

État de l'art de la recherche scientifique sur l'impact climatique des traînées de condensation des avions

Rapport final

Avril
2021



EXPERTISES

CITATION DE CE RAPPORT

VIEIRA DA ROCHA Tamara, ANDRE Jean-Marc. 2021. État de l'art de la recherche scientifique sur l'impact climatique des traînées de condensation des avions. 33 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr/mediatheque

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 2020003501

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : Citepa
Coordination technique - ADEME : FLEURIOT Fanny
Direction/Service : Direction Adaptation, Aménagement et Trajectoires Bas Carbone

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	5
ABSTRACT	6
1. CONTEXTE	7
2. IMPACT CLIMATIQUE DE L'AVIATION	10
2.1. Dioxyde de carbone : CO ₂	11
2.2. Vapeur d'eau : H ₂ O	11
2.3. Oxyde d'azote : NO _x	11
2.4. Particules (aérosols) de sulfate et de suie	12
2.5. Traînées de condensation	12
3. ESTIMATION DE L'IMPACT CLIMATIQUE DES TRAINÉES DE CONDENSATION	15
3.1. Forçage Radiatif (RF)	15
3.1.1. Estimations.....	16
3.1.2. Limites.....	20
3.2. Potentiel de réchauffement global (PRG) et <i>Global Temperature change Potential</i> (GTP).....	21
3.2.1. Estimations.....	22
3.2.2. Limites.....	23
3.3. Choix de la métrique adaptée	23
4. CONCLUSIONS, PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS	25
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	27
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES	35
SIGLES ET ACRONYMES	35

RÉSUMÉ

Aujourd'hui, la question des effets liés aux émissions de CO₂ du secteur aérien est bien connue et traitée. Avant méconnus, les effets des émissions hors CO₂ sont de plus en plus étudiés au niveau scientifique, notamment les effets de traînées de condensation et leur quantification qui sont l'objet de ce document.

À partir de la revue bibliographique ici réalisée, l'évolution des connaissances tend à démontrer, avec l'amélioration des méthodologies de calculs, un plus grand impact des effets des traînées de condensation sur le climat : au moins 50 % des impacts climatiques de l'aviation seraient imputables aux traînées de condensation. Il est ainsi recommandé de prendre en compte cet effet « non-CO₂ » et les échelles de temps associées lors de l'évaluation de l'impact climatique total de l'aviation. Une évaluation qui serait basée exclusivement sur les émissions de CO₂ pourrait conduire à mettre en place des mesures inefficaces sur le plan climatique dans les cas où des compromis sont nécessaires, et à négliger – au contraire – des opportunités de réduction des impacts climatiques de l'aviation dans les cas où des synergies sont possibles.

Tandis que les émissions de CO₂ sont directement proportionnelles à la consommation de carburant, la formation et les caractéristiques des traînées de condensation (durée de vie, épaisseur optique, évolution en cirrus induit, ...) dépendent de nombreux paramètres physiques (conditions atmosphériques à l'altitude de vol, émissions issues de la combustion du carburant, ...), ce qui rend l'évaluation de leur impact climatique particulièrement complexe.

L'évolution des méthodologies d'évaluation de ces effets doit continuer à être suivie à l'avenir. Il est attendu un plus grand consensus entre les études dans ce domaine et une consolidation de leurs résultats souvent appliqués à des cas spécifiques et non-forcément transposables à d'autres, pour permettre une quantification plus précise et généralisable de ces impacts.

ABSTRACT

Today the issue of the effects of CO₂ aviation emissions is well known and addressed. Previously unknown, the effects of non-CO₂ emissions are increasingly studied at scientific level, in particular the effects of contrails and their quantification which are the subject of this document.

From the literature review carried out here, the evolution of knowledge tends to demonstrate a greater importance of the effects of contrails on the climate as the methodologies are improved : at least 50% of the climate impacts of aviation may be due to contrails. It is therefore recommended to take this "non-CO₂" effect and the associated time scales into account when evaluating the overall climate impact of aviation. An assessment based exclusively on CO₂ emissions could lead to climate inefficiencies in cases where trade-offs are necessary, and to neglecting - on the contrary - opportunities to reduce the climate impacts of aviation in cases where synergies are possible.

While CO₂ emissions are directly proportional to fuel consumption, the formation and characteristics of contrails (lifetime, optical thickness, evolution into induced cirrus clouds, etc.) depend on many physical parameters (atmospheric conditions at flight altitude, emissions from fuel combustion, etc.), which makes the assessment of their climate impact particularly complex.

The evolution of methodologies for assessing these effects must therefore continue to be followed in the future because there is a need for greater consensus between the studies and a consolidation of their results often applied to specific cases and not necessarily transposable to others. This will allow a more precise and generalizable quantification of these impacts.

1. Contexte

En 2018, les émissions totales de GES¹ en France s'élèvent à 445 Mt de CO₂e². Les transports constituent la principale source de GES avec 31 % des émissions totales. Le transport routier contribue à lui seul pour 29 % des émissions totales de GES, suivent des contributions de 1,2 % de l'aérien domestique³, 0,25 % du maritime domestique (y compris la pêche), 0,25 % d'autres navigations⁴, 0,10 % du ferroviaire et 0,02 % du fluvial national. Ces émissions en valeurs absolues sont présentées à la [Figure 1](#), en y incluant les émissions internationales⁵ qui ne sont pas incluses dans le total national. (CITEPA, 2020 [58]).

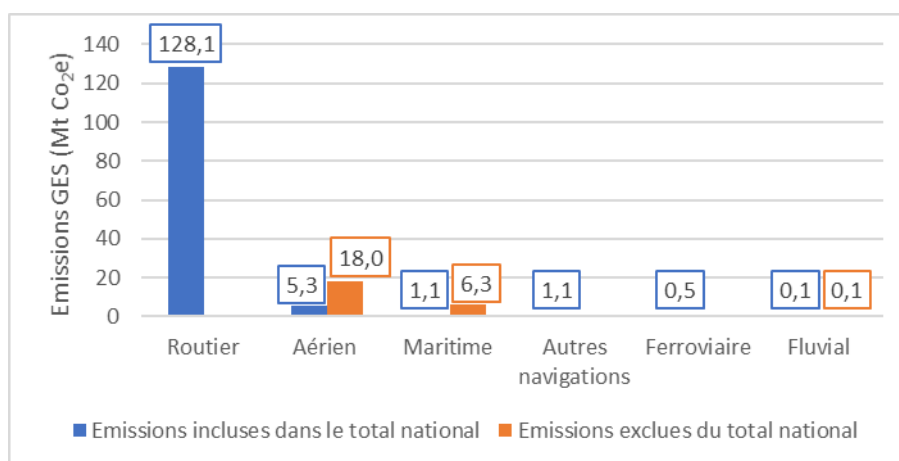


Figure 1. Emissions totales de GES en France du secteur « Transport » pour l'année 2018.
Source : CITEPA (2020) [58]

Les émissions des GES du transport sont une conséquence de la demande, elle-même liée majoritairement à la démographie, aux politiques publiques (e.g. report modal et prime à la conversion des véhicules) et à l'évolution du prix des carburants. Ceci a un effet combiné et associé avec le renouvellement du parc (plus ou moins important selon le mode de transport) et l'introduction des agro-carburants (CITEPA, 2020 [58]).

Ces émissions en CO₂e (équivalent CO₂) ont été estimées par le Citepa par l'agrégation de toutes les émissions de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O, PFC, HFC, SF₆, NF₃) présentées en tonnes de CO₂ équivalent, en prenant en compte leur pouvoir de réchauffement global (PRG) propre à 100 ans. Il s'agit uniquement des émissions directes : pour les transports, cela concerne les émissions GES issues de la combustion des carburants.

Afin d'estimer l'impact climatique global d'une activité anthropique, d'autres métriques que le PRG sont employées dans la littérature. À mesure que ces méthodologies sont développées et améliorées, d'autres effets sont pris en compte, comme notamment les effets climatiques hors émissions de CO₂. C'est le cas des études qui analysent l'impact climatique des traînées de condensation pour le secteur aérien.

Par définition, les traînées de condensation sont des panaches blancs observables généralement par beau temps dans le ciel après le passage d'un avion. Elles se forment à haute altitude (de 8 à 13 km) à la sortie

¹ Les émissions totales de GES incluent les substances suivantes : CO₂, CH₄, N₂O, PFC, HFC, SF₆, NF₃.

² Les émissions totales de GES n'incluent pas les émissions maritimes, fluviales et aériennes internationales, ainsi que les émissions des sources biotiques de l'agriculture et des forêts et les émissions des sources non-anthropiques.

³ Le trafic domestique concerne les liaisons entre deux points du territoire national.

⁴ Le secteur du transport catégorisé dans « autres navigations » concerne les activités des bateaux à passagers fluviaux, des bateaux à usage professionnel fluviaux et maritimes (hors pêche) et des bateaux de plaisance (activités de loisirs) fluviaux et maritimes.

⁵ Le trafic international concerne les liaisons entre deux points, l'un en France l'autre à l'étranger.

des réacteurs si l'air environnant est suffisamment froid et humide. Les traînées de condensation sont constituées de cristaux de glace, formés par la condensation de la vapeur d'eau émise par les moteurs, autour de noyaux de condensation présents dans les suies et les gaz de combustion dans l'atmosphère.

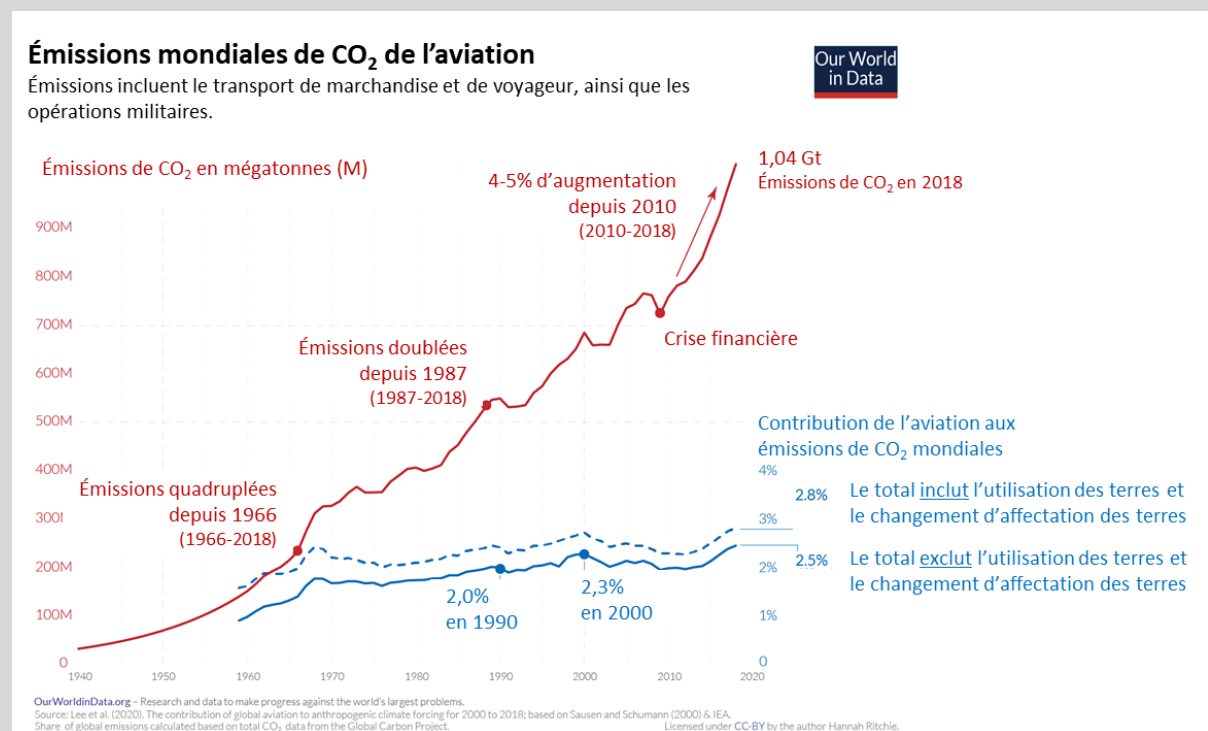
La durée de vie des traînées de condensation est variable selon les conditions météorologiques. Elles peuvent s'estomper quelques secondes seulement après leur formation, par sublimation de la glace, mais également persister jusqu'à quelques heures, s'étendant alors pour former des nuages induits du type cirrus.

