



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



ACNUSA

AUTORITÉ DE CONTRÔLE DES NUISANCES AÉROPORTUAIRES

CONTEXTE DE LA LUTTE POUR LE CLIMAT DANS LE SECTEUR AÉROPORTUAIRE

Février 2021

PREFACE



La crise sanitaire de la COVID 19 impacte lourdement le transport aérien et les activités aéroportuaires qui y sont liées. Elle révèle certaines failles structurelles du secteur. Elle stimule ses principaux acteurs qui ont bien conscience que l'avenir du transport aérien passe par la confiance des populations à trouver des solutions permettant de réduire ses impacts sur la santé, l'environnement et le climat.

Renouant avec l'esprit d'innovation des pionniers de l'aviation, de nombreux professionnels sont aujourd'hui engagés dans la lutte pour le climat.

Après avoir demandé au centre national technique de référence en matière de pollutions atmosphériques et de changement climatique (CITEPA) de dresser le cadre politique et réglementaire de la lutte contre le changement climatique en lien avec le secteur aérien, l'Autorité de contrôle des nuisances aéroportuaires a souhaité publier un état des lieux des engagements et des connaissances.

L'Autorité de contrôle entend accompagner les acteurs afin d'atteindre les résultats visés, aux différentes échéances, par les Etats Membres de l'Union européenne. Ce document permettra aux territoires et aux sociétés aéroportuaires, ainsi qu'aux autres parties prenantes de la lutte pour le climat, d'appréhender les voies et moyens mobilisables pour réussir à réduire rapidement les émissions du transport aérien.

La réduction des émissions atmosphériques est essentielle pour la qualité de l'air local et pour le climat.

Elle va de pair avec la réduction des émissions sonores. Il importe que les résultats mesurables des efforts engagés contribuent à retrouver la confiance des collectivités et des populations dans notre capacité collective à respecter la vie sur notre planète.

Gilles Leblanc,
Paris, le 22 février 2021

SOMMAIRE

I.	Emissions de gaz à effet de serre et transport aérien - Quelques chiffres clés.....	6
A.	Les émissions de gaz à effet de serre (CO ₂ et autres substances) et leurs impacts sur le climat.....	6
1.	Emissions des aéronefs.....	6
2.	Emissions et climat : Impact sur le climat.....	6
B.	Evolution des émissions du transport aérien mondial (projections réalisées avant la crise sanitaire).....	8
C.	Evolution des émissions de gaz à effet de serre liées au transport aérien aux échelles européennes et françaises.....	10
1.	A l'échelle européenne.....	10
2.	A l'échelle française.....	12
II.	Politique, réglementation et engagements volontaires relatifs à la lutte contre le changement climatique et le transport aérien.....	13
A.	Présentation de la réglementation en vigueur en matière de lutte contre l'effet de serre dans le secteur aérien.....	13
B.	Focus sur l'article 45 de la Loi sur la transition écologique pour une croissance verte (LTECV).....	14
1.	Périmètre : exploitants concernés.....	14
2.	Gaz à effet de serre concernés.....	14
3.	Sources d'émissions.....	15
4.	Plan d'action de réduction des émissions de GES.....	15
5.	Evaluation du programme d'actions.....	17
C.	Airport Carbon Accreditation.....	17
1.	Les exploitants concernés.....	18
2.	les gaz à effet de serre concernés.....	19
3.	Les sources d'émissions.....	19
4.	Les niveaux d'accréditation.....	20
5.	Le plan d'action de réduction des émissions de GES.....	21
6.	La vérification par un organisme indépendant.....	22
7.	L'ACA et les émissions de CO ₂ - quelques chiffres.....	22
8.	Les mesures de réduction prises dans le cadre de l'ACA.....	23
III.	Exemples d'actions engagées pour réduire les émissions de gaz à effet de serre	25
A.	Réduction par l'amélioration des procédures lors des opérations aériennes.....	25
1.	Gestion du trafic aérien.....	25
a)	Ciel unique européen (Single European Sky) et programme SESAR.....	25
b)	Émissions de CO ₂ excédentaires durant le vol.....	27
c)	Efficacité opérationnelle des aéroports.....	27
d)	Les descentes continues (CDO).....	29
e)	Airport Collaborative Decision Making (A-CDM).....	30
f)	Roulage à n-1 (-2) moteur(s).....	32
2.	Mesures touchant l'exploitation des avions.....	32
B.	Réductions par l'utilisation de biocarburant.....	34
1.	Capacité de production en Europe.....	34
2.	Prix et consommation.....	35
3.	Carburants durables dans l'aviation et réduction de gaz à effet de serre.....	35
C.	Réduction par l'innovation technologique des avions et moteurs.....	37
1.	Technologies évolutives - Perspectives.....	37
2.	Aérodynamique des avions.....	39
a)	Flux laminaire naturel.....	39
b)	Flux laminaire hybride.....	40
3.	Systèmes à bord des aéronefs.....	41

a) Système de roulage électrique	41
b) Piles à combustible	41
4. Technologies relatives aux moteurs à propulsion	41
a) CFM56 Tech Insertion	41
b) Moteur LEAP (Leading Edge Aviation Propulsion).....	41
c) Moteur Geared Turbo Fan (GTF) de Pratt & Whitney	43
d) Moteurs électriques et avions « plus électriques ».....	43
e) Aéronefs hybrides électriques.....	46
f) Compresseur basse pression	46
5. Avion 3D.....	46
6. Avion a hydrogène.....	47
Annexe 1 : les effets sur le climat des substances autres que le CO ₂	51
Annexe 2 : type de carburant et émissions de GES.....	52
Annexe 3 : Exemple des réduction d'émissions directes pour un panel de filières de biocarburant pour l'aviation (gains en termes d'émissions de GES suivant la technologie de fabrication de biocarburant).....	53

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Liste des tableaux

Tableau 1 : Substance émise par les aéronefs et leur effet sur le climat (source : Emissions des transports aériens et leur impact sur le climat, Urs Neu, ProClim, 2020)	7
Tableau 2 : Liste des postes d'émission (source : ADEME).....	15
Tableau 3 : liste globale des actions de réduction des émissions (source : ADEME).....	16
Tableau 4 : exemples de solutions déployées ou qui très prochainement déployées dans le cadre de SESAR (source : EASA, 2020).....	26
Tableau 5 : Gains en consommation et émission par la mise œuvre le roulage à n-1 moteur (source : aéroport de Zurich).....	32
Tableau 6 : Critères de durabilité des biocarburants.....	35
Tableau 7 : Liste des nouveaux concepts technologiques (2020-2035) (source : IATA 2019)	38
Tableau 8 : Les aéronefs de plus en plus électriques (source : Safran, 2019)	45

Liste des figures

Figure 1 : Émissions d'un avion à réaction bimoteur typique pendant 1 heure de vol avec 150 passagers à bord (source : FOCA/ EASA, 2020).....	6
Figure 2 : Forçage radiatif induit par le transport aérien (UBA, 2020)	8
Figure 3 : Evolution de la consommation de carburant conventionnel de l'aviation internationale entre 2005 et 2050, y compris l'utilisation potentielle de carburants d'aviation durables	9
Figure 4 : Evolution des émissions de CO ₂ de l'aviation internationale entre 2005 et 2050	10
Figure 5 : Evolution des émissions de CO ₂ liées au transport aérien européen depuis 1990 et projection à 2040 (source : EASA, 2020)	11
Figure 6 : Evolution des émissions de gaz à effet de serre en MtonnesCO ₂ équivalent pour la France et l'Outre-mer (source : CITEPA, Inventaire national d'émission format Secten ed. 2020)	12
Figure 7 : Evolution des émissions de gaz à effet de serre en France (base 100 en 1990)....	12
Figure 8 : Répartition des aéroports européens engagés dans l'ACA	19
Figure 9 : sources d'émissions sur un aéroport et scopes de la démarche ACA.....	20

Figure 10 : Evolution du nombre d'aéroports européens engagés dans l'ACA et par niveau d'accréditation et émissions de CO ₂ par passager	22
Figure 11 : réduction des émissions de CO ₂ pour les sources du scopes 1 et 2.....	23
Figure 12 : Part des aéroports qui produisent de l'énergie renouvelable in situ.....	24
Figure 13 : Les 9 blocs d'espace aérien fonctionnels et les dates de création.....	25
Figure 14 : Répartition des émissions excédentaires de CO ₂ porte à porte pour un vol moyen en Europe.....	27
Figure 15 : temps additionnel à l'arrivée pour les 30 aéroports européens les plus fréquentés	28
Figure 16 : temps additionnel au départ pour les 30 aéroports européens les plus fréquentés	28
Figure 17 : Taux de réalisation des procédures CDO entre 2016 et 2019 (source : DGAC)...	29
Figure 18 : Temps moyen réalisé en palier lors des CCO/CDO en 2017 sur les principaux aéroports européens (source : EASA).....	30
Figure 19 : Infographie sur les économies annuelles liées au temps de taxi pour 17 aéroports équipés de l'A-CDM (estimation)	31
Figure 20 : A-CDM dans la zone SES (Single European Sky Area) (source : EASA).....	31
Figure 21 : Evolution de la consommation de carburant (la taille de bulle est fonction de la capacité en nombre de sièges) (source : Jean-Paul Rodrigue 2020)	37
Figure 22 : Délais pour la disponibilité des avions analysés et des concepts de moteurs (source : IATA 2019).....	39
Figure 23 : Test en vol de l'aile externe BLADE NLF (source : Williams, G, 2018).....	40
Figure 24 : Systèmes de « laminarisation » du flux (source : Williams, G, 2018).....	40
Figure 25 : Nombre de moteurs CFM56 et LEAP fabriqués (source : Safran, 2018).....	42
Figure 26 : Système de propulsion distribuée hybride électrique de Safran (source : Safran, 2018).....	43
Figure 27 : Objectifs de propulsion 100% électrique (source : Safran, 2019).....	44
Figure 28 : Technologie alimentant l'avion testée sur « ionBird » (source : Rolls-Royce, 2020)	45

INTRODUCTION

Le transport aérien génère une faible part des émissions de gaz à effet de serre, mais celles-ci étaient en forte croissance depuis 1990. Les prévisions réalisées avant la crise de la COVID-19 poursuivent cette tendance. Même si le niveau des trafics 2019 ne sera probablement atteint qu'entre 2024 et 2027, les émissions atmosphériques du secteur doivent être progressivement plus que maîtrisées.

En France, le Haut conseil pour le climat (HCC) a publié en avril 2020 un rapport « Climat, santé : mieux prévenir, mieux guérir »¹ alertant sur l'importance d'un soutien économique compatible avec l'objectif de neutralité carbone de la France et contenant 18 recommandations. Le HCC propose d'inspirer, soutenir, accompagner les changements de comportements et de modes de vie vers plus de sobriété en réduisant notamment les transports aériens.

En juin 2020 les membres de la Convention Citoyenne pour le climat- dont le mandat était de définir des mesures en vue d'atteindre une baisse d'au moins 40 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) d'ici 2030 et par rapport à 1990 - ont rendu leurs propositions au Gouvernement : 149 propositions réparties au sein de 5 thématiques. S'agissant du transport aérien, l'objectif poursuivi est d'en « limiter les effets néfastes » au travers de sept propositions.

En ce même mois de juin 2020, la ministre de la Transition écologique et solidaire a demandé à l'Autorité de mettre plus nettement l'accent sur les émissions de gaz à effet de serre impactant le climat.

Le présent document, élaboré notamment à partir des travaux réalisés par le Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique (CITEPA) pour l'Autorité de contrôle des nuisances aéroportuaires (https://www.acnusa.fr/uploads/media/default/0001/02/1581_2012-10-synthese-cadre-politique-reglementaire-lutte-contre-le-changement-climatique-secteur-aerien.pdf), est destiné à toutes les parties concernées par le sujet qui y trouveront les références nécessaires. Il comprend trois parties :

- Présentation des émissions de gaz à effet de serre du transport aérien ;
- Politiques, réglementations et engagements volontaires liés à la lutte contre le changement climatique ;
- Exemples de bonnes pratiques et d'actions engagées pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.

¹ https://www.hautconseilclimat.fr/wp-content/uploads/2020/04/hcc_rapport_spcial.pdf

I. EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE ET TRANSPORT AERIEN - QUELQUES CHIFFRES CLES

A. LES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE (CO₂ ET AUTRES SUBSTANCES) ET LEURS IMPACTS SUR LE CLIMAT

1. EMISSIONS DES AERONEFS

Les principales substances émises par les aéronefs sont le dioxyde de carbone (CO₂), la vapeur d'eau (H₂O), les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de soufre (SO₂), le monoxyde de carbone (CO), les hydrocarbures (HC), les particules (PM) et les suies (voir figure ci-dessous).

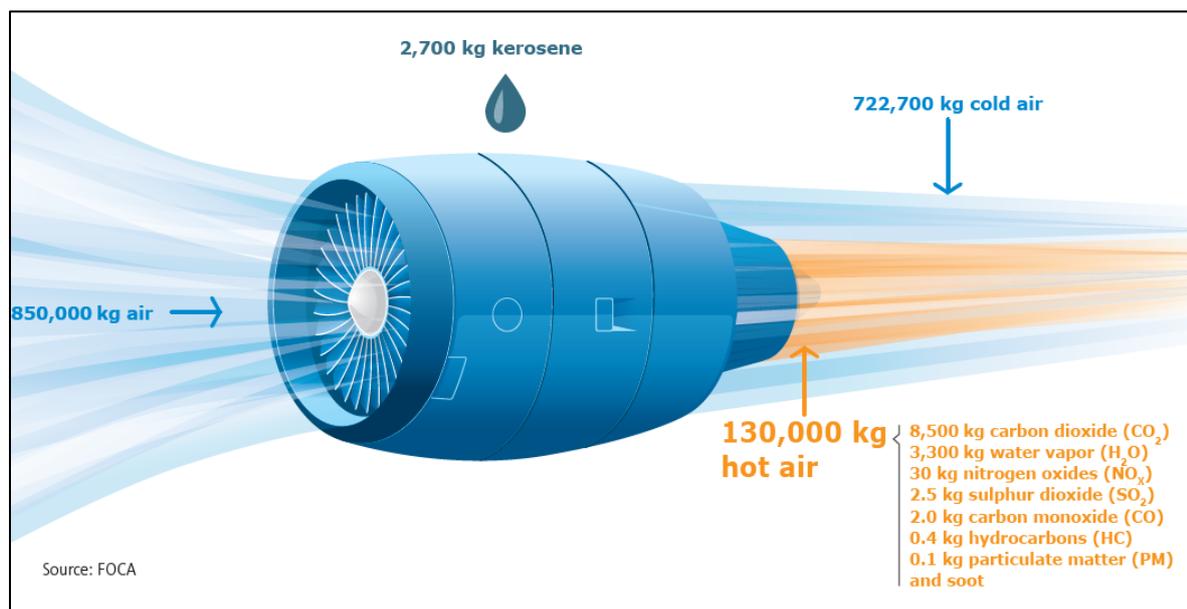


Figure 1 : Émissions d'un avion à réaction bimoteur typique pendant 1 heure de vol avec 150 passagers à bord (source : FOCA/ EASA, 2020²)

2. EMISSIONS ET CLIMAT : IMPACT SUR LE CLIMAT

A part le CO₂, les émissions des aéronefs contiennent plusieurs autres composants qui exercent un effet sur le climat. Ce sont notamment :

- la vapeur d'eau,
- les oxydes d'azote,
- le dioxyde de soufre,
- la suie.

Alors que les émissions de CO₂ et leurs effets sur le climat sont bien connus, les données concernant les impacts climatiques des rejets autres que le CO₂ comportent une plus grande part d'incertitude et sont fondées sur des estimations issues d'un nombre limité d'études.

Les rapports actuels du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) contiennent des données concernant l'effet des transports aériens sur la formation

² https://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/usr_uploaded/219473_EASA_EAER_2019_WEB_LOW-RES_190311.pdf

de traînées de condensation et de nuages ainsi que sur l'ozone, mais pas sur l'action de la suie et du SO₂ ni sur l'effet direct des NO_x.

Selon les connaissances disponibles, les traînées de condensation induites par l'émission de vapeur d'eau et de particules et les cirrus persistants qui en découlent, ont l'impact climatique de loin le plus important des émissions autres que le CO₂ émis par le transport aérien. Le tableau ci-dessous présente les effets des substances émises sur le climat.

Tableau 1 : Substance émise par les aéronefs et leur effet sur le climat (source : Emissions des transports aériens et leur impact sur le climat, Urs Neu, ProClim, 2020³)

Substance émise	Mécanisme d'action
Dioxyde de carbone CO ₂	- Effet de serre (réchauffant)
Vapeur d'eau H ₂ O	- Effet de serre (réchauffant) - Favorise la formation de traînées de condensation et peut entraîner l'apparition de cirrus supplémentaires (du fait de la saturation en eau et de la condensation ; effet global réchauffant)
Oxydes d'azote NO _x	- Intensifient à court terme la formation d'ozone. L'ozone agit comme gaz à effet de serre (effet réchauffant) - Décomposent le méthane, qui est un gaz à effet de serre (effet refroidissant). La décomposition du méthane diminue à long terme la formation d'ozone (effet refroidissant) - Entraînent la formation d'aérosols (effet refroidissant) et influencent indirectement la couverture nuageuse
Suie	- Effet radiatif (absorbe le rayonnement solaire ; effet réchauffant) - Conduit à la formation d'aérosols et de traînées de condensation (effet réchauffant) et influence indirectement la couverture nuageuse
Dioxyde de soufre SO ₂	- Effet radiatif (réfléchit le rayonnement solaire ; effet refroidissant) - Conduit à la formation d'aérosols (effet refroidissant) et influence indirectement la couverture nuageuse

[Pour en savoir plus sur les mécanismes d'action : se reporter à l'annexe 1](#)

³ <https://www.bazl.admin.ch/bazl/fr/home/politique/environnement/aviation-et-rechauffement-climatique.html>

La figure suivante présente les informations en terme de forçage radiatif⁴ des différentes substances émises par le transport aérien ainsi que les incertitudes liées à cette évaluation.

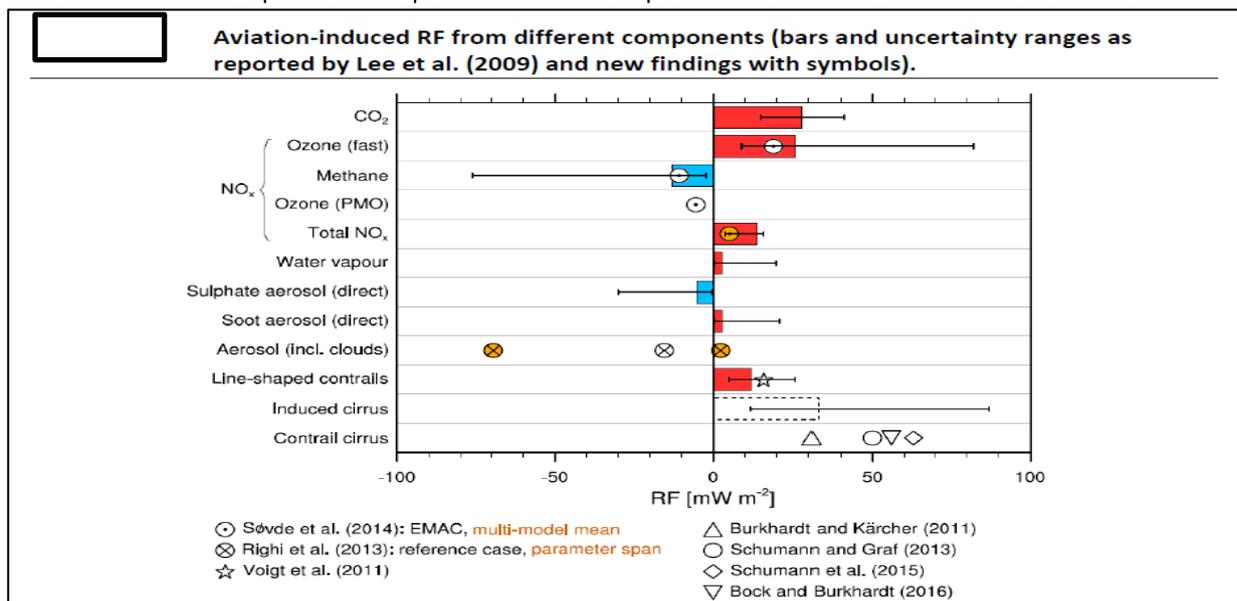


Figure 2 : Forçage radiatif induit par le transport aérien (UBA, 2020⁵)

Les incertitudes sont importantes pour la mesure de l'impact sur le climat (notamment pour les traînées de condensation qui sont fortement dépendantes des conditions météorologiques). On constate néanmoins que le forçage radiatif lié aux substances autres que le CO₂ est doublé par rapport au seul impact du CO₂.

B. EVOLUTION DES EMISSIONS DU TRANSPORT AERIEN MONDIAL (PROJECTIONS REALISEES AVANT LA CRISE SANITAIRE)

Les émissions du transport aérien ont été estimées pour l'année 2018 à 918 MtCO₂⁶, soit environ 3 % des émissions mondiales. Environ 80 % de ces émissions peuvent être attribuées au transport de passagers et 20 % au fret. 60 % des émissions proviennent des vols internationaux et 40 % des vols domestiques. Les pays les plus émetteurs dans le domaine du transport aérien sont les USA (182 MtCO₂), la Chine (95 MtCO₂), le Royaume-Uni (30 MtCO₂) et le Japon (23 MtCO₂). La France se place en 8^e position avec 19 MtCO₂⁷.

Les premières tendances mondiales concernant le bilan environnemental de l'aviation ont été présentées et approuvées à la 37^e session de l'Assemblée de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) en 2010. Depuis à chaque session de l'Assemblée, ces tendances sont actualisées et présentées afin de servir de base à leurs réflexions et décisions.

⁴ On appelle forçage radiatif (Wm⁻²) du système climatique toute variation de l'énergie transmise à l'ensemble du système Terre atmosphère, causée par des changements des facteurs de forçage. Il s'agit donc de la différence entre l'énergie radiative reçue et l'énergie radiative émise par un système climatique donné. Positif (plus d'énergie reçue qu'émise), il tend à réchauffer le système. Négatif (plus d'énergie émise que reçue), il tend vers un refroidissement.

Il constitue un indice des incidences moyennes relatives à l'échelle du globe de ce changement imputable à diverses causes naturelles et anthropiques sur le système surface-troposphère.

