



L'impact du transport aérien sur le climat et comment le mesurer

Éléments fondamentaux

Les émissions produites au niveau mondial par le trafic aérien, que ce soit sous forme de CO₂ d'origine fossile ou sous d'autres formes (effets hors CO₂), ont un impact sur le climat.

L'impact des émissions de CO₂ d'origine fossile

La combustion de matières fossiles (comme l'essence, le diesel, le gaz, le charbon) produit essentiellement du dioxyde de carbone (CO₂) et de la vapeur d'eau. Le CO₂ est un gaz non toxique et n'entre pas, dès lors, dans la catégorie des polluants. Il est toutefois le principal agent responsable de l'effet de serre et joue un rôle très important dans le cycle global du carbone qui se produit entre l'atmosphère, les océans et la terre. Comme le souligne le document de l'OFAC sur les émissions de CO₂ du transport aérien, le CO₂ rejeté dans l'atmosphère a une très longue durée de vie - de l'ordre du siècle en moyenne - jusqu'à ce qu'il soit absorbé (p. ex. par la végétation). Mais une part significative des émissions contribuant à l'effet de serre stagne bien plus longtemps dans l'atmosphère¹. Toutes sources confondues, les émissions de CO₂ produites actuellement s'accumulent dans l'atmosphère et déploient leurs effets sur une très longue période. C'est là une différence majeure par rapport aux autres impacts du trafic aérien sur le climat.

À très haute altitude (là où même les avions ne volent pas), l'atmosphère et le CO₂ sont très bien mélangés. Autrement dit, en termes d'effet sur le climat, il importe peu que le CO₂ provienne d'activités terrestres ou d'un avion volant à haute altitude. L'effet sur le climat d'une tonne de CO₂ produite par un réacteur d'avion est identique à celui d'une tonne de CO₂ provenant d'une autre source. Cela est également valable pour une tonne CO₂ qui n'est pas rejetée dans l'atmosphère. Les émissions de CO₂ du trafic aérien mondial² représentent de **2 % à 2,5 %** des émissions de CO₂ fossiles anthropiques³, ce qui correspond également à l'effet CO₂ imputable à l'aviation.

Autres effets du transport aérien (effets hors CO₂)

Les autres effets (effets hors CO₂) comprennent l'impact des gaz, comme l'oxyde d'azote, et des particules de suie, qui n'ont pas d'effet direct sur le climat mais modifient néanmoins la composition de l'atmosphère et ont des répercussions sur la nébulosité. Les effets hors CO₂ du transport aérien ont ceci de particulier que leur impact diffère de celui des émissions de gaz à effet de serre⁴ :

¹ De 20 à 40% du CO₂ issu de sources fossiles stagne pendant plusieurs millénaires dans l'atmosphère : Dr. David W. Fahey, NOAA Earth System Research Laboratory, CO₂ – the forever gas, https://www.esrl.noaa.gov/csd/staff/david.w.fahey/david.w.fahey.presentations/FaheyNISTClimateTalk_11Jun2014.pdf

² Soit la somme des vols domestiques et des vols internationaux pour le monde entier. Sources : Organisation de l'aviation civile internationale (OACI, Agence internationale de l'énergie (AIE 2018), total 2015 : env. 800 millions de tonnes de CO₂.

³ Agence internationale de l'énergie (AIE 2018), env. 35 000 millions de tonnes de CO₂

⁴ Gaz qui, en absorbant le rayonnement thermique, contribue à l'effet de serre

- Ils peuvent aussi bien favoriser le réchauffement que le refroidissement de la Terre.
- En général, il n'y pas d'« effet cumulatif » de l'effet de serre sur la longue durée comme dans le cas du CO₂.
- Les effets sont de brève durée (minutes, heures, jours) comparés à l'effet de serre induit par les émissions de CO₂.



