

INSTITUT
MONTAIGNE



Aviation décarbonée : embarquement immédiat



RAPPORT JANVIER 2022

INSTITUT
MONTAIGNE



Think tank indépendant créé en 2000, l'Institut Montaigne est une plateforme de réflexion, de propositions et d'expérimentations consacrée aux politiques publiques en France et en Europe. À travers ses publications et les événements qu'il organise, il souhaite jouer pleinement son rôle d'acteur du débat démocratique avec une approche transpartisane. Ses travaux sont le fruit d'une méthode d'analyse et de recherche rigoureuse et critique, ouverte sur les comparaisons internationales. Association à but non lucratif, l'Institut Montaigne réunit des chefs d'entreprise, des hauts fonctionnaires, des universitaires et des personnalités issues d'horizons divers. Ses financements sont exclusivement privés, aucune contribution n'excédant 1,5 % d'un budget annuel de 6,5 millions d'euros.

Aviation décarbonée : embarquement immédiat

RAPPORT – JANVIER 2022

TABLE DES MATIÈRES

Table des recommandations	8
--	----------

Glossaire	12
------------------------	-----------

I – Le secteur aérien, actif essentiel de souveraineté, mis sous tension par la crise sanitaire	14
--	-----------

1. Le transport aérien est une filière essentielle pour la souveraineté stratégique de l'Europe, la mobilité des personnes et, plus largement, le développement économique et humain	14
---	----

2. Le trafic aérien domestique et international a été fortement impacté par la crise de la Covid-19, mettant sous pression la filière et sa portée stratégique, laquelle doit être soutenue	17
--	----

3. Les prévisions de trafic ont été revues à la baisse à l'horizon 2050	22
--	----

II – Les acteurs du secteur ont dessiné une trajectoire de décarbonation ambitieuse	25
--	-----------

1. Malgré une croissance régulière du trafic aérien depuis 1990 (~5% par an), le niveau d'émissions de CO ₂ du secteur a été contenu grâce à l'amélioration des appareils	25
---	----

2. Les exigences environnementales croissantes en matière de transport aérien incitent les principaux acteurs à s'engager dans une feuille de route ambitieuse visant à atteindre la neutralité carbone d'ici à 2050	30
---	----

*Il n'est désir plus naturel
que le désir de connaissance*

3. La question de l'impact environnemental dépasse le seul enjeu des émissions de CO ₂	31	Conclusion	156
III – Des leviers de décarbonation existent, et doivent tous être activés pour permettre à la filière de l'aérien d'engager sa transition	37	Annexe : aperçu de différentes études consacrées à ce thème	158
1. La mise en œuvre d'innovations technologiques de rupture est incontournable pour réduire la consommation des appareils	41	Remerciements	161
2. Le renouvellement des appareils est un levier de court terme, facilement activable, qui permet de bénéficier rapidement des évolutions technologiques	61	Table des principales sources	166
3. Les leviers d'optimisation de la consommation en vol et au sol doivent être activés à court et moyen-terme	67		
4. Le recours aux carburants d'aviation durables en grandes quantités est nécessaire pour atteindre l'objectif de décarbonation et contribue pour plus de 50 % à sa réalisation	91		
5. Les systèmes de compensation en place doivent être étendus et amplifiés	127		
IV – La décarbonation du transport aérien s'inscrit dans une transition énergétique plus globale qui implique une massification de la production d'électricité décarbonée pour remplacer les énergies fossiles	134		
1. Les besoins énergétiques doivent être regardés sur l'ensemble des moyens de transport	134		
2. Les carburants de synthèse ont une place incontournable pour réussir la décarbonation	138		
3. Les besoins énergétiques associés à la décarbonation sont très importants et nécessitent des investissements sans précédent	143		

TABLE DES RECOMMANDATIONS

RECOMMANDATION n° 1 (Monde)

Accélérer le développement des technologies de rupture en complément d'une accélération de la baisse de consommation incrémentale des appareils.

- a. Accélérer les évolutions incrémentales de réduction de la consommation ;
- b. Maintenir la dynamique d'investissement sur les technologies de rupture, en particulier sur : les nouvelles formes d'appareils, les nouvelles motorisations (y.c. électrification), l'avion fonctionnant à l'hydrogène ;
- c. Préparer le modèle de certification des innovations de rupture ;
- d. Mettre en place des mécanismes pour assurer la compétitivité coût des appareils moins émetteurs (financement de nouvelles infrastructures, compensation du surcoût associé aux nouveaux appareils, etc.).

RECOMMANDATION n° 2 (France/UE/Monde)

Faciliter le financement du renouvellement des appareils anciens par des appareils plus récents et moins émetteurs dans le cadre de la taxonomie et/ou via des mécanismes de suramortissement.

RECOMMANDATION n° 3 (France/UE/Monde)

Mettre en place les leviers de réduction de la consommation liés à l'opération des appareils.

- En vol : accélérer la mise en place du ciel unique européen et la digitalisation du contrôle aérien, l'utilisation de localisations satellites pour les vols transatlantiques, développer les configurations de vol permettant de récupérer l'énergie de sillage...
- Au sol : limiter l'utilisation des APU lorsque les appareils sont connectés au terminal, optimiser le roulage au sol et le remorquage lorsque cela est pertinent...

RECOMMANDATION n° 4 (France/UE/Monde)

Favoriser l'intermodalité pour les débuts/fins de parcours, en particulier en assurant des liaisons entre les principales gares ferroviaires et aéroports pour faciliter la transition et en mettant en place des parcours passagers intégrés.

RECOMMANDATION n° 5

Clarifier la définition des SAF et veiller à leur utilisation pour atteindre l'objectif de réduction des émissions.

- a. **(Monde)** Mettre en place des critères de durabilité des SAF partagés par tous les pays, définis par l'OACI, tant en ce qui concerne le type de matière première utilisée que le niveau de réduction des émissions sur le cycle de vie du carburant.
- b. **(France/UE)** Intégrer l'hydrogène dans la définition des SAF afin de permettre le développement de toutes les filières contribuant à la décarbonation du transport aérien.
- c. **(UE/Monde)** Développer l'obligation d'incorporation de SAF sur l'ensemble des géographies, sur le modèle de ce qui a été initié en Europe avec Refuel EU ; en Europe, faire évoluer la cible à 2050 au-delà des 63 % prévus par Refuel EU Aviation en fonction du rythme d'activation et de l'intensité des différents leviers de décarbonation.

RECOMMANDATION n° 6

Soutenir l'offre pour créer un marché des SAF compétitif en Europe.

- a. **(France/UE)** Financer des projets de démonstrateurs sur différentes technologies, dont les biocarburants et les carburants de synthèse, en utilisant notamment les fonds de l'EU-ETS.
- b. **(France/UE)** Pour initier le développement de la filière en Europe et sécuriser le lancement des premières unités de production, mettre en place des Appels à Projets (prix garanti) et assurer la compétitivité des SAF produits en Europe pendant les premières années (subvention).
- c. **(UE)** Adapter dynamiquement la trajectoire d'incorporation des SAF définie dans le cadre de Refuel EU Aviation, afin d'éviter les effets de pallier et

d'être cohérent avec l'environnement industriel ; à cet égard, une augmentation de l'ambition à l'horizon 2030 pourrait être envisagée.

- d. (UE)** Pour maximiser les volumes de production, mettre en place des incitations (ex : crédits d'impôts) pour compenser le surcoût entre les SAF et le kérosène pour les injections au-delà des obligations d'incorporation.

RECOMMANDATION n° 7 (UE/Monde)

Limiter les distorsions de concurrence entre hubs/compagnies aériennes.

- a.** À court-terme, mettre en place un mécanisme européen de compensation s'appliquant à tous les trajets au départ de l'UE et proportionnel à la distance parcourue par chaque passager pour subventionner l'incorporation de SAF sans surcoût par rapport au kérosène, afin d'éviter les distorsions de concurrence et les risques de fuite de carbone au profit de parcours hors UE non soumis aux mêmes obligations d'incorporation de SAF.
- b.** À moyen-terme, permettre des vitesses différentes de mise en œuvre des obligations d'incorporation de SAF entre les géographies/pays sans distorsion de concurrence entre les hubs/compagnies aériennes ; adosser l'obligation d'incorporation de SAF au point d'origine de chaque passager et sur l'ensemble de son parcours.
- c.** À long terme, mettre en place des obligations d'incorporation de SAF uniformes au niveau de l'OACI.

RECOMMANDATION n° 8 (France/UE)

Promouvoir le carburant de synthèse pour dynamiser la mise en place d'une filière de production d'hydrogène de grande échelle :

- Le carburant de synthèse ouvre un débouché de grand volume à court terme pour la production d'hydrogène et permet la mise en place de moyens de production à grande échelle indispensables pour en faire baisser les coûts ;
- Le carburant de synthèse permet de s'affranchir des problématiques de transport et de stockage de l'hydrogène en l'absence d'infrastructures dédiées ;
- Le procédé de fabrication du carburant de synthèse permet de s'affranchir

de l'enjeu de disponibilité des matières premières car il n'utilise que de l'air, de l'eau et de l'électricité ;

- Les investissements réalisés pourront ensuite être utilisés pour la distribution d'hydrogène aux aéroports lors de la mise en service des avions à hydrogène ;
- La production de carburant de synthèse permet également le développement des technologies de captage du CO₂.

RECOMMANDATION n° 9 (UE)

À court-terme, mettre en place un mécanisme pour limiter la distorsion de concurrence liée au trafic de correspondance entre l'Europe et le reste du monde soumis à l'EU-ETS, par exemple en maintenant une fraction des quotas gratuits pour assurer une concurrence équilibrée avec les vols soumis au système CORSIA.

RECOMMANDATION n° 10 (Monde)

Renforcer les systèmes de quotas carbone existants et développer de nouveaux mécanismes pour étendre leur couverture aux émissions du trafic aérien non couvertes à ce jour :

- a.** Encourager la mise en place de mécanismes de marché type ETS pour les émissions domestiques dans les pays et régions autres que l'Europe ;
- b.** À moyen-terme, assurer l'alignement des systèmes de quotas carbone entre eux et avec l'objectif « Net Zéro » de l'industrie.

RECOMMANDATION n° 11 (Monde)

Mettre en place une politique d'investissement massive dans les énergies décarbonées, au-delà du remplacement des modes de production actuellement utilisés, pour répondre aux nouveaux besoins des acteurs du transport à l'horizon 2050.

GLOSSAIRE

- **ACI** – *Airports Council International*
- **ADEME** – Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
- **AIE** – Agence Internationale de l'Energie (IEA en anglais)
- **ASD** – *AeroSpace & Defence Industries Association of Europe*
- **ATAG** – *Air Transport Action Group*
- **ATM** – *Air Traffic Management* (gestion du trafic aérien)
- **A4E** – *Airlines For Europe*
- **BPI** – Banque Publique d'Investissement
- **CANSO** – *Civil Air Navigation Services Organisation*
- **CDO** – descente continue
- **CII** – Crédit d'Impôt Innovation
- **CIR** – Crédit d'Impôt Recherche
- **COP** – Conférences des Parties
- **CORAC** – Conseil pour la Recherche Aéronautique Civile
- **CORSIA** – *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*
- **EASA** – *European Union Aviation Safety Agency* (Agence européenne de la sécurité aérienne)
- **EEA** – *European Economic Area* (= EEE – Espace économique européen)
- **ERA** – *European Regions Airline Association*
- **EREA** – *European Research Establishments in Aeronautics*
- **EU-ETS** – *European Union Emission Trading Scheme* (Système d'Échange de Quotas d'Emission de l'UE = SEQE-EU)
- **FAB** – *Functional Airspace Block* (blocs d'espaces aériens fonctionnel)
- **FABEC** – Bloc d'espace aérien d'Europe Centrale
- **FEGP** – *Fixed Electrical Ground Power* (Alimentation électrique fixe au sol)
- **GIFAS** – Groupement des Industries Français Aéronautiques et Spatiales
- **GPU** – *Ground Power Unit* (Unité de puissance au sol)
- **HEFA** – *Hydroprocessed Esters and Fatty Acids* (Filière de transformation des huiles)
- **HEP** – *Hybrid Electric Propulsion* (propulsion électrique hybride)
- **IAEA** – *International Atomic Energy Agency* (Agence Internationale de l'Energie Atomique)
- **IATA** – *International Air Transport Association*
- **ICCT** – *International Council on Clean Transportation*
- **IRENA** – *International Renewable Energy Agency* (Agence Internationale pour les énergies renouvelables)
- **OACI** – Organisation de l'Aviation Civile Internationale
- **PAC** – Pile à Combustible
- **PNB / RNP** (*navigation plus précise*) – *Performance Based Navigation* (Navigation Basée sur la Performance) / *Required Navigation Performance* (Navigation avec Performance Requisite)
- **Projet NextGen** – *Next Generation Air Transportation System* (Système de transport aérien de nouvelle génération)
- **PCA** – *Pre-Conditioned Air unit* (Unité d'air préconditionné)
- **PSNA** – Prestataires de Service de Navigation Aérienne
- **PtL** – *Power to Liquid*
- **RISE** – *Revolutionary Innovation for Sustainable Engines*
- **RPK** – *Revenue Passenger Kilometer* (Passager-kilomètre payant)
- **SAF** – *Sustainable Aviation Fuel* (carburants durables d'aviation)
- **SEQE-UE** – Système d'Échange de Quotas d'Emission de l'Union Européenne
- **SESAR** – *Single European Sky Air Traffic Management* (ciel unique européen)
- **SETI** – *Single Engine Taxi In* (procédure à l'arrivée)
- **SETO** – *Single Engine Taxi Out* (procédure au décollage)
- **TRL** – *Technology Readiness Level* (niveau de maturité d'une technologie)
- **VTOL** – *Vertical Take-Off and Landing* (avion à décollage et atterrissage verticaux)
- **WEF** – *World Economic Forum*

LE SECTEUR AÉRIEN, ACTIF ESSENTIEL DE SOUVERAINETÉ, MIS SOUS TENSION PAR LA CRISE SANITAIRE

1. Le transport aérien est une filière essentielle pour la souveraineté stratégique de l'Europe, la mobilité des personnes et, plus largement, le développement économique et humain

La première caractéristique du transport aérien, si on le compare aux autres modes de mobilité, est de ne pas être substituable par des modes de transport alternatifs sur les longues et très longues distances. Son développement a en effet permis de relier en moins d'une journée n'importe quels points du globe, là où le même trajet aurait pris plusieurs jours voire semaines au début du 20^e siècle. En ce sens, le développement du transport aérien a révolutionné le modèle de mobilité des sociétés occidentales et a été l'un des éléments permettant l'important mouvement de globalisation qui a caractérisé la seconde moitié du 20^e siècle. Au-delà des liaisons intercontinentales, il existe un certain nombre de géographies – notamment insulaires – pour lesquelles les liaisons aériennes constituent aujourd'hui un besoin quasi-vital.

À titre d'exemple, l'Indonésie, qui a un territoire très insulaire, transporte chaque année un nombre de passagers (en vols intérieurs) équivalent à 15 % de sa population.

Il n'est pas inutile de rappeler que le transport aérien n'est pas utilisé uniquement pour les voyages d'affaires. Les déplacements d'ordre familial constituent en effet une part importante des vols (environ 20 % avant la crise). Dans le cas français et au-delà des usages touristiques, le transport aérien est indispensable au maintien d'un lien de proximité avec les 2,5 millions de Français vivant à l'étranger, et avec les 2,7 millions de Français vivant dans les territoires et départements d'outre-mer.

Le transport aérien occupe donc une place essentielle dans le modèle de mobilité des sociétés modernes, et plus globalement dans le fonctionnement de nos sociétés et de leurs économies. Il joue un rôle de catalyseur et d'accélérateur à la fois pour la connectivité, l'innovation et la productivité. L'ATAG¹ indique en effet qu'une augmentation de 10 % du trafic aérien impliquerait une croissance du PIB par habitant sur le long terme de 0,5 %.

L'un des secteurs économiques où l'apport du transport aérien est le plus important est celui du tourisme. Il représente plusieurs centaines de millions d'emplois dans le monde et environ 10 % du PIB mondial. Le niveau et la croissance du secteur touristique dépendent directement de la capacité des personnes à voyager, et plus particulièrement à prendre l'avion. En effet, selon l'ATAG la majorité (58 %) des touristes en transit international utilisent l'avion pour se déplacer. Toujours selon l'ATAG, l'aéronautique permet de soutenir environ 44,8 millions d'emplois touristiques dans le monde, ce qui correspond à une contribution d'environ 1 000 milliards de dollars au PIB mondial.

¹ *Air Transport Action Group* : coalition d'organisations et d'entreprises du secteur du transport aérien, qui compte quelques 40 membres dont les principaux avionneurs (Airbus ; Boeing ; Comac), les motoristes (GE ; Pratt & Whitney ; Rolls-Royce ; Safran) et les représentants des compagnies aériennes. L'ATAG a notamment pour but de réfléchir aux questions de durabilité du secteur.

En outre, l'importance du fret aéronautique ne doit pas être négligée : s'il ne représente que 1 % du volume global du fret au niveau mondial, il représente 35 % de celui-ci en valeur, dans des secteurs stratégiques comme l'industrie pharmaceutique par exemple.

La filière aéronautique est l'une des plus importantes en Europe. Selon l'ATAG, le secteur employait en 2018 directement environ 2,7 millions de personnes en Europe, dont la majorité sont des emplois dans les aéroports. À ces emplois directs doivent être ajoutés les emplois indirects et induits, ainsi que les emplois du secteur du tourisme pour lesquels le transport aérien est largement nécessaire : globalement, l'apport du transport aérien représentait en 2018 au niveau européen 13,5 millions d'emplois pour 991 Mds\$ de contribution au PIB.

En France, la filière aéronautique constitue l'une des principales filières industrielles. Le GIFAS estime à 194 000 le nombre de personnes travaillant dans les entreprises adhérentes (principalement en Ile-de-France et dans le Sud-Ouest). Outre les entreprises adhérentes du GIFAS, on estime à 350 000 le nombre d'emplois industriels directs de la filière aéronautique en France². La France dispose ainsi d'un nombre important d'acteurs et le secteur aéronautique est l'un des principaux secteurs industriels en France, avec environ 74 Md€ de chiffre d'affaires en 2019 dont deux-tiers à l'exportation, ce qui fait de l'industrie aéronautique l'un des principaux contributeurs à la balance commerciale française.

À ces emplois industriels directs doivent également être ajoutés les emplois directs non-industriels, indirects et induits ainsi que ceux du tourisme, qui est un secteur particulièrement important en France. En prenant en compte les données de l'ATAG, on peut estimer que l'impact positif du transport aérien en France représente plusieurs millions d'emplois et plusieurs centaines de milliards d'euros.

² Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales (GIFAS), site internet (Observatoire/ Emploi & Formation).

En outre, un des mouvements les plus spectaculaires de la seconde moitié du 20^e siècle est la forte démocratisation du transport aérien, permise grâce à la baisse importante du prix des billets : ceux-ci ont été divisés par 7 depuis 1950 et par 2 depuis 1980. En 2019, 4,5 milliards de passagers ont ainsi été transportés (dont 58,4 % de passagers domestiques). Comme indiqué, la forte baisse du prix des billets a permis de largement démocratiser l'usage de l'avion : la grande majorité des habitants des pays développés ont pris l'avion au moins une fois dans leur vie, et près de la moitié ont pris l'avion dans les 12 derniers mois (données américaines et britanniques). Enfin, il est utile de noter que la baisse du coût du transport aérien a été mise en œuvre alors que l'industrie supporte le coût de ses infrastructures, contrairement à la plupart des autres types de transport.

2. Le trafic aérien domestique et international a été fortement impacté par la crise de la Covid-19, mettant sous pression la filière et sa portée stratégique, laquelle doit être soutenue

La crise sanitaire a particulièrement touché le secteur aérien. Les premières conséquences ont été vues dès la mise en place des diverses mesures de distanciation et de prévention de l'épidémie, et en particulier des confinements à travers le monde. Au mois d'avril 2020, plus de 64 % de la flotte mondiale a été clouée au sol, et le trafic a été réduit de 94,4 % en comparaison avec le mois d'avril 2019. Sur l'année, le nombre de passagers-kilomètres a baissé de 64,5 %.

Les premiers acteurs touchés par la baisse du trafic ont été les aéroports et les compagnies aériennes : ces dernières ont subi de lourdes pertes en 2020, estimées à 137,7 Mds\$ par IATA (à comparer à un bénéfice annuel moyen d'environ 30 Mds\$ pré-crise sanitaire). Les conséquences de la crise ont toutefois été amorties grâce à un fort soutien public. IATA estime qu'entre début 2020 et août 2021, ce sont 243 Mds\$ qui ont été octroyés aux compagnies par les États afin de renforcer leur niveau de liquidité. Ces aides ont

notamment permis de limiter le nombre de faillites de compagnies, qui a été du même ordre de grandeur en 2020 comparé à la période précédant la crise (~45 faillites par an). Les États ont utilisé des outils divers pour soutenir les compagnies (augmentation de capital, subvention, prêt, ...), dont certains devront faire l'objet d'un remboursement après la crise. Les compagnies ont en outre lourdement emprunté pour faire face à l'hémorragie de trésorerie qu'impliquait la baisse d'activité. En conséquence, leur dette a augmenté d'environ 50 %, passant de 430 Mds\$ en 2019 à 650 Mds\$ en 2021. De leur côté, les aéroports ont vu leur modèle économique largement remis en cause par la crise, dans la mesure où celui-ci est fortement dépendant du trafic aérien (redevances des compagnies, parkings, commerces, etc.).

En France, l'État a mis en place des dispositifs importants soutenant l'ensemble de l'économie dont la filière du transport aérien (prêt garanti par l'État, chômage partiel), mais également des mesures spécifiques (comme l'accélération des commandes militaires), et un soutien direct auprès d'Air France-KLM. Au total, ce sont de l'ordre de 20 Mds€ qui ont été mobilisés par l'État au profit de la filière, ce qui a notamment eu pour effet de limiter le nombre de faillites d'entreprises du secteur et de préserver les compétences. Parallèlement, le fond de modernisation et de diversification a mobilisé près d'un milliard d'euros et a permis de maintenir, en partie, la dynamique d'investissements.

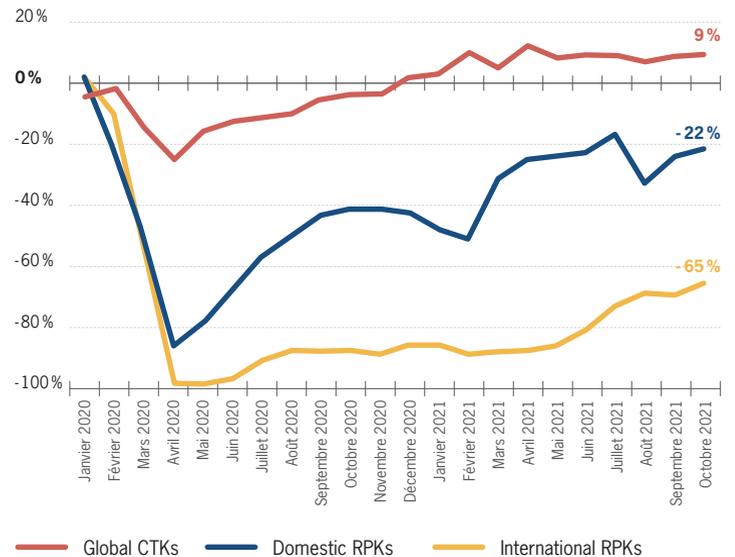
Globalement, la part d'activité économique liée au transport aérien mise à risque au niveau mondial par la crise sanitaire est estimée à 1 700 Mds\$ par l'ATAG. Plusieurs millions d'emplois ont été impactés dans le secteur (2,3 millions selon l'ATAG), représentant une baisse de 21 % par rapport à la situation pré-crise sanitaire. Les compagnies aériennes ont notamment initié des plans de réduction des effectifs et d'économies.

Du côté des industriels, la crise a également lourdement pesé en 2020 avec notamment une baisse de 55 % des livraisons d'avions par rapport à 2018 (également due à la crise du 737 MAX). Le volume des commandes a également été affecté, principalement sur les avions longs courriers.

En conséquence, les industriels ont largement baissé les cadences de production (d'environ 40 %), entraînant des conséquences importantes sur l'ensemble de la chaîne de sous-traitance de la filière.

Si le développement de la vaccination contre la covid-19 semble apporter une solution pour sortir de la crise, le retour à la normale n'est aujourd'hui pas total à la suite de l'apparition de nouveaux variants du virus, et à la mise en œuvre de nouvelles mesures restrictives par les gouvernements pour faire face aux nouvelles vagues. Cette situation mitigée est représentée dans le graphique ci-dessous publié par IATA :

Évolution du trafic aérien depuis début 2020
(Unité : passager kilomètre (RPK) ou tonne kilomètre cargo (CTK) pour le fret)



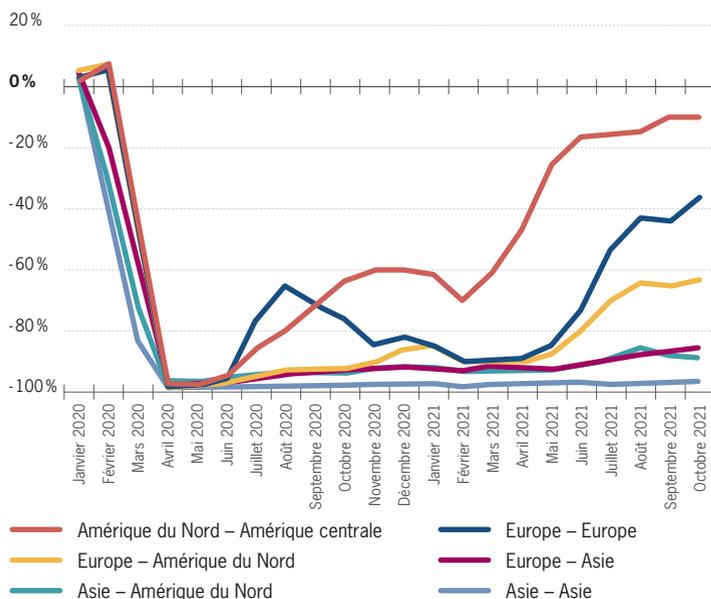
Source : IATA.

On y constate que (i) la crise sanitaire n'a quasiment pas eu de conséquences sur le volume de fret, (ii) le trafic domestique témoigne d'un rétablissement progressif mais partiel et était en octobre 2021 à un niveau inférieur de 22 % à celui de janvier 2020 et (iii) le transport international est toujours lourdement ralenti, à un niveau 65 % inférieur à celui de janvier 2020.

Il existe également une forte disparité des niveaux de reprise du trafic suivant la géographie considérée, comme le montre le graphique ci-dessous.

**Évolution du trafic aérien depuis début 2020
par type de liaison géographique**

(Unité : en passager kilomètre)



Source : IATA.

L'Asie semble être le continent continuant à être le plus touché par la baisse de trafic, alors que l'Europe et les États-Unis montrent des niveaux de trafic plus proches des niveaux observés avant la crise. Deux facteurs expliquent ces dynamiques : le premier est l'écart entre les mesures sanitaires mises en place entre les pays rendant complexe le flux de passagers, le second est la mise en place de politiques « zéro covid » dans plusieurs pays d'Asie rendant les déplacements particulièrement difficiles.

Enfin, les perspectives de reprise du trafic aérien sont également différentes suivant les types de voyages considérés. Si les voyages affinitaires (visites de proches) seront les premiers à reprendre, les déplacements professionnels sont plus à risque, avec notamment le développement du télétravail et les réductions budgétaires des entreprises.

Cette situation inégale se retrouve dans les résultats financiers des compagnies aériennes qui, si elles ne retrouvent pas les profits d'avant la crise sanitaire, ont globalement renoué avec la profitabilité au troisième trimestre 2021, pour la première fois depuis le dernier trimestre 2019, malgré la hausse globale des coûts liée à l'inflation et à l'augmentation des coûts du pétrole.

La portée de la crise, associée aux incertitudes sur la reprise du trafic sont donc des éléments de forte fragilisation pour la filière, et il est difficile d'évaluer l'ampleur que prendront les conséquences de la crise sur la filière à long terme. L'enjeu de décarbonation est par conséquent d'autant plus un défi, dans la mesure où il demandera – comme nous le verrons dans la suite de ce rapport – des investissements très importants.

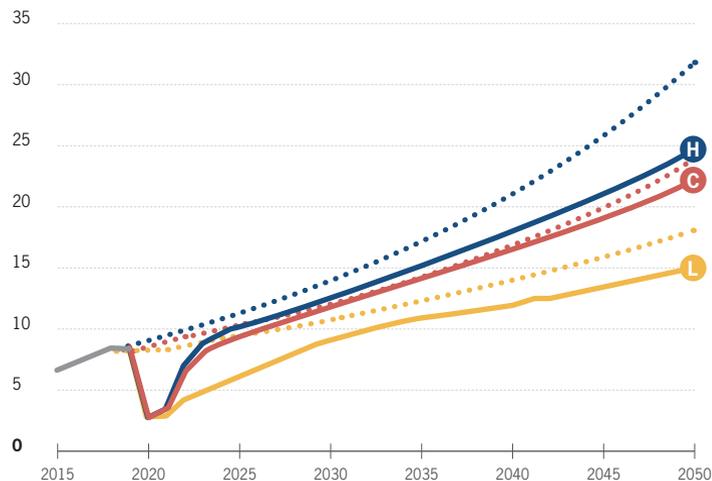
3. Les prévisions de trafic ont été revues à la baisse à l'horizon 2050

Dans cet univers incertain, l'exercice prospectif est particulièrement difficile. Au début de l'été 2020, un consensus se dégageait dans la filière pour prévoir un retour du trafic au niveau de 2019 dès 2023. À ce jour, cet objectif a été décalé d'un an et un retour à la situation pré-crise n'est pas attendu avant 2024.

À plus long terme, l'ATAG a révisé les perspectives de croissance du trafic aérien, sa prévision centrale de trafic utilisée pour le rapport Waypoint 2050 étant inférieure d'environ 8% en 2050 à ce qu'elle était dans un monde sans Covid. Cette prévision, qui comporte des marges d'incertitudes importantes est représentée dans le graphique ci-dessous, et prévoit une augmentation moyenne annuelle du trafic aérien de 3,1%, à comparer aux 5,3% de croissance par an depuis 1990. Cette prévision implique une baisse de 8% du niveau de trafic à horizon 2050 par rapport aux prévisions établies avant la crise sanitaire.

Scenarii ATAG de reprise du trafic aérien mondial

(Passagers-kilomètres payants (RPKS))



- H** Prévision de trafic waypoint 2050 : élevée
- C** Prévision de trafic waypoint 2050 : moyenne
- L** Prévision de trafic waypoint 2050 : basse
- Prévisions pre-covid-19
- Prévisions post-covid-19
- Historique

Note : réduction de 8% du trafic 2050 pour la prévision moyenne

Source : Waypoint 2050, p. 17.

La dynamique de reprise du trafic et de croissance à moyen terme du transport aérien mondial dépendra de plusieurs facteurs, encore incertains, dont (i) la date effective de sortie de la crise sanitaire, à laquelle le trafic aérien retrouvera son niveau d'avant la crise sanitaire, (ii) la situation économique

globale, et l'impact à long terme de la crise sanitaire sur la croissance du PIB des économies du monde entier, (iii) une possible réduction du trafic de loisirs en raison d'inquiétudes quant à la situation sanitaire des destinations et aux inconvénients potentiels des quarantaines et (iv) une réduction du trafic affaires / intra-entreprise à moyen terme, en raison des nouveaux modes de fonctionnement (réunion à distance, télétravail) et des réductions budgétaires.

II

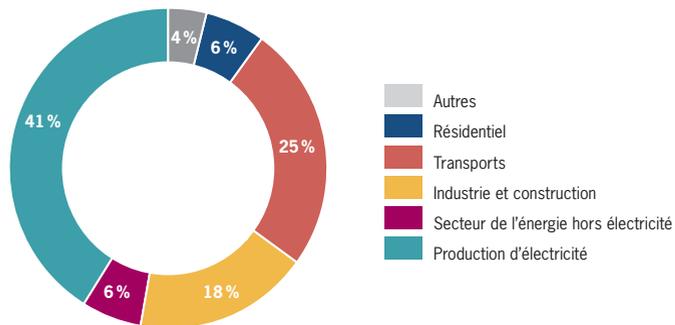
LES ACTEURS DU SECTEUR ONT DESSINÉ UNE TRAJECTOIRE DE DÉCARBONATION AMBITIEUSE

1. Malgré une croissance régulière du trafic aérien depuis 1990 (~5 % par an), le niveau d'émissions de CO₂ du secteur a été contenu grâce à l'amélioration des appareils

Il convient en premier lieu de mettre en perspective l'importance de l'enjeu de décarbonation du transport aérien en rappelant (i) la part des émissions du transport aérien dans l'ensemble des émissions mondiales et (ii) la trajectoire passée d'augmentation des émissions.

En 2019, d'après l'ATAG, le transport aérien a consommé 363 millions de litres de kérosène, qui ont produit 914 millions de tonnes de CO₂. Les émissions du secteur représentent ainsi 2 à 3 % du total des émissions mondiales, et 10 % des émissions du secteur des transports, un niveau inférieur à celui du transport maritime. Environ 80 % des émissions proviennent des vols assurant un trajet de plus de 1 500 km (moyen et long-courriers).

Part des émissions mondiales de CO₂ par secteur d'activité

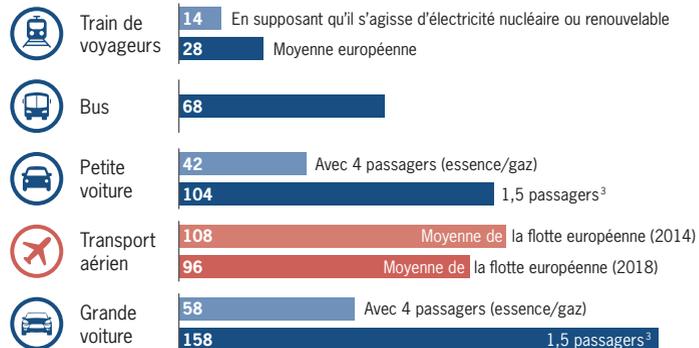


Note : l'aérien représente entre 2 % et 3 % des émissions mondiales de CO₂ et environ 10 % des émissions de CO₂ du secteur des transports

Source : Ministère de la transition écologique, Chiffres clés du climat, 2018.

Comparaison des émissions de CO₂ pour différents modes de transport

(Grammes de CO₂ par kilomètre-passager)



Source : Waypoint 2050.

Si on le compare aux autres modes de transport, il semble clair que le transport aérien est très efficace dans l'utilisation du combustible, et donc dans l'intensité carbone associée à la consommation de celui-ci : par passager-kilomètre, le transport aérien émet des quantités de CO₂ comparables au transport automobile. Cette comparaison a toutefois ses limites dans la mesure où chaque mode de transport répond à des besoins de mobilité qui peuvent être très différents.

Cette efficacité énergétique du transport aérien a été permise par un progrès continu dans les technologies aéronautiques. Les progrès dans la conception des appareils et des moteurs ont permis de baisser de 82 % la consommation de carburant par siège depuis 1960. Associés à l'amélioration des opérations

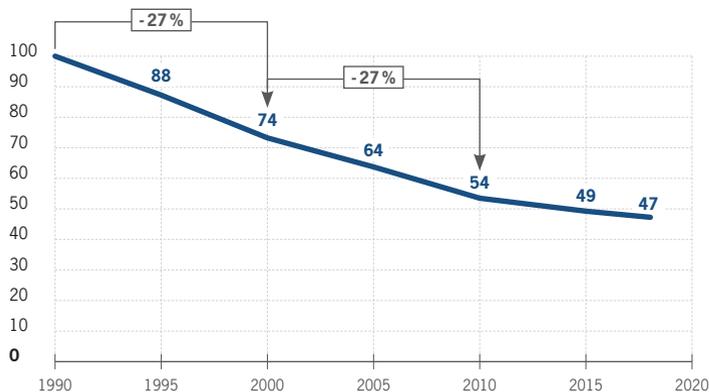
³ L'occupation moyenne des voitures est d'environ 1,5 passagers. Ces chiffres ne tiennent pas compte des émissions liées à la construction et à l'entretien des infrastructures, qui sont moins importantes pour l'aviation.

et des infrastructures, ces progrès continus ont permis de diviser par 2 les émissions de CO₂ par passager-kilomètre depuis 1990, et ont ainsi évité l'émission de 11 Gt de CO₂ depuis 1990.

S'il a principalement été dirigé par un objectif de baisse des coûts, et notamment du kérosène, ce travail continu de la filière a conduit à une maîtrise de son empreinte carbone, malgré une croissance importante du nombre de passagers transportés. Ainsi, l'aviation est aujourd'hui un moyen de transport très efficace, dont les émissions par passager kilomètre sont comparables à celles de la voiture individuelle.

Évolution de la performance énergétique de la flotte mondiale

(Unité : CO₂ / revenus Tonne-Kilomètre, base 100 en 1990)

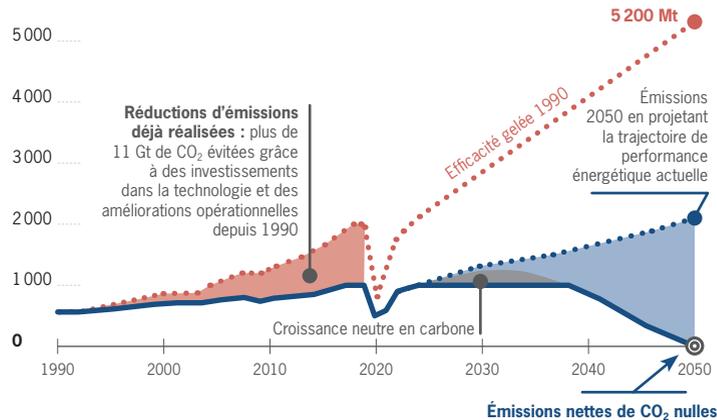


Source : IATA, fuel fact sheet, 2019.

Un constat particulièrement révélateur des efforts déjà faits par la filière dans la diminution de son impact environnemental est celui du découplage entre l'augmentation du nombre de passagers et celui des émissions. Depuis 1990, les émissions de CO₂ du secteur ont augmenté annuellement de 2,49%, alors que le trafic aérien a connu une croissance annuelle de 5,33%.

Trajectoires d'émissions de CO₂ du transport aérien mondial

(en millions de tonnes de CO₂)



Source : Waypoint 2050 p. 14.