Les études récentes démontrent que l'effet des traînées de condensation contribue davantage au réchauffement climatique que tout le CO₂ émis par les avions. Ces effets devraient s'aggraver à mesure que le trafic aérien et la couverture nuageuse qui en résulte augmentent.

Estimer l'impact climatique des traînées de condensation est donc essentiel pour valider l'efficacité des différentes solutions d'atténuation, comme l'utilisation de carburants alternatifs, une nouvelle technologie de moteur ou des stratégies de déroutement de vol.

L'aviation et les émissions mondiales de CO₂ (LEE et al., 2020 [7]) :

L'aviation mondiale (transport domestique et international du transport de marchandises, de voyageurs et des opérations militaires) contribue à 2,5 % des émissions totales de CO₂ en 2018. La série chronologique des émissions mondiales de l'aviation depuis 1960 est présentée dans la figure ci-dessous.



Source : RITCHIE (2020) [57]

Entre 1987 et 2018, les émissions de l'aviation ont doublé au rythme similaire à celui des émissions totales de CO₂ tout secteur confondu. Autrement dit, pendant cette période la contribution de l'aviation aux émissions mondiales de CO₂ a été relativement stable : de l'ordre de 2 % à 2,5 % (en incluant au total l'utilisation des terres et le changement d'affectation des terres).

1.1. Objectif de l'étude

Dans le cadre de l'animation et de la gestion de sa Base Carbone® (base de données de référence des facteurs d'émissions), l'ADEME a mis en place en 2019 un groupe de travail « Transport ». Ce groupe intègre l'ensemble des parties prenantes pertinentes du secteur pour réaliser la mise à jour et l'amélioration des données associées dans la Base Carbone®.

Le sous-groupe aérien a identifié un besoin d'approfondissement des connaissances concernant la prise en compte de l'effet des traînées de condensation dans l'évaluation de l'impact de l'aviation sur le climat. En effet, si les émissions de GES liées à la combustion sont aujourd'hui évaluées assez finement, les impacts potentiels sur le climat des traînées de condensation et cirrus induits le sont moins.

Il n'existe pas à ce jour de consensus scientifique sur une valeur moyenne de l'impact de ces effets. À titre conservatoire, l'ADEME propose dans sa Base Carbone® des facteurs d'émissions avec ou sans impact des traînées de condensation. Pour les facteurs d'émissions dit « avec traînées », un facteur multiplicateur des émissions de combustion égal à 2 est utilisé. Dit autrement, pour 1 kg équivalent CO₂ dû à la combustion, 1 kg équivalent CO₂ dû à l'impact complémentaire des traînées et cirrus est ajouté.

En vue d'une possible actualisation des données de la Base Carbone®, l'objectif de ce document est la réalisation d'un état de l'art de la recherche scientifique sur **l'impact climatique des traînées de condensation des avions**. Ceci donne suite à une première revue scientifique menée pour le compte de l'ADEME en 2015 [1].

2. Impact climatique de l'aviation

La balance énergétique de la terre peut se résumer par la figure suivante. La terre reçoit le rayonnement solaire, principalement sous forme de rayonnement visible (Figure 2). Le flux solaire incident est de l'ordre de $342 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Le sol absorbe environ 48 % de cette énergie incidente dont l'autre portion a été absorbée par l'atmosphère (23 %) ou réfléchi par les nuages et par les surfaces claires du sol, tels que les déserts et les glaciers (30 %).

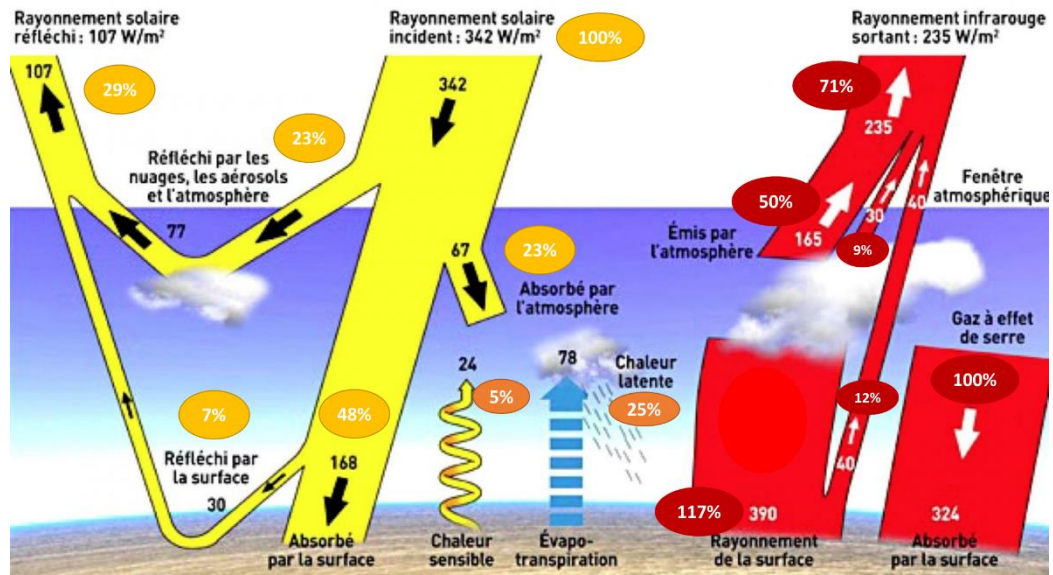


Figure 2. Schéma du bilan énergétique planétaire.
En jaune et à gauche : l'apport solaire. En rouge et à droite : l'apport des surfaces.
Source : Forest of Broceliande [67]

La surface terrestre réémet cette énergie reçue sous forme de rayonnements infrarouges, de l'ordre de $390 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. L'effet de serre est principalement lié à l'absorption des rayonnements infrarouges de grande longueur d'onde, émis par la surface terrestre, par les nuages et des composés présents dans l'atmosphère de façon naturelle, tels que : la vapeur d'eau (H_2O), le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), l'ozone (O_3), le protoxyde d'azote (N_2O) et les gaz fluorés. Ce sont ces composés qui engendrent un effet de serre et l'accroissement des concentrations des composés à longue durée de vie tels que le CO_2 conduit à un renforcement de l'effet de serre (CITEPA, 2020 [58]).

Malgré tout, l'accroissement de l'effet de serre ne se résume pas aux seuls GES à longue durée de vie. Des composés à courte durée de vie contribuent au réchauffement, de façon directe (ozone [O_3], particules solides issues de processus de combustion : suie ou « black carbon » [BC], CH_4) ou indirecte (cas du monoxyde de carbone [CO] et des composés organiques volatils [COV] qui se transforment en CO_2). À l'inverse, certains polluants tels que le dioxyde de soufre (SO_2) peuvent aussi avoir des effets refroidissant (CITEPA, 2020 [58]).

Dans le cadre de l'évaluations de son impact climatique, les effets liés au secteur de l'aviation se divisent en deux grandes catégories :

- Les effets des émissions de dioxyde de carbone (CO_2) ;
- Les effets hors émissions CO_2 , dont les principaux sont :
 - La vapeur d'eau (H_2O) ;
 - Les oxydes d'azote (NO_x) ;
 - Les particules (aérosols) de sulfate et de suie ;
 - Les traînées de condensation.

2.1. Dioxyde de carbone : CO₂

Le CO₂ est un gaz incolore et inodore. C'est un GES présent à l'état naturel mais sa concentration dans l'atmosphère croît fortement avec les activités humaines.

Au début de la révolution industrielle en 1750, la concentration de CO₂ n'était que de 280 ppm. Deux siècles et demi plus tard, cette valeur dépasse à présent les 400 ppm, même dans les régions les plus reculées du globe.

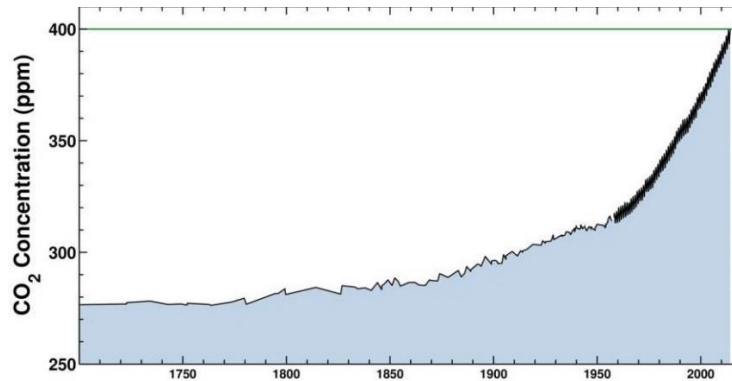


Figure 3. Taux de CO₂ dans l'atmosphère depuis la révolution industrielle. Les mesures à Mauna Loa, à Hawaï, ont commencé en 1958.

Source : © Scripps Oceanography cité par DEMEERSMAN (2017) [60]

Le transport aérien est un émetteur important de CO₂. Il est le produit de la combustion complète du carburant (kérosène), et en proportion directe avec la quantité de kérosène consommé : 3,16 kg de CO₂ sont produits par kilogramme de kérosène brûlé (GIEC, 1999 [52]). Le carbone contenu dans le carburant se combine avec l'oxygène de l'air pour produire du CO₂.

La réponse du climat aux émissions de CO₂ est indépendante de l'endroit où les émissions se produisent ; le CO₂ produit par les avions en vol a le même effet que le CO₂ provenant d'autres sources au niveau du sol.

2.2. Vapeur d'eau : H₂O

La vapeur d'eau est un gaz à effet de serre, l'augmentation de sa concentration tend à réchauffer la surface de la Terre.

La combustion du kérosène émet de la vapeur d'eau : l'hydrogène présent dans le carburant se combine avec l'oxygène de l'air pour produire H₂O. Lorsque l'émission a lieu dans la troposphère, la vapeur d'eau est intégrée au cycle naturel de l'eau et rapidement éliminée sous forme de précipitations. Ce n'est pas le cas dans la stratosphère, zone plus sèche où la durée de résidence de la vapeur d'eau est plus importante et peut contribuer à la formation des traînées de condensation. Les émissions de vapeur d'eau dans cette zone contribuent à l'effet de serre.

2.3. Oxyde d'azote : NO_x

Les oxydes d'azote (NO_x) sont un ensemble de polluants atmosphériques comprenant le NO₂ (dioxyde d'azote) et le NO (monoxyde d'azote).

Les NO_x sont principalement produits dans les moteurs d'avions dans des conditions de hautes température et pression. S'il ne s'agit pas de gaz à effet de serre, ces émissions déplacent les équilibres de la chimie atmosphérique, et réagissent en particulier avec l'oxygène et l'azote déjà présents dans l'atmosphère. De ce fait, les oxydes d'azote interviennent négativement sur le climat de manière indirecte en créant de l'ozone (O₃). Il est à noter que les émissions de NO_x liées au transport aérien produisent davantage d'ozone dans la haute troposphère qu'une quantité équivalente de NO_x émise au niveau du sol. Les NO_x interviennent également plus tard de façon positive en détruisant du CH₄ présent dans

l'atmosphère et émis au niveau du sol⁶. Les NO_x ont ainsi des effets contraires sur le réchauffement climatique, créant et détruisant des gaz à effet de serre.

Actuellement, les connaissances scientifiques ne permettent pas d'évaluer précisément l'impact global des NO_x émis par l'aviation, du fait de la complexité des phénomènes en jeu. L'effet des NO_x émis par l'aviation sur le climat pourrait changer, dans un sens positif ou négatif, indépendamment du devenir du secteur et en fonction des évolutions des émissions de NO_x autres secteurs. Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) s'accorde cependant sur un effet de réchauffement par les NO_x spécifiques au trafic aérien.

2.4. Particules (aérosols) de sulfate et de suie

Par définition, les particules en suspension dans l'air, encore appelées aérosols, sont constituées de substances solides ou liquides, présentant une vitesse de chute négligeable. Elles constituent un ensemble extrêmement hétérogène de polluants dont la taille varie de quelques dixièmes de nanomètres à une centaine de micromètres. Dans le cas de l'aviation, ces particules sont le produit de la combustion du carburant.