Source : OFAC

La formation des traînées de condensation qui se transforment parfois en nuages illustre bien la difficulté à appréhender les effets hors CO₂ de l'aviation. Dans certaines couches de l'atmosphère, ces nuages, qui sont formés de cristaux de glace, réfléchissent le rayonnement solaire en direction de l'espace (et diminuent ce faisant les radiations à ondes courtes en direction de la Terre). Par contre, ils réfléchissent aussi le rayonnement thermique émanant de la Terre (rayonnement à grande longueur d'onde). Le bilan et l'intensité de ces effets locaux sont fonction de la distribution granulométrique des cristaux de glace, de la

densité de nuages, de l'heure de la journée et des caractéristiques de rayonnement de la surface terrestre sous ces nuages (c'est-à-dire de l'intensité de la réflexion à la surface terrestre)⁵.

Eu égard notamment au programme d'actions coordonné sur le plan international, la question de l'impact à long terme des effets hors CO₂ est cruciale. Les affirmations dans ce domaine doivent être très robustes en particulier à cause du phénomène de vases communicants qui est à l'œuvre ici. En effet, des facteurs à la fois techniques et opérationnels font que toute mesure de réduction des émissions d'oxyde d'azote et des traînées de condensation, deux effets hors CO₂, se traduit mécaniquement par une augmentation des émissions de CO₂. Par exemple, il serait possible de faire en sorte que les avions évitent les couches nuageuses humides et froides en volant à des altitudes moindres afin de diminuer la formation de nuages de cristaux de glace. Or, cela se ferait au prix d'une consommation accrue de carburant et donc d'un surcroît d'émissions de CO₂ par rapport aux pratiques actuelles (cf. le document « Le casse-tête des avions écologiques »). Une proportion significative des émissions de CO₂ supplémentaires ainsi générées stagnerait pendant plusieurs siècles dans l'atmosphère. Dans ce contexte, vu les grandes incertitudes entourant les effets des traînées de condensation, en l'état actuel des connaissances, rien ne justifie de faire de la diminution des traînées de condensation un objectif prioritaire par rapport à la diminution des émissions de CO₂, c'est-à-dire au prix d'une augmentation de celles-ci.

Selon l'analyse de l'OFAC, il est en revanche possible de diminuer les émissions de suie des gros réacteurs d'avion de conception nouvelle sans augmenter les émissions d'oxyde d'azote, ni la consommation de carburant. Il y a près de dix ans, l'OFAC, avec pour mot d'ordre de « réduire les émissions potentiellement dommageables pour le climat qui peuvent l'être lorsqu'elles n'impliquent aucune augmentation des émissions de CO₂ », a travaillé à l'élaboration d'un procédé de mesure des émissions de suie des réacteurs d'avion et à la définition de valeurs limites d'émissions. En février 2019, couronnant les efforts de l'OFAC, le CAEP de l'OACI⁶ adoptait les premières normes mondiales d'émissions de particules. Il est cependant impossible de quantifier l'effet que cette mesure aura sur le climat. Celle-ci est basée sur le principe de précaution et a abouti car elle n'a pas d'incidence sur la diminution des émissions de CO₂ et est techniquement faisable et économiquement supportable.

⁵ Cf. GIEC (1999) *Aviation and the Global Atmosphere*

⁶ Comité de la protection de l'environnement en aviation de l'OACI qui est chargé de définir les normes environnementales applicables aux aéronefs

Les spécificités des effets hors CO₂ et leurs implications que l'on vient de décrire, montrent la difficulté à mesurer la totalité de l'impact de l'aviation sur le climat. Nous allons maintenant présenter trois manières de mesurer les changements de température à la surface terrestre et leurs limites.

Forçage radiatif

Le forçage radiatif consiste à établir un bilan radiatif à la limite supérieure de la troposphère, soit à environ 10 km du sol, par modélisation du flux de chaleur dirigé contre la surface de la Terre et de celui dirigé contre le ciel. Si le bilan radiatif est positif (le flux de chaleur dirigé contre le sol est plus important que le flux de chaleur provenant du sol), la troposphère tend à se réchauffer ; s'il est négatif, celle-ci tend à se refroidir (p. ex. la nuit lorsque le ciel est dégagé). L'effet (positif ou négatif) sur le bilan radiatif de divers gaz à effet de serre et d'autres émissions a été déterminé selon cette approche. Le forçage radiatif dû à l'aviation est ainsi estimé à 5 % du forçage radiatif anthropique total⁷, tandis que la part du forçage radiatif des émissions de CO₂ du trafic aérien mondial est estimée à près de 2 %⁷. Plusieurs auteurs en ont déduit à tort que les effets hors CO₂ devaient être au moins deux fois plus importants que l'effet des émissions de CO₂ (5% / 2%). Or, comme le soulignent plusieurs publications scientifiques^{8,9,10}, le concept de forçage radiatif ne permet pas de mesurer les effets hors CO₂ de manière analogue aux effets des émissions de CO₂, compte tenu des différences de nature entre ces deux catégories d'émissions.