L'enjeu pour la filière est donc de franchir une nouvelle étape dans ce découplage entre le volume de passagers transportés et les émissions de CO₂. En l'absence d'effort supplémentaire, il est en effet probable que le transport aérien continuerait à augmenter son volume d'émissions, en lien avec l'augmentation du trafic aérien.

2. Les exigences environnementales croissantes en matière de transport aérien incitent les principaux acteurs à s'engager dans une feuille de route ambitieuse visant à atteindre la neutralité carbone d'ici à 2050

La pression écologique sur le transport aérien s'est considérablement accélérée ces dernières années, la filière étant attaquée tant pour ses émissions que pour son image, et les évaluations des émissions de la filière par le grand public étant souvent largement surévaluées. Cette pression a des conséquences importantes sur l'image de la filière. À titre d'exemple, les enquêtes réalisées annuellement par l'ADEME indiquent que 51 % des Français affirment renoncer à prendre l'avion pour leurs loisirs, alors qu'ils étaient seulement 36 % en 2018.

Au-delà de ces mouvements au niveau individuel appelant à une accélération des efforts de l'industrie, les grands groupes font par ailleurs face à des obligations de mesures et de reporting climatiques de plus en plus contraignantes, et sont sous la pression à la fois des États et des investisseurs.

L'accélération de la réduction de l'impact environnemental de l'aéronautique représente un défi majeur pour la filière notamment dans la mesure où (i) le niveau de maturité élevé des technologies implique un coût élevé pour les innovations incrémentales futures, (ii) l'introduction d'une technologie de rupture nécessite également des investissements importants et (iii) les cycles d'investissement et de rentabilité de l'industrie s'étalent sur plusieurs dizaines d'années, ce qui implique un renouvellement limité des flottes.

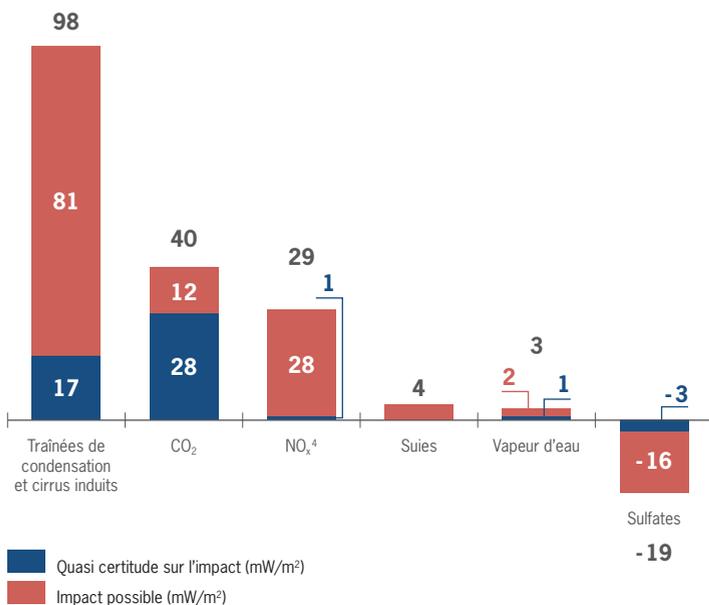
La filière s'est récemment engagée à atteindre une neutralité carbone à horizon 2050. Le présent rapport a pour but d'identifier et de passer en revue les leviers permettant d'atteindre cette cible. Par ailleurs, à titre individuel, certains acteurs ont pris des engagements dans le cadre de leur trajectoire carbone (AirFrance a indiqué viser une trajectoire en-deçà de 2°C dans le

cadre du modèle *Science-Based Targets*, et Airbus a annoncé le développement d'un avion à hydrogène d'ici 2035).

3. La question de l'impact environnemental dépasse le seul enjeu des émissions de CO₂

Il convient de noter que, bien que ce rapport se concentre sur la réduction des émissions de CO₂ du transport aérien, ce dernier produit également d'autres types de gaz à effet de serre comme les oxydes d'azote (NO_x). Si tous les gaz n'ont pas le même impact sur le climat, le CO₂ est le gaz à effet de serre le plus notable en raison de sa longue durée de vie (~100 ans), comparativement à d'autres gaz à effet de serre (ex : environ 1 journée pour les NO_x, ou 10 ans pour le méthane produit par l'agriculture).

Impact des produits de l'aviation en termes de forçage radiatif effectif

 (Unité : mW/m²)


Source : Atmospheric Environment, Volume 244, The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018⁵. Analyses Archery Strategy Consulting.

Lorsque les avions traversent certaines zones de l'atmosphère, ils laissent derrière eux des traînées de condensation. L'impact de ces traînées (et des cirrus brumeux qu'elles génèrent parfois) sur le changement climatique est encore très incertain. La recherche doit encore se poursuivre pour évaluer l'impact exact des traînées sur l'effet de serre. De la même manière, les autres gaz émis par l'aviation peuvent avoir un impact favorable ou défavorable sur l'effet de serre.

Au total, les impacts hors CO₂ sur le réchauffement climatique – sur lesquels pèse un niveau d'incertitude plus élevé à date – pourraient être plus importants que les impacts CO₂. Le fait de privilégier l'analyse des impacts CO₂ sur les impacts hors CO₂ présente toutefois un avantage méthodologique, du fait de la précision (i) des mesures des émissions de CO₂ et de leurs impacts et (ii) des prévisions d'émissions futures en fonction des leviers activés dans chaque scénario.

De plus, on peut considérer que certaines mesures mises en place pour traiter les émissions de CO₂ permettent d'avoir également un impact sur les émissions « hors CO₂ de l'aérien » (e.g. réduction de la consommation de carburants, optimisation des opérations en vol et au sol). À cet égard, les carburants alternatifs présentés plus loin dans ce rapport contiennent moins d'aromatiques que le carburant fossile (kérosène), ce qui permet de limiter notamment la formation de traînées de condensation. Il existe en outre d'autres mesures en cours d'étude à l'heure actuelle pour réduire les impacts hors CO₂, que nous n'étudions pas dans la présente étude. S'agissant des traînées, l'optimisation des plans de vol pour éviter les zones de formation (déviation de trajectoire horizontale et/ou verticale) est à l'étude. S'agissant des NO_x, des recherches sont en cours pour optimiser les niveaux de vol afin de limiter les émissions de NO_x.

Par ailleurs, il faut également noter que le réchauffement climatique, et les évolutions de température, d'humidité et de vent qu'il implique peut induire des rétroactions positives ou négatives sur l'ensemble des impacts environnementaux de l'aviation.

⁴ Impact des émissions de NO_x net, une partie étant consommée par réaction avec le méthane et la vapeur d'eau présents dans haute atmosphère.

⁵ Atmospheric Environment, Volume 244 (D.S. Lee, D.W. Fahey, A. Skowron, M.R. Allen, U. Burkhardt, Q. Chen, S.J. Doherty, S. Freeman, P.M. Forster, J. Fuglestedt, A. Gettelman, R.R. De Leon, L.L. Lim, M.T. Lund, R.J. Millar, B. Owen, J.E. Penner, G. Pitari, M.J. Prather, R. Sausen, L.J. Wilcox).

Enfin, certaines mesures ayant un impact positif sur un facteur environnemental donné peuvent également en dégrader un autre, ce qui implique une approche globale : même si cette étude se concentre sur les émissions de CO₂ du secteur pour une raison d'efficacité méthodologique, ce sont bien l'ensemble des externalités environnementales qui devront être prises en compte et atténuées, incluant les autres gaz à effet de serre mais également les impacts potentiellement négatifs sur la qualité de l'air, de l'eau ou sur la biodiversité. Cette analyse vaut également pour l'ensemble des modes de mobilités et de leurs infrastructures.

À titre d'exemple, la figure ci-dessous présente une analyse comparative des impacts associés à la création d'une nouvelle ligne ferroviaire (coût du projet : 14,3 milliards d'euros⁶) et à l'utilisation des moyens de transport existants – avion et voiture – pour relier Paris à Toulouse. Cette analyse montre l'importance de prendre en compte l'ensemble des conséquences environnementales pour chaque mode de transport, et peut être fortement modifiée en fonction du contexte géographique, démographique et économique d'un projet.

Comparaison de l'impact environnemental du transport ferroviaire (LGV) avec celui du transport aérien

Impact	Création LGV GPSO (Grand projet ferrovière du Sud-Ouest)	Avion	Voiture	
Émissions de CO ₂	Création infrastructures	-3 MteqCO ₂ 327 km de LGV, dont : • 222 km entre Bordeaux et Toulouse (mise en service en 2024) • 160 km entre Bordeaux et Dax (mise en service en 2027) • 55 km mutualisés	Préexistante sur les aéroports de Bordeaux et Toulouse	Préexistante Autoroute A10 (Paris-Bordeaux) Autoroute A62 (Bordeaux-Toulouse)
	Exploitation ligne voyageur	4 kg CO ₂ /voyageur (émissions Paris-Toulouse en TGV)	130 kg CO ₂ /voyageur (émissions Paris-Toulouse en avion)	40 kg CO ₂ /voyageur (émissions Paris-Toulouse en voiture)
Autres effets	Emprise au sol	• 4 830 hectares dont 1 230 ha de surfaces agricoles et 2 850 ha d'espaces sylvicoles (forêts) • Construction de 82 viaducs (représentant 20 km), 2 tunnels (4 km), 5 tranchées couvertes (1 820 m), 68 ponts « rail », 167 ponts « route »...	Préexistante sur les aéroports de Bordeaux et Toulouse	Préexistante Autoroutes A10 / A62
	Biodiversité	Important, faisant l'objet de mesures de compensation	Limité	Important
	Émissions sonores	Important (niveau modéré sur une longue distance)	Important (principalement aux abords des aéroports)	Important (niveau modéré sur une longue distance)

↓

La substitution d'une part du trafic aérien en trafic ferroviaire engendre un **gain d'environ 0,3 MteqCO₂ / an**, soit une **durée d'amortissement des émissions du chantier de -10 ans**

Source : rapport de la commission d'enquête préalable à la déclaration d'utilité publique du Grand Projet Ferrovière du Sud-Ouest⁷ ; Analyses Archery Strategy Consulting.

6 La Tribune, LGV Bordeaux-Toulouse : L'empreinte environnementale du GPSO scrutée à la loupe (novembre 2021).

7 Rapport de la commission d'enquête GPSO / LN (mars 2015).

Par ailleurs, ces analyses comparatives entre modes de transport doivent être effectuées de manière prospective. Il faut en effet plus de 15 ans pour développer une nouvelle ligne à grande vitesse qui va demander des investissements très importants et avoir un fort impact sur les sols et la biodiversité. Or à cet horizon (2035), des alternatives aériennes « zéro carbone » devraient être disponibles (ex : avion hydrogène), ce qui réinterroge l'arbitrage entre la création d'une nouvelle LGV et l'utilisation du transport aérien.

Enfin, les émissions induites par la filière (par exemple dans le secteur du tourisme dont on a vu qu'il était très dépendant économiquement du transport aérien) doivent faire l'objet d'actions spécifiques afin de diminuer leur impact environnemental.



DES LEVIERS DE DÉCARBONATION EXISTENT, ET DOIVENT TOUS ÊTRE ACTIVÉS POUR PERMETTRE À LA FILIÈRE DE L'AÉRIEN D'ENGAGER SA TRANSITION

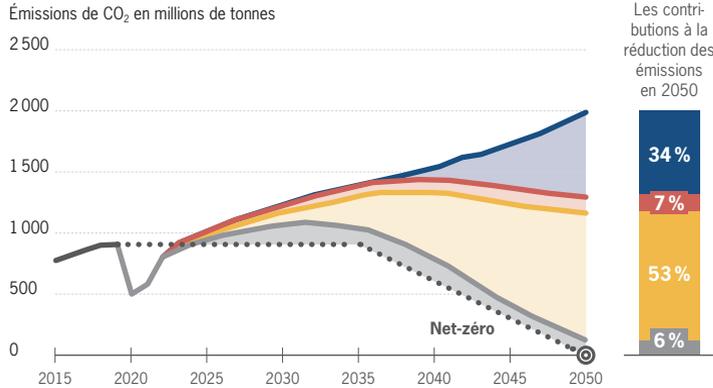
Afin de respecter son engagement d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, réitéré lors de la COP 26 en novembre 2021 à Glasgow⁸, le secteur aérien sous l'égide de l'ATAG a envisagé dans son étude *Waypoint 2050*⁹ plusieurs scénarios de décarbonation.

8 COP : la Conférences des Parties est une conférence internationale sur le climat qui réunit chaque année les pays signataires de la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC). L'édition 2015 (COP 21), organisée par la France, a adopté l'Accord de Paris qui engage tous les pays du monde à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre et à maintenir le réchauffement sous la barre des 2°C d'ici à 2100. Si des progrès significatifs ont été accomplis lors de l'édition 2021 (COP 26) organisée par le Royaume-Uni (ex : engagement mondial sur le méthane), des efforts supplémentaires seront nécessaires dans les années à venir pour respecter l'Accord de Paris (ex : sortie du charbon).

9 ATAG, *Waypoint 2050 – A vision of net-zero aviation by mid-century* (2^e édition, septembre 2021).

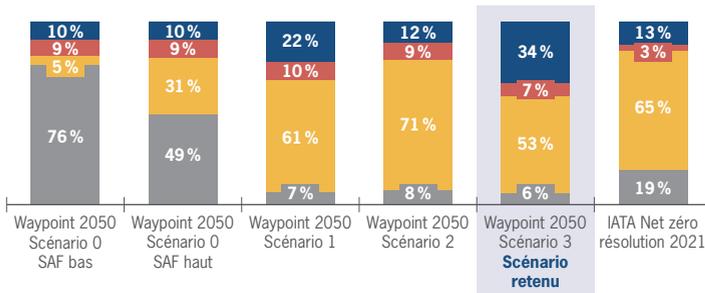
Scénarios de décarbonation de l'aérien au niveau mondial

Scénario 3 – Waypoint 2050



- T** Technologie
- O** Opérations et infrastructures (y compris les améliorations de l'efficacité du facteur de charge)
- F** Carburant d'aviation durable (SAF)
- M** Mécanismes de compensation et/ou capture de carbone

Autres scénarii envisagés



Source : ATAG, Waypoint 2050 p. 26 ; IATA¹⁰, Fly Net Zero p. 5 à p. 8. Analyses Archery Strategy Consulting.

Quatre principaux leviers d'amélioration sont identifiés pour atteindre les objectifs de décarbonation :

- Les développements technologiques (ex : aérodynamisme de l'avion, moteur) et leur intégration dans la flotte ;
- L'optimisation des opérations en vol et au sol (ex : trajectoire de vol, maintenance de l'appareil) ;
- L'utilisation de carburant durable d'aviation ou *Sustainable Aviation Fuel* – SAF (ex : biocarburant produit à partir de résidus forestiers ou de microalgues) ;
- Le recours aux mesures de compensation (ex : sylviculture, puits de carbone naturels, piégeage/stockage de CO₂).

Les différents scénarii se différencient par l'utilisation qu'ils font des différents leviers d'amélioration :

- Le scénario de base (scénario 0) est une poursuite des tendances actuelles en matière d'efficacité dans le domaine technologique sans accélération des améliorations ; quel que soit le niveau de pénétration des SAF envisagé (5% à 31%), l'atteinte de l'objectif de neutralité repose en majorité sur des mesures de capture de CO₂ ou de compensation des émissions de carbone (49% à 76%) ;
- Dans le scénario 1, les améliorations technologiques sont amplifiées avec l'intégration de technologies de rupture (22%), notamment avec la transition de la flotte vers des avions hybrides/électriques et des architectures innovantes à partir de 2035/40 ; l'objectif de neutralité carbone est atteint par l'utilisation de grandes quantités de SAF (61%) ;
- Dans le scénario 2, les améliorations technologiques intègrent de nouvelles configurations d'aéronefs mais pas de passage significatif à la motorisation électrique ou hybride ; l'objectif de neutralité carbone est de nouveau atteint par l'utilisation de SAF en quantité très importante (71%) ;
- Dans le scénario 3, les développements technologiques sont plus marqués (34%), avec des avions électriques jusqu'à 100 sièges (régional), des avions à émissions nulles (alimentés par de l'hydrogène décarboné¹¹) pour

11 On entend par hydrogène décarboné celui créé par des moyens de production renouvelables (ex : l'éolien) ou bas-carbone (ex : le nucléaire).

10 International Air Transport Association, Fly Net Zero – Airline commitment to Net Zero 2050 (octobre 2021).

le segment des 100-200 sièges (court et moyen-courrier), et des avions non conventionnels à propulsion hybride-électrique pour les avions de grande taille ; le poids des SAF reste majoritaire dans ce scénario pour atteindre la neutralité carbone (53 %).

Ce rapport intègre donc les conclusions de l'analyse détaillée Waypoint 2050 : il a été choisi de se focaliser sur le **scénario 3**. La trajectoire de décarbonation retenue repose donc sur le mix de leviers d'amélioration suivant :

- à ~34 % sur les développements technologiques ;
- à ~7 % sur l'optimisation des opérations en vol et au sol ;
- à ~53 % sur l'utilisation des carburants alternatifs (SAF) ;
- à ~6 % sur les mesures de compensation.

Ce scénario est le plus volontariste en termes de progrès technologique et est aligné avec les annonces récentes des constructeurs d'avions et de moteurs :

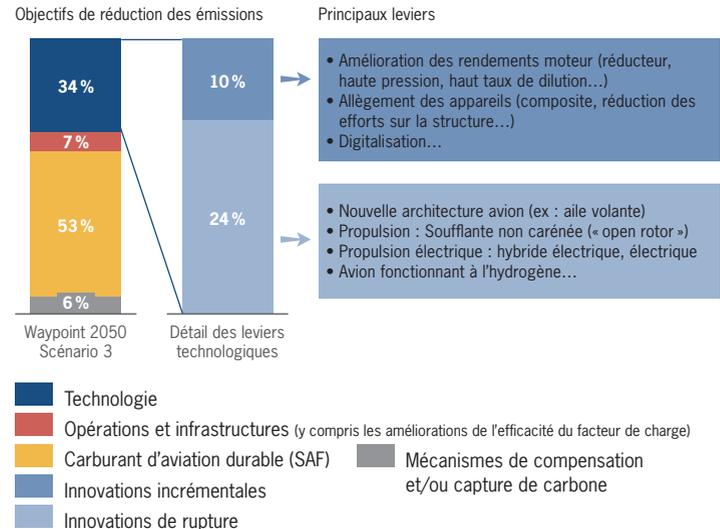
- Projet d'avion fonctionnant à l'hydrogène annoncé par Airbus pour une mise en service à l'horizon 2035 ;
- Démonstrateur RISE (Revolutionary Innovation for Sustainable Engines) annoncé par CFM International permettant un gain de consommation de 20 % par rapport à la génération de réacteurs LEAP présents sur les A320neo d'Airbus et 737 MAX de Boeing ; combiné à des évolutions sur les autres éléments des appareils, un gain de consommation de 30 % est envisageable pour les avions moyen-courrier ;
- Démonstrateur Ultrafan annoncé par Rolls-Royce avec un gain annoncé de 25 % de consommation en comparaison des moteurs Trent de première génération.

En outre, ce scénario apparaît comme le plus équilibré entre les 2 principaux leviers (développements technologiques et SAF) : il permet de prendre en compte, à l'horizon 2050, les limites inhérentes à la production des SAF : disponibilité limitée d'intrants économiquement exploitables pour les biocarburants, et génération importante d'électricité décarbonée pour la production de carburants de synthèse.

1. La mise en œuvre d'innovations technologiques de rupture est incontournable pour réduire la consommation des appareils

Le développement technologique regroupe **2 types d'évolutions : incrémentale et de rupture**. Elles se distinguent essentiellement par leur niveau de maturité technologique (TRL¹²) à date et la profondeur du changement par rapport à l'architecture historique des appareils.

Contribution de la technologie à l'objectif de réduction des émissions



Source : Waypoint 2050. Analyses Archery Strategy Consulting.

12 Le système de mesure TRL (Technology Readiness Level) est employé pour évaluer le niveau de maturité d'une technologie. L'échelle comporte 9 niveaux de maturité (de 1 – faible – à 9 – fort) : plus le niveau est haut (proche de 9), plus la technologie est mature pour être mise sur le marché.

1.1. Innovations incrémentales

RECOMMANDATION 1A (Monde)

Accélérer les évolutions incrémentales de réduction de la consommation.

Les évolutions incrémentales reposent sur des **architectures et technologies maîtrisées** qui contribueront à la réalisation des objectifs de réduction des émissions (~10% sur les ~34%) :

- Optimisation du **rendement moteur** (utilisation d'engrenages, moteurs fonctionnant à plus haute pression, installation de plus grandes soufflantes^{13...}) ;
- Amélioration de la **structure de l'appareil** (matériaux composites, winglets, volets adaptables...), afin d'améliorer son aérodynamisme ou d'alléger son poids ;
- Recours accru à la **digitalisation** (déploiement de capteurs, calculs...), permettant une utilisation optimisée des appareils.

Le concept de ces évolutions est aujourd'hui maîtrisé, et leur implémentation dans les nouveaux appareils n'est qu'une question de temps. Plus elles pourront être implémentées tôt dans les flottes, plus leur impact sur les émissions sera important. Dès lors, il est essentiel de maintenir les efforts sur les innovations incrémentales afin de sécuriser leur adoption au plus tôt.

¹³ Module visible en entrée du turboréacteur, composé d'aubes ou de pales aspirant et comprimant l'air au sein du moteur et dont la taille joue fortement sur sa consommation en carburant.

Panorama des innovations incrémentales

Technologies	Description	Maturité	Périmètre	Illustration
Moteurs à réducteur M	Utiliser un réducteur afin de dissocier les vitesses des éléments du turbo-réacteur : optimisation du rendement moteur	 En cours avec le moteur Pratt & Whitney	R MC LC	 Boîte de vitesse
Structures composites pour les ailes et le fuselage	Élargir la part des structures en matériaux composites plus légers que les métaux actuellement utilisés : réduction du poids de l'avion et donc de la consommation de carburant	 Déjà utilisées dans des proportions +/- fortes	R MC LC	
« Winglets »	Modifier les extrémités des ailes afin de réduire la traînée induite par les tourbillons en bout d'aile : amélioration de l'aérodynamisme de l'avion	 Répandus sauf sur certains vieux modèles	R MC LC	
Allègement des charges sur les ailes	Utiliser des volets adaptatifs afin de limiter le niveau de contrainte subie par les ailes et ainsi en réduire le poids : allègement de l'appareil et donc réduction de la consommation		R MC LC	
Contrôle de santé intégré	Détecter les dommages sur la structure avec l'aide de capteurs et identifier plus rapidement les besoins de maintenance / réparations : réduction des structures et donc du poids grâce à des cycles de maintenance au juste besoin		R MC LC	
Digitalisation avancée des commandes de vols	Augmenter et améliorer les ordinateurs à bord : optimisation des commandes & contrôles et de la navigation permettant une réduction de la consommation de carburant		R MC LC	
Réacteurs à haute pression M	Faire fonctionner les moteurs à plus hautes pressions afin d'améliorer le rendement moteur : réduction du poids de l'avion et amélioration de l'efficacité du turboréacteur	 TRL 8	R MC LC	

Panorama des innovations incrémentales (suite)

Technologies	Description	Maturité	Périmètre	Illustration
Parois rainurées	Créer des cavités sur la paroi de l'avion : réduction de la traînée de frottement donc augmentation de l'efficacité de l'avion et réduction de la consommation	TRL 8	R MC LC	
PAC pour systèmes auxiliaires	Remplacer les groupes auxiliaires de puissance (alimentant en électricité les différents systèmes de l'avion) fonctionnant au kérosène par une PAC alimentée en hydrogène : réduction de la consommation de kérosène	TRL 8 – tests spécifiques à prévoir pour aviation	R MC LC	
Réacteurs à très hauts taux de dilution (UHBR) M	Installer de plus grandes soufflantes : augmentation du taux de dilution et donc diminution de la consommation de carburant	TRL 5	R MC LC	

Niveau TRL [1 ; 3] : recherche
 Niveau TRL [4 ; 6] : en développement
 Niveau TRL [7 ; 9] : en Déploiement
 Niveau TRL [4 ; 6] : Commercialisé, peut être plus répandu / amélioré

TRL : Technology Readiness Level = Maturité de la technologie

M Technologie moteur
R Court Courrier **MC** Moyen Courrier **LC** Long Courrier

Source : Waypoint 2050. Analyses Archery Strategy Consulting.

1.2. Innovations de rupture

D'autres évolutions plus radicales, ou innovations de rupture, sont indispensables pour atteindre les objectifs de réductions de CO₂ (~24 % sur les ~34 %). Ces innovations porteront d'une part sur la motorisation, et d'autre part sur la structure de l'appareil.

Motorisation

Sur le moteur d'abord, les développements technologiques peuvent être réalisés dans trois domaines principaux : design, motorisation hybride/électrique et utilisation de l'hydrogène comme carburant.

Panorama des innovations de rupture sur la motorisation

Technologies	Description	Maturité	Périmètre	Illustration
Soufflante non carénée	Disposer la soufflante en dehors de la nacelle : augmentation du taux de dilution et réduction de la consommation		R MC LC	
Propulsion électrique hybride	Combiner et / ou alterner des propulsions électriques et thermiques : réduction de la consommation de carburant amplifiée par une possible réduction de la taille des moteurs à combustion et donc du poids		R MC LC	
Propulsion électrique	Utiliser des moteurs électriques pour activer des propulseurs traditionnels (ou une série de petites soufflantes) alimentés par des batteries ou des PAC : suppression de la consommation d'hydrocarbure		R MC LC	
Avion Hydrogène	Utiliser l'hydrogène comme carburant (soit dans une réaction thermique pour alimenter des moteurs traditionnels, soit dans une réaction chimique pour alimenter une PAC alimentant un moteur électrique) : suppression de la consommation d'hydrocarbure		R MC LC	
Réacteurs intégrés au fuselage Boundary Layer Ingestion	Placer les réacteurs à l'arrière du fuselage pour que la soufflante absorbe l'air passant par le fuselage : réduction d'une partie de la traînée		TBD	

Source : Waypoint 2050. Analyses Archery Strategy Consulting.

Design du moteur

Sur le design, l'objectif est de rompre avec les réacteurs traditionnels et de développer de nouvelles architectures. Un des projets les plus avancés est l'utilisation d'une soufflante non carénée. CFM International¹⁴ a ainsi officiellement lancé le programme de développement technologique CFM RISE¹⁵ en 2021, qui sera doté d'une soufflante non carénée. Cette nouvelle conception devrait permettre de réduire la consommation de carburant et les émissions de CO₂ de plus de 20 % par rapport à la génération actuelle de réacteurs LEAP¹⁶, tout en maintenant des performances comparables en termes de vitesse de croisière (~950km/h) et de niveau sonore. Rappelons que LEAP permettait déjà de réduire d'environ 15 % la consommation de carburant et les émissions de CO₂ par rapport à la génération précédente de moteur (CFM56)¹⁷.

Avion électrique hybride / électrique

De nombreux concepts d'avions hybrides ou électriques sont en cours de développement, dont certains sont destinés à une exploitation à l'échelle commerciale. C'est le cas de plusieurs startups françaises comme VoltAero (Cassio 1 hybride électrique 4 places), Mauboussin (Alerion M1H hybride électrique biplace) ou Ascendance Flight (VTOL¹⁸ hybride électrique 4-5 places), mais aussi des grands groupes tel qu'Airbus (VTOL CityAirbus Nextgen électrique 4 places).

Compte-tenu de cette effervescence, la propulsion électrique pourrait commencer à faire son entrée sur le marché des petits avions (2 à 6 passagers) d'ici 2025. Ces avions pourraient constituer une alternative viable dans certains domaines, comme les taxis volants ou le transport sanitaire dans les villes encombrées. Bien que ces aéronefs ne soient pas inclus dans le

champ d'application de l'analyse de Waypoint 2050, ils constituent une étape nécessaire pour ensuite développer ces technologies sur des avions de taille commerciale (pour du transport régional).

Toutefois, la mise à l'échelle des technologies électriques pour les avions civils à courte portée (jusqu'à ~90 minutes, 100 sièges environ), entièrement électriques ou hybrides, pose aujourd'hui un certain nombre de défis :

- Bien que la technologie des batteries ait évolué rapidement ces dernières années, en partie grâce au déploiement accéléré sur le marché des véhicules routiers, la densité d'énergie d'une batterie lithium-ion classique (~250 Wh/kg) reste insuffisante pour alimenter un avion même si celle-ci se rapproche des niveaux requis par les petits avions (750 à 2 000 Wh/kg). Que ce soit grâce aux progrès de cette technologie ou à des technologies alternatives (par exemple le lithium-soufre), il est raisonnable de penser qu'une densité énergétique de 800 Wh/kg pourra être atteinte d'ici 2050 ;
- Alors qu'avec le carburant liquide, l'avion s'allège au fur et à mesure qu'il vole et brûle du carburant, les batteries ne s'allègent pas au fur et à mesure que l'énergie est consommée : ce facteur limitant restreint encore l'autonomie de l'avion et limite l'utilisation des batteries à de très courts trajets ;
- Bien que la sécurité incendie des batteries au lithium se soit considérablement améliorée ces dernières années, il sera néanmoins indispensable de mettre en place des processus de test et de certification très stricts pour garantir que les avions électriques satisfont aux standards de sécurité très élevés de l'aviation commerciale.

Alternativement aux batteries électriques, les piles à combustible peuvent produire de l'électricité à bord à partir d'hydrogène. Mais là encore, leur faible densité énergétique (1 à 2 kW/kg) limite actuellement leur application à des démonstrateurs pour de très petits avions. Il existe de nombreux projets, dont celui de la société californienne ZeroAvia, qui a fait voler un petit avion (Piper Malibu M) équipé d'un moteur électrique et d'une pile à combustible.

14 Co-entreprise entre le motoriste américain GE et le motoriste Safran (Safran Aircraft Engines).

15 Revolutionary Innovation for Sustainable Engines.

16 Successeur du moteur CFM56 qui équipe la dernière génération de programmes court-courriers (A320neo, B737max, C919).

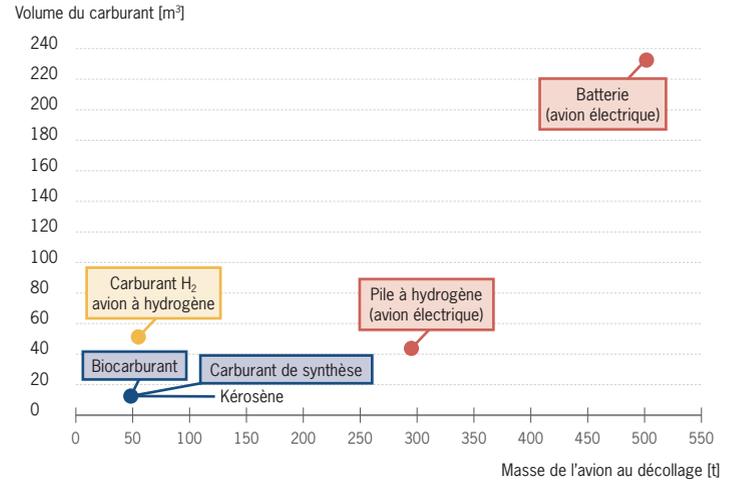
17 Safran, LEAP-1A : un moteur de nouvelle génération pour la famille A320neo (site internet).

18 Vertical Take-Off and Landing : avion à décollage et atterrissage verticaux, conçu pour s'affranchir des pistes normalement nécessaires.

Étant donné les défis importants associés au développement d'avions entièrement électriques de plus grande taille, les avions à propulsion électrique hybride pourraient constituer une étape intermédiaire techniquement réalisable vers l'électrification complète. Cette propulsion électrique hybride peut être obtenue en combinant un turboréacteur (ou turbopropulseur) avec une chaîne de propulsion électrique (en série ou en parallèle). Ce concept est déjà exploité depuis plus de 20 ans dans l'industrie automobile¹⁹.

Dans ce tour d'horizon des solutions technologiques de remplacement du kérosène conventionnel, un point fondamental est l'impact en termes de poids et de volume transporté dans l'avion : à ce jour, seul le remplacement du kérosène par un carburant alternatif (biocarburant ou carburant de synthèse) est neutre sur le poids de l'avion au décollage ou sur le volume occupé par le carburant, toutes choses égales par ailleurs. L'utilisation de carburant H₂ impacte le volume disponible dans l'avion et limite l'autonomie des appareils et le recours à une pile à hydrogène ou à des batteries alourdit considérablement le poids de l'avion. En outre, le volume occupé par les batteries est largement supérieur à celui du kérosène.

Impact du système de propulsion d'un avion en volume et en masse
(pour un avion de 200 passagers parcourant une distance de 2 000 km)



Impact masse et/ou volume si substitution au kérosène :

■ Aucun ■ Limité ■ Fort

Source : Clean Sky 2, Fuel Cells and Hydrogen²⁰, analyses Archery Strategy Consulting.

En l'état des connaissances actuelles, il semble peu probable que des avions entièrement électriques de plus de 100 sièges environ puissent être techniquement réalisables et entrer en service d'ici 2050. Si les défis techniques restent de taille pour le segment des 50-100 sièges, l'activité se développe

²⁰ Clean Sky 2 et Fuel Cells and Hydrogen sont des partenariats public-privé, le premier visant à développer des technologies pour réduire le bruit et les émissions de CO₂ et d'autres gaz dans l'aviation, et le second à développer des technologies de piles à combustible et à hydrogène. Tous deux sont financés par la Commission européenne, l'industrie et les centres de recherche/universités.

¹⁹ La 1^{re} voiture hybride commercialisée massivement fut la Toyota Prius, dont la mise sur le marché a eu lieu en 1997.

dans le segment des moins de 19 sièges, qui représente moins de 1 % de la consommation totale de carburant (et des émissions de CO₂) de l'aviation mondiale.

Pour le segment des appareils moyen et long-courrier, seul l'hydrogène et les carburants de synthèse sont des technologies accessibles.

Avion à hydrogène

Contrairement à la pile à combustible, où l'hydrogène (H₂) utilisé comme combustible et couplé avec le comburant O₂ génère de l'électricité, l'objectif ici est d'utiliser l'H₂ comme carburant direct pour un turboréacteur.

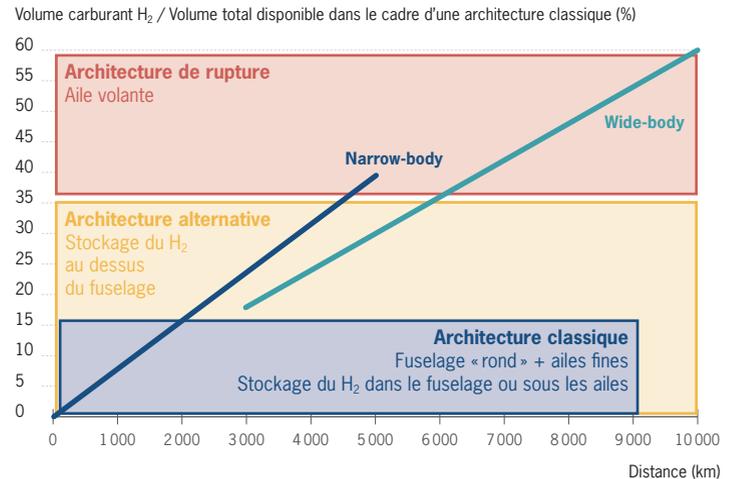
En matière de carburant, l'hydrogène apparaît comme un des meilleurs candidats pour décarboner l'avion de demain et constitue une des solutions privilégiées par les aviateurs à l'horizon 2035, car il fournit plus d'énergie que la plupart des carburants courants et, contrairement aux carburants carbonés, il ne produit que de l'eau lors de la combustion. En outre, si le réseau d'infrastructures (transport et stockage) n'existe pas aujourd'hui, la distribution de carburant d'aviation est très centralisée et l'on peut aisément approvisionner un nombre restreint d'aéroports tout en couvrant une part importante du trafic aérien mondial (en 2017, les 100 premiers aéroports ont généré près de la moitié du trafic aérien de passagers dans le monde²¹).

Cette configuration nécessite des développements technologiques, le principal défi étant de pouvoir transporter de l'hydrogène à bord d'un avion en quantité suffisante, car bien qu'environ trois fois plus léger que le kérosène, l'H₂ est environ quatre fois plus volumineux pour une même énergie embarquée. Pour trouver cet espace, des réservoirs placés dans le fuselage arrière, qui serait allongé, sont envisagés. Non seulement cela affecterait les performances aérodynamiques de l'avion, mais il faudrait également stocker l'H₂ sous forme liquide pour gagner de la place (à -253 °C). Or stocker un tel volume d'H₂ à -253 °C et le maintenir à cette température nécessitera d'une part l'utilisation

d'un système cryogénique, et d'autre part une structure de réservoir répondant à plusieurs enjeux : isolation thermique, tenue aux vibrations et aux chocs, poids contenu, étanchéité pour éviter la fuite de l'hydrogène (fugacité²²)... Si ces propriétés sont maîtrisées individuellement, le défi est de les regrouper au sein d'un seul matériau.

Dans ces conditions et avec une architecture classique pour une 1^{re} génération d'appareils, un rayon d'action d'environ 2 000 km semble envisageable. Au-delà, des architectures alternatives (stockage H₂ au-dessus du fuselage) voire de rupture (aile volante) devront être envisagées.

Modélisation du volume d'hydrogène à emporter selon la distance à parcourir



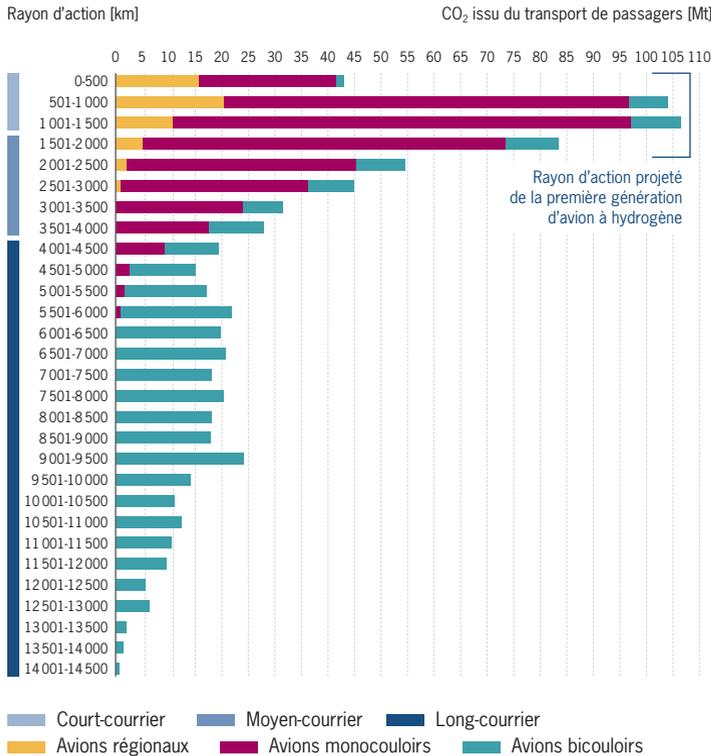
Source : Analyses Archery Strategy Consulting.

