacité, soit 3Mt/an d'approvisionnements ligno-cellulosiques, c'est-à-dire 3 fois la taille de la plus grosse usine de pâte à papier européenne).

La préparation de la biomasse à l'amont de la gazéification, (biomasse dispersée et pondéreuse), nécessite des étapes de conditionnement préalables dans des unités de prétraitement plus petites et réparties (par exemple procédé de torréfaction étudié par Bio-T-Fioul ou le procédé mécanique de pulvérisation étudié par Syndièse).

Un des intérêts de cette filière BtL semble être son excellente performance en termes de réduction des émissions de GES, réduction qui pourrait être de l'ordre de -80 à -90 %.

Cette filière comme HEFA peut produire en synergie du biojet-fuel et du biodiesel, ce qui peut en sécuriser le développement (mais peut aussi entraver le développement du biojet-fuel, tant que sa compétitivité face au kérosène ne sera pas garantie).

La principale contrainte de la filière BtL est la taille très importante (à l'instar des raffineries pétrolières) nécessaire pour bâtir des unités industrielles de gazéification susceptibles d'être viables, peu compatible avec des territoires de production de biomasse comme la France.

Elle justifie également des investissements très importants, de l'ordre de 1Md€ par unité, inenvisageables sans un partage du risque avec d'autres opérateurs, ce qui conduit à envisager la possibilité d'un co-traitement « synergique » de biomasse, de charbon et de résidus pétroliers dans les mêmes unités. La collaboration entre Total et les autres partenaires agricoles tels qu'Avril au sein du programme pilote Bio-T-Fuel en est un signe.

Les filières de conversion des sucres et alcools

Les filières issues des sucres et alcools et pouvant déboucher notamment sur du biojet-fuel (DSHC et Alcohol-to-Jet) n'ont pas encore été qualifiées, hormis le Farnésène de la société Amyris/Total (2014). Mais d'autres certifications pourraient suivre, à commencer peut-être par l'isobutène, hydrocarbure gazeux (Société Global Bioénergies). Ces filières procèdent par conversion de sucres (fermentation, catalyse), ou d'alcools, et peuvent à terme élargir leurs matières premières à des sucres à cinq atomes de carbone, ou xyloses, d'origine ligno-cellulosique.

Aujourd'hui les capacités agricoles de la filière betteravière française pourraient être accrues. En outre, les infrastructures de traitement du sucre qui existent sont plutôt en surcapacité et pourraient être théoriquement exploitées pour accueillir des unités dédiées à la production de biocarburants aéronautiques.

Le développement de telle ou telle de ces filières pourrait permettre également de créer des conditions favorables à l'émergence de biocarburants de 2^e génération par voie biologique issus de la lignocellulose (sous-produits agricoles ou forestiers), soit pour les usages routiers, soit pour l'aéronautique. Le programme Futurol et ses multiples « voies de sortie » peuvent en être la préfiguration, au même titre que les travaux menés par la société Global Bioénergies, récemment élargis à la transformation du xylose en isobutène.

Le prétraitement de la matière lignocellulosique et son hydrolyse constituent toujours 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 sucre au sens large (y compris les éléments primaires composant l'amidon et la cellulose) est la matière première renouvelable la plus abondante. Sa production massive photosynthétique est 3 à 4 fois plus importante à l'hectare que celle des productions végétales lipidiques, sauf le palmier à huile. De ce fait, l'utilisation élargie des sucres et de la ligno-cellulose comme matière première pour des usages non alimentaires permet une meilleure prise en compte des contraintes de durabilité et de la faible empreinte carbone liée à l'utilisation des résidus agricoles ou forestiers.

Parmi les filières ex. sucres/alcools opérationnelles à ce jour :

- La filière DSHC fermentaire (Direct Sugar to Hydro Carbon) est portée pour la France par la société franco-brésilienne Amyris, dont Total détient désormais 75 % (avec un potentiel de production de biojet fuel de 20 à 30 000 t/an). Cette filière est certifiée et alimente le vol hebdomadaire Paris-Toulouse de la compagnie Air France (mélange à 10%) dans le cadre du programme *Lab'line*.

Le procédé d'Amyris (qui débouche également sur des produits de cosmétique ou de chimie du végétal) consiste en une étape de fermentation de sucre de canne ou de mélasse, et à terme de lignocellulose. Le process produit une molécule hydrocarbonée de type oléfinique, le farnésène. C'est cette molécule qui est alors hydrotraitée pour produire une iso-paraffine, désormais incorporable dans les carburants aéronautiques

ou dans le biodiesel. Amyris évalue à 60% ou 70% la réduction des émissions de GES obtenues ainsi selon l'origine du sucre (betterave ou canne). L'objectif recherché par Amyris, notamment par l'utilisation envisagée de ligno-cellulose, serait d'obtenir un carburant qui n'excède pas deux fois le prix du kérosène.

Le Projet DSHC spécifique de la société Global Bioénergies vise à produire des oléfines légères par la fermentation directe de sucres. Il s'agit de produire de l'isobutène gazeux (isomérisable), grâce à la sélection de micro-organismes spécifiques assurant la fermentation, avec des coûts plus réduits et une meilleure compétitivité. Global bioénergies vient de démontrer en outre la validité de son procédé à partir de xylose (ex. cellulose). Ce procédé semblerait donc à ce stade plus efficace et plus économique pour assurer la production d'un carburant aéronautique de nature similaire à l'AtJ.

La pré-industrialisation du procédé développé par Global Bioénergies est en cours, entre la plate-forme de la bioraffinerie de Pomacle-Bazancourt vers Reims, et la raffinerie de Leuna en Allemagne.

- La filière « Alcohol to Jet » (AtJ), à la différence de DSHC, démarre au stade « alcool » (produit par voie biologique) et s'appuie sur des procédés catalytiques et de nombreuses étapes pour synthétiser des chaînes carbonées compatibles avec le jet-fuel. L'utilisation d'alcools celluloseux est visée à terme. Cette filière peut bénéficier d'une bonne synergie avec l'industrie pétrolière (Sté GEVO). Néanmoins le coût de production est certainement élevé (enchaînement multiple des étapes de production), et la certification ASTM n'est pas acquise à ce jour.

4. Bio-ressources, concurrences d'usage, durabilité

La biomasse est une source d'énergie, mais elle constitue d'abord la source de production des aliments, des biofertilisants, des biomolécules et des matériaux renouvelables. Sa transformation en énergie se conçoit donc plutôt comme devant rester subsidiaire, intervenant en fin de vie des bio-ressources ou pour valoriser des sous produits ou des bio-déchets non valorisables par ailleurs.

Quatre grands secteurs économiques produisent et détiennent des gisements de bio-ressources : l'agriculture, la sylviculture, l'aquaculture et les économies générant des bio-déchets ou des sous-produits organiques ou ligno-cellulosiques (à terme culture des micro-algues et des micro-organismes). La bio-économie s'intéresse tout particulièrement, pour l'instant, aux productions agricoles et forestières, ainsi qu'à la valorisation des sous-produits directs (plaquettes de bois, pailles...). Et ces filières sont à la base de voies possibles de production des biocarburants aéronautiques (comme pour les biocarburants automobiles).

La photosynthèse terrestre produit des quantités considérables de biomasse, dont à peine 20% sont effectivement gérées, collectées et valorisées, le reste participant au cycle naturel du carbone par retour au sol des composants organiques dégradés. Dans le cas de la France, on peut estimer à 35 Mt/an le gisement de biomasse transformé en chaleur et en électricité, (dont un tiers proviendrait de sous-produits de la filière bois).

Dans le même temps, la filière bois-fibre consommerait, quant à elle, 40 Mt /an de bois pour la construction, l'emballage et le papier. La productivité de la forêt française réserverait donc un potentiel de développement pour des filières consommatrices de bois (même si le gisement disponible est principalement feuillu, alors que les besoins des marchés, sauf pour l'énergie, sont avant tout résineux).

Les biocarburants de 1^e génération occupent 2Mha environ, soit 7 % de la SAU (surface agricole utile), et ils sont incorporés dans les carburants routiers avec approximativement le même pourcentage (7%). Les surfaces consacrées par ailleurs aux plantes textiles et fibreuses, à la chimie et à la parfumerie s'évaluent entre 500 000 et 600 000 ha. Ces terres bénéficient du retour au sol annuel de matières organiques (épandage, compostage, enfouissement...) à hauteur de 300 Mt/an d'amendements pour maintenir les facultés agronomiques, le stockage de carbone et les équilibres des sols agricoles.