Ces polluants peuvent influencer le climat en absorbant ou en diffusant le rayonnement solaire. Les particules interviennent également dans le cycle de l'eau, en particulier lors de la formation des nuages, des brouillards et des précipitations. (ACTU ENVIRONNEMENT [66]).

On observe ainsi trois cas de figure distincts :

- D'une part, les suies jouent un rôle dans l'augmentation de la nébulosité et changent les propriétés radiatives des nuages. Par conséquent, l'augmentation de la concentration de particules de suie tend à réchauffer le climat.
- D'autre part, les sulfates reflètent la lumière du soleil. Par conséquent, l'augmentation de la concentration de particules de sulfate tend à refroidir la surface de la Terre.
- En parallèle de ces phénomènes, la vapeur d'eau rejetée dans l'air saturé peut interagir avec les sulfates en se condensant (nucléation de la glace), formant ainsi des traînées de condensation et des cirrus. Les émissions de particules ont donc des effets contraires sur le réchauffement climatique (cf. encadré chapitre 3.1.1.1).

Les émissions de particules de sulfate et de suie liées au transport aérien affectent le climat. Ce sont des émissions qui ne restent pas très longtemps dans l'atmosphère. En général, leur durée de vie est de quelques jours à quelques semaines (BOUCHER et al., 2013 [29]).

Les émissions de particules de sulfate et de suie dépendent du type de moteur utilisé et du réglage de sa puissance. Par conséquent, avec les progrès technologiques du secteur aérien, ces émissions diminuent depuis les années 1960 (CHEZE et al., 2013 [26]).

2.5. Traînées de condensation

Les traînées de condensation sont des panaches blancs observables généralement par beau temps dans le ciel après le passage d'un avion. Elles se forment à haute altitude (de 8 à 13 km) à la sortie des réacteurs si l'air environnant est suffisamment froid et humide. Les traînées de condensation sont constituées de cristaux de glace, formés par la condensation de la vapeur d'eau émise par les moteurs, autour de noyaux de condensation présents dans les gaz de combustion et dans l'atmosphère (KÄRCHER, 2018 ; KHOU, 2016) [13] [61].

Les traînées de condensation sont aussi connues par leur nom anglophone « contrails », qui est la contraction de « condensation trails », équivalent états-unien de l'ancien terme britannique « vapour

⁶ Le CH₄ et l'O₃ sont impliqués tous deux dans l'effet de serre. Ils sont respectivement le troisième et deuxième gaz à effet de serre en termes de pouvoir de réchauffement global, après le CO₂.

trails ». Ce dernier signifie en français « traînées de vapeur » mais n'est pas assez précis car la vapeur, qui est la forme gazeuse de l'eau, n'est pas visible. De ces deux termes, le plus précis (et donc privilégié) reste donc « traînée de condensation » (FUTURA 2008) [62].

La durée de vie des traînées de condensation est variable selon les conditions météorologiques. Elles peuvent s'estomper quelques secondes seulement après leur formation, par sublimation de la glace, mais également persister jusqu'à quelques heures, s'étendant alors pour former des nuages induits du type cirrus⁷ (KHOU, 2016) [61].

Les traînées de condensation à longue durée de vie sont définies comme celles qui perdurent pendant au moins 10 minutes et sont le seul type de nuages de glace artificiels connu. Ce phénomène est appelé « nuages induits par les avions » (AIC, acronyme de l'anglais « Aircraft-Induced Clouds »). Selon que ces traînées conservent ou non leur forme linéaire, elles sont respectivement appelées « traînées persistantes » (en anglais « persistent contrails ») ou « cirrus de traînée » (en anglais « contrail cirrus ») (KÄRCHER, 2018) [13].

Les « cirrus de traînée » ne peuvent pas être facilement distingués des cirrus naturels, qui gênent leur observation. Les dimensions des cirrus de traînées dépendent de morphologies de nuages encore mal connues et pas systématiquement étudiées, mais sont probablement très variables (KÄRCHER, 2018) [13].

Terminologie à retenir :

On applique le terme « traînées de condensation » (en anglais « contrails ») pour la définition la plus vaste désignant l'ensemble de nuages de glace générés par les avions naviguant dans la haute troposphère.

Les traînées de condensation de courte durée sont appelées « traînées non persistantes ».

Lorsqu'elles persistent, le terme plus spécifique « nuages induits par les avions » (en anglais « aircraft-induced clouds », AIC), ou plus simplement « nuages induits » est utilisé. Les traînées de condensation peuvent encore être distinguées plus spécifiquement :

- « Traînées persistantes » (en anglais « persistent contrails » ou « linear contrails »), si elles conservent leur forme linéaire, ou ;
- « Cirrus de traînée » (en anglais « contrail cirrus »), si elles ne conservent pas leur forme linéaire.



Figure 4. Traînées persistantes.
© GEORGE ANDERSON [62]

⁷ Par définition, les cirrus sont des nuages d'altitude entièrement composés de cristaux de glace. Ils se produisent au-dessus de 6 km, couvrant de manière naturelle environ 30 % de la surface de la Terre.

Traînées de condensation	Courte durée	Longue durée	
Type	Traînées non-persistantes (<i>contrail</i>)	Traînées persistantes (<i>persistent contrail</i>)	Cirrus de traînée (<i>contrail cirrus</i>)
Morphologie	Linéaire	Linéaire	Non linéaire
Durée	0,1-10 min	10 min-10h	
Épaisseur	100 m	100-1000 m	
Largeur	10-100m	0,1-10 km	<100 km
Longueur	0,1-10 km	0,1-10 km	<100 km

Tableau 1. Caractéristiques des traînées de condensation.

Source : KÄRCHER (2018) [13], Table 1.

3. Estimation de l'impact climatique des traînées de condensation

La température de la surface de la Terre est déterminée par la balance énergétique entre deux composantes : le rayonnement solaire incident, et le rayonnement infrarouge sortant de la surface et de l'atmosphère de la Terre (ADEME, 2015 [1] ; SHINE, 2015 [24]).

L'origine des métriques climatiques développées par la science réside ainsi dans la physique du phénomène derrière cette balance énergétique et comment celle-ci peut être affectée, notamment par des activités anthropiques.

Ce chapitre présente les principaux aspects liés à ces métriques, en se focalisant sur les principales métriques de l'impact climatique des traînées de condensation.

3.1. Forçage Radiatif (RF)

Au sommet de l'atmosphère, moyenné sur le globe et sur une année, l'équilibre énergétique est défini de telle sorte que le rayonnement solaire absorbé par la Terre (atmosphère et surface) est approximativement égal au rayonnement infrarouge sortant de la Terre. Du fait qu'une partie de l'énergie que renvoie la Terre ne quitte pas l'atmosphère et est retenue, l'effet de serre se produit. En l'absence de cet effet de serre « naturel », la température moyenne de la Terre ne serait pas de l'ordre de 15 °C, mais de -18 °C. La Figure 5 illustre ce bilan radiatif de la Terre.

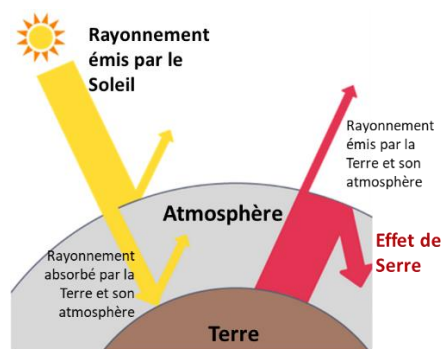


Figure 5. Illustration du bilan radiatif de la Terre.

Pour bien identifier les différentes contributions au déséquilibre de cette balance énergétique, il est nécessaire de définir l'apport d'une espèce chimique ou phénomène au bilan énergétique de la Terre. Pour cela, la notion de forçage radiatif (RF, acronyme de l'anglais « Radiative Forcing ») est appliquée. Il s'agit du flux d'énergie qu'une substance a ajouté ou soustrait durant une certaine période au bilan énergétique de la planète (WIT, 2005 [49]). Ces substances chimiques, ou phénomènes, qui contribuent au forçage radiatif total de l'aviation sont les suivantes (LEE, 2009 [46]) :

1. Émissions de CO₂ ;
2. Émissions de NO_x. Ce terme est principalement la somme de trois termes constitutifs :
 - a. Production d'O₃ troposphérique ;
 - b. Une réduction à plus long terme du CH₄ ambiant ;
 - c. Une faible diminution à plus long terme de l'O₃ ;
3. Émissions de H₂O ;
4. Formation de traînées persistantes (*persistent linear contrails*) ;
5. Nuages induits par les avions (*aviation-induced cloudiness, AIC*) ;
6. Émissions de particules de sulfate ;
7. Émissions de particules de suie.

Le GIEC définit le RF de la façon suivante (GIEC, 2013 [64]) :

Variation du flux de rayonnement résultant (différence entre le rayonnement descendant et le rayonnement ascendant, exprimée en $W.m^{-2}$), à la tropopause ou au sommet de l'atmosphère, due à une modification d'un agent externe du changement climatique, par exemple une modification de la concentration de dioxyde de carbone ou du rayonnement solaire. Parfois encore, on parle de forçage en se référant à des facteurs internes, alors que ceux-ci découlent de l'altération du climat, notamment les variations touchant les aérosols ou les gaz à effet de serre dans les paléoclimats.

D'ordinaire, on calcule le forçage radiatif après avoir laissé les températures stratosphériques éventuellement perturbées se réajuster à l'équilibre radiatif dynamique, en maintenant toutefois toutes les propriétés troposphériques à leurs valeurs non perturbées. Le forçage radiatif est dit instantané si on ne tient pas compte du changement de température dans la stratosphère. Une fois les ajustements rapides pris en compte, on parle alors de forçage radiatif effectif.

Pour les besoins du rapport GIEC, le forçage radiatif est en outre défini comme le changement effectif par rapport à l'année 1750 (c'est-à-dire l'accumulation depuis 1750 de l'ensemble des effets) et, sauf indication contraire, se rapporte à une valeur moyenne annuelle à l'échelle du globe.

Le forçage radiatif tel que décrit ici ne doit pas être confondu avec l'expression analogue de « forçage radiatif dû aux nuages » servant à décrire une mesure, sans réel rapport, de l'incidence des nuages sur le flux du rayonnement au sommet de l'atmosphère.

3.1.1. Estimations

3.1.1.1. Le forçage radiatif

Le forçage radiatif est calculé au sommet de la troposphère et il est exprimé en watts par mètre carré ($W.m^2$). Quatre paramètres sont importants pour estimer cette variable par substance chimique ou phénomène, contribuant au forçage radiatif total (Figure 6).

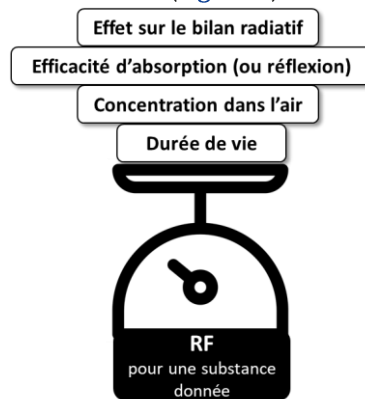


Figure 6. Les quatre paramètres pris en compte pour estimer le forçage radiatif d'une substance chimique (ou phénomène).

Le premier paramètre est l'effet de l'espèce chimique sur le bilan radiatif. Le forçage radiatif est positif lorsque la planète absorbe plus d'énergie qu'elle n'en émet. Le système climatique réagit en conséquence en se réchauffant. C'est le cas des gaz à effet de serre (GES) émis dans l'atmosphère. Les GES absorbent le rayonnement infrarouge et le réémettent à la surface de la Terre, avec donc des valeurs de forçage radiatif positives. A contrario, le forçage radiatif est négatif lorsque la planète émet plus d'énergie qu'elle n'en absorbe. Ceci conduit à un refroidissement. C'est le cas des particules d'aérosol qui réfléchissent le rayonnement solaire (ADEME, 2015 [1] ; SHINE, 2015 [24]).

Le second paramètre est l'efficacité d'absorption ou de réflexion de cette espèce. Par exemple, une molécule qui absorbe fortement et sur une large gamme de longueur d'onde aura un impact plus important sur le forçage radiatif. C'est le cas du CH₄ comparé au CO₂.