22 Propriété de l'hydrogène qui, à cette température, traverse les matériaux.

21 Airports Council International (ACI).

Ce rayon d'action serait suffisant pour couvrir ~42 % des émissions de l'aérien (en grande partie des avions régionaux et monocouloirs).

Niveau d'émissions de CO₂ des appareils selon leur rayon d'action à l'échelle mondiale



Source : ICCT²³, CO₂ emissions from commercial aviation ; Analyses Archery Strategy Consulting.

Des leviers technologiques focalisés sur les avions court et moyen-courriers

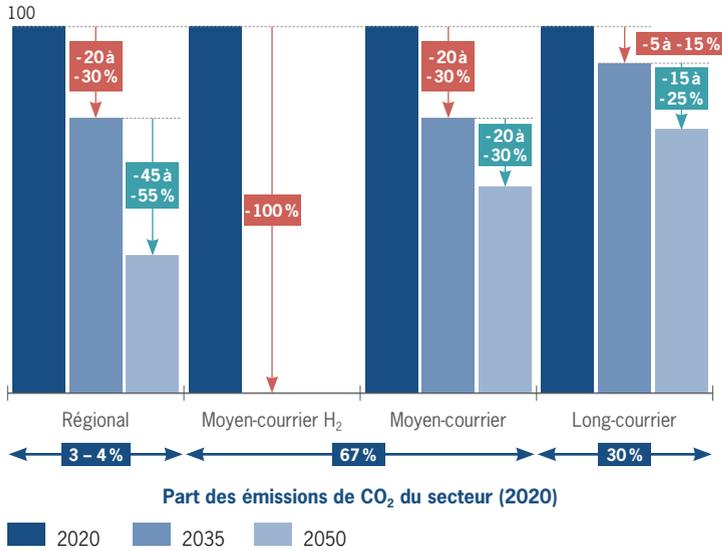
La trajectoire de décarbonation sera très différente selon le segment passager considéré, car si l'utilisation de carburants durables d'aviation (SAF) est aujourd'hui possible pour tous les segments, l'utilisation des technologies mentionnées (batterie électrique, piles à hydrogène, hydrogène carburant) est très inégale.

- Les vols régionaux (9-10 et 50-100 sièges), qui représentent ~3-4 % des émissions de CO₂ du secteur (au niveau mondial), pourraient s'appuyer sur la propulsion (hybride) électrique et la pile à hydrogène pour se décarboner progressivement ;
- Les vols court et moyen-courriers (100-250 sièges), responsables de ~67 % des émissions de CO₂ (au niveau mondial), pourraient bénéficier d'une part d'une alternative au kérosène avec la propulsion hydrogène et d'autre part d'améliorations significatives des performances ;
- Enfin, les vols long-courriers (250+ sièges), comptant pour le reste (~30 % des émissions de CO₂ au niveau mondial), n'auront d'autre alternative que de recourir intégralement aux SAF.

²³ International Council on Clean Transportation : organisation à but non lucratif visant à produire des rapports techniques et scientifiques impartiaux au service des régulateurs en matière d'environnement.

Réduction de la consommation en kérosène attendue par classe d'appareils

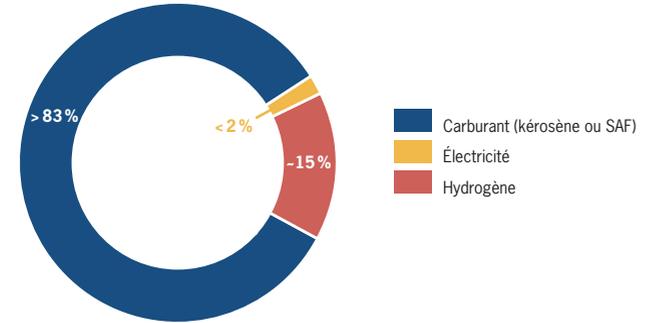
(Consommation en kérosène – base 100 en 2020)



Source : Destination 2050 ; Waypoint 2050 ; Groupe de Travail ; Projection Archery Strategy Consulting.

Répartition de la demande mondiale d'énergie pour l'aviation par type de carburants en 2050

Demande mondiale d'énergie pour l'aviation en 2050 : ~600 Mtep



Source : Waypoint 2050 ; Analyses Archery Strategy Consulting.

Structure de l'avion

Les principaux développements technologiques sur la structure de l'avion visent à améliorer son aérodynamisme et sa portance. Les modifications envisagées concernent aussi bien les ailes (taille, courbure, nombre, etc.) que le corps de l'avion (liaison des ailes entre elles, intégration des ailes dans le fuselage, etc.).

Par conséquent, alors que l'industrie aéronautique se mobilise pour rendre viables des avions de plus en plus performants et moins émetteurs de CO₂, une très grande partie des avions commerciaux (>80 %) continuera néanmoins à être propulsée par des moteurs classiques, alimentés par des carburants conventionnels (kérosène) ou alternatifs (carburant durable d'aviation – SAF). Cela est particulièrement vrai pour les vols long-courriers pour lesquels aucune alternative ne semble accessible à l'horizon 2050.

Panorama des innovations de rupture sur la structure

Technologies	Description	Maturité	Périmètre	Illustration
Contrôle du flux laminaire	Modifier le revêtement de l'avion pour optimiser l'écoulement de l'air : maintien de l'efficacité sur la durée et donc réduction de la consommation de carburant	TRL 7	R MC LC	
Amélioration de la courbure des ailes	Optimiser la courbure des ailes en cours de vol afin d'améliorer l'efficacité de l'appareil : amélioration de la portance et donc de l'efficacité de l'avion	TRL 6	R MC LC	
« Strut / Truss- Braced wing »	Augmenter l'envergure des ailes, supportées alors par des mâts : réduction de la traînée et augmentation de l'efficacité		R MC LC	
Configuration « Canard »	Installer des surfaces portantes à l'avant de l'avion (devant les ailes) : suppression de la traînée de l'empennage (surface portante à l'arrière) et amélioration de l'efficacité	Avancé militaire pas civil	R MC LC	
« Blended Wing Body »	Changer le corps de l'avion pour intégrer les ailes au fuselage (absence de démarcation forte entre les deux) : amélioration du rapport portance / traînée donc de l'efficacité de l'avion		R MC LC	
« Box Wing »	Changer le corps de l'avion pour connecter les ailes entre elles et englober le fuselage : réduction de la traînée et donc de la consommation de carburant		R MC LC	

Niveau TRL [1 ; 3] : recherche
 Niveau TRL [4 ; 6] : en développement
 Niveau TRL [7 ; 9] : en Déploiement
 Commercialisé, peut être plus répandu / amélioré

TRL : Technology Readiness Level = Maturité de la technologie

Court Courrier
 Moyen Courrier
 Long Courrier

Source : Waypoint 2050. Analyses Archery Strategy Consulting.

Financement de l'innovation

RECOMMANDATION 1B (Monde)

Maintenir la dynamique d'investissement sur les technologies de rupture, en particulier sur les nouvelles formes d'appareils, les nouvelles motorisations (y.c. électrification), l'avion fonctionnant à l'hydrogène.

Les industriels du secteur investissent massivement en R&D sur fonds propres. Ainsi, les avionneurs Airbus et Boeing ont investi plus de 3 milliards d'euros en fonds propres en 2019, tandis que les motoristes Safran et Rolls-Royce ont autofinancé plus de 1 milliard d'euros de R&D la même année²⁴.

Les entreprises du secteur aéronautique ont par ailleurs accès à plusieurs formes d'aides publiques pour financer l'innovation.

L'Union européenne a lancé fin 2021 un programme de recherche et d'innovation pour l'aviation, *Clean Aviation*, qui s'inscrit dans le cadre du *Green Deal* européen présenté en 2019 (dont l'objectif global est de réduire à zéro les émissions de gaz à effet de serre en Europe d'ici 2050). Ce programme s'articule autour de trois grands axes de recherche : les concepts hybrides et entièrement électriques, les architectures d'aéronefs ultra-efficaces et les technologies de rupture pour faire fonctionner les avions à l'hydrogène. S'étendant de 2021 à 2031, ce partenariat public-privé entre l'UE et le secteur européen de l'aviation disposera d'un budget total de plus de 4,1 milliards d'euros, dont 1,7 milliard sera financé par l'UE²⁵. *Clean Aviation* succède aux PPP Clean Sky 1 et 2 (lancés respectivement en 2008 et 2014), qui soutenaient la recherche et l'innovation notamment pour réduire les émissions de CO₂, de NO_x et de bruit.

24 Airbus : Rapport annuel 2019 | Boeing : Rapport annuel 2019 et site internet Onglet Innovation | Safran : Rapport annuel 2020 | Rolls-Royce : Rapport annuel 2019 ; Niveau d'investissements en R&D communiqués à l'échelle des Groupes.

25 Union Européenne, *Clean Aviation*, *Clean Aviation seeks scientific advice* (23 novembre 2021).

En France, les principaux dispositifs sont : le crédit d'impôt sur les sociétés à travers le crédit d'impôt recherche (CIR) ou le crédit d'impôt innovation (CII) ; la possibilité d'avances remboursables et de subventions accordées par différents organismes, tels que la BPI²⁶ ou les fonds régionaux. Afin de piloter l'innovation de la filière aéronautique, l'État français a créé en 2008 un organisme : le CORAC²⁷. Cette instance est présidée par le Ministre des Transports et réunit l'ensemble des acteurs du secteur (avioneurs, motoristes, systémiers, équipementiers, PME spécialisées), afin de définir le programme de recherche de la filière en fonction d'objectifs articulés autour des grands thèmes de l'environnement, de la sécurité et de la compétitivité (ex : digitalisation de la chaîne d'approvisionnement). Plus concrètement, le CORAC soutient financièrement des projets de démonstrateurs visant à réduire les émissions (polluants atmosphériques, bruit), à améliorer la sécurité face à un trafic aérien grandissant, ou à soutenir l'émergence de nouvelles formes de mobilité (exemple : taxis volants). Ainsi, le projet d'avion hybride EcoPulse²⁸ porté par Airbus, Daher et Safran a reçu une aide de 11 millions d'euros en 2019. Alors que le CORAC disposait auparavant d'un budget annuel de 135 millions d'euros, il s'est vu confier la gestion d'un budget exceptionnel avec le plan « France 2030 », qui prévoit 4 milliards d'euros de soutien aux filières automobiles et aéronautiques²⁹ : à travers ce budget inédit, le Gouvernement affiche sa volonté de parvenir au développement d'un avion bas-carbone en 2035.

Il faut noter que toutes ces mesures de soutien à l'innovation sont distinctes du fonds Ace Aéro Partenaires (Ace Capital Partners, filiale de Tikehau Capital). Ce fonds, lancé en 2020 et dédié au sauvetage et à la restructuration de l'industrie aéronautique française, doit permettre l'émergence d'un écosystème de sous-traitants renforcés dans une industrie qui compte encore un grand nombre de PME hyperspécialisées. Cet écosystème sera indispensable pour

assurer la production des appareils de nouvelle génération. Fin 2021, le fonds aura investi 200-250 M€ sur les 750 M€ levés auprès de l'État (200 M€) et des donneurs d'ordres (Airbus, Safran, Dassault, Thales)³⁰.

Certification

RECOMMANDATION 1C (Monde)

Préparer le modèle de certification des innovations de rupture.

La certification est un processus long et extrêmement normé (test individuel des différentes pièces constitutives de l'avion, essais au sol ou sur d'autres avions, test en soufflerie, test sur simulateur, recours à des prototypes pour des essais...), où les tests sont menés par les constructeurs sous le contrôle des autorités de certification.

Pour certaines fonctions, une grande partie de la certification est basée sur l'expérience acquise par le constructeur à travers des volumes importants de vols effectués dans le passé par des avions les utilisant. Cela ne sera pas possible pour certaines innovations de rupture pour lesquelles il est important de déterminer très tôt dans le processus de définition de l'avion quels éléments de démonstration sont attendus pour assurer la certification de ces nouveaux avions.

Ces éléments de démonstration attendus devront également être partagés entre toutes les agences de certification au niveau mondial, au risque de voir ainsi l'appareil certifié dans une seule partie du monde. Par ailleurs, il ne fait aucun doute qu'en cas d'innovation de rupture, les agences des différentes géographies demanderont une analyse indépendante de l'appareil.

26 Banque Publique d'Investissement.

27 Conseil pour la Recherche Aéronautique Civile.

28 Le 1^{er} vol est prévu courant 2022.

29 Gouvernement, *Plan France 2030 : 30 milliards d'euros d'investissement sur les technologies de pointe* (octobre 2021).

30 GIFAS, *La consolidation se renforce dans l'aéronautique* (octobre 2021).

Mécanisme pour assurer la compétitivité des appareils moins émetteurs

RECOMMANDATION 1D (Monde)

Mettre en place des mécanismes pour assurer la compétitivité coût des appareils moins émetteurs (financement de nouvelles infrastructures, compensation du surcoût associé aux nouveaux appareils, etc.).

Pour accompagner certaines des innovations envisagées, telles que l'avion hybride / électrique ou à hydrogène, il y aura besoin d'adapter l'infrastructure aéroportuaire existante pour fournir de l'électricité à haute puissance ou de l'hydrogène. Les futurs avions à faibles émissions pourraient donc rencontrer des obstacles à leur déploiement en raison des investissements nécessaires pour adapter les infrastructures, comme c'est le cas dans d'autres industries (par exemple l'automobile électrique). Ceci est d'autant plus vrai que le nombre de vols d'avions H₂ au départ d'un même aéroport sur lequel amortir ce surcoût risque d'être très limité lors du lancement de ces appareils : il n'est pas possible de répercuter l'intégralité du coût des nouvelles infrastructures sur ces quelques vols quotidiens au risque de voir leur coût d'exploitation largement dégradé.

En plus de cela, le modèle économique de ces nouveaux appareils pourrait être impacté : un temps de charge des batteries ou temps d'avitaillement en H₂ supérieur à celui des avions fonctionnant au kérosène impactera à la baisse le nombre de rotations journalières pouvant être effectuées par ces appareils.

Il sera donc nécessaire d'anticiper ces écueils potentiels en parallèle du développement de ces nouvelles générations d'appareils, et de mettre en place des mécanismes permettant d'assurer leur compétitivité dès leur entrée en service (ex : aéroport, compagnies aériennes, etc.).

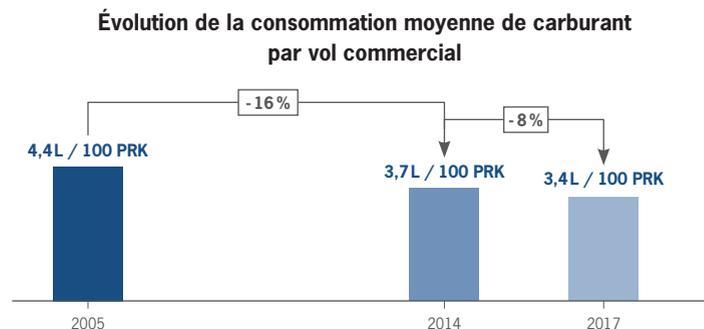
2. Le renouvellement des appareils est un levier de court terme, facilement activable, qui permet de bénéficier rapidement des évolutions technologiques

RECOMMANDATION 2 (France/UE/Monde)

Faciliter le financement du renouvellement des appareils anciens par des appareils plus récents et moins émetteurs dans le cadre de la taxonomie et/ou via des mécanismes de suramortissement.

2.1. Enjeu du renouvellement des appareils

La consommation moyenne de carburant par vol commercial a tendance à diminuer avec l'arrivée de nouveaux avions plus efficaces (de 4,4 L / 100 RPK³¹ en 2005 à 3,4 L / 100 RPK en 2017).



Source : European Aviation Environmental Report 2019, p. 7³².

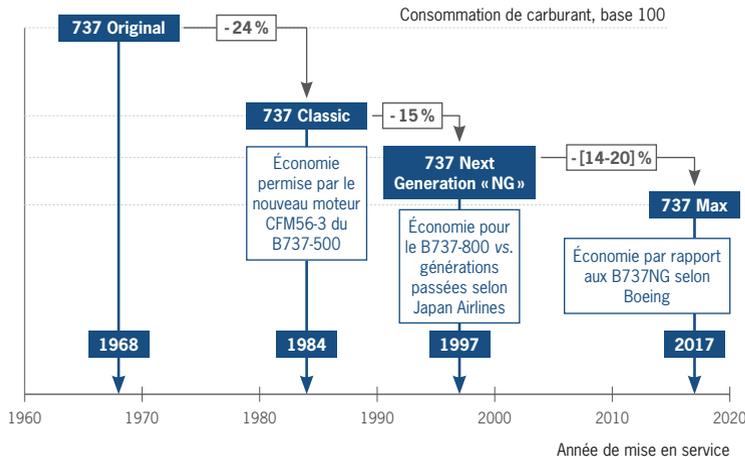
31 Passager-kilomètre payant (en français) : unité de mesure correspondant au transport d'une personne sur un kilomètre.

32 EEA, EASA et Eurocontrol, European Aviation Environmental Report 2019 (janvier 2019).

Le renouvellement des avions permet donc de capter les effets bénéfiques des évolutions technologiques en faveur de la réduction de la consommation et par extension du CO₂. Plus l'âge de la flotte en service est élevé, plus le potentiel d'économies de CO₂ est important.

Concrètement, les avionneurs renouvellent leurs modèles tous les 15 à 20 ans, avec à chaque génération un gain sur le niveau de consommation. La famille des Boeing 737 a ainsi connu au cours des 50 dernières années une amélioration importante de son efficacité opérationnelle, avec notamment une économie en carburant estimée à environ 50 % pour son 737 MAX (4^e génération, mise en service en 2017) par rapport au B737 «Original» (mise en service en 1968).

Présentation des quatre générations de Boeing 737 et estimation des économies de carburant entre chacune d'entre elles

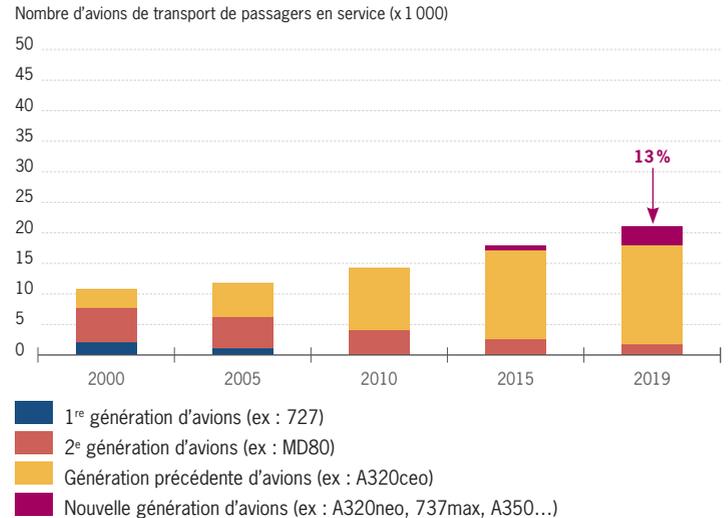


Source : Boeing, Japan Airlines, CFM International, Analyses Archery Strategy Consulting.

Le remplacement des appareils au sein des compagnies aériennes intervient en moyenne 22,5 ans après la livraison au premier client³³. D'ailleurs, la plupart des compagnies aériennes déprécient leurs avions sur une durée de 20 ans (voire 25 ans pour certains avions)³⁴.

Ainsi, il est fréquent de voir dans les flottes des compagnies des avions ayant plus d'une génération de retard avec les avions les plus récents. Ces avions représentaient en 2019 environ 5 % de la flotte en service.

Part des différentes générations d'avions dans la flotte mondiale en service



Source : Airbus, Global Market Forecast 2021-2040 p. 13.

33 Destination 2050.

34 Air France (rapport annuel 2014) | Lufthansa (rapport annuel 2014) | easyJet plc (rapport annuel 2014).

Le renouvellement des appareils est un levier de décarbonation très efficace et immédiat, par exemple, un renouvellement théorique immédiat des 87 % d'appareils d'ancienne génération induirait une diminution des émissions supérieure à 10 %. La question des appareils retirés des flottes reste à définir au cas par cas : ils pourraient être soit décommissionnés, soit remis sur le marché de l'occasion alimentant ainsi le retrait d'appareils encore plus anciens et donc plus émetteurs de CO₂.

Le Groupe Air France-KLM, en acquérant 100 nouveaux appareils de la famille A320neo fin 2021 (destinés à KLM et Transavia), a réaffirmé que le renouvellement est le « premier levier de réduction des émissions de CO₂ à effet immédiat »³⁵.

L'impact des émissions de CO₂ étant cumulatif (les émissions émises l'année N restent l'année N+1), l'impact sur le réchauffement climatique doit être abordé sur la période et non uniquement en 2050. Un renouvellement régulier des flottes, compatible avec le modèle économique des industriels de la filière (et avec le maintien de leur capacité à investir dans des innovations), doit permettre de contenir les émissions sur la période 2020-2050.

Il faudra équilibrer cette mesure avec les enjeux des industriels, en particulier sur la filière moteur dont une part importante de la rentabilité provient des opérations de maintenance qui sont moins importantes sur des flottes récentes que sur des flottes âgées. La rentabilité de ces acteurs est clé pour financer les investissements dans les nouvelles technologies.

Pour inciter les compagnies aériennes à investir dans des moyens moins émetteurs, les États pourraient envisager de mettre en place des mécanismes incitatifs comme des dispositifs de suramortissement, qui permettent d'accélérer le rythme de remplacement des investissements : dans ce sens, le Projet de loi de finances français pour 2022³⁶ propose d'« introduire un mécanisme de

suramortissement fiscal pour les investissements réalisés par les compagnies aériennes renouvelant leur flotte en optant pour des avions qui permettent une réduction d'au moins 15 % des émissions de dioxyde de carbone par rapport aux aéronefs qu'ils remplacent ». Un tel dispositif avait d'ailleurs déjà été envisagé pour 2021 avec un taux de suramortissement de 30 %³⁷.

Financement d'un mécanisme de suramortissement fiscal

Principe : le suramortissement permet à une entreprise de déduire de son résultat imposable un montant (%) de la valeur d'achat d'un bien. La déduction, répartie sur la durée d'utilisation, s'ajoute à l'amortissement comptable.

Périmètre d'applicabilité : cette disposition est applicable dans le pays où la société est domiciliée fiscalement (ex : France). Elle peut être étendue à plusieurs géographies (ex : États membres de l'UE).

Coût : 65 M€ en année 1 et jusqu'à 1,3 Md€ par an à l'échelle de l'Europe en rythme de croisière, à partir de 20 ans.

Hypothèses :

- Suramortissement autorisé : 30 % (sur l'exemple envisagé en France)
- Impôt sur les sociétés : 25 % (à compter de 2022 en France)
- Valeur d'un avion³⁸ : 70 M€ (coût catalogue – avant réduction consentie par l'avionneur – pouvant varier de ~100 M€ pour un monocouloir à ~400 M€ pour un super jumbo)
- Durée amortissement : 20 ans
- Flotte d'appareils³⁹ en 2040 en Europe (vs. 2019) : 9 140 (5 220) – Livraisons d'appareils (2021-2040) : 8 705

³⁵ Air France-KLM, Air France-KLM commande 100 appareils de la famille A320neo destinés à KLM et Transavia (décembre 2021).

³⁶ Sénat, *Projet de loi de finances 2022* (novembre 2021).

³⁷ Sénat, *Projet de loi de finances pour 2021*.

³⁸ Presse spécialisée.

³⁹ Boeing, *Commercial Market Outlook, 2021-2040* (septembre 2021).

2.2. Taxonomie européenne

La réglementation européenne évolue alors que l'Europe s'est fixée comme objectif d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. Différents leviers d'action ont été mis en place à travers un plan global, le *Green Deal* européen⁴⁰, annoncé par la Commission européenne en 2019. L'un des piliers, le plan d'action pour la finance durable, vise à réorienter les investissements en capital vers des activités dites durables.

Dans ce contexte, la taxonomie permet d'établir un système européen de classification des activités durables. Elle vise à classer les activités économiques en fonction de leur impact sur l'environnement, c'est-à-dire de leur niveau de durabilité, défini selon la contribution de l'activité à l'un des six objectifs environnementaux de l'UE, dont l'atténuation du changement climatique. 4 types d'activités découlent de cette classification : Durables, Transitoires (si aucune alternative bas carbone n'existe mais que les émissions correspondent aux meilleures performances du secteur), Habilitantes (activité produisant de fortes émissions mais nécessaires au développement d'activités durables), Autres. Cette taxonomie a pour finalité de labelliser les produits financiers destinés à des activités Durables, Transitoires ou Habilitantes, afin de les rendre visibles contrairement aux Autres.

Afin de permettre le remplacement des anciens appareils, la taxonomie européenne doit s'assurer de ne pas limiter le financement du renouvellement des flottes en impactant tous les appareils de la même manière. Pour cela, il est important que la taxonomie puisse distinguer 2 cas de figure :

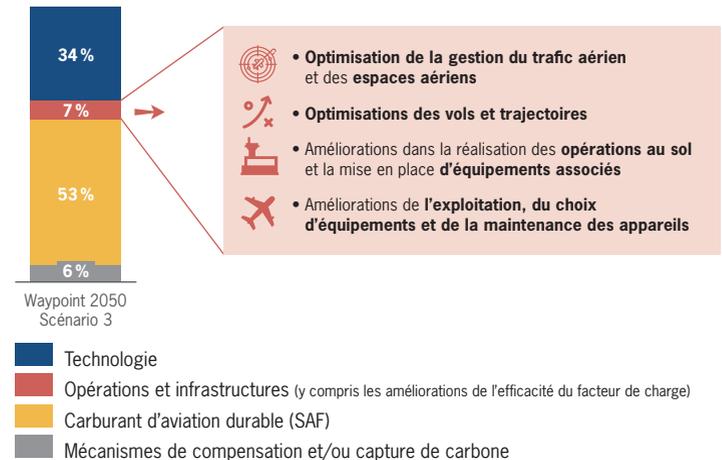
- L'acquisition d'avions plus récents pour remplacer des modèles plus anciens et plus polluants (par exemple, le remplacement de l'A320 ceo par l'A320 neo), à flotte constante, ce cas de figure contribuant à réduire les émissions de CO₂ ;
- L'acquisition d'un nouvel avion pour élargir la flotte, ce cas de figure ne contribuant pas à réduire les émissions de CO₂.

Les enjeux de la taxonomie sont colossaux : si l'aviation obtient le label européen pour une partie de ses activités, alors les propriétaires d'avions (compagnies aériennes, sociétés de leasing) pourraient se financer plus facilement sur les marchés. Dans le cas contraire, les financements seraient beaucoup plus contraints et la stratégie du secteur pour atteindre la neutralité carbone en serait affectée.

3. Les leviers d'optimisation de la consommation en vol et au sol doivent être activés à court et moyen-terme

3.1. Optimisation des opérations en vol et au sol

Contribution des opérations à l'objectif de réduction des émissions de CO₂

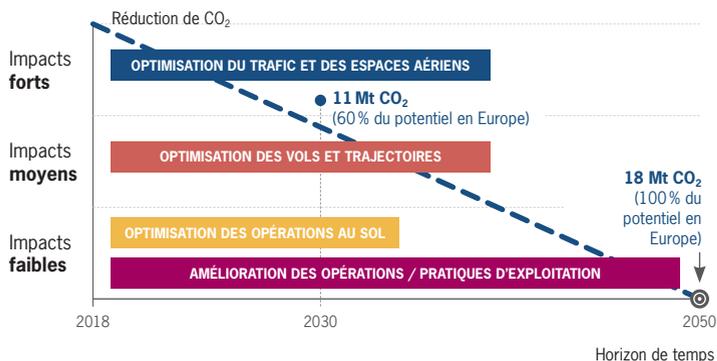


Source : Waypoint 2050.

40 Pacte vert pour l'Europe.

Améliorer l'efficacité des opérations peut contribuer à réduire les émissions de CO₂ et à atteindre l'objectif de neutralité carbone en 2050. Si ce levier ne suffira pas à lui seul à atteindre l'objectif, les pratiques qui en découlent peuvent souvent être mises en œuvre plus rapidement que les développements technologiques des avions, qui sont limités par le rythme auquel les nouveaux avions entrent dans la flotte. Leur mise en place pourrait contribuer à une réduction en Europe de 11 Mt CO₂ en 2030 (~60 % du potentiel) et de 18 Mt CO₂ en 2050 (~100 % du potentiel).

Contribution des 4 types de pratiques à l'objectif de réduction des émissions de CO₂



Source : Destination 2050 p. 8.

Dans un environnement d'exploitation du transport aérien très réglementé, complexe et souvent organisé de façon locale, un grand nombre d'acteurs sont collectivement responsables de la sécurité et de l'efficacité du transport aérien et influencent les opérations de transport aérien, l'efficacité du processus opérationnel et, par conséquent, les performances environnementales du secteur de l'aviation : compagnies aériennes, prestataires de services de navigation aérienne (PSNA), aéroports, agents d'assistance en escale, fabricants d'avions...

RECOMMANDATION 3 (France/UE/Monde)

Mettre en place les leviers de réduction de la consommation liés à l'opération des appareils :

- En vol : accélérer la mise en place du ciel unique européen et la digitalisation du contrôle aérien, l'utilisation de localisation satellite pour les vols transatlantiques, développer les configurations de vol permettant de récupérer l'énergie de sillage...
- Au sol : limiter l'utilisation des APU lorsque les appareils sont connectés au terminal, optimiser le roulage au sol et le remorquage lorsque cela est pertinent...

La réduction visée par ce 2^e levier sera mise en œuvre à travers 4 catégories de pratiques, qui contribuent de manière hétérogène à l'objectif visé :

- Optimisation du trafic et des espaces aériens ;
- Optimisation des vols et des trajectoires ;
- Optimisation des opérations au sol ;
- Amélioration des opérations et des pratiques d'exploitation.

Optimisation du trafic et des espaces aériens

La gestion du trafic et des espaces aériens vise à assurer des vols sûrs et efficaces, à équilibrer la demande de vols avec la capacité disponible de l'espace aérien et à fournir des informations aéronautiques aux utilisateurs de l'espace aérien. Les améliorations regroupées dans cette catégorie concernent principalement la configuration et l'utilisation de l'espace aérien dans lequel opèrent les compagnies aériennes. Cette catégorie de pratiques pourrait avoir un impact élevé sur la réduction des émissions de CO₂.

Panorama des pratiques d'optimisation du trafic et des espaces aériens

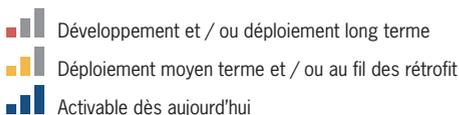
Pratiques	Description	Accessibilité	Porteurs
« Airport Collaborative Decision-Making » (A-CDM)	Centraliser et partager les informations opérationnelles (via des outils numériques) entre les compagnies, le contrôle du trafic aérien, les services au sol : limiter le temps de roulage, d'attente et la consommation de carburant associée		Aéroports / PSNA / Compagnies aériennes
Descentes et montées continues	Déployer des pratiques d'approches continues grâce à une gestion du trafic plus fine permettant d'éviter les phases de vol par palier qui sollicitent plus les moteurs : réduction de la consommation		Compagnies aériennes / Aéroports / PSNA
Utilisation flexible des espaces aériens militaires	Mettre à disposition des espaces aériens militaires lorsqu'ils ne sont pas utilisés afin d'y laisser naviguer les appareils civils lorsque pertinent : optimisation de la trajectoire donc réduction de la consommation		État / PSNA
Ciel Unique Européen	Réduire la fragmentation des espaces aériens européens en harmonisant les pratiques et les systèmes (ou en les rendant interopérables pour pouvoir communiquer entre eux) et en créant des blocs d'espaces aériens correspondant plus au flux qu'aux frontières : optimisation des trajets donc réduction de la consommation		États / PSNA / Union Européenne
SESAR	Single European Sky ATM (Air Traffic Management) Research, pendant technologique et industriel du Ciel Unique Européen : vise à développer des systèmes de gestion adaptés, harmonisés et / ou interopérables		États / PSNA / Union Européenne

Pratiques	Description	Accessibilité	Porteurs
Réduction des écartements entre avions au décollage	Optimiser les règles de séparation entre les avions pour augmenter la capacité des pistes et les marges de manœuvre opérationnelles tout en maintenant des niveaux de sécurité appropriés : réduction de la consommation de carburant avant le décollage		ESA / DGAC
Initiatives d'amélioration du trafic aérien hors UE	Moderniser la gestion du trafic aérien, notamment aux États-Unis avec le projet NextGen déployant massivement l'utilisation de données satellites et en temps réel des trajets : optimisation du trafic		États-Unis / PSNA / Compagnies aériennes / Aéroports
« Performance-based Navigation » (PBN)	Utiliser des technologies satellitaires pour les trajectoires d'atterrissage permettant d'optimiser les approches et les voies aériennes empruntées, notamment en cas de congestion de l'aéroport : réduction de la consommation de carburant durant l'atterrissage	 <small>Schéma directeur selon pays</small>	Compagnies aériennes / Aéroports / PSNA
« Required Navigation Performance » (RNP)	Renforcer la pratique du PBN en adoptant la spécification RNP, plus précise et permettant au contrôleur de rapprocher les voies aériennes car plus sûres : optimisation de la trajectoire	 <small>Schéma directeur selon pays</small>	Compagnies aériennes / Aéroports / PSNA
Voies aériennes plus flexibles	Profiter des systèmes de navigation plus précis (PBN/RNP) pour convenir d'une nouvelle route avec les contrôles aériens en cas de changements de conditions météorologiques : optimisation trajectoire donc réduction de carburant		Compagnies aériennes / PSNA / aéroports

... / ...

... / ...

Pratiques	Description	Accessibilité	Porteurs
Management de la congestion des aéroports	Déployer des outils (capteurs et logiciels) permettant de visualiser et analyser les embarquements, les départs, le trafic aérien régional... donner le départ quand la piste est accessible ≠ aujourd'hui départ dès que l'avion est prêt : limite le roulage et la consommation associée		Compagnies aériennes / PSNA / aéroports
Opérations basées sur trajectoire – Trajectory-based Operations (TBO)	Projeter les trajectoires des appareils dans le temps afin de prévoir et proposer des intervalles d'approches optimisés (basé sur des systèmes PNB ; des systèmes de gestion de trafic basés sur le temps ; des systèmes d'échanges d'informations entre infrastructures et appareils) : optimisation trajet donc réduction de la consommation		Compagnies aériennes / aéroports / Constructeurs / PSNA



PSNA : prestataires de Services de la navigation aérienne

Source : *Waypoint 2050, Destination 2050. Analyses Archery Strategy Consulting.*

Mise en place de « ciels uniques »

En réponse à l'augmentation continue du trafic aérien en Europe et aux inefficacités du contrôle du trafic aérien identifiées par Eurocontrol, l'UE a lancé le programme du ciel unique européen, qui vise à permettre à l'espace aérien européen d'accueillir davantage de trafic, tout en réduisant les coûts et en améliorant les performances.

La mise en œuvre s'appuie sur un ensemble de mesures⁴¹ :

⁴¹ Ministère de la Transition écologique (2017).

- Le développement et l'application d'une réglementation de la gestion du trafic aérien en matière notamment de sécurité, d'interopérabilité des systèmes et des procédures, de redevances.
- La mise en place des blocs d'espace aérien fonctionnel (FABs) formés par accords entre États, visant la gestion de l'espace aérien en fonction des flux de trafic et non des frontières : on compte aujourd'hui 9 FABs en Europe. Le FABEC (bloc d'espace aérien d'Europe Centrale), qui compte pour ~55 % des vols fréquentant l'espace aérien européen, regroupe la France, l'Allemagne, la Belgique, le Luxembourg, les Pays-Bas et la Suisse. Le FABEC a par exemple permis de créer des itinéraires plus courts en grandes villes, se traduisant par des économies de carburant.
- Un système de performance des services de navigation aérienne, soit européen avec des objectifs contraignants fixés par la Commission européenne, soit local au niveau des États ou des FABs.
- La désignation d'Eurocontrol comme Gestionnaire du Réseau.
- Le programme technologique SESAR⁴² de modernisation du système européen de gestion du trafic aérien (ATM), notamment par la numérisation et l'automatisation des activités associées ; l'investissement dans SESAR au cours de la période 2015-2024 devrait s'élever à près de 3 milliards d'euros⁴³ et doit permettre d'économiser 540 000 tonnes de kérosène et 1,7 millions de tonnes de CO₂ d'ici 2030. Le projet SESAR est l'équivalent européen du projet NextGen⁴⁴ aux États-Unis.

Toutes ces mesures doivent permettre d'optimiser l'organisation et l'utilisation de l'espace aérien européen, avec pour conséquence des économies de carburant et donc d'émissions de CO₂.

Depuis décembre 2021, les avions évoluant à près de 6 000 mètres d'altitude dans les espaces aériens gérés par les centres de Bordeaux, Brest et Paris

⁴² *Single European Sky Air Traffic Management.*

⁴³ *International Airport Review, SESAR deployment drives efficient, modern ATM* (novembre 2021).

⁴⁴ *Next Generation Air Transportation System* : système de transport aérien de nouvelle génération.

(soit près de la moitié de l'espace aérien français) peuvent faire du « free route » : cette pratique, qui permet aux compagnies aériennes de choisir le meilleur itinéraire pour chaque vol en s'affranchissant des routes aériennes historiques, doit permettre de réduire les émissions de CO₂.

Centralisation et partage des informations opérationnelles

Cette pratique, plus connue sous le nom d'A-CDM⁴⁵, vise à optimiser les opérations aéroportuaires et à assurer un trafic fluide et efficace. Elle repose sur le partage de données fiables et précises (horaires de départ et arrivée des avions, pistes en service et capacités associées, météo...) pour permettre aux partenaires de prendre les décisions les plus appropriées (compagnie aérienne, contrôle du trafic aérien, services au sol...).