Lorsque l'on imagine que l'incorporation de biocarburants aéronautiques pourrait viser, dans un premier temps, 1% (amorçage), puis 3,5% (objectif européen, très ambitieux, à 2020), puis même environ 10% à terme (objectif de référence pour les biocarburants routiers), on fait référence, pour la France, à des quantités de biocarburants équivalentes, respectivement, à 70 000 t/an (1%), puis 200 000 t/an, (3,5%) ou à 600 000 t/an (10%). Ces chiffres posent la question des capacités durables de production, et des concurrences d'usage avec les productions alimentaires et non alimentaires (dont celles des biocarburants routiers). Avec un rendement massique moyen de process de 30% pour les filières de biojet-fuel concernées, et donc avec une production agricole ou lignocellulosique moyenne de 2 tep/ha (soit deux tonnes de biocarburant par hectare), les surfaces productives qui seraient en cause seraient respectivement de 30 000, 100 000 ou 300 000 ha (betteraves, forêts de production, etc.)

La concurrence d'usage tend à évoluer avec les premières bioraffineries en Europe, dont celle de Pomacle Bazancourt dans la Marne (céréales) ou celle de Tartas dans les Landes (Bois).

Une bioraffinerie vise, outre l'environnement de recherche et de formation qu'elle attire, à développer en synergie cinq types de produits et de marchés (Pomacle Bazancourt) à partir d'une matière première unique (céréales, bois, oléagineux...) : bioénergies, biocarburants, biomolécules (colles et adhésifs, intermédiaires chimiques, solvants, biolubrifiants, surfactants, ...), biomatériaux (fibres, polymères, textiles, plastiques...) et bio-ingrédients (produits cosmétiques, compléments nutritifs, ...).

La concurrence d'usages peut se transformer en une organisation des filières agro-industrielles en « synergies d'usages », mise en perspective pour les 20 à 30 ans à venir, pour soutenir le développement conjoint des filières alimentaires et non alimentaires, dont celles des biocarburants.

Cependant, la biomasse récupérable n'est pas en quantité illimitée et ses usages sont nombreux, avec des coûts et des niveaux de compétitivité différents ; cela suppose un arbitrage des pouvoirs publics pour définir les priorités d'usage des bio-ressources et les précautions de développement des filières.

Ces biocarburants aéronautiques doivent enfin être durables, c'est-à-dire économiquement compétitifs mais aussi acceptables socialement et écologiquement. Le même débat avait été ouvert dans les années 2005 à propos du développement contesté des biocarburants routiers et s'était finalement concrétisé par la première directive européenne sur les énergies renouvelables du 5 juin 2009.

L'Union Européenne avait à l'époque adopté son premier « Paquet Energie Climat » qui fixait, pour 2020, un objectif de 20% de la consommation énergétique totale (dont 10% de celle des transports) sous forme d'énergies renouvelables, ainsi que la réduction de 20% des émissions de gaz à effet de serre (dans la lignée du « facteur 4 » pour 2050) et la diminution de 20% de la consommation énergétique totale de l'Union Européenne.

Il y était demandé aux biocarburants mis sur le marché, qu'ils soient produits ou importés en Europe, de répondre à cinq grands critères de durabilité pour être comptabilisés dans les objectifs nationaux de 2020 et pouvoir bénéficier d'aides publiques sous toutes les formes.

Les cinq critères devaient s'appliquer aux biocarburants pour qu'ils puissent être comptabilisés. Mais en réalité, seuls les biocarburants routiers ont donné lieu à la mise en place effective des schémas de certification et de contrôle, qui conditionnaient leurs avantages fiscaux.

- La réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) par rapport aux carburants conventionnels devait être d'au moins 35%, puis de 50% ou 60% à partir de 2017.
- Les biocarburants ne devaient pas être produits sur des terres de grande valeur en termes de biodiversité (forêts primaires, zones protégées, zones de protection d'espèces, prairies à forte biodiversité), ni sur des terres présentant un important stock de carbone ou des tourbières.

- Les biocarburants européens devaient être issus de productions agricoles respectant les règles d'éco-conditionnalité de la PAC.
- Les biocarburants devaient provenir de pays ayant ratifié et mis en œuvre certaines conventions internationales relatives au travail et à l'environnement en relation avec les critères de la Directive ENR.
- Les biocarburants devaient enfin être produits par des opérateurs pouvant justifier de mesures prises pour la protection des sols, de l'eau, de l'air, et la restauration des terres dégradées.

Les opérateurs européens des biocarburants, et les douanes, se sont organisés pour établir une chaîne de traçabilité (notamment grâce à des certificats massiques), de certification et de contrôle unique.

En matière de biocarburants aéronautiques, l'absence de pénalités ou de soutiens fiscaux priverait les opérateurs du secteur aéronautique de stimuli quand les biocarburants routiers bénéficiaient de réductions fiscales (TIC) et d'un mandat d'incorporation associé à une TGAP.

5. Projets financés par le programme cadre européen FP7 pour les carburants alternatifs pour l'aviation⁶²

A number of research projects of the 7th Framework Programme have concentrated on the development of new pathways or specific research issues in biofuels for aviation.

The 7th Framework Programme for research and technological development is the EU's primary instrument for funding research and demonstration activities over the period of 2007 to 2013.³³ It brings together all research-related EU initiatives under one roof, providing the structure for reaching the EU goals of growth, competitiveness and employment. The total FP7 budget for the seven-year period amounts to 51 billion euros. The EU Member States and the European Parliament have earmarked a total of € 2.35 billion over the duration of FP7 for funding Energy related projects.

FP7 Bioenergy Projects

Since the start of FP7 in the area of bioenergy, the calls have prioritised large scale demonstration projects with particular emphasis on biofuel production from lignocellulosic biomass and have addressed the most important value chains described in Table 1 below. This has resulted in 10 large-scale demonstration projects that are led by strong industrial consortia aiming to accelerate technology development in key areas and to facilitate their market deployment. The 10 contracts can be divided into four main clusters that represent particular value chains, synthetic biofuels, lignocellulosic ethanol, pyrolysis, and biofuels from algae.

In the 2013 FP7 Call the topic for biofuel demonstration projects focused on the production and use of biofuels in the aviation sector. Two proposals were shortlisted for support, however, since both these proposals are at the early stages of negotiations little information can be provided at present. The first project with title "Production of fully synthetic paraffinic jet fuel from wood and other biomass" (acronym: BFSJ) is led by Swedish Biofuels and aims to produce bio-kerosene via the ethanol route with key partners Abengoa Bioenergy, Lufthansa, SkyEnergy and LanzaTech with about 56 and 28 Million Euro respectively for total project cost and EC requested support. The second project with title "2000 ton/y industrial scale demonstration biorefinery on lignin based aviation fuel" (acronym: BIOREFLY) is led by Chemtex Italia and aims to produce bio-kerosene from the lignin residue of a lignocellulosic ethanol facility with key partner Agusta Westland with about 26 and 14 Million Euro respectively for total project cost and EC requested support.

According to the call specifications in both projects flights will be undertaken with the biofuels produced. The negotiations of both projects are expected to be completed within the next 4 months and the projects should start before the end of the year.

FP7 Transport Projects

ITAKA (Initiative Towards sustAinable Kerosene for Aviation)

ITAKA will look at removing the barriers to the use of sustainable biofuels in aviation and therefore will contribute to the annual production target of two million tonnes of biofuel for aviation by 2020.

⁶² Source Commission européenne. Document remis à la mission.

ITAKA will test the use of sustainable renewable aviation fuel in existing logistic systems and in normal flight operations in Europe. The project will also link supply and demand by establishing relationships among feedstock growers and producers, biofuel producers, distributors, and airlines.

As feedstock, ITAKA targets European camelina oil and used cooking oil, in order to meet a minimum of 60% on greenhouse gas emission saving compared to the fossil jetA1.

The project aims to certify the entire supply chain of the renewable aviation fuel, based on the Roundtable on Sustainable Biofuels (RSB) EU RED standard. In addition, the production and use of camelina as a biofuel feedstock will also be assessed with regards to its contribution to food and feed markets and its potential impact on direct and Indirect Land Use Change (ILUC). The research will also evaluate the economic, social and regulatory implications of the large-scale biofuels utilisation in aviation.

Consortium members include companies and research centres leaders in: feedstock production (BIOTEHGEN and Camelina Company España); renewable fuel production (Neste Oil and RE-CORD); fuel logistics (CLH and SkyNRG); air transport (Airbus, EADS IW UK, Embraer and SENASA); and sustainability assessment (EADS IW France, EPFL and MMU).

SOLAR JET (Solar chemical reactor demonstration and Optimization for Long-term Availability of Renewable JET fuel)

The aim of the SOLAR-JET project is to demonstrate a carbon-neutral path for producing aviation fuel, compatible with current infrastructure, in an economically viable way. The SOLAR-JET project will demonstrate on a laboratory-scale a process that combines concentrated sunlight with CO₂ captured from air and H₂O to produce kerosene by coupling a two-step solar thermochemical cycle based on non-stoichiometric ceria redox reactions with the Fischer-Tropsch process. This process provides a secure, sustainable and scalable supply of renewable aviation fuel, and early adoption will provide European aviation industries with a competitive advantage in the global market. These efforts are further complemented by assessments of the chemical suitability of the solar kerosene, identification of technological gaps, and determination of the technological and economical potentials..