Potentiel de réchauffement global

Le concept de potentiel de réchauffement global (PRG) a été utilisé dans le cadre du Protocole de Kyoto afin de mieux comparer l'effet des différents gaz à effet de serre. Le PRG compare la quantité de chaleur qui est « piégée » dans l'atmosphère durant une période définie par une certaine quantité (exprimée en kilos) d'un gaz à effet de serre, d'une part, et la quantité de chaleur d'une quantité équivalente de CO₂ sur la même période, de l'autre. Cette valeur comparative est exprimée pour les gaz à effet de serre en équivalents CO₂ (eq CO₂). Mais cet outil qui est parfaitement valide dans le cas d'émissions de gaz à effet de serre comme le méthane dans le domaine de l'agriculture est largement inopérant pour les effets hors CO₂ de l'aviation. Ses limites sont notamment atteintes lorsqu'il s'agit de comparer des effets de courte durée, dont certains n'ont même pas le caractère d'émission, avec des gaz à effet de serre à la durée de vie très longue (CO₂). Cette méthode comporte un élément subjectif susceptible d'influencer le résultat puisque le choix de la durée pour mesurer l'effet sur le long terme est laissé à l'utilisateur (*user related choice*)⁹. En optant par exemple pour une période de cent ans, l'impact sur le climat sera mesuré sur cette période même si une bonne partie des effets sur le climat causés par le CO₂ rejeté aujourd'hui s'étendra au-delà de cent ans. Certains auteurs ont avancé dernièrement qu'en essayant d'intégrer l'effet des traînées de condensation et en prenant pour référence une période de cent ans, il est possible d'estimer un PRG de 2 pour les effets hors CO₂ du transport aérien, encore que les grandes incertitudes quant aux effets induits par les traînées de condensation aient été négligées¹⁰. Il faut bien comprendre que le PRG n'exprime pas l'impact réel des émissions gazeuses sur l'augmentation moyenne des températures à la surface de la Terre : s'il est vrai qu'à quantités émises égales, un puissant gaz à effet de serre à la courte durée de vie dans l'atmosphère peut avoir un PRG identique à un gaz moins nocif mais à la durée de vie plus longue, leur effet sur le

⁷ Lee D. S., Fahey D., Forster P., Newton P., Wit R.C.N., Lim L. L., Owen B., Sausen R. (2009) Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmos. Environ.* 43, 3520-3537.

⁸ Wuebbles D., Forster P., Rogers H., and Herman R. (2010). Issues and Uncertainties Affecting Metrics for Aviation impacts on Climate. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 91, 491-496. 10.1175/2009BAMS2840.1.

⁹ Fuglestvedt J.S. et al. (2010) Transport impacts on atmosphere and climate: Metrics. *Atmos. Environ.* 44, 4648-4677.

¹⁰ Lee D. S., Pitari G., Grewe V., Gierens K., Penner J.E., Petzold A., Prather M., Schumann U., Bais A., Bernsten T., Iachetti D., Lim L.L. and Sausen R. (2010) Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation. *Atmos. Environ.* 44, 4678-4734.