⁵ <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/integration-of-non-co2-effects-of-aviation-in-the>

⁶ Source : ICCT : https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_CO2-commercl-aviation-2018_20190918.pdf

⁷ https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_CO2-commercl-aviation-2018_20190918.pdf

L'effet d'une telle augmentation de l'utilisation de carburant sur les émissions nettes de CO₂ de l'aviation internationale est illustrée ci-dessous.

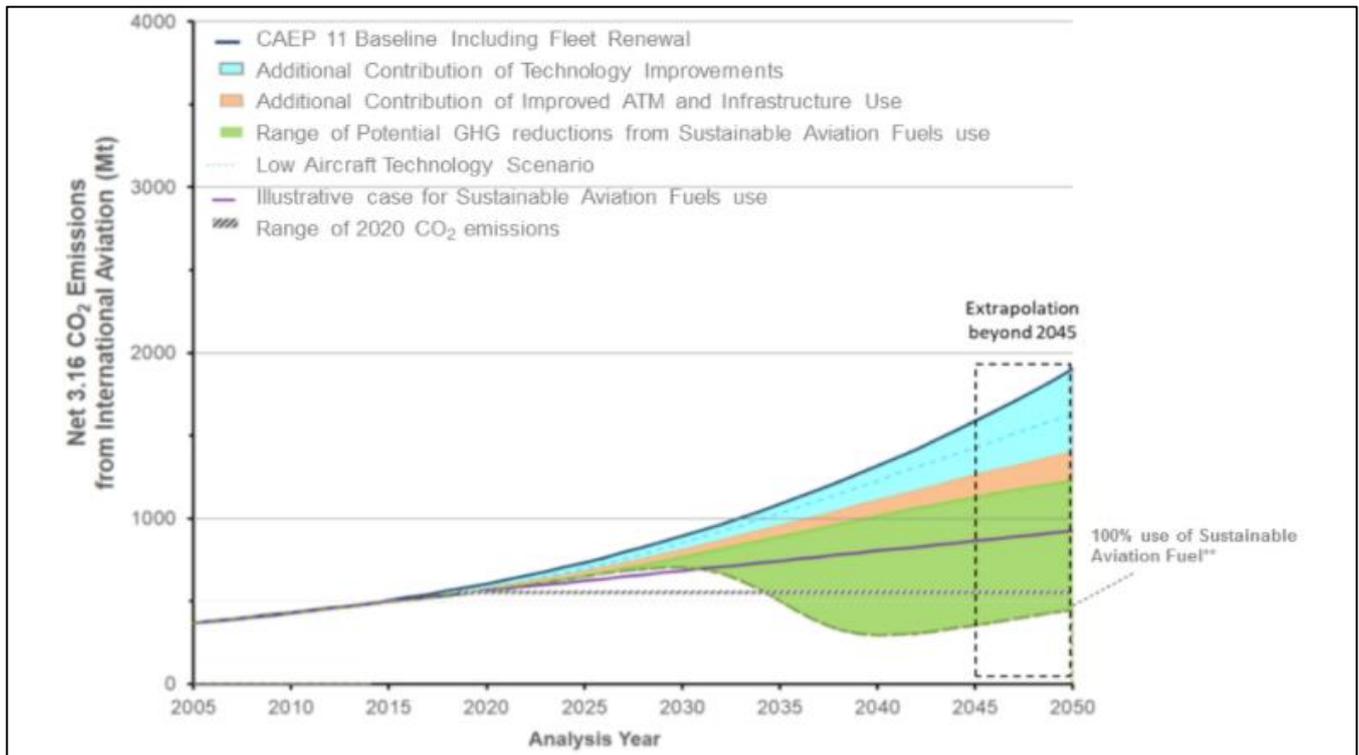


Figure 4 : Evolution des émissions de CO₂ de l'aviation internationale entre 2005 et 2050⁹

Les émissions mondiales ont augmenté de 32 % entre 2014 et 2019. D'après les tendances d'avant la crise actuelle, les émissions tripleraient d'ici 2050, ce qui consommerait le quart du budget carbone nécessaire pour limiter le réchauffement climatique à 1,5°C.

C. EVOLUTION DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE LIEES AU TRANSPORT AERIEN AUX ECHELLES EUROPEENNES ET FRANÇAISES

1. A L'ECHELLE EUROPEENNE

Selon les données communiquées par les États membres à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), les émissions de CO₂ de tous les vols au départ de l'Union européenne (UE) des vingt-huit et de l'European Free Trade Association (EFTA¹⁰) sont passées de 88 à 171 millions de tonnes (+ 95 %) entre 1990 et 2016¹¹.

Sur la même période, la consommation moyenne de carburant par passager-kilomètre parcouru, hors aviation d'affaires, a diminué de 24 %.

Cependant, ce gain d'efficacité n'est pas suffisant pour contrebalancer l'augmentation des émissions de CO₂ en raison de l'augmentation du nombre de vols, de la taille des avions et de la distance parcourue.

⁹ https://www.icao.int/Meetings/a40/Documents/WP/wp_054_en.pdf

¹⁰ European Free Trade Association

¹¹ https://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/usr_uploaded/219473_EASA_EAER_2019_WEB_LOW-RES_190311.pdf

Les émissions de CO₂ devraient augmenter de 21 % supplémentaires pour atteindre 198 Mt en 2040. L'achat annuel de quotas par les exploitants d'aéronefs dans le cadre du système d'échange de quotas d'émission de l'UE (Emissions Trading System - ETS¹²) depuis 2013 a abouti à une réduction de 27 Mt d'émissions nettes de CO₂ en 2017.

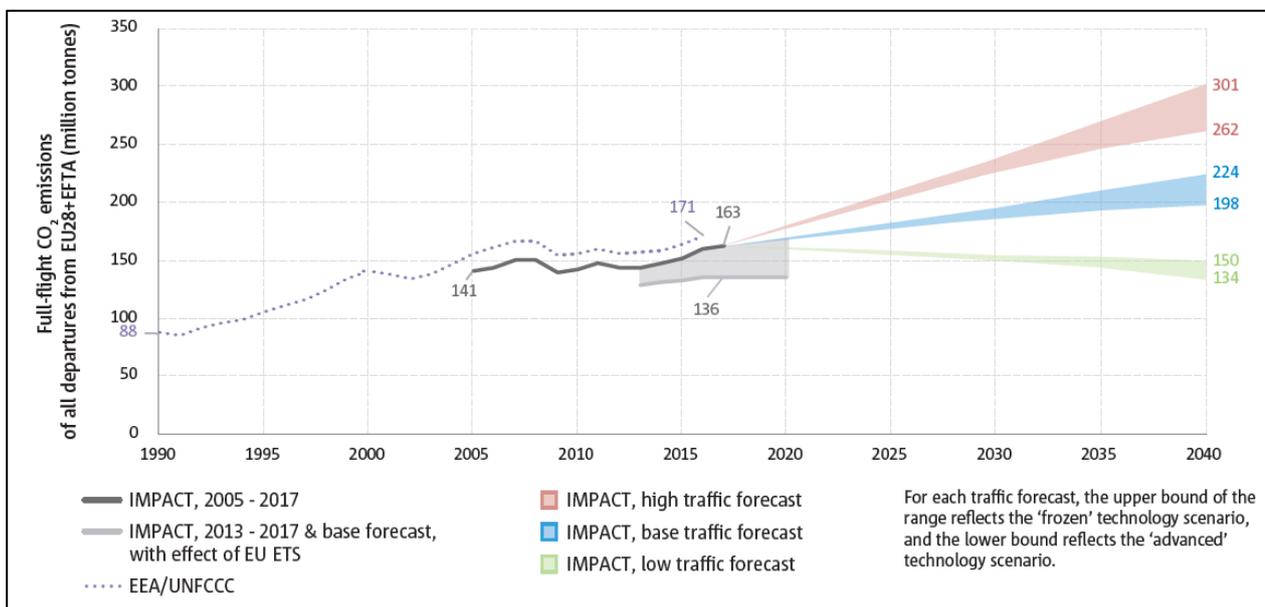


Figure 5 : Evolution des émissions de CO₂ liées au transport aérien européen depuis 1990 et projection à 2040 (source : EASA, 2020)

En 2016, l'aviation était responsable de 3,6 % des émissions totales de gaz à effet de serre des 28 pays de l'UE et de 13,4 % des émissions provenant des transports, faisant de l'aviation la deuxième source de émissions de GES liées au transport après le trafic routier. Les émissions de gaz à effet de serre de l'aviation dans l'UE ont plus que doublé depuis 1990, elles représentaient alors 1,4 % des émissions totales. **À mesure que les émissions provenant de sources autres que les transports diminuent, les émissions de l'aviation deviennent de plus en plus importantes.** L'aviation européenne représentait 20 % des émissions de CO₂ de l'aviation mondiale en 2015.

Politique européenne

Vis à vis de l'aviation, l'UE a investi environ 5 milliards d'euros au cours des 10 dernières années pour soutenir ses engagements en matière de climat par le biais de divers programmes (Clean Sky, SESAR, Life, Horizon 2020, Connecting Europe Facility, etc.) et un panier de mesures (EU ETS, CORSIA, norme de certification relative au CO₂, etc.).

La consommation énergétique par type de carburant ainsi que la répartition des émissions de gaz à effet de serre du secteur transport pour l'UE des 28 pour l'année 2014 sont présentées en annexe 2.

¹² https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_en

2. A L'ECHELLE FRANÇAISE

En France et en 2019, d'après l'inventaire national d'émission réalisé par le Citepa, (format Secten), les émissions du transport aérien représentaient 5 % des émissions totales.

La figure ci-dessous présente l'évolution des émissions de gaz à effet de serre de la France dont celles du secteur aérien depuis l'année 1990.

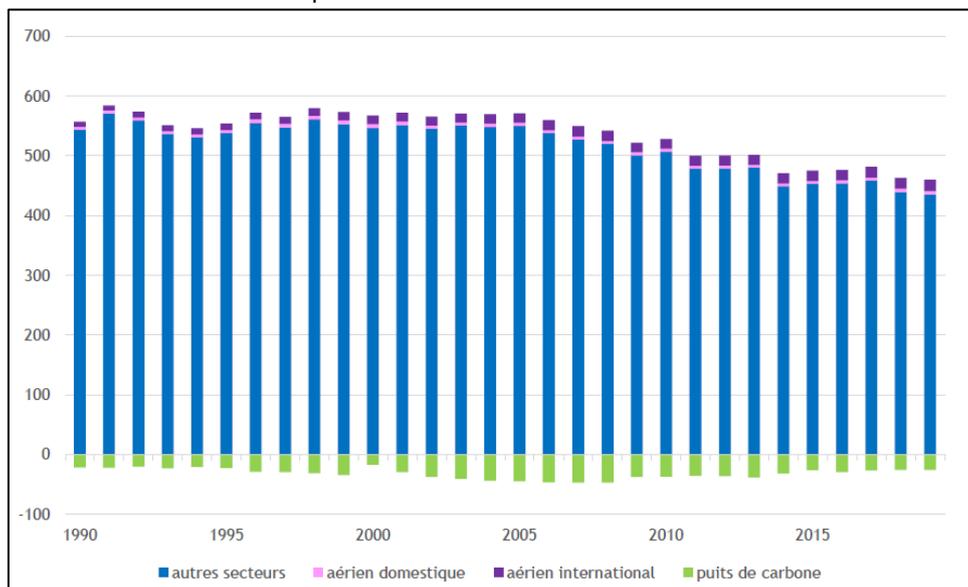


Figure 6 : Evolution des émissions de gaz à effet de serre en MtonnesCO₂ équivalent pour la France et l'Outre-mer (source : CITEPA, Inventaire national d'émission format Secten ed. 2020)

En France, le transport commercial de passagers est essentiellement réalisé à partir d'une centaine d'aéroports. Le flux de trafic de voyageurs a plus que doublé entre 1997 et 2018, passant de 81 millions de voyageurs par an à 172 millions avec une hausse particulièrement forte à la fin des années 1990 et après 2010. L'année 2020 est bien sûr marquée par la situation sanitaire exceptionnelle et vient rompre la tendance historique. Cette hausse globale est principalement due à la hausse du trafic international, avec une hausse de la part des pavillons étrangers, et notamment la part des compagnies à bas coûts (*low cost*) qui représentaient 35% du trafic en 2018, contre 25% en 2020. Dans l'inventaire national (qui estime la part internationale mais présente ces émissions à part, en dehors du total national), on constate une augmentation de la part internationale de +109% entre 1990 et 2018 (+19% pour la part domestique).

La figure ci-dessous présente la tendance d'évolution de gaz à effet de serre en France (base 100 en 1990).

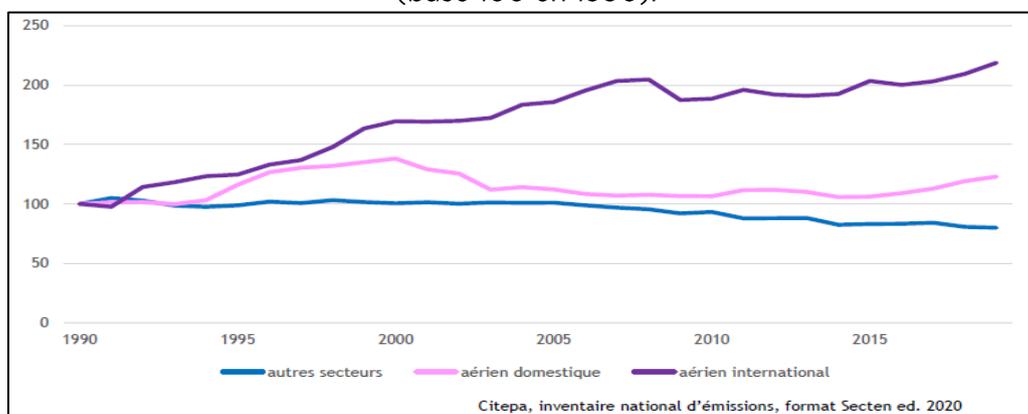


Figure 7 : Evolution des émissions de gaz à effet de serre en France (base 100 en 1990)

II. POLITIQUE, RÉGLEMENTATION ET ENGAGEMENTS VOLONTAIRES RELATIFS À LA LUTTE CONTRE LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET LE TRANSPORT AÉRIEN

A. PRÉSENTATION DE LA RÉGLEMENTATION EN VIGUEUR EN MATIÈRE DE LUTTE CONTRE L'EFFET DE SERRE DANS LE SECTEUR AÉRIEN

Un état des lieux du cadre politique et réglementaire lié à la lutte contre le changement climatique en lien avec le secteur aérien a été réalisé par le CITEPA pour l'Autorité. Ce rapport présente les différents cadres au niveau international, au niveau de l'Union Européenne et au niveau français.

Au niveau international, les émissions de l'aviation sont d'abord réparties en deux blocs : les émissions internationales (entre pays différents) et les émissions domestiques (au sein d'un même pays). La Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), qui constitue le cadre principal de l'action, a ainsi acté que c'est l'OACI qui se charge des actions climat de l'aviation internationale (il en va de même pour le transport maritime international, confié à l'Organisation maritime internationale). Ainsi, les objectifs de la CCNUCC, et du Protocole de Kyoto et de l'Accord de Paris (découlant tous deux de la CCNUCC) concerne tous les secteurs émetteurs en bloc (y compris l'aviation domestique) mais pas le transport international. Au sein de l'OACI, un accord obtenu en 2010 a permis de mettre en place plusieurs volets d'action pour réduire les émissions de GES de l'aviation, avec notamment la création d'un système fondé sur le marché, devenu CORSIA¹³, qui obligera progressivement les compagnies d'acheter des crédits pour compenser les émissions dépassant un niveau de référence. Enfin, un troisième cadre concerne aussi indirectement l'aviation : l'accord de Kigali sur la limitation des hydrofluorocarbures (HFC).

Au niveau de l'Union Européenne, d'une part, des documents politiques d'orientation et des grands textes fixent les objectifs généraux de réduction des émissions, aux horizons 2020, 2030, 2050. Ces objectifs reposent notamment sur le système d'échanges de quotas d'émissions (SEQE) dans lequel l'aviation a été intégrée (mais l'intégration de l'aviation internationale est temporairement suspendue, notamment en attendant d'assurer une cohérence avec CORSIA). Les compagnies aériennes doivent donc actuellement rendre compte de leurs émissions de CO₂ et des quotas d'émissions, dont une partie est allouée gratuitement, qui leur permettent de couvrir ces émissions. Plusieurs autres plans et stratégies de l'UE concernent directement l'aviation, notamment la navigation aérienne et l'industrie aéronautique.

Au niveau français, le Plan Climat définit les grandes orientations. La Loi sur la Transition Ecologique (2015), complétée en 2019 par la Loi relative à l'énergie et au climat, définit des objectifs précis, repris notamment dans des documents stratégiques (la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) pour l'énergie, et notamment les objectifs de renouvelables et de biocarburants. La stratégie nationale bas carbone (SNBC) arrête les trajectoires de réduction des émissions par secteur économique, notamment celui des transports, dont le transport aérien. Plusieurs plans et stratégies concernent spécifiquement l'aviation, pour le développement des biocarburants et plus récemment l'hydrogène.

[Le rapport complet est disponible sur le site internet de l'Autorité :
https://www.acnusa.fr/uploads/media/default/0001/02/1581_2012-10-synthese-cadre-politique-reglementaire-lutte-contre-le-changement-climatique-secteur-aerien.pdf](https://www.acnusa.fr/uploads/media/default/0001/02/1581_2012-10-synthese-cadre-politique-reglementaire-lutte-contre-le-changement-climatique-secteur-aerien.pdf)

¹³ CORSIA : Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation

B. FOCUS SUR L'ARTICLE 45 DE LA LOI SUR LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE POUR UNE CROISSANCE VERTE (LTECV)

L'article 45 de la loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) fait obligation aux exploitants de 11 principaux aéroports français d'établir un programme d'actions dont l'objet est de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques. Le Décret n° 2016-565 du 10 mai 2016 précise les modalités d'application de cet article de loi ainsi que la liste des personnes publiques ou privées soumises aux obligations qu'il fixe.

Les personnes publiques ou privées exploitant un aéroport défini aux deux premiers alinéas du I de l'article 1609 quaterbis A du Code général des impôts devaient établir, au plus tard le 31 décembre 2016, un programme d'actions qu'elles décident de mettre en place afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques résultant « des activités directes et au sol de la plateforme aéroportuaire, en matière de roulage des avions et de circulation de véhicules sur la plateforme notamment ».

L'objectif de réduction de l'intensité¹⁴ en gaz à effet de serre et en polluants atmosphériques est, par rapport à l'année 2010, de 10 % au moins en 2020 et de 20 % au moins en 2025.

Les véhicules terrestres et aériens utilisés pour les missions opérationnelles de défense, de sécurité, d'intervention, d'incendie et de secours ne relèvent pas de ces programmes d'actions.

1. PÉRIMÈTRE : EXPLOITANTS CONCERNÉS

Le décret d'application de l'article 45 de la loi n° 2015-992 est applicable aux personnes publiques ou privées exploitant l'un des aéroports suivants :

- Bâle - Mulhouse ;
- Beauvais - Tillé ;
- Bordeaux - Mérignac ;
- Lyon - Saint - Exupéry
- Marseille - Provence ;
- Nantes - Atlantique ;
- Nice - Côte d'Azur ;
- Paris - Charles - de - Gaulle ;
- Paris - Orly ;
- Paris - Le Bourget ;
- Toulouse - Blagnac.

2. GAZ À EFFET DE SERRE CONCERNÉS

Les gaz à effet de serre considérés sont ceux visés à l'article R. 229-45 du code de l'environnement :

- le dioxyde de carbone (CO₂) ;
- le méthane (CH₄) ;
- le protoxyde d'azote (N₂O) ;
- les hydrofluorocarbones (HFC) ;
- les hydrocarbures perfluorés (PFC) ;
- l'hexafluorure de soufre (SF₆) ;
- le trifluorure d'azote (NF₃).

¹⁴ L'intensité en gaz à effet de serre est le rapport entre le volume des émissions de ces gaz et le nombre d'unités de trafic aérien sur la plateforme concernée la même année.

Les polluants atmosphériques considérés sont les oxydes d'azote, les particules totales en suspension et les composés organiques volatils.

3. SOURCES D'ÉMISSIONS

Les sources d'émissions considérées sont celles sous la responsabilité du gestionnaire d'aéroport :

- les avions lors de leurs évolutions au sol (roulage et APU) ;
- les sources d'émissions mobiles: tout type de véhicule ou engin évoluant exclusivement en zone de sûreté à accès réglementé ;
- les sources d'émissions fixes situées en dehors de la zone de sûreté à accès réglementé et produisant des émissions associées à la consommation d'électricité, de chaleur ou de vapeur nécessaire aux activités de l'exploitant d'aérodrome.

Le premier bilan des plans d'action réalisé par l'ADEME¹⁵ a permis de distinguer les 7 grands postes d'émissions identifiés par les gestionnaires d'aéroports.

Tableau 2 : Liste des postes d'émission (source : ADEME)

Poste d'émission	Description	Emissions locales ou distantes
Avions - roulage	Roulage des avions	Locales
Avions - APU	Emissions de l'APU au poste de stationnement	Locales
Equipements au sol (GSE)	Ground Support Equipment (dont véhicules assistants en escale, véhicules gestionnaires, GPU)	Locales
Production chaleur / vapeur	Production de chaleur ou de vapeur	Locales
Production électricité	Production d'électricité	Locales
Fluides frigorigènes	Fuites de fluides frigorigènes (climatisation)	Locales
Achat électricité / chaleur / vapeur	Achat d'électricité, de chaleur ou de vapeur	Distantes

4. PLAN D'ACTION DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GES

Le programme des actions de réduction de l'intensité en gaz à effet de serre et en polluants atmosphériques que chaque exploitant d'aérodrome a transmis à l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie avant le 31 décembre 2016, indique, pour les années 2010, 2020 et 2025 :

- les hypothèses utilisées pour élaborer les données chiffrées permettant le calcul des émissions ;
- les résultats de la quantification des émissions ;
- les actions de réduction des émissions associées à chacune des sources d'émissions identifiées : Roulage et moteurs auxiliaires de puissance (APU), Equipements au sol (engins de piste), Production d'électricité, de chaleur et de vapeur, Fluides frigorigènes, Achat d'électricité, de chaleur et de vapeur.

¹⁵ https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/programme-actions-aerodromes_2018.pdf

Le tableau suivant présente les actions de réduction identifiées pour chacun des postes d'émissions.