The fuel is expected to overcome known sustainability and/or scalability limitations of coal/gas-to-liquid, bio-to-liquid and other drop-in biofuels while avoiding the inherent restrictions associated with other alternative fuels, such as hydrogen, that require major changes in aircraft design and infrastructure.

The process demonstrated in SOLAR-JET eliminates logistical requirements associated with the biomass processing chain and results in much cleaner kerosene and represents a significant step forward in the production of renewable aviation fuels.

Consortium members: BAUHAUS LUFTFAHRT (Germany), Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (Switzerland), DEUTSCHES ZENTRUM FUER LUFT – UND RAUMFAHRT EV (Germany), SHELL GLOBAL SOLUTIONS INTERNATIONAL B.V. SHELL Netherlands, ARTTIC (France)

CORE JET (Coordinating research and innovation of jet and other sustainable aviation fuel)

The project CORE-JetFuel will evaluate the research and innovation “landscape” in order to develop and implement a strategy for sharing information, for coordinating initiatives, projects and results and to identify needs in research, standardisation, innovation/deployment, and policy measures at European level. Bottlenecks of research and innovation will be identified and, where appropriate, recommendations for the European Commission will be elaborated with respect to re-orientation and re-definition of priorities in the funding strategy. The consortium will cover the entire alternative fuel production chain in four domains: Feedstocks and sustainability; conversion technologies and radical concepts; technical compatibility, certification and deployment; policies, incentives and regulation. CORE-JetFuel will ensure cooperation with other European, international and national initiatives and with the key stakeholders in the field.

The expected benefits are enhanced knowledge of decision makers, support for maintaining coherent research policies and the promotion of a better understanding of future investments in aviation fuel research and innovation, in alignment with the ACARE Strategic Research and Innovation Agenda (SRIA) as well as with the ATAG goals of future emission reduction in aviation.

Consortium members: Agency for Renewable Resources (FNR), SENASA, Bauhaus Luftfahrt (BHL), WIP , IFP, EADS Innovation Works and numerous external experts from science, industry and politics.

ALFA-BIRD (Alternative Fuels and Biofuels for Aircraft Development)

ALPHA BIRD started in July 2008 and ended in June 2012.

ALFA-BIRD was aiming at viable technical solutions. Its objective was to investigate and develop a variety of alternative fuels for the use in aeronautics. The main challenge in the project work was developing fuels that meet the very strict operational constraints in aviation (e.g. flight in very cold conditions), and were compatible with current civil aircraft. To address this challenge, ALFA-BIRD gathered a multi-disciplinary consortium with key industrial partners from aeronautics (engine manufacturers, aircraft manufacturers) and fuel industry, and research organizations covering a large spectrum of expertise in fields of biochemistry, combustion as well as industrial safety. The most promising solutions have been examined during the project, from classical ones (plant oils, synthetic fuels) to the most innovative, such as new organic molecules.

A detailed analysis of 4 new fuels was performed with tests in realistic conditions. It covers a number of areas, including:

- study of possible alternative fuels for use in aviation
- chemical analysis of the "best" fuel
- improved formulation of biofuels
- new injection systems

- modeling of injection and combustion
- compatibility with aircraft fuel systems
- production of new fuels.

The first fuel selection matrix has been designed around three main axes, covering a wide range of possible alternative fuels from short term to long term:

- paraffinic fuels, with hydrotreated vegetable oils and synthetic fuels (XtL), in a short / middle term vision
- naphthenic fuels, representative of new production processes such as coal or biomass liquefaction in a middle term vision
- oxygenated fuels, such as higher alcohols or furanic compounds, in a long term vision.

The 4 fuels selected were FSJF, FT-SPK, a blend of FT-SPK and 50% naphthenic cut, and a blend of FT-SPK and 20% hexanol. This fuel matrix offers the possibility to evaluate the potential of different chemical families which are paraffinic compounds, naphthenic compounds and oxygenated compounds.

This fuel matrix was also representative of a short, middle, and long term view. The information collected during the tests have been used to prepare the environmental and economical impact assessment, which was the basis for the elaboration of the future strategy for the use of alternative fuels for aircraft.

SWAFEA

The SWAFEA European study was initiated to investigate the feasibility and impacts of the use of alternative fuels in aviation. The goals were to develop a comparative analysis of different fuels and energy-carrier options for aviation on the basis of the available knowledge, as well as to propose a possible vision and roadmap for their deployment in order to facilitate and support future policy decisions.

The SWAFEA study was initiated in February 2009 by the European Commission's Directorate General for Mobility and Vehicles as part of its general policy for mitigating climate change and contributing to Europe's Energy security as well as economic growth. The study encompassed all aspects of the possible introduction of alternative fuels in aviation using a highly multidisciplinary approach. This included technical, environmental, and economic assessments.

The purpose of the technical component of the study was to complement available data regarding technical suitability of alternative fuels with additional investigation and testing.

The environmental and economic assessments both consisted of in-depth analyses of the impact of various fuel production pathways, from feedstock to fuel, through the entire life-cycle. The environmental component also included societal impacts of fuel production, while the economic component studied the required fuel production infrastructure in addition to the cost breakdown of various alternative fuels.

The study delivered its findings and recommendations in April 2011. The technical assessment performed in the frame of SWAFEA aimed at complementing the existing works on Fischer-Tropsch (FT) and HEFA (hydroprocessed vegetable oils and animal fats) synthetic paraffinic kerosenes, focused on well-established processes and final products that clone crude-oil based kerosene molecules, by investigating possible solutions beyond these first candidate fuels (impact of synthetic kerosene properties, impact of blending ratio, suitability of naphthenic compounds from liquefaction, potential of FAE).

As part of the environmental assessment of alternative fuels, life cycle analysis was performed for Fischer-Tropsch fuels and HEFA for various type of feedstock evidencing that significant emissions reductions could be achieved with biofuels provided that land use change emissions were carefully controlled. Potential impacts of alternative fuels on radiative forcing through their atmospheric impacts (contrails and high altitude chemistry) were also studied.

An analysis of the potential availability of biomass for energy use up to 2050 was performed taking into account sustainability criteria in accordance with the European Directive on Renewable Energy. The analysis, although containing inherent high uncertainties, outlined the challenge associated with the highest emissions reduction target of aviation and the need for further research on more efficient biomass and processes.

Last, an economic analysis was carried out within SWAFEA, essentially on HEFA and FT biomass-to-liquid (BTL), to evaluate how biofuels compare with conventional jet fuel and which measures could be required for their deployment. The analysis concluded that neither BTL nor HEFA solutions are initially cost competitive with conventional jet fuel while in the longer term their viability depends heavily on the possibility to secure "low price" feedstock supply. Specific policy measures and incentives are thus required to initiate the deployment of biofuels.

Consortium Members : Airbus, AirFrance, Altran, Bauhaus Luftfahrt, Cerfacs, Concawe, DLR, EADS-IW, Embraer, Erdyn, Iata, Ineris, IFPEN, Onera, Plant Research International (WUR), Rolls-Royce UK and RollsRoyce Deutschland, Shell, Snecma, University of Sheffield

DREAM (Validation of radical engine architecture systems)

DREAM is a large multinational FP7 R&T project which is the response of the engine community to commercial and environmental pressures that have come about mainly as a results of two main factors:

- The demand to reduce CO₂ has increased considerably since the publication of the ACARE goals
- The increasing cost and future availability of Jet A1 fuel.

DREAM Sub-Project 5 aimed at demonstrating that alternative fuels could be used in modern aircrafts and engines. This demonstration was performed with an existing and available fuel (2 alternative drop-in fuels have been selected: a 50% GTL – 50% Jet A1 blend provided by Shell and a 50% HVO – 50% Jet A1 blend made of camelina oil provided by UOP) on a turboshaft engine and a paper work extension to aero-engines was performed.

The impact of using these fuels was evaluated both on aero-engine fuel systems and on aircraft fuel systems through the following tests:

- Ageing tests on usual elastomers with both fuels to evaluate elastomers compatibility,
- Fuels system components tests: component characterization, ageing tests, self-suction capabilities,
- Engine endurance test.

The tests concluded that the fuel systems performances with synthetic fuels are similar to performances with Jet-A1. No major disparity has been found between alternative fuels and reference Jet-A1 during the combustion test conducted with small helicopter turboshaft engine.

It was also concluded that alternative fuels can be used in an aero-engine without major modification. The overall behaviour of the engine with HVO blend is consistent to engine behaviour with Jet-A1. The endurance with HVO blend was successful. HVO effects on Emission Index (EINO_x, EICO, EIHC) compared to Jet A1 are lower than engine to engine variability. HVO effects on Smoke Number levels compared to Jet A1 are lower than the uncertainty of the measurement process. The project validated also the fuel system functional requirements in terms of "compatibility with materials" and "lubrication of the fuel system components".

6. Activité des aéroports français et prise de carburant sur ces aéroports

(Données 2014 – estimation DGAC)

NB : L'activité est exprimée en nombre de vols au départ des aéroports français ; les prises de carburant sont exprimées en tonnes.