Le partage d'information offre plusieurs bénéfices : optimisation des capacités du contrôle aérien, amélioration des prévisions de vol dans des conditions météorologiques normales et dégradées, amélioration de la ponctualité, amélioration de la fluidité du trafic au sol, amélioration de l'assistance au sol... Cela permet de réduire le temps d'attente des avions au seuil de la piste et de réduire la consommation de carburant et, en définitive, les émissions de CO₂.

Introduit et porté par Eurocontrol⁴⁶, le concept A-CDM s'est peu à peu mis en place et est aujourd'hui pleinement intégré et utilisé dans le fonctionnement de près de 30 grands aéroports européens (Paris CDG, Amsterdam, Francfort, Madrid, Rome...).

Eurocontrol rapporte plusieurs bénéfices de cette pratique⁴⁷ : gain de temps moyen au roulage entre 0,25 et 3 minutes par départ ; amélioration moyenne du respect des horaires entre 0,5 et 2 minutes par vol ; respect accru des créneaux malgré l'augmentation de la demande de trafic ; meilleure utilisation des ressources de manutention au sol ; réduction du nombre de changements de stand et de porte d'embarquement tardifs...

45 *Airport Collaborative Decision-Making* : prise de décision collaborative dans l'aéroport.

46 Organisation européenne pour la sécurité de la navigation aérienne.

47 Eurocontrol, *A-CDM Impact Assessment* (2016).

Le concept existe également sous différentes formes dans d'autres régions du monde, et notamment aux États-Unis sous le nom Surface-CDM.

Déploiement des pratiques d'approches continues

Traditionnellement, dans une descente classique, le pilote procède par paliers, à faible altitude. Ces paliers nécessitent une importante poussée des réacteurs et l'utilisation de dispositifs hypersustentateurs (becs de bord d'attaque, volets de bord de fuite), permettant d'améliorer la portance de l'avion aux basses vitesses.

L'approche en descente continue (ou en montée) est une technique qui permet d'atterrir (ou de décoller) en évitant au maximum les phases de vol en palier et en réduisant ainsi la sollicitation des moteurs, ce qui permet de limiter les nuisances sonores et d'économiser du carburant.

Cette technique, qui répond aux exigences de sécurité des vols, nécessite une configuration de l'espace aérien adaptée, la définition d'une procédure opérationnelle spécifique et des actions de contrôle appropriées en temps réel.

Des études suggèrent que les avantages de l'amélioration des montées et descentes continues peuvent être importants :

- La start-up Safety Line a développé un outil d'optimisation (OptiClimb), qui ne s'applique qu'à la phase de décollage : une expérience avec Transavia a montré qu'il permet d'économiser près de 80 kg de kérosène à chaque montée⁴⁸ ;
- La start-up OpenAirlines a mis au point un logiciel (SkyBreathe) qui favorise l'écoconduite pour les pilotes d'avions. La solution donne des recommandations ciblées aux compagnies pour mettre en place les procédures les plus économes en carburant et permettre de réduire leur consommation jusqu'à 5%⁴⁹ ;

48 Transavia (avril 2021).

49 Air France (juillet 2020).

- Air France a expérimenté en septembre 2021 un « vol parfait » entre Paris et Toulouse (en coopération avec Airbus et la Direction des Services de la Navigation Aérienne notamment), où l'enjeu était de réduire la consommation de carburant en combinant plusieurs innovations techniques et opérationnelles, et lors duquel l'A320 a optimisé sa trajectoire d'atterrissage en choisissant une descente continue ; suite à cela, Air France a déclaré qu'en réalisant 100 % de descente continue sur l'aéroport de Paris-Charles-de-Gaulle, la compagnie pourrait potentiellement économiser 10 000 tonnes de carburant⁵⁰.

L'application de cette technique reste toutefois limitée⁵¹ dans les aéroports très fréquentés et pendant les périodes d'affluence en raison de la nécessité d'une intervention tactique des contrôleurs aériens pour gérer en toute sécurité les flux d'arrivée et de départ.

Mise à disposition des espaces aériens militaires

L'espace aérien est traditionnellement utilisé par deux grands utilisateurs : l'aviation civile et l'aviation militaire. Cependant, ces deux domaines de l'aviation ne peuvent généralement pas fonctionner simultanément dans le même bloc d'espace aérien, ce qui nécessite l'établissement de frontières ou de ségrégations.

Si l'existence d'un espace aérien militaire oblige les aéronefs civils à le contourner, certains États ont pu mettre en place une utilisation flexible de cet espace aérien, en le confiant à la gestion du trafic aérien civil lorsqu'il n'est pas utilisé à des fins militaires et en permettant un acheminement beaucoup plus direct des avions civils, et donc une économie de carburant.

Réduction de l'écartement au décollage

Pour minimiser le risque de turbulence de sillage, des règles de séparation entre les avions sont définies. Concrètement, un avion qui souhaite décoller

après un autre avion doit attendre avant de pouvoir décoller, et cette attente avec les moteurs en marche consomme du kérosène.

Approfondissement

La **turbulence de sillage** est une turbulence aérodynamique qui se forme derrière un avion. Tous les avions en vol génèrent de la turbulence de sillage qui prend essentiellement la forme de deux tourbillons. Le risque pour l'avion qui traverse la turbulence de sillage de l'avion qui le précède est d'autant plus grand que celui qui la génère est gros (c'est-à-dire que l'intensité de la turbulence est élevée) et que celui qui la traverse est petit.

Pendant le décollage et l'atterrissage, la turbulence de sillage s'étend à l'arrière de l'avion, mais aussi autour de la piste lorsque le vent est faible. Lorsque le vent souffle, la turbulence de sillage se déplace d'un côté de la piste, ou peut même atteindre une piste voisine ou parallèle. Une mauvaise prise en compte des turbulences de sillage a conduit à plusieurs accidents dans le passé (vol American Airlines 587).

L'optimisation des écartements peut permettre d'augmenter la capacité des pistes, de limiter le temps d'attente des avions sur le point de décoller et qui attendent sur le tarmac avec les moteurs en marche, et *a fortiori* de limiter la consommation de carburant.

Optimisation des vols et des trajectoires

L'optimisation des vols et des trajectoires concerne la manière dont les avions sont utilisés en opération par les compagnies aériennes.

⁵⁰ Laurent Lafontan (Directeur du développement des Opérations Aériennes).

⁵¹ Taux de réalisation des procédures de descente continue en 2020 : Paris CDG ~27 %, Nice Côte d'Azur ~33 %, Paris Orly ~41 %, Toulouse Blagnac ~51 % (Source : Ministère de la Transition Écologique).

Cette catégorie de pratiques pourrait avoir un impact moyen sur la réduction des émissions de CO₂. Si plusieurs pratiques peuvent être mises en place pour concourir à cet objectif, seule une est aujourd'hui accessible : le déploiement de nouveaux logiciels de planification.

Panorama des pratiques d'optimisation des vols et des trajectoires

Pratiques	Description	Accessibilité	Porteurs
Optimisation de la trajectoire de l'appareil	Optimiser la trajectoire de l'appareil pour améliorer la consommation : réduire la distance parcourue, s'adapter aux conditions météorologiques (défavorables ou adopter un profil de vol plus naturel)		Compagnies aériennes / PSNA / Aéroports
Flight planning	Déployer de nouvelles versions de logiciels de planification des vols et des trajectoires pour optimiser la consommation de carburant		Compagnies aériennes
Développement des partenariats pour le « vol parfait »	Réaliser des vols de démonstration cherchant à optimiser l'ensemble des interventions et phases lors d'un vol impliquant le contrôle aérien, la compagnie, les services au sol, les recommandations du constructeur : identification / construction des bonnes pratiques permettant la réduction de consommation		Compagnies aériennes / Constructeurs / PSNA / Aéroports
Vol en formation	Développer des logiciels afin de réaliser des vols proches coordonnés entre avions pour que les uns profitent de l'énergie de sillage des autres : récupération d'énergie donc diminution de la consommation de carburant superflue		Compagnies aériennes / Constructeurs / PSNA / Aéroports

Pratiques	Description	Accessibilité	Porteurs
« Space-based navigation »	Utiliser l'équipement embarqué de l'avion pour transmettre des données à des satellites ou des stations sol qui transmettent au contrôle aérien permettant de préciser les positions sur des zones isolées / océans et de réduire les marges de sécurité et d'optimiser les voies empruntées : réduction de la consommation		Compagnies aériennes / Aéroports / PSNA

- Développement et / ou déploiement long terme
- Déploiement moyen terme et / ou au fil des rétrofits
- Activable dès aujourd'hui

PSNA : prestataires de Services de la navigation aérienne

Source : Waypoint 2050 ; Destination 2050 ; Analyses Archery Strategy Consulting.

Utilisation de trajectoires directes ou optimisées

Traditionnellement, les avions circulent dans des couloirs aériens, qui sont assimilables à des autoroutes dont le tracé prédéfini permet d'optimiser la gestion des flux d'avions. Cependant, ces couloirs aériens ne permettent pas d'optimiser la trajectoire des avions en :

- Réduisant la distance entre le point de départ et d'arrivée ;
- Faisant bénéficier l'appareil de vents favorables ;
- En accompagnant la trajectoire naturelle de l'avion qui, en consommant du carburant, devrait naturellement gagner de l'altitude ; en réalité, le pilote maintient la trajectoire prévue dans le couloir aérien, ce qui tend à augmenter sa consommation de carburant.

Ces trajectoires, concourant aux « vols parfaits », permettent ainsi des réductions d'émissions importantes : celui effectué par Air France en septembre 2021, où l'avion a volé de Paris à Toulouse en ligne droite, a permis de réduire de 7 à 8 % les émissions de CO₂⁵².

Plusieurs pistes peuvent permettre d'optimiser la trajectoire des appareils :

- À court terme, des solutions technologiques émergent pour permettre aux pilotes de demander des modifications de leur plan de vol pendant leur parcours afin de bénéficier d'une trajectoire plus directe sur la base des demandes déjà accordées par les contrôleurs aériens dans le passé. Transavia a utilisé les outils OptiClim et OptiDirect de Safety Line en 2019 ce qui lui a permis de gagner près de 5 000 tonnes de CO₂⁵³ ;
- À moyen terme, la numérisation de la gestion du trafic aérien sera indispensable pour mettre en œuvre des profils de trajectoire optimisés tout en maintenant le niveau de sécurité nécessaire.

Planification

La planification vise à choisir la meilleure trajectoire de vol, en tenant compte de tous les facteurs pertinents. Un logiciel de planification effectue les calculs en intégrant le parcours imposé, les vents en altitude, la possibilité de turbulences ou d'orages en route, les températures, les espaces aériens réglementés, l'efficacité énergétique, la masse et l'altitude de l'avion... Le plan de vol est ensuite transmis aux pilotes quelques heures avant le départ, et téléchargé dans l'ordinateur de navigation. Il peut éventuellement être mis à jour à nouveau compte tenu des dernières données (vents et poids exact de l'avion).

Les compagnies aériennes adaptent les algorithmes d'optimisation et les priorités d'optimisation à leurs propres besoins, et les routes peuvent changer tous les jours et toutes les heures (ex : un vol de Toronto à Vancouver peut être effectué dans l'espace aérien canadien, ou bien en survolant le nord des États-Unis).

52 L'Usine Nouvelle, *Entretien avec Yannick Assouad – Thales avionique* (décembre 2021).

53 Communication sur le site de Safety Line : <https://www.safety-line.fr/optiflight/>

Si d'autres critères peuvent entrer en ligne de compte (ex : ponctualité), les compagnies aériennes chercheront de manière générale à offrir les vols les plus économiques.

Autres pratiques notables

Au-delà des pratiques détaillées ci-dessus, d'autres plus ou moins accessibles présentent un potentiel de décarbonation intéressant. Il s'agit notamment de développer la possibilité pour les avions de voler en formation pour profiter de l'énergie de sillage. Une autre pratique consiste en l'utilisation des données de l'appareil pour transmettre des informations plus précises sur sa position et ainsi réduire les marges de sécurité en zones isolées et optimiser sa trajectoire.

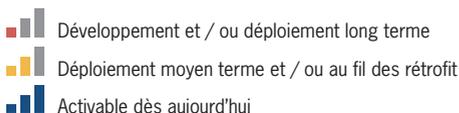
Optimisation des opérations au sol

L'optimisation des opérations au sol vise les émissions liées aux opérations des aéronefs, et en particulier les émissions liées au stationnement à la porte d'embarquement et aux mouvements associés entre la porte d'embarquement et la piste. En outre, cette catégorie prend en compte les émissions générées, par exemple, par les équipements d'assistance au sol (ex : tracteurs). Il convient de noter qu'en plus de réduire les émissions de CO₂, les mesures énumérées réduisent souvent également le bruit et d'autres émissions qui contribuent ainsi à améliorer la qualité de l'air local.

Cette catégorie de pratiques pourrait avoir un impact plus modéré sur la réduction des émissions de CO₂.

Panorama des pratiques d'optimisation des opérations au sol

Pratiques	Description	Accessibilité	Porteurs
Utilisation réduite des réacteurs lors du roulage	Ne pas utiliser l'ensemble des réacteurs pour le roulage mais seulement une partie quand l'avion n'est pas tracté par un appareil au sol : réduction de la consommation de carburant au sol		Compagnies aériennes
Installation de bornes électriques pour avion au niveau des embarquements	Favoriser l'utilisation des connexions électriques et d'air climatisé au sol pour limiter le recours à l'APU : réduction de la consommation de carburant associée		Aéroports
Conversion de la flotte au sol à l'électrique et / ou l'hydrogène	Convertir la flotte au sol pour remplacer l'utilisation de tracteurs thermiques pour le tractage sur piste à faible allure (valable sur des temps longs pour de très grands aéroports) : suppression de la consommation de carburant associée à la phase de roulage		Aéroports



Source : Waypoint 2050 ; Destination 2050 ;
 Analyses Archery Strategy Consulting.

Utilisation limitée des réacteurs lors du roulage

Au début et à la fin de chaque vol, l'avion doit se déplacer de l'aire de stationnement (tarmac) à la piste via les voies de circulation (taxiways) et vice versa. On parle de roulage lorsque l'avion se déplace par ses propres moyens ou de remorquage lorsqu'un autre véhicule est utilisé. Bien que la quantité de carburant consommée pendant le trajet au sol soit limitée par rapport à

celle consommée pendant le vol, il existe plusieurs moyens de réduire cette consommation.

Une option régulièrement appliquée aujourd'hui est le roulage à moteur réduit, dans lequel un ou plusieurs moteurs de l'avion sont arrêtés pendant une partie du roulage, le pilote démarrant les moteurs arrêtés à l'approche de la piste de décollage. Sur les bimoteurs, la possibilité d'utiliser un seul moteur dépend non seulement de l'existence d'une procédure émise par la compagnie aérienne⁵⁴, mais aussi des spécificités du terrain de l'aéroport (pente, virage...) :

- Le roulage sur un seul moteur est désormais une procédure normale sur la flotte d'A320 de British Airways, permettant d'économiser en moyenne 70 kg de carburant par roulage à Heathrow (ou 4 100 tonnes de carburant en 2014)⁵⁵.
- D'autres compagnies, comme Corsair International, pratiquent le roulage à moteur réduit, opération rendue possible par l'utilisation de logiciels (comme SkyBreathe de la société OpenAirlines évoqué plus haut) qui améliorent la connaissance de la physiologie de l'aéroport⁵⁶.

Le roulage avec un seul moteur a un impact positif non seulement sur la consommation de carburant et donc sur les émissions de CO₂, mais aussi sur l'empreinte sonore et la durée de vie des moteurs.

Utilisation limitée de l'APU lorsque l'avion est connecté au terminal

De nombreux équipements sont consommateurs d'électricité dans un avion et leur besoin est sans cesse croissant : instruments de navigation, calculateurs, commandes de vol, éclairages, climatisation, charges commerciales (ex : fours pour réchauffer les plateaux repas). Les circuits électriques d'un avion fonctionnent à 400 Hz⁵⁷, afin de limiter le poids des transformateurs nécessaires.

54 Single Engine Taxi Out (procédure au décollage), Single Engine Taxi In (procédure à l'arrivée).

55 Aviation Benefits Beyond Borders.

56 Corsair International, OpenAirlines.

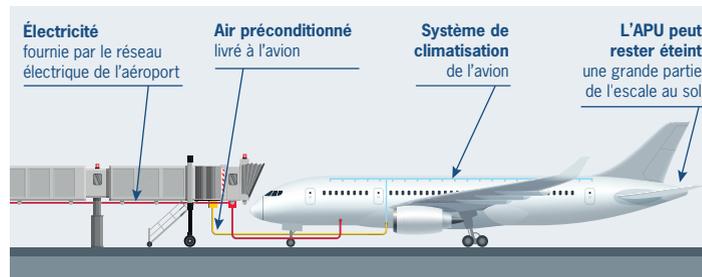
57 La fréquence est de 50Hz en Europe et de 60Hz aux États-Unis.

Le fonctionnement des moteurs en vol permet d'alimenter un générateur pour produire de l'électricité. Cependant, lorsqu'il est stationné, l'avion peut utiliser un autre équipement : l'APU. Il s'agit d'un petit moteur, généralement situé à l'arrière du fuselage, conçu notamment pour générer de l'électricité (tension de 115 V à 400 Hz) et compresser l'air afin d'alimenter les différents systèmes embarqués au sol, notamment la climatisation, lorsque les moteurs principaux sont arrêtés (l'APU peut également être utilisé en vol). Si le recours à ce petit moteur permet d'économiser du carburant, il consomme néanmoins également du kérosène⁵⁸.

L'APU étant nécessaire pour aider à démarrer les moteurs principaux, il peut néanmoins être mis en marche juste avant le départ de l'avion et rester éteint une grande partie de l'escale au sol :

- Pour alimenter l'avion en énergie électrique sans utiliser d'APU, il est possible de recourir à un système d'alimentation électrique au sol, soit mobile (GPU⁵⁹) soit fixe (FEGP⁶⁰). Si le GPU est dans la majorité des cas un générateur fonctionnant au diesel (émettant toutefois moins de CO₂ que l'APU car son rendement est meilleur), il peut parfois être un simple convertisseur. Dans ce dernier cas, comme dans le cas du FEPG, le système est connecté directement au réseau électrique local de l'aéroport, et peut éventuellement ne pas émettre de CO₂ en cas d'utilisation d'une alimentation électrique de source décarbonée.
- Pour compresser l'air, un système d'air conditionné basé au sol (PCA⁶¹) offre également une alternative intéressante à l'APU : étant alimentée par le réseau d'électricité, l'unité PCA réduit drastiquement les émissions de CO₂ (et la pollution acoustique).

Systèmes permettant de substituer l'utilisation de l'APU



Source : Aviation Benefits Beyond Borders.

Conversion de la flotte aéroportuaire à l'électrique ou à l'hydrogène

La conversion de la flotte aéroportuaire d'une motorisation thermique vers l'électrique et/ou l'hydrogène présente un potentiel intéressant de décarbonation des opérations au sol. Des solutions électriques et hybrides-électriques sont désormais commercialisées pour les tracteurs de remorquage pour les chariots à bagages, les camions avitailleurs en carburant ou encore les tracteurs de remorquage pour avions.

Cette conversion est en cours dans de nombreux aéroports avec pour objectif initial de réduire les pollutions locales. Pour les grands aéroports où la distance entre le terminal et le début de piste est importante, la réduction des émissions sera encore plus grande. En 2020, l'aéroport de Schiphol s'est engagé à s'équiper en TaxiBot⁶², qui permettront de réduire les émissions au sol de l'ordre de 50 à 65 % selon l'aéroport. Cinq ans plus tôt, la technologie avait été adoptée par Lufthansa à l'aéroport de Francfort, après une période de tests et de certification par l'EASA.

58 80 kg de kérosène pour un court-courrier en escale 45 minutes et 300 kg pour un long-courrier en escale 75 min (DGAC, 2007).

59 Ground Power Unit : Unité de puissance au sol.

60 Fixed Electrical Ground Power : Alimentation électrique fixe au sol.

61 Pre-Conditioned Air unit : Unité d'air préconditionné.

62 Les TaxiBot sont des véhicules semi-robotiques à motorisation hybride (diesel et électrique) contrôlés par le pilote de l'avion et dans lesquels s'insère la roulette de nez de l'avion afin de le tracter sur les taxiways tout moteur éteint. Les taxiways font référence aux voies de circulation de l'aérogare à la piste de décollage et de la piste d'atterrissage à l'aérogare.

S'agissant des camions aviateurs en carburant, Gaussin a développé l'ART Full Elec, en partenariat avec SAFT, qui est capable de tracter deux citernes de 30 t grâce à ses 100 kWh de batteries.

Amélioration des opérations / pratiques d'exploitation

Outre la façon dont un vol est planifié et exécuté, les compagnies aériennes ont un certain contrôle sur les paramètres opérationnels qui influent en particulier sur le poids de l'avion. Chaque kilogramme nécessitant le transport de carburant supplémentaire, la réduction du poids peut permettre de réaliser des économies importantes en termes de consommation de carburant et d'émissions de CO₂. C'est ce que vise le levier d'amélioration des opérations et pratiques d'exploitation.

Cette catégorie de pratiques pourrait avoir un impact plus modéré sur la réduction des émissions de CO₂. Elle intègre par exemple les améliorations suivantes : la limitation des pratiques de « tanking » en ajustant l'approvisionnement en carburant et eau au juste besoin, le nettoyage plus fréquent de l'avion et des moteurs pour éliminer toutes les particules susceptibles de dégrader la performance de l'appareil, l'allègement du poids des équipements en cabine (ex : chariots du personnel navigant, sièges des passagers).

Panorama des pratiques d'amélioration des opérations/pratiques d'exploitation

Pratiques	Description	Accessibilité	Porteurs
Ajuster l'approvisionnement en carburant et en eau au juste besoin	S'approvisionner en carburant et en eau par rapport au poids réel des passagers et des bagages et des conditions de vol rencontrées (notamment les vents) et arrêter les pratiques de tanking : réduction du poids embarqué		Compagnies aériennes
Maintien de la peinture extérieure dans des conditions optimales	Limiter la détérioration de la peinture extérieure pouvant entraîner des pertes sur des zones critiques par des vérifications / maintenances plus régulières : maintien de l'efficacité de l'avion et du niveau de consommation associé		Compagnies aériennes
Nettoyage extérieur	Limiter l'accumulation de particules sur les parois externes par des nettoyages plus réguliers : maintien de l'efficacité de l'avion et du niveau de consommation associé		Compagnies aériennes
Nettoyage moteur	Massifier l'utilisation de systèmes modernes permettant d'affiner le nettoyage des moteurs (supprimer plus de polluants) : limitation de l'augmentation de la température de fonctionnement des moteurs donc réduction de la consommation de carburant		Compagnies aériennes
Nettoyage des zones cabines / passagers / cargo	Limiter l'accumulation de particules à l'intérieur de l'avion (permet également de limiter les dégâts et coûts associés aux objets laissés) : maintien du poids de l'avion et du niveau de consommation associé		Compagnies aériennes

Pratiques	Description	Accessibilité	Porteurs
Remplacement des manuels par des tablettes	Remplacer les magazines, manuels, ... en papier lourd par des tablettes : réduction du poids		Compagnies aériennes
Allègement des équipements utilisés par le personnel navigant	Remplacer les équipements utilisés par le personnel navigant comme les chariots, armoires... par des équipements en matériel plus léger : réduction du poids		Compagnies aériennes
Allègement des sièges	Remplacer les sièges par des équivalents en matériel plus léger : réduction du poids		Compagnies aériennes
Allègement des conteneurs	Remplacer les conteneurs actuels utilisés par des compagnies par des équivalents en matériel plus léger : réduction du poids		Compagnies aériennes

- Développement et / ou déploiement long terme
- Déploiement moyen terme et / ou au fil des rétrofit
- Activable dès aujourd'hui

Source : Waypoint 2050 ; Destination 2050 ;
Analyses Archery Strategy Consulting.

3.2. Intermodalité train-avion

RECOMMANDATION 4 (France/UE/Monde)

Favoriser l'intermodalité pour les débuts/fins de parcours, en particulier en assurant des liaisons entre les principales gares ferroviaires et aéroports pour faciliter la transition et en mettant en place des parcours passagers intégrés.

L'intermodalité⁶³ train-avion désigne la possibilité pour un passager voyageant en avion d'effectuer le début et/ou la fin de son parcours en train (ex : trajet Bordeaux-Paris en TGV pour rejoindre le hub de Roissy pour un vol international) : l'avion émettant nettement plus de CO₂ que le train (surtout si ce dernier est alimenté par un réseau électrique décarboné), l'intermodalité train-avion minimise l'impact environnemental par rapport au même trajet empruntant un double itinéraire avion-avion (ex : Bordeaux-Paris en avion).

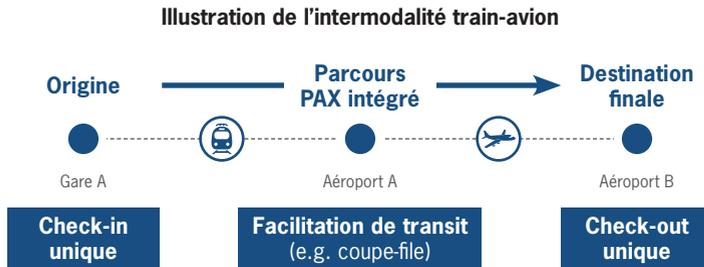
L'intermodalité train-avion fait sens en particulier dans les pays où le réseau ferroviaire maille le territoire, comme c'est déjà le cas dans certains pays d'Europe (ex : France, Allemagne) ou d'Asie (ex : Corée du Sud, Japon). Dans les faits, cette intermodalité est déjà une réalité en France grâce à l'existence d'une offre « Train + Air », fruit d'un partenariat entre la SNCF et une douzaine de compagnies aériennes (ex : Air Caraïbes, Air France, Emirates, etc.) : concrètement, ce service permet d'avoir un billet combiné pour partir de ~20 villes de province en train (ex : Avignon, Bordeaux, Lille) et prendre un vol long-courrier au départ des aéroports parisiens (Roissy et Orly). Si les enquêtes de satisfaction montrent que les voyageurs intermodaux sont satisfaits de la complémentarité train-avion, ces derniers restent cependant encore relativement peu nombreux en France même si leur nombre est en augmentation : l'intermodalité à Paris-CDG est ainsi passée de près de 2 % en 1999 à environ 5 % en 2014 (3,3 M de passagers sur un total de 61,4 M)⁶⁴. Des projets visent à améliorer l'intermodalité en France (ex : CDG express, reporté à 2027), mais certains grands aéroports métropolitains ne disposent pas encore d'une liaison ferroviaire directe (ex : aéroport Toulouse-Bagnac, Bordeaux-Mérignac, Marseille Provence – Marignane).

Les principaux critères de décision des voyageurs pour un billet combiné train-avion, plutôt qu'un billet avion-avion, sont d'abord le coût du voyage et sa durée (temps de trajet total, temps de correspondance). Pour devenir plus

63 L'intermodalité désigne la capacité d'un système de transport à permettre l'utilisation successive d'au moins deux modes de transport (ex : avion, train, voiture), intégrés dans une chaîne de déplacement.

64 DGAC, *Enquête complémentarité modale avion train* (2014).

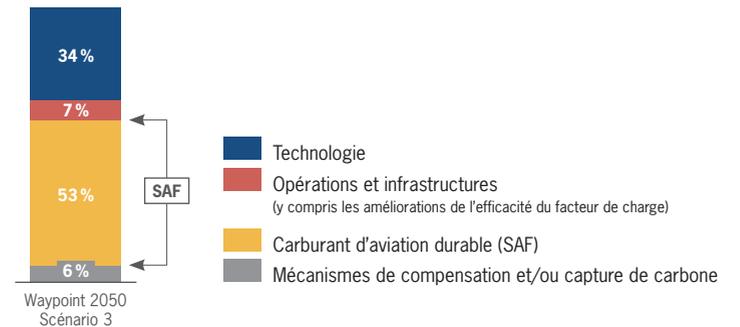
attractif au-delà de ces critères, le trajet train-avion doit être mieux intégré tant au niveau du parcours (check-in/check-out unique, suivi bagages de bout en bout, Information Voyageur intégrée synchronisée et cohérente, etc.) que du service client (ex : assurance voyage multimodale), sur le même modèle que le parcours avion-avion.



Source : Analyses Archery Strategy Consulting.

4. Le recours aux carburants d'aviation durables en grandes quantités est nécessaire pour atteindre l'objectif de décarbonation et contribue pour plus de 50 % à sa réalisation

Contribution des SAF à l'objectif de réduction des émissions de CO₂



Source : Waypoint 2050.

Les sections précédentes font ressortir que les deux premiers leviers d'amélioration (technologie, opérations en vol et au sol) ne permettent pas, seuls, d'atteindre l'objectif de décarbonation fixé par le secteur de l'aviation.

Les carburants durables d'aviation (SAF⁶⁵) représentent le levier principal de la trajectoire considérée (53%).

65 Sustainable Aviation Fuel.

4.1. Intérêt et fabrication des carburants d'aviation durables

Introduction

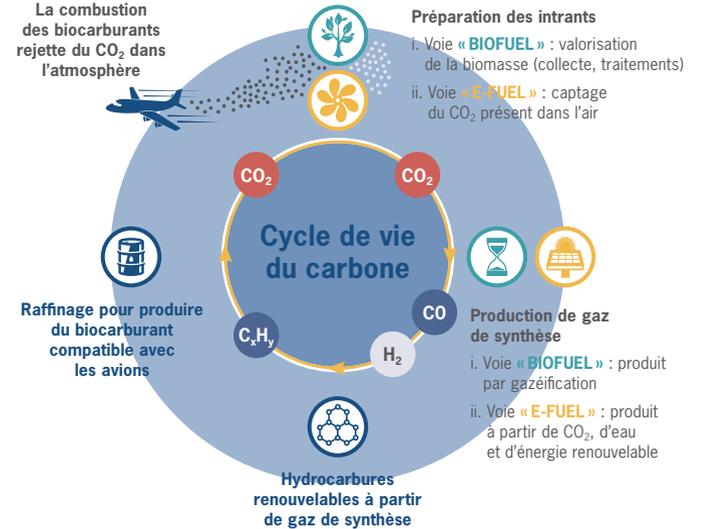
Le terme SAF désigne les carburants présentant trois caractéristiques essentielles :

- Ils répondent aux exigences techniques et de certification⁶⁶ requises pour une utilisation comme carburant dans les avions commerciaux ;
- Ils sont issus de matières premières alternatives au pétrole brut ; cela comprend toute matière ou substance renouvelable pouvant être utilisée comme combustible (huile de cuisson, huiles végétales, résidus agricoles...) ou la capture de CO₂ ;
- Leur utilisation est compatible avec les objectifs économiques, sociaux et environnementaux, tout en préservant un équilibre écologique permettant d'éviter l'épuisement des ressources naturelles (durabilité).

Lors de l'utilisation de SAF, la réduction de l'empreinte carbone ne provient pas d'un changement dans l'utilisation des carburants, puisqu'il s'agit également de chaînes carbonées dont la combustion produit autant de CO₂ que le kérosène, mais du processus d'extraction du carburant. En effet, le kérosène étant un produit du pétrole dont la formation date d'environ 20 à 350 millions d'années, l'extraction revient à libérer du carbone piégé en profondeur. À l'inverse, les matières premières nécessaires à la production des SAF (ex : algues, végétaux...) sont des « puits » de carbone dans le sens où elles absorbent du CO₂ présent en quantité dans l'atmosphère durant leur vie (via le procédé de photosynthèse). La combustion des SAF va donc libérer du CO₂ originellement déjà présent dans l'atmosphère : en conséquence, le cycle de vie complet présente dans le cadre des SAF un bilan carbone considérablement réduit.

⁶⁶ La certification des carburants d'aviation est délivrée par un organisme mondial de normalisation, l'ASTM (American Society for Testing Material). Cette certification de sécurité et de performance du carburant est requise pour qu'il soit utilisé sur les vols réguliers de passagers.

Cycle de vie du carbone, du captage dans l'air à la réémission par les avions



Source : Données publiques ; Analyses Archery Strategy Consulting.

Pour rappel, la stratégie de recours aux SAF sera différenciée selon la capacité à substituer les carburants fossiles par une alternative électrique ou hydrogène :

- Pour les vols régionaux, court et moyen-courriers : ces carburants sont un complément aux technologies hydrogène ou électrique ;
- Pour les vols long-courriers, ces carburants représentent l'essentiel de la décarbonation.

L'interchangeabilité des SAF avec le kérosène actuel (on parle de carburant « drop-in »⁶⁷) permet de limiter les modifications à apporter aux avions, moteurs et autres infrastructures aéroportuaires, accélérant ainsi la capacité à déployer cette solution largement et rapidement. Il s'agit d'une caractéristique majeure pour l'aviation : tout SAF qui ne remplit pas cette condition pourrait présenter des problèmes de sécurité liés au risque de mauvaise manipulation et nécessiterait la mise en place d'une infrastructure parallèle.

Si le taux d'utilisation des SAF dans les moteurs est aujourd'hui limité à 50 %, les motoristes visent à terme une utilisation à 100 % pour les moteurs mis en service à partir de 2030-35. Fin 2021, le motoriste américain Pratt & Whitney a présenté une évolution de son moteur GTF, le *GTF Advantage*⁶⁸, qui deviendra l'offre standard pour la famille Airbus A320neo à partir de 2024, et sera compatible avec un taux d'incorporation de SAF de 100 %. Les autres motoristes (Safran, Rolls-Royce) ont également entamé des essais pour atteindre cet objectif.

Typologies de SAF

Deux grandes catégories de SAF sont habituellement distinguées : les biocarburants (ou biofuels) et les carburants de synthèse (souvent appelés *e-fuels*, e-carburants ou PtL – *Power to Liquid*).

Biocarburants

Le biocarburant est produit à partir de la biomasse, et est généralement distingué selon 3 générations :

- Un biocarburant de 1^{re} génération est produit à partir d'intrants issus de cultures traditionnellement utilisées pour l'alimentation : le blé ou la betterave pour l'éthanol, le colza ou le tournesol pour le biodiesel... Si les biocarburants de 1^{re} génération sont aujourd'hui les plus répandus, notamment

en raison de gisements d'intrants plus importants et de coûts contenus, leur légitimité est contestée dans la mesure où ils peuvent contribuer à la déforestation, entrer en concurrence avec les terres arables (notamment avec l'agriculture vivrière) et participer à la hausse des prix des denrées alimentaires sur le marché mondial.

- La 2^e génération désigne les biocarburants produits à partir de résidus de l'activité humaine : résidus de bois et de forêts, résidus agricoles (tiges colza, paille...), déchets organiques, huiles de cuisine... Cette génération n'utilise que des matières végétales non valorisées par l'alimentation ou par l'industrie du bois (papeterie, meubles, construction). Si cette génération est mieux acceptée, le gisement est pour l'instant encore insuffisant en raison principalement d'un manque de collecte des résidus dans la plupart des pays.
- Enfin, la 3^e génération regroupe les carburants produits à partir de micro-organismes, tels que les microalgues, par photosynthèse ou voie fermentaire. Cette génération, comme la 2^e, n'entre pas en concurrence avec les usages alimentaires et fait l'objet d'importantes recherches à travers le monde afin de démontrer sa faisabilité à l'échelle industrielle. En effet, si cette biomasse marine constitue un gisement illimité dans les océans, elle est difficile à récolter et on lui préfère la culture en laboratoire, toutefois plus compliquée (fragilité des microalgues, besoins élevés en eau et phosphore, etc.). Par conséquent, la voie vers les biocarburants de 3^e génération est encore longue : il faudra non seulement améliorer l'industrialisation à grande échelle (productivité des souches, technologies de production...) mais aussi l'équation économique.

Les biocarburants de 2^e et 3^e génération sont parfois appelés « biocarburants avancés » (*advanced biofuels*), car ils répondent à la concurrence des biocarburants de 1^{ère} génération en matière d'utilisation des ressources alimentaires.

Carburants de synthèse

Le carburant de synthèse est produit à partir de dioxyde de carbone (CO₂) et d'hydrogène (H₂). Il présente l'avantage de n'avoir pour seule limite de production que la quantité d'électricité et d'eau disponible.

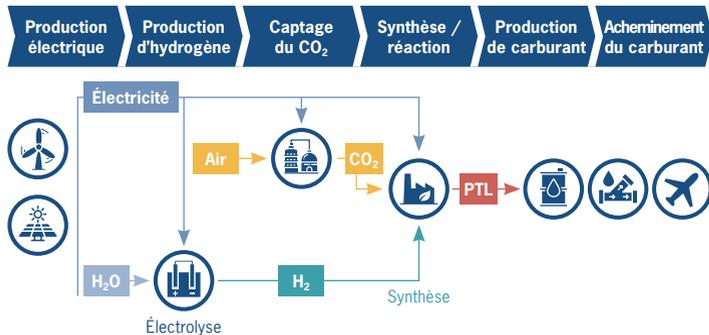
67 Un carburant « drop-in » est entièrement compatible/substituable avec le kérosène conventionnel.

68 Pratt & Whitney (pwgtf.com/advantage).

Pour produire du Carburant de Synthèse, 3 principales étapes sont nécessaires :

- Produire de l'hydrogène, via une électrolyse de l'eau⁶⁹ ;
- Capturer du CO₂, cela peut être réalisé à la sortie d'une usine (sidérurgie, cimenterie, raffinage, chimie et pétrochimie), ou directement dans l'air (DAC⁷⁰) ; on utilise pour cela des membranes qui captent le CO₂ qui en est extrait par la suite. La capture directe dans l'air est plus énergivore car les niveaux de concentration sont largement inférieurs à une sortie d'usine. Cependant, ce mode d'extraction sera essentiel à terme du fait qu'il permettra une réelle neutralité carbone (le CO₂ utilisé étant déjà présent dans l'air) et que les sources en sortie d'usine resteront limitées en volume et diminueront au fur et à mesure que l'industrie se décarbone ;
- Synthétiser le carburant à partir de l'hydrogène et du CO₂, le procédé le plus largement utilisé étant le procédé de Fischer-Tropsch.

Schéma de production du carburant de synthèse



Source : Données publiques ; Analyses Archery Strategy Consulting.