réchauffement peut cependant différer¹¹. Pour calculer le PRG à cent ans des effets du transport aérien, on a pris pour hypothèse fondamentale que le changement de température par unité de forçage radiatif pour tous les éléments des effets hors CO₂ est constant, quel que soit l'effet considéré. Or, plusieurs auteurs montrent que cela ne correspond pas à la réalité^{12 13}. Une autre étude portant sur les effets sur le climat des avions à hydrogène¹⁴, arrive à la conclusion que l'effet sur l'augmentation de la température des traînées de condensation par unité de forçage radiatif ne correspond qu'à 60 % de l'effet causé par le CO₂. S'appuyant sur le modèle climatique du UK Met Office, une étude¹⁵ aboutit même à un pourcentage de 31 %. Plus récemment, Schumann et Mayer (2017)¹⁶ estiment que les traînées de condensation ont un pouvoir de réchauffement de la surface terrestre inférieur par unité de forçage à celui du CO₂ et que dès lors le PRG à cent ans des effets hors CO₂ est très vraisemblablement inférieur à 2. Par conséquent, lorsque l'on essaie d'exprimer l'effet global du transport aérien sur le climat en équivalents CO₂, le doublement des émissions effectives de CO₂ conduirait très vraisemblablement à surestimer l'impact à long terme du transport aérien sur le climat.

Potentiel d'évolution de la température planétaire

Afin d'exprimer la relation entre les émissions et les variations de température à la surface terrestre, un autre concept a été imaginé, le potentiel d'évolution de la température planétaire (*Global Temperature Potential*, GTP). Cet outil vise à estimer l'importance de l'évolution de la température au terme d'une période définie (par exemple cent ans) lorsqu'une substance affectant le climat ou ses précurseurs sont rejetés dans l'atmosphères. Comme dans le cas du PRG, le GTP peut servir à évaluer les émissions par référence au CO₂. Cet outil impose également de fixer un horizon temporel, ce choix influençant grandement le résultat final. Le GTP de l'ensemble des effets hors CO₂ du transport aérien en 2005 avec un horizon de référence de cent ans a été estimé à 1,1^{9,10}. Cette valeur montre que les effets du transport aérien sur l'évolution de la température planétaire à cent ans sont presque entièrement dus aux émissions de CO₂.

¹¹ K.P. Shine, J.S. Fuglestedt and N. Stuber, "An alternative to the Global Warming Potential for comparing climate impacts of emissions of greenhouse gases", 2003

¹² Joshi M., Shine K., Ponater M., Stuber N., Sausen R. und Li L. (2003). A comparison of climate response to different radiative forcings in three general circulation models: towards an improved metric of climate change. *Clim. Dynam.* 20, 843-854. DOI: 10.1007/s00382-003-0305-9

¹³ Hansen J. et al. (2005). Efficacy of climate forcings. *J. Geophys. Res.* 110, D18104. DOI: 10.1029/2005JD005776

¹⁴ Ponater M., Pechtl S., Sausen R., Schumann U., Hüttig G. (2006) Potential of the cryoplane technology to reduce aircraft climate impact: A state-of-the-art assessment. *Atmos. Environ.* 40, 6928-6944.

¹⁵ Rap. A., Forster P. M., Haywood J. M., Jones A., Boucher O. (2010) Estimating the climate impact of linear contrails using the UK Met Office climate model. *Geophys. Res. Lett.* 37, doi: 10.1029/2010GL045161.

¹⁶ Schumann U., Mayer B. (2017) Sensitivity of surface temperature to radiative forcing by contrail cirrus in a radiative-mixing model. *Atmos. Chem. Phys.* 17, 13833-13848.

En conclusion

Les stratégies de réduction des émissions de CO₂ promettent des avantages tangibles et durables alors que la réduction des effets hors CO₂ aboutit à des résultats aléatoires quand elle ne se traduit pas par une augmentation des émissions de CO₂. Ainsi, des démarches telles que la compensation des émissions de CO₂ ne devraient porter que sur les émissions effectives de CO₂. Pour l'estimation des coûts climatiques occasionnés par le transport aérien, un PRG de 1,35 pour un horizon de cent ans a été retenu, compte tenu des grandes incertitudes et de l'impossibilité de comparer l'impact des traînées de condensation avec les gaz à effet de serre^{9,10}. Les résultats des dernières recherches (voir *supra*) montrent que cette option est encore valable – pour autant que l'on considère que le PRG à cent ans soit pertinent. Les estimations ayant trait à l'impact des émissions de CO₂ et des effets hors CO₂ sur l'évolution de la température planétaire montrent que les émissions CO₂ sont déterminantes et qu'il est donc rationnel de vouloir en priorité réduire les émissions effectives de CO₂ dans l'aviation pour contenir l'augmentation de la température planétaire.