Tableau 3 : liste globale des actions de réduction des émissions (source : ADEME)

poste d'émission	actions	nombre d'aéro-dromes ayant retenu l'action	
		De 2010 à 2020	De 2020 à 2025
Avions - roulage	Temps de roulage	7	0
Avions - roulage	« Roulage vert »	1	2
Avions - roulage	Lavage des moteurs	1	0
Avions - APU	400 Hz	8	3
Avions - APU	Réduction du temps d'utilisation de l'APU	7	1
Avions - APU	PCA (pré-conditionnement d'air)	1	1
Equipements au sol (GSE)	Développement de l'alimentation électrique mise à disposition sur les pistes	5	1
Equipements au sol (GSE)	Remplacement des GPU par du 400 Hz	9	1
Equipements au sol (GSE)	Acquisition de véhicules et engins de piste électriques	10	5
Equipements au sol (GSE)	Acquisition de véhicules de piste au GNV	2	0
Equipements au sol (GSE)	Modernisation de la flotte de véhicules et d'engins de piste	10	4
Equipements au sol (GSE)	Eco-conduite des véhicules de piste	3	2
Production chaleur / vapeur	Chaudières fioul ou gaz : source d'énergie, modernisation et gestion	6	1
Production chaleur / vapeur	Recours aux énergies renouvelables	3	1
Production chaleur / vapeur	Qualité énergétique des bâtiments	5	1
Production électricité	Remplacement des groupes électrogènes	4	0
Production électricité	Maintenance préventive des groupes électrogènes	3	0
Production électricité	Mode de fonctionnement des groupes électrogènes	4	0
Fluides frigorigènes	Maintenance préventive des équipements	4	2
Fluides frigorigènes	Recours à des fluides alternatifs	2	1
Achat électricité / chaleur / vapeur	Electricité verte	8	5
Achat électricité / chaleur / vapeur	Etudes et audits	4	0
Achat électricité / chaleur / vapeur	Management de l'énergie	4	0
Achat électricité / chaleur / vapeur	Eclairage	6	0
Achat électricité / chaleur / vapeur	Chauffage, ventilation, climatisation (CVC)	4	0
Achat électricité / chaleur / vapeur	Tri bagages, escalators et ascenseurs	2	0

5. EVALUATION DU PROGRAMME D' ACTIONS

L'ADEME a évalué le programme des actions établi par chacun des exploitants d'aérodrome concerné et a vérifié l'atteinte des objectifs de réduction de l'intensité en gaz à effet de serre et en polluants atmosphériques. Le premier bilan réalisé par l'ADEME à partir des données de 2016 a été rendu public en 2018 :

https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/programme-actions-aerodromes_2018.pdf

Comme le rappelle l'ADEME dans son bilan, ni l'Article 45, ni le décret n° 2016-565, ne précisent les suites qui pourraient être données, à partir de 2018, à la transmission des programmes d'action par les aérodromes. Les aérodromes n'ont actuellement pas à reporter à l'ADEME et/ ou à l'ACNUSA leurs bilans actualisés.

Dans son rapport de 2018, l'ADEME a formulé quelques pistes de travail sur les suites éventuelles de ce bilan. Ces pistes s'appuient sur deux constats :

- Le principal enjeu environnemental des aérodromes n'est pas lié à leurs bâtiments ou leurs actions au sol, mais au trafic aérien et, dans une moindre mesure, au trafic automobile qu'ils subissent ou génèrent ;
- Les enjeux relatifs au changement climatique et à la qualité de l'air imposent de considérer les réductions des émissions absolues et non simplement des intensités d'émission.

Les pistes de travail concernant le transport aérien sont les suivantes :

- Promouvoir au niveau international un objectif de réduction des émissions absolues de l'ensemble du transport aérien mondial, et fixer un objectif national pour le transport aérien intérieur et international depuis et vers la France, ainsi qu'une trajectoire pour atteindre cet objectif ;
- Pour parvenir à cet objectif, utiliser le levier de la maîtrise du développement du trafic et mener au préalable un débat ouvert sur ce thème ;
- Impliquer les passagers en les informant systématiquement sur l'impact environnemental de leurs trajets aériens ; mieux appliquer le dispositif d'informations GES des prestations de transport (« Info GES ») en vigueur depuis 2013 ; ne pas proposer aux passagers de compenser les émissions de leurs vols sans sensibilisation préalable ;
- Améliorer la connaissance des émissions réelles de polluants des avions.

La piste de travail complémentaire portant sur les autres moyens de transports est d'identifier auprès des acteurs du maritime les possibilités de transposer ces démarches aux ports maritimes ainsi qu'au transport maritime depuis et vers la France.

C. AIRPORT CARBON ACCREDITATION

L'Airport Carbon Accreditation (ACA) a été développée et lancée en Europe par le Conseil International des Aéroports (ACI)¹⁶ - Europe en 2009. C'est le seul standard mondial volontaire de gestion du carbone pour les aéroports conformément aux principes du GHG Protocol et de l'ISO 14064-18. En août 2020, le programme était suivi par 313 aéroports dans le monde, dont 37 aéroports en France.

L'Airport Carbon Accreditation invite les aéroports à engager des actions de réduction de leur empreinte environnementale en matière de gaz à effet de serre, mesurer les progrès au moyen d'indicateurs adaptés et leur permet de bénéficier d'un accompagnement continu

¹⁶ Le Conseil International des Aéroports (De l'anglais, Airports Council International, ACI) est la principale organisation professionnelle fédérant les sociétés aéroportuaires mondiales au travers de cinq régions ACI : ACI Europe, ACI Asie-Pacifique, ACI Afrique, ACI-NA (Amérique du Nord), et ACI-LAC (Amérique Latine et Caraïbes).

pour la mise en œuvre de ces actions de réduction. Cette démarche propose une méthode de calcul des émissions de GES adaptée aux activités aéroportuaires, permettant de guider les aéroports et leurs sociétés dans la réduction de ces émissions.

L'évaluation est réalisée par un tiers indépendant et reconnaît les efforts entrepris par les aéroports pour gérer et réduire leurs émissions de GES, avec 4 premiers niveaux de certification :

- Cartographie ;
- Réduction ;
- Optimisation ;
- Neutralité.

Le programme ACA fournit aux aéroports un cadre commun pour la maîtrise de leurs émissions de GES avec des indicateurs mesurables. Il est adapté à différents types d'aéroports et permet de tenir compte d'obligations réglementaires nationales ou locales rencontrées par les gestionnaires d'aéroports, avec l'assurance d'une fiabilité constante de la méthodologie utilisée.

Lors du congrès annuel d'ACI Europe qui s'est tenu le 17 novembre 2020, son directeur général Olivier Jankovec, a annoncé la mise en place de deux nouveaux niveaux d'accréditation : niveau 4 : Transformation / niveau 4+ : Transition. Il s'agit du premier changement structurel du programme depuis sa création en 2009. Le programme est dorénavant en conformité avec les Accords de Paris.

1. LES EXPLOITANTS CONCERNES

Les aéroports membres de n'importe quelle région de l'ACI peuvent participer au programme Airport Carbon Accreditation. Ce programme est adapté aux aéroports de toute taille. Il concerne non seulement les hubs et les aéroports régionaux ayant un trafic régulier de passagers, mais également les aéroports spécialisés en aviation générale et en fret.

En janvier 2021, la situation des 12 aéroports relevant des compétences particulières de l'ACNUSA était la suivante :

Aérodrome	Niveau de certification ACA
Bâle – Mulhouse	2
Beauvais – Tillé	Engagé – certification en cours
Bordeaux – Mérignac	Non engagé
Lille – Lesquin	Non engagé
Lyon – Saint-Exupéry	3+
Marseille – Provence	3
Nantes – Atlantique	2
Nice – Côte-d'Azur	3+
Paris – Charles-de-Gaulle	3
Paris – Le Bourget	3
Paris – Orly	3
Toulouse – Blagnac	3

La situation des aéroports européens engagés dans l'ACA fin 2017 est présentée sur la figure ci-dessous (la cartographie actualisée est disponible sous ce lien : <https://airportco2.org/airports-across-the-world.html>) :

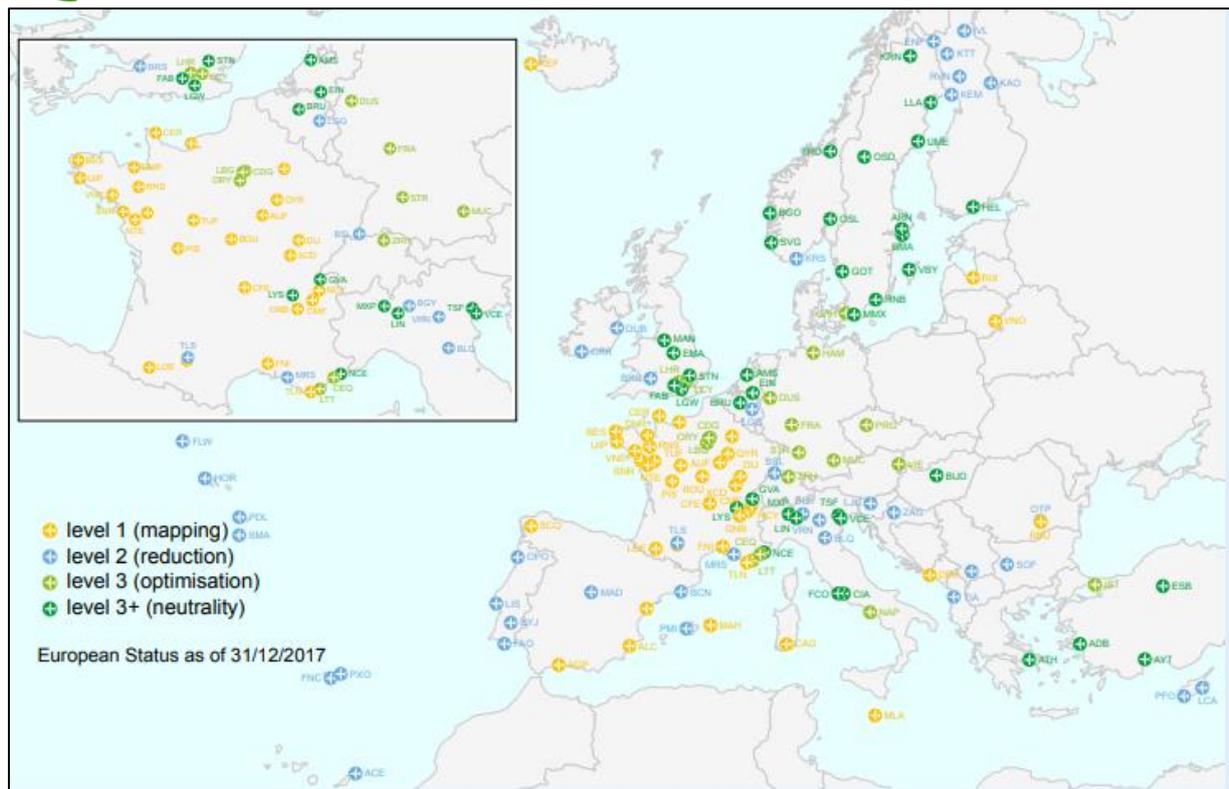


Figure 8 : Répartition des aéroports européens engagés dans l'ACA¹⁷

2. LES GAZ A EFFET DE SERRE CONCERNES

L'Airport Carbon Accreditation se concentre sur les émissions de CO₂ car elles constituent la grande majorité des émissions de GES des aéroports. Les émissions d'autres gaz à effet de serre peuvent être incluses sur une base volontaire.

3. LES SOURCES D'ÉMISSIONS

Selon le GHG Protocol dont est adapté l'ACA, la limite opérationnelle des gestionnaires permet d'identifier et de classer les émissions directes (sources contrôlées par l'organisation) des émissions indirectes (sources nécessaires aux activités de l'organisation). Le périmètre opérationnel correspond aux catégories et postes d'émissions liés aux activités du périmètre organisationnel qui vont être prises en compte dans le bilan.

Les principales normes et méthodes internationales définissent 3 catégories d'émissions :

- Scope 1 : Émissions directes de GES provenant de sources détenues et / ou contrôlées par l'aéroport, par exemple les émissions résultant de la combustion dans les chaudières, les appareils de chauffage, les véhicules, etc.
- Scope 2 : Émissions indirectes de GES provenant de la production d'électricité, de vapeur, de chaleur ou de refroidissement qui est consommé par l'aéroport.
- Scope 3 : Toutes les autres émissions indirectes provenant des activités de l'aéroport, mais issues de sources non détenues et / ou contrôlées par la société : les mouvements d'aéronefs, les véhicules et équipements exploités par des tiers comme par exemple l'assistance en escale, la gestion des déchets hors site, l'accès aux plateformes par les salariés et les passagers, etc.).

¹⁷ https://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/usr_uploaded/219473_EASA_EAER_2019_WEB_LOW-RES_190311.pdf



Figure 9 : sources d'émissions sur un aéroport et scopes de la démarche ACA

4. LES NIVEAUX D'ACCREDITATION

À travers ses 6 niveaux de certification, le programme d'accréditation carbone des aéroports permet aux aéroports d'accéder à différents niveaux de maîtrise des émissions de GES et de neutralité carbone :

- **Niveau 1 - Cartographie** : Valide le calcul du bilan carbone de l'aéroport selon le GHG Protocol, et sa vérification par un organisme tiers indépendant. Ce niveau concerne les scopes 1 et 2 ;
- **Niveau 2 - Réduction** : Atteste de la réduction des émissions des activités directes des scopes 1 et 2 d'un aéroport. Pour ce faire, l'aéroport doit établir des objectifs de réduction des émissions de CO₂ et également définir l'année de référence utilisée ;
- **Niveau 3 - Optimisation** : Demande d'impliquer les tiers pour estimer leurs émissions, et plus particulièrement les compagnies aériennes pour leur cycle LTO (landing - take-off, ou atterrissage - décollage), les passagers et les moyens de transport utilisés pour se rendre à l'aéroport. Ce niveau de l'accréditation inclut les sources d'émissions des scopes 1 et 2 ainsi que certaines sources du scope 3 : les émissions liées aux atterrissages et décollages (cycle LTO), les émissions des moteurs auxiliaires de puissance (APU) des avions, les engins et véhicules d'assistance en escale, l'électricité vendue à des tiers présents sur la plateforme, les accès vers l'aéroport pour

les passagers et les employés, les émissions des voyages professionnels du personnel de l'aéroport, et les autres émissions du scope 3 que l'aéroport choisit d'inclure ;

- **Niveau 3+ - Neutralité** : Atteinte lorsqu'il y a compensation des émissions CO₂ résiduelles des scopes 1 et 2 (calculées au niveau 1) ainsi que des émissions du scope 3 liées aux déplacements professionnels des employés de l'aéroport qui ne peuvent pas être réduites par d'autres moyens.

-Niveau 4 : Transformation : L'aéroport doit définir une stratégie de gestion du carbone à long terme et orientée vers la réduction absolue des émissions. Pour cela, l'aéroport doit formuler un objectif absolu de réduction des émissions à long terme, aligné sur la trajectoire de 1,5 ° C ou la trajectoire de 2 ° C définie par le GIEC, définir les étapes pour atteindre cet objectif et les jalons intermédiaires pour mesurer ses progrès et démontrer des preuves de la conduite active de tiers vers des réductions d'émissions.

-Niveau 4 + : Transition : l'aéroport doit répondre à toutes les exigences du niveau 4 - transformation et compenser les émissions de carbone résiduelles sur lesquelles l'aéroport a le contrôle, en utilisant des compensations internationalement reconnues.

5. LE PLAN D'ACTION DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GES

Définition et atteinte des objectifs de réduction

Les aéroports de niveau 2 et supérieurs doivent définir un objectif ambitieux mais réaliste en matière de réduction des émissions. Afin d'atteindre ou de rester au niveau 2 et supérieur, les aéroports doivent démontrer une amélioration annuelle des émissions des scopes 1 et 2 par rapport à une moyenne glissante sur trois ans. À terme, les aéroports doivent également justifier de l'atteinte de leurs objectifs conformément à l'année cible qu'ils se sont fixés.

Lors de la définition d'un objectif, l'aéroport doit prendre en compte les besoins financiers, opérationnels et commerciaux, les contraintes, la disponibilité des technologies, les exigences en matière de surveillance et de reporting, les parties prenantes, etc.

Après avoir rejoint le programme, il est possible qu'un aéroport ajoute de nouveaux actifs (terminaux par exemple) et / ou cède d'anciens actifs (par exemple la manutention des bagages). Il est donc nécessaire de montrer l'effet de l'ajout ou de la déduction sur les empreintes carbone des années précédentes pour permettre une comparaison à périmètre constant.

Plan de gestion carbone :

Aux niveaux 2 et supérieur, l'aéroport doit élaborer un plan de gestion du carbone. Le but de ce plan consiste à démontrer les efforts significatifs déployés par l'aéroport pour réduire ses émissions conformément aux objectifs définis et à la politique de réduction des émissions mise en place. Au minimum, le plan doit couvrir les émissions des scopes 1 et 2 qui ont été définies dans l'empreinte carbone. Après son développement initial, le plan doit être mis à jour au moins tous les trois ans.

Les aéroports doivent fournir les justificatifs dans le formulaire de demande d'accréditation pour démontrer que le plan est efficacement mis en œuvre. La confirmation du vérificateur de l'aéroport, ayant suivi une formation spécifique, est requise lorsqu'un plan a été élaboré et mis en œuvre (et conformément aux délais de vérification définis dans le document de guidance de l'ACA).

6. LA VÉRIFICATION PAR UN ORGANISME INDÉPENDANT

Le principal objectif de la vérification par une tierce partie indépendante est de garantir que les informations, déclarations et plans communiqués constituent un compte rendu fidèle et juste des efforts de l'aéroport. Plus les données utilisées pour estimer les émissions d'un aéroport sont transparentes, contrôlées et bien documentées, plus elles seront faciles à vérifier. La vérification est une exigence essentielle pour tous les niveaux de l'ACA. Le vérificateur doit attester que les informations suivantes sur l'application satisfont aux exigences du programme (en fonction du niveau d'accréditation requis) : déclaration de la politique générale, empreinte carbone, objectif de réduction des émissions et année de référence, comparaison des émissions annuelles par rapport à la moyenne mobile sur 3 ans, plan de gestion carbone, plan d'engagement des parties prenantes, compensations et réductions (dans le cas du cycle de renouvellement de trois ans pour le niveau 3/3+) des émissions pour au moins une source d'émissions du champ d'application. La vérification de l'empreinte carbone doit être effectuée conformément aux exigences de la norme ISO 14064-3 et au protocole GHG.

7. L'ACA ET LES ÉMISSIONS DE CO₂ – QUELQUES CHIFFRES

Selon le rapport « European Aviation Environmental Report 2019 » de l'EASA¹⁸, les 133 aéroports engagés dans l'ACA en 2019 correspondaient à un trafic « passagers » de 1,343 milliard (65% des passagers en Europe) en 2017-2018 contre 1,105 milliard de passagers (64% des passagers en Europe) sur la période 2014-2015. Les émissions totales directes qui étaient sous le contrôle des aéroports ont été évaluées à 1,985 million de tonnes de CO₂ en 2017-2018 contre 2,089 millions de tonnes de CO₂ dans la période 2014-2015. Les émissions de carbone par passager voyageant dans les aéroports européens pour l'ensemble des aéroports engagés dans l'ACA se sont stabilisées au cours des 3 dernières années à environ 1,5 kg de CO₂ / passager (PAX). La figure ci-dessous présente l'évolution de 2010-2011 à 2017-2018 du nombre d'aéroports engagés dans l'ACA, leur répartition par niveau d'accréditation ainsi que l'évolution des émissions de CO₂/PAX.

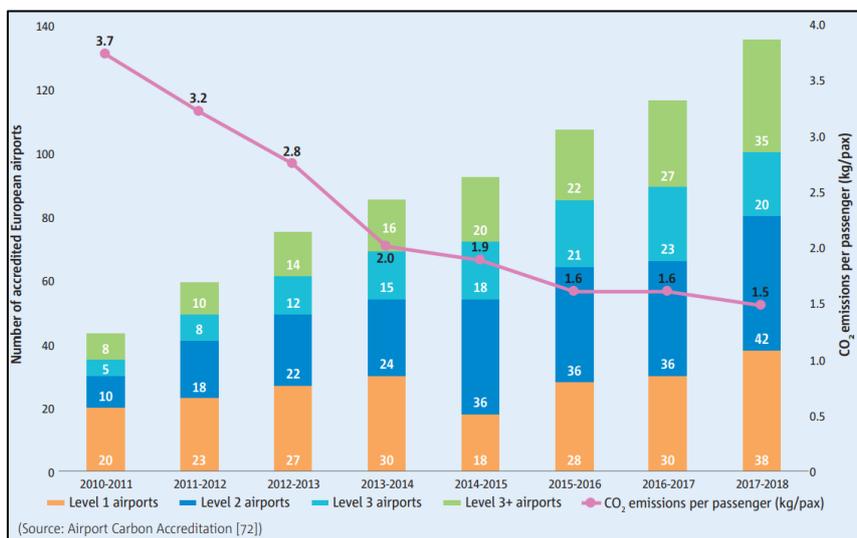


Figure 10 : Evolution du nombre d'aéroports européens engagés dans l'ACA et par niveau d'accréditation et émissions de CO₂ par passager¹⁹

¹⁸https://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/usr_uploaded/219473_EASA_EAER_2019_WEB_LOW-RES_190311.pdf

¹⁹https://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/usr_uploaded/219473_EASA_EAER_2019_WEB_LOW-RES_190311.pdf

Dans le cadre des émissions comprises dans les scopes 1 et 2, une réduction²⁰ de 169 000 tonnes de CO₂ pour l'ensemble des aéroports accrédités de niveau 2 et plus a été enregistrée en 2017-2018 (cf. figure ci-dessous). Cela représente environ 7,9 % des émissions annuelles moyennes sur la période 2014-2017.