Origine	Destination	Activité	Carburant livré
Métropole	Métropole	311 011	623 793
Métropole	Outremer (et vv)	10 287	686 690
Outremer	Outremer	71 552	41 614
Sous total	France	392 850	1 352 097
Métropole	International	1 003 514	5 150 338
Outremer	International	54 981	114 050
Sous total	International	1 058 495	5 264 388
	Total	1 451 345	6 616 485

Commentaires

- Les prises de carburant en France représentent 2,87 % de la consommation mondiale.
- Les prises de carburant pour les vols domestiques (Métropole et Outremer) représentent 20,4 % du total des prises carburant en France. Hors vols outremer, les vols domestiques ne représentent plus que 9,42 %.
- L'activité de l'ensemble des aéroports français représente une moyenne quotidienne de 3976 vols au départ, dont 73 % à destination internationale.

Autres données de nature internationale ¹

Consommation mondiale de carburant (vols commerciaux) : 230 millions de tonnes en 2014.

Répartition géographique :

- vols intra- européens : 7,4 %
- vols de et vers l'Europe : 26,5 %
- autres vols : 66,1 %

¹ Source IATA

7. L'organisation de l'aviation civile internationale (OACI)

La convention relative à l'aviation civile internationale, dite Convention de Chicago, a été adoptée par 52 États, le 7 décembre 1944. Elle est entrée en vigueur en mars 1947, après ratification par 26 états, seuil prévu par la convention. Elle a conduit à la création, en octobre 1947, de l'Organisation de l'aviation civile internationale, dont le siège est à Montréal, chargée d'administrer la Convention.

Sa gouvernance est organisée autour des instances suivantes :

- l'assemblée des 191 États signataires de la Convention, qui se réunit au moins une fois tous les trois ans (ex : A37 en 2010 ; A38 en 2013, A39 en 2016), qui vote les résolutions et adopte les normes, standards et pratiques recommandées. L'assemblée approuve le budget de l'organisation et élit les membres du conseil.
- le conseil, organe permanent de l'organisation, constitué de 36 États, répartis en 3 collèges. Sa composition est actuellement la suivante :

1^{er} États d'importance majeure dans le transport aérien :

Allemagne, Australie, Brésil, Canada, Chine, États-Unis, Fédération de Russie, France, Italie, Japon et Royaume-Uni.

2^e États qui contribuent le plus à fournir des installations et services pour la navigation aérienne civile internationale :

Afrique du Sud, Arabie saoudite, Argentine, Égypte, Espagne, Inde, Mexique, Nigéria, Norvège*, Portugal*, Singapour et Venezuela*.

3^e États dont la désignation assure la représentation géographique :

Bolivie*, Burkina Faso, Cameroun, Chili*, Émirats arabes unis, Kenya*, Libye*, Malaisie, Nicaragua*, Pologne*, République de Corée, République dominicaine* et République Unie de Tanzanie.

* États nouvellement élus en 2013

- le comité de la protection de l'environnement de l'aviation (CAEP, en anglais)

Les activités de l'OACI, en matière environnementale, sont menées par le CAEP, établi par le conseil en 1983, en remplacement du comité sur le bruit des aéronefs et du comité sur les émissions des moteurs d'avion.

- le Secrétariat, dirigé par un secrétaire général.

Le Secrétaire général dirige le personnel international spécialisé travaillant au sein du Secrétariat ; il fait fonction de secrétaire du Conseil de l'OACI, devant lequel il est responsable ; il s'acquitte des fonctions qui lui sont confiées par le Conseil, auquel il présente des rapports périodiques sur l'avancement des activités du Secrétariat.

Le Secrétariat comporte cinq sections : navigation aérienne, transport aérien, coopération technique, affaires juridiques et relations extérieures et administration et services.

Les annexes à la convention de Chicago, recueil des normes, standards et pratiques recommandées, adoptées au fil des années par l'Assemblée, sont aujourd'hui au nombre de 18 ;

- **Annexe 1** Licences du personnel
- **Annexe 2** Règles de l'air
- **Annexe 3** Assistance météorologique à la navigation aérienne internationale
- **Annexe 4** Cartes aéronautiques
- **Annexe 5** Unités de mesure à utiliser dans l'exploitation en vol et au sol
- **Annexe 6** Exploitation technique des aéronefs
- **Annexe 7** Marques de nationalité et d'immatriculation des aéronefs
- **Annexe 8** Navigabilité des aéronefs
- **Annexe 9** Facilitation
- **Annexe 10** Télécommunications aéronautiques
- **Annexe 11** Services de la circulation aérienne
- **Annexe 12** Recherches et sauvetage
- **Annexe 13** Enquêtes sur les accidents et incidents d'aviation
- **Annexe 14** Aérodrômes
- **Annexe 15** Services d'information aéronautique
- **Annexe 16** Protection de l'environnement
- **Annexe 17** Sûreté. Protection de l'aviation civile internationale contre les actes d'intervention illicite
- **Annexe 18** Sécurité du transport aérien des marchandises dangereuses

8. Éléments d'appréciation des subventions implicites aux énergies fossiles

Working Paper 15/105 du Fonds monétaire international

Le document publié en avril 2015 par le Fonds monétaire international (WP 15/105, Fiscal Affairs Department) *How Large Are Global Energy Subsidies?*, David Coady, Ian Parry, Louis Sears, and Baoping Shang, conclut à une sous-estimation importante de ces subventions :

« Global post-tax energy subsidies—after incorporating the most recent estimates of the environmental damage from energy consumption—are substantially higher than previously estimated. The estimate for 2011—at \$4.2 trillion (5.8 percent of global GDP)—is more than double the amount reported by Clements and others (2013). The estimate grows to \$4.9 trillion (6.5 percent of global GDP) in 2013 and is projected to remain high at \$5.3 trillion (6.5 percent of global GDP) in 2015 despite the large drop in international energy prices. ».

Le même document compare les évaluations proposées auparavant :

« The International Energy Agency (IEA) reports its estimate of global energy subsidies in its annual World Energy Outlook. This estimate is based on the price-gap approach, which compares the end-user prices with reference prices. The reference prices consist of supply cost inclusive of shipping cost and margins and any value-added tax. The latest estimate indicates that fossil-fuel consumption subsidies worldwide amounted to \$548 billion in 2013, a slight increase from \$523 in 2011 (IEA 2012; IEA 2014).

The estimate by the Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) is based on the so called inventory approach. This method focuses on direct budgetary support and tax expenditures that provide a benefit or preference for fossil-fuel production or consumption, either in absolute terms or relative to other activities or products. The OECD estimate for energy subsidies in 34 OECD countries amounted to \$50–90 billion annually between 2005 and 2011 (OECD 2013).

The IMF also adopted the price-gap approach and provides subsidy estimates based on two definitions of energy subsidies. Pre-tax subsidies compare consumer prices with supply cost, and post-tax subsidies compare consumer prices with supply cost plus the efficient level of taxation which includes an excise component for externalities and a consumption tax component for revenue considerations (Clements and others 2013). The IMF estimated that pre-tax energy subsidies were \$492 billion and post-tax energy subsidies were \$2.0 trillion in 2011.

The IMF pre-tax subsidies are slightly lower than the IEA estimate. One of the reasons for the difference is that the IEA estimate includes some tax subsidies. The IMF post-tax subsidies, on the other hand, are substantially higher than the IEA estimate because the IEA reference prices do not incorporate the environmental cost of energy consumption. The OECD estimate is much smaller than those of IEA and IMF, partly because it only covers advanced economies. Similar to the IEA estimates, the OECD estimates do not take into account the implicit subsidies from the environmental costs of energy consumption. »

9. Présentation de diverses politiques nationales en matière de carburants alternatifs

Source : Politiques en faveur du développement de carburants alternatifs, Analyse comparative dans huit pays.

Étude éditée par la direction générale du Trésor (mars 2015)

9.1. L'Allemagne

Au vu des objectifs ambitieux de l'Allemagne en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre (- 40% en 2020 par rapport à 1990), tous les secteurs y sont mis à contribution, en particulier celui des transports.

Les objectifs initiaux ont été renforcés par un nouveau plan d'action gouvernemental adopté en décembre 2014 qui prévoit d'améliorer les résultats en matière d'efficacité énergétique (25-30 Mt CO₂ éq.); les attentes sont fortes à l'égard du secteur électrique (22 Mt), des transports (7-10 Mt), mais une contribution est attendue également de l'industrie et des déchets (3 à 7,7 Mt) et de l'agriculture (3,6 Mt). La collaboration entre industries de pointe et les réseaux de recherche qui interviennent tout au long de la chaîne de valeur semble établie et pourrait servir d'exemple.

