



Sciences
Technologies
Santé

2D

Travaux dirigés

Réduction des émissions de GES

Aéronautique

Auteur :

GROUPE
INSA

Réalisation :

fondation
UVED



L'aviation commerciale a représenté en 2019 entre 3,5% et 8,3% de l'empreinte carbone de la France, en fonction des hypothèses prises pour faire le calcul. La contribution de l'aviation n'étant pas uniquement due aux émissions de GES mais également à d'autres mécanismes, les scientifiques étudient souvent l'impact de l'aviation sur le forçage radiatif. La définition donnée par le GIEC en est la suivante : « *Le forçage radiatif mesure l'impact de certains facteurs affectant le climat sur le bilan énergétique du système couplé Terre/atmosphère. Ce bilan radiatif contrôle la température de la surface du globe. [...] Le forçage radiatif est généralement quantifié comme "le taux de transfert d'énergie par unité de surface du globe, mesuré dans les couches supérieures de l'atmosphère" et s'exprime en "watts par mètre carré" (W/m²). Un forçage radiatif causé par un ou plusieurs facteurs est dit positif lorsqu'il conduit à une augmentation de l'énergie du système Terre/atmosphère et donc au réchauffement du système. Dans le cas contraire, un forçage radiatif est dit négatif lorsque l'énergie diminue, entraînant un refroidissement du système* ». Dans la suite de ce TD, vous trouverez parfois mention du « forçage radiatif effectif ». La différence entre les deux est très technique, et vous n'avez pas à vous en soucier à ce stade.

Question 1 : Selon le graphique ci-dessous, quel a été le taux d'augmentation annuel moyen des émissions CO₂ de l'aviation entre 1990 et 2018 ? Que pouvons-nous conclure de ce graphique ?

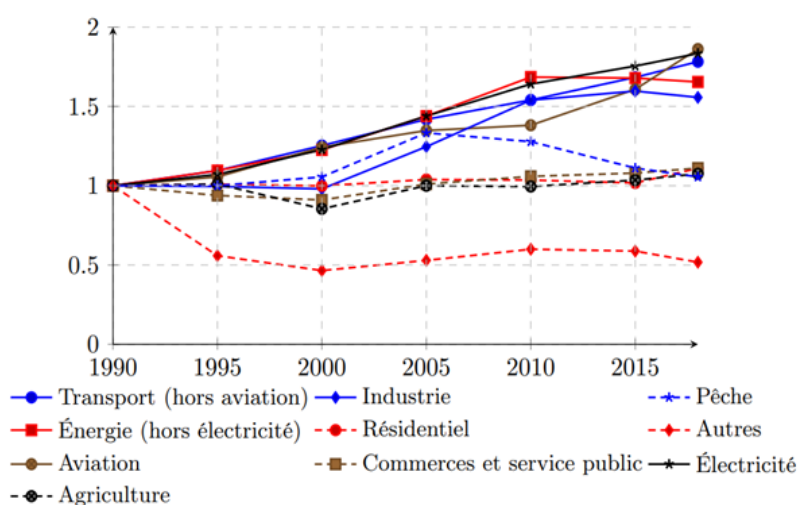


Figure 1 : Facteur d'augmentation des émissions de CO₂ par rapport à leur niveau de 1990 pour différents secteurs d'activité, selon les données de l'AIE (Agence internationale de l'énergie)¹ (CC BY SA).

Question 2

D'autres effets que les émissions CO₂ ont une contribution importante au réchauffement climatique. Ils sont simplement appelés les « effets non-CO₂ ». Tout d'abord, d'autres composés que le CO₂ issus de la combustion du kérosène sont