Approfondissements

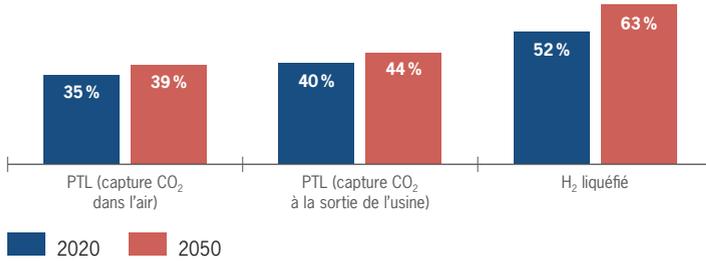
- À titre d'exemple, l'Islande a mis en route fin 2021 une usine (Orca) capable d'**aspirer le CO₂ dans l'air** et de le pétrifier dans la roche : équipée de 12 ventilateurs associés à des filtres et alimentée en énergie par une centrale d'électricité renouvelable voisine, la centrale permet de retirer près de 4 000 tonnes de CO₂ par an (soit la consommation de près de 870 voitures selon l'Agence américaine de protection de l'environnement).
- Le dihydrogène peut être produit non seulement par le procédé d'électrolyse de l'eau, mais aussi par le procédé de **vaporeformage** : un combustible fossile (ex : gaz naturel CH₄) est exposé à de la vapeur d'eau très chaude et libère ainsi de l'H₂ ainsi que du CO₂, ce dernier pouvant être réinjecté/emprisonné dans les puits de pétrole déplétés. Ce procédé est majoritaire aujourd'hui (~95 % du H₂ produit).

Le rendement de l'ensemble de ce procédé est relativement faible, estimé en cible à environ 40 % (énergie contenue dans le SAF par rapport à l'énergie électrique en entrée). Dès lors, la quantité d'énergie décarbonée nécessaire pour produire ce type de carburant est extrêmement importante. La production de biocarburant nécessitant peu d'électricité et l'hydrogène étant près de 40 % plus efficace à produire, ces deux voies pourront être privilégiées.

69 Décomposition de l'eau (H₂O) en dioxygène (O₂) et hydrogène (H₂) grâce à un courant électrique (2H₂O → 2H₂ + O₂).

70 Direct Air Capture : capture directe du CO₂.

Comparaison des rendements de production selon les procédés



Source : Données publiques ;
modélisation Analyses Archery Strategy Consulting.

- du carburant de synthèse en appliquant des traitements additionnels au combustible synthétique liquide issu du procédé PtL.
- AtJ⁷³ (TRL 6-7) : ce procédé est basé sur la transformation de certaines matières premières en alcool (isobutanol ou éthanol), qui est ensuite traité et valorisé en biocarburant ; de même que pour le procédé FT, le carburant obtenu peut être soit du biocarburant (par fermentation des sucres, de l'amidon...) soit du carburant de synthèse (traitement du combustible issu du procédé PtL).

Procédés de production des SAF⁷⁴

MATIÈRES PREMIÈRES	TRAITEMENT PRÉALABLE	PROCÉDÉ CERTIFIÉ PAR L'ASTM
Huiles • Biocarburants 1 ^{re} génération : colza, soja... • 2 ^e génération : huiles de cuisson usagées, graisses animales usagées... • 3 ^e génération : algues		HEFA
Résidus forestiers et agricoles, déchets solides municipaux (biocarburants 2^e génération)		AtJ ou FT
Gaz d'échappement industriels	PtL	
Captage du CO₂ dans l'atmosphère (DAC)		

Source : Données publiques ; Analyses Archery Strategy Consulting.

Filière de production

Procédés de production

Si plusieurs procédés de production de SAF sont déjà certifiés par l'ASTM, ou font actuellement l'objet de tests en vue d'une certification, il en existe trois principaux, plus ou moins matures :

- HEFA⁷¹ (TRL 8-9) : production de biocarburant par la valorisation des huiles (huiles végétales, huiles de cuisson usagées, graisses animales usagées ou suifs...); ce procédé est largement dominant dans la production actuelle.
- Fischer-Tropsch⁷² (TRL 7-8 – « FT ») : ce procédé utilise des matières premières pour produire du gaz de synthèse, qui est ensuite converti en carburant ; ce carburant peut-être soit :
 - du biocarburant par valorisation/fermentation directe de la biomasse (résidus forestiers et agricoles, déchets solides municipaux...);

71 Hydroprocessed Esters and Fatty Acids.
72 Du nom de 2 chercheurs allemands (Franz Fischer et Hans Tropsch), dont le 1^{er} brevet (1923) visait à valoriser le charbon.

73 Alcohol to Jet.
74 AtJ = Alcohol to Jet; FT = Fischer-Tropsch; PtL = Power to Liquid.

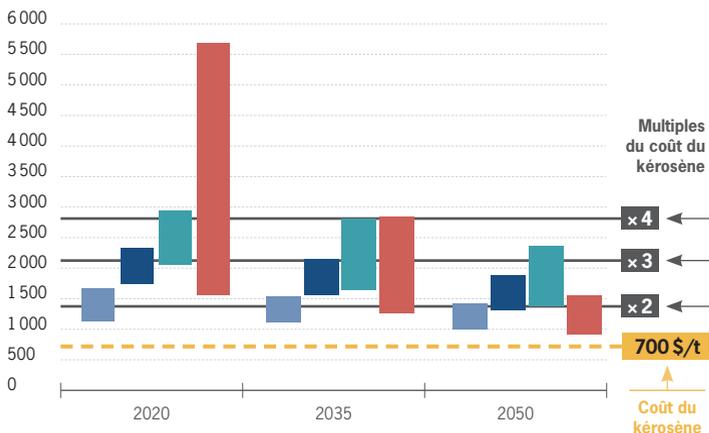
Coût de production

Quelle que soit la filière choisie, le passage à l'échelle industrielle peut poser une série de défis, certaines matières premières pouvant être difficiles à collecter en quantités suffisantes (disponibilité, logistique), et certains procédés pouvant nécessiter une maturation supplémentaire avant de devenir pleinement opérationnels (efforts de R&D).

Les différentes estimations des coûts de production, quelle que soit la filière de production choisie, montrent un coût supérieur à celui du kérosène fossile aux prix actuels (hors intégration d'un coût du carbone pour celui-ci).

Comparaison des coûts de production selon le procédé

(Unité : dollars par tonne de biocarburant)



Biocarburant : HEFA (blue), Gazéification/FT (dark blue), Alcool-to-jet (teal)
Carburant de synthèse : Power-to-liquid (PTL) (red)

Coût kérosène ~700\$ par tonne (calcul pour un coût ~60\$ / baril)

Source : Clean Skies for Tomorrow ; WEF ; Destination 2050 ; Analyses Archery Strategy Consulting.

En outre, les tarifs constatés par certaines compagnies sont plus élevés que ceux affichés : c'est notamment le cas d'Air France qui évoque un coût 4 à 8 fois supérieur au coût du kérosène, du fait d'un coût de production des SAF, notamment via le procédé HEFA, encore élevé⁷⁵.

La production de SAF via le procédé HEFA, par exemple, exige des coûts initiaux plus faibles pour les infrastructures (CAPEX) mais des coûts récurrents plus élevés pour les matières premières (OPEX) : elle est donc peu propice aux économies d'échelle. À l'inverse, celle via le procédé FT exige des coûts initiaux d'infrastructures considérables (CAPEX) mais des coûts récurrents très faibles pour les matières premières (OPEX).

Transport et distribution

La filière de production des SAF rassemble une grande diversité d'acteurs : agriculteurs / industriels de l'agroalimentaire pour les intrants de 1^{re} génération (ex : le groupe coopératif sucrier français Tereos) ; gestionnaires de déchets pour les intrants de 2^e génération (ex : Veolia et Suez) ; compagnies pétrolières (ex : TotalEnergies ou Neste⁷⁶)...

À titre d'exemple⁷⁷, TotalEnergies produit du SAF à la bioraffinerie de La Mède (Bouches-du-Rhône) et sur le site d'Oudalle (Seine-Maritime), spécialisé dans les lubrifiants. Des investissements devraient permettre au pétrolier français de produire également des SAF sur son site de Grandpuits (Seine-et-Marne). Le groupe a annoncé par ailleurs que l'ensemble des SAF seraient produits à partir de déchets et résidus issus de l'économie circulaire (graisses animales, huiles de cuisson usagées...).

La distribution des carburants d'aviation comprend une partie amont desservant les aéroports et une logistique à l'intérieur des aéroports. Les compagnies aériennes négocient des contrats d'approvisionnement avec les

⁷⁵ Communication Air France à l'AFP (janvier 2022).

⁷⁶ Entreprise finlandaise spécialisée dans le raffinage, et détenue à 50,1 % par l'État finlandais.

⁷⁷ TotalEnergies (communiqué du 8 avril 2021).

distributeurs, par exemple Shell Aviation ou Air BP, qui assurent ensuite le transport depuis les raffineries de production jusqu'aux dépôts de carburant dans les aéroports. Les aéroports approvisionnés en SAF doivent mettre en place une gestion différenciée des 2 flux de carburant (kérosène classique et SAF), et en assurer la traçabilité. En outre, des installations de mélange doivent être prévues afin d'incorporer le SAF au kérosène.

En 2019, 5 aéroports étaient approvisionnés en permanence en SAF (Bergen, Brisbane, Los Angeles, Oslo et Stockholm) alors que d'autres offrent un approvisionnement occasionnel⁷⁸. Les 100 premiers aéroports représentant plus de 50 % du trafic mondial (en nombre de passagers)⁷⁹, la mise à disposition de SAF dans un nombre limité d'aéroports pourrait permettre de répondre à une grande partie de la demande.

4.2. Clarifier la définition des SAF

Se doter de critères partagés pour les SAF

RECOMMANDATION 5A (Monde)

Mettre en place des critères de durabilité des SAF partagés par tous les pays, définis par l'OACI, tant en ce qui concerne le type de matière première utilisée que le niveau de réduction des émissions sur le cycle de vie du carburant.

Si la définition d'un SAF est claire d'un point de vue technique, elle n'a pas été définie d'un point de vue environnemental ou éthique. Par exemple, aux États-Unis, un carburant est considéré comme SAF lorsqu'il permet une réduction de 50 % des émissions sur le cycle de vie, alors qu'en Europe, ce seuil est fixé à 65 %.

⁷⁸ Agence Internationale de l'Énergie.
⁷⁹ Airports Council International (2017).

En outre, certains intrants/processus sont moins efficaces que d'autres pour réduire les émissions de CO₂ par rapport au kérosène : alors que les résidus agricoles ou forestiers peuvent réduire les émissions de CO₂ de près de 90 %, l'huile de palme ne peut le faire qu'à hauteur de 33 % dans certaines conditions (notamment lorsque des bassins ouverts sont utilisés comme c'est parfois le cas en Indonésie ou en Malaisie)⁸⁰ et son exploitation contribue dans certains cas à la déforestation.

Il est donc essentiel de se doter d'un cadre commun, au niveau de l'OACI, afin de limiter les effets secondaires dommageables du développement des SAF et d'assurer une concurrence équitable entre les acteurs de la filière SAF.

Enfin, pour le cas de la France, la prédominance du nucléaire dans le mix énergétique nécessite de s'assurer que les carburants de synthèse et l'hydrogène produits dans l'hexagone soient bien considérés comme faiblement carbonés.

Intégrer l'hydrogène dans la définition des SAF

RECOMMANDATION 5B (France/UE)

Intégrer l'hydrogène dans la définition des SAF afin de permettre le développement de toutes les filières contribuant à la décarbonation du transport aérien.

Si les SAF sont susceptibles de jouer un rôle majeur dans la décarbonation du transport aérien, les vecteurs énergétiques mentionnés précédemment, tels que l'hydrogène, ont également un rôle à jouer lorsqu'ils sont produits de manière propre et durable.

À ce titre, il serait utile d'attribuer à l'hydrogène un équivalent massique en SAF proportionnel à l'efficacité de la chaîne de propulsion associée.

⁸⁰ Destination 2050.

Cela permettrait d'assurer son développement favorisé par les mesures évoquées dans le présent rapport.

4.3. Sécuriser la demande

RECOMMANDATION 5C (UE/MONDE)

Développer l'obligation d'incorporation de SAF sur l'ensemble des géographies, sur le modèle de ce qui a été initié en Europe avec Refuel EU ; en Europe, faire évoluer la cible à 2050 au-delà des 63 % prévus par Refuel EU Aviation en fonction du rythme d'activation et de l'intensité des différents leviers de décarbonation.

Pour accélérer le développement des SAF il est nécessaire de donner de la visibilité sur la demande aux porteurs de projets. À ce titre, des incitations et des réglementations, sont définies (ou en cours de définition), au niveau national ou international :

- Seuls trois pays dans le monde ont rendu obligatoire l'incorporation de SAF au 1^{er} janvier 2022 : la Norvège (depuis 2020), la Suède (depuis 2021) et la France (depuis 2022). S'agissant des deux premiers pays cités, leur réglementation impose un mélange de 1 % de SAF avec du kérosène conventionnel pour tout avion se ravitaillant sur leur territoire, avec pour cible une obligation de 30 % de SAF d'ici 2030. La France a également défini sa stratégie pour les biocarburants, qui prévoit une obligation d'incorporation de SAF au départ de l'Hexagone selon une trajectoire « ambitieuse mais réaliste »⁸¹ : 1 % en 2022, 2 % en 2025, 5 % en 2030 et 50 % en 2050.
- À l'échelle européenne, une trajectoire volontaire à l'horizon 2050 a été élaborée dans le cadre de l'initiative *ReFuel EU Aviation*. Ce dispositif, dont une proposition sera prochainement présentée à la Commission Européenne,

sera valable uniquement pour les vols au départ d'aéroports européens. Si le pourcentage obligatoire d'incorporation de SAF est relativement faible à court-terme (part minimale en volume de 2 % de SAF en 2025 et 5 % en 2030), il va progressivement prendre de l'importance d'ici 2050 (part minimale en volume de 63 % de SAF, dont une part minimale de d'e-fuels de 28 %⁸²).

- Enfin, le Royaume-Uni, l'Indonésie et le Brésil envisagent aussi d'obliger l'incorporation de SAF.

Par ailleurs, d'autres pays se concentrent actuellement sur des subventions à la production/consommation de SAF

- États-Unis⁸³ : le congrès américain a introduit le *Sustainable Skies Act* en mai 2021, visant à renforcer les incitations à l'utilisation des SAF (crédit de 1,50 à 2 \$/gallon pour les mélangeurs, en fonction des performances en termes de réduction des gaz à effet de serre, le minimum étant fixé à 50 %), à exiger que les SAF éligibles utilisent l'ensemble des critères de durabilité de l'OACI, et à accorder une subvention de 1 Md\$ sur 5 ans pour augmenter le nombre d'installations de production de SAF. En septembre 2021, les États-Unis ont annoncé un nouvel objectif visant à porter la production de SAF à au moins 3 milliards de gallons par an d'ici à 2030, ainsi qu'une hausse du soutien financier à 4,3 Md\$ pour soutenir les projets/producteurs de SAF⁸⁴.
- Royaume-Uni⁸⁵ : le gouvernement britannique a publié sa stratégie *Net Zero* en octobre 2021, annonçant un engagement de 180 M£ pour soutenir le développement de la production de SAF. Il prévoit en outre une obligation d'incorporation de SAF à partir de 2025 (1 %, puis 3 % en 2030 et 6 % en 2035).

82 Commission européenne, *Projet ReFuel EU Aviation* (juillet 2021).

83 IATA, *Fact Sheet: EU and US policy approaches to advance SAF production* (octobre 2021).

84 The White House, *Fact Sheet: Biden Administration Advances the Future of Sustainable Fuels in American Aviation* (septembre 2021).

85 HM Government, *Net Zero Strategy: Build Back Greener* (Octobre 2021).

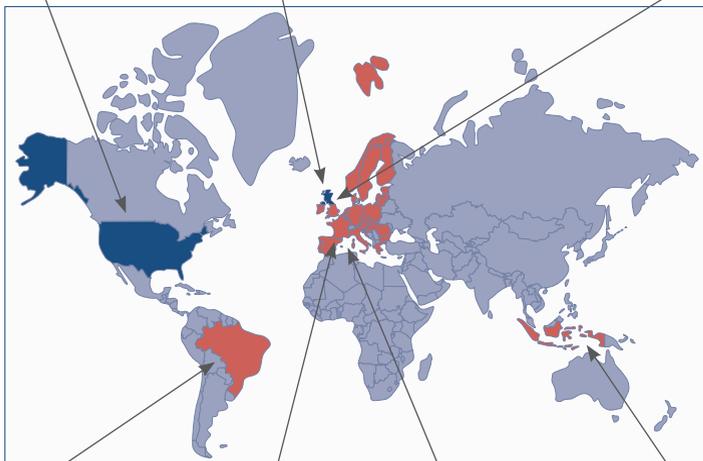
81 Ministères, *Feuille de route française pour le déploiement des biocarburants aéronautiques durables* (2020).

Panorama des incitations à l'utilisation du SAF dans le monde

US : SAF Tax Credit (1,5-2\$/gallon) + SAF Act (4,3 Md \$ de subventions pour infras)

UK : Renewable Transport Fuel Obligation (RTFO) : récompense la production de SAF sur les mêmes bases que les véhicules routiers

UK : Obligation d'incorporation SAF d'ici 2025



Brésil : Politique « RenovaBio » pour la décarbonisation des carburants. Le comité « Future Fuels » explore d'autres incitations SAF

France :

- 1 % en 2022
- 2 % en 2025
- 5 % en 2030
- 50 % en 2050

EU : Refuel-EU

- 2 % SAF en 2025
- 5 % SAF en 2030
- 20 % SAF en 2035
- 32 % SAF en 2040
- 38 % SAF en 2045
- 63 % SAF en 2050

Indonésie : Obligation d'incorporation de SAF de 5 % en 2025

■ Subvention à la production / consommation
■ Obligation d'incorporation

Sources : Données publiques ; Analyses Archery Strategy Consulting.

Afin d'encourager une plus grande utilisation du SAF dans l'aviation, il serait bénéfique que des systèmes similaires à celui proposé par l'Europe voient le jour dans les régions qui ne les proposent pas actuellement.

En Europe, si la trajectoire définie dans le cadre de Refuel EU est ambitieuse compte-tenu de la maturité de la filière aujourd'hui tant sur l'offre que sur la demande (cible d'incorporation de SAF de 63 %), elle ne permet cependant pas d'atteindre l'objectif de neutralité carbone en 2050 : ce taux d'incorporation de SAF devra progressivement être augmenté d'ici 2050, et ce au niveau mondial.

4.4. Soutenir l'offre pour créer un marché des SAF compétitif en Europe

Faire monter en maturité industrielle les technologies de production de SAF

RECOMMANDATION 6A (France/UE)

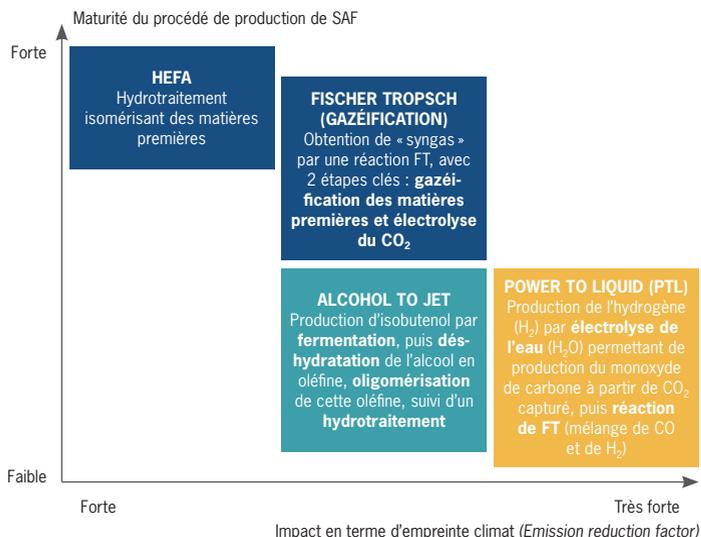
Financer des projets de démonstrateurs sur différentes technologies, dont les biocarburants et les carburants de synthèse, en utilisant notamment les fonds de l'EU-ETS.

À court terme, la filière HEFA s'appuie sur une technologie mature (TRL 8-9⁸⁶), bien maîtrisée et déjà déployée à l'échelle industrielle dans le monde. Pour cette raison, la production de biocarburants par cette voie est aujourd'hui prépondérante. Par exemple, la transformation de sa raffinerie de La Mède en bioraffinerie devrait permettre à Total, à partir de déchets valorisés selon le procédé HEFA, de produire du carburant d'aviation. Cependant, le développement de ce procédé est limité par les faibles quantités de matières premières disponibles. À terme, cette technologie ne devrait fournir qu'une faible proportion des volumes de SAF.

86 Destination 2050.

Dans une perspective plus lointaine, les procédés Gazéification/ Fischer-Tropsch (TRL 7-8) ou Alcohol-to-Jet (TRL 6-7) permettraient d'exploiter des volumes plus importants en mobilisant d'autres types de ressources. Le financement de projets de démonstrateurs doit permettre de créer les conditions de la montée en maturité industrielle de ces différentes filières.

Comparaison des procédés de production de SAF, en termes de maturité et bénéfice espéré



Source : Analyses Archery Strategy Consulting.

En France, le projet pilote BioTfuel⁸⁷ lancé en 2010, réunissant un consortium d'acteurs autour de Total et financé en partie par le fonds démonstrateur de recherche de l'ADEME (à hauteur de 30 M€), doit permettre de valider la transposition de la voie FT à l'échelle industrielle avec pour objectif une mise sur le marché début 2022. Citons également le projet Futurol financé par la BPI (à

hauteur de 30 M€), qui a permis de démontrer la faisabilité technique d'un procédé de production de bioéthanol à grande échelle : commercialisé par Axens (filiale de l'IFPEN), une première licence a été accordée à la compagnie pétrolière croate INA et devrait permettre la production de 55 000 tonnes de bioéthanol⁸⁸.

Les fonds du système européen d'échange de quotas d'émission (EU-ETS⁸⁹) pourraient également être utilisés pour financer des projets de démonstration sur les biocarburants et les carburants de synthèse. À titre d'exemple, le Fonds démonstrateur européen NER 300 (*New Entrants' Reserve*), créé en 2009 et alimenté par les recettes de 300 millions de quotas d'émission de l'EU-ETS (soit 2,1 Md€⁹⁰), a financé plusieurs projets de démonstration innovants en matière d'énergie à faible émission de carbone en France et en Europe. Son successeur, le Fonds à l'Innovation (Innovation Fund), est doté de 450 millions de quotas d'émissions (+50 %) et bénéficiera également des fonds non dépensés par NER 300.

Accompagner le démarrage de la filière SAF en Europe

RECOMMANDATION 6B (France/UE)

Pour initier le développement de la filière en Europe et sécuriser le lancement des premières unités de production, mettre en place des Appels à Projets (prix garanti) et assurer la compétitivité des SAF produits en Europe pendant les premières années (subvention).

RECOMMANDATION 6C (UE)

Adapter dynamiquement la trajectoire d'incorporation des SAF définie dans le cadre de Refuel EU Aviation, afin d'éviter les effets de pallier et d'être cohérent avec l'environnement industriel ; à cet égard, une augmentation de l'ambition à l'horizon 2030 pourrait être envisagée.

88 Formule verte, Axens commercialise pour la première fois son procédé Futurol (mars 2020).

89 European Union Emission Trading Scheme : bourse d'échange européenne permettant à chaque entreprise d'acheter ou de vendre des quotas d'émission CO₂.

90 Ministère de la Transition écologique (2021).

87 Total, BioTfuel : vers un développement des biocarburants de 2^e génération.

RECOMMANDATION 6D (UE)

Pour maximiser les volumes de production, mettre en place des incitations (ex : crédits d'impôts) pour compenser le surcoût entre les SAF et le kérosène pour les injections au-delà des obligations d'incorporation.

Des partenariats sont annoncés entre énergéticiens, compagnies aériennes et industriels : citons le partenariat stratégique⁹¹ signé entre TotalEnergies et Safran en 2021, qui vise à améliorer la compatibilité entre les SAF et les moteurs d'avions et permettre un taux d'incorporation de 100%. La même année, Boeing a conclu un partenariat avec SkyNRG Americas en vue d'améliorer la disponibilité des SAF et a annoncé investir dans la première usine de production de SAF dédiée aux États-Unis de son partenaire.

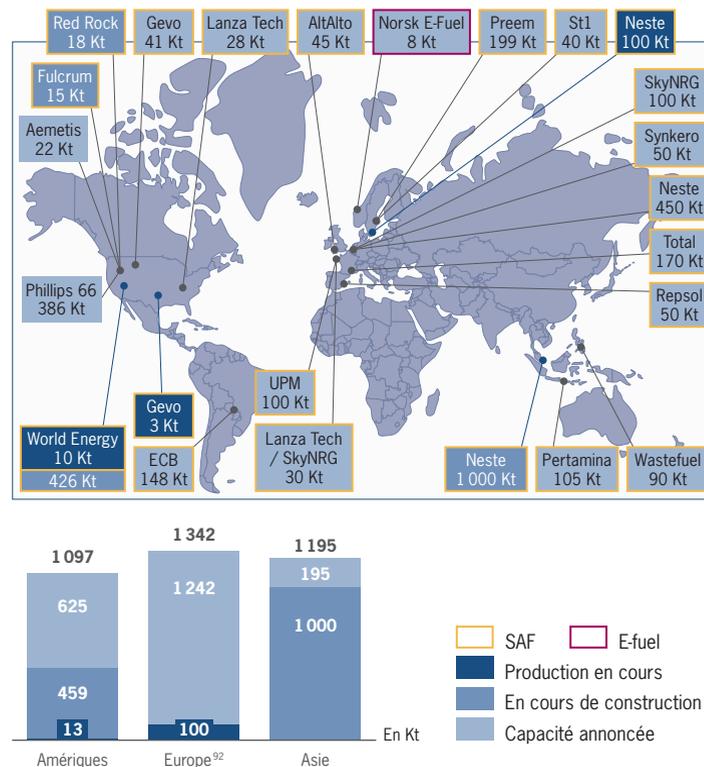
Néanmoins, la filière actuelle de production de SAF est encore très peu développée au niveau international. Les acteurs aéronautiques et de l'énergie sont dans une situation d'attente sans vision encore affirmée du positionnement de chacun dans cette nouvelle filière.

La production mondiale de biocarburants en 2021 est d'environ 100 000 tonnes ; comme évoqué précédemment, la technologie HEFA est actuellement la seule technologie qui a fait ses preuves à l'échelle commerciale (production de plus de 100 kt par an). En incluant les unités en construction, et les capacités annoncées, cette production pourrait atteindre 3,6 millions de tonnes par an, soit environ 1 % des besoins en kérosène du secteur (environ 350 Mtoe en 2018). La moitié de ces capacités est portée par Neste (en Europe et en Malaisie) et World Energy (aux États-Unis). Si les projets de construction de nouvelles unités sont nombreux, l'offre reste largement inférieure à la demande.

91 L'Usine Nouvelle, Safran et TotalEnergies s'allient pour faire décoller les carburants durables (septembre 2021).

Panorama des capacités de production de SAF existantes et annoncées

(Mars 2021)



Source : SkyNRG – WDB Action Programme ;
Analyses Archery Strategy Consulting.

92 Europe : 2,3 mt/an potentiel de prod. SAF, mais utilisés pour d'autres outputs actuellement.

On peut également noter que la majorité des capacités installées ou en cours de construction sont situées sur les continents américain et asiatique.

Afin de sécuriser les *business plans* des porteurs de projet, et donc le développement de nouvelles capacités de production, il est nécessaire de donner aux producteurs de SAF une visibilité sur la demande à long terme, afin qu'ils puissent investir en confiance dans l'outil de production :

- en volume, l'obligation d'incorporation garantit une demande importante et croissante des compagnies aériennes sécurisant cette dimension ;
- en valeur, de fortes incertitudes pèsent sur les baisses de prix anticipées pour les différents SAF avec un risque de perte de compétitivité à moyen terme.

Pour répondre à cette contrainte, des dispositifs type Appel à Projets peuvent permettre de renforcer la visibilité : l'industriel souhaitant investir dans une unité de production SAF voit son revenu garanti sur une longue période (ex : 10 ans), ce qui lui permet de sécuriser son *business plans*. Ce type de dispositifs a particulièrement été utilisé pour le développement des énergies renouvelables (solaire photovoltaïque, éolien, biométhane, etc.).

L'expérience des biocarburants routiers a montré par le passé les risques de déséquilibre entre les plaques géographiques, l'Union européenne ayant dû faire face à une concurrence extra-européenne très compétitive, qu'il s'agisse de bioéthanol originaire des États-Unis ou de biodiesel importé d'Argentine⁹³.

En particulier, le biodiesel produit en Argentine à partir de soja étant plus compétitif que le biodiesel européen produit à partir de colza, cela a provoqué un afflux de biodiesel argentin en Europe, ce qui a par ailleurs lourdement pénalisé les producteurs européens, le leader tricolore Avril ayant même été contraint de réduire temporairement sa production et de placer cinq usines au chômage technique. Les subventions accordées en Europe au biodiesel ont davantage servi les intérêts de l'industrie argentine que ceux de l'industrie

européenne. Cette situation a conduit à l'instauration en 2019 de droits compensateurs anti-subsidiation sur le biodiesel pur ou mélangé en provenance d'Argentine.

D'ailleurs, les grands producteurs de biocarburants routiers comme le Brésil, l'Argentine ou l'Indonésie ont développé leur secteur « biocarburants » en tenant compte non seulement de leur consommation intérieure mais aussi des perspectives de débouchés sur les marchés nord-américain et européen, avec une intention d'exporter massivement vers ces centres de consommation.

En outre, l'Europe bénéficie d'une surface agricole limitée par rapport à d'autres géographies, ce qui rend nécessaire l'utilisation de carburants plus coûteux à produire (utilisation de déchets ou carburants de synthèse).

Le corollaire de cette situation est que si l'Europe n'agit pas maintenant pour dynamiser sa filière SAF, il lui sera difficile de rattraper son retard par la suite, et elle s'exposera à devoir importer massivement pour répondre à la demande de l'industrie en carburants propres, le surcoût lié à l'incorporation de SAF et supporté par le passager européen n'alimentant pas l'économie européenne mais celles d'autres géographies.

Afin d'assurer l'indépendance de l'Europe sur son approvisionnement en SAF, il est essentiel que dans l'attente d'un équilibrage des prix lié à la montée en maturité et en volume des différentes méthodes de production, la filière soit soutenue. Cela pourrait passer par exemple par des subventions permettant d'équilibrer le coût de production ou de vente des SAF en Europe avec le marché international.

93 Assemblée Nationale, *Rapport d'information sur les agrocarburants* (22 janvier 2020).

Financement d'un dispositif de subvention des SAF équivalent à celui envisagé aux États-Unis

Principe : la subvention permet à une entreprise de bénéficier d'un soutien des pouvoirs publics et peut prendre différentes formes (tarif d'achats, compléments de rémunération, etc.). Il est proposé ici de reproduire le dispositif mis en place par les États-Unis, qui d'une part facilite la création de nouvelles unités de production (subvention d'investissement) et d'autre part soutient la production non compétitive de SAF au prorata des volumes produits (subvention d'exploitation).

Périmètre d'applicabilité : cette disposition est applicable à une échelle supranationale (ex : États membres de l'UE).

Coût annuel : 1 milliard d'euros par an en 2025 puis 2,2 milliards d'euros par an en 2030 à l'échelle de l'Europe.

Hypothèses :

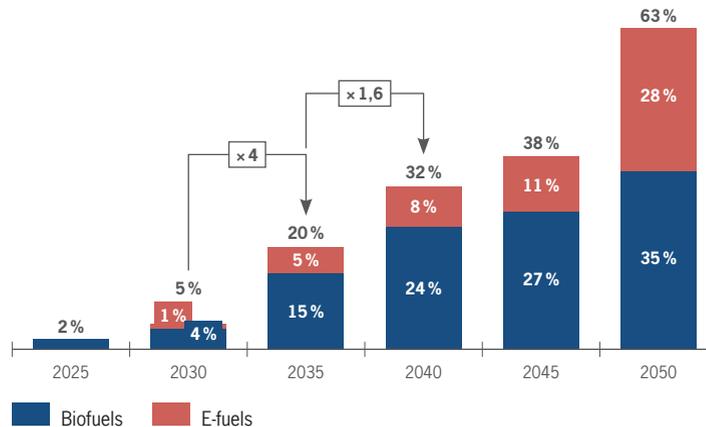
- Consommation de carburant d'aviation / kérosène dans l'UE⁹⁴ : 55,5 Mt (2025) – 71,1 Mt (2035) ; extrapolation linéaire : 63,3 Mt (2030)
- Taux d'incorporation de SAF (ReFuel IEU Aviation) : 2% (2025) – 5% (2030)
- Subvention d'investissement USA : 4,3 milliards de dollars (2021–2030) ; subvention d'exploitation : 1,5 à 2\$/ gallon (1 gallon ~ 3,8 L)
- Taux de change (2021) : 1 € = 1,13\$

La trajectoire d'incorporation du SAF envisagée par l'initiative ReFuel EU Aviation semble très ambitieuse (avec, par exemple, une multiplication par 4 du taux d'incorporation de SAF entre 2030 et 2035). Si les conditions sont réunies pour enclencher une dynamique d'investissements favorable à l'émergence

d'une filière SAF, il faudra également accepter le risque de générer des surcapacités locales. Si tel était le cas, ce qui reste très hypothétique, il reviendrait aux autorités de mettre en place le dispositif permettant d'absorber ces surplus sans que les producteurs en pâtissent (ex : subventions).

Trajectoire d'incorporation de SAF telle qu'envisagée par l'Europe

(% d'incorporation au kérosène)



Source : ReFuelEU Aviation ; Analyses Archery Strategy Consulting.

Afin d'assurer le niveau d'ambition de la trajectoire d'incorporation fixée par Refuel EU, l'ensemble des capacités disponibles doivent être mobilisées et les projets ne doivent pas être retardés. Ainsi, il est proposé de mettre en place des dispositifs incitatifs type crédit d'impôts pour les compagnies qui incorporeraient davantage de SAF que les objectifs fixés dans le cadre de Refuel EU. Cela permettra d'assurer des débouchés à toute capacité de production additionnelle et de lisser la trajectoire d'incorporation en évitant un effet pallier.

94 ICCT, *Estimating sustainable aviation fuel feedstock availability to meet growing European Union demand* (Mars 2021).

4.5 Limiter les distorsions de concurrence

RECOMMANDATION 7A (UE/Monde)

À court-terme, mettre en place un mécanisme européen de compensation s'appliquant à tous les trajets au départ de l'UE et proportionnel à la distance parcourue par chaque passager pour subventionner l'incorporation de SAF sans surcoût par rapport au kérosène, afin d'éviter les distorsions de concurrence et les risques de fuite de carbone au profit de parcours hors UE non soumis aux mêmes obligations d'incorporation de SAF.

RECOMMANDATION 7B (UE/Monde)

À moyen terme, permettre des vitesses différentes de mise en œuvre des obligations d'incorporation de SAF entre les géographies/pays sans distorsion de concurrence entre les hubs/compagnies aériennes ; adosser l'obligation d'incorporation de SAF au point d'origine de chaque passager et sur l'ensemble de son parcours.

RECOMMANDATION 7C (UE/Monde)

À long-terme, mettre en place des obligations d'incorporation de SAF uniformes au niveau de l'OACI.

Les coûts des SAF resteront plus élevés que ceux du kérosène actuel, en raison de très lourds investissements (R&D, logistique d'approvisionnement en matières premières, construction de nouvelles installations de fabrication, etc.), mais les économies d'échelle et la maturation des différentes technologies devraient entraîner à terme une baisse significative des prix.

Pour illustrer le propos : avec un pétrole à ~700 \$/tonne, le coût de production du SAF en 2035 sera 2 à 4 fois plus élevé que celui du kérosène.

Prenons maintenant l'exemple d'un vol Paris – Singapour :

Modélisation de l'impact de l'incorporation de SAF sur le prix d'un billet pour un Paris – Singapour en 2035

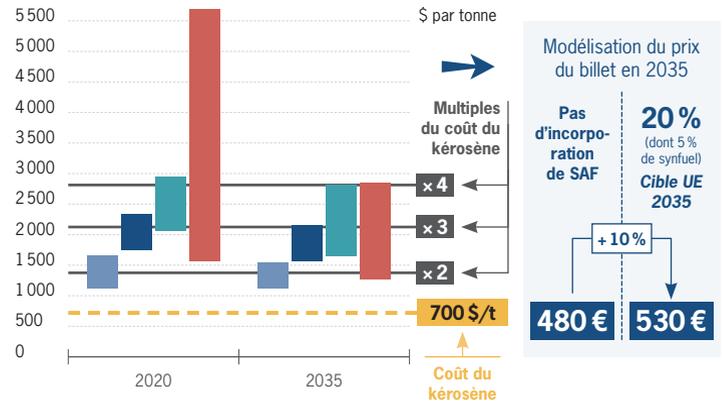
Étude de cas :



Distance : ~12 000 km / Prix moyen : ~500 €

Hypothèses :

- Prix carburant = ~120 € (24 % du coût total, Source : IATA – 2019)
- Kérosène fossile stable dans le temps – Efficacité de la flotte améliorée (vs. 2020) : 15 % en 2035
- Inflation neutralisée



Biocarburant : HEFA (bleu clair), Gazéification/FT (bleu foncé), Alcohol-to-jet (vert)
Carburant de synthèse : Power-to-liquid (PTL) (rouge)

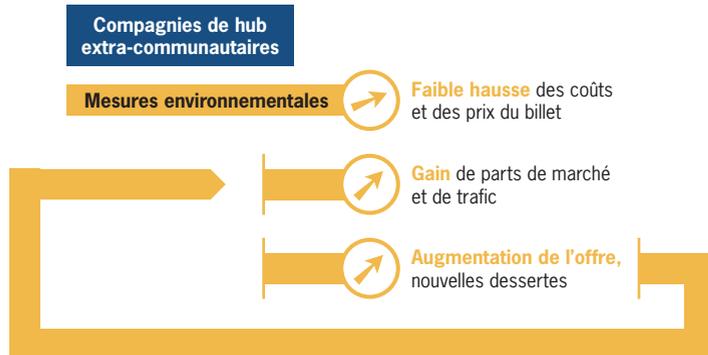
Coût kérosène -700 \$ par tonne (calcul pour un coût ~60 \$ / baril)

Source : Clean Skies for Tomorrow ; Destination 2050 ; Analyses Archery Strategy Consulting.