Dans le secteur des transports, il s'agit de diminuer d'environ 10% la consommation énergétique finale jusqu'à 2020 et d'environ 40% jusqu'à 2050, par rapport à 2005. Les voies choisies sont prioritairement d'augmenter considérablement le nombre de véhicules électriques (1 million jusqu'à 2020 et 6 millions jusqu'à 2030), d'optimiser le transport routier de marchandises (renouvellement de la flotte de camions, soutien aux camions hybrides), de favoriser le report vers le transport ferroviaire, notamment par le biais d'un élargissement en 2015 du périmètre d'application de la taxe poids lourds adaptée à l'efficacité énergétique, d'apporter un soutien renforcé aux transports publics ainsi qu'aux déplacements en vélo et à pied, aux plans de déplacement des entreprises et à la conduite économe en carburants. Mais il a été démontré également qu'une réduction significative des émissions de CO₂ dans le domaine des transports à cet horizon qui est proche, suppose de faire appel à des carburants alternatifs, et en particulier à l'électromobilité.

L'Allemagne a une démarche ancienne en la matière avec un programme national d'innovation sur l'hydrogène et les piles à combustible (NIP) de 1,4 Mrd d'€ en 2006 pour une durée de dix ans associant le gouvernement fédéral, l'industrie et la communauté scientifique, dans le cadre d'une organisation nationale dédiée, pour accélérer l'industrialisation et la commercialisation des technologies de l'hydrogène et des piles à combustible en Allemagne avec un programme concentré sur les démonstrateurs à grande échelle ainsi que sur les projets de recherche et développement.

Elle a également initié un plan national de développement de l'électromobilité mobilisant 150 experts de différents secteurs industriels regroupés en sept groupes de travail et doté d'1,5 Mrd € pour les véhicules électriques et véhicules hybrides rechargeables fixant comme objectif la circulation d'un million de véhicules électriques en 2020.

En d'autres termes, l'Allemagne veut se positionner comme le fournisseur et le marché leader de l'électromobilité dont la 3e étape porterait de 2017 à 2020 sur le développement d'un marché de masse avec des véhicules électriques à batteries (BEV), des véhicules électriques à action étendue (REEV) et véhicules hybrides plugin (PHEV).

Concernant les biocarburants, l'Allemagne a transposé les deux directives de l'Union Européenne sur les énergies renouvelables (RED) et sur la qualité des carburants (FQD) ; un taux de 6,25% de biocarburants a été prévu dans le mix énergétique en 2014, incluant des sous-objectifs de 4,4% pour le diesel et de 2,8% pour l'essence. Cet objectif remplace l'incitation fiscale précédemment en vigueur. Les mesures incitatives sur le 100% biodiesel et les huiles végétales pures ont été supprimées en 2012 et celles concernant les biocarburants de 2e génération, les biogaz et l'E85 arrivent à échéance en 2015.

La transposition en droit allemand des objectifs de baisse de l'intensité carbone fixés par le FQD (soit un coefficient de réduction des émissions des biocarburants par rapport aux carburants fossiles de 35% en 2011, 50% en 2017 et 60% en 2018) établit des exigences en termes de durabilité et de qualité des biocarburants et définit des critères, issus de la directive européenne, dont la protection des zones à haute valeur écologique ou à haute densité en carbone, la protection des tourbières, l'utilisation durable des terres et les émissions de GES. Le ministère de l'agriculture a de plus lancé en partenariat avec l'agence pour les énergies renouvelables (FNR) l'*Initiative pour la transformation durable des matières premières dans l'exploitation de la biomasse* (INRO). Cette initiative a pour but d'engager les entreprises et industriels de la filière à signer une charte de certification de l'utilisation durable de la biomasse. Les critères sont avant tout écologiques (protection des espaces naturels et du sol, utilisation de l'eau, gestion des déchets) et sociaux (conditions de travail).

En 2013 ont été utilisés 54 millions de tonnes de carburants. Cette consommation se répartit entre 60% de diesel, 33% d'essence, 2 % de gaz et 5,2 % de biocarburants (exprimés en contenu énergétique) soit 3,4 millions de tonnes.

En 2013, il y avait 15 stations-services à hydrogène en Allemagne et au moins 35 autres prévus d'ici fin 2015. Elles servent essentiellement aux véhicules à pile à combustible dans certaines agglomérations. Le projet Clean Energy Partnership (CEP) est l'un des projets « phares » du Programme NIP ; il s'agit de démontrer la viabilité de la mobilité fondée sur l'hydrogène. Ses trois missions sont les suivantes : développement d'un secteur de production d'hydrogène durable, du circuit de ravitaillement et des véhicules. On y retrouve trois groupes de travail : automobile, bus et infrastructures. Le montant des projets soutenus s'élève à 150 M€ avec un objectif de 50% d'hydrogène « vert » d'ici.

Le projet européen PECDEMO, qui vise à développer un système pratique convertissant plus de 8% de l'énergie solaire en hydrogène, a démarré en avril 2014. Ce système matériel doit en outre occuper une superficie de 50 centimètres carrés et rester stable pendant plus d'un millier d'heures. Le budget nécessaire est estimé à 4 Mds€ jusqu'en 2014, principalement pour les batteries et les technologies de propulsion. Le gouvernement a décidé, dans son programme, d'investir 1 Md€ supplémentaire sur cette période, tandis que l'industrie soutiendra la recherche et le développement à hauteur de 17 Mds€. La plate-forme a retenu six projets, qui seront mis en œuvre par vingt-quatre clusters. Ces projets se concentrent sur les batteries, les technologies de propulsion, la construction légère, les TIC et les infrastructures, le recyclage et l'intégration des véhicules.

En substance, l'Allemagne n'a pas délaissé immédiatement les biocarburants mais s'est engagée résolument depuis bientôt dix ans, sans interruption, avec des moyens conséquents de plusieurs dizaines de milliards d'euros dans d'autres voies de décarbonation des transports routiers. Les mesures incitatives aux biocarburants routiers sont en outre supprimées ou en cours de suppression.

9.2. Les États-Unis

Le gouvernement américain s'est engagé en décembre 2009, lors de la Conférence Climat de Copenhague, à réduire les émissions de gaz à effet de serre des États-Unis de 17% d'ici 2020 par rapport à 2005. Les engagements de Copenhague ont par ailleurs été renforcés lors d'une annonce conjointe avec le gouvernement chinois le 12 novembre 2014, les États-Unis s'engageant à réduire les émissions de gaz à effet de serre de 26 à 28% d'ici 2025.

Le Plan d'Action Climat prévoit en particulier d'établir des nouvelles normes de rendements énergétiques pour les camions et bus qui s'appliqueraient après 2018, après une première étape (2014 à 2018), qui permettraient de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 270 millions mètres cubes et d'économiser 530 barils de pétrole ; il prévoit également de renforcer le secteur des biocarburants avec un soutien au mandat d'incorporation de biocarburants dans les transports.

Un effort sera fait dans la recherche de biocarburants moins coûteux pour les transports militaires et commerciaux. Des objectifs locaux peuvent renforcer ces engagements, soit focalisés sur la réduction des émissions, soit concernant le développement d'énergies renouvelables, de transports alternatifs ou de mesures d'efficacité énergétique des bâtiments.

Le dispositif normatif américain est original : seule la Californie est autorisée à édicter des normes plus strictes que le niveau fédéral, les autres états pouvant ensuite choisir de suivre les standards fédéraux ou ceux de la Californie. À titre d'illustration : 15 états ont limité les émissions des véhicules (à l'initiative de la Californie) et 45 ont pris des mesures incitatives pour les biocarburants, 19 ayant adopté des dispositions (réglementaires ou incitatives) pour augmenter la distance parcourue par unité de carburant et 46 des mesures réglementaires favorisant l'acquisition de véhicules électriques (taux de véhicules à détenir par flotte, incitation financière ...). Huit états ont suivi la Californie dans son projet de *Zero Emission Véhicule*, dont l'objectif est de mettre 3,3 millions de véhicules n'émettant pas directement de CO₂ d'ici 2025.

Pour les poids lourds, a été publié en septembre 2011 un premier jeu de normes pour la période 2014-2018, visant à réduire de 23 % les émissions de GES de ces véhicules, soit 270 MMt) sur leur durée de vie. L'administration devrait adopter des normes complémentaires pour la période 2018-2025, sans doute une réduction complémentaire de 2.6% par an qui permettrait une réduction de l'équivalent de 1 % des émissions de GES totales d'ici 2020, à population constante.

En matière de biocarburants, des mandats d'incorporation (« Renewable Fuels Standard » RFS) ont été votés dans le cadre de la loi sur l'Énergie de 2007 (« Energy Independence and Security Act » EISA) afin d'assurer un marché durable aux biocarburants et de soutenir la demande. La révision du programme en RFS2 en mai 2009, fixe un objectif d'incorporation de biocarburants de 36 milliards de gallons (158 milliards de litres) d'ici 2022. Ces mandats sont évolutifs sur la période, et sont sous-

divisés en plusieurs types de biocarburants afin de permettre le développement de biocarburants dits avancés.

Afin d'être éligibles au RFS, les biocarburants doivent réduire les émissions de CO₂ de 20 % pour les biocarburants conventionnels, 50 % pour le biodiesel et les biocarburants dits « avancés » ; 60 % pour les biocarburants cellulosiques. Le RFS devrait permettre de réduire en 2022 les émissions de 138 millions de tonnes de CO₂, soit les émissions de 27 millions de véhicules.