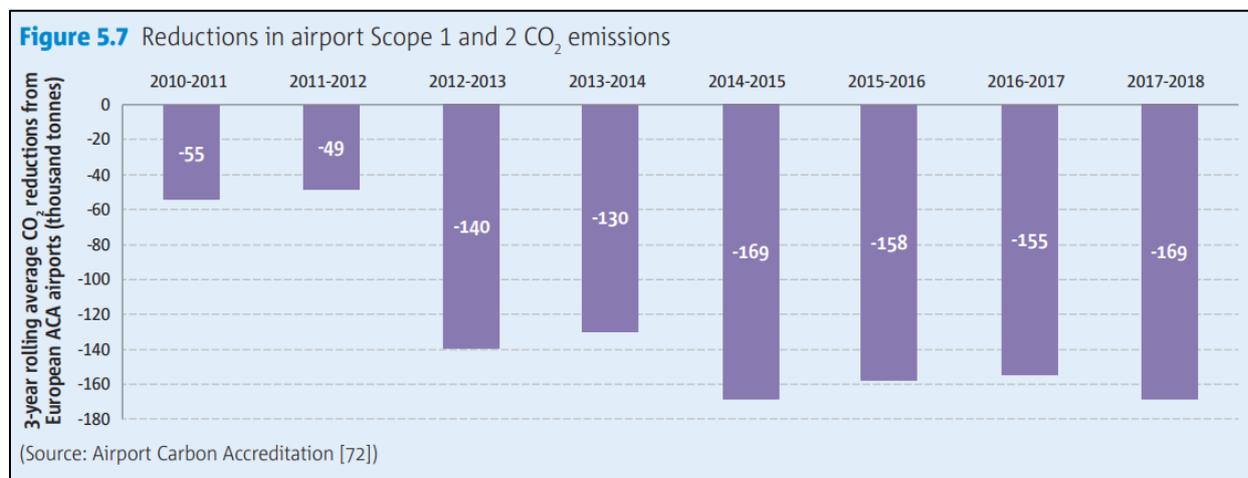


Figure 11 : réduction des émissions de CO₂ pour les sources du scopes 1 et 2²¹

Les émissions du scope 3 ont, quant – à – elles, augmenté de 1,159 million de tonnes de CO₂ en 2017-2018 contre une réduction de 0,551 million de tonnes sur la période 2014-2015.

8. LES MESURES DE REDUCTION PRISES DANS LE CADRE DE L'ACA

Des exemples d'actions menées par les aéroports ont été inventoriées sur la base de 51 réponses des aéroports ayant participé à l'enquête réalisée par ACI EUROPE en 2018 (aéroports représentant 60% du nombre total de passagers de l'UE28 + EFTA) :

- **Flotte de véhicules** : 86% des répondants ont déclaré que leur flotte de véhicules avait commencé à comprendre des véhicules électriques, 47% des modèles hybrides et 35% des véhicules fonctionnant avec un carburant alternatif durable. En outre, 18% des aéroports ont indiqué qu'ils incitaient les taxis à utiliser également ces types de véhicules « verts ».
- **Energie** : 61% des répondants ont indiqué avoir une production d'énergie renouvelable sur la plateforme (voir figure ci-dessous pour la répartition des sources d'énergie) tandis que 40 % ont mis en place un système de gestion de l'énergie certifié selon la norme ISO 50001 :
 - 89 % de ces aéroports ont indiqué que l'énergie renouvelable produite sur place couvre 1 à 20% de leurs besoins énergétiques ;
 - 3 % ont déclaré que l'énergie renouvelable couvre 21 à 40 % de leurs besoins ;
 - 5 % ont déclaré que l'énergie renouvelable couvre 41 à 60 % de leurs besoins ;
 - 3 % ont déclaré que l'énergie renouvelable couvre plus de 61 % de leurs besoins.

²⁰ Les réductions d'émissions doivent être démontrées par rapport aux émissions historiques moyennes des trois années précédant l'année 0. Comme l'année 0 change chaque année lors du renouvellement / du changement de niveau d'un aéroport, les trois années sélectionnées pour le calcul de la moyenne le font également. Par conséquent, les aéroports doivent afficher des réductions d'émissions par rapport à une moyenne mobile sur trois ans.

²¹https://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/usr_uploaded/219473_EASA_EAER_2019_WEB_LOW-RES_190311.pdf

De plus, 65 % des aéroports indiquent acheter de l'électricité produite à partir de sources renouvelables.

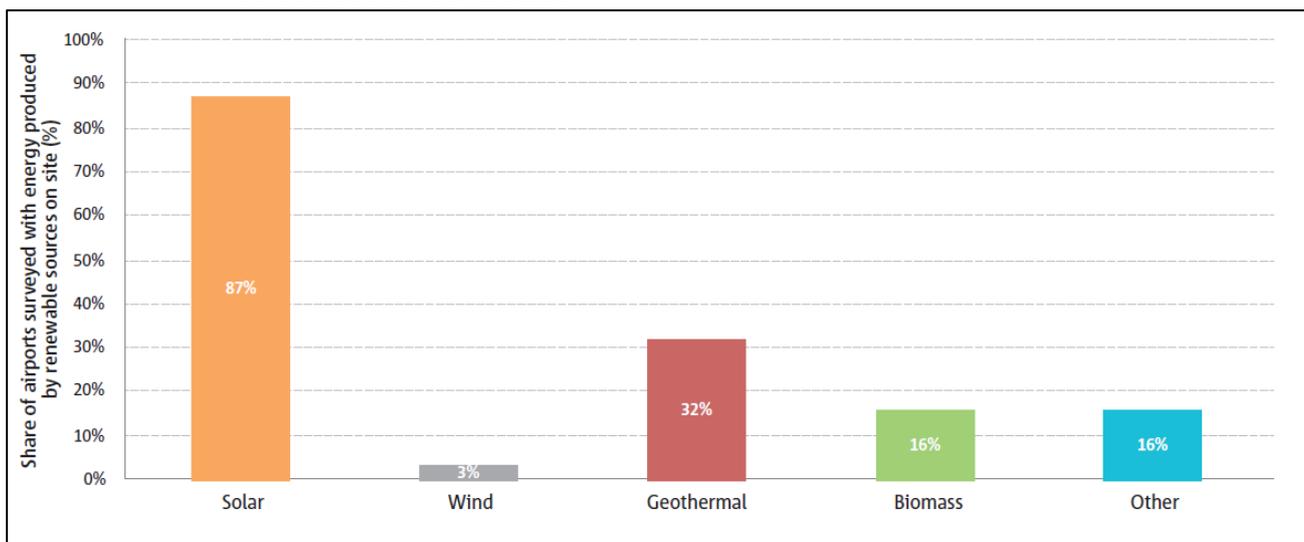


Figure 12 : Part des aéroports qui produisent de l'énergie renouvelable in situ²²

- **Infrastructures aéroportuaires** : moyens de substitution aux APU fixes (pour la fourniture d'électricité -400 Hz et de climatisation / chauffage - PCA) : 82 % des répondants fournissent l'électricité aux avions sur les postes au contact et 58 % fournissent la climatisation/chauffage.
- **Accès à l'aéroport** : Une grande partie des émissions indirectes des aéroports provient des émissions liées à l'accès (par exemple, l'accès routier à l'aéroport). Le développement de système de transport public pour réduire l'utilisation des véhicules individuels et améliorer la qualité de l'air local est l'un des principaux défis pour les aéroports et les autorités locales. Bien que 98% des aéroports ont indiqué que les transports publics étaient disponibles, la majorité des aéroports ont également indiqué que moins de 20 % de leurs employés l'utilisent réellement pour se rendre au travail. Dans une analyse distincte, en moyenne, 36 % des passagers se rendent à l'aéroport par les transports en commun en 2018 contre 43 % en 2016.
- **Système de management environnemental** : 82 % des aéroports étudiés, soit 53% du total des passagers de l'UE28 + EFTA, ont été certifiés selon une norme internationale pour surveiller et gérer efficacement leur performance environnementale (ou la gestion de l'énergie (ISO 50001)).

²² https://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/usr_uploaded/219473_EASA_EAER_2019_WEB_LOW-RES_190311.pdf

III. EXEMPLES D' ACTIONS ENGAGÉES POUR REDUIRE LES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE

A. REDUCTION PAR L' AMELIORATION DES PROCEDURES LORS DES OPERATIONS AERIENNES

1. GESTION DU TRAFIC AERIEN

a) Ciel unique européen (Single European Sky) et programme SESAR

L'initiative « Ciel unique européen » (CUE) ou « Single European Sky » (en anglais) a été officiellement lancée en 2004 par l'Union européenne afin d'améliorer la gestion du trafic aérien (GTA). Elle a pour objectif, de réduire les retards, de renforcer les normes de sécurité et l'efficacité des vols tout en fragmentant l'espace européen. Les objectifs globaux du CUE seront atteints grâce à une approche englobant cinq piliers interdépendants : le cadre réglementaire basé sur la performance, le pilier sécurité, la contribution technologique, le facteur humain et l'optimisation des infrastructures aéroportuaires. La zone géographique couverte par le CUE comprend l'ensemble des 28 Etats de l'UE mais également la Suisse et la Norvège. Le cadre législatif du CUE se compose de quatre règlements de base (N° 549/2004, 550/2004, 551/2004, 552/2004) couvrant la fourniture de services de navigation aérienne (SNA), l'organisation et l'utilisation de l'espace aérien et l'interopérabilité du réseau européen de gestion du trafic aérien. En 2004, un programme de recherche et de développement Single European Sky Air traffic management Research (SESAR) a été mis en place avec pour objectif de développer un système de GTA et des standards techniques. En 2012, le concept de « blocs fonctionnels d'espace aérien » (FAB) a été introduit avec pour objectif de regrouper les pays européens au sein de neuf zones géographiques pour la GTA. La France est engagée dans le FAB Europe Central (FABEC), situé au cœur de l'Europe, avec l'Allemagne, la Suisse, la Belgique, les Pays-Bas et le Luxembourg. En raison de sa position géographique, le FABEC contrôlera l'un des trafics aériens les plus denses au monde (voir figure ci-dessous).

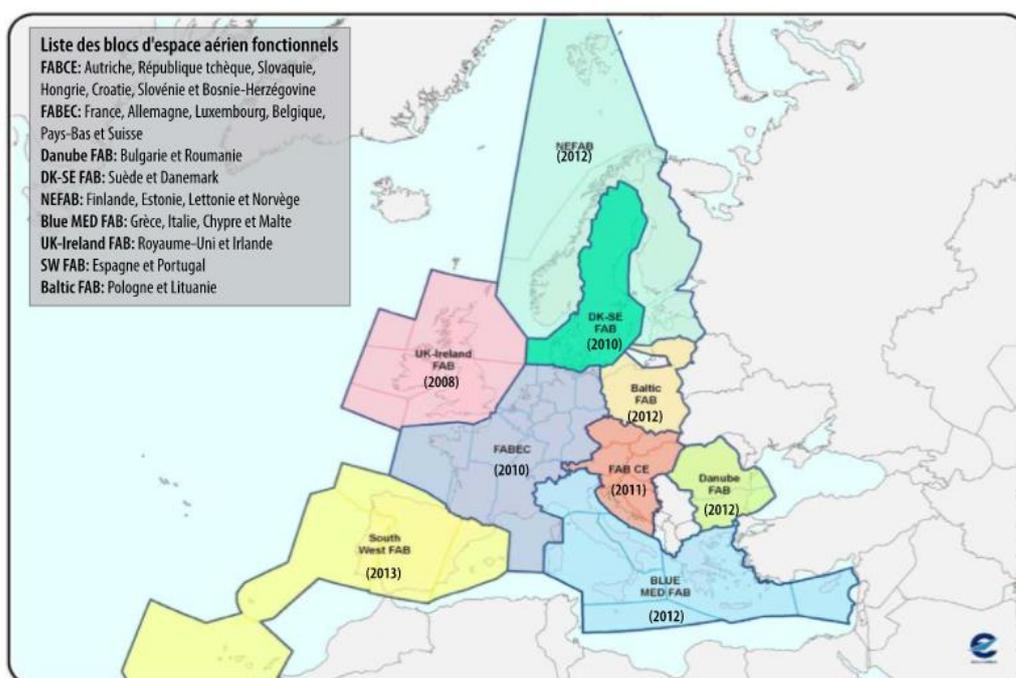


Figure 13 : Les 9 blocs d'espace aérien fonctionnels et les dates de création

SESAR constitue le volet technologique du ciel unique européen. Il vise à fournir à l'Europe des systèmes performants de gestion du trafic aérien afin de moderniser les systèmes actuels.

Le programme SESAR a principalement pour objectif de :

- Restructurer l'espace aérien afin d'augmenter la capacité et d'améliorer l'efficacité globale du système de gestion du trafic aérien ;
- Accroître le niveau de sécurité d'un facteur 10 dans un contexte de doublement du trafic d'ici 20 ans ;
- Diminuer l'impact sur l'environnement de l'activité aérienne ;
- Développer l'efficacité économique du système.

Le tableau ci-dessous présente des exemples de solutions qui ont été ou qui vont être déployées dans le cadre de SESAR en Europe.

Tableau 4 : exemples de solutions déployées ou qui très prochainement déployées dans le cadre de SESAR (source : EASA, 2020)

SESAR solutions	Environmental benefits
<p>Arrival Management extended to en route Airspace (AMAN) Allows for smoother traffic management by earlier sequencing of arrival traffic at a point further away from the airport.</p>	Less fuel burn from reduced vectoring at lower levels, reduced holding and maintaining more fuel efficient flight levels for longer
<p>Enhanced Terminal Airspace using RNP-Based Operations This allows aircraft to follow precision flight paths to reduce distance flown and avoid noise sensitive areas.</p>	Less fuel burn and lower noise
<p>Departure Management Synchronised with Pre-departure Sequencing Pre-departure management delivers optimal traffic flow to the runway by factoring in accurate taxi time forecasts and route planning derived from static data.</p>	Reduced waiting time at the runway holding point, which saves fuel and allows air navigation service efficiency
<p>Departure Management integrating Surface Management Constraints The solution integrates surface planning and routing functions to build a very accurate departure sequence, taking the tactical changes into account.</p>	Less fuel burn and emissions
<p>Time-Based Separation for Final Approach Current distance separations replaced with time intervals in order to adapt to weather conditions and maintain runway approach capacity.</p>	Less fuel burn due to reduction in holding times
<p>Automated Assistance to Controller for Surface Movement Planning and Routing The route planning functionality allows controllers to graphically edit routes and automatically compute estimated taxi times, contributing to more predictable surface operations.</p>	Improved taxi times resulting in less fuel burn

b) Émissions de CO₂ excédentaires durant le vol

En comparant les trajectoires réelles porte-à-porte de tous les vols européens en 2017 à leurs trajectoires « idéales/sans entrave », on constate une augmentation de 5,8 % d'émissions de CO₂ à l'échelle européenne. La figure ci-dessous illustre les émissions excédentaires moyennes de CO₂ par vol ventilées selon les différentes phases de vol. A noter que les émissions excédentaires moyennes de CO₂ sont restées globalement stables au cours des 6 dernières années, même si le trafic a augmenté.

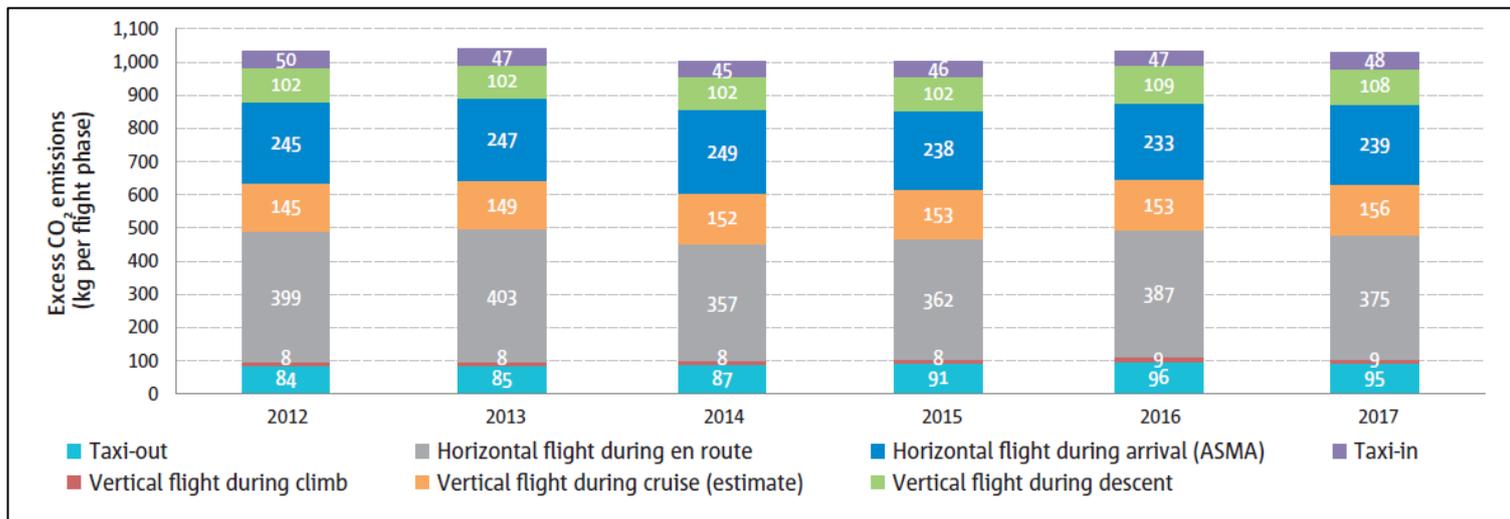


Figure 14 : Répartition des émissions excédentaires de CO₂ porte à porte pour un vol moyen en Europe²³

Il existe un certain nombre de raisons pour lesquelles la trajectoire réelle parcourue peut différer de la trajectoire « sans entrave », une efficacité de 100% ne semble pas réalisable. Cela peut être dû, par exemple, à des conditions météorologiques défavorables, aux besoins de maintenir une séparation minimale entre 2 avions, à un manque de capacité menant à des déviations... L'objectif de l'« European ATM Master Plan²⁴ » est de continuer à réduire les temps de vol supplémentaires et les émissions supplémentaires de CO₂ pour atteindre respectivement 3,2% et 2,3% d'ici 2035.

c) Efficacité opérationnelle des aéroports

Au niveau européen, le temps de roulage supplémentaire à l'arrivée est estimé à environ 1,24 minute par arrivée en 2017, des variations importantes peuvent être observées d'un aéroport à un autre (voir figure ci-dessous). En 2017, l'inefficacité du flux d'arrivée dans les 30 principaux aéroports s'est traduite par 8,33 millions de minutes de roulage supplémentaires. Le principal contributeur est Londres - Heathrow, qui représentait 23% du total des minutes tandis que sa part de trafic était inférieure à 6%. Ceci est une conséquence du mode d'exploitation à Heathrow, qui donne la priorité à la pleine utilisation de la capacité des pistes au détriment des émissions de gaz à effet de serre.

²³ https://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/usr_uploaded/219473_EASA_EAER_2019_WEB_LOW-RES_190311.pdf

²⁴ <https://www.atmmasterplan.eu/>

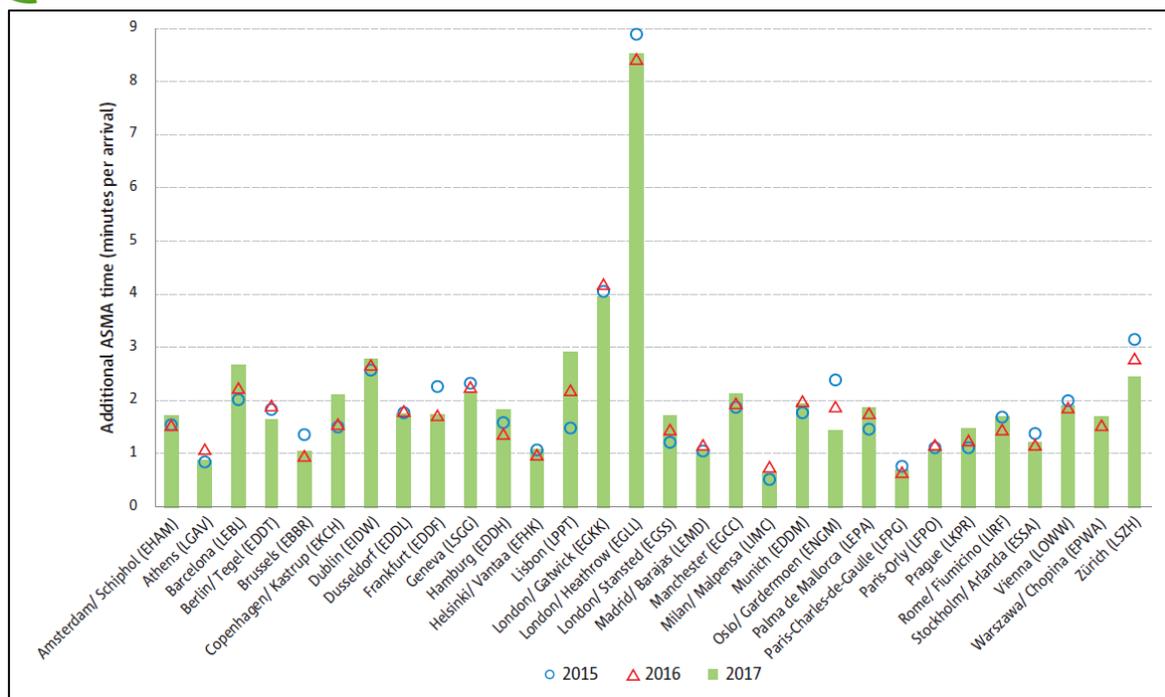


Figure 15 : temps additionnel à l'arrivée pour les 30 aéroports européens les plus fréquentés²⁵

Le temps de roulage supplémentaire moyen au départ, quant-à-lui, s'est légèrement amélioré dans les 30 aéroports les plus fréquentés de la zone SES, passant de 3,82 minutes en 2016 à 3,77 minutes en 2017, avec quelques variations au niveau des aéroports (cf. figure ci-dessous). Attendre dans une file d'attente pour le décollage génère des émissions de CO₂ inutiles.