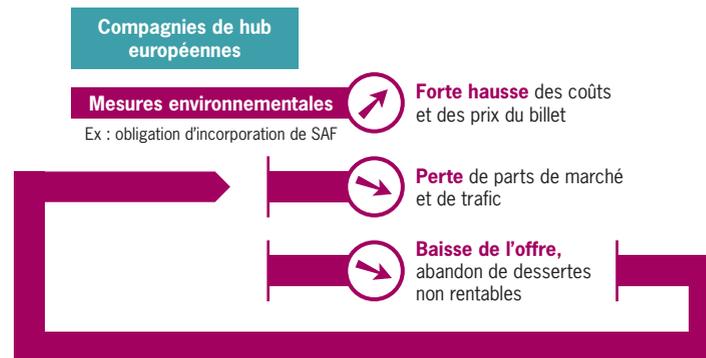
Cet exemple montre que, compte tenu de la différence de prix entre le kérosène et le SAF, l'obligation d'incorporation de SAF entraînera des coûts d'exploitation supplémentaires pour les compagnies aériennes, qui se traduira par une hausse des prix des billets commercialisés (dans ce cas, une augmentation des billets d'environ 10 % en 2035 par rapport aux prix actuels, toutes choses égales par ailleurs).

Cette hausse des coûts et des prix, pourvu qu'elle soit progressive, homogène entre géographies, et si nécessaire accompagnée de manière transitoire, ne remet pas en cause la viabilité du secteur. En revanche, une application inhomogène par rapport aux autres régions du monde serait source d'importantes distorsions de concurrence, notamment sur certaines destinations où l'élasticité prix⁹⁵ est importante.

Illustration du phénomène de distorsion de concurrence



95 L'élasticité prix mesure la sensibilité de la demande à une variation du prix : plus elle est forte, plus le consommateur est sensible au prix.



Source : Groupe de travail.

Ce phénomène de distorsion de concurrence entre compagnies aériennes ayant des obligations d'incorporation de SAF différentes (voire aucune obligation) pourrait en outre avoir un impact sur la répartition du trafic entre ces compagnies. Selon une étude IATA⁹⁶, pour une augmentation de 1 % du prix unilatéral par une compagnie aérienne, on estime qu'il y a un transfert de 1,5 à 2,5 % du trafic vers les autres compagnies aériennes. Sur l'exemple précédent (vol Paris – Singapour) face à une hausse de 10 % du prix des billets en 2035, et selon cette même étude, les compagnies aériennes européennes pourraient perdre environ 10 % du trafic par le seul effet des distorsions de concurrence sur les lignes exposées à la concurrence des hubs internationaux.

Plus généralement, si l'on considère un passager souhaitant prendre un vol de Madrid à Pékin, plusieurs options d'itinéraires s'offrent à lui, toutes choses égales par ailleurs (situation du marché permettant le choix entre plusieurs itinéraires/compagnies aériennes européennes ou non européennes/escapes...) :

96 IATA, *Estimating Air Travel Demand Elasticities* (décembre 2007).

- Option (i) : prendre un vol direct de Madrid à Pékin, auquel cas l'ensemble du vol est soumis à l'obligation européenne d'incorporation de SAF (aéroport d'origine en Europe) ;
- Option (ii) : faire une escale dans un hub européen, auquel cas, là encore, l'ensemble du vol est soumis à l'obligation européenne d'incorporation de SAF (aéroports d'origine et d'escale en Europe) ;
- Option (iii) : faire escale dans un hub extra-communautaire, ce qui implique que si la 1ère partie du vol est soumise à l'obligation européenne d'incorporation de SAF (aéroport d'origine en Europe), la 2^{nde} ne l'est pas (aéroport d'escale en dehors de l'Europe).

Ce premier exemple nous amène à conclure que le vol via un hub non européen est plus compétitif qu'un vol direct ou un vol avec escale dans un hub européen (toutes choses égales par ailleurs).

Une démonstration similaire, cette fois pour un trajet Mexique-Pékin, nous amènerait à conclure que les trajets internationaux via un hub non européen sont plus compétitifs que les trajets via un hub européen (toutes choses égales par ailleurs).

Illustration des distorsions de concurrence résultant de l'obligation d'incorporation de SAF européenne

Modèle en cours de construction : tous les vols depuis l'UE sont soumis aux obligations d'incorporation de SAF sur la totalité du volume de carburant.



Distorsion n° 1 : passer par un hub extracommunautaire est plus compétitif qu'un vol direct ou passer par un hub UE

Escale hors UE :
réduction de la part du trajet soumise à la réglementation (B1 vs. A1 + A2)
→ **Trajet (B1) + (B2) plus compétitif que (A1) + (A2)**

Distorsion n° 2 : passer par un hub extracommunautaire est + compétitif que passer par un hub UE

Escale hors UE :
Ensemble du trajet soumis à la réglementation
→ **Trajet (D1) + (D2) plus compétitif que (C1) + (C2)**

- Vol soumis à l'obligation d'incorporer du SAF
- - - -> Vol non soumis à cette obligation

Modèles envisageables

Pour veiller à ce que la phase de transition qui doit conduire l'industrie du transport aérien vers la neutralité carbone ne se fasse pas au détriment des acteurs auxquels s'appliqueront les obligations les plus fortes, en particulier les compagnies aériennes et les aéroports européens, nous proposons trois mesures pour éviter ou compenser les distorsions de concurrence.

Ces mesures pourraient être mises en œuvre de manière itérative en fonction de l'équilibre des obligations d'incorporation de SAF au niveau mondial et de la dynamique de convergence sur les règles communes au niveau de l'OACI.

Complémentarité et échelonnement des mesures permettant un déploiement des SAF dans le monde en limitant les distorsions de concurrence

Mesures

Périmètre



Source : Groupe de travail ; Analyses Archery Strategy Consulting.

À court-terme

À court terme, un mécanisme international semble complexe à mettre en place. Dans ce cadre, il est nécessaire d'identifier des mesures permettant de compenser les obligations d'incorporation de SAF pour les passagers en transit via un hub européen.

Ce mécanisme de compensation serait financé par le client final, qui payerait un coût supplémentaire dans le prix de son billet, reflétant le surcoût généré par l'incorporation obligatoire du SAF. Le montant serait proportionnel à la distance totale parcourue par le passager indépendamment des éventuelles escales, y compris dans le cadre des trajets en partage de codes⁹⁷. Les montants perçus viendraient alimenter un fond permettant aux compagnies aériennes de financer les SAF qu'elles devront embarquer. Le mécanisme proposé est autofinancé et ne nécessite donc aucun soutien financier public.

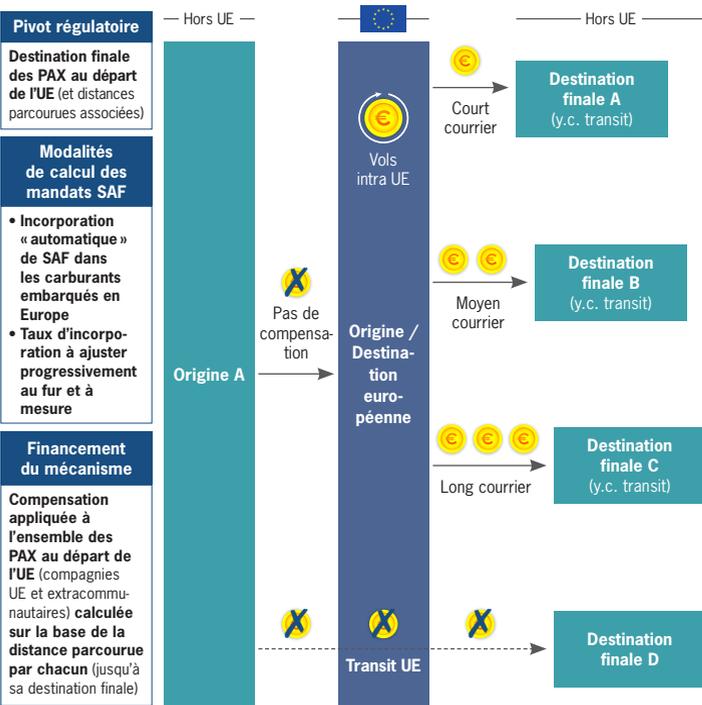
Tous les passagers au départ de l'UE seraient éligibles à ce mécanisme tandis que les passagers ayant une origine hors Europe et étant en transit sur un hub Européen en seraient exemptés sans distinction de compagnie aérienne.

De surcroît, afin de financer l'incorporation des SAF au sein de l'UE avec un coût supplémentaire limité par rapport au kérosène, le niveau de compensation tiendrait compte de l'évolution du différentiel de prix (SAF-kérosène), et serait calibré sur une base annuelle. Cette réévaluation permettrait d'intégrer non seulement les variations du prix du kérosène, la baisse escomptée du prix des SAF dans le temps, ainsi que les évolutions des niveaux d'incorporation.

⁹⁷ Le *Code Share* (ou partage de code) revient à laisser plusieurs compagnies apposer leur code (identifiant unique) sur un même vol ou, plus concrètement, avoir pour un même vol des numéros de vol correspondant à plusieurs compagnies aériennes. Cette pratique permet à la compagnie de mieux remplir ses avions, d'offrir plus de fréquences et de desservir des marchés inaccessibles (par exemple, des vols intérieurs aux États-Unis par une compagnie européenne). En outre, le *Code Share* permet au passager de bénéficier d'un « guichet unique » en utilisant une seule compagnie aérienne.

Illustration d'un mécanisme de compensation européen permettant de limiter les distorsions de concurrence

Proposition : mécanisme européen de compensation sur les trajets au départ de l'UE (intra-UE ou internationaux). Financement de l'incorporation de SAF dans les carburants approvisionnés en UE par un mécanisme de compensation des billets proportionnel à la distance parcourue.



€ Niveau de compensation proportionnel à la distance parcourue par chaque PAX
X Pas de compensation
Mécanisme européen de compensation calibré annuellement pour financer l'incorporation de SAF au sein de l'UE sans surcoût par rapport au kérosène

124

125

À moyen-terme

La mise en œuvre des obligations d'incorporation de SAF ne se fera pas à la même vitesse dans le monde entier en raison de trajectoires de décarbonation et de volumes d'intrants disponibles différents. Cette situation ne doit pas constituer un frein au déploiement des SAF et un cadre réglementaire spécifique, négocié au niveau de l'OACI, peut être mis en place pour permettre de définir des niveaux d'incorporation différents entre pays sans générer de distorsions de concurrence.

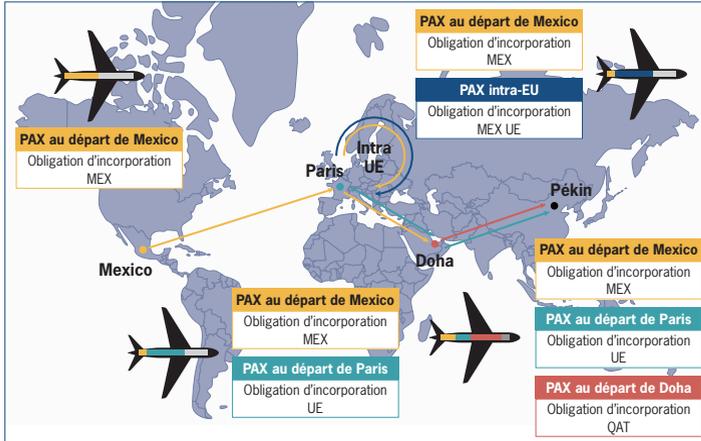
À cette fin, il serait nécessaire de baser le niveau d'incorporation de SAF non pas par rapport à chaque avion mais par rapport au point de départ de chaque passager quelles que soient les escales réalisées, y compris dans le cadre des trajets en partage de codes. Chaque compagnie assure une incorporation de SAF proportionnelle aux obligations d'incorporation des pays d'origine de ses passagers. Par exemple, un passager au départ de Mexico pour Pékin sera soumis sur l'intégralité de son voyage et quelles que soient ses escales à l'obligation d'incorporation du Mexique.

Concrètement, il serait nécessaire de mettre en place une base partagée au niveau de l'OACI afin que les compagnies puissent remonter la consommation de carburant pour tous leurs passagers par pays d'origine ainsi que les volumes de SAF incorporés. Cela permettrait de réaliser un équilibre entre le SAF réellement incorporé et le SAF à incorporer.

Pour aller plus loin, il serait même possible de localiser les obligations d'incorporation de SAF. Ainsi, l'intégralité du SAF qu'une compagnie doit intégrer pour les passagers d'Europe pourrait être intégré en Europe. Cela pourrait éviter des phénomènes qui empêcheraient les pays ayant des obligations d'incorporation ambitieuses de bénéficier des retours en termes économiques et d'emplois.

Illustration d'un modèle permettant la mise en œuvre de différentes obligations d'incorporation de SAF par géographies

Proposition : modèle mondialisé permettant des obligations d'incorporation différentes par géographie. Quel que soit le trajet (avec ou sans escale), le carburant consommé par le PAX sur l'ensemble de ses vols est soumis aux obligations d'incorporation exigées par le pays de départ.



Pivot réglementaire

Origine du trajet de chaque PAX quels que soient les escales et le point d'arrivée (international)

Modalités de calcul des obligations d'incorporation de SAF

- **Obligations d'incorporation de chaque pays** appliquées à l'ensemble des trajets PAX **au départ de ce pays et jusqu'à la destination finale** (y.c. escales)
- S'applique aussi dans le cas de **partage de codes**



Source : Groupe de travail ; Analyses Archery Strategy Consulting.

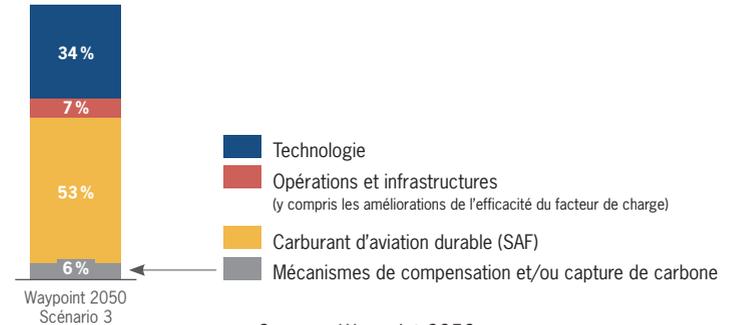
Afin de garantir la mise en œuvre opérationnelle de la réglementation, il sera essentiel que les pays/régions mettent en place les conditions d'approvisionnement en SAF requises par leur réglementation au sein de leurs infrastructures aéroportuaires.

À long-terme

À terme, la convergence des obligations d'incorporation des SAF sera souhaitable, voire inéluctable. En pratique, cela implique de définir via l'OACI⁹⁸ un taux unique d'obligation d'incorporation des SAF dans toutes les géographies.

5. Les systèmes de compensation en place doivent être étendus et amplifiés

Contribution des mesures de marché à l'objectif de réduction des émissions de CO₂



Source : Waypoint 2050.

98 Organisation de l'Aviation Civile Internationale (ICAO en anglais) : organisation dépendant de l'ONU, rassemblant 193 États signataires, et chargée d'établir le cadre réglementaire mondial du transport aérien, y compris en matière de protection de l'environnement.

Deux systèmes de quotas carbone co-existent actuellement en Europe : EU-ETS (European Union Emission Trading Scheme) et CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation).

RECOMMANDATION 9 (UE)

À court-terme, mettre en place un mécanisme pour limiter la distorsion de concurrence liée au trafic de correspondance entre l'Europe et le reste du monde soumis à l'EU-ETS, par exemple en maintenant une fraction des quotas gratuits pour assurer une concurrence équilibrée avec les vols soumis au système CORSIA

RECOMMANDATION 10A (Monde)

Encourager la mise en place de mécanismes de marché de type ETS pour les émissions domestiques dans les pays et régions autres que l'Europe.

RECOMMANDATION 10B (Monde)

À moyen-terme, assurer l'alignement des systèmes de quotas carbone entre eux et avec l'objectif « Net Zéro » de l'industrie.

5.1. EU-ETS

Le Système d'Echange de Quotas d'Emission de l'UE (SEQE-EU ou EU-ETS en anglais) est un mécanisme de droits d'émissions de CO₂ mis en œuvre depuis 2005 visant à réduire l'émission globale de CO₂ et à atteindre les objectifs fixés pour l'UE au sein du protocole de Kyōto⁹⁹. Il met en place une limitation des gaz à émettre et un marché du carbone. Des quotas d'émissions déterminés

par l'autorité publique sont distribués, gratuitement ou par enchère, aux organisations couvertes. Celles-ci peuvent en outre acheter ou vendre des quotas supplémentaires sur le marché.

Actuellement, ce dispositif couvre les principaux secteurs émetteurs : production d'électricité et de chaleur, industries à forte intensité énergétique (acier, papier, verre, ciment, céramique) et aviation commerciale. Près de 11 000 centrales électriques et grands sites industriels, dont les compagnies aériennes, sont concernés par le marché européen du carbone.

Pour l'aviation, ce dispositif couvre tous les vols à l'intérieur de la zone qui comprend non seulement les pays de l'UE, mais aussi ceux de l'Espace économique européen (EEE) – Norvège, Liechtenstein et Islande – ainsi que la Suisse, qui a rejoint le marché du carbone en 2020.

Pour répondre à l'objectif de réduction des émissions de 55 % entre 1990 et 2030 récemment relevé par la Commission Européenne dans le *Plan Cible en matière de climat à l'horizon 2030* (contre 40 % précédemment), les émissions des organisations les plus émettrices devront être réduites. Cela passera par la réduction progressive du nombre total de quotas d'émission disponibles sur le marché et, pour les compagnies aériennes, par la suppression graduelle des quotas gratuits d'ici 2027. En passant par une mise aux enchères intégrale des quotas à partir de cette date, la Commission européenne espère créer un signal de prix plus fort et stimuler la réduction des émissions.

5.2. CORSIA

Les vols internationaux de leur côté sont couverts par le système CORSIA, programme ratifié en 2016 par l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI). CORSIA vise à compenser la part des émissions de CO₂ des vols

⁹⁹ Le protocole, signé en 1997 et entré en vigueur en 2005, contient des objectifs contraignants et quantifiés de limitation et de réduction de 6 gaz à effet de serre (dioxyde de carbone CO₂, méthane CH₄, oxyde nitreux N₂O et composés à base de fluor HFCs / PFCs / SF₆).

internationaux qui dépasse les niveaux d'émissions de 2019. Autrement dit, ce système se fixe pour objectif une croissance neutre en carbone à partir de cette date.

Concrètement, les compagnies aériennes dépassant 10 000 tCO₂/an sur les vols internationaux doivent désormais déclarer leurs émissions sur la base de la consommation réelle de leur flotte.

Signé par 191 pays, ce mécanisme de marché impose aux compagnies aériennes d'acheter des crédits générés par des projets bas carbone internationaux éligibles. Le dispositif CORSIA est entré en vigueur pour une période pilote volontaire en janvier 2021 et deviendra ensuite obligatoire pour toutes les compagnies aériennes du monde entier en 2027.

En 2021, 88 États (dont ceux de l'UE) représentant 77 % de l'activité aéronautique internationale se sont portés volontaires pour participer à CORSIA¹⁰⁰. Certains marchés fortement émetteurs ne prennent pas part à la phase volontaire, et ne participeront à la phase obligatoire qu'à partir de 2027.

5.3. Deux approches différentes pour une finalité comparable

EU-ETS et CORSIA reposent tous deux sur la déclaration des émissions de CO₂ que les compagnies aériennes communiquent chaque année à leur État d'administration, après vérification par un auditeur externe indépendant.

Si les deux systèmes de quotas de carbone diffèrent par leur couverture géographique, leur approche, leur applicabilité et leur niveau d'ambition, l'objectif de limiter le niveau des émissions CO₂ du secteur aérien est comparable.

L'EU-ETS est un système de plafonnement et d'échange : les secteurs couverts par le marché du carbone européen, tels que le transport aérien, ne

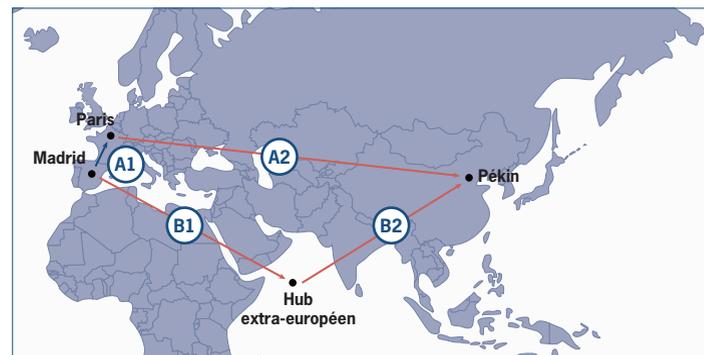
peuvent émettre plus d'émissions que celles autorisées par le plafond. S'il n'y a plus de quotas, aucun gaz à effet de serre ne peut plus être émis. Au fur et à mesure que le plafond est réduit, la quantité totale d'émissions de CO₂ est également réduite.

CORSIA, quant à lui, est un système de compensation. Cela signifie qu'il n'y a pas de plafond sur la quantité totale de CO₂ émise dans l'atmosphère. Le système exige des participants (compagnies aériennes) qu'ils compensent la quantité de CO₂ qu'ils émettent par rapport à une valeur de référence prédéterminée (le niveau de 2019). La compensation prend généralement la forme de la plantation d'arbres (de sorte qu'une quantité équivalente de CO₂ est capturée et stockée dans la biomasse) ou de financement de réductions de CO₂ dans d'autres industries.

5.4. Limites et propositions

Éviter les distorsions de concurrence

Illustration de la coexistence de 2 systèmes de quotas carbone



—> Vol soumis à CORSIA —> Vol soumis à EU ETS

Source : Analyses Archery Strategy Consulting.

100 Eurocontrol, *CORSIA and the EU's Emissions Trading System: how EUROCONTROL supports European aviation to foster sustainability* (Mai 2021).

Tout d'abord, l'objectif de réduction d'émissions de CO₂ du système EU-ETS est plus ambitieux que celui de CORSIA¹⁰¹ et donc entrainera des coûts plus importants. Or, si nous reprenons l'exemple d'un passager souhaitant se rendre à Pékin depuis Madrid, plusieurs options se présentent :

- Option (a) : faire escale dans un hub européen (ex : Paris), auquel cas le trajet intra-européen (a1) est soumis au système EU-ETS, tandis que la 2^e partie du trajet vers Pékin (a2) est soumise au système CORSIA ;
- Option (b) : faire escale dans un hub extra-européen, auquel cas l'ensemble du vol (b1+b2) est soumis au système CORSIA.

Le coût du billet pour le passager sera plus élevé dans l'option (a), toutes choses égales par ailleurs, que le coût du billet dans l'option (b). Cet exemple met en évidence une distorsion de concurrence qui incitera le voyageur à préférer le trajet passant par le hub non européen, qui sera nettement moins impacté par les systèmes de quotas de carbone en vigueur.

Les vols domestiques des pays non européens (hors UE), qui représentent aujourd'hui près d'un tiers du trafic aérien mondial, ne sont pas couverts : c'est notamment le cas de la Chine (2^e marché intérieur en termes d'émissions de CO₂ en 2019), de l'Inde (3^e) et du Brésil (6^e)¹⁰³. Le niveau de trafic dans ces régions très dynamiques, en Asie en particulier, pourrait augmenter à l'avenir.

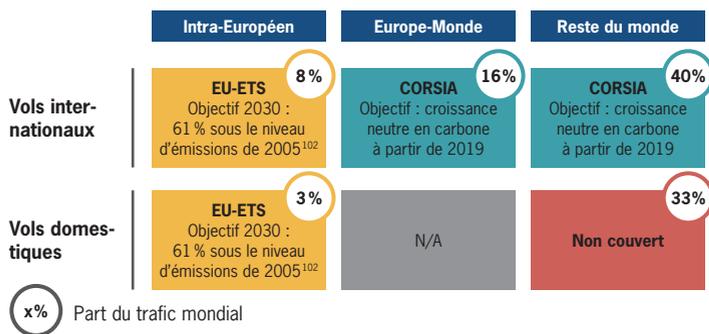
Étendre ces systèmes de quotas carbone aux vols domestiques dans d'autres pays et régions du monde que l'Europe sera donc nécessaire pour couvrir au mieux les émissions liées au trafic aérien.

Des systèmes à aligner avec l'objectif de décarbonation

Les systèmes EU-ETS et CORSIA n'intègrent pas encore l'objectif de neutralité carbone en 2050 du secteur aérien (objectif « Net Zéro ») et devront donc évoluer en ce sens.

Étendre les 2 systèmes de quotas carbone aux vols domestiques

Niveau de couverture des mécanismes EU-ETS et CORSIA
par géographie et typologie de parcours



Source : Données publiques ; Analyses Archery Strategy Consulting.

101 Destination 2050.

102 Objectif global pour l'ensemble des secteurs inclus au mécanisme EU-ETS.

103 ICCT, CO₂ emissions from commercial aviation (2020).

IV

LA DÉCARBONATION DU TRANSPORT AÉRIEN S'INSCRIT DANS UNE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE PLUS GLOBALE QUI IMPLIQUE UNE MASSIFICATION DE LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ DÉCARBONÉE POUR REMPLACER LES ÉNERGIES FOSSILES

Besoins en carburant par mode de transport en 2018 et 2050

	Trafic et émissions 2018			Trajectoire balistique 2050	
	Trafic 2018 (Bn passager.Km ou Bn T.Km)	Consommation de carburant 2018 (Mtep)	Dont biocarburant	Trafic 2050 (Bn passager. Km ou Bn T.Km)	Consommation en intégrant 30 % de réduction de conso. (Mtep)
Transport routier de personnes	30	1 200	2,4 %	71	2 000
Transport routier de marchandises	22	800	3 %	58	1 600
Transport aérien	8	350	0,1 %	22	600
Transport maritime	85	250	0,1 %	269	600
		2 600 Mtep			4 800 Mtep

Source : ITF Transport Outlook 2019 ; Waypoint 2050 ; IEA ; Analyses Archery Strategy Consulting.

La consommation mondiale de carburants d'origine pétrolière (essence, diesel, kérosène, fioul lourd, etc.) a atteint environ 2 600 Mtep¹⁰⁴ en 2018, largement portée par le transport routier (personnes et marchandises). Avec près de 350 Mtep, le secteur aérien représente 13 % de ce total.

D'ici 2050, les transports devraient continuer d'augmenter en volume et, avec eux, la consommation de carburants. En incluant une réduction de la consommation liée à l'évolution technologique (amélioration du rendement), la consommation totale pourrait atteindre près de 4 800 Mtep.

104 Mégatonne d'équivalent pétrole : unité de mesure de l'énergie, qui correspond au pouvoir calorifique d'une tonne de pétrole.

1. Les besoins énergétiques doivent être regardés sur l'ensemble des moyens de transport

Le pétrole est une source d'énergie fossile largement utilisée dans les transports, car il présente l'avantage d'être très dense en énergie, aisément transportable et facile à approvisionner. C'est aussi une matière irremplaçable pour l'industrie de la pétrochimie (plastiques, peintures, colorants, cosmétiques, etc.). Enfin le pétrole sert également de combustible dans le chauffage domestique et comme source de chaleur dans l'industrie. L'analyse présentée dans ce rapport se concentre sur le transport.

Une partie de cette consommation sera assurée par des technologies alternatives aux produits pétroliers (batterie, pile à combustible / hydrogène, ammoniac, etc.), dont le niveau variera en fonction de leur démocratisation dans le parc des moyens de transport en circulation. À titre d'exemple, dans un scénario prudent, la part des voitures électriques dans l'automobile pourrait représenter près de 30 % du parc installé, alors qu'elle serait de 75 % dans un scénario plus optimiste, cet écart reflétant une vitesse de développement différente de la mobilité électrique (remplacement des véhicules thermiques par des véhicules électriques, déploiement des infrastructures de recharge, incitations du cadre législatif et réglementaire, etc.).

Dans ce qui suit, nous proposons de considérer un scénario unique de décarbonation accélérée (optimiste) qui prend en compte les gains ambitieux offerts par les technologies alternatives. En considérant des niveaux de pénétration variables selon la technologie, le besoin en carburant résiduel pourrait s'élever à près de 2 200 Mtep en 2050.

Scénario unique de décarbonation des transports

	Carburants de substitution (hors biocarburants et PTL)		Besoin carburant résiduel (Mtep)
	Substitut principal	Cible dans le trafic en 2050	
Transport routier de personnes	Batterie H ₂ /FC	75% 5%	400
Transport routier de marchandises	LH ₂ /FC Batterie	30% 15%	900
Transport aérien	LH ₂	15%	500
Transport maritime	Ammoniac	40%	400
Décarbonation accélérée			2 200 Mtep

Source : Données publiques ;
Analyses Archery Strategy Consulting.

Chacun des moyens de transport (routier, aérien, maritime) est engagé dans une trajectoire de décarbonation plus ou moins avancée. Dès lors, au-delà du niveau de pénétration des technologies de substitution propres à chacun (par exemple, l'ammoniac pour le transport maritime), il existe une appétence commune pour l'utilisation des biocarburants afin de faciliter la transition environnementale, sans quoi l'utilisation des produits pétroliers restera à des niveaux importants.

Par conséquent, la ressource en biomasse n'étant pas illimitée, elle fera l'objet d'une concurrence entre les secteurs, si bien que la contribution des biocarburants à l'offre de carburants alternatifs pour l'aviation restera limitée.

2. Les carburants de synthèse ont une place incontournable pour réussir la décarbonation

RECOMMANDATION 8 (France/UE)

Promouvoir le carburant de synthèse pour dynamiser la mise en place d'une filière de production d'hydrogène de grande échelle :

- le carburant de synthèse ouvre un débouché de grand volume à court terme pour la production d'hydrogène et permet la mise en place de moyens de production à grande échelle indispensables pour en faire baisser les coûts ;
- le carburant de synthèse permet de s'affranchir des problématiques de transport et de stockage de l'hydrogène en l'absence d'infrastructures dédiées ;
- le procédé de fabrication du carburant de synthèse permet de s'affranchir de l'enjeu de disponibilité des matières premières car il n'utilise que de l'air, de l'eau et de l'électricité ;

.../...

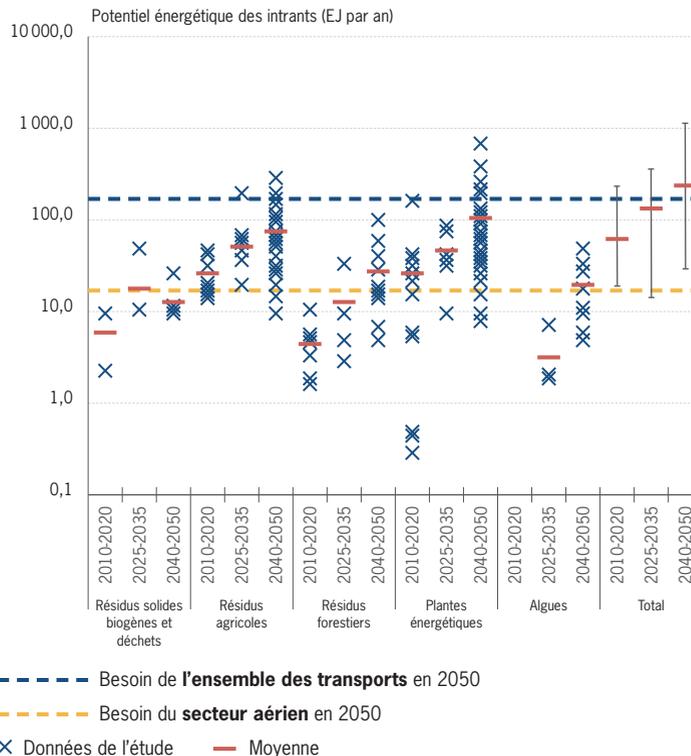
- les investissements réalisés pourront ensuite être utilisés pour la distribution d'hydrogène aux aéroports lors de la mise en service des avions à hydrogène ;
- la production de carburant de synthèse permet également le développement des technologies de captage du CO₂.

2.1. Disponibilité des biofuels

D'ici à 2050, les biocarburants constitueront une part importante des SAF. Si les estimations du potentiel énergétique des intrants à l'horizon 2050 sont très hétérogènes, il apparait que le potentiel de la biomasse est considérable et qu'il dépasse les besoins en biocarburants de l'ensemble des transports en 2050 (routier, aérien, maritime), et donc a fortiori de l'aviation en particulier.

Disponibilité des matières premières pour la production de biocarburants

(Unité : Exajoule par an¹⁰⁵)



Source : IRENA, Innovation Outlook – Advanced Liquid biofuels p. 33 ; Analyses Archery Strategy Consulting.

105 L'exajoule (EJ) est égal à 10¹⁸ joules, unité pour quantifier l'énergie. On utilise usuellement les kilojoules (kJ) ou les calories en nutrition.

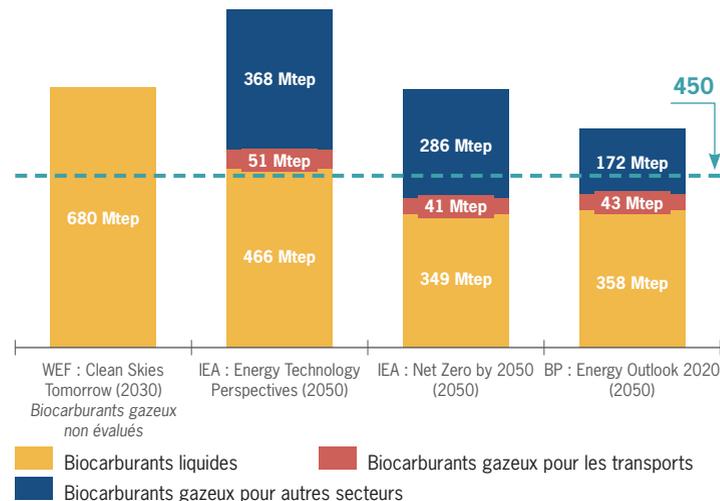
Bien que la disponibilité des intrants dépasse les besoins en biocarburants pour décarboner tous les transports, la réalité est que tous ces intrants ne peuvent pas être utilisés à cette fin pour plusieurs raisons :

- Les biocarburants liquides sont plus adaptés au transport, notamment aérien, que les biocarburants gazeux obtenus, par exemple par méthanisation (dégradation de la matière organique par des micro-organismes, produisant notamment du biogaz), et dont seule une fraction modérée (environ 12 %) est retenue pour une utilisation dans les transports ;
- Les défis logistiques liés à la captation des gisements diffus (résidus, déchets, etc.) et à la concentration de la biomasse pour limiter le besoin de transport sont considérables ;
- La disponibilité des ressources varie selon les saisons et il est nécessaire d'identifier une diversité d'intrants compatibles entre eux et avec l'installation industrielle dans la même zone géographique pour assurer un fonctionnement tout au long de l'année.

140

Il est donc largement admis que le potentiel bioénergétique durable en 2050 serait limité. Selon plusieurs acteurs de référence du secteur de l'Énergie, ce potentiel pourrait s'élever à près de 450 Mtep.

Estimation de la production de biocarburants liquides à 2030 / 2050 selon différents acteurs



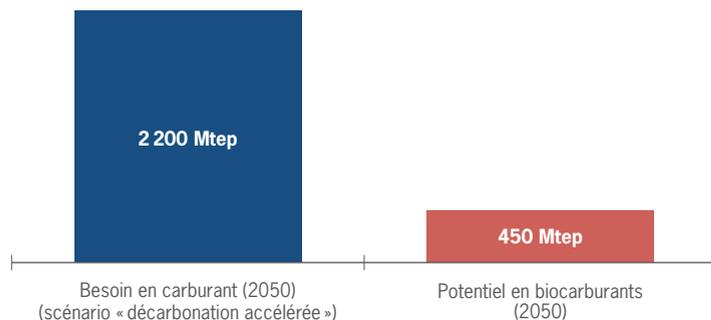
141

Source : IEA, Net Zero by 2050 & Energy Technology Perspectives ; Clean Skies Tomorrow ; BP, Energy Outlook 2020 Edition ; Analyses Archery Strategy Consulting.

2.2. Concurrence entre les secteurs du transport et pénétration des carburants de substitution nécessitant le recours aux e-fuels

À l'échelle des différents modes de transport, ces 450 Mtep ne représentent que 20 % du besoin résiduel en carburant après prise en compte des technologies de substitution.

Comparaison du potentiel énergétique des biocarburants avec les besoins en carburant résiduels en 2050



Source : Analyses Archery Strategy Consulting.

142

Pour surmonter le problème de la disponibilité des matières premières, notamment face à la concurrence d'autres secteurs du transport eux aussi désireux de décarboner leur activité, et pour produire des SAF en quantité, l'utilisation de carburants de synthèse est donc incontournable.

Le développement de la filière PtL (Power-to-Liquid) est d'autant plus pertinent qu'il constituerait un débouché à court-terme pour la filière H₂, dont l'utilisation comme carburant « direct » ne devrait pas intervenir avant 2035 :

- L'hydrogène est un intrant essentiel du processus PtL, celui-ci ouvre à court terme un vaste marché de volume pour la consommation de l'hydrogène permettant la mise en place d'installations à grande échelle et la montée en maturité des installations pour optimiser le coût de production.
- Le processus PtL permet de s'affranchir des contraintes opérationnelles du transport et du stockage de l'hydrogène.
- La production de carburant synthétique permet également de développer des technologies de captage du CO₂.

3. Les besoins énergétiques associés à la décarbonation sont très importants et nécessitent des investissements sans précédent

RECOMMANDATION N° 11 (Monde)

Mettre en place une politique d'investissement massive dans les énergies décarbonées, au-delà du remplacement des modes de production actuellement utilisés, pour répondre aux nouveaux besoins des acteurs du transport à l'horizon 2050.

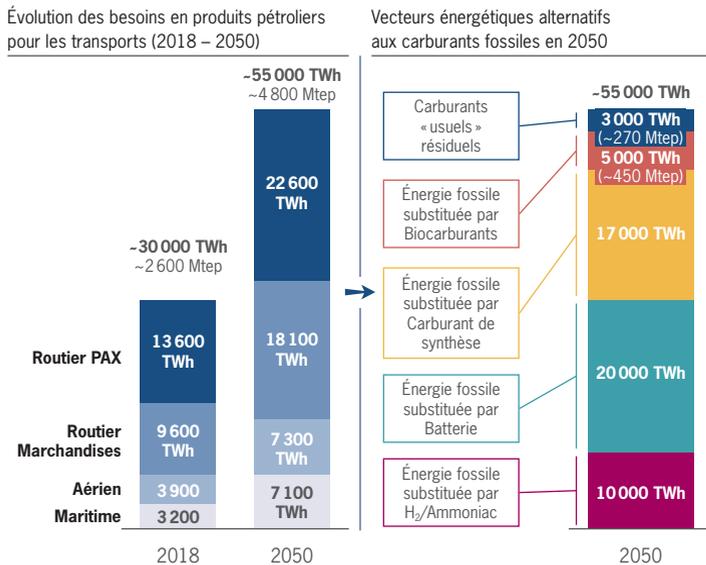
3.1. Besoins de production d'électricité décarbonnée

La production de carburants de synthèse présente de nombreux attraits : des intrants non limités (eau, air) et un impact CO₂ proche de zéro. Cependant, ce procédé nécessite une quantité importante d'énergie électrique pour produire de l'hydrogène décarboné et capter du CO₂ présent dans l'air ou émis par des unités industrielles. Pour assurer une réduction nette des émissions, cette énergie doit être produite à l'aide d'unités faiblement émettrices de CO₂, telles que les énergies renouvelables (éolien, solaire, hydraulique) ou le nucléaire.