La production de biocarburants aux États-Unis est toutefois constituée essentiellement d'éthanol de maïs, qui n'a pas d'impact (voir un impact négatif) sur les émissions de GES. Les biocarburants bénéficient cependant de plusieurs aides : depuis 1980 une taxe ad valorem de 2,5% à laquelle s'ajoute une taxe supplémentaire de 0.54 USD/gallons qui protège le marché intérieur. En outre un crédit d'impôt bénéficiant aux raffineurs a été mis en œuvre en 2004 pour soutenir l'importation de biocarburants dans l'essence. Il bénéficie indirectement à la filière de production des biocarburants. Ce crédit d'impôt a été renouvelé chaque année, et varie entre 0,4 et 0,6 USD/gallon pour un coût annuel d'environ 6 milliards de dollars pour le budget américain. Le coût total des mesures de soutien fédérales aux biocarburants est estimé à 45 milliards de dollars depuis 1977, dont 8,3 milliards entre 2009 et 2012 au titre du plan de relance. Trois installations de production de biocarburants cellulosiques sont entrées en production en 2014 : Abengoa à Hugoton, Kansas (25 millions de gallons/an), DuPont à Nevada, Iowa (30 millions de gallons par an) et POET-DSM à Emmetsburg, Iowa. La mise en service d'autres installations est prévue en 2015.

En matière de soutien aux véhicules électriques, le panorama des aides publiques est vaste : tarifs préférentiels d'électricité (voire gratuité), places de parking réservées, accès aux voies rapides, etc. La Californie est l'État le plus actif sur le sujet et a développé de nombreuses aides en propre. Depuis leur lancement en 2009, plus de 3,5 millions de véhicules hybrides ont été vendus aux États-Unis, dont 1,4 million de Toyota Prius. Le coût de production des batteries a pu être réduit de 50% entre 2010 et 2014, pour s'établir à 325 \$/kWhr.

Différentes aides fédérales à l'acquisition de véhicules à hydrogène ou à pile à combustible sont disponibles : aide fiscale pour l'acquisition, bonus de 0,5 cents/gallon d'hydrogène liquéfié, aide de 30.000 USD pour l'installation d'une infrastructure de recharge. La Californie a exigé que tous les raffineurs ou importateurs de carburant créent un approvisionnement en carburants pour les piles à combustibles lorsque 10 000 véhicules dotés de piles à combustible circuleront en Californie.

La division par deux des coûts pour les piles à combustible, et une division par 5 de la quantité de platine requise ont permis le déploiement de 693 piles à combustibles en 2014 pour des chariots élévateurs, qui s'ajoutent aux 7500 déployées par l'industrie. En Californie, 560 véhicules à pile à combustible sont actuellement sur les routes, et un million de passagers ont été transportés dans des bus fonctionnant avec cette technologie. La recherche tente d'obtenir un coût en équivalent carburant inférieur à 3\$/gallon en 2015 et 2\$ par gallon en 2020. Les budgets de recherche du DOE pour le programme « Hydrogen and fuel cell technologies » ont été de 93 millions de dollars en 2014, de 97 millions de dollars en 2015 et sont prévus pour 2016 à 103 millions de dollars. La R&D dans ce secteur bénéficie par ailleurs des efforts déployés par les institutions de recherche militaires dans le domaine du stockage de l'énergie.

En substance, les États-Unis développent une politique agressive de longue date sur des biocarburants peu avancés, qui porte ses fruits, avec des outils complexes et originaux. La politique fédérale ainsi que celle de quelques États clef pour le développement des véhicules électriques et des piles à combustible est également assez ambitieuse.

9.3. Le Brésil

Le développement des carburants alternatifs au Brésil concerne quasi exclusivement le développement du bioéthanol produit à partir de canne à sucre, qui a commencé à être encouragé dès les années 70, et qui est à la fois incorporé dans l'essence et distribué pur à la pompe dans une filière de distribution dédiée pour les véhicules flex fuel (essence-éthanol). Depuis 2005, le biodiesel (base soja et graisses animales) s'est également développé en vue de son incorporation dans le diesel. Pour toutes les autres filières, elles sont soit interdites (GPL), soit peu compétitives (GNP ; électrique), soit en phase de recherche-développement (hybride, biogaz, hydrogène), avec un développement qui devrait rester marginal (niches).

Lors de la COP 15 de Copenhague en 2009, le Brésil s'est engagé à réduire volontairement de 36,1% à 38,9% ses émissions en 2020 en adoptant des objectifs indicatifs chiffrés sur la base de projections d'émissions à 2020 (scénario Business as usual) avec une baisse de la déforestation de 80% en Amazonie et de 40% dans le biome Cerrados (savane brésilienne), la récupération de pâturages dégradés, la mise en place de semis direct, l'intégration agro-sylvo-pastorale et la fixation biologique d'azote pour l'agriculture et l'élevage, l'utilisation de biocarburants – éthanol et biodiesel – dans les transports, l'amélioration de l'efficacité énergétique et l'augmentation des énergies renouvelables – hydro-électricité mais aussi solaire, éolien et bioénergies et enfin l'utilisation de charbon de forêt plantée pour la sidérurgie.

La filière privilégiée au Brésil est la filière du bioéthanol, produit à base de canne à sucre dont le pouvoir énergétique est inférieur à celui de l'essence. La disponibilité de la matière première (le Brésil est le 1er producteur mondial de canne à sucre) et le potentiel d'expansion possible de ce biocarburant ont induit cette orientation appuyée par un choix politique fort, en particulier au début des années 2000.

L'État impose l'incorporation dans l'essence d'éthanol dans un taux variant entre 18 et 27%. En pratique, ce taux d'incorporation n'a jamais été inférieur à 20% depuis son introduction en 1993. Par ailleurs, différentes mesures fiscales ont eu pour but de développer la flotte de véhicules flex et de permettre le développement de l'éthanol carburant (hydraté), sans toutefois que le gouvernement se fixe des objectifs chiffrés.

Exprimée en tep (tonnes équivalent pétrole), la demande en éthanol a représenté 12,5 Mtep en 2013 soit 4,9% de la demande énergétique totale, et devrait représenter 6,3% en 2023 avec 22,2 Mtep (soit une croissance de la consommation de 6,4% par an en 10 ans). Le plan de développement énergétique anticipe une demande de 42,8 Mds de litres d'éthanol en 2023 : éthanol hydraté pour distribution à la pompe et éthanol anhydre pour mélange avec l'essence en considérant une incorporation à 25% en moyenne d'éthanol dans l'essence. 23,8 Mds de litres d'éthanol ont ainsi été consommés. L'éthanol pourrait représenter 17% de l'énergie consommée dans les transports en 2023 (environ 14% aujourd'hui).

Le biodiesel est depuis novembre 2014 incorporé à 7% dans le diesel. La demande de biodiesel (tous usages) a représenté 2,6 Mtep en 2013 soit 1 % de la demande énergétique totale, et devrait représenter 1,3 % en 2023 avec 4,6 Mtep (soit une

croissance de la consommation de +9% par an en 10 ans). En tablant sur le maintien d'une incorporation de biodiesel à 7% dans le diesel entre 2013 et 2023, le plan anticipe une demande de 5,9 Mds de litres de biodiesel en 2023 (croissance de 7,4% par an sur 10 ans). Un mandat d'incorporation a été introduit en 2005. Une mesure provisoire de 2014 a validé une possibilité d'incorporation à 7%, qui est entrée en vigueur au 1er novembre 2014, les distributeurs étant tenus d'utiliser du biodiesel certifié provenant de l'agriculture familiale. Le mandat d'incorporation s'est traduit par la consommation de 3,3 Mds litres de biodiesel en 2013.

La flotte de véhicules flex, introduits sur le marché qu'en 2003, représente 58% de la flotte de véhicules légers aujourd'hui et pourrait en représenter 75% en 2023.

Le Brésil s'est également doté d'un programme *Innovar Auto* pour inciter les fabricants automobiles à faire des efforts en termes d'efficacité des moteurs (émissions de CO₂ et de polluants par litre de carburant ou km parcouru) et conduit des actions de recherche, de développement et d'innovation en matière de production d'hydrogène et de piles à combustibles, dans le cadre du Programme ProH₂, lancé en 2002 et coordonné par le ministère des sciences, des technologies et de l'innovation. En 2005, le gouvernement fédéral a publié la *Feuille de route pour la structuration de l'économie de l'hydrogène*. Ce document a été élaboré sous la coordination du ministère des mines et de l'énergie et met en place les actions pour l'introduction de l'hydrogène dans le mix énergétique à l'horizon 2020. Il se développe mal cependant du fait d'un manque de capital humain et d'un coût élevé des investissements nécessaires en recherche.