Le troisième paramètre à prendre en compte lors de l'estimation du forçage radiatif est la concentration de la substance analysée dans l'atmosphère, car plus un gaz est présent en grande quantité, plus fort sera son effet sur le bilan radiatif. De ce fait, l'estimation du RF prend en compte l'historique des émissions pour examiner leur effet cumulatif sur un instant précis (généralement une année donnée). Cette période rétroactive, pour le RF dû à l'activité humaine, est souvent définie comme le changement total depuis la période post-industrialisation (depuis 1750 par convention du GIEC). Pour l'analyse d'un secteur spécifique, la concentration de fond prise en compte est celle imputable au secteur (SHINE, 2015 [24]).

Le dernier paramètre est la stabilité de la substance. Une molécule très stable, et qui donc persiste longtemps dans l'atmosphère, aura une contribution durable sur le bilan radiatif. Ceci est le cas du CO₂ qui a des effets à longue durée.

À titre de comparaison, la figure suivante (Figure 7) présente les valeurs des RF des différents composants qui contribuent au RF total de l'aviation. Ces valeurs sont issues de LEE et al. (2020) [7] pour l'année d'évaluation de 2018.

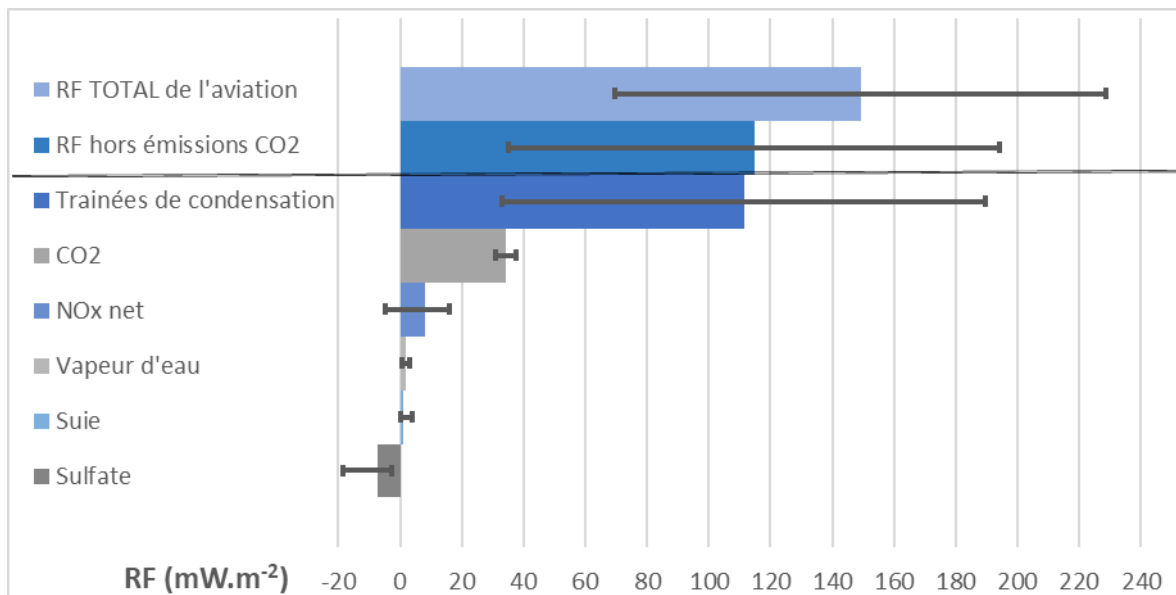


Figure 7. Composants des forçages radiatifs globaux de l'aviation pour l'année 2018.
Source : LEE et al. (2020) [7]

Selon cette étude de LEE et al. (2020) [7], les nuages induits sont le premier contributeur au RF total, à hauteur de 75 %, suivi des émissions de CO₂ qui contribuent à hauteur de 23 % et les émissions de NO_x à 5 %. En valeur absolue, les RF sont égaux à 111,4 mW.m⁻² (±70 %) pour les traînées de condensation, 34,3 mW.m⁻² (±10 %) pour les émissions de CO₂ et 8,2 mW.m⁻² (-159 %, +95 %) pour les émissions de NO_x. Le RF total de l'aviation est égal 149,1 mW.m⁻² avec une incertitude de 5 %. Les distributions d'incertitude montrent que les termes de RF hors émissions CO₂ sont les plus grands contributeurs à l'incertitude globale du RF de l'aviation en 2018.

Une étude plus ancienne de LEE et al. (2009) [46] estime plus globalement le RF total issu de l'activité anthropique pour l'année 2009. Le RF de l'aviation contribue alors à 3,5 % de ce RF total si l'effet des traînées persistantes est exclu, et à 4,9 % s'il est inclus. Dans la même étude, le RF des émissions de CO₂ issues de l'aviation contribue à 1,6 % du RF total lié à l'activité anthropique.

En se focalisant seulement sur les RF de l'aviation dans la revue bibliographique, une évolution de la méthodologie pour l'estimation de l'impact des traînées de condensation sur le climat est observée et présentée ci-après.

En 1999, la valeur de RF induite par les traînées de condensations persistantes (*linear contrails*) a été estimée par le GIEC [52] à 20 mW.m⁻² pour l'année 1992³². Cette valeur a été de nouveau estimée égale à 10 mW.m⁻² en 2000 dans une évaluation du GIEC (SAUSEN *et al.*, 2005 [48]), puis égale à 11,8 mW.m⁻² en 2005 par LEE (2009) [46]. Dans ces études, le RF total de l'aviation n'inclut pas les effets des cirrus de traînée (*contrail cirrus*).

Les récentes études ajoutent l'effet des cirrus de traînée à celui des traînées de condensation persistantes. Le RF associé est donc plus élevé, variant entre 15,5 à 111,4 mW.m⁻² selon les valeurs présentées dans le Tableau 2.

Année	RF (mW.m ⁻²)				Source :
	Nuages induits		CO ₂	TOTAL	
	Traînées persistantes	Cirrus de traînée			
1992	20	NE	18	48,5	GIEC (1999) 32[52]
2000	10	NE	25,3	47,8	SAUSEN <i>et al.</i> (2005) [48]
2005	11,8 ^a	NE	28,0	78	LEE <i>et al.</i> (2009) [46]
	33,0 ^b				
2005	67,5 ^c		25,0	95,2	LEE <i>et al.</i> (2020) [7]
2006	63,0 ^d		NE	NE	SCHUMANN <i>et al.</i> (2015) [23]
2006	12 ^e		NE	NE	CHEN & GETTELMAN (2013) [27]
2006	49,0		24,0	NE	BOCK & BURKHARDT (2019) [11]
2011	85,6 ^c		29,0	117,4	LEE <i>et al.</i> (2020) [7]
2015	32,6 ^f		NE	NE	SANZ-MORERE <i>et al.</i> (2020) [6]
2018	111,4 ^c		34,3	149,1	LEE <i>et al.</i> (2020) [7]

Tableau 2. Estimation du forçage radiatif (RF) de l'aviation issu des révisions bibliographiques : valeurs globales et annuelles en mW.m⁻².

NE : Valeur non estimée.

^a LEE *et al.* (2009) [46] utilisent la terminologie « contrails » pour désigner les « traînées persistantes ».

^b LEE *et al.* (2009) [46] utilisent la terminologie « AIC ».

^c LEE *et al.* (2020) [7] et BOCK & BURKHARDT (2019) [11] utilisent la terminologie « contrail cirrus » pour désigner les « nuages induits ».

^d SCHUMANN *et al.* (2015) [23] utilisent la terminologie « contrails » pour désigner les traînées de condensation de durée de quelques minutes à 36 h. Dans ce document c'est défini comme « traînées de condensation », le terme le plus vaste.

^e CHEN & GETTELMAN (2013) [27] utilisent la terminologie « contrails » et « contrail cirrus » pour désigner les « nuages induits ».

^f SANZ-MORERE *et al.* (2020) [6] utilisent la terminologie « contrails » pour désigner les « nuages induits ».

L'écart des valeurs de RF s'explique principalement par (pour plus de détails, voir la section « 3.1.2 Limites ») :

- Les différences méthodologiques intrinsèques aux modèles utilisés et les hypothèses prises (prise en compte ou pas des cirrus de traînée par exemple) ;
- L'évolution de l'activité et des émissions du secteur de l'aviation ;
- L'évolution de la concentration de fond des différentes substances dans l'atmosphère.

L'introduction de l'effet des cirrus de traînée a fait ainsi augmenter le RF total de l'aviation dans les études plus récentes. Ceci est une conséquence directe de l'amélioration de la méthodologie de calcul qui reproduit des phénomènes qui n'étaient jusque-là pas pris en compte, en raison de leur méconnaissance. En comparant les incertitudes de deux études de LEE, les incertitudes pour le RF des nuages induits (LEE *et al.*, 2020 [7]) et pour les traînées de condensation (LEE *et al.*, 2009 [46]) sont égales à 70 % dans chaque cas. L'introduction, ainsi, de l'effet des cirrus de traînée n'ajoute pas d'incertitudes aux estimations totales.

Les effets de l'aviation sur le forçage radiatif* :

1. RF positif : Émissions de CO₂
2. RF positif : Émissions de NO_x, dont :
 - a. RF positif : Production d'O₃ troposphérique
 - b. RF négatif : Une réduction à plus long terme du CH₄ ambiant
 - c. RF négatif : Une faible diminution à plus long terme de l'O₃
3. RF positif : Émissions de H₂O
4. RF positif : Formation de traînées persistantes
5. RF positif : Nuages induits par les avions
6. RF négatif : Émissions de particules de sulfate
7. RF positif : Émissions de particules de suie

* tendance globale pour chacun des effets et non répliquable unitairement à chaque vol, la formation de certains effets étant fortement dépendante des conditions lors de l'émission (localisation, jour/nuit, etc.)

3.1.1.2. L'index de forçage radiatif

Le concept d'index de forçage radiatif (RFI, acronyme de l'anglais «Radiative Forcing Index») a été développé dans la littérature comme un indicateur de la contribution des émissions de CO₂ à l'impact climatique global pour le périmètre analysé (e.g. l'aviation).

Le RFI est calculé à partir des RF des composants analysés du secteur concerné. Il est ainsi défini comme le ratio entre la somme des RF composants le RF total et celui des émissions seules de CO₂. Plus la valeur du RFI est basse, plus grande est la contribution des émissions de CO₂ à l'impact climatique total. À l'inverse, plus cette valeur est élevée, plus grande est la contribution des effets hors émissions de CO₂ (Figure 8).

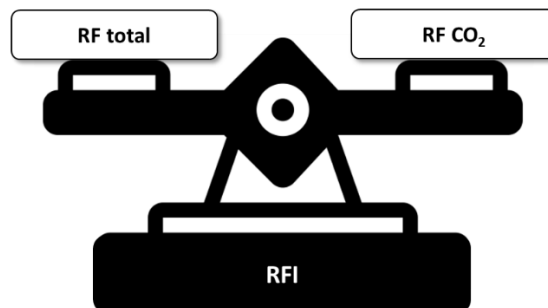


Figure 8. Schéma conceptuel de l'index de forçage radiatif.

Les valeurs de RFI issues de différentes études sont présentées sur le tableau suivant (Tableau 3).

Année	RFI	Source :
1992	2,7	GIEC (1999) 32[52]
2000	1,9	SAUSEN et al. (2005) [48]
2005	2,8	LEE et al. (2009) [46]
2005	3,8	LEE et al. (2020) [7]
2011	4,0	
2018	4,3	

Tableau 3. Estimation de l'index de forçage radiatif (RFI) de l'aviation issu des révisions bibliographiques.

Les valeurs de RFI déduites des études montrent l'évolution de ces valeurs au fil des années. Ceci est directement lié à la méthodologie appliquée pour les calculs des RF (intégration des cirrus de traînées).

De ce fait, les valeurs de RFI varient entre 2,7 en 1992 et 1,9 en 2000 à 4,3 en 2018. Pour une même année d'évaluation (2005) et pour le même auteur (LEE et al., 2020 [7]), le RFI est égal à 2,8 lorsque les cirrus de traînées ne sont pas pris en compte et s'élève à 3,8 lorsque ce paramètre est pris en compte.