Illustrons cela en 2050, où les besoins énergétiques de l'ensemble des secteurs du transport pourraient s'élever à près de 55 000 TWh (soit ~4 800 Mtep). Dans le scénario considéré (« décarbonation accélérée »), la pénétration des technologies alternatives (batterie électrique, hydrogène) est importante. La disponibilité des biocarburants étant donnée (450 Mtep), les besoins en carburant résiduel peuvent être satisfaits soit par du kérosène conventionnel, soit par des carburants de synthèse (PtL). Nous choisissons de tenir compte d'un taux incompressible d'environ 6 % des besoins énergétiques couverts par les carburants fossiles (qui pourront faire l'objet de compensations). Le solde des besoins énergétiques est donc couvert par les carburants de synthèse (soit 17 000 TWh).

143

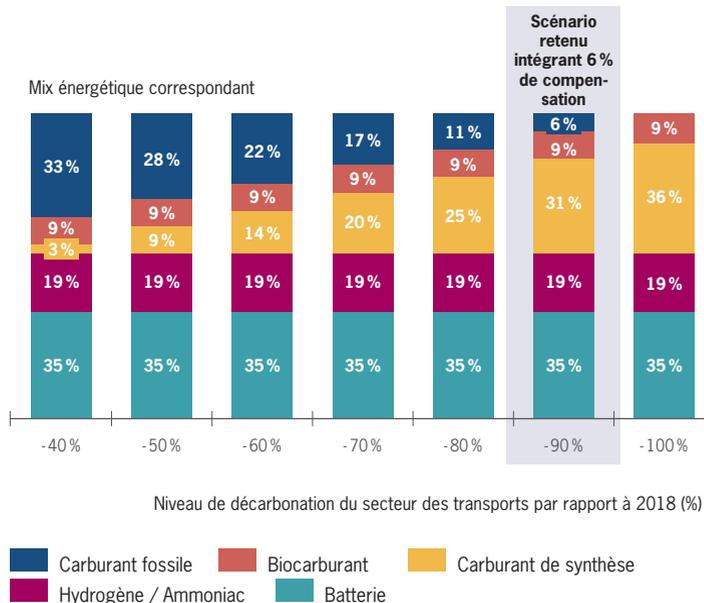
Répartition des besoins énergétiques des transports en 2050 par type de carburant/solution



Source : Analyses Archery Strategy Consulting.

Le mix énergétique ainsi proposé permet de décarboner l'ensemble des transports à hauteur de 90 %, ce qui est cohérent avec la proposition de l'ATAG dans le scénario considéré ici (Waypoint – scénario 3), et qui nécessite des mesures de compensation pour atteindre la neutralité carbone.

Mixes énergétiques en fonction du niveau attendu de décarbonation du secteur des transports par rapport à aujourd'hui



Niveau de décarbonation du secteur des transports par rapport à 2018 (%)

■ Carburant fossile ■ Biocarburant ■ Carburant de synthèse
■ Hydrogène / Ammoniac ■ Batterie

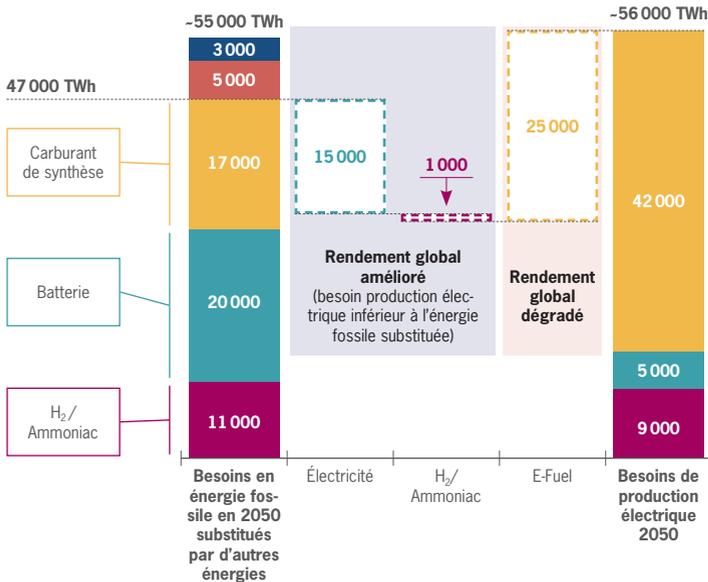
Source : Analyses Archery Strategy Consulting.

Les besoins en électricité nécessaires pour produire les carburants de synthèse viennent s'ajouter à ceux nécessaires pour la mise en œuvre des autres technologies de substitution décarbonées (électricité pour produire l'H₂ et pour alimenter les batteries). Pour évaluer la production électrique nécessaire, il faut par ailleurs tenir compte du rendement des différents moyens de substitution aux carburants fossiles envisagés :

- La propulsion électrique d'un véhicule routier est particulièrement efficace et nécessite près de 50 % d'énergie primaire en moins que l'énergie contenue dans l'essence ;

- La propulsion H₂/ammoniac pour le transport maritime est globalement équivalente en termes d'énergie (un peu plus dans le cas de la combustion directe de H₂ comme pour le transport aérien, un peu moins dans le cas de l'utilisation d'une pile à combustible);
- Les carburants de synthèse sont utilisés dans les mêmes moteurs que les carburants fossiles, il n'y a donc pas de gain en termes de combustion, mais leur production est très énergivore, avec un rendement de production d'environ 40 %.

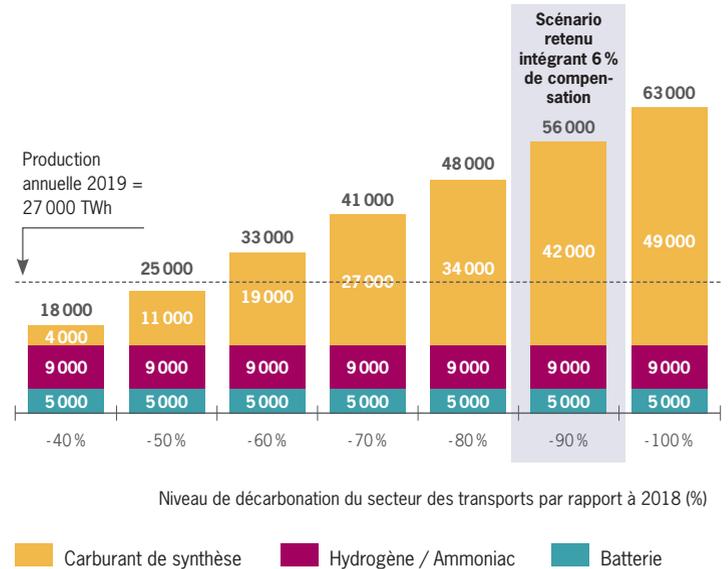
Production d'électricité nécessaire pour obtenir l'énergie associée aux technologies de substitution



Ainsi, près de 56 000 TWh seront nécessaires en 2050 pour disposer des technologies de substitution aux carburants fossiles et fournir la même énergie. Sachant que la production mondiale d'électricité s'élève actuellement à près de 27 000 TWh, destinée principalement aux secteurs résidentiel, tertiaire et industriel, cela équivaut à tripler la production électrique mondiale annuelle actuelle (toutes choses égales par ailleurs).

Production d'électricité nécessaire pour activer les technologies de substitution aux combustibles fossiles, en fonction du niveau attendu de décarbonation des transports par rapport à aujourd'hui

(Production d'électricité en TWh)



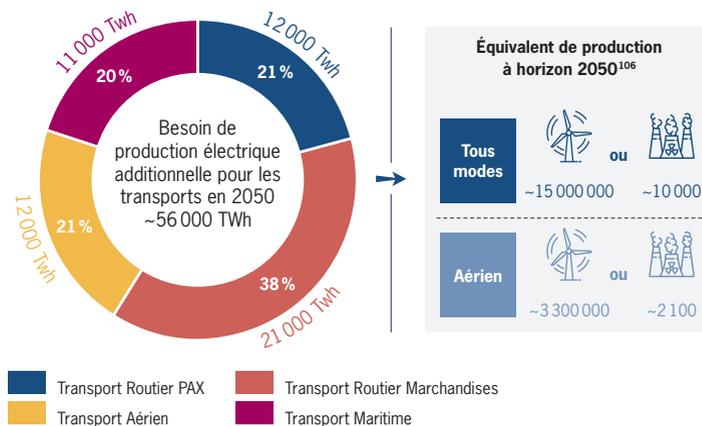
En résumé, le recours aux carburants de synthèse pour compléter l'offre de technologies de substitution (batterie, H₂) et de biocarburants est particulièrement énergivore, représentant près de 75 % des nouveaux besoins en électricité (~42 000 TWh sur ~56 000 TWh). Par ailleurs, la décarbonation du transport aérien sera plus énergivore comparativement aux autres secteurs du transport (route notamment) : les efforts visant à développer les carburants de synthèse (via le procédé PtL) comme solution à la décarbonation de l'aviation pourraient donc être considérés soit comme un motif de plus pour accélérer les investissements dans des capacités supplémentaires de production d'électricité (renouvelable ou à faible émission de carbone), soit comme un usager de la ressource moins important que les autres modes de transport et utilisateurs.

3.2. Moyens de production

La production d'environ 56 000 TWh d'électricité supplémentaire en 2050 pour décarboner l'ensemble des transports dans le monde en ayant recours à des SAF et des technologies alternatives (batterie, H₂) équivaut à la production d'électricité de près de 15 millions d'éoliennes ou de 10 000 unités nucléaires de puissance équivalente à la moyenne du parc installé en 2019.

Pour le seul transport aérien, cela représenterait près de 3,3 millions d'éoliennes ou 2 100 nouvelles tranches nucléaires.

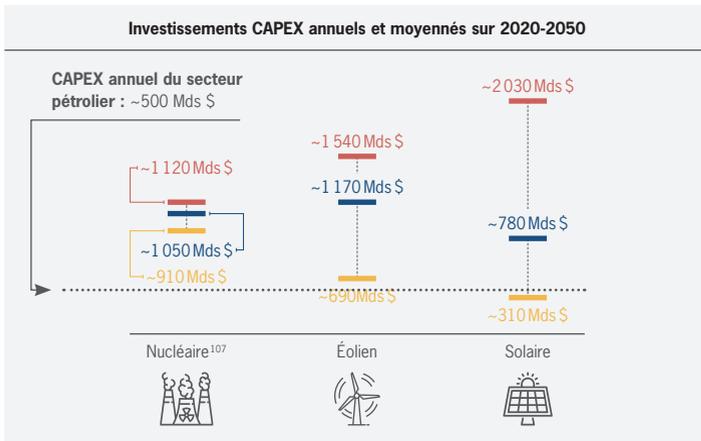
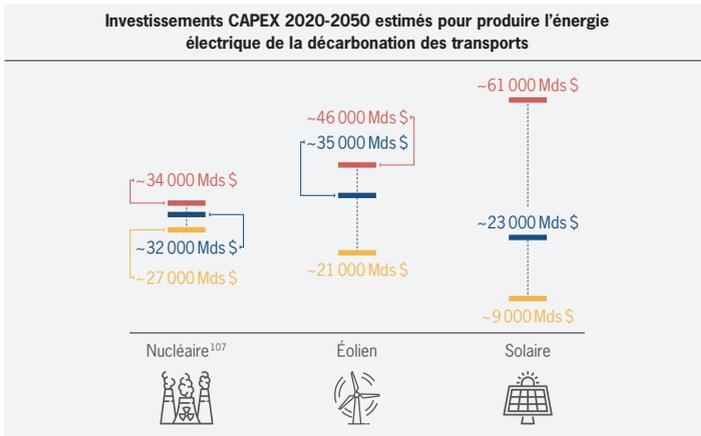
Illustration des moyens de production électrique supplémentaires requis pour la décarbonation des transports



Selon la technologie choisie et les hypothèses de décroissance des coûts de production, le coût du système électrique nécessaire pour produire 56 000 TWh varie énormément.

106 Estimations basées sur la production 2019 de la base installée.

Comparaison du niveau d'investissement nécessaire, selon le moyen de production, avec celui du secteur pétrolier



Hypothèses :

Nucléaire ¹⁰⁷	Éolien	Solaire
• 4 000 \$/kW _e	• 1 800 \$/kW _e	• 1 300 \$/kW _e
• 3 750 \$/kW _e	• 1 360 \$/kW _e	• 500 \$/kW _e
• 3 250 \$/kW _e	• 800 \$/kW _e	• 200 \$/kW _e

— Moyenne 2020 — Scénario 2050 Conservateur

— Scénario 2050 Optimiste

Source : Usine Nouvelle¹⁰⁸, IRENA¹⁰⁹, Sustainable Energy Handbook¹¹⁰, Analyses Archery Strategy Consulting.

Il y a lieu dès à présent de réexaminer notre système de production d'électricité à la lumière de ce défi énergétique et d'investir en conséquence en anticipant suffisamment les besoins futurs. Les niveaux d'investissement nécessaires sont vertigineux, et de l'ordre de 1 000 milliards de dollars par an. Comparé au niveau historique d'investissement dans le secteur pétrolier (près de 500 milliards de dollars par an), ce montant semble toutefois accessible si des politiques très volontaristes sont mises en place.

Comparaison avec les prévisions RTE

Dans son étude publiée en 2021 sur l'évolution du système électrique intitulée « Futurs énergétiques 2050 », le gestionnaire du réseau de transport d'électricité RTE évalue les besoins énergétiques de la France à l'horizon 2050. Cette analyse s'appuie notamment sur les prévisions de la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC), la feuille de route de la France pour lutter contre le changement climatique. ... / ...

107 Coût du capital non pris en compte (supérieur dans le cas du nucléaire vs. énergies renouvelables).

108 L'Usine Nouvelle, Pourquoi la capacité d'énergie nucléaire dans le monde a diminué en 2019... mais pas la production (juin 2020).

109 IRENA, Wind and solar PV – what we need by 2050 (janvier 2020).

110 Sustainable Energy Handbook, Module 6.1 : simplified financials models (février 2016).

Nous avons voulu identifier les différences entre l'analyse réalisée dans le présent rapport et les trajectoires de consommation présentées par RTE. Ainsi, l'évaluation des besoins énergétique dans le scénario de référence de RTE diffère sur 4 points essentiels :

1. Les hypothèses de croissance du trafic aérien (0,4 % par an au niveau national) sont nettement inférieures à celles retenues par les acteurs du secteur aérien, sur un périmètre différent (environ 3 % par an à l'échelle mondiale).
2. RTE, comme la SNBC (Stratégie Nationale Bas-Carbone), estime que les transports aérien et maritime ne seront pas totalement décarbonés en 2050, 50 % des besoins énergétiques étant encore couverts par des carburants fossiles dont les émissions seront compensées par des puits de carbone naturels (ex : les forêts) : pour l'aérien, les 50 % restants reposent uniquement sur les carburants durables d'aviation (biocarburants et carburants de synthèse), l'avion hydrogène n'étant pas considéré (levier technologique).
3. RTE, comme la SNBC, ne prend pas en compte les soutes internationales, besoins énergétiques des trafics aérien et maritime dont la destination finale se situe hors de France (métropole et DOM-TOM).
4. Enfin, le recours à l'hydrogène et aux carburants de synthèse est faible ; de plus leur production n'est pas nécessairement faite en France.

Besoins en carburant par mode de transport en 2019 et 2050, dans le scénario de référence de RTE

		Consommation France (2019) Mtep	Taux croissance prévu dans la SNBC TCAM 2015-2050	Besoin résiduel en carburant, biocarburants ou carburant de synthèse (inclus optimisation consommation et substitution) 2050	
Transport routier de personnes		26 Mtep	-0,1 % p.a.	0,4 Mtep	L'Ademe prévoit environ 8 Mtep de biocarburant liquide en France à l'horizon 2050 et environ 7 Mtep de biogaz qui sera essentiellement utilisé pour des usages hors transport (hypothèse 20 % du biogaz est utilisé en bio GNV). Ce qui donne 9,5 Mtep mobilisables pour les transports .
Transport routier de marchandises		16 Mtep	+0,3 % p.a.	8,1 Mtep	
Transport aérien	National	1,7 Mtep	+0,4 % p.a.	1,3 Mtep ¹¹¹	
	International	6,1 Mtep	Non mentionné : hypothèse iso France	4,8 Mtep ¹¹¹	
Transport maritime	National	0,2 Mtep	+1 % p.a.	0,2 Mtep ¹¹¹	
	International	1,7 Mtep	Non mentionné : hypothèse iso France	1,6 Mtep ¹¹¹	
		52 Mtep		16,5 Mtep	

Source : RTE « Futurs énergétiques 2050 » ; Analyses Archery Strategy Consulting.

Dans le scénario de référence de RTE, en considérant l'évolution de la consommation telle que prévue dans la SNBC et prise en compte dans son analyse, ainsi que la disponibilité des biocarburants (liquides ... / ...

111 Hypothèse de baisse de consommation non mentionnée dans la SNBC, valeur de 30 % prise en considération.

et bioGNV) à l'horizon 2050 telle qu'anticipée par l'ADEME, il ressort un besoin résiduel en carburant d'environ 7 Mtep en 2050, qui sera couvert par les carburants fossiles, représentant un niveau de décarbonation par rapport à 2019 d'environ 85 % (largement tiré par le transport routier).

Dans un scénario alternatif intitulé « Hydrogène + », RTE envisage une décarbonation plus poussée des transports aérien et maritime avec une production électrique dédiée à la production de carburants de synthèse : cette production passe de 9 TWh dans le scénario de référence à 72 TWh dans le scénario « Hydrogène + », ce qui permettrait de produire environ 2,5 Mtep de carburant de synthèse supplémentaire et d'atteindre un niveau de décarbonation par rapport à 2019 d'environ 90 %. Ce scénario implique par ailleurs une hausse de la consommation d'électricité en France (754 TWh au lieu de 645 TWh dans le scénario de référence).

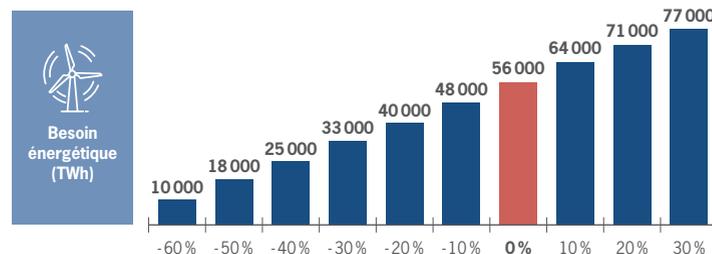
154

3.3. Sensibilité aux évolutions de trafic

Le besoin énergétique est très fortement corrélé à l'évolution du trafic, ainsi une diminution du trafic de l'ordre de 30 % par rapport aux niveaux attendus en 2050 permettrait de diminuer le besoin en énergie décarbonée de l'ordre de 40 % et une hausse du trafic de l'ordre de 30 % nécessiterait de l'augmenter de 35 %.

Même en restant sur des niveaux de trafic très proches des niveaux actuels, il serait indispensable d'avoir une production électrique autour de 10 000 TWh pour assurer le remplacement des carburants fossiles actuellement utilisés.

Sensibilité du besoin énergétique aux évolutions du trafic pour une décarbonation des transports à -90 % par rapport à 2018



Évolution du trafic 2050 par rapport à la référence

	-60%	-50%	-40%	-30%	-20%	-10%	0%	10%	20%	30%
Transport routier de personnes	-0,2%	0,5%	1,1%	1,6%	2,0%	2,4%	2,7%	3,1%	3,3%	3,6%
Transport routier de marchandises	0,2%	0,9%	1,5%	2,0%	2,4%	2,8%	3,1%	3,4%	3,7%	4,0%
Transport aérien	0,2%	0,9%	1,5%	2,0%	2,4%	2,8%	3,1%	3,4%	3,7%	3,9%
Transport maritime	0,7%	1,4%	2,0%	2,5%	2,9%	3,3%	3,7%	4,0%	4,3%	4,5%

TCAM 2018-2050

Scénario Waypoint 2050

Source : Analyses Archery Strategy Consulting.

155

CONCLUSION

Nous avons décrit dans la présente étude l'ensemble des leviers devant permettre au transport aérien d'atteindre son objectif de neutralité carbone en 2050, ainsi que les différentes recommandations qui nous semblent devoir être prises rapidement pour accélérer le processus de décarbonation de la filière. Si la trajectoire présentée semble ambitieuse et représente un défi majeur tant pour le secteur aérien que pour celui de l'énergie, elle n'en reste pas moins atteignable aux conditions suivantes :

- les évolutions incrémentales et les améliorations opérationnelles doivent être mises en œuvre au plus tôt ;
- les innovations de rupture sont indispensables pour diminuer drastiquement la consommation des appareils ;
- le renouvellement des flottes d'avions doit être optimisé afin de capter les bénéfices attendus en termes d'émissions de CO₂, que ceux-ci résultent d'innovations incrémentales ou de rupture ;
- la production des biocarburants doit être maximisée pour limiter le besoin en électricité ;
- la production de carburants de synthèse – qui représenteraient la majorité des carburants substitués aux énergies fossiles en 2050 – nécessite un niveau d'investissements sans précédent dans les infrastructures de production d'électricité, représentant un doublement des investissements actuellement réalisés dans le secteur pétrolier.

Historiquement, si le transport aérien a réussi à contenir ses émissions dans un contexte de hausse de trafic sans faire appel à des énergies alternatives, cette situation n'est plus compatible avec l'ambition de décarbonation du secteur. Il devient ainsi indispensable de mettre en place une action coordonnée entre le secteur aéronautique, les acteurs de la production électrique et les énergéticiens producteurs de carburants de substitution (biocarburant, hydrogène, carburant de synthèse) tout en gardant une cohérence d'ensemble entre les mesures mises en place pour décarboner les différents modes de transport.

Les États ont donc un rôle central à jouer dans l'accompagnement de la transition de ce secteur, en particulier afin de soutenir la mise en place de nouveaux moyens de production électrique et de carburants durables.

Par ailleurs, il est certain que la décarbonation sera réalisée à différentes vitesses selon les plaques géographiques (en fonction de la situation et des ambitions de chaque État) et les institutions devront être vigilantes à ce que les mesures prises localement ne génèrent pas de distorsion de concurrence à l'encontre des géographies les plus volontaristes, l'aviation étant par nature un secteur mondialisé.

Ne pas s'engager dans la dynamique présentée dans cette étude constituerait un triple risque de voir (i) une remise en question de la dynamique de croissance du trafic aérien, (ii) un déclassement de la filière aéronautique et (iii) l'émergence d'une nouvelle dépendance aux pays exportateurs de carburants d'aviation durable.

Aussi, nous considérons que les recommandations formulées dans le présent rapport doivent être engagées dans la mesure où elles constituent la meilleure chance d'atteindre un modèle de mobilité aérienne décarbonée.

APERÇU DE DIFFÉRENTES ÉTUDES CONSACRÉES À CE THÈME

De nombreuses publications ont voulu tracer les contours d'un scénario de décarbonation de l'aérien d'ici 2050, et les implications qui en découlent pour le système de production d'électricité. Certaines ont été exploitées dans le cadre de la rédaction de ce rapport, d'autres non, et leur éclairage n'en est pas moins intéressant.

Les études citées jusque-là dans ce rapport – *Clean Skies for Tomorrow*; *Waypoint 2050*; *Destination 2050* – soulignent le rôle clé des SAF dans un scénario de décarbonation du transport aérien, en particulier des carburants de synthèse (Power to Liquids) pour compléter l'offre des biocarburants compte-tenu de leur potentiel bioénergétique limité en 2050 (près de 400 Mtep en 2050).

Si toutes admettent que l'accès à des sources durables de CO₂, d'hydrogène vert et d'électricité renouvelable à des coûts compétitifs est le principal obstacle à l'atteinte de l'objectif recherché, elles se distinguent par ailleurs :

- Le rapport *Clean Skies for Tomorrow* pose l'hypothèse que les biocarburants seront utilisés en priorité pour le transport aérien¹¹², considéré comme plus difficile à décarboner compte-tenu de la faible maturité technologique de la propulsion électrique ou à l'hydrogène pour l'avion par rapport à la voiture par exemple (il en va de même pour la production d'électricité ou

le chauffage résidentiel), il propose donc d'accélérer le déploiement des alternatives au pétrole dans les moyens de transport.

- Les rapports *Destination 2050* et *Waypoint 2050* soulignent que la production d'électricité décarbonée doit être intensifiée dans l'UE.

Le *Shift Project*¹¹³ de son côté propose d'établir un budget carbone pour répondre à l'objectif de contenir le réchauffement climatique à 2°C d'ici 2100 (Accords de Paris) en prenant en compte le retour du trafic aérien à son niveau de 2019 (avant crise) en 2024, puis une croissance de 4 %/an jusqu'en 2050. Il conclut son analyse en soulignant que seul un réexamen de la croissance du trafic aérien permettrait de respecter l'objectif initial. En particulier, il distingue 2 scénarios de décarbonation pour tenir le budget carbone, plus ou moins ambitieux :

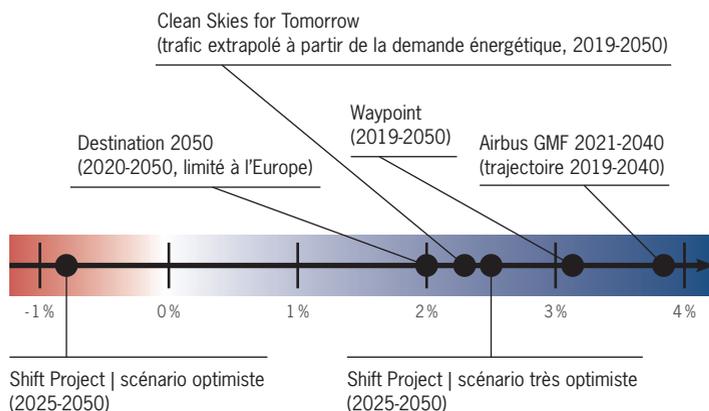
- Un scénario « très optimiste » : roadmap technologique conforme aux prévisions les plus optimistes du secteurs (court/moyen-courrier à hydrogène en 2035, long-courrier avec motorisation acceptant 100 % de SAF en 2035...), renouvellement des flottes tous les 15 ans, 100 % de la production de SAF dédiée à l'aviation...
- Un scénario « optimiste » : roadmap technologique décalée de 5 ans par rapport au scénario précédent, renouvellement des flottes tous les 25 ans, 50 % de la production de SAF dédiée à l'aviation (le reste destiné aux autres secteurs du transport).

112 *Clean Skies for Tomorrow, Guidelines for a Sustainable Aviation Fuel Blending Mandate in Europe* (Juillet 2021).

113 *Think tank* dont la mission est d'éclairer et d'influencer le débat sur la transition énergétique, financé en partie par le mécénat d'industriels. Tiré de la note de synthèse *Pouvoir voler en 2050 : quelle aviation dans un monde contraint ?* (mars 2021).

Hypothèses de trafic aérien de passagers par source

(TCAM trafic aérien passager, unité : TCAM¹⁰⁸)



Source : Waypoint 2050, Destination 2050, Clean Skies for Tomorrow, Airbus Global Market Forecast 2021-2040, Shift Project, Analyses Archery Strategy Consulting.

Il convient de rappeler ici que ce rapport a pris pour hypothèse le scénario décrit par Waypoint, avec une croissance du trafic aérien de 3,1 % par an entre 2019 et 2050.

114 TCAM = taux de croissance annuel moyen.

REMERCIEMENTS

L'Institut Montaigne remercie particulièrement les personnes suivantes pour leur contribution à ce travail :

Présidents de la réflexion :

- **Guillaume Faury**, président exécutif, Airbus
- **Benjamin Smith**, directeur général, Air France-KLM

Rapporteurs :

- **Stéphane Alberne**, président, Archery Strategy Consulting
- **Rémy Bonnery**, Senior Project Manager, Archery Strategy Consulting
- **Guillaume Hue**, Partner, Archery Strategy Consulting
- **Ludovic Planté**

Équipe de travail :

- **Gaëtan Arpin**, Analyst, Archery Strategy Consulting
- **Clément Bordet**, Associate Project Manager, Archery Strategy Consulting
- **Maximilien Chaperon**, assistant chargé d'études, Institut Montaigne
- **Thomas Feugier**, assistant chargé d'études, Institut Montaigne
- **Iona Lefebvre**, chargée d'études, Institut Montaigne
- **Nicolas Léonard**, consultant, Archery Strategy Consulting
- **Emmanuel Miremont**, Associate Project Manager, Archery Strategy Consulting
- **Camille Monvoisin**, Consultant, Archery Strategy Consulting
- **Matteo Spezzaferri**, Senior Consultant, Archery Strategy Consulting
- **Adrien Vasse**, Senior Consultant, Archery Strategy Consulting

Nous remercions également les personnes avec qui nous avons échangé dans l'élaboration de ce travail

- **Yannick Assouad**, directrice générale Adjointe Thales, Avionique
- **Wassim Ballout**, analyste stratégique, Direction de la Stratégie, EDF
- **Jerôme Batout**, associé, Cabinet Batout-Guilbaud
- **Anne-Sophie de la Bigne**, directrice des affaires civiles à la direction des Affaires Publiques, Airbus
- **Anne Bondiou Clergerie**, directrice affaires R&D, Espace et Environnement, GIFAS (Groupement des industries françaises aéronautiques et spatiales) et secrétaire exécutif du Conseil pour la Recherche Aéronautique Civile (CORAC)
- **Rémi Borel**, chargé de mission, Direction des Affaires publiques, EDF
- **Antoine Bouvier**, directeur de la stratégie, Airbus
- **Yann Briand**, chercheur climat et transports, Institut du Développement Durable et des Relations Internationales (IDDRI)
- **Olivier Del Bucchia**, membre d'Aérodécarbo, co-auteur du rapport « Pouvoir voler en 2050 »
- **Jean-Pierre Burzynski**, directeur du Centre de Résultats Procédés, IFP Énergies nouvelles
- **Grégoire Carpentier**, membre d'Aérodécarbo, co-auteur du rapport « Pouvoir voler en 2050 »
- **Damien Cazé**, directeur général de l'Aviation civile (DGAC)
- **Léa Chauvin**, *Corporate Public Affairs Manager*, Air Liquide Group
- **Pierre-Franck Chevet**, président du conseil d'administration, IFP Énergies nouvelles
- **Lucas Colson**, chef de projets, Direction Générale des Entreprises (DGE)
- **Marc Cottignies**, ingénieur expert, ADEME
- **Philippe Coq**, directeur des affaires publiques, Airbus
- **Éric Dalbies**, directeur de la recherche, de la technologie et l'innovation, Safran
- **François Delabre**, responsable des relations Think Tanks et des Études Économiques Affaires Institutionnelles, Groupe Air France-KLM
- **Stephan Denner**, *Managing Director*, AVIAPARTNER France
- **Nicolas Disle**, responsable grands comptes pour la filière aéronautique, EDF commerce
- **Muriel Doucet**, *Director of Public Affairs*, Innovation, Technologies (Deep Tech: Space, Big Science / Quantum Computing, Aerospace), Digital & Healthcare, Air Liquide Group
- **Régis le Drezen**, *Head of department-Innovation & Development e-Mobility*, Enedis
- **Ève Dufosse**, responsable des programmes Énergies Renouvelables, Biomasse et Power-to-X de la Recherche et Développement EDF
- **Julien Einaudi**, *Executive Vice President*, Groupe Ortec
- **Énea Fracassi**, *Chief Operating Officer*, Corsair International
- **Thibault Frossard**, conseiller approvisionnements stratégiques, numérique, innovation et transports, Cabinet de la ministre déléguée, chargée de l'industrie
- **Laurent Galtier**, *Activity Leader for Organics*, SUEZ
- **Jacques Ghisgant**, responsable d'actions territoriales, financement de l'innovation, EDF Ile-de-France
- **Hervé Gilibert**, *Chief Technical Officer*, ArianeGroup
- **Pierre-Étienne Girardot**, conseiller innovation, industries des transports et du numérique, Cabinet de la ministre déléguée, chargée de l'industrie
- **Jean Gouadain**, directeur de cabinet du directeur général de l'Aviation civile, Direction Générale de l'Aviation Civile
- **Fabien Guillotin**, conseiller technique, Cabinet du Directeur Général Direction Générale de l'Aviation Civile
- **Marc Hamy**, *Vice President*, Corporate Affairs, Sustainability and Environment, Airbus
- **Jean Christophe Henoux**, *VP futur programs*, ArianeGroup
- **Laurent Joly**, directeur adjoint de la Recherche et des Ressources Pédagogiques, ISAE-SUPAERO
- **Marion Lacombe**, *Business Developer Hydrogene*, GRTgaz
- **Dominique Lagarde**, *directeur de la stratégie*, Enedis
- **Marwan Lahoud**, *Executive chairman*, ACE Capital Partners, membre du comité directeur de l'Institut Montaigne

- **Matthieu Landon**, conseiller technique Industrie, recherche au sein du Pôle économie, finances industrie du cabinet du Premier Ministre
- **Anne-Sophie Le Lay**, secrétaire générale, Air France-KLM
- **Steven Lemoing**, responsable du programme des énergies nouvelles, Airbus
- **Antoine Maguin**, CEO, Alvest Group
- **Joffrey Mai**, directeur environnement et développement durable, Vinci Concessions
- **Denis Mercier**, directeur général adjoint, FIVES
- **Dominique Mockly**, président et directeur général, Terega
- **Samuel Morillon**, *Senior Vice President*, Asia Pacific – General Manager, Siemens Energy (au moment de l'audition) ?
- **Pierre Moschetti**, sous-directeur de la construction aéronautique, DGAC
- **Thibaud Normand**, directeur climat, Safran
- **Nicolas Notebaert**, directeur général, Vinci Concessions
- **Xavier Pons**, *SONOVISION Managing Director* – ORTEC Groupe
- **Olivier Reuther**, Hydrogen Project Leader, ArianeGroup
- **Anne Rigail**, directrice générale, Air France
- **François Robert**, membre d'Aérodécarbo, co-auteur du rapport « Pouvoir voler en 2050 »
- **Marc Rohfritsch**, directeur du programme industrie et services, Secrétariat général pour l'investissement
- **Delphine Roma**, *VP Marketing – Global Markets & Technologies*, Air Liquide Group
- **Augustin de Romanet**, président-directeur général, groupe Aéroports De Paris
- **André Hubert Roussel**, CEO, ArianeGroup
- **Marianne Sieg de Maintenant**, directrice affaires institutionnelles et internationales, Groupe Air France-KLM
- **Stéphane Thion**, *Head of Sustainable Aviation Fuels*, TotalEnergies Aviation – Strategy/Development & Sustainability
- **Yann Tréméac**, chef de service adjoint Transports et Mobilité, ADEME
- **Lucas Violon**, consultant, Batout Guilbaud

- **Xavier Vigor**, *VP Technologies and Industrial Management – World Business Line Hydrogen*, Air Liquide Group
- **Jean-Christophe Viguie**, *Program Manager Biofuels & Plastic Recycling*, IFP Énergies nouvelles
- **David Ziegler**, *VP Industry Aerospace and Defense*, Dassault Systèmes

**Les opinions exprimées dans ce rapport
n'engagent ni les personnes précédemment citées
ni les institutions qu'elles représentent.**

TABLE DES PRINCIPALES SOURCES

- Agence Internationale de l'Energie (AIE), *Net Zero by 2050* (mai 2021), disponible sur <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- Agence Internationale de l'Energie (AIE), *Energy Technology Perspectives 2020* (septembre 2020), disponible sur <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>
- Agence Internationale de l'Energie (AIE), *Car market share by powertrain in selected countries and globally, in the Stated Policies Scénario and the Sustainable Development Scénario, 2019, 2030 and 2050* (avril 2021), disponible sur <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/car-market-share-by-powertrain-in-selected-countries-and-globally-in-the-stated-policies-scénario-and-the-sustainable-development-scénario-2019-2030-and-2050>, dernière consultation le 15/12/2021
- Agence Internationale de l'Energie (AIE), *Global EV Outlook 2021, Prospects for electric vehicle deployment*, (2021), disponible sur <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>
- Air Transport Action Group (ATAG), *Waypoint 2050 – a vision of net-zero aviation by mid-century* (2^e édition, septembre 2021), disponible sur https://aviationbenefits.org/media/167417/w2050_v2021_27sept_full.pdf
- Airbus, *Global Market Forecast 2021 – 2040* (2021), disponible sur <https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/market/global-market-forecast>
- Airlines For Europe (A4E), Airports Council International (ACI), AeroSpace & Defence Industries Association of Europe (ASD), Civil Air Navigation Services Organisation (CANSO) et European Regions Airline Association (ERA), *NRL Royal Netherlands Aerospace Centre et SEO Amsterdam Economics, Destination 2050 – A route to Net Zero European Aviation* (février 2021), disponible sur https://www.destination2050.eu/wp-content/uploads/2021/03/Destination2050_Report.pdf
- Assemblée Nationale, *Mission d'information sur les agrocarburants* (janvier 2020), disponible sur https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/rapports/cion-dvp/115b2609_rapport-information#
- BP, *BP Energy Outlook 2020* (2020), disponible sur <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2020.pdf>
- Carbone 4, Murzeau Victor, *La Taxonomie européenne : pièce centrale de la stratégie réglementaire européenne pour une finance durable* (juillet 2021), disponible sur <https://www.carbone4.com/analyse-taxonomie-europeenne>
- Clean Sky 2 & Fuel Cells Hydrogen 2, *Hydrogen-powered aviation, A fact-study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050* (juin 2020), disponible sur <https://www.fch.europa.eu/publications/hydrogen-powered-aviation>
- European Research Establishments in Aeronautics (EREA), *From Air Transport System 2050 Vision to Panning for Research and Innovation* (mai 2012), disponible sur https://www.onera.fr/sites/default/files/recherche/ats_2050-phase2_en.pdf
- Eurocontrol, *A-CDM Impact Assessment* (mars 2016), disponible sur <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-04/a-cdm-impact-assessment-2016.pdf>
- Eurocontrol, *Data Snapshot #4 on CO₂ emissions by flight distance* (février 2021), disponible sur <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-data-snapshot-co2-emissions-flight-distance>
- Eurocontrol, *CORSIA and the EU's Emissions Trading System: how EUROCONTROL supports European aviation to foster sustainability* (Mai 2021), disponible sur <https://www.eurocontrol.int/article/corsia-and-eus-emissions-trading-system-how-eurocontrol-supports-european-aviation-foster>
- Eurocontrol, *Continuous climb and descent operations*, disponible sur <https://www.eurocontrol.int/concept/continuous-climb-and-descent-operations>, dernière consultation le 15/12/2021
- European Environment Agency (EEA), European Union Aviation Safety Agency (EASA) et Eurocontrol, *European Aviation Environmental Report 2019* (janvier 2019), disponible sur <https://www.easa.europa.eu/eaer/downloads>
- Hydrogen Council, *Hydrogen scaling up* (novembre 2017), disponible sur <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf>