Le gouvernement fédéral ne propose pas de financements spécifiques pour les véhicules électriques et les programmes de développement sont plutôt le fait des municipalités (par exemple le Programme *Ecoeletrico* avec Renault).

En résumé, le Brésil a misé beaucoup sur les biocarburants issus de sucre de canne pour assurer le mieux possible son indépendance énergétique mais ne néglige pas les progrès d'efficacité énergétique. Il n'a pas les moyens humains de développer des filières alternatives aux biocarburants.

9.4. La Chine

La nécessité pour la Chine de limiter sa dépendance au charbon et au pétrole a contribué à ce qu'elle se fixe dès 2009 des objectifs pour 2020 par rapport à 2005 de réduction de 40 à 45 % les émissions de CO₂ par unité de PIB, d'augmentation de la couverture forestière de 40 M ha. Elle a décidé également de porter à 15 % la part des énergies non-fossiles dans la consommation primaire.

Le 12^{ème} plan quinquennal (2011-2015) fixe ainsi un objectif de réduction de 16 % de l'intensité énergétique (consommation énergétique par unité de PIB) et de réduction de 17 % de l'intensité carbone (émissions de CO₂ par unité de PIB) pour la période 2015-2020. La stratégie nationale d'adaptation au changement climatique (2014-2020) assigne de nombreux objectifs en matière de réduction des émissions au secteur des transports.

En matière de transport routier, le plan prévoit de développer les transports publics, les véhicules fonctionnant au gaz naturel, à l'électricité, aux énergies nouvelles et, plus généralement, les véhicules faiblement émetteurs. L'objectif est qu'en 2020, les transports publics représentent 30 % des déplacements dans les grandes et moyennes villes et que les émissions de dioxyde de carbone soient réduites de 5 % par

voyageur / kilomètre transporté et de 13% par tonne / kilomètre de marchandise transportée par rapport à 2010.

En matière ferroviaire, le plan encourage l'électrification des chemins de fer, le développement des trains et des TGV à faible consommation énergétique et des transports ferrés urbains. Il est prévu qu'en 2020, les émissions de dioxyde de carbone par unité de volume de transport ferroviaire soient réduites de 15 % par rapport à 2010.

Dans le transport fluvial, le plan veut encourager l'utilisation d'énergies alternatives afin de réduire les émissions de dioxyde de carbone par unité de volume de transport fluvial de 13 % d'ici 2020 par rapport à 2010.

Enfin dans le domaine du transport aérien, le plan veut promouvoir activement l'utilisation des biocarburants aéronautiques et les technologies d'économie de carburant afin de réduire les émissions par unité de volume transporté par voie aérienne d'environ 11 % en 2020 par rapport à 2010.

En substance, l'ensemble des secteurs est supposé s'engager sur une voie de plus grande sobriété à un rythme rapide et le transport aérien est inclus dans les objectifs poursuivis.

10. Enjeu d'innovation et autres opportunités de marchés

Les compagnies aériennes affrontent deux défis principaux à moyen terme : réduire l'impact du secteur aéronautique sur les émissions de gaz à effet de serre (d'où les objectifs assignés par l'OACI et IATA aux horizons 2020 et 2050), et sauvegarder leur équilibre financier.

Les biocarburants aéronautiques peuvent contribuer à réduire significativement les émissions de GES, dans la mesure où ils seraient incorporés massivement dans le kérosène. Mais cette incorporation massive est rendue difficile par le coût élevé du biojet-fuel (sauf si l'ensemble des compagnies étaient astreintes à cette incorporation).

Les objectifs recherchés pourraient être néanmoins approchés grâce à une incorporation progressive de biojet-fuels certifiés gérée par des certificats massiques des compagnies. Un tel dispositif s'appuyerait sur de futurs mécanismes de marché qu'étudie actuellement l'OACI.

Un amorçage lent n'apporterait aucun bénéfice significatif dans le domaine de la réduction des émissions de GES, ni en termes de transition énergétique. En revanche, l'innovation scientifique et industrielle pourrait en tirer parti (par exemple les programmes Nouvelle France Industrielle, chimie verte et bio-ressources..), d'autant que les acteurs français de l'aéronautique, de l'énergie et de la bioéconomie y sont engagés. Il convient donc qu'un signal durable puisse leur être adressé par les pouvoirs publics avec une vision à moyen terme et un cadre réglementaire stable. Ils sont impliqués dans les biocarburants routiers, avec des recherches et des projets pilotes engagés vers la 2^e génération. Pour les pétroliers, la production de biojet-fuels pourrait s'accompagner de celle de biodiesel et de bionaphta.

L'Europe s'est organisée autour de l'*European Advanced Biofuels Flightpath* avec pour objectif une production et une incorporation de 2 millions de tonnes de biojet-fuel par an en 2020. Des programmes de recherche tels que SWAFEA ont permis de cerner les besoins et d'ébaucher des solutions. Une telle ambition européenne ne pourra être satisfaite sans une combinaison d'intérêts entre les secteurs d'activité et sans des synergies entre les opérateurs des biocarburants et ceux de la chimie.

Des efforts réels ont en effet été déjà réalisés en commun en vue de la production de biojet-fuels et de molécules précurseurs de la biochimie. La France dispose pour cela de l'ensemble des acteurs et des compétences qui permettraient de se positionner.

Cependant qu'il s'agisse de cellulose, d'huiles ou de sucres, la ressource en biomasse n'est évidemment pas illimitée. La biomasse est soumise à des concurrences d'usage dans les secteurs énergétiques et non énergétiques, y compris pour l'alimentation. La contribution de biojet-fuels à l'offre de carburants alternatifs pour l'aéronautique risque donc d'être concurrentielle. Il en résulte une obligation de dialogue et de partenariat entre les acteurs, tout comme une recherche d'innovations concertée entre les opérateurs des diverses filières de la bio-économie pour tenter notamment de maîtriser le développement de conflits d'usage excessifs au sein de la filière bois (bois énergie / bois matériau).

11. L'initiative d'Air France : *Lab'line for the future*

Dans un contexte où les initiatives internationales se multipliaient, Air France a élaboré les principes d'une *Lab'line for the future* pour tester en conditions opérationnelles les biocarburants aviation de différentes filières.

Depuis septembre 2014, la compagnie propose ainsi une vitrine des innovations, sur la ligne Toulouse – Paris (Orly), à raison d'un vol par semaine, avec trois volets :

- un volet environnemental : alimentation au biocarburant développé par Total et sa filiale Amyris, optimisation des procédures de pilotage et des trajectoires, allègement du matériel embarqué...
- un volet d'innovation, sur l'intégralité de la chaîne de voyage (test ou développement de nouveaux produits ou services en lien avec le développement durable) ;
- un volet retour d'expérience, tant sur le plan technique (consommation, comportement des moteurs...), que socio-économique (niveau d'information et réactions des clients).

Les partenaires d'Air France :

- un partenaire institutionnel : la DGAC,
- des partenaires industriels : Total et Safran,
- des partenaires commerciaux : Airbus, Aéroport de Toulouse, EDF, Orange, Zodiac, Thalès, Région Midi Pyrénées, Veolia, etc.

Le carburant utilisé : 90 % de jet A1 et 10 % de Farnesane, d'origine canne à sucre (Brésil), certifié aux normes ASTM sur le plan technique et aux normes RSB sur le plan durabilité.

L'opération devrait se poursuivre jusqu'en janvier 2016.

12. Liste des personnes rencontrées

<i>Nom</i>	<i>Prénom</i>	<i>Organisme</i>	<i>Fonction</i>	<i>Date de rencontre</i>
Administrations publiques				
En France				
PILLAN	Aline	DGAC	Sous-directeur développement durable	28/08 09/10
MOSCHETTI	Pierre	DGAC	Sous-directeur construction aéronautique	28/08 09/10
GILAD	Jonathan	DGAC	Adjoint à la sous-directrice du développement durable	28/08
AYOUN	Philippe	DGAC	Sous-directeur des études, es statistiques et de la prospective	07/09
HABIB	Myriam	Cabinet du Secrétaire d'État aux transports	Conseillère technique	08/09
GAUMERAIS	Anne-Laure	DGAC	Adjointe au sous-directeur construction aéronautique	08/09
LEMAIRE	Yves	DGEC	Chef de bureau des carburants	09/09
BELLEC	Gilles	Conseil général de l'économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies (CGE)	Membre permanent	15/09
COUDERC	Sébastien	Cabinet du ministère chargé de l'agriculture (MAAF)	Conseiller technique	17/09
MILLION	Aurélien	MAAF, direction générale de la performance économique et environnementale des entreprises	Chef de bureau	17/09
PESKINE	Hélène	Cabinet MEDDE	Conseillère transition énergétique, climat, écomobilité, bâtiment durable	21/09
POUET	Jean Christophe	ADEME	Division Biomasse	28/9 par téléphone
HILAIRET	Sylvain	Ministère de la défense / État-Major des Armées	Ingénieur militaire des essences	05/10