Le RFI n'est donc pas un nombre intrinsèquement fixe au fil du temps, du fait de sa définition et des équations du RF. Pour le démontrer, l'étude de LEE et al. (2005) [51] a réalisé des analyses à partir des scénarios de référence du GIEC (1999) [52]. En supposant que pour chaque année à partir de 2000, la même quantité d'émissions de CO₂ serait produite par l'aviation, les valeurs calculées de RFI diminuent avec le temps. Ceci est dû à la plus longue durée de vie du CO₂ par rapport aux autres éléments qui composent le RF (Figure 9).

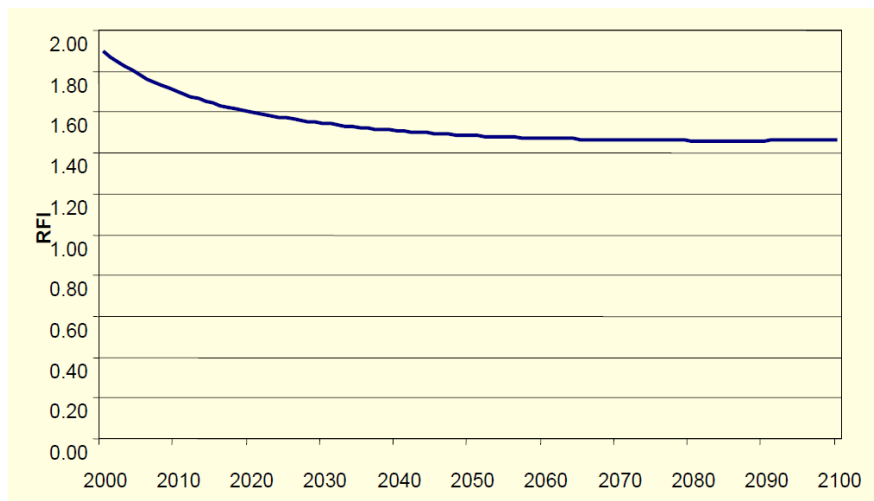


Figure 9. Indice de forçage radiatif (RFI) pour l'aviation à émissions constantes de CO₂ après l'année 2000 ; modèle ajusté à RFI de 1,9 en 2000 et calculé avec le modèle de LEE et al. (2005) [51].
Source : WIT (2005) [49]

Les RFI présentés en Figure 9 diminuent exponentiellement au fil du temps. Il faut souligner toutefois que ce profil est directement lié aux hypothèses prises par l'étude. L'objectif de LEE et al. (2005) [51][46] est de démontrer que le RFI n'est pas une valeur fixée à partir d'un scénario simplifié. Si les émissions réelles de CO₂ étaient prises en compte, la courbe aurait certainement un profil différent. À noter également que seuls les RF induits par les traînées persistantes sont pris en compte (cirrus de traînées non inclus).

Actuellement, le calcul utilisé dans la Base Carbone® de l'ADEME n'est pas basé sur le RFI comme multiplicateur pour estimer l'impact climatique total de l'aviation mais sur le RF total de l'aviation issu du GIEC (1999) [52]. Ce dernier est de l'ordre de 40 mW.m⁻² alors que le seul CO₂ fait 20 mW.m⁻², c'est-à-dire 2 fois moins (ADEME, 2020 [56], cf. page 46). Ainsi, pour estimer les émissions de GES de l'aviation incluant les traînées de condensation, les émissions de CO₂ du secteur (combustion) sont estimées et multipliées par ce facteur.

3.1.2. Limites

À partir de l'analyse des études basées sur la métrique du forçage radiatif (RF) induit par les traînées de condensation, des écarts des valeurs à travers différentes méthodologies sont observés.

D'une manière globale, le RF pour une période donnée est celui basé sur l'historique des concentrations et le profil temporel des RF qui en résulte. Cela ne dit rien sur le futur RF découlant de ce profil passé. (WIT, 2005 [49]).

En ce qui concerne l'aviation, selon KÄRCHER (2018) [15] et SHINE (2015) [24], il manque des estimations robustes des RF, notamment ceux induits par les nuages induits (AIC). Ces derniers font partie des RF de l'aéronautique les plus incertains malgré leur fort impact sur le climat. Cette incertitude est liée au manque de preuves d'observation et aux incertitudes existantes dans le paramétrage de la modélisation de ce phénomène. Une amélioration de la représentation des cirrus naturels dans les modèles globaux serait également nécessaire pour estimer le RF des nuages induits (AIC) avec une plus grande confiance.

Un autre paramètre potentiellement important pour l'estimation du RF lié aux nuages induits (AIC) concerne les particules de sulfate. Les émissions à basse altitude des particules de sulfate pourraient influencer les propriétés des nuages et causer un important RF négatif. Les particules de sulfate et de noir de carbone à haute altitude provenant de l'aviation pourraient aussi avoir un effet similaire selon SHINE (2015) [24]. Il y a toutefois d'énormes difficultés à effectuer de tels calculs en raison des incertitudes dans les processus microphysiques dans les nuages et de la façon dont ils sont affectés par les variations des concentrations des particules. Néanmoins, des études de modélisation récentes indiquent que l'effet des émissions de sulfate sur les nuages pourrait provoquer un RF négatif de plusieurs dizaines de $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ (CHEN & GETTELMAN, 2013 [27]). Cela le rendrait presque aussi important, mais de signe opposé, que le RF direct des nuages induits (AIC). Davantage de travaux sont clairement nécessaires pour conclure (SHINE, 2015 [24]).

Concernant spécifiquement les traînées de condensation persistantes (*persistent contrails*), il existe de nombreuses difficultés pour estimer le RF associé. Premièrement, bien que les traînées soient clairement visibles sur les images satellites, des modèles climatologiques mondiaux robustes quant à la prise en compte de leur couverture horizontale n'ont pas encore été développés. Cela nécessite des techniques de reconnaissance de formes capables de distinguer de manière fiable les traînées des autres nuages. En d'autres termes, il s'agit de combiner ces images avec des techniques de modélisation (qui combinent des données météorologiques et des inventaires de vol) pour fournir une estimation globale de l'occurrence de ces traînées. Une deuxième difficulté vient du fait que les calculs des RF nécessitent des informations supplémentaires sur les propriétés des traînées (telles que leur épaisseur, nombre et taille, ainsi que la forme des cristaux de glace qui composent la traînée). Ces données ne sont disponibles que pour un nombre limité d'études de cas et de nombreuses hypothèses doivent être faites pour généraliser les calculs. Enfin, une dernière difficulté discutée dans SHINE (2015) [24] concerne le fait que le RF net des traînées est en réalité le résultat des RF opposés : d'une part les traînées réfléchissent le rayonnement solaire, provoquant un RF négatif ; d'autre part, ces traînées piègent le rayonnement infrarouge thermique, provoquant un RF positif.

3.2. Potentiel de réchauffement global (PRG) et Global Temperature change Potential (GTP)

Pour estimer l'impact futur d'une substance sur le réchauffement planétaire et pouvoir faire des comparaisons entre substances chimiques différentes, deux notions ont été développées : le concept de potentiel de réchauffement global d'une substance (PRG) et le « Global Temperature change Potential » (GTP).

Le GIEC a mis au point la métrique du potentiel de réchauffement global (PRG ou GWP, acronyme de l'anglais «Global Warming Potential») pour évaluer l'impact futur d'une substance chimique ou phénomène sur le réchauffement planétaire. Le PRG se définit comme le forçage radiatif cumulé sur une durée d'une quantité de gaz donnée. Cette valeur est normalisée par rapport à celle du CO_2 (dont le PRG est par définition égal à 1) et est calculée sur une période donnée (la période de référence a été fixée à 100ans dans le cadre de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques [CCNUCC] et du Protocole de Kyoto) après qu'une certaine concentration ait été atteinte à un instant initial (CITEPA, 2020 [58]; PLANÈTE VIABLE, 2012 [65]).

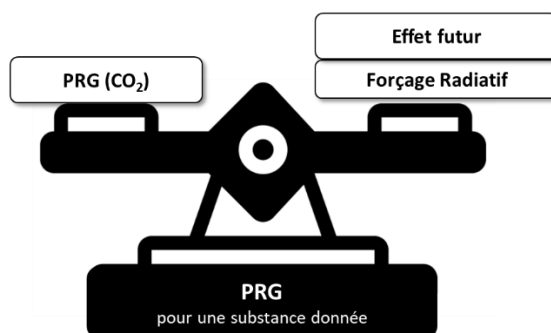


Figure 10. Schéma conceptuel du potentiel de réchauffement global (PRG).

Le GIEC définit le PRG de la façon suivante (GIEC, 2013 [64]) :

Potentiel de réchauffement global (PRG) : Indice fondé sur les propriétés radiatives des gaz à effet de serre, qui sert à mesurer, à la suite d'une émission ponctuelle, le forçage radiatif d'une unité de masse d'un tel mélange dans l'atmosphère actuelle, intégré pour un horizon de temps donné par rapport à celui du dioxyde de carbone. Le PRG représente l'effet combiné des temps de séjour différents de ces gaz dans l'atmosphère et de leur pouvoir relatif sur le forçage radiatif. Le Protocole de Kyoto s'appuie sur les PRG pour des émissions ponctuelles sur une durée de 100 ans.

Un indice alternatif, appelé « Global Temperature change Potential » (GTP) a été proposé dans l'étude de SHINE (2005). C'est une autre façon de comparer les gaz entre eux. Alors que le PRG estime la chaleur absorbée, le GTP estime l'augmentation de la température moyenne de surface de la Terre causée par l'émission d'une substance chimique ou d'un phénomène à un horizon déterminé. Cet indicateur est également normalisé par rapport à l'élévation de température que la même masse de CO₂ entraînerait. Cette mesure est plus complexe car elle calcule la réponse du climat à un horizon déterminé et pas seulement le forçage radiatif engendré.

3.2.1. Estimations

Le PRG de chaque GES est déterminé par le GIEC au fur et à mesure de ses rapports d'évaluation (*Assessment Reports* ou AR). Le cinquième et dernier rapport d'évaluation du GIEC sur ce point est paru en 2014.

Dans les inventaires d'émissions nationaux au format CCNUCC, les émissions de chacun des GES sont calculées en masse, puis converties en équivalent CO₂ (CO_{2e}). Pour les calculer, les valeurs de PRG actuellement utilisées sont celles, sur 100 ans, de l'AR4 de 2007. En effet, depuis le rapportage, en 2015, de l'inventaire de la période 1990-2013, les États Parties à l'annexe I à la CCNUCC doivent utiliser ces valeurs. À partir du 1^{er} janvier 2023, ces pays, y compris la France, devront prendre en compte les PRG de l'AR5 pour la mise en œuvre de l'Accord de Paris (CITEPA, 2020 [58], voir [Tableau 4](#)).

GES	AR4	AR5
CO ₂	1	1
CH ₄	25	28
N ₂ O	298	265

Tableau 4. Valeurs de PRG selon les rapports d'évaluation du GIEC en cours (AR4) et à appliquer en 2023 (AR5)

LEE et al. (2020) [7] estiment les PRG et GTP de l'aviation pour les horizons de 20, 50 et 100 ans. Ces indicateurs attribuent des « équivalences d'émission de CO₂ » pour les effets hors émissions CO₂ à partir des valeurs de RF calculées ([Tableau 5](#)).

Année 2018	PRG			GTP		
	PRG ₂₀	PRG ₅₀	PRG ₁₀₀	GTP ₂₀	GTP ₅₀	GTP ₁₀₀
CO ₂	1	1	1	1	1	1
Nuages induits* (TCO ₂ basis)	2,32	1,09	0,63	0,67	0,11	0,09
TOTAL CO _{2e} /CO ₂	4,0	2,3	1,7	1,3	1,0	1,1

Tableau 5. PRG et GTP pour les émissions de CO₂ et les effets climatiques des nuages induits* de l'aviation pour l'année 2018.

Source : LEE et al. (2020) [7].

*Les auteurs utilisent la terminologie « contrail cirrus » pour désigner les « nuages induits ».

Les PRG et GTP captent le fait que des effets constants à courte durée de vie maintiennent un niveau de réchauffement à peu près constant, tandis que des effets constants climatiques à longue durée de vie, comme le CO₂, continuent de s'accumuler dans l'atmosphère, ce qui entraîne une augmentation constante du niveau du réchauffement associé. Par conséquent, ces métriques montrent que l'hypothèse largement utilisée d'un « multiplicateur » constant ne s'applique que dans une situation où les émissions de l'aviation augmentent exponentiellement de sorte que le taux de variation des RF sans CO₂ soit approximativement proportionnel au taux d'émissions de CO₂.