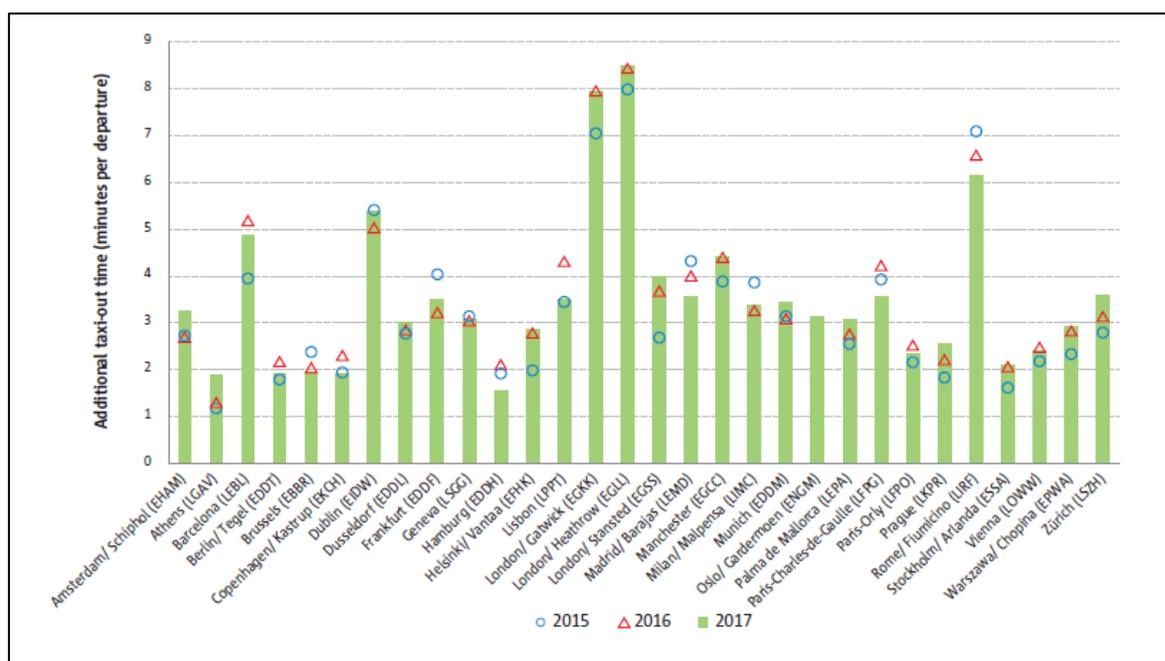


Figure 16 : temps additionnel au départ pour les 30 aéroports européens les plus fréquentés²⁵

²⁵ https://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/usr_uploaded/219473_EASA_EAER_2019_WEB_LOW-RES_190311.pdf

La mise en œuvre de la gestion locale de départ (GLD) en combinaison avec l'intégration des systèmes de prise de décision collaborative aéroportuaire (Airport collaborative decision-making - A-CDM) vise à améliorer le séquençage des départs. Cela permet d'optimiser le temps de roulage et d'améliorer la prévisibilité des heures de décollage en surveillant le trafic de surface. Cependant, cet effet n'est pas toujours pleinement visible car certains aéroports ayant mis en œuvre l'A-CDM affichent des performances de roulage au sol similaires à celles d'aéroports non A-CDM.

A noter que la gestion des arrivées s'étend désormais à l'espace aérien en route jusqu'à 180 à 200 milles nautiques de l'aéroport d'arrivée et devrait permettre un meilleur ordonnancement du trafic.

d) Les descentes continues (CDO)

La mise en place de la procédure de descente continue (Continuous descent operations) permet à l'aéronef d'éviter les segments de vol en palier. La suppression de ces paliers réduit le temps de vol, la consommation du carburant, les émissions atmosphériques et le bruit.²⁶

La CDO est mise en place sur 11 grands aéroports en France avec un taux moyen d'utilisation autour de 47% en 2019. Le graphe ci-dessous montre l'évolution du taux d'utilisation sur ces aéroports entre 2016 et 2019. Les trois principaux aéroports français sont ceux où le taux de descente continue apparaît le plus bas :

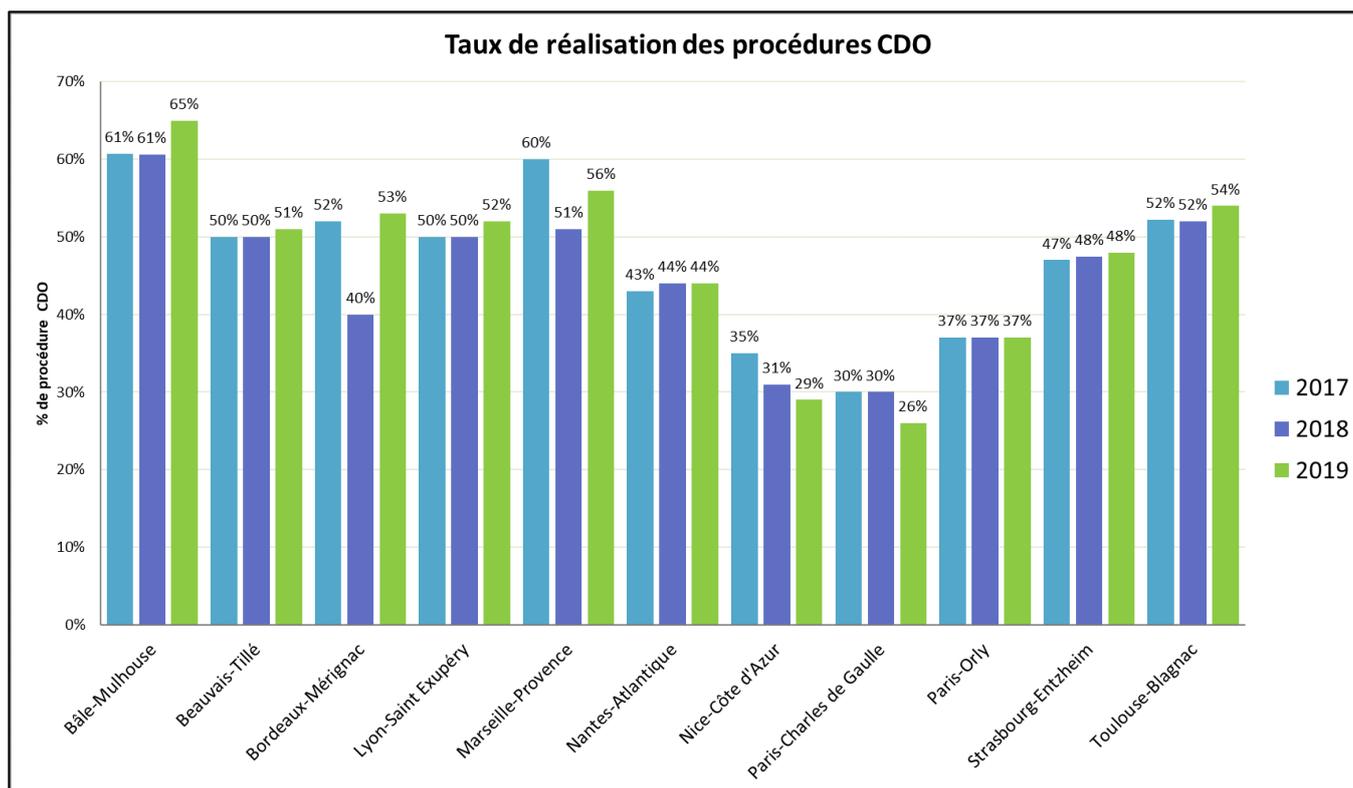


Figure 17 : Taux de réalisation des procédures CDO entre 2016 et 2019 (source : DGAC)

En 2015, un groupe de travail des parties prenantes de la gestion du trafic aérien (ATM – Air traffic management)) européen a approuvé des définitions, des paramètres et des mesures afin d'évaluer les opérations de descente et de montée continues (CDO et CCO (Continuous climb operations)), notamment en termes de bruit et de consommation. Pour ce dernier,

²⁶ https://www.icao.int/Meetings/EnvironmentalWorkshops/Documents/ICAO-TransportCanada-2006/Brooks_fr.pdf

l'évaluation indique l'efficacité verticale du vol en termes de carburant et de CO₂ pour l'ensemble du profil de montée et de descente.

Une étude européenne réalisée en 2017, suite aux travaux du groupe de travail, a évalué l'efficacité en termes de consommation et des émissions de CO₂ des CDO et CCO sur certains aéroports européens ainsi que leur impact financier.

Les résultats montrent qu'en moyenne les vols effectuent 44 secondes en palier au départ et 165 secondes à l'arrivée. La figure suivante montre qu'il y a un nombre relativement important de vols en palier dans la zone centrale européenne indiquant, selon l'EASA, un lien entre CCO/CDO et la complexité de l'espace aérien.

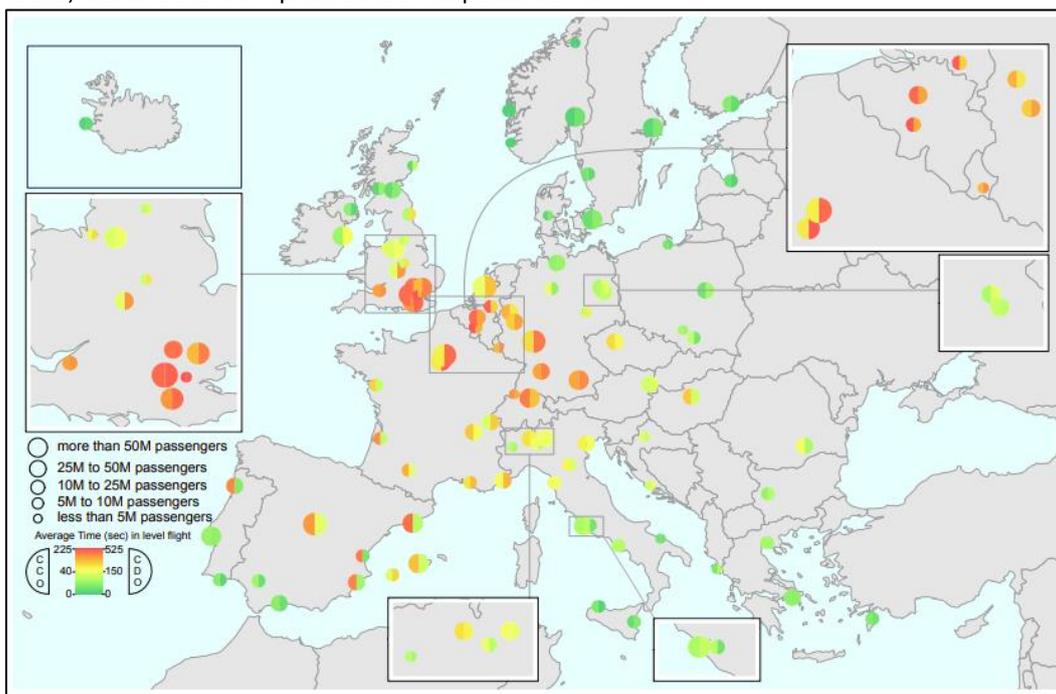


Figure 18 : Temps moyen réalisé en palier lors des CCO/CDO en 2017 sur les principaux aéroports européens (source : EASA)

Les résultats ont également montré qu'en mettant en place la CDO pour un vol type avec des paliers, l'économie en CO₂ pourrait aller jusqu'à 145 kg (et 48 kg pour un CCO).

Enfin, selon l'étude, les économies potentielles totales en Europe s'élèvent à 350 000 tonnes de carburant équivalant à 1,1 million de tonnes de CO₂ par an. Toutefois, il convient de noter que de voler 100 % CCO ou CDO peut être compliqué pour des raisons de sécurité, les conditions météorologiques ou encore vis-à-vis de la capacité.²⁷

e) Airport Collaborative Decision Making (A-CDM)

Le concept de l'Airport Collaborative Decision Making (A-CDM) développé par Eurocontrol et soutenu par l'ACI et IATA permet d'améliorer la prédictibilité et l'efficacité des opérations aéroportuaires et permet l'échange d'informations plus précises relatives aux départs, en particulier les heures de décollage cibles avec le réseau européen « Air traffic flow and capacity management » (ATFCM). Cela permet notamment d'améliorer la planification en route et sectorielle²⁸.

²⁷ https://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/usr_uploaded/219473_EASA_EAER_2019_WEB_LOW-RES_190311.pdf

²⁸ <https://www.eurocontrol.int/concept/airport-collaborative-decision-making>

L'A-CDM contribue également à réduire l'impact environnemental du trafic aérien par l'optimisation des opérations aéroportuaires, notamment par la réduction du temps de roulage. La mise en place de l'A-CDM permet de réduire, en moyenne, de 1 à 3 minutes le temps de roulage au départ.²⁹

Eurocontrol a réalisé en 2016 une étude d'impact³⁰ de l'A-CDM sur les aéroports européens ayant mis en place le système. L'étude a démontré que 13 aéroports sur 17 ayant mis en place l'A-CDM en 2015 ont pu ainsi éviter l'émission de 102 700 tonnes de CO₂ par an pendant le temps de roulage (voir figure ci-dessous).

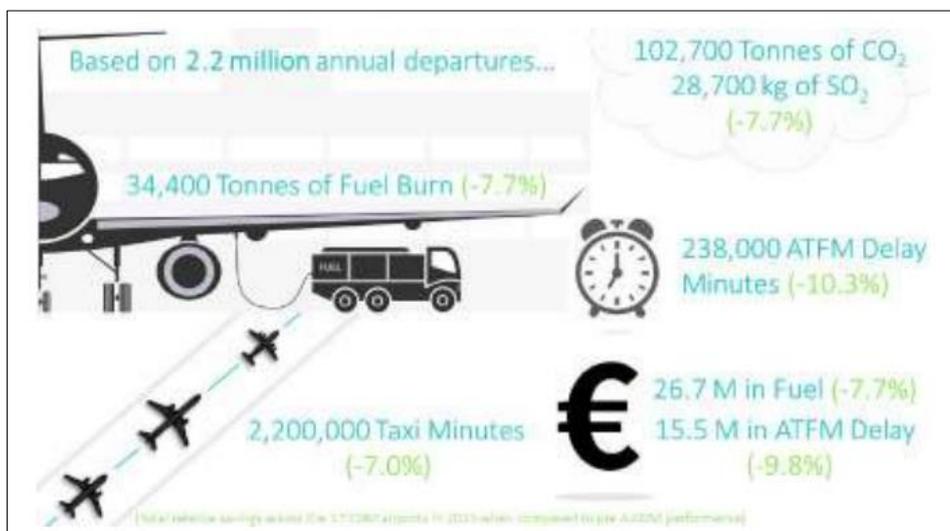


Figure 19 : Infographie sur les économies annuelles liées au temps de taxi pour 17 aéroports équipés de l'A-CDM (estimation)

Le figure suivante présente les aéroports européens ayant mis en place l'A-CDM jusqu'en 2019, cela représente environ 40,9% de départs européens.²⁷

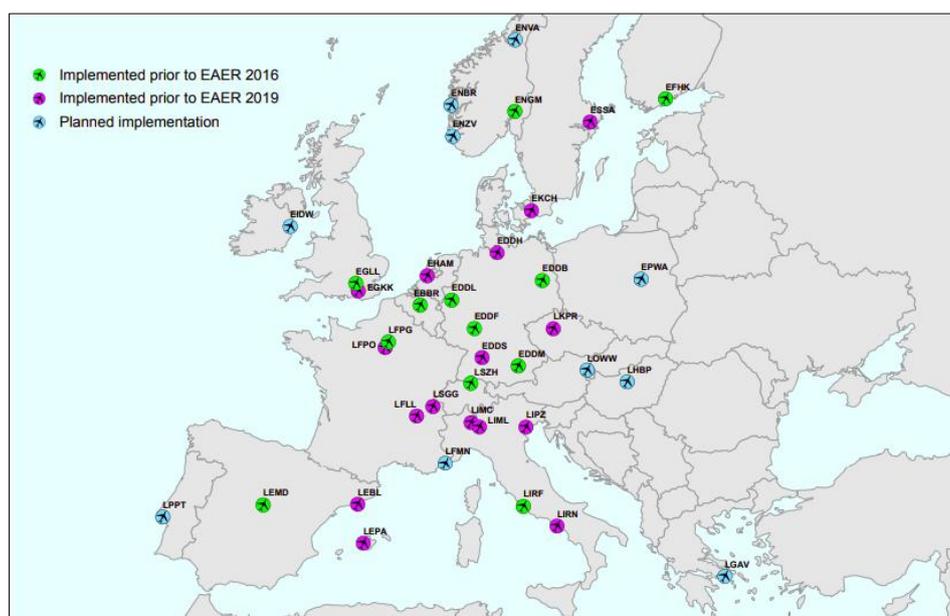


Figure 20 : A-CDM dans la zone SES (Single European Sky Area) (source : EASA)

²⁹ SES Network Manager, 2018, Airport Collaborative Decision Making.

³⁰ <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-04/a-cdm-impact-assessment-2016.pdf>

En France, pour l'aéroport de Paris – Charles – de – Gaulle, on estime que le gain permis par l'A-CDM en termes de réduction du temps de roulage est d'environ 10 % (source : DGAC). Dans le PPA d'Ile-de-France (2018), les gains associés à la mise en place de la gestion localisée des départs (CDM) sur l'aéroport de Paris – Orly ont été estimés à une diminution du temps de roulage de 3%.

La mise en place de l'A-CDM sur l'aéroport de Lyon – Saint-Exupéry a permis de réduire le temps de roulage de 25 secondes (estimé), soit 220 heures de roulage en moins réduisant les émissions de CO₂ (et des polluants).³¹

f) Roulage à n-1 (-2) moteur(s)

Cette procédure de roulage implique de ne faire fonctionner qu'un moteur pour les avions bimoteurs, ou que deux moteurs pour les aéronefs quadrimoteurs, principalement à l'arrivée. (Au départ cette pratique pose des questions importantes en matière de sécurité). L'utilisation de n-1 ou n-2 moteur(s) au roulage entraîne en générale une consommation de carburant légèrement plus élevée du (des) moteur(s) restant(s) et en plus, selon les recommandations des constructeurs, l'utilisation de l'APU devient nécessaire.

A l'aéroport de Zurich, le roulage à n-1/n-2 moteurs à l'arrivée est une opération largement mise en place. Selon une des compagnies aériennes de l'aéroport, la réduction de la consommation de carburant est autour de 30-40% pour les bi- et quadrimoteurs. De plus, la compagnie aérienne en question a rapporté que l'APU n'est pas utilisé systématiquement sauf si le constructeur le prescrit.

Le tableau suivant montre la réduction de consommation de carburant et des émissions par la mise en œuvre du roulage à n-1 moteur pour différents scenario³² :

Tableau 5 : Gains en consommation et émission par la mise œuvre le roulage à n-1 moteur (source : aéroport de Zurich)

Scenario	Current	All airlines	Maximum
Description (baseline: no SET)	Average of 20% of taxi-in operations of this one airline	Average of 20% of taxi-in operations, but all airlines serving ZRH	100% taxi-in operations by all airlines serving ZRH
Fuel Burn reduction	35 t/a	466 t/a	2,339 t/a
NOx-emission reduction	0 t/a	2 t/a	11 t/a
CO ₂ -emission reduction	110 t/a	1,471 t/a	7,353 t/a

[Pour aller plus loin](#) : Rapport sur la gestion de la qualité de l'air sur et autour des plateformes aéroportuaires, Juin 2020, ACNUSA (partie IV : Perspectives pour diminuer l'impact des activités aéroportuaires)

2. MESURES TOUCHANT L'EXPLOITATION DES AVIONS

Pouvant atteindre jusqu'à 40 % des coûts directs de l'exploitation des avions, le carburant représente un important poste de coûts pour les compagnies aériennes. C'est ce qui explique que jusqu'à présent, le monde de l'aviation a misé largement sur les mécanismes de marché pour améliorer le rendement énergétique du transport aérien de personnes et de

³¹ <https://developpementdurable.lyonaeroports.com/assets/files/autres/infographie-qualite-air.pdf>

³² Taxi-Emissions at Zurich Airport, Calculation Analysis and Opportunities

marchandises. Ces mécanismes ont conduit à se concentrer sur l'emploi d'avions de moins en moins consommateurs et sur une meilleure efficacité des opérations.

De meilleurs rendements peuvent être obtenus par le biais de mesures touchant l'exploitation des aéronefs :

- **Réduction du poids** : L'aménagement intérieur des avions (sièges, conteneurs fret, etc.) s'est allégé. Le calcul de l'emport de carburant est devenu tellement perfectionné qu'aucune tonne de carburant superflue n'est embarquée (sans toucher cependant aux réserves nécessaires, notamment celles destinées à faire face à des imprévus). Sur les vols long-courriers, chaque tonne de carburant que l'on évite d'embarquer entraîne une diminution plus que proportionnelle de la consommation de carburant.
- **Répartition du poids** : Le fret est réparti de manière à ce que l'avion ait une traînée aussi faible que possible en vol de croisière. Sur les grands avions, le carburant passe alternativement des réservoirs d'aile au réservoir d'équilibrage situé dans le stabilisateur afin que l'avion ait une traînée aussi réduite que possible en phase croisière, sans devoir pour autant modifier les surfaces de commande. Ce mécanisme fonctionne également lorsque les passagers ou des membres de l'équipage se déplacent dans la cabine.
- **Vitesse de croisière** : Même si à grande altitude les avions sont capables d'atteindre des vitesses élevées en fournissant une puissance motrice relativement peu importante du fait de la faible densité de l'air, les lois de la physique induisent que la moindre augmentation de la vitesse normale de croisière pour laquelle l'avion a été conçu demande de fournir une grande puissance supplémentaire. Que ce soit pour un avion en vol, pour une voiture circulant sur l'autoroute ou pour un train filant sur le réseau à grande vitesse, la règle est identique : augmenter la vitesse de 10 % exige 30 % de puissance motrice supplémentaire. Gagner du temps en augmentant la vitesse est très mauvais en termes de consommation de carburant et plus généralement de rendement énergétique. À l'inverse, réduire légèrement la vitesse, par exemple de Mach 0,83 (83 % de la vitesse du son en vol) à Mach 0,82, permet déjà de réaliser de sensibles économies de carburant. Aussi, les pilotes réduisent légèrement la vitesse de croisière dès qu'ils le peuvent à la recherche d'un compromis entre les souhaits des passagers (temps de vol, heure d'arrivée) et la consommation de carburant.
- **Optimisation des phases de montée et de descente et routes directes afin de diminuer la consommation de carburant** : L'espacement des avions par le service de la navigation aérienne et les réglementations nationales de l'espace aérien, qui aboutissent à l'établissement de routes aériennes dictées en partie par des considérations d'ordre politique, peuvent induire, dans un ciel européen très fragmenté, des profils de vol inefficaces du point de vue de la consommation de carburant. Avec le Ciel unique européen en point de mire, les compagnies et services de navigation aérienne européens étudient différentes mesures d'optimisation afin d'exploiter de nouveaux potentiels. Par exemple, un nombre croissant d'avions de ligne à réaction sont capables de parcourir les derniers 200 km réacteurs au point mort sans devoir sans cesse remettre des gaz ou être contraints d'amorcer leur descente trop tôt ou trop tard. Lorsque les conditions sont idéales, un avion de ligne à réaction peut effectuer son approche jusqu'à destination en vol plané.
- **Élimination des circuits d'attente.**
- **Adaptation des routes selon les conditions de vent** : Les prévisions météorologiques notamment celles concernant les vents en altitude sont aujourd'hui très précises. Les systèmes de gestion de vol modernes permettent de mieux exploiter ces informations.