Nom	Prénom	Organisme	Fonction	Date de rencontre
GANDIL	Patrick	DGAC	Directeur général	09/10/15
MONNET	Sébastien	DGAC	Directeur de cabinet du directeur général	09/10
DELDUC	Paul	DGALN	Directeur général	12/10
BECKER	Jean-Jacques	CGDD	Sous-directeur mobilité et aménagement	13/10
VINDIMIAN	Eric	CGEDD	Coordonnateur du collège recherche	20/10
LEROUGE	Christophe	Ministère de l'économie Direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services	Chef du Service de l'industrie	27/10
RICO	Marc	Ministère Économie Direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services	Service de l'industrie, Chef du bureau Chimie et Biotechnologies	27/10
En Europe				
LUCIANI	Pascal	Représentation permanente de la France auprès de la commission européenne	Conseiller Transports	02/10
CHARRIER	Aude	Représentation permanente de la France auprès de la commission européenne	Conseillère pour l'environnement	02/10
WERMELINGER	Elea	Représentation permanente de la France auprès de la commission européenne	Conseillère adjointe Énergie	02/10
COLACO	Antonio	DG MOVE Commission européenne	Aviation Research Biofuel Jointgroup	02/10
FITCH	Keir	DG MOVE Commission européenne	Chef d'unité, Research and Innovative Transport Systems	02/10
VU DUC	Hoang	DG MOVE Commission européenne	Recherche et systèmes de transports innovants	02/10
DE FRUTOS	Vicente	DG MOVE Commission européenne	Policy officer Ciel unique européen	02/10

Nom	Prénom	Organisme	Fonction	Date de rencontre
SCEPONAVICIUTE	Rasa	DG CLIMA Commission européenne	Unité marchés carbone aviation	02/10
KUEPKER	Bernd	DG ÉNER Commission européenne	Sustainability, Renewables and Biofuels	02/10
DENOS	Rémy	DG ÉNER Commission européenne	Policy officer Energy technology	02/10
Entreprises de l'aéronautique, de la bio-économie et de l'énergie				
CHAUD	Bernard	Global Bio Energie	Vice-Président Stratégie industrielle	14/09
COUILLARD	Francis	SAFRAN	Directeur de la politique environnementale	22/09
JEULAND	Nicolas	SAFRAN	Expert carburants futurs	22/09
MARCHAND	Philippe	TOTAL	Directeur biotechnologies, Direction Energies nouvelles	01/10
DABAS	Vincent	TOTAL	Direction Raffinage-Chimie Prospective et Nouvelles Technologies	01/10
WACHENHEIM	Michel	AIRBUS	Conseiller Affaires publiques	05/10
COSTES	Bruno	AIRBUS	Directeur environnement	05/10
EYCHENNE	Frédéric	AIRBUS	Responsable nouvelles énergies	05/10
REMY	Sébastien	AIRBUS	Head of innovations	05/10
LOMBAËRT VALOT	Isabelle	AIRBUS	Research team leader Alternative Fuels & Fuel Systems	05/10
HA MINH TU	Cécile	AIRBUS	Directrice des affaires institutionnelles	05/10
ROUS	Jean-François	AVRIL	Directeur Recherche et Innovation	06/10
LEMAIRE	Raphaël	AVRIL	Ingénieur génie des procédés, Direction innovation	06/10
BANDET	Pierre Olivier	AIR FRANCE	DGA, cabinet Présidence & affaires publiques	09/10
SIMMENAUER	Nathalie	AIR FRANCE	Directrice environnement & développement durable	09/10

Nom	Prénom	Organisme	Fonction	Date de rencontre
DUCHAMPS	Hervé	AIR FRANCE	Responsable énergies nouvelles	09/10
FRAISSINET	Cyril	SUEZ ENVIRONNEMENT	DGA Recyclage et valorisation des déchets, Opérations stratégiques	13/10
MARTEL	Frédéric	Procéthol 2G-FuturoI	Directeur Général	04/11 par téléphone
Organismes de recherche				
NOVELLI	Philippe	ONERA	Chef de projet	16/09
JARRY	Bruno	Académie des Technologies	Président de la Commission des biotechnologies	21/09
KUENTZMANN	Paul	ONERA Académie Air et Espace	Haut conseiller honoraire	21/09
BARTHELEMY	Pascal	IFPEN	Directeur général adjoint	13/10
ALAZARD-TOUX	Nathalie	IFPEN	Directeur économie et veille	13/10
POROT	Pierre	IFPEN	Directeur adjoint Centre de résultats procédés	13/10
COLONNA	Paul	INRA	Directeur général adjoint pour l'alimentation et la bioéconomie	27/10
PUSSIEUX	Thierry	CEA	Chef du projet Syndièse	05/11 par téléphone
Associations professionnelles				
GILL	Michael	IATA	Directeur environnement	17/09 par téléphone
ROETGER	Thomas	IATA	Manager Alternative fuels	17/09 par téléphone
LIGNET	Corinne	GIFAS	Directeur adjoint des affaires R&D, Espace et environnement	29/9
GODSON	Jon	IATA	Assistant Director Environment	29/09
BONDIOU-CLERGERIE	Anne	GIFAS	Directrice, Affaires R&D & Environnement	19/10
TARDIEU	Guy	FNAM	Délégué Général	21/10

Nom	Prénom	Organisme	Fonction	Date de rencontre
FOUCHET	Frédéric	FNAM	Délégué Général Adjoint	21/10
DEMOURES	Sylvain	SNPAA Syndicat national des producteurs d'alcool agricole	Délégué Général	28/10
FUZELIER	Sabrina	Syndicat des énergies renouvelables	Directrice Bioénergies	02/11 par téléphone
Associations environnementales, représentation de la société civile et autres				
PIRIS-CABEZAS	Pedro	EDF- Environmental Defense Fund	membre « alternative fuel task force CAEP – OACI	18/09
AMANT	Stéphane	Carbone 4	Senior Manager	08/10 par téléphone
WALTHER THOSS	Jenny	WWF Allemagne	Bioenergy and Biofuels	13/10 par téléphone
BAS-DEFOSSEZ	Justine	European Environmental Bureau	Senior Policy Officer	15/10 par téléphone
GUERIN	André-Jean	Conseil Économique, Social et Environnemental	Conseiller	16/10

13. Glossaire des sigles et acronymes

<i>Acronyme</i>	<i>Signification</i>
ACV	Analyse du cycle de vie
AFTF	Alternative Fuels Task Force – groupe de travail du CAEP relatif aux carburants alternatifs
ASTM	American Society of Testing and Materials
ACARE	Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe
AtJ	Alcohol to Jet
ATAG	Air Transport Action Group
BtL	Biomass to Liquid
BRICS	Brésil, Russie, Inde, Chine et Afrique du sud
CAAFI	Commercial Aviation Alternative Fuel Initiative
CAEP	Committee on Aviation Environmental Protection
CASI ou ILUC	Changement indirect d'affectation des sols (ILUC)
CCR	Centre commun de recherches (UE)
CGDD	Commissariat général au développement durable (MEDDE)
CGE	Conseil général de l'économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies
CORAC	Conseil d'orientation pour la recherche aéronautique civile
CtL	Coal to Liquid
DGAC	Direction générale de l'aviation civile (MEDDE)
DGALN	Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature (MEDDE)
DGEC	Direction générale de l'énergie et du climat (MEDDE)
DGPE	Direction générale de la performance économique et environnementale des entreprises (MAAF)
DSHC	Direct Sugar to HydroCarbons
EMHV	Ester méthylique d'huile végétale
EU-ETS	European Union - Emissions Trading System
FNAM	Fédération nationale de l'aviation marchande
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe intergouvernemental d'étude du climat
GIFAS	Groupement des industries françaises aéronautiques et spatiales
GtL	Gas to Liquid
FMI	Fonds monétaire international

Acronyme	Signification
FT	Fischer-Tropsch
HEFA	Hydroprocessed (ou Hydrotreated) Esters and Fatty Acids
IATA	International Aviation Transport Association
ICAO	International civil aviation organisation (OACI)
IPCC	International Panel on Climate Change (GIEC)
ITAKA	Initiative Towards sustainable Kerosene for Aviation
JRC	Joint Research Center (CCR)
LTECV	Loi relative à la transition énergétique et pour la croissance verte
MAAF	Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt
MBM	Market Based Measures – Mesures économiques de marché
MEDDE	Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie
OACI	Organisation de l'aviation civile internationale
OEM	Original Equipment Manufacturer
ONERA	Office national d'études et de recherches aérospatiales
ONU	Organisation des Nations-unies
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
RED	Renewable Energy Directive – Directive (UE) relative aux énergies renouvelables
REDD	Réduction des émissions liées à la déforestation et à la dégradation des forêts
RFS2	Renewable Fuel Standard 2
RSB	Roundtable on Sustainable Biomaterials
StA	Sugars to Alkanes
SPK	Synthetic Paraffinic Kerosene
SWAFEA	Sustainable Way for Alternative Fuels and Energy for Aviation (projet UE)
TGAP	Taxe générale sur les activités polluantes