Selon LEE et al. (2020) [7], les PRG et GTP calculés par les auteurs ne doivent pas être appliqués aux scénarios futurs qui s'écartent de la tendance actuelle de l'augmentation des émissions liées à l'aviation. À partir du large éventail de valeurs d'un « multiplicateur » estimées par cette étude, les auteurs démontrent les limites de l'utilisation d'un multiplicateur constant dans l'évaluation des impacts climatiques de l'aviation, et rappellent que le choix de la métrique pour un tel multiplicateur implique des choix subjectifs.

3.2.2. Limites

Le PRG est largement accepté comme un moyen fiable pour mesurer les effets de gaz tels que le CO₂. Toutefois, tel qu'il est utilisé dans le protocole de Kyoto, avec une période de 100 ans, il ne convient pas pour la mesure de la nature des émissions de courte durée liées au transport aérien (FUGLESTVEDT et al., 1999 [53]).

Le choix du PRG (ou du GTP) avec une période de 100 ans ne met pas l'accent sur les émissions à court terme (SO_x, NO_x, suies et particules), alors même que ces émissions favorisent la formation des nuages induits (SHINE, 2015 [24]).

3.3. Choix de la métrique adaptée

La diversité des émissions de l'aviation conduit à la question suivante : quelle cohérence est-il possible d'obtenir en souhaitant évaluer les émissions de l'aviation sur une échelle commune de comparaison ? Sachant que cette comparaison est nécessaire afin d'estimer l'impact climatique total de l'aviation (ou d'un autre secteur), où les effets des émissions autres que de CO₂ sont pris en compte.

L'estimation de l'impact climatique total est la métrique de base pour guider les décideurs publics dans leurs choix pour réduire cet impact et pour guider les scientifiques dans la compréhension de ce système complexe. Le choix de la métrique adaptée à l'usage final peut être guidé par (SHINE, 2015 [24]; FUGLESTVEDT et al., 2010 [42]) :

- i. Les effets perturbateurs de la balance énergétique de l'atmosphère pris en compte ; e.g. émissions de CO₂, émissions de NO_x et traînées de condensation.
- ii. L'échelle temporelle d'analyse ; si l'impact climatique analysé est de longue durée, de l'ordre des décennies ou siècles (e.g. émissions de CO₂), ou de courte durée, de l'ordre de jours (e.g. émissions de soufre).
- iii. L'échelle spatiale d'analyse ; la répartition entre les composants pour une métrique d'émission (ou phénomène) peut varier considérablement selon l'endroit où l'émission a lieu (à la fois géographiquement et en matière d'altitude).
- iv. Les incertitudes associées.

Ces critères devront bien évidemment être mis en parallèle du besoin final, à savoir le type de question à laquelle il s'agit de répondre.

Selon SHINE (2015) [24], il n'existe pas encore de moyen largement accepté de comparer les effets climatiques des émissions des aéronefs et certains choix, tels que la période de calcul, sont des décisions qui ne peuvent s'abstraire d'une certaine subjectivité et doivent être adaptés à la problématique particulière considérée, et qui doivent donc être prises par les décideurs.

La métrique particulière des RF et RFI dépend fortement de l'histoire passée des émissions. Les RF et RFI sont ainsi utiles pour examiner l'effet cumulatif des émissions passées de l'aviation, mais moins adaptées pour examiner les effets futurs des émissions actuelles (SHINE, 2015 [24]).

Le PRG surmonte ce problème en appliquant une intégration temporelle directe sur une période arbitraire de l'émission analysée. Cependant, il n'apporte pas de solution satisfaisante aux effets hors émissions CO₂ de l'aviation. En effet, les PRG ne conviennent pas aux effets climatiques à vie courte. Pour les traînées de condensation spécifiquement, un PRG ne peut pas être calculé car l'effet ne peut pas être facilement lié à une émission en masse (SHINE, 2015 [24]).

Le GTP surmonte certains de ces problèmes car c'est un indicateur qui approche les effets des émissions, mais il introduit de fait plus d'incertitudes selon SHINE (2015) [24]. À l'heure actuelle, le GTP n'a pas atteint le niveau d'acceptation du PRG. Néanmoins, il illustre l'influence de différents choix dans la conception des indices d'émission. Le GTP examine le changement de température quelque temps après une émission au lieu d'intégrer l'effet d'une émission au fil du temps. Par conséquent, il indique en général un impact moindre pour les effets hors émissions CO₂ de courte durée de l'aviation (WIT, 2015 [49]).

Le RFI peut être un indice utile pour indiquer la contribution des effets climatiques hors CO₂ d'un ou plusieurs secteurs donnés. À des fins d'élaboration de politiques publiques et d'outils d'aide à la décision, le RFI est parfois utilisé comme un simple multiplicateur pour inclure l'impact des émissions hors CO₂ de l'aviation (FUGLESTVEDT *et al.*, 2010 [42]).

Actuellement, la méthodologie de la Base Carbone® de l'ADEME se base sur ce principe mais en utilisant le RF (et non le RFI) pour calculer la valeur du facteur multiplicateur. Les valeurs utilisées proviennent d'un rapport du GIEC de 1999 [64]. En considérant que les émissions de CO₂ et les traînées de condensation sont les contributeurs majeurs à l'impact climatique de l'aviation, le facteur multiplicateur est calculé à partir des RF associés. Ainsi, il est évalué comme le quotient de (i) la somme du RF des traînées de condensation (de l'ordre de 18 mW.m²) et du RF des émissions CO₂ (de l'ordre de 20 mW.m²) par (ii) le RF des émissions CO₂. Les émissions totales (hors émissions amont liées au carburant) de GES des avions analysés (long ou court-courriers) sont ainsi évaluées à 2 fois les émissions de CO₂ liées à la combustion. Il faut noter toutefois que l'estimation du forçage total dans GIEC (1999) [64] n'inclut pas l'effet des cirrus de traînée (*contrail cirrus*), mais uniquement l'effet des traînées de condensation persistantes (*linear contrails*). Des études plus récentes incluent l'effet des cirrus de traînées, et atteignent des valeurs de RFI entre 3,8 et 4,3 selon l'année analysée.

Un facteur équivalent CO₂ constant tel qu'utilisé dans la Base Carbone® est peut-être une solution simple pour estimer l'impact climatique des effets autres que le CO₂. Cependant, ces facteurs constants sont très imprécis car il existe de fortes interdépendances entre l'impact climatique et le lieu d'émission, l'altitude de vol et la distance de vol.

L'étude de la German Environment Agency (2020) [3] propose que ce facteur multiplicateur soit a minima dépendant de la distance du vol, des altitudes de vol différentes pouvant être impliquées. L'étude précise toutefois que la précision d'une telle approche proposée et les éventuelles divergences devraient être analysées en détail dans d'autres études complémentaires.

Par ailleurs, l'utilisation d'une métrique inadaptée pourrait entraîner des mesures inappropriées, afin de réduire l'impact du secteur. En effet, il peut sembler avantageux de modifier le fonctionnement ou les caractéristiques du moteur pour diminuer les émissions de CO₂. Le bénéfice pourrait toutefois s'évaporer une avec la prise en compte des émissions hors CO₂ (FUGLESTVEDT *et al.* (2010) [42]).

Deux mesures sont envisageables actuellement afin de réduire l'impact climatique des traînées de condensation. La première se base sur l'utilisation obligatoire de carburants durables (ou agrocarburants) pour l'aviation. Cette mesure vise la réduction des émissions de particules de suie qui contribuent à la formation des traînées de condensation. La deuxième mesure consiste à éviter les régions considérées comme sensibles d'un point de vue de la formation de traînées de condensation (EASA, 2020 [2]).

4. Conclusions, Perspectives et Recommandations

Ce document réalise une revue bibliographique sur l'impact climatique des traînées de condensation de l'aviation.

Aujourd'hui la problématique des émissions de CO₂ est bien connue et traitée. D'abord méconnus, les effets des émissions hors CO₂ sont de plus en plus étudiés au niveau scientifique, notamment les effets des traînées de condensation et leur quantification.

À partir de l'état actuel des connaissances scientifiques, les métriques RF (forçage radiatif) et RFI (index de forçage radiatif) semblent les plus adaptées pour évaluer les différents composants de l'aviation ayant un impact sur le changement climatique, notamment les traînées de condensation. Pour rappel, lorsque des traînées de condensation ont un effet persistant, on les appelle « traînées persistantes » si elles gardent la forme linéaire, ou « cirrus de traînée » si elles ne conservent pas leur forme linéaire.

Le PRG (potentiel de réchauffement global) est une métrique climatique appropriée pour le protocole de Kyoto et souvent utilisée pour des applications de politiques publiques. Néanmoins, ce n'est pas le meilleur choix pour inclure les effets des traînées de condensation, car leur courte durée est mal prise en compte. Le GTP (*Global Temperature change Potentiel*) pourrait être utilisé pour pallier cette problématique, mais du fait des grandes incertitudes liées à la méthodologie actuelle, le GTP n'a pas atteint le niveau d'acceptation du PRG.

Dans les études plus anciennes, dont le rapport GIEC de 1999, qui ne prenaient en compte que l'impact des traînées persistantes, le RFI est estimé entre 1,9 et 2,8, c'est-à-dire que les effets climatiques totaux étaient de 1,9 à 2,8 fois plus grands que les effets des seules émissions CO₂. Les traînées persistantes contribuent seules, dans ce contexte, de 15 % à 41 % au RF total de l'aviation. Lorsque les études plus récentes ajoutent les effets des cirrus de traînée, le RFI augmente et il est estimé entre 3,8 et 4,3. Les nuages induits par l'aviation (traînées persistantes et cirrus de traînée) contribuent dans ce contexte, entre 71 % à 75 % au RF total de l'aviation.

L'évolution des connaissances démontre une plus grande importance des effets des traînées de condensation sur le climat à mesure que les méthodologies s'améliorent. Il est ainsi recommandé de prendre en compte ce paramètre lors des évaluations de l'impact climatique global de l'aviation. Inclure uniquement les effets des émissions de CO₂ pourrait conduire à de « fausses bonnes idées » car des actions de réduction de ces seules émissions pourraient entraîner une augmentation des effets des traînées de condensation. Par exemple : l'augmentation de l'altitude de vol entraîne une réduction de la consommation de carburant mais peut augmenter l'impact climatique des traînées de condensation, entraînant une augmentation de l'impact sur le climat malgré une réduction des émissions de CO₂.

Estimer l'impact climatique de l'aviation est nécessaire notamment à la vue des possibles évolutions au niveau réglementaire. Une redevance sur le climat pourrait être mise en œuvre à long terme (d'ici 8 ans ou plus). En ce qui concerne les traînées de condensation, l'utilisation de carburants durables pour l'aviation pourrait être rendue obligatoire à moyen terme (d'ici 5 à 8 ans) ou à long terme (au-delà de 8 ans). Cette mesure pourrait être mise en œuvre par une obligation au niveau de l'Union européenne exigeant qu'un certain pourcentage du total des carburants vendus sur une période donnée corresponde à ce type de carburants. La mesure d'évitement des zones propices à la formation de traînées de condensation pourrait être introduite à moyen terme (d'ici 5 à 8 ans) (EASA, 2020 [2]).

Pour estimer l'impact climatique des émissions hors CO₂, notamment des traînées de condensation, la complexité de la méthodologie à employer dépend directement de la métrique choisie. Un facteur équivalent CO₂ constant est ainsi l'une des solutions les plus simples pour estimer un tel impact car il ne nécessite qu'une simple multiplication par les émissions de CO₂. C'est le cas de nombreuses études qui utilisent le RFI comme facteur multiplicateur. Cependant, les facteurs d'équivalent CO₂ constants sont imprécis, notamment car il existe de fortes interdépendances entre l'impact climatique et le lieu d'émission, ainsi que l'altitude de vol et la distance de vol.

Des facteurs multiplicateurs dépendant à minima de la distance de vol (reflétant donc des altitudes de vol différentes) devraient être utilisés. Toutefois, à ce stade de connaissances scientifiques, il n'y a pas une méthodologie consolidée permettant d'appliquer de tels facteurs de façon généralisée. La présente étude recommande ainsi de maintenir l'équivalent CO₂ constant dans la Base Carbone® de l'ADEME, actuellement égal à 2.