- International Air Transport Association (IATA), *Fly Net Zero – Airline commitment to Net Zero 2050* (octobre 2021) disponible sur : <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/presentations/environment-net-zero-carbon-at-iata-agm-2021/>
- International Air Transport Association (IATA), *Fact Sheet: EU and US policy approaches to advance SAF production* (octobre 2021) disponible sur : <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/fact-sheet-us-and-eu-saf-policies.pdf>
- International Air Transport Association (IATA), *Estimating Air Travel Demand Elasticities* (décembre 2007), disponible sur <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/estimating-air-travel-demand-elasticities-by-intervistas/>
- International Air Transport Association (IATA), *Aircraft Technology Roadmap to 2050* (2019), disponible sur <https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/technology20roadmap20to20205020no20foreword.pdf>
- International Council on Clean Transportation (ICCT), *CO₂ emissions from commercial aviation* (septembre 2019), disponible sur <https://theicct.org/publications/co2-emissions-commercial-aviation-2018>
- International Renewable Energy Agency (IRENA), *Innovation Outlook – Advanced Liquid biofuels* (octobre 2016), disponible sur <https://www.irena.org/publications/2016/Oct/Innovation-Outlook-Advanced-Liquid-Biofuels>
- DNV GL, Maritime Forecast to 2050, *Energy Transition Outlook 2020* (septembre 2020), disponible sur https://www.isesassociation.com/wp-content/uploads/2020/09/DNVGL_2020_Maritime_Forecast_to_2050_WEB.pdf
- Khadilkar H. et Balakrishnan H., *Network Congestion Control of Airport Surface Operations* (25 avril 2014), *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, disponible sur <https://doi.org/10.2514/1.57850>
- Ministère de l'Écologie x Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC), *Guide méthodologique pour la détermination des émissions dans l'atmosphère des APU* (juillet 2007), disponible sur https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Guide_CITEPA__APU_180707.pdf
- Ministère de l'Écologie x Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC), *Enquête complémentarité modale avion train – Résultats 2014* (juin 2015), disponible sur https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Presentation_enquete_complementarite_modale_avril_2015.pdf
- Ministère de l'Écologie, Plan PBN France, *Plan français de mise en œuvre de la navigation fondée sur les performances* (mars 2012), disponible sur https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/PNB_francais.pdf
- RTE, *Futurs énergétiques 2050 – Principaux résultats* (octobre 2021), disponible sur https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-10/Futurs-Energetiques-2050-principaux-resultats_0.pdf
- RTE, *Rapport Futur Énergétique 2050 – Consommation* (novembre 2021), disponible sur https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-11/BP2050_rapport-complet_chapitre3_consommation.pdf
- Sky NRG, *WDB SAF Action Programme* (mars 2021), disponible sur https://skynrg.com/wp-content/uploads/2021/03/WDB-Action-programme_EN_Final-version3.pdf
- The Shift Project, *Pouvoir voler en 2050 : quelle aviation dans un monde contraint ?* (mars 2021), disponible sur <https://theshiftproject.org/article/quelle-aviation-dans-un-monde-contraint-nouveau-rapport-du-shift/>

Législation / Politiques Publiques

- Commission Européenne, *Regulation of the European Parliament and of the Council on ensuring a level playing field for sustainable air transport* (14 juillet 2021), disponible sur https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/refueeu_aviation_-_sustainable_aviation_fuels.pdf
- Commission Européenne, Cordis, *Box wing design for more efficient aircraft* (14 juillet 2021), disponible sur <https://cordis.europa.eu/article/id/428904-box-wing-design-for-more-efficient-aircraft>
- HM Government, *Net Zero Strategy: Build Back Greener* (octobre 2021), disponible sur https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1033990/net-zero-strategy-beis.pdf
- Ministère de la Transition Écologique, *Ciel Unique Européen* (20 septembre 2017), disponible sur <https://www.ecologie.gouv.fr/ciel-unique-europeen>

- Ministère de la Transition Ecologique, *Marchés du carbone* (12 novembre 2021), disponible sur <https://www.ecologie.gouv.fr/marches-du-carbone>
- Ministère de la Transition Ecologique, *Mise en œuvre de procédures de descente continue sur les grands aéroports en France* (29 septembre 2021), disponible sur <https://www.ecologie.gouv.fr/mise-en-oeuvre-procedures-descente-continue-sur-grands-aeroports-en-france>
- Parlement Européen, *Fiche thématique – Transport aérien : le ciel unique européen*, (mai 2021), disponible sur <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/fr/sheet/133/transport-aerien-le-ciel-unique-europeen>
- Sénat, *Projet de Loi de Finances 2022* (novembre 2021), disponible sur https://www.senat.fr/enseance/2020-2021/137/Amdt_1499.html
- The White House, *Fact Sheet: Biden Administration Advances the Future of Sustainable Fuels in American Aviation* (9 septembre 2021), disponible sur <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/09/09/fact-sheet-biden-administration-advances-the-future-of-sustainable-fuels-in-american-aviation/>
- Union Européenne, *Règlement n° 552/2004 du Parlement Européen et du Conseil du 10 mars 2004 concernant l'interopérabilité du réseau européen de gestion du trafic aérien* (2004), disponible sur <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?qid=1540462729790&uri=CELEX:32004R0552>
- World Economic Forum (WEF), *Clean Skies for Tomorrow: Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation* (novembre 2021), disponible sur <https://www.weforum.org/reports/clean-skies-for-tomorrow-sustainable-aviation-fuels-as-a-pathway-to-net-zero-aviation>

États financiers

- Air France, *Rapport Annuel 2014* (mai 2015), disponible sur https://www.airfranceklm.com/sites/default/files/publications/annual_report_2014.pdf
- Airbus, *Rapport annuel 2019* (février 2020), disponible sur <https://www.airbus.com/en/investors/financial-results-annual-reports>
- Boeing, *Rapport annuel 2019* (2020), disponible sur <https://investors.boeing.com/investors/financial-reports/default.aspx>

- Easy Jet plc, *Rapport Annuel 2014* (2015), disponible sur <https://www.annualreports.com/Company/easyjet-plc>
- Lufthansa, *Rapport annuel 2014* (2015), disponible sur : <https://investor-relations.lufthansagroup.com/fileadmin/downloads/en/financial-reports/financial-statements/LH-FS-2014-e.pdf>
- Rolls-Royce Holdings plc, *Rapport annuel 2019* (2020), disponible sur https://www.rolls-royce.com/~/_media/Files/R/Rolls-Royce/documents/annual-report/2019/2019-full-annual-report.pdf
- Safran, *Rapport annuel 2020* (février 2021), disponible sur <https://www.safran-group.com/finance/publications-results>

Presse / Sites internet

- Agence Internationale de l'Energie (AIE), *Évolution du trafic aérien mondial de passagers, 1980-2020* (décembre 2020), disponible sur <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-air-passenger-traffic-evolution-1980-2020>
- Air France, *Air France choisit la solution d'éco-pilotage SkyBreathe® pour réduire sa consommation de carburant et ses émissions de CO₂* (9 juillet 2020), disponible sur <https://corporate.airfrance.com/fr/communiquede-presse/air-france-choisit-la-solution-deco-pilotage-skybreather-pour-reduire-sa>
- Airbus, *Maintain – Ensuring safe efficient maintenance across the entire aircraft life cycle*, disponible sur <https://aircraft.airbus.com/en/services/maintain>, dernière consultation le 15/12/2021
- Airbus, *E-Fan X*, disponible sur <https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission/electric-flight/e-fan-x>, dernière consultation le 15/12/2021
- Airbus, *Airbus and Rolls-Royce sign UltraFan engine integration collaboration agreement* (avril 2018), disponible sur <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2018-04-airbus-and-rolls-royce-sign-ultrafan-engine-integration>
- Aviation Benefits Beyond Borders, *Étude de Cas First class fuel efficiency*, disponible sur <https://aviationbenefits.org/case-studies/first-class-fuel-efficiency/>, dernière consultation le 14/12/2021

- Aviation Benefits Beyond Borders, *Étude de Cas Fixed electrical ground power*, disponible sur <https://aviationbenefits.org/case-studies/fixed-electrical-ground-power/>, dernière consultation le 14/12/2021
- Aviation Benefits Beyond Borders, *Étude de Cas Space-based navigation*, disponible sur <https://aviationbenefits.org/case-studies/space-based-navigation/>, dernière consultation le 14/12/2021
- Boeing, *Onglet Innovation*, disponible sur <https://www.boeing.com/innovation/>, dernière consultation le 14/12/2021
- Boeing, *Boeing and SKyNRG Partner to Scale Sustainable Aviation Fuels Globally* (14 juillet 2021), disponible sur <https://investors.boeing.com/investors/investor-news/press-release-details/2021/Boeing-and-SkyNRG-Partner-to-Scale-Sustainable-Aviation-Fuels-Globally/default.aspx>
- CFM International, *onglet Innovation*, disponible sur <https://www.cfmaeroengines.com/sustainability/>, dernière consultation le 15/12/2021
- Clean Aviation, *Go with the flow: Clean Sky's Hybrid Laminar Flow Control Demo* (2018), disponible sur <https://www.cleansky.eu/go-with-the-flow-clean-skys-hybrid-laminar-flow-control-demo>
- Defense Industry Daily, *Embraer And Pratt & Whitney Partner On 100% SAF* (décembre 2021), disponible sur <https://www.defenseindustrydaily.com/embraer-and-pratt-whitney-partner-on-100-saf-egypt-might-purchase-k-9-netherlands-gets-mq-9-update-046290/>, dernière consultation le 15/12/2021
- Gaussin, *ART*, disponible sur <https://www.gaussin.com/art>, dernière consultation le 15/12/2021
- Industrie & Technologies, *Nippert Aline, Safran et GE Aviation lancent le développement d'un moteur de rupture pour réduire la consommation de carburant de 20 %* (juin 2021), disponible sur <https://www.industrie-techno.com/article/safran-et-ge-aviation-lancent-le-developpement-d-un-moteur-de-rupture-pour-reduire-la-consommation-de-carburant-de-20.65799>, dernière consultation le 15/12/2021
- International Airport Review, *SESAR deployment drives efficient, modern ATM* (novembre 2021), disponible sur <https://www.internationalairportreview.com/article/171718/sesar-deployment-drives-efficient-modern-atm/>
- Japan Airlines, *JAL's First Boeing 737-800 Next Generation Arrives in Japan* (21 novembre 2006), disponible sur <http://www.jal.com/en/press/0000773/773.html>
- Le Journal de l'Aviation, *Le TaxiBot en service chez Lufthansa* (23 février 2015), disponible sur <https://www.journal-aviation.com/actualites/28992-le-taxibot-en-service-chez-lufthansa-reportage-video>
- Le Journal de l'Aviation, *Drab Emilie, Transavia signe avec Safety Line* (18 décembre 2017), disponible sur <https://www.journal-aviation.com/actualites/39081-transavia-signe-avec-safety-line>, dernière consultation le 14/12/2021
- Les Echos, *investir, Reuters, FEATURE-De la peinture à l'eau pour l'A350* (15 mars 2013), disponible sur <https://investir.lesechos.fr/actions/actualites/feature-de-la-peinture-a-l-eau-pour-l-a350-880047.php>, dernière consultation le 15/12/2021
- L'Usine Nouvelle, *James Olivier, « La pénurie de puces est un combat de tous les jours », pour Yannick Assouad, patronne de l'avionique de Thales* (9 décembre 2021), disponible sur <https://www.usinenouvelle.com/article/la-penurie-de-puces-est-un-combat-de-tous-les-jours-pour-yannick-assouad-patronne-de-l-avionique-de-thales.N1167377>, dernière consultation le 14/12/2021
- OpenAirlines [blog], *[Interview] How Corsair International improved its fuel efficiency using big data analytics* (28 septembre 2021), disponible sur <https://blog.openairlines.com/interview-how-corsair-international-improved-its-fuel-efficiency-using-big-data-analytics>
- Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI), *Le Conseil de l'OACI adopte une nouvelle arme sur les émissions de CO₂ pour les aéronefs* (6 mars 2017), disponible sur <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/FR/ICAO-Council-adopts-new-CO2-emissions-standard-for-aircraft.aspx>
- Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI), *Aircraft CO₂ emissions standard metric system* (2017), disponible sur <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/CO2%20Metric%20System%20%20Information%20Sheet.pdf>
- Pratt & Whitney, *Pratt & Whitney GTF Advantage™ Engine*, disponible sur <https://pwgtf.com/advantage>, dernière consultation le 14/12/2021

LES PUBLICATIONS DE L'INSTITUT MONTAIGNE

- Safran, *Quel avenir pour l'Open Rotor ?* (28 mars 2019), disponible sur <https://www.safran-group.com/fr/actualite/quel-avenir-lopen-rotor-2019-03-28>
- Schiphol Airport, *Sustainable taxiing: Taxibot trial*, disponible sur <https://www.schiphol.nl/en/innovation/page/sustainable-taxiing-taxibot-trial/> dernière consultation le 15/12/2021
- The Guardian x AFP, *World's biggest machine capturing carbon from air turned on in Iceland* (9 septembre 2021), disponible sur <https://www.theguardian.com/environment/2021/sep/09/worlds-biggest-plant-to-turn-carbon-dioxide-into-rock-opens-in-iceland-orca>, dernière consultation le 14/12/2021
- The Guardian, Topham Gwyn, *Boeing's 737 Max wooed airlines with its cost-saving fuel economy* (mars 2019), disponible sur <https://www.theguardian.com/business/2019/mar/12/boeings-737-max-wooed-airlines-cost-saving-fuel-economy>, dernière consultation le 15/12/2021
- TotalEnergies, *Total démarre la production de biocarburants aériens durables sur ses sites français* (8 avril 2021), disponible sur <https://totalenergies.com/fr/medias/actualite/communiqués-presse/total-demarre-production-biocarburants-aeriens-durables>, dernière consultation le 14/12/2021
- TotalEnergies, *BioTfuel : vers un développement des biocarburants de 2^e génération* (8 avril 2021), disponible sur <https://totalenergies.com/fr/expertise-energies/projets/bioenergies/biotfuel-convertir-residus-vegetaux-carburant>, dernière consultation le 14/12/2021
- Union Européenne, *Partenariat Public-Privé Clean Aviation Joint Undertaking*, Clean Aviation seeks scientific advice (23 novembre 2021), disponible sur <https://clean-aviation.eu/members-of-the-scientific-advisory-body-of-the-clean-aviation-joint-undertaking>

- Cinq ans pour faire progresser la France des ETI (janvier 2022)
- 2022-2027 : quelles perspectives pour les finances publiques ? (janvier 2022)
- Santé 2022 : tout un programme (janvier 2022)
- China Trends #11 – Une ouverture à la carte : les investissements directs étrangers en Chine (décembre 2021)
- Transports du quotidien : en route vers le sans carbone ! (décembre 2021)
- La présidence française de l'Union européenne à la loupe (décembre 2021)
- Europe-Inde : quelles ambitions face à la Chine ? (décembre 2021)
- Réinvestir le secteur bancaire européen (novembre 2021)
- Une France convalescente, une France du « proche » Baromètre des Territoires 2021 (novembre 2021)
- China Trends n° 10 – Comment l'intelligence artificielle transformera la Chine (novembre 2021)
- Prix Interne du Carbone : une solution qui tombe à PIC pour les entreprises ? (novembre 2021)
- En campagne pour l'agriculture de demain (octobre 2021)
- La France dans le bouleversement du monde (octobre 2021)
- Automobile : feu vert pour une industrie durable (octobre 2021)
- Innovation française : nos incroyables talents (octobre 2021)
- Parcours patient : parcours du combattant ? (septembre 2021)
- Europe : agir ensemble pour la décarbonation (septembre 2021)
- Quelle Allemagne après Merkel ? (septembre 2021)
- Quinquennat Macron : le grand décryptage (août 2021)
- China Trends n° 9 – Une Chine décarbonée est-elle possible ? (juillet 2021)
- Villes : à vos données ! (juillet 2021)
- Vu de Pékin : le rebond de l'économie chinoise (juin 2021)
- Régions : le renouveau de l'action publique ? (juin 2021)
- La stabilité du Maghreb, un impératif pour l'Europe (mai 2021)
- Bien-vieillir : faire mûrir nos ambitions (mai 2021)
- Relance en Afrique : quel rôle pour les entreprises (mai 2021)

- Religion au travail : croire au dialogue – Baromètre du Fait Religieux en Entreprise (mai 2021)
- Fintech chinoise : l'heure de la reprise en main (avril 2021)
- Enseignement supérieur et recherche : il est temps d'agir! (avril 2021)
- Filière santé : gagnons la course à l'innovation (mars 2021)
- Rééquilibrer le développement de nos territoires (mars 2021)
- China Trends n° 8 – L'armée chinoise en Asie : puissance et coercition (février 2021)
- Repenser la défense face aux crise du 21^e siècle (février 2021)
- Les militants du djihad (janvier 2021)
- Compétitivité de la vallée de la Seine : comment redresser la barre? (janvier 2021)
- Semi-conducteurs : la quête de la Chine (janvier 2021)
- Vaccination en France : l'enjeu de la confiance (décembre 2020)
- Santé mentale : faire face à la crise (décembre 2020)
- Construire la métropole Aix-Marseille-Provence de 2030 (novembre 2020)
- Allemagne-France : pour une politique européenne commune à l'égard de la Chine (novembre 2020)
- Plan de relance : répondre à l'urgence économique (novembre 2020)
- Réformer les retraites en temps de crise (octobre 2020)
- Les quartiers pauvres ont un avenir (octobre 2020)
- Trump ou Biden – comment reconstruire la relation transatlantique? (octobre 2020)
- Le capitalisme responsable : une chance pour l'Europe (septembre 2020)
- Rebondir face au Covid-19 : neuf idées efficaces en faveur de l'emploi (septembre 2020)
- Un virus clarificateur L'impact du Covid-19 sur la politique étrangère de la France (juin 2020)
- Les entreprises françaises en Afrique face à la crise du Covid-19 (juin 2020)
- Transatlantic Trends 2020 (juillet 2020)
- Europe's Pushback on China (juin 2020)
- E-santé : augmentons la dose! (juin 2020)
- Dividende carbone : une carte à jouer pour l'Europe (juin 2020)
- L'action publique face à la crise du Covid-19 (juin 2020)
- Seine-Saint-Denis : les batailles de l'emploi et de l'insertion (mai 2020)
- Rebondir face au Covid-19 : relançons l'investissement (mai 2020)
- Rebondir face au Covid-19 : l'enjeu du temps de travail (mai 2020)
- Internet : le péril jeune? (avril 2020)
- Covid-19 : l'Asie orientale face à la pandémie (avril 2020)
- Algorithmes : contrôle des biais S.V.P. (mars 2020)
- Retraites : pour un régime équilibré (mars 2020)
- Espace : le réveil de l'Europe? (février 2020)
- Données personnelles : comment gagner la bataille? (décembre 2019)
- Transition énergétique : faisons jouer nos réseaux (décembre 2019)
- Religion au travail : croire au dialogue – Baromètre du Fait Religieux Entreprise 2019 (novembre 2019)
- Taxes de production : préservons les entreprises dans les territoires (octobre 2019)
- Médicaments innovants : prévenir pour mieux guérir (septembre 2019)
- Rénovation énergétique : chantier accessible à tous (juillet 2019)
- Agir pour la parité : performance à la clé (juillet 2019)
- Pour réussir la transition énergétique (juin 2019)
- Europe-Afrique : partenaires particuliers (juin 2019)
- Media polarization « à la française »? Comparing the French and American ecosystems (mai 2019)
- L'Europe et la 5G : le cas Huawei (partie 2, mai 2019)
- L'Europe et la 5G : passons la cinquième! (partie 1, mai 2019)
- Système de santé : soyez consultés! (avril 2019)
- Travailleurs des plateformes : liberté oui, protection aussi (avril 2019)
- Action publique : pourquoi faire compliqué quand on peut faire simple (mars 2019)
- La France en morceaux : baromètre des Territoires 2019 (février 2019)
- Énergie solaire en Afrique : un avenir rayonnant? (février 2019)
- IA et emploi en santé : quoi de neuf docteur? (janvier 2019)
- Cybermenace : avis de tempête (novembre 2018)
- Partenariat franco-britannique de défense et de sécurité : améliorer notre coopération (novembre 2018)
- Sauver le droit d'asile (octobre 2018)

- Industrie du futur, prêts, partez! (septembre 2018)
- La fabrique de l'islamisme (septembre 2018)
- Protection sociale : une mise à jour vitale (mars 2018)
- Innovation en santé : soignons nos talents (mars 2018)
- Travail en prison : préparer (vraiment) l'après (février 2018)
- ETI : taille intermédiaire, gros potentiel (janvier 2018)
- Réforme de la formation professionnelle : allons jusqu'au bout! (janvier 2018)
- Espace : l'Europe contre-attaque? (décembre 2017)
- Justice : faites entrer le numérique (novembre 2017)
- Apprentissage : les trois clés d'une véritable transformation (octobre 2017)
- Prêts pour l'Afrique d'aujourd'hui? (septembre 2017)
- Nouveau monde arabe, nouvelle « politique arabe » pour la France (août 2017)
- Enseignement supérieur et numérique : connectez-vous! (juin 2017)
- Syrie : en finir avec une guerre sans fin (juin 2017)
- Énergie : priorité au climat! (juin 2017)
- Quelle place pour la voiture demain? (mai 2017)
- Sécurité nationale : quels moyens pour quelles priorités? (avril 2017)
- Tourisme en France : cliquez ici pour rafraîchir (mars 2017)
- L'Europe dont nous avons besoin (mars 2017)
- Dernière chance pour le paritarisme de gestion (mars 2017)
- L'impossible État actionnaire? (janvier 2017)
- Un capital emploi formation pour tous (janvier 2017)
- Économie circulaire, réconcilier croissance et environnement (novembre 2016)
- Traité transatlantique : pourquoi persévérer (octobre 2016)
- Un islam français est possible (septembre 2016)
- Refonder la sécurité nationale (septembre 2016)
- Brexain ou Brexit : Europe, prépare ton avenir! (juin 2016)
- Réanimer le système de santé – Propositions pour 2017 (juin 2016)
- Nucléaire : l'heure des choix (juin 2016)
- Un autre droit du travail est possible (mai 2016)
- Les primaires pour les Nuls (avril 2016)
- Le numérique pour réussir dès l'école primaire (mars 2016)
- Retraites : pour une réforme durable (février 2016)
- Décentralisation : sortons de la confusion / Repenser l'action publique dans les territoires (janvier 2016)
- Terreur dans l'Hexagone (décembre 2015)
- Climat et entreprises : de la mobilisation à l'action / Sept propositions pour préparer l'après-COP21 (novembre 2015)
- Discriminations religieuses à l'embauche : une réalité (octobre 2015)
- Pour en finir avec le chômage (septembre 2015)
- Sauver le dialogue social (septembre 2015)
- Politique du logement : faire sauter les verrous (juillet 2015)
- Faire du bien vieillir un projet de société (juin 2015)
- Dépense publique : le temps de l'action (mai 2015)
- Apprentissage : un vaccin contre le chômage des jeunes (mai 2015)
- Big Data et objets connectés. Faire de la France un champion de la révolution numérique (avril 2015)
- Université : pour une nouvelle ambition (avril 2015)
- Rallumer la télévision : 10 propositions pour faire rayonner l'audiovisuel français (février 2015)
- Marché du travail : la grande fracture (février 2015)
- Concilier efficacité économique et démocratie : l'exemple mutualiste (décembre 2014)
- Résidences Seniors : une alternative à développer (décembre 2014)
- Business schools : rester des champions dans la compétition internationale (novembre 2014)
- Prévention des maladies psychiatriques : pour en finir avec le retard français (octobre 2014)
- Temps de travail : mettre fin aux blocages (octobre 2014)
- Réforme de la formation professionnelle : entre avancées, occasions manquées et pari financier (septembre 2014)
- Dix ans de politiques de diversité : quel bilan? (septembre 2014)
- Et la confiance, bordel? (août 2014)
- Gaz de schiste : comment avancer (juillet 2014)
- Pour une véritable politique publique du renseignement (juillet 2014)
- Rester le leader mondial du tourisme, un enjeu vital pour la France (juin 2014)

- 1 151 milliards d'euros de dépenses publiques : quels résultats? (février 2014)
- Comment renforcer l'Europe politique (janvier 2014)
- Améliorer l'équité et l'efficacité de l'assurance-chômage (décembre 2013)
- Santé : faire le pari de l'innovation (décembre 2013)
- Afrique-France : mettre en œuvre le co-développement Contribution au XXVI^e sommet Afrique-France (décembre 2013)
- Chômage : inverser la courbe (octobre 2013)
- Mettre la fiscalité au service de la croissance (septembre 2013)
- Vive le long terme! Les entreprises familiales au service de la croissance et de l'emploi (septembre 2013)
- Habitat : pour une transition énergétique ambitieuse (septembre 2013)
- Commerce extérieur : refuser le déclin - Propositions pour renforcer notre présence dans les échanges internationaux (juillet 2013)
- Pour des logements sobres en consommation d'énergie (juillet 2013)
- 10 propositions pour refonder le patronat (juin 2013)
- Accès aux soins : en finir avec la fracture territoriale (mai 2013)
- Nouvelle réglementation européenne des agences de notation : quels bénéfices attendre? (avril 2013)
- Remettre la formation professionnelle au service de l'emploi et de la compétitivité (mars 2013)
- Faire vivre la promesse laïque (mars 2013)
- Pour un « New Deal » numérique (février 2013)
- Intérêt général : que peut l'entreprise? (janvier 2013)
- Redonner sens et efficacité à la dépense publique 15 propositions pour 60 milliards d'économies (décembre 2012)
- Les juges et l'économie : une défiance française? (décembre 2012)
- Restaurer la compétitivité de l'économie française (novembre 2012)
- Faire de la transition énergétique un levier de compétitivité (novembre 2012)
- Réformer la mise en examen Un impératif pour renforcer l'État de droit (novembre 2012)
- Transport de voyageurs : comment réformer un modèle à bout de souffle? (novembre 2012)
- Comment concilier régulation financière et croissance : 20 propositions (novembre 2012)
- Taxe professionnelle et finances locales : premier pas vers une réforme globale? (septembre 2012)
- Remettre la notation financière à sa juste place (juillet 2012)
- Réformer par temps de crise (mai 2012)
- Insatisfaction au travail : sortir de l'exception française (avril 2012)
- Vademecum 2007 – 2012 : Objectif Croissance (mars 2012)
- Financement des entreprises : propositions pour la présidentielle (mars 2012)
- Une fiscalité au service de la « social compétitivité » (mars 2012)
- La France au miroir de l'Italie (février 2012)
- Pour des réseaux électriques intelligents (février 2012)
- Un CDI pour tous (novembre 2011)
- Repenser la politique familiale (octobre 2011)
- Formation professionnelle : pour en finir avec les réformes inabouties (octobre 2011)
- Banlieue de la République (septembre 2011)
- De la naissance à la croissance : comment développer nos PME (juin 2011)
- Reconstruire le dialogue social (juin 2011)
- Adapter la formation des ingénieurs à la mondialisation (février 2011)
- « Vous avez le droit de garder le silence... » Comment réformer la garde à vue (décembre 2010)
- Gone for Good? Partis pour de bon? – Les expatriés de l'enseignement supérieur français aux États-Unis (novembre 2010)
- 15 propositions pour l'emploi des jeunes et des seniors (septembre 2010)
- Afrique – France. Réinventer le co-développement (juin 2010)
- Vaincre l'échec à l'école primaire (avril 2010)
- Pour un Eurobond. Une stratégie coordonnée pour sortir de la crise (février 2010)
- Réforme des retraites : vers un big-bang? (mai 2009)
- Mesurer la qualité des soins (février 2009)
- Ouvrir la politique à la diversité (janvier 2009)
- Engager le citoyen dans la vie associative (novembre 2008)
- Comment rendre la prison (enfin) utile (septembre 2008)
- Infrastructures de transport : lesquelles bâtir, comment les choisir? (juillet 2008)

- HLM, parc privé. Deux pistes pour que tous aient un toit (juin 2008)
- Comment communiquer la réforme (mai 2008)
- Après le Japon, la France...
Faire du vieillissement un moteur de croissance (décembre 2007)
- Au nom de l'Islam... Quel dialogue avec les minorités musulmanes en Europe? (septembre 2007)
- L'exemple inattendu des Vets
Comment ressusciter un système public de santé (juin 2007)
- Vademecum 2007-2012 – Moderniser la France (mai 2007)
- Après Erasmus, Amicus. Pour un service civique universel européen (avril 2007)
- Quelle politique de l'énergie pour l'Union européenne? (mars 2007)
- Sortir de l'immobilité sociale à la française (novembre 2006)
- Avoir des leaders dans la compétition universitaire mondiale (octobre 2006)
- Comment sauver la presse quotidienne d'information (août 2006)
- Pourquoi nos PME ne grandissent pas (juillet 2006)
- Mondialisation : réconcilier la France avec la compétitivité (juin 2006)
- TVA, CSG, IR, cotisations...
Comment financer la protection sociale (mai 2006)
- Pauvreté, exclusion : ce que peut faire l'entreprise (février 2006)
- Ouvrir les grandes écoles à la diversité (janvier 2006)
- Immobilier de l'État : quoi vendre, pourquoi, comment (décembre 2005)
- 15 pistes (parmi d'autres...) pour moderniser la sphère publique (novembre 2005)
- Ambition pour l'agriculture, libertés pour les agriculteurs (juillet 2005)
- Hôpital : le modèle invisible (juin 2005)
- Un Contrôleur général pour les Finances publiques (février 2005)
- Les oubliés de l'égalité des chances (janvier 2004 – Réédition septembre 2005)

Pour les publications antérieures se référer à notre site internet :

www.institutmontaigne.org



ABB FRANCE
 ABBVIE
 ACCENTURE
 ACCURACY
 ACTIVEO
 ADECCO
 ADEO
 ADIT
 ADVANCY
 AIR FRANCE - KLM
 AIR LIQUIDE
 AIRBUS
 ALLEN & OVERY
 ALLIANZ
 ALVAREZ & MARSAL FRANCE
 AMAZON
 AMBER CAPITAL
 AMUNDI
 ANTIN INFRASTRUCTURE PARTNERS
 ARCHERY STRATEGY CONSULTING
 ARCHIMED
 ARDIAN
 ASTRAZENECA
 AUGUST DEBOUZY
 AVRIL
 AXA
 BAKER & MCKENZIE
 BEARINGPOINT
 BESSÉ
 BG GROUP
 BNP PARIBAS
 BOLLORÉ
 BONA FIDÉ
 BOUYGUES
 BROUSSE VERGEZ
 BRUNSWICK
 CANDRIAM
 CAPGEMINI
 CAPITAL GROUP

INSTITUT MONTAIGNE



CAREIT ASSET ET PROPERTY MANAGEMENT
CARREFOUR
CASINO
CHUBB
CIS
CISCO SYSTEMS FRANCE
CLUB TOP 20
CMA CGM
CNP ASSURANCES
COHEN AMIR-ASLANI
COMPAGNIE PLASTIC OMNIUM
CONSEIL SUPÉRIEUR DU NOTARIAT
CORRÈZE & ZAMBÈZE
CRÉDIT AGRICOLE
D'ANGELIN & CO.LTD
DASSAULT SYSTÈMES
DE PARDIEU BROCAS MAFFEI
DOCTOLIB
ECL GROUP
EDENRED
EDF
EDHEC BUSINESS SCHOOL
EDWARDS LIFESCIENCES
ELSAN
ENEDIS
ENGIE
EQT
ESL & NETWORK
EUROGROUP CONSULTING
FIVES
FONCIÈRE INEA
GALILEO GLOBAL EDUCATION
GETLINK
GIDE LOYRETTE NOUEL
GOJOB
GOOGLE
GRAS SAVOYE
GROUPAMA
GROUPE BEL

INSTITUT MONTAIGNE



GROUPE EDMOND DE ROTHSCHILD
GROUPE M6
GROUPE ORANGE
HAMEUR ET CIE
HENNER
HSBC CONTINENTAL EUROPE
IBM FRANCE
IFPASS
ING BANK FRANCE
INKARN
INSTITUT MÉRIEUX
INTERNATIONAL SOS
INTERPARFUMS
INTUITIVE SURGICAL
IONIS EDUCATION GROUP
ISRP
IZIWORK
JEANTET ASSOCIÉS
JOLT CAPITAL
KANTAR
KATALYSE
KEARNEY
KEDGE BUSINESS SCHOOL
KKR
KPMG S.A.
LA BANQUE POSTALE
LA COMPAGNIE FRUITIÈRE
LINEDATA SERVICES
LIVANOVA
L'ORÉAL
LOXAM
LVMH - MOËT-HENNESSY - LOUIS VUITTON
M.CHARRAIRE
MACSF
MALAKOFF HUMANIS
MAREMMA
MAZARS
MCKINSEY & COMPANY FRANCE
MÉDIA-PARTICIPATIONS

INSTITUT MONTAIGNE



MEDIOBANCA
MERCER
MERIDIAM
MICHELIN
MICROSOFT FRANCE
MITSUBISHI FRANCE S.A.S
MOELIS & COMPANY
MOODY'S FRANCE
NATIXIS
NESTLÉ
NEXITY
ODDO BHF
OLIVER WYMAN
ONDRA PARTNERS
ONEPOINT
ONET
OPTIGESTION
ORANO
ORTEC GROUP
OWKIN
PAI PARTNERS
PERGAMON
POLYTANE
PRODWARE
PRUDENTIA CAPITAL
PWC FRANCE & MAGHREB
RAISE
RAMSAY GÉNÉRALE DE SANTÉ
RANDSTAD
RATP
RELX GROUP
RENAULT
REXEL
RICOL LASTEYRIE
RIVOLIER
ROCHE
ROLAND BERGER
ROTHSCHILD & CO
RTE

INSTITUT MONTAIGNE



SAFRAN
SANOFI
SAP FRANCE
SCHNEIDER ELECTRIC
SERVIER
SGS
SIA PARTNERS
SIACI SAINT HONORÉ
SIEMENS
SIEMENS ENERGY
SIER CONSTRUCTEUR
SNCF
SNCF RÉSEAU
SODEXO
SNEF
SPRINKLR
SPVIE
STAN
SUEZ
SYSTEMIS
TALAN
TECNET PARTICIPATIONS SARL
TEREGA
THE BOSTON CONSULTING GROUP
TILDER
TOFANE
TOTALENERGIES
UBS FRANCE
VEOLIA
VERLINGUE
VINCI
VIVENDI
WAKAM
WAVESTONE
WENDEL
WILLIS TOWERS WATSON
WORDAPPEAL
ZURICH

SOUTIENNENT L'INSTITUT MONTAIGNE

SOUTIENNENT L'INSTITUT MONTAIGNE



COMITÉ DIRECTEUR

PRÉSIDENT

Henri de Castris président, Institut Montaigne

MEMBRES

David Azéma associé, Perella Weinberg Partners

Emmanuelle Barbara *Senior Partner*, August Debouzy

Marguerite Bérard directrice des Réseaux France, BNP Paribas

Jean-Pierre Clamadieu président du Conseil d'Administration, ENGIE

Paul Hermelin président du Conseil d'administration, Capgemini

Marwan Lahoud président, Ace Capital Partners

Natalie Rastoin présidente, Polytane ; *Senior Advisor*, WPP

René Ricol président, Ricol Lasteyrie

Jean-Dominique Senard président du Conseil d'administration, Groupe Renault

Arnaud Vaissé président-directeur général, International SOS

Natacha Valla économiste ; doyenne de l'École de Management
et d'Innovation, Sciences Po

Florence Verzelen directrice générale adjointe, Dassault Systèmes

Philippe Wahl président-directeur général, Groupe La Poste

PRÉSIDENT D'HONNEUR

Claude Bébéar fondateur et président d'honneur, AXA

Photo de couverture © Mathieu Odin.

INSTITUT MONTAIGNE



IL N'EST DÉSIR PLUS NATUREL QUE LE DÉSIR DE CONNAISSANCE

Aviation décarbonée : embarquement immédiat

En 2021, la filière aéronautique a annoncé un objectif de neutralité carbone à horizon 2050. Pour être en ligne avec les Accords de Paris, le secteur aérien a franchi une nouvelle étape dans sa volonté de décarbonation, en prenant un engagement formel. Cet objectif doit désormais se décliner en un plan d'actions concret, combinant un ensemble de mesures volontaristes et ambitieuses.

Responsable de 2 à 3% des émissions de CO₂ mondiales et de 10% des émissions du secteur des transports, le transport aérien occupe une place essentielle dans le modèle de mobilité des sociétés modernes (avec 4,5 millions de passagers transportés en 2019), et plus globalement dans le fonctionnement de nos sociétés et de leurs économies.

Aujourd'hui, la réussite de la transition de la filière aéronautique française et européenne est essentielle tant ce secteur est stratégique. Il s'agit ainsi de la confirmer comme acteur de classe mondiale en termes de compétitivité et de technologie, et de permettre aux citoyens français et européens de continuer à bénéficier des contributions majeures de l'aviation à notre société.

L'Institut Montaigne s'est ainsi saisi de la question afin de décrire et détailler l'ensemble des leviers qui devront permettre d'atteindre l'objectif de neutralité carbone du transport aérien mondial en 2050, et de mesurer le niveau d'ambition que représente cet objectif, notamment à travers une estimation des besoins d'investissement qu'il nécessite.

Rejoignez-nous sur :



Suivez chaque semaine notre actualité
en vous abonnant à notre newsletter sur :
www.institutmontaigne.org

Institut Montaigne
59, rue La Boétie - 75008 Paris
Tél. +33 (0)1 53 89 05 60
www.institutmontaigne.org

10 €
ISSN 1771-6764
JANVIER 2022