Pour aller plus loin :

<https://www.bazl.admin.ch/bazl/fr/home/politique/environnement/aviation-et-rechauffement-climatique/massnahmen-zur-schadstoffreduktion/operationelle-massnahmen.html>

Vol d'avions de ligne en formation

Airbus a signé un accord avec les compagnies aériennes Frenchbee et SAS Scandinavian Airlines, ainsi qu'avec des organismes de trafic aérien (direction des services de la navigation aérienne pour la France- DSNA, service de la navigation aérienne pour le Royaume Uni - Nats et Eurocontrol) pour étudier les moyens de créer des formations d'avions. L'idée est de copier les formations des oies sauvages qui volent en forme de V afin de préserver leur énergie. Le vol d'avions de ligne en formation pourrait permettre une réduction de 5 à 10% de la consommation de carburant. Un vortex contenant un courant d'air ascendant produit par chaque moteur d'avion pourrait bénéficier à l'avion suiveur et lui permettre de réduire sa poussée et donc la consommation. Un vol d'essai en 2016 avec un A350 volant derrière un A380 a montré une économie instantanée de 10% sur la consommation de carburant.³³

B. REDUCTIONS PAR L'UTILISATION DE BIOCARBURANT

Le transport aérien représente plus de 2 % des émissions mondiales de CO₂ et 4 % des émissions en Europe³⁴. Il représente aussi 8 % de la consommation mondiale de pétrole (10 % de carburant). Ces chiffres pourraient progresser dans la perspective de la reprise de la croissance du trafic aérien. Dans ce contexte, les biocarburants constituent à court terme l'un des leviers pour initier la transition énergétique du secteur et sa décarbonation. La capacité opérationnelle des biocarburants dans l'aviation n'est plus à démontrer. Depuis 2011, près de 2 000 vols commerciaux ont eu lieu lors de vols de démonstration, validant ainsi les aspects logistiques et opérationnels. Plusieurs projets se sont alors développés, comme le projet « ITAKA » (Initiative Towards sustainable Kerosene towards Aviation), financé par la Commission Européenne, démontrant la faisabilité de la mise en place de cette filière. Un des paramètres importants pour les carburants alternatifs dans le secteur aérien est la notion de « drop-in ». C'est-à-dire que le carburant doit pouvoir se substituer en partie ou en totalité au jet fuel conventionnel sans impact opérationnel (pas de modification des infrastructures aéroportuaires, ni des avions ou moteurs existants). Grâce à ce paramètre, le taux d'incorporation des biocarburants issus de la biomasse peut aller jusqu'à 50%³⁵. Les carburants alternatifs ont conduit au développement de certification, comme la certification technique « ASTM » (*American Society for Testing Materials*). Ce processus vise à assurer la sécurité et la compatibilité avec les moteurs et systèmes de fuel des avions. Cette certification longue et coûteuse permet la commercialisation et l'usage de ces carburants. Elle est accompagnée par une certification environnementale pour apprécier les critères de durabilité du carburant³⁶.

1. CAPACITE DE PRODUCTION EN EUROPE

La capacité de production de biocarburant pour l'aviation dans l'Union Européenne (UE) repose sur un petit nombre d'usines représentant une production maximale d'environ 2,3 millions de tonnes par an (scénario Max-EU) correspondant à environ 4% de l'ensemble de la demande en carburant fossile au sein de l'UE.

³³ capital.fr/entreprises-marches/pour-economiser-du-carburant-airbus-veut-copier-les-formations-doies-sauvage-1380047

³⁴ <https://www.citepa.org/fr/ccnucc/>

³⁵ https://www.gifas.asso.fr/sites/default/files/Brochure%20Climat-Gifas-A4_HD%20Planches-FR-Juin%202019_0.pdf

³⁶ <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/biocarburants#>

Le procédé le plus développé à ce jour est la filière HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids). Dans ce processus, des huiles végétales et / ou des matières premières lipidiques animales peuvent être utilisées pour produire une alternative biosourcée au kérosène entièrement certifiée. La filière HEFA fait partie de la filière « huile végétale hydrotraitée » (HVO), biocarburant actuellement utilisé dans le secteur routier. Une filière qui permettrait d'utiliser une plus grande part de la production de « HVO », augmentant ainsi le potentiel de production de l'UE, est en cours de certification (extension HEFA ou HEFA+). La filière de « co-processing » récemment certifiée pourrait améliorer les capacités de production³⁷.

2. PRIX ET CONSOMMATION

Le prix du biocarburant par rapport au kérosène d'origine fossile est l'un des principaux obstacles à son utilisation. Aujourd'hui, le prix de la matière première représente la principale composante du prix final du biocarburant pour l'aviation. Alors que le prix du carburant d'origine fossile est de l'ordre de 600 €/tonne, le prix du carburant biosourcé produit à partir d'huile de cuisson usagée peut être compris entre 950 et 1 015 €/tonne. En outre, les matières premières exigées dans le procédé HEFA sont également utilisées dans le secteur des carburants routiers pour la production de biodiesel. **Erreur ! Signet non défini..**

3. CARBURANTS DURABLES DANS L'AVIATION ET REDUCTION DE GAZ A EFFET DE SERRE

DURABILITE

Pour qu'un carburant biosourcé soit considéré comme un « Sustainable Aviation Fuels- SAF », il doit répondre à des critères de durabilité. À l'heure actuelle, il n'y a actuellement pas une seule définition de « SAF » validée au niveau international.

Dans le cadre réglementaire européen, la durabilité est définie dans la directive sur les énergies renouvelables (EnR) EC/2009/28. Le Conseil et le Parlement européen ont récemment approuvé une révision de la directive EnR, qui fixe de nouveaux objectifs ambitieux et inclut des critères de durabilité révisés³⁸.

Le tableau suivant donne un aperçu des critères de durabilité convenus pour la directive EnR révisée. Au niveau international, des discussions sont en cours pour convenir de critères d'évaluation de la durabilité des carburants pour l'aviation, qui seraient éligibles dans le cadre du programme CORSIA de l'OACI.

Tableau 6 : Critères de durabilité des biocarburants³⁹

Scheme	Sustainability criteria
EU RED Recast (2018)	<p><i>GHG reductions</i> – Greenhouse gas emissions from biofuels must be lower than from the fossil fuels they replace: at least 50% for installations older than 5 October 2015, 60% for installations after that date and 65% for biofuels produced in installations starting operation after 2021.</p> <p><i>Land use change</i> – Carbon stock and biodiversity: raw materials for biofuels production cannot be sourced from land with high biodiversity or high carbon stock (i.e. primary and protected forests, highly biodiverse grassland, wetlands and peatlands).</p> <p>Other sustainability issues covered by the reporting obligation are set out in the Governance regulation and can be covered by certification schemes on a voluntary basis.</p>
Future 'CORSIA'	Sustainability criteria under approval at ICAO ¹

1 The EAER website will provide an update on the CORSIA SAF sustainability criteria as soon as they are officially approved at ICAO level.

³⁷ https://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/usr_uploaded/219473_EASA_EAER_2019_WEB_LOW-RES_190311.pdf

³⁸ <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-10307-2018-ADD-2/en/pdf>

³⁹ https://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/usr_uploaded/219473_EASA_EAER_2019_WEB_LOW-RES_190311.pdf

EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE

Les biocarburants aéronautiques peuvent émettre moins de GES que les carburants fossiles traditionnels. En effet, les émissions issues de la combustion des biocarburants sont souvent considérées comme nulles, étant donné que les carburants sont produits à partir de la biomasse. Celles-ci sont appelées « émissions biogéniques » et sont supposées être nulles car la croissance de la biomasse absorbe la même quantité de CO₂ que celle libérée lors de leur combustion. Néanmoins, les « émissions non biogéniques » sont utilisées pour désigner les émissions lors de production des carburants biosourcés et résultant de la culture, de la récolte et du transport de la biomasse ainsi que de sa conversion en carburant. Ces « émissions non biogéniques » ne sont pas compensées et constituent par conséquent un impact direct des biocarburants pour l'aviation. La différence entre les « émissions non biogéniques » des carburants biosourcés et les émissions résultant de l'utilisation d'un carburant fossile standard constitue le potentiel d'économies de GES du carburant biosourcé. Des discussions sont actuellement en cours sur la méthodologie la plus pertinente pour évaluer ces émissions grâce à une analyse du cycle de vie. Ceci reste particulièrement pertinent pour les filières qui entrent actuellement sur le marché. Il y a aussi beaucoup de débats sur la façon de rendre compte des émissions indirectes telles que les émissions de culture étroitement liées aux pratiques agricoles et aux types de sols. En fonction de ces effets indirects, les émissions d'un carburant biosourcé par rapport aux émissions issues de la production et de la combustion de carburant conventionnel peuvent être inférieures, comparables ou même supérieures. Le JRC (Joint Research Centre) de la Commission européenne contribue activement aux discussions en cours sur la quantification du potentiel de réduction des émissions de GES des biocarburants pour l'aviation. Alors que les émissions de GES de la production de HEFA à partir de matières premières telles que les huiles de tournesol et de soja peuvent être estimées à environ 40 gCO₂eq/MJ, le même procédé HEFA alimenté par l'huile de colza entraînerait des émissions de GES plus élevées, d'environ 51 gCO₂eq/MJ en raison des différences dans les chaînes de production. Afin de calculer les réductions potentielles de GES provenant du biocarburant pour l'aviation, il convient de noter que l'OACI a défini un niveau de référence d'émissions de GES provenant d'un carburant à base fossile à 89 gCO₂eq/MJ.

[L'annexe 3 présente un aperçu des réduction d'émissions directes pour un panel de filières de biocarburant pour l'aviation.](#)

LES EFFETS INDIRECTS DE LA PRODUCTION DE BIOCARBURANTS

L'avantage environnemental de l'utilisation du biocarburant pour l'aviation peut être considérablement réduit par les effets indirects induits liés à leur production. L'effet indirect le plus connu a trait à l'impact sur l'utilisation des terres. La production de biomasse a généralement lieu sur des terres arables qui étaient auparavant utilisées pour d'autres cultures telles que la culture de denrées alimentaires ou d'aliments pour animaux.

Comme cette production agricole est encore nécessaire, elle peut être, au moins en partie, déplacée vers des terres auparavant non cultivées telles que les prairies et les forêts. Ce processus est connu sous le nom de changement indirect d'utilisation des terres. Un autre effet indirect concerne la concurrence avec la production de denrées alimentaires et d'aliments pour animaux lorsque des matières premières agricoles sont utilisées dans le processus de production des biocarburants. Un exemple est l'utilisation de l'huile de colza comme matière première pour la production de carburant biosourcé, qui, en augmentant la demande d'huile de colza, peut contribuer à augmenter son prix sur les marchés de l'alimentation humaine et animale. Une option pour limiter ces effets indirects induits consiste à utiliser les déchets comme matière première. Les déchets ménagers recyclés (déchets solides issus des stations d'épuration) en sont un bon exemple, car aujourd'hui la partie non recyclée est principalement envoyée en décharge ou est incinérée. Cependant, il

n'est pas toujours facile de définir un flux de production à partir de « déchets » car d'autres secteurs industriels peuvent déjà utiliser ce sous-produit à d'autres fins. C'est le cas de la mélasse de sucre, qui est transformée et réutilisée pour la production d'aliments pour animaux. L'ICTT (*International Council on Clean Transportation*) a également publié un rapport en 2019 « *The cost of supporting alternative jet fuels in the European Union* »⁴⁰. Ce rapport passe en revue la littérature existante sur l'économie de la production de carburants alternatifs, évalue les coûts de production pour une sélection de technologies, comptabilise les émissions de gaz à effet de serre durant le cycle de vie des carburants et identifie les voies de production qui offrent les réductions de carbone les plus rentables. Les résultats montrent que dans l'ensemble, le coût de production des carburants alternatifs, même les moins chers, est beaucoup plus élevé que le coût du pétrole, ce qui nécessite un soutien politique substantiel pour qu'ils atteignent le marché.

C. RÉDUCTION PAR L'INNOVATION TECHNOLOGIQUE DES AVIONS ET MOTEURS

1. TECHNOLOGIES ÉVOLUTIVES - PERSPECTIVES

Une gamme de nouveaux avions devrait entrer en service dans les prochaines années. Les nouveaux modèles sont, généralement, de 15 à 25 % plus économes en carburant que leurs prédécesseurs. La conception des prochains avions est déjà définie et leur mise en service est fixée. Les caractéristiques de consommation de carburant de ces aéronefs sont connues avec un degré de confiance élevé, ce qui permet une prévision fiable de leur impact sur l'efficacité de la flotte mondiale.

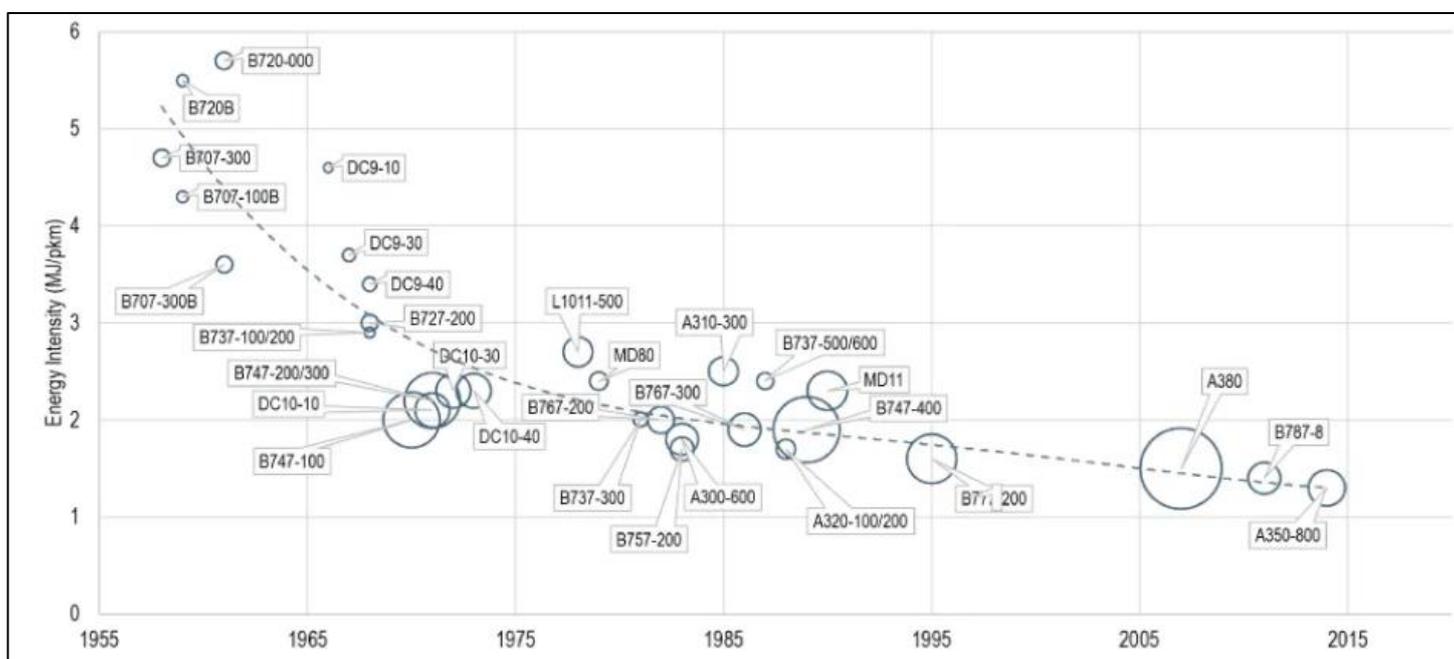


Figure 21 : Evolution de la consommation de carburant (la taille de bulle est fonction de la capacité en nombre de sièges) (source : Jean-Paul Rodrigue 2020) ⁴¹

⁴⁰ https://theicct.org/sites/default/files/publications/Alternative_jet_fuels_cost_EU_20190320_1.pdf

⁴¹ Jean-Paul Rodrigue. *The Geography of Transport Systems* - fifth edition. New York: Routledge, 456 pages. ISBN 978-0-367-36463-2, 2020.

Les technologies évolutives ont un potentiel d'amélioration de l'efficacité énergétique de l'ordre de 30% d'ici 2030 par rapport à 2005. Cependant, leur potentiel pourrait ralentir au-delà de 2030. Le tableau ci-dessous présente une liste des technologies aéronautiques évolutives futures les plus importantes avec leurs niveaux de disponibilité technologique définis par la NASA. Plus le niveau de disponibilité est élevé, plus la technologie est prête à être mise en service⁴².

Tableau 7 : Liste des nouveaux concepts technologiques (2020-2035) (source : IATA 2019)

Groupe	Concept	Mise en service	Niveau de disponibilité technologique	Réduction de consommation énergétique
Nouvelle architecture de moteur (UltraHigh Bypass Ratio⁴³)	Advance Turbofan	2020	8	20% (Trent 700)
	Ultrafan	2025	7	25% (Trent 700)
	GE9X	2020	8	10% (GE90-115B)
	Counter Rotating Fan	Après 2020	3	15 - 20%
	Ultra-High Bypass Ratio Engine	2025	5	20 - 25% (5 - 10% re LEAP)
Concept de moteurs avancés⁴⁴	Zero Hub Fan	2020	7	2 - 4%
Cycle thermodynamique des moteurs⁴⁵	Contrôle de flux adaptatif/actif	Après 2020	2	10 - 20%
	Composites omniprésents (2 ^e génération)	Après 2020	3	10 - 15%
Aérodynamique	Flux laminaire naturel	Après 2020	8	5 - 10%
	Flux laminaire hybride	Après 2020	7	10 - 15%
	Carrossage variable avec de nouvelles surfaces de contrôle	Après 2020	5	5 - 10%
	Spiroïdes Winglets	Après 2020	7	2 - 6%
Systèmes annexes	Système de roulage électrique (EGTS)	2021	8	3%
	Piles à combustible	2020	8	1 - 5%

La réalisation de l'objectif climatique à long terme nécessite de nouvelles réductions des émissions dont une grande partie devra passer par l'utilisation de carburants d'aviation durables. Les avions traditionnels tels qu'Airbus et Boeing ainsi que les start-up spécialisées telles que Zunum Aero et DZYNE, les instituts de recherche et les universités

⁴² IATA. Aircraft Technology Roadmap to 2050, 2019.

⁴³ Le taux de bypass est le rapport entre le débit massique du flux de dérivation et le débit massique entrant dans le cœur de la chambre de combustion. En général, plus le taux de bypass d'un moteur est élevé, meilleure est son efficacité énergétique. Safran travaille sur des turbo-réacteurs à double flux UHBR avec un taux de bypass d'au moins 15. La conception fait appel à des matériaux composites légers (réf : Safran. Future engine architectures: innovation under the hood! 2018).

⁴⁴ Rolls-Royce travaille sur deux nouvelles conceptions efficaces prévues pour un lancement en 2020 et 2025 respectivement : les moteurs Advance et Ultrafan. Le moteur Advance présente une architecture à trois arbres avec un nouveau noyau haute pression. L'Ultrafan est une étape supplémentaire utilisant le noyau du moteur Advance mais avec une configuration à deux arbres couplée à un turbo-réacteur à engrenages (réf : Rolls-Royce. A ground-breaking solution, 2016).

⁴⁵ Le cycle thermodynamique du turbo-réacteur comprend quatre temps où l'air subit des modifications physiques ou chimiques : aspiration, compression, combustion et détente/éjection. Les technologies de moteur incluent des concepts de deuxième et troisième génération pour améliorer l'efficacité thermique du cycle de moteur. Certaines de ces technologies telles que le contrôle de flux adaptatif/actif (le moteur qui peut adapter sa condition de fonctionnement pendant le vol à la mission donnée et optimiser le comportement des composants du cycle) et les composites omniprésents (2^e génération de structures composites de moteur avec le pourcentage plus élevé du total des composants structurels du moteur) pourraient être incluses dans la future mise en œuvre des moteurs de nouvelles générations (réf : IATA. Technology Roadmap, 4th Edition, June 2013).

travaillent sur une variété de nouveaux concepts d'avions. Les principales tendances dans le développement de futurs aéronefs plus efficaces se situent dans de nouvelles configurations d'aéronefs ainsi que dans les technologies, les matériaux et les structures de propulsion. Leur développement et leur mise en œuvre, y compris les adaptations nécessaires du système de transport aérien nécessitent des délais considérables. Le tableau suivant présente la prévision de la mise en service des nouveaux aéronefs à partir de 2035 dans des conditions optimales.¹³

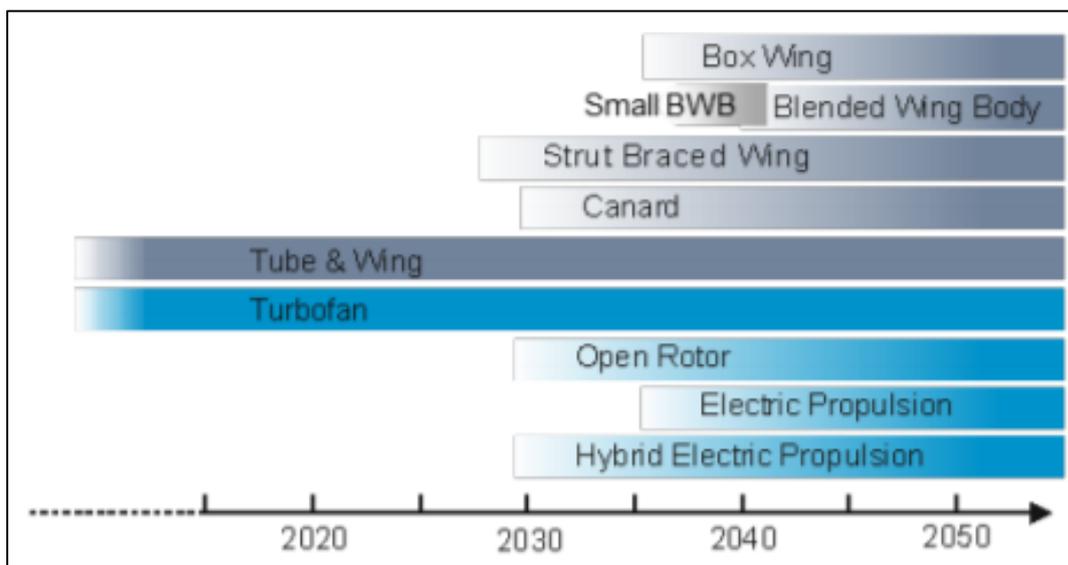


Figure 22 : Délais pour la disponibilité des avions analysés et des concepts de moteurs (source : IATA 2019⁴⁶)

2. AÉRODYNAMIQUE DES AVIONS

a) Flux laminaire naturel

Une technologie aérodynamique qui a fait l'objet de recherche pendant de nombreuses années et qui a récemment fait de nouveaux progrès est le contrôle du flux laminaire. Le flux laminaire est la solution pour obtenir une traînée minimale à la surface des avions et comporte des couches lisses d'écoulement d'air sans mélange avec de couches adjacentes. Cette technologie permet une réduction considérable de la traînée en évitant les turbulences dans le flux d'air en surface de l'avion. Le contrôle du flux laminaire naturel (NFL) permet un écoulement laminaire uniquement en concevant les surfaces des ailes et d'autres pièces de l'avion avec une forme appropriée. Depuis 2017, des essais en vol sont menés avec un avion d'essai A340, sur lequel les ailes extérieures ont été remplacées par des profils laminaires. D'après les résultats des vols d'essai, le potentiel d'économie de carburant du NFL pour un vol de 800 miles nautiques serait d'environ 4,6%.⁴⁷

⁴⁶ IATA. Aircraft Technology Roadmap to 2050, 2019.