Une étude plus approfondie doit être menée afin d'inclure l'analyse des autres effets climatiques non liés aux émissions de CO₂, notamment les émissions de NO_x et sulfates. L'effet des traînées de condensation est certes le plus grand contributeur à l'impact climatique total de l'aviation à ce stade des connaissances. Toutefois la présente étude ne peut pas affirmer que d'autres effets hors émissions CO₂ méconnus ne nécessitent pas également une amélioration de la méthodologie d'estimation associée.

L'impact climatique doit être ainsi analysé sur l'ensemble des composants du forçage radiatif de l'aviation. Une telle étude consolidée n'a pas été à ce jour identifiée dans la littérature. L'étude préconise également que cette analyse soit menée dans les autres secteurs d'activité, notamment ceux des autres modes de transport, afin de rendre les estimations associées plus comparables.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1]. **ADEME 2015**

ADEME, 2015. *Réseau scientifique d'expertise BASE CARBONE® et Empreinte GES : Rapport intermédiaire de la Convention n° 1216C0052*. Étude réalisée par l'ARMINES. Mars 2015.

Études de référence sur les traînées de condensation (à partir de la plus récente) :

Les études mis en évidence par un fond gris sont celles de référence du précédent rapport [1].

[2]. **EASA 2020**

EASA: European Commission requested from the European Union Aviation Safety Agency, 2020. Updated analysis of the non-CO2 climate impacts of aviation and potential policy measures pursuant to EU Emissions Trading System Directive Article 30(4). Report from the Commission to the European Parliament and the Council, November 2020.

[3]. **German Environment Agency 2020**

German Environment Agency. Integration of Non-CO2 Effects of Aviation in the EU ETS and under CORSIA. Final report, July 2020.

[4]. **FRÖMMING et al. 2020**

C. FRÖMMING, V. GREWE, S. BRINKOP, P. JÖCKEL, A.S. HASLERUD, S. ROSANKA, J. VAN MANEN & S. MATTHES, 2020. *Influence of the actual weather situation on non-CO2 aviation climate effects: The REACT4C*. Climate Change Functions. Currently under review.

[5]. **GRIMONPREZ et al. 2020**

S. GRIMONPREZ, J. WU, A. FACCINETTO, S. GOSSELIN, E. RIBER, B. CUENOT, M. CAZAUNAU, E. PANGUI, P. FORMENTI, J.-F. DOUSSIN, D. PETITPREZ & P. DESGROUX, 2020. *Hydrophilic properties of soot particles exposed to OH radicals: A possible new mechanism involved in the contrail formation*. Proceedings of the Combustion Institute. Currently under review.

[6]. **SANZ-MORERE et al. 2020**

I. SANZ-MORERE, S. D. EASTHAM, F. ALLROGGEN, R. L. SPETH, S. R. H. BARRETT, 2020. Effect of contrail overlap on radiative impact attributable to aviation contrails. Atmospheric Chemistry and Physics. Currently under review.

[7]. **LEE et al. 2020**

D.S. LEE, D.W. FAHEY, A.S. KOWRON, M. R. ALLEN, U. BURKHARDT, Q. CHENE, S.J. DOHERTY, S. FREEMAN, P.M. FORSTER, J. FUGLESTVET, A. GETTELMAN, R.R. DE LEON, L.L. LIM, M.T. LUND, R.J. MILLAR, B. OWEN, J.E. PENNER, G. PITARI & J. WILCOX, 2020. *The*

contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. Atmospheric Environment. 244 (1), September 2020.

[8]. **TEOH et al. 2020**

R. TEOH, U. SCHUMANN & M.E.J. STETTLER, 2020. *Beyond Contrail Avoidance: Efficacy of Flight Altitude Changes to Minimise Contrail Climate Forcing.* Aerospace, August 2020.

[9]. **BICKEL et al. 2020**

M. BICKEL, M. PONATER, L. BOCK, U. BURKHARDT & S. REINEKE, 2020. *Estimating the effective Radiative Forcing of Contrail Cirrus.* Journal of Climate. 33(5): 1991–2005, February 2020.

[10]. **TEOH et al. 2020 b**

R. TEOH, U. SCHUMANN, A. MAJUMDAR & M.E.J. STETTLER, 2020. *Mitigating the Climate Forcing of Aircraft Contrails by Small-Scale Diversions and Technology Adoption.* Environmental Science & Technology. 54(5): 2941–2950, 2020.

[11]. **BOCK & BURKHARDT 2019**

L. BOCK & U. BURKHARDT. *Contrail cirrus radiative forcing for future air traffic.* Atmospheric Chemistry and Physics. 19(12): 8163–8174, June 2019.

[12]. **SCHEELHAASE 2019**

J.D. SCHEELHAASE. *How to regulate aviation's full climate impact as intended by the EU council from 2020 onwards.* Journal of Air Transport Management. 75(1): 68–74, March 2019.

[13]. **JUNGBLUTH & MEILI 2018**

N. JUNGBLUTH & C. MEILI, 2018. *Recommendations for calculation of the global warming potential of aviation including the radiative forcing index.* The International Journal of Life Cycle Assessment. 24(37), November 2018.

[14]. **BURKHARDT et al. 2018**

U. BURKHARDT, L. BOCK & A. BIER, 2018. *Mitigating the contrail cirrus climate impact by reducing aircraft soot number emission.* Climate and Atmospheric Science. 37(1), December 2018.

[15]. **KÄRCHER 2018**

B. KÄRCHER, 2018. *Formation and Radiative Forcing of Contrail Cirrus.* Nature Communications. 9(1), December 2018.

[16]. **LEE 2018**

D.S. LEE, 2018. *The current state of scientific understanding of the non-CO2 effects of aviation on climate.* Report commissioned by the Department of Transport (UK). December 2018.

[17]. **BIER et al. 2017**

- A. BIER, U. BURKHARDT & L. BOCK. *Synoptic Control of Contrail Cirrus Life Cycles and Their Modification Due to Reduced Soot Number Emissions*. Journal Geophysical Research: Atmospheres. 122 (1): 11584–11603, November 2017.
- [18]. **SCHUMANN & MAYER 2017**
U. SCHUMANN & B. MAYER, 2017. Sensitivity of surface temperature to radiative forcing by contrail cirrus in a radiative-mixing model. Atmospheric Chemistry and Physics. 17(1): 13833–13848, November 2017.
- [19]. **CHEN & GETTELMAN 2016**
C.-C. CHEN & A. GETTELMAN, 2016. Simulated 2050 aviation radiative forcing from contrails and aerosols. Atmospheric Chemistry and Physics. 16(1): 7317–7333, June 2016.
- [20]. **M. TESCHE et al. 2016**
M. TESCHE, P. ACHTERT, P. GLANTZ & K.J. NOONE, 2016. Aviation effects on already-existing cirrus clouds. Nature Communications. 7(1), June 2016.
- [21]. **BOCK & BURKHARDT 2016**
L. BOCK & U. BURKHARDT, 2016. *The temporal evolution of a long-lived contrail cirrus cluster: Simulations with a global climate model*. Journal of Geophysical Research Atmospheres. 121 (1), 3548–3565, April 2016.
- [22]. **DAHLMANN et al. 2016**
K. DAHLMANN, V. GREWE, C. FRÖMMING & U. BURKHARDT, 2016. *Can we reliably assess climate mitigation options for air traffic scenarios despite large uncertainties in atmospheric processes?* Transportation Research Part D. 46(1): 40–55, March 2016.
- [23]. **SCHUMANN et al. 2015**
U. SCHUMANN, J.E. PENNER, Y. CHEN, C. ZHOU & K. GRAF, 2015. *Dehydration effects from contrails in a coupled contrail–climate model*. Atmospheric Chemistry and Physics. 15(19), October 2015.
- [24]. **SHINE 2015**
K. SHINE, 2015. *Radiative forcing and climate change*. Encyclopedia of Aerospace Engineering, John Wiley & Sons. Pages 1–11, June 2015.
- [25]. **CHOOBARI et al. 2014**
O.A. CHOOBARI, P. ZAWAR-REZA & A. STURMAN, 2013. *The global distribution of mineral dust and its impacts on the climate system*. Atmospheric Research. 138 (1): 152–165, March 2014.
- [26]. **CHEZE et al. 2013**
B. Chèze, J. Chevallier & P. Gastineau, 2013. *Will technological progress be sufficient to stabilize CO2 emissions from air transport in the mid-term ?*: Cahiers de l'économie. Série Recherche, n° 94. December 2013.

[27]. CHEN & GETTELMAN 2013

C.-C. CHEN & A. GETTELMAN. Simulated radiative forcing from contrails and contrail cirrus. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 13(1): 12525–12536, December 2013.

[28]. JEBBERGER *et al.* 2013

P. JEBBERGER, C. VOIGT, U. SCHUMANN, I. SÖLCH, H. SCHLAGER, S. KAUFMANN, A. PETZOLD, D. SCHÄUBLE & J.-F. GAYET. *Aircraft type influence on contrail properties*. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 13(1): 11965–11984, December 2013.

[29]. BOUCHER *et al.* 2013

O. BOUCHER, D. RANDALL, P. ARTAXO, C. BRETHERTON, G. FEINGOLD, P. FORSTER, V.-M. KERMINEN, Y. KONDO, H. LIAO, U. LOHMANN, P. RASCH, S.K. SATHEESH, S. SHERWOOD, B. STEVENS & X.Y. ZHANG, 2013. *Clouds and Aerosols*. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2013.

[30]. KHODAYARI *et al.* 2013

A. KHODAYARI, D.J. WUEBBLES, S.C. OLSEN, J.S. FUGLESTVEDT, T. BERNTSEN, M.T. LUND, I. WAITZ, P. WOLFE, P.M. FORSTER, M. MEINSHAUSEN, D.S. LEE & L.L. LIM, 2012. *Intercomparison of the capabilities of simplified climate models to project the effects of aviation CO₂ on climate*. *Atmospheric Environment*. 75(1): 321–328, August 2013.

[31]. SKOWRON *et al.* 2013

A. SKOWRON, D.S. LEE & R.R. DE LEON, 2013. *The assessment of the impact of aviation NO_x on ozone and other radiative forcing responses: The importance of representing cruise altitudes accurately*. *Atmospheric Environment*, 74(1): 159–168, August 2013.

[32]. GIRARDET & SPINLER 2013

D. GIRARDET & S. SPINLER, 2013. *Does the aviation emission trading system influence the financial evaluation of new airplanes? An assessment of present values and purchase options*. *Transportation Research Part D*. 20(1): 30–39, May 2013.

[33]. DEUBER *et al.* 2013

O. DEUBER, M. SIGRUN, S. ROBERT, P. MICHAEL & L. LING. *A physical metric-based framework for evaluating the climate trade-off between CO₂ and contrails—The case of lowering aircraft flight trajectories*. *Environmental Science & Policy*. 25(1): 176–185, January 2013.

[34]. KÖHLER *et al.* 2013

M.O. KÖHLER, G. RÄDEL, K.P. SHINE, H.L. ROGERS & J.A. PYLE, 2013. *Latitudinal variation of the effect of aviation NO_x emissions on atmospheric ozone and methane and related climate metrics*. *Atmospheric Environment*. 64(1): 1–9, January 2013.

[35]. ÅKERMAN 2012

J. ÅKERMAN, 2012. *Climate impact of international travel by Swedish residents*. *Journal of Transport Geography*. 25(1): 87–93, November 2012.

[36]. HOWITT et al. 2011

O.J.A. HOWITT, M.A. CARRUTHERS, I.J. SMITH & C.J. RODGER, 2011. *Carbon dioxide emissions from international air freight*. Atmospheric Environment, 45(39): 7036–7045, December 2011.

[37]. DORBIAN et al. 2011

C.S. DORBIAN, P.J. WOLFE & I.A. WAITZ, 2011. *Estimating the climate and air quality benefits of aviation fuel and emissions reductions*. Atmospheric Environment, 45(16): 2750–2759, May 2011.

[38]. AZAR & JOHANSSON 2012

C. AZAR & D.J.A. JOHANSSON 2012. *Valuing the non-CO2 climate impacts of aviation*. Climatic Change. 111 (1): 559–579, April 2012.