⁴⁷ Airbus. European laminar flow research takes a new step with Airbus' BLADE Flight Lab, 2017.

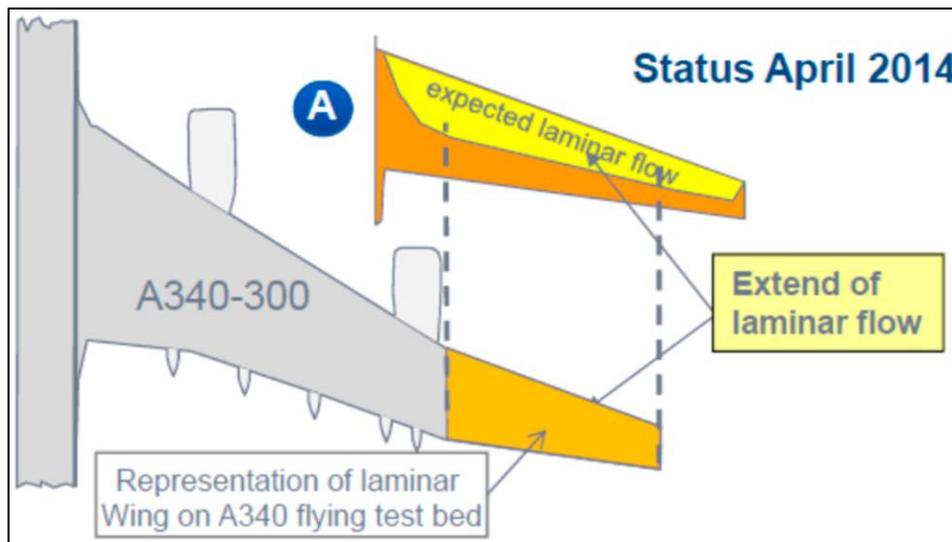


Figure 23 : Test en vol de l'aile externe BLADE NLF (source : Williams, G, 2018⁴⁸)

b) Flux laminaire hybride

Un autre moyen d'obtenir des conditions d'écoulement laminaire est le contrôle du flux laminaire hybride (HLFC), qui utilise une aspiration de la couche d'air pour maintenir un flux laminaire sur la surface de l'avion. Cette technologie est particulièrement adaptée aux ailes qui s'inclinent vers l'arrière ou parfois vers l'avant plutôt que dans une direction latérale droite. La NASA, dans le cadre de son programme de recherche sur l'aviation écologiquement responsable (ERA), a effectué une série de vols d'essai sur un B757 équipé d'un système HLFC.⁴⁹

La figure suivante illustre les systèmes de « laminarisation » du flux qui aident à maintenir l'état d'écoulement laminaire au moyen d'une aspiration sur la surface de l'aile.

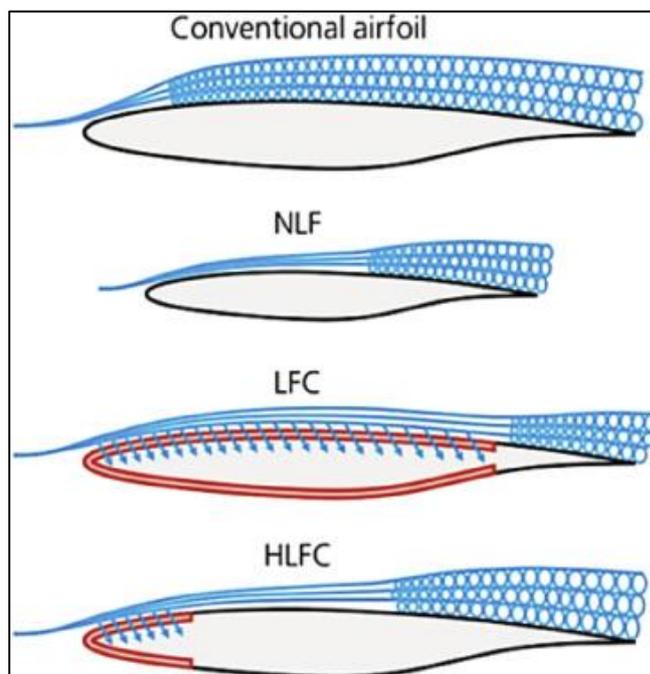


Figure 24 : Systèmes de « laminarisation » du flux (source : Williams, G, 2018⁵⁰)

⁴⁸ Williams, G. Progress and Achievements in CleanSky SFWA.

⁴⁹ ICAO. 2016 Environmental Report, 2016.

⁵⁰ Krishnan, K. Review of hybrid laminar flow control systems, 2017.

3. SYSTEMES A BORD DES AERONEFS

a) Système de roulage électrique

Safran développe un système de roulage électrique (EGTS - Electric Green Taxiing System) composé d'un moteur électrique intégré au train d'atterrissage et alimenté par l'APU. Ce système est en test avec Airbus sur le programme A320neo/ceo pour une mise en service à l'horizon 2022. Ce moteur devrait permettre un gain d'énergie de l'ordre de 4% par vol en assurant le roulage au sol de l'avion.⁵¹

b) Piles à combustible

Les piles à combustible produisent de l'énergie électrique à partir de l'oxygène de l'air ambiant et de l'hydrogène gazeux. Elles sont plus respectueuses de l'environnement car elles ne génèrent ni bruit ni émissions polluantes. Les piles à combustible pourraient remplacer l'APU et alimenter divers systèmes à bord de l'aéronef tels que le démarrage du moteur, la ventilation, les commandes de vol, l'éclairage, etc. Safran travaille actuellement sur le développement de cette technologie. Selon les conditions d'exploitation, les économies de carburant devraient être comprises entre 1 et 5 %. Il faut toutefois tenir compte du fait que les piles à combustible nécessitent un approvisionnement régulier en hydrogène comme combustible. Par conséquent, la mise en œuvre de piles à combustible pour l'alimentation électrique des futurs aéronefs ne sera possible qu'une fois qu'une structure mondiale d'approvisionnement en hydrogène sera construite. Avec les progrès actuels des énergies renouvelables, cela pourrait se produire au cours de la prochaine décennie.⁵²

4. TECHNOLOGIES RELATIVES AUX MOTEURS A PROPULSION

a) CFM56 Tech Insertion

La configuration du moteur CFM56 Tech Insertion de CFM International (CF pour le moteur commercial de General Electric et M56 pour le cinquante-sixième projet de Snecma) permet à environ 180 opérateurs dans le monde de réduire leur consommation de carburant et les émissions dans l'atmosphère. Sur le cycle de vie total d'un moteur CFM56, la configuration permet une réduction de 1 % de la consommation de carburant et un accroissement de la longévité du moteur. Ce moteur représente actuellement la flotte de moteurs la plus grande du monde avec plus de 33 100 unités ayant été livrées et plus de 31 500 en service. Pour l'Airbus A320neo, le CFM56 détient une part de marché totale de 59 %. La génération actuelle du Boeing 737 NG, comme la version précédente, est propulsée uniquement par des moteurs CFM56.

b) Moteur LEAP (Leading Edge Aviation Propulsion)

Les objectifs de performance de propulsion et les exigences d'acceptabilité des futurs moteurs d'avion découlent des travaux menés par ACARE (Advisory Council for Aeronautics Research in Europe). Par rapport à l'année 2000, des objectifs sont fixés pour deux étapes : 2020 et 2050. Pour 2020, les systèmes de propulsion des avions doivent réduire la consommation de carburant de 20 %, les émissions des polluants de 60 %. La publication Flightpath 2050⁵³ spécifie des réductions de 75 % des émissions de gaz à effet de serre et 90 % des émissions d'oxyde d'azote.

La première étape est le turboréacteur LEAP (Leading Edge Aviation Propulsion), avec un taux de bypass très élevé. Le moteur LEAP, qui est commercialisé depuis 2016, apporte des améliorations majeures. Le moteur LEAP permet une réduction de 15 % de la consommation de carburant et des émissions de CO₂ par rapport à la dernière génération de moteurs

⁵¹ Safran. Safran and Thales team up to optimize the power conversion system for electric taxiing of aircraft, 2017.

⁵² Safran. Fuel cells: green energy on board, 2017.

⁵³ ACARE. Flightpath 2050 Europe's Vision for Aviation, 2011.

CFM56. Le nouveau moteur réduira également les émissions d'oxyde d'azote. Le moteur LEAP a été sélectionné, jusqu'en 2018, pour une utilisation sur trois avions :

- la version LEAP-1A est l'une des deux options de moteurs pour le nouvel Airbus A320neo ;
- la version LEAP-1B est le seul moteur pour le nouveau Boeing 737 MAX, qui réduit la consommation de carburant et les émissions de CO₂ de 14% par rapport aux avions monocouloirs actuellement en service et de 20% par rapport à la génération précédente de 737 NG.
- la version LEAP-1C est le seul moteur utilisé en occident pour le système de propulsion (moteur plus nacelle) basé en Chine : Avion C919 de COMAC.

A la fin de 2018, le nombre de commandes du moteur LEAP s'élevait à 15 620 unités. La deuxième étape est plus innovante, en cohérence avec Flightpath 2050, avec les objectifs concernant l'architecture des moteurs à travers l'exploration de développements tels que le concept d'Open Rotor et les architectures carénées avec des taux de bypass très élevés. Dans le cadre de ce programme, des essais au sol du démonstrateur Open Rotor de Safran ont été réalisés sur le site d'Istres dans le sud de la France sur lequel Safran dispose d'un banc d'essais de 80 000 m² permettant de tester le LEAP et ses évolutions, les démonstrateurs Open Rotor et UHBR (Ultra High Bypass Ratio)⁵⁴. Le démonstrateur Open Rotor, développé dans le cadre du programme européen Clean Sky, fait partie de la stratégie de la R&T Safran. Lancé en 2008 sous l'impulsion de Safran, l'Open Rotor dispose d'une architecture en rupture, non-carénée et à double hélice contrarotatives pour réduire la consommation de carburant et les émissions de CO₂ de 30% par rapport aux moteurs CFM56. Alors que le concept d'Open Rotor est vieux de plusieurs décennies, son développement a été ralenti principalement par des défis pour réduire ses niveaux de bruit, qui sont plus élevés que ceux des moteurs à double flux comparables. Les fabricants envisagent la mise en service du moteur à Open Rotor en 2030⁵⁵.

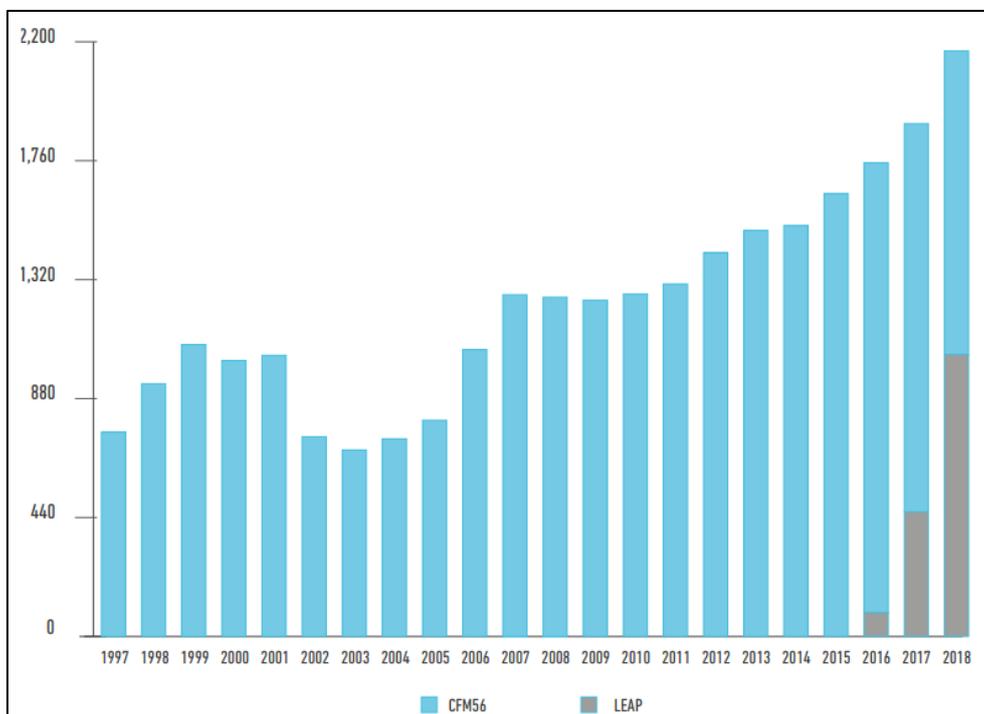


Figure 25 : Nombre de moteurs CFM56 et LEAP fabriqués (source : Safran, 2018)

⁵⁴ Safran. Registration document - Including the annual - Financial report, 2018.

⁵⁵ Safran. Safran celebrates successful start of Open Rotor demonstrator tests on new open-air test rig in southern France, 2017.

c) Moteur Geared Turbo Fan (GTF) de Pratt & Whitney

Le GTF de Pratt & Whitney Pure Power (modèle PW1100G pour l'A320, PW1500G pour l'A220, le PW1900G pour la nouvelle famille de E2 d'Embraer) permet au moteur de fonctionner à la vitesse la plus efficace. Pratt & Whitney a annoncé que les avions de ligne équipés du GTF pourraient réduire la consommation de carburant de 16 % et les émissions des NOx de 50 %. De plus, le GTF devrait permettre d'éviter l'émission de plus d'une tonne de CO₂ par heure de vol.⁵⁶

d) Moteurs électriques et avions « plus électriques »

L'électrification de la propulsion permet l'optimisation des performances des moteurs. Pour l'électrification de la propulsion, il faut se projeter dans plusieurs décennies afin d'envisager les ruptures technologiques nécessaires pour des avions commerciaux de grande taille 100 % électrique. Depuis les premiers jets, la consommation de carburant des avions par siège par kilomètre a baissé de 80 %. Les progrès des moteurs électriques ont ouvert la voie à de nouveaux modèles d'aéronefs. Les premières commandes de vols « plus électriques » d'Airbus A320 ont été lancées dans les années 1980 et Boeing avec le Boeing 787 a poursuivi cette tendance à l'électrification. Plus de 100 projets d'aéronefs à propulsion électrique ou hybride sont actuellement recensés dans le monde. Entre 50 000 et 100 000 de ces nouveaux aéronefs voleront d'ici 20 ans, selon Safran. Depuis 2017, Safran est engagé dans un accord de coopération technologique avec Alstom pour mettre en commun leurs compétences dans le domaine de la propulsion électrique. Le partage d'expérience avec Valeo a également permis à Safran d'enrichir la réflexion sur de moteurs électriques. Un système de propulsion distribuée hybride électrique (SPHE) complet a été conçu par Safran en 18 mois et puis testé avec succès en juin 2019 par Safran Helicopter Engines. Dans ce système, un turboréacteur (composé d'une turbine à gaz et d'une génératrice) est couplé à des batteries. Grâce à un système de gestion de puissance de nouvelle génération, la puissance est distribuée sur l'ensemble du système de manière optimale. Une électronique intelligente pilote les moteurs électriques.⁵⁷

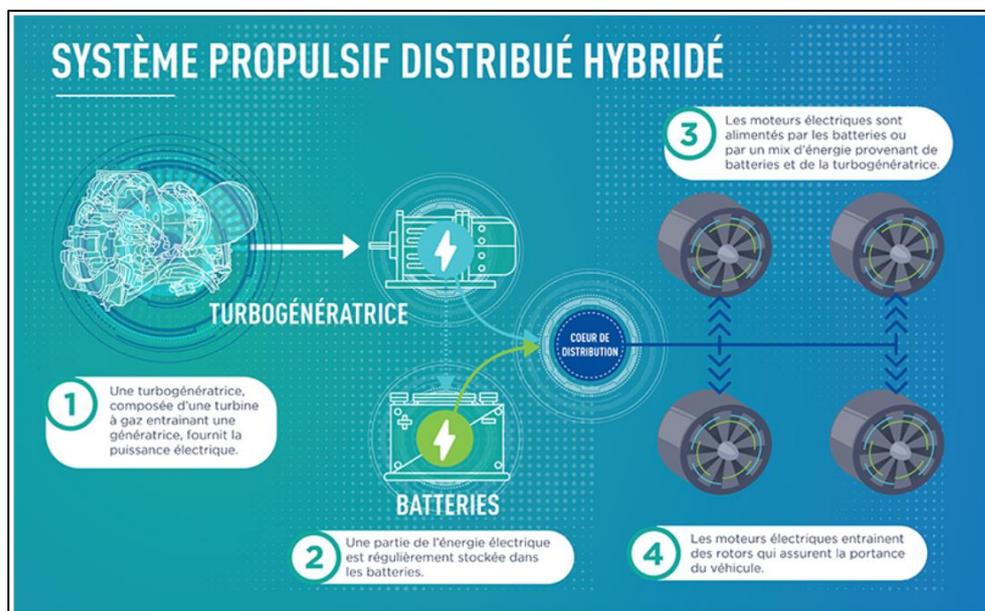


Figure 26 : Système de propulsion distribuée hybride électrique de Safran (source : Safran, 2018)

⁵⁶ <https://prattwhitney.com/products-and-services/products/commercial-engines/pratt-and-whitney-gtf>

⁵⁷ <https://www.safran-helicopter-engines.com/fr/media/first-ground-test-safrans-hybrid-electric-propulsion-system-20180719>

Le moteur Arrano, positionné pour une puissance de 1 100 à 1 300 shp (820 à 970 kW), a été conçu afin d'équiper les moteurs de 2 à 3 tonnes et les hélicoptères bimoteurs de 4 à 6 tonnes. Ce moteur offre une consommation en carburant réduite de 15 % par rapport aux autres moteurs actuels. Il intègre un compresseur centrifuge à deux étages développé dans le cadre du programme de recherche européen Clean Sky, dont l'aérodynamique a été optimisée pour améliorer sa performance et sa robustesse avec une chambre à combustion à flux inversé, une turbine de puissance et une turbine libre à une seule étape. Un système d'IGV (Inlet Guide Vanes) est également intégré en amont du compresseur et permet la réduction de la consommation du carburant en améliorant le cycle thermodynamique du moteur en régime de croisière. En 2014, le premier essai au banc de l'Arrano a été réalisé dans l'usine de Bordes. Le moteur Arrano a été équipé sur l'hélicoptère H160 d'Airbus Helicopters qui a réalisé son premier vol en janvier 2016. En juin 2019, Safran Helicopter Engines a reçu le certificat de l'EASA.

Dans le schéma de Safran, la génération de puissance est assurée en fonction de chaque phase de vol par une turbine couplée à un générateur électrique et par une source de type batterie électrique. Avec les technologies actuelles, le transport de fret long-courrier n'est pas possible avec une architecture 100 % électrique mais le même concept d'aéronef pourrait être déployé avec une architecture hybride pouvant permettre d'augmenter la puissance et l'autonomie.

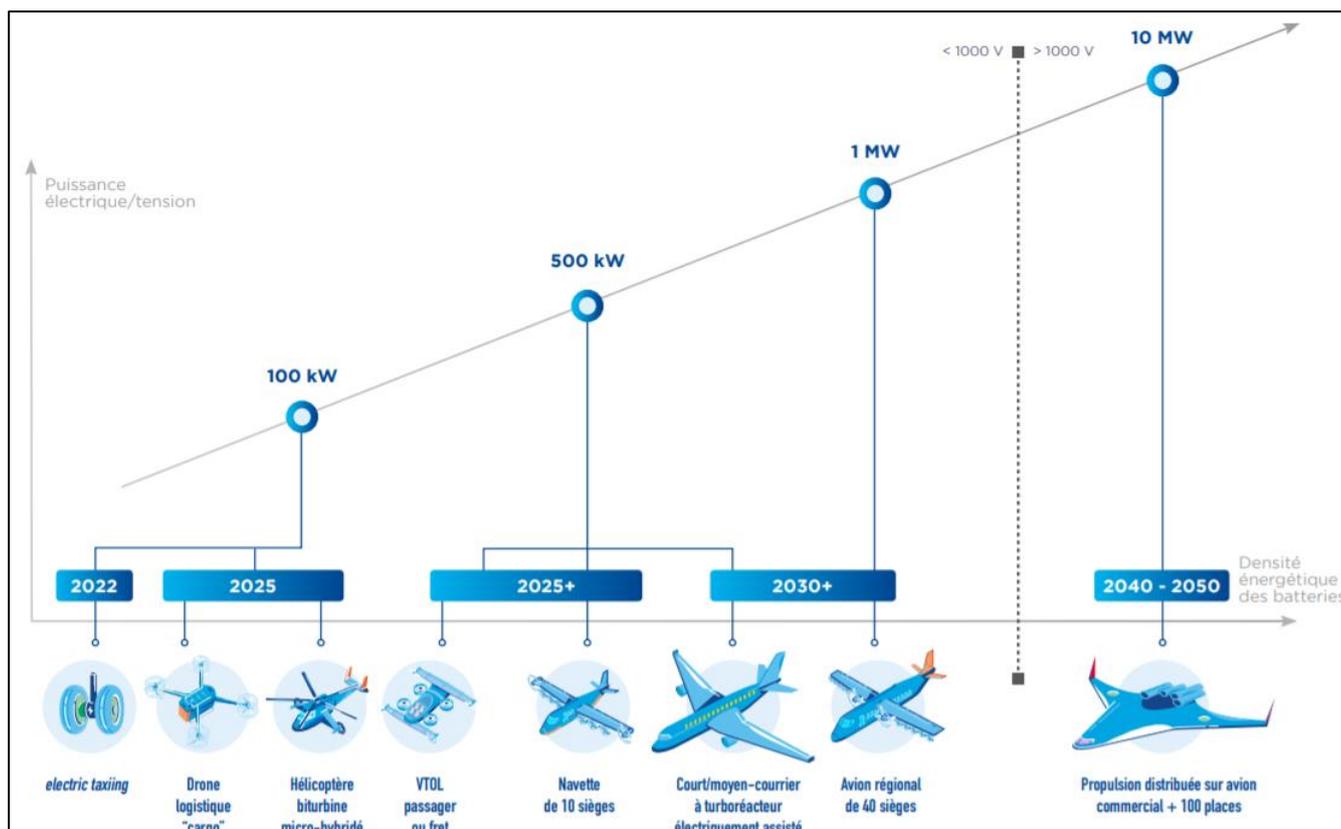


Figure 27 : Objectifs de propulsion 100% électrique (source : Safran, 2019)

L'électrification de la propulsion devient chaque jour un peu plus une réalité. Le tableau suivant présente les différents systèmes et technologies électriques présentes dans les aéronefs.⁵⁸

⁵⁸ Safran. Dossier de presse le Bourget 2019 l'avenir électrique de l'aéronautique, 2019.