[39]. FORSYTH 2011

P. FORSYTH, 2011. *Environmental and financial sustainability of air transport: Are they incompatible?* Journal of Air Transport Management. 17(1): 27–32, January 2011.

[40]. MYHRE ET AL. 2011

G. MYHRE, K.P. SHINE, G. RÄDEL, M. GAUSS, I.S.A. ISAKSEN, Q. TANG, M.J. PRATHER, J.E. WILLIAMS, P. VAN VELTHOVEN, O. DESSENS, B. KOFFI, S. SZOPA, P. HOOR, V. GREWE, J. BORKEN-KLEEFELD, T.K. BERNTSEN & J.S. FUGLESTVEDT, 2011. *Radiative forcing due to changes in ozone and methane caused by the transport sector*. Atmospheric Environment. 45(2): 387–394, January 2011.

[41]. BRÜNING 2010

C. BRÜNING, 2010. *Transport impacts on atmosphere and climate*. Atmospheric Environment. 44(37), December 2010.

[42]. FUGLESTVEDT et al. 2010

J.S. FUGLESTVEDT, K.P. SHINE, T. BERNTSEN, J. COOK, D.S. LEE, A. STENKE, R.B. SKEIE, G.J.M. VELDERS & I.A. WAITZ, 2010. *Transport impacts on atmosphere and climate: Metrics*. Atmospheric Environment. 44(37): 4648–4677, December 2010.

[43]. LEE et al. 2010

D.S. LEE, G. PITARI, V. GREWE, K. GIERENS, J.E. PENNER, A. PETZOLD, M.J. PRATHER, U. SCHUMANN, A. BAIS, T. BERNTSEN, D. IACHETTI, L.L. LIM & R. SAUSEN, 2010. *Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation*. Atmospheric Environment. 44(1): 4678–4734, December 2010.

[44]. SAUSEN 2010

R. SAUSEN, 2010. *Transport impacts on atmosphere and climate*. Atmospheric Environment. 44(37): 4646–4647, December 2010.

[45]. CAPOCCITTI et al. 2010

- S. CAPOCCITTI, A. KHARE & U. MILDENBERGER, 2010. *Aviation Industry—Mitigating Climate Change Impacts through Technology and Policy*. Journal Technology Management & Innovation. 5(2), August 2010.
- [46]. **LEE et al. 2009**
D. S. LEE, D. W. FAHEY, P.M. FORSTER, P.J. NEWTON, R. C. N. WIT, L. L. LIM, B. OWEN & R. SAUSEN, 2009. *Aviation and global climate change in the 21st century*. Atmospheric Environment. 43(22): 3520–3537, July 2009.
- [47]. **WILLIAMS & NOLAND 2006**
V. WILLIAMS & R.B. NOLAND, 2006. *Comparing the CO2 emissions and contrail formation from short and long haul air traffic routes from London Heathrow*. Environmental Science & Policy. 9(5): 487–495, August 2006.
- [48]. **SAUSEN et al. 2005**
R. SAUSEN, I. ISAKSEN, V. GREWE, D. HAUGLUSTAIN, D. S. LEE, G. MYHRE, M. O. KÖHLER, G. PITARI, U. SCHUMANN, F. STORDAL & C. ZEREFOS, 2005. *Aviation radiative forcing in 2000: An update on IPCC (1999)*. Meteorologische Zeitschrift, 14 (4): 555–561, August 2005.
- [49]. **WIT et al. 2005**
R.C.N. WIT, B.H. BOON & A. VAN VELZEN, 2005. Giving wings to emission trading. Inclusion of aviation under the European Emission Trading System (ETS): Design and impacts. Technical Report, Delft University of Technology. July 2005.
- [50]. **SCHUMANN 2005**
U. SCHUMANN, 2005. Formation, properties and climatic effects of contrails. C. R. Physique, 6 (4) : 549– 565, June 2005.
- [51]. **LEE et al. 2005**
D. LEE, L. L. LIM & S. C. RAPER, 2005. *The role of aviation emissions in climate stabilization scenarios*. January 2005.
- [52]. **GIEC 1999**
GIEC, 1999. Rapport spécial du GIEC : L'aviation et l'atmosphère planétaire. 1999.
- [53]. **FUGLESTVEDT et al. 1999**
J. S FUGLESTVEDT., T. K. BERNTSEN, I. S. A. ISAKSEN, H. MAO, X. Z. LIANG & W. C. WANG, 1999. *Climatic forcing of nitrogen oxides through changes in tropospheric ozone and methane*. Global 3D model studies. Atmospheric Environment, 33(1) : 961–977. 1999.
- [54]. **YAMAMOTO et al. 1996**
S. YAMAMOTO, H. KONDO, M. GAMO, S.I MURAYAMA, N. KANEYASU & M. HAYASHI, 1996. *Airplane measurements of carbon dioxide distribution on iriomote island in japan*. Atmospheric Environment, 30(7): 1091–1097. April 1996.
- [55]. **SCHOLL et al. 1996**

L. SCHOLL, L. SCHIPPER & N. KIANG, 1996. *CO2 emissions from passenger transport: A comparison of international trends from 1973 to 1992*. Energy Policy, 24(1): 17–30. January 2006.

Autres références (à partir de la plus récente) :

[56]. **ADEME 2020**

ADEME, 2020. Approche expérimentale du bilan carbone d'une entreprise. Partie 1 — Description de la méthode (version 0): objectifs, résultats exploitables, choix méthodologiques. Novembre 2020.

[57]. **RITCHIE 2020**

Hannah RITCHIE. Climate change and flying: what share of global CO2 emissions come from aviation?. Our World in Data, Octobre 2020. <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-aviation#aviation-accounts-for-2-5-of-global-co2-emissions>

[58]. **CITEPA 2020**

CITEPA, 2020. *Rapport Secten : Bilan des émissions en France de 1990 à 2018*. Juin 2020.

[59]. **GREWE 2018**

V GREWE, 2018. *Climate Impact of Aviation CO2 and non-CO2 effects and examples for mitigation options*. In: T&E Workshop, 23 January 2018.

[60]. **DEMEERSMAN 2017**

X. DEMEERSMAN, 2017. Vers un taux de CO2 jamais vu depuis 200 millions d'années. Futura Planète, Avril 2017. <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/climatologie-taux-co2-atmosphere-atteint-record-jamais-vu-depuis-3-millions-annees-19695/> [consulté le 2020/12]

[61]. **KHOU 2016**

J. — C. KHOU, 2016. *Modélisation des traînées de condensation par interaction entre l'aérodynamique, la cinétique chimique et la microphysique*. Thèse de doctorat de Physique. École de Technologie Supérieure, Université du Québec. 262 pages, Novembre 2016.

[62]. **ANDERSON 2015**

George ANDERSON, 2015. Traînées de condensation produites par des aéronefs : cirrus homogenitus. Image disponible sur <https://cloudatlas.wmo.int/fr/aircraft-condensation-trails.html> [consulté le 2020/10]

[63]. **FUTURA 2008**

FUTURA, 2008. *La Terre vue de l'espace : les traînées de condensation des avions*. www.futura-sciences.com/planete/actualites/meteorologie-terre-vue-espace-trainees-condensation-avions-16729/ [consulté le 2020/11]

[64]. **GIEC 2013**

- GIEC, 2013. *Glossaire*. In: Changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques. 2013. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI_AR5_glossary_FR.pdf [consulté le 2020/11]
- [65]. **Planète viable 2012**
Planète viable, 2012. Forçage radiatif, albédo et gaz à effet de serre. 2012. <https://planeteviable.org/forcage-radiatif-albedo-gaz-a-effet-de-serre/> [consulté le 2020/12]
- [66]. **ACTU ENVIRONNEMENT**
ACTU ENVIRONNEMENT. Dictionnaire environnement : Aérosol. https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/aerosol.php4 [consulté le 2020/11]
- [67]. **Forest of Broceliande**
FOREST OF BROCELIANDE. Bilan énergétique planétaire et bilan radiatif régional. <https://proxy.eplanete.net/galleries/broceliande7/bilan-%C3%A9nerg%C3%A9tique-plan%C3%A9taire-et-bilan-radiatif-r%C3%A9gional> [consulté le 2020/12]

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristiques des traînées de condensation.	14
Tableau 2. Estimation du forçage radiatif (RF) de l’aviation issu des révisions bibliographiques : valeurs globales et annuelles en mW.m ²	18
Tableau 3. Estimation de l’index de forçage radiatif (RFI) de l’aviation issu des révisions bibliographiques.	19
Tableau 4. Valeurs de PRG selon les rapports d’évaluation du GIEC en cours (AR4) et à appliquer en 2023 (AR5)	22
Tableau 5. PRG et GTP pour les émissions de CO ₂ et les effets climatiques des nuages induits* de l’aviation pour l’année 2018.	22

FIGURES

Figure 1. Emissions totales de GES en France du secteur « Transport » pour l’année 2018.....	7
Figure 2. Schéma du bilan énergétique planétaire. En jaune et à gauche : l’apport solaire. En rouge et à droite : l’apport des surfaces.....	10
Figure 3. Taux de CO ₂ dans l’atmosphère depuis la révolution industrielle. Les mesures à Mauna Loa, à Hawaï, ont commencé en 1958.....	11
Figure 4. Traînées persistantes.....	13
Figure 5. Bilan radiatif de la Terre.....	15
Figure 6. Les quatre paramètres pris en compte pour estimer le forçage radiatif d’une substance chimique (ou phénomène).....	16
Figure 7. Composants des forçages radiatifs globaux de l’aviation pour l’année 2018.	17
Figure 8. Schéma conceptuel de l’index de forçage radiatif.	19
Figure 9. Indice de forçage radiatif (RFI) pour l’aviation à émissions constantes de CO ₂ après l’année 2000 ; modèle ajusté à RFI de 1,9 en 2000 et calculé avec le modèle de LEE et al. (2005) [51].	20
Figure 10. Schéma conceptuel du potentiel de réchauffement global (PRG).....	21

SIGLES ET ACRONYMES

ADEME	Agence de l’Environnement et de la Maîtrise de l’Énergie
COV	Composés Organiques Volatils
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
NO ₂	Dioxyde d’azote
CO ₂	Dioxyde de carbone
SO ₂	Dioxyde de soufre
H ₂ O	Eau
HFC	Hydrofluorocarbures
RF	Forçage radiatif, acronyme de l’anglais « Radiative Forcing »
GES	Gaz à Effet de Serre
GTP	Acronyme de l’anglais, « Global Temperature change Potentiel »
GWP	« Global Warming Potential » (en français, PRG)
GIEC	Groupe d’Experts Intergouvernemental sur l’Évolution du Climat
RFI	Index de forçage radiatif, acronyme de l’anglais « Raditive Forcing Index »
CH ₄	Méthane
NO	Monoxyde d’azote
CO	Monoxyde de carbone
AIC	Nuages induits par les avions, acronyme de l’anglais « Aircraft-Induced Clouds »
O ₃	Ozone
PFC	Perfluorocarbures
PRG	Potentiel de Réchauffement Global (en anglais, GWP)
SF ₆	Hexafluorure de soufre
N ₂ O	Protoxyde d’azote

NF ₃	Trifluorure d'azote
-----------------	---------------------

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME — l'Agence de la transition écologique — nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, air, économie circulaire, alimentation, déchets, sols, etc., nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



État de l'art de la recherche scientifique sur l'impact climatique des traînées de condensation des avions

Aujourd'hui la question des effets liés aux émissions de CO₂ est bien connue et traitée. Avant méconnus, les effets des émissions hors CO₂ sont plus étudiés au niveau scientifique, notamment les effets de traînées de condensation et sa quantification qui sont l'objet de ce document.

À partir de la revue bibliographique ici réalisée, l'évolution des connaissances démontre une plus grande importance des effets des traînées de condensation sur le climat à mesure que les méthodologies sont améliorées (de l'ordre de 50 % des impacts climatiques de l'aviation peuvent être imputables aux traînées de condensation).

Il est ainsi recommandé de prendre en compte ce paramètre lors des évaluations de l'impact climatique global de l'aviation. Inclure uniquement les effets des émissions de CO₂ pourrait conduire à de fausses incitations car la réduction de ces émissions pourrait entraîner une augmentation des effets des traînées de condensation.