Tableau 8 : Les aéronefs de plus en plus électriques (source : Safran, 2019)

	Airbus A320	Airbus A380	Boeing 787	Nouvelle génération
Dégivrage	Pneumatique	Pneumatique	Electrique	Electrique
Conditionnement de l'air	Electrique	Electrique		
Avionique				
Charges intérieures	Hydraulique	Hydraulique	Hydraulique	Partiellement électrique
Freinage				
Commandes de vol				
Trains, inverseurs de poussée				
Puissance embarquée	< 200 kW	600 kW	1 000 kW	> 1 000 kW

Deux des principaux freins des moteurs électriques sont leurs poids et leur faible puissance. Le 10 juin 2020, la première certification au monde d'un avion entièrement électrique, le PipistrelVelis, a été annoncée par l'EASA. Cette certification, achevée en moins de trois ans, a apporté d'importants apprentissages pour les futurs moteurs et aéronefs à propulsion électrique. Fin septembre 2020, Rolls-Royce a terminé les essais au sol sur une réplique « grandeur nature » du noyau de l'avion, appelé « ionBird ». Le projet ACCEL (Accelerating the Electrification of Flight) est le premier projet de Rolls-Royce vers le zéro carbone en 2050. Le Rolls-Royce ACCEL devrait atteindre un nouveau record du monde de vitesse pour la catégorie « vol électrique » de 480 km/h.



Figure 28 : Technologie alimentant l'avion testée sur « ionBird » (source : Rolls-Royce, 2020)

Un avionneur suédois, Heart Aerospace, a dévoilé un système de propulsion électrique le 23 septembre 2020 pour un avion de ligne régional quadrimoteur ES-19, qui devrait être exploité à l'été 2026. Cet avion pourrait voler sur une distance équivalente à 400 km avec une vitesse maximale de 398 km/h, selon Heart Aerospace. Un prototype du projet ES-19 débutera les essais en vol à la mi-2024. Cassio 1, démonstrateur technologique de VoltAéro destiné à être fabriqué en série en France dès fin 2022 – début 2023, combine trois moteurs électriques hautes performances de 60 kW et un moteur à combustion interne de 272 kW. Cassio 1 avait enregistré quatorze heures et 25 vols en altitude avec des moteurs électriques de 45kW (70 kW maximum) fournis par Safran.⁵⁹

⁵⁹ https://s.kmni.eu/t/pgeJRnZoD-cqz079CuUm5WwyAZKyMw-pdf-zC/Air_Cosmos_20201126110000

e) Aéronefs hybrides électriques

Les aéronefs hybrides électriques sont considérés comme un substitut très efficace aux aéronefs conventionnels court/moyen-courriers. Ces systèmes sont basés sur des moteurs à turbine à gaz pour la production d'énergie de propulsion et pour le chargement des batteries. Les batteries fournissent l'énergie nécessaire à la propulsion pendant plusieurs phases de vol. En outre, les batteries lourdes pourraient être remplacées par des piles à hydrogène. Ces avions sont conçus pour remplacer les avions conventionnels propulsés par des moteurs à combustion sur les routes régionales. Selon les études du Centre allemand pour l'aéronautique et l'astronautique (DLR), il serait possible de remplacer 60 à 70% de tous les avions régionaux conventionnels par des avions hybrides.⁶⁰

En 2017, Airbus, Rolls-Royce et Siemens ont formé un partenariat dans le but de développer et de construire un avion de démonstration hybride-électrique en série pour alimenter un moteur électrique de 2 MW. L'objectif à plus long terme est de construire un avion commercial équipé de la technologie E-Fan X qui pourrait accueillir de 50 à 100 passagers à bord et effectuer des vols régionaux et à courte distance, avec une mise en service prévue pour l'année 2035. En mai 2019, SAS et Airbus ont signé un protocole d'accord pour la recherche sur les besoins opérationnels pour la mise en service commercial d'avions hybrides et électriques. L'objectif de SAS est de réduire les émissions de 25% d'ici à 2030.⁶¹ Aux Etats-Unis, Boeing et une compagnie aérienne américaine ont investi dans une start-up « Zunum Aero », qui vise à développer le premier avion commercial hybride à propulsion électrique du monde. Cet avion devrait entrer en service en 2023. L'avion serait en mesure de réduire de 80 % ses émissions de CO₂ et devrait entrer en service au début des années 2030⁶².

f) Compresseur basse pression

Safran Aero Boosters a fini le premier prototype de booster à haute vitesse (compresseur basse pression) destiné aux nouvelles configurations de moteur de taux élevé de bypass visant à réduire la consommation de carburant et le bruit. Ces moteurs intègrent des compresseurs tournant à des vitesses de l'ordre de 10 000 tours/minute, plus élevées par rapport à celle de moteur récent actuel comme le LEAP (4 000 tours/minute). Ce booster est composé de plus de 5 000 pièces et a été développé dans le cadre du projet européen Enoval⁶³.

5. AVION 3D

Les gains sur l'économie de carburant de l'impression 3D sont encore très faibles aujourd'hui. La fabrication additive permet théoriquement de réduire le temps de production des avions et leur poids, donc joue sur leur consommation de carburant. Safran a certifié auprès de l'EASA et de la FAA une douzaine de pièces réalisées à partir de l'impression. Dans un moteur Arrius dédié aux hélicoptères, la masse du module a réduite de 25% grâce à l'impression 3D.

Airbus et Boeing ont investi dans cette voie technologique pour fabriquer différentes pièces de leurs avions. Les derniers moteurs LEAP de CFM dont les injecteurs sont imprimés en 3D, montrent une amélioration du rendement énergétique de 15 %. Airbus a annoncé, en 2015, avoir imprimé le plus grand composant de cabine d'avion, une cloison pour l'Airbus A320,

⁶⁰ Clean Energy Wire. Emission-free aviation is technically feasible - DLR Researcher, 2018.

⁶¹ Airbus. Airbus, Rolls-Royce, and Siemens team up for electric future Partnership launches E-Fan X hybrid-electric flight demonstrator, 2017.

⁶² Zunum Aero - new home page, 2018.

⁶³ <https://www.safran-aero-boosters.com/fr/media/la-compression-haute-vitesse-pour-les-moteurs-davion-du-futur-20171204>

en 3D. La cloison était 45% plus légère que les modèles actuels soient 30 kg. Plus de 70 000 pièces ont été imprimées par l'Airbus pour ses avions⁶⁴.

Le Boeing 777 est propulsé par des moteurs GE9X composés de plus de 300 pièces imprimées en 3D à partir de fibres de carbone recyclées. En janvier 2020, le premier vol a été réalisé de Paine Field (États-Unis) à Everett (Népal), après deux tentatives échouées en raison de vents violents. Grâce à la fabrication additive, le nombre de pales a été réduit de 22 à 16. Les autres composants imprimés en 3D sont des capteurs de température, des mélangeurs de carburant, des échangeurs de chaleur, des séparateurs et des pales de turbine basse pression. Selon Boeing, la consommation de carburant de B777X serait 10% inférieure à ses concurrents⁶⁵.

6. AVION A HYDROGENE

En septembre 2020, Airbus a présenté sa feuille de route pour un avion à hydrogène « zéro émission » en 2035⁶⁶. Il a dévoilé trois concepts pour le premier avion commercial zéro émission au monde qui pourrait entrer en service d'ici 2035. Ces concepts représentent chacun une approche différente pour atteindre un vol zéro émission, explorant diverses voies technologiques et configurations aérodynamiques. Tous ces concepts reposent sur l'hydrogène comme principale source d'énergie - une option qui, selon Airbus, est extrêmement prometteuse en tant que carburant d'aviation propre et est susceptible d'être une solution pour l'aérospatiale et de nombreuses autres industries pour atteindre leurs objectifs climatiquement neutres.

En octobre 2020, le gouvernement a lancé deux appels à projet pour développer la filière hydrogène. Ils sont portés par l'ADEME et s'inscrivent dans le cadre du plan de relance de la France mais également dans le cadre de la stratégie nationale d'accélération de l'hydrogène décarboné⁶⁷ annoncée le 8 septembre 2020. Cette stratégie entend amorcer un changement d'échelle dans les développements de la filière, en accompagnant le déploiement d'usages de l'hydrogène dans les territoires, et l'innovation au sein des acteurs équipementiers et industriels. Les deux appels à projets constituent la première étape de cette stratégie :

- L'appel à projets « Briques technologiques et démonstrateurs » financé par le Programme d'investissements d'avenir (PIA) de l'Etat et opéré par l'ADEME, s'adresse principalement aux entreprises. Il vise à développer ou améliorer les composants et systèmes liés à la production et au transport d'hydrogène et à ses usages tels que les applications de transport ou de fourniture d'énergie, ou encore à concevoir et développer de nouveaux véhicules notamment pour le transport routier de marchandises et le ferroviaire. Il pourra également soutenir des pilotes et démonstrateurs d'envergure (supérieur à 20MW) sur le territoire national, permettant à la filière industrielle de l'hydrogène de développer de nouvelles solutions et de se structurer.
- L'appel à projets « Ecosystèmes territoriaux hydrogène » de l'ADEME soutient des investissements de production et de distribution d'hydrogène renouvelable ou décarboné, pour des usages industriels et en mobilité, en particulier dans le domaine des utilitaires et des transports lourds (collectifs ou de marchandise). Il vise à faire émerger des consortiums réunissant sur un même territoire collectivités et industriels porter des écosystèmes de grande envergure favorisant des économies d'échelle.

⁶⁴ Assemblée nationale. L'impression 3D, 2018.

⁶⁵ Boeing. Avions du futur : comment se dessine l'avenir pour Boeing Aviation Commerciale et le transport aérien ?, 2015.

⁶⁶ <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2020/09/airbus-reveals-new-zeroemission-concept-aircraft.html>

⁶⁷ <https://www.economie.gouv.fr/presentation-strategie-nationale-developpement-hydrogene-decarbone-france#>

En février 2021, le Gouvernement a demandé à Aéroports de Paris l'abandon de l'actuel projet de Terminal 4 ainsi que la présentation d'un nouveau projet d'évolution de la plateforme de Paris-Charles de Gaulle. Aéroports de Paris a indiqué s'engager pour que les aménagements contribuant à la transition énergétique de l'aéroport, et du secteur aérien dans son ensemble soient repensés au regard de l'accélération des engagements sur l'avion vert, confirmés dans le plan de soutien à l'aéronautique du Gouvernement pour une industrie verte et compétitive du 9 juin 2020.

Ce dossier sera complété pour éclairer les enjeux.

Rapport : Contexte de la lutte pour le climat dans le secteur aéroportuaire.
Rédigé par Nathalie Guitard, Responsable du pôle air et milieux de l'Autorité de contrôle des nuisances aéroportuaires (ACNUSA).
Présenté au collège de l'Autorité le 2 novembre 2020.

ACA: Airport Carbon Accreditation
ACARE: Advisory Council for Aeronautics Research in Europe
A-CDM: Airport collaborative decision-making
ACI: Airports Council International
ADEME: Agence de la transition écologique
APU: moteur auxiliaire de puissance
ATM: Air Traffic Management
CAEP: Comité de la Protection de l'Environnement en aviation (au sein de l'OACI)
CCC: Convention Citoyenne pour le climat
CCNUCC: Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CCO: Continuous climb operations / procédure de montée continue
CDO: Continuous descent operations/ procédure de descente continue
CORSIA: Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation
CUE: Ciel unique européen
EASA: European Union Aviation Safety Agency
EFTA: European Free Trade Association / Association européenne de libre-échange
EnR: Energies renouvelables
ETS: Emissions Trading System
GES: Gaz à effet de serre
GIEC: Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GLD: gestion locale des départ
HCC: Haut Conseil pour le climat
HEFA: Hydroprocessed Esters and Fatty Acids - filière biocarburant
IATA: International Air Transport Association / Association internationale du transport aérien
LTO: Landing - Take Off / Atterrissage - Décollage
OACI: Organisation de l'aviation civile internationale
PAX: passagers
SAF: Sustainable Aviation Fuels / carburant biosourcé
SESAR: Single European Sky Air traffic management Research
SNBC: Stratégie Nationale Bas Carbone

QUELQUES DOCUMENTS RESSOURCES

ADEME, 2018 : https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/programme-actions-aerodromes_2018.pdf

Airport Carbon Accreditation : <https://www.airportcarbonaccreditation.org/>

CITEPA 2020: https://www.acnusa.fr/uploads/media/default/0001/02/1581_2012-10-synthese-cadre-politique-reglementaire-lutte-contre-le-changement-climatique-secteur-aerien.pdf.

EASA 2020 :
https://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/usr_uploaded/219473_EASA_EAER_2019_WEB_LOW-RES_190311.pdf

OACI, 2019 : ICAO global environmental trends – present and future aircraft noise and emissions, 40^e Assemblée, juillet 2019 :
https://www.icao.int/Meetings/a40/Documents/WP/wp_054_en.pdf

OFAC, 2019 : <https://www.bazl.admin.ch/bazl/fr/home/politique/environnement/aviation-et-rechauffement-climatique/massnahmen-zur-schadstoffreduktion/operationelle-massnahmen.html>

UBA, 2020 -Integration of Non CO₂ effects of aviation in the EU ETA and under CORSIA – final report : <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/integration-of-non-co2-effects-of-aviation-in-the>

ANNEXE 1 : LES EFFETS SUR LE CLIMAT DES SUBSTANCES AUTRES QUE LE CO₂

Les émissions de SO₂ et NO_x ainsi que la suie entraînent :

- un forçage radiatif direct par réflexion de rayonnement solaire ou absorption de rayonnement thermique ;
- des modifications de la concentration d'ozone ;
- conduisent – conjointement aux émissions de vapeur d'eau et à la vapeur d'eau de l'air ambiant – à la formation de traînées de condensation et à des nuages de haute altitude et ont ainsi une influence supplémentaire indirecte sur le climat.

Les NO_x influencent les concentrations d'ozone et de méthane. Ils ont ainsi des effets refroidissant aussi bien que réchauffant et dépendent du lieu d'émission et des concentrations de fond de NO_x. Les effets refroidissant et réchauffant sont du même ordre de grandeur mais se produisent à des moments différents, ils ne font donc pas simplement que s'annuler réciproquement.

Les particules d'aérosols soufrés et la suie ont – à part leur influence sur la formation de traînées de condensation – un effet radiatif direct : la suie entraîne un réchauffement, le soufre un refroidissement. Les ordres de grandeur des impacts climatiques correspondants sont connus.

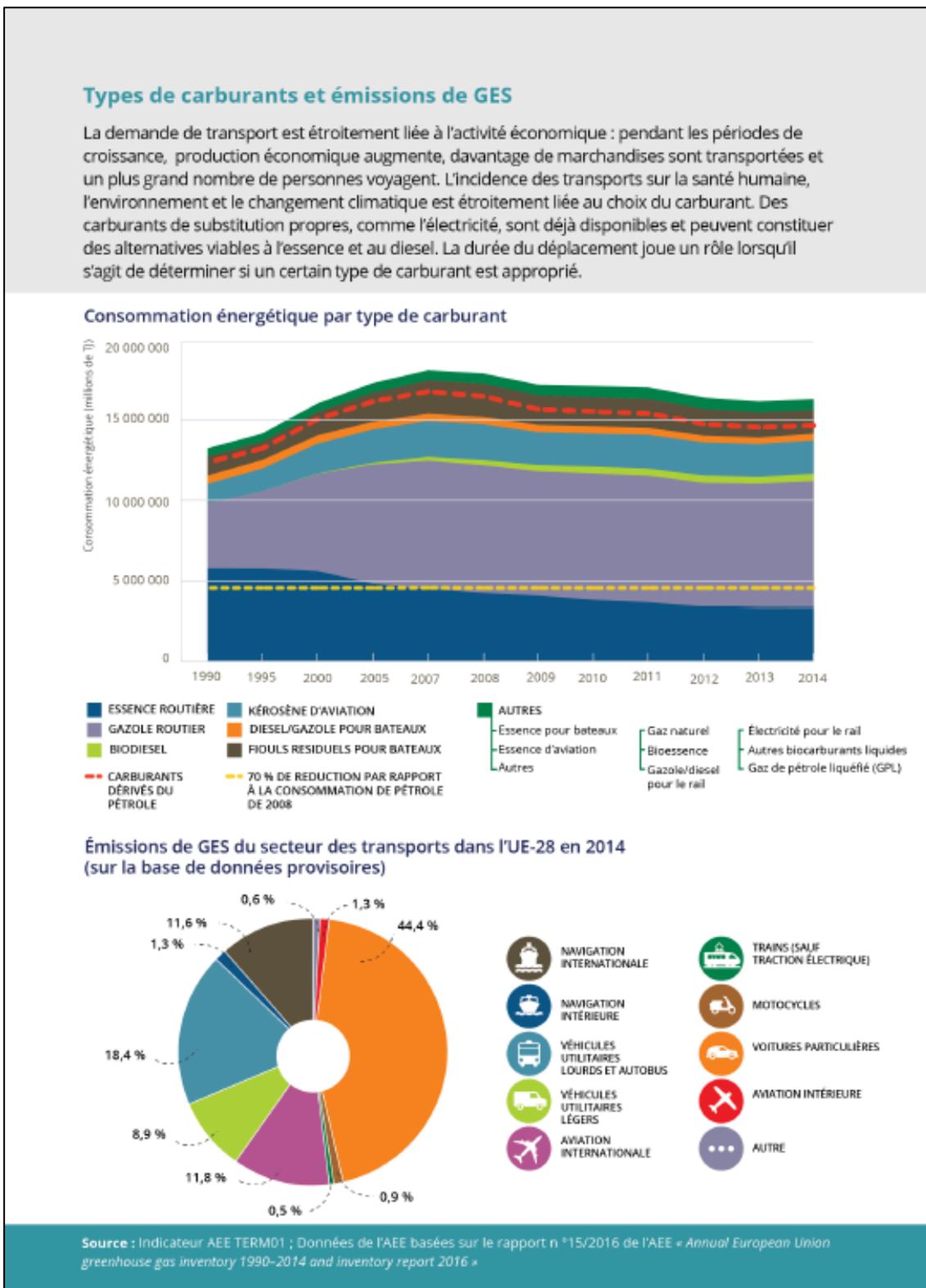
Les effets possibles du SO₂ et de la suie sur la couverture nuageuse en général (en plus des effets de traînées de condensation) ont été peu étudiés. Les données que l'on trouve dans la littérature spécialisée peuvent diverger fortement.

Les effets autres que le CO₂ sont fortement dépendants de l'altitude de vol, de la position géographique, du moment du jour et de la situation météorologique. Il est donc très difficile de calculer leur impact climatique. Il existe différentes approches de modélisation, qui ne tiennent toutefois pas compte de tous les couplages et rétroactions du système climatique.

[Pour en savoir plus : Emissions des transports aériens et leur impact sur le climat, Urs Neu, ProClim, 2020](https://www.bazl.admin.ch/bazl/fr/home/politique/environnement/aviation-et-rechauffement-climatique.html)
<https://www.bazl.admin.ch/bazl/fr/home/politique/environnement/aviation-et-rechauffement-climatique.html>

ANNEXE 2 : TYPE DE CARBURANT ET EMISSIONS DE GES

Pour aller plus loin : <https://www.eea.europa.eu/fr/pressroom/infographies/types-de-carburants-et-emissions>



ANNEXE 3 : EXEMPLE DES REDUCTION D'EMISSIONS DIRECTES POUR UN PANEL DE FILIERES DE BIOCARBURANT POUR L'AVIATION (GAINS EN TERMES D'EMISSIONS DE GES SUIVANT LA TECHNOLOGIE DE FABRICATION DE BIOCARBURANT⁶⁸)

Conversion technology	Fuel feedstock	% direct emissions savings compared to fossil-based aviation fuel baseline of 89 gCO ₂ eq/MJ
Fischer-Tropsch (FT)	Agricultural residues	89-94%*
	Forestry residues	88%
	Municipal Solid Waste (MSW)	68%
	Short-rotation woody crops	81%
	Herbaceous energy crops	87%
Hydroprocessed esters and fatty acids (HEFA)	Tallow	78%
	Used cooking oil	85%
	Palm fatty acid distillate	76%
	Soybean	53%
	Rapeseed/Canola	48%
	Camelina	54%
	Palm oil - closed pond	61%
	Palm oil - open pond	29%
Synthesized iso-paraffins (SIP)	Sugarcane	62%
	Sugarbeet	68%
Alcohol (iso-butanol) to jet (ATJ)	Agricultural residues	71%
	Forestry residues	74%
	Sugarcane	69%
	Corn grain	54%
	Herbaceous energy crops (switchgrass)	66%
	Molasses	69%
Alcohol (ethanol) to jet (ATJ)	Sugarcane	69%
	Corn grain	26%

*More than one feedstock considered

⁶⁸ https://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/usr_uploaded/219473_EASA_EAER_2019_WEB_LOW-RES_190311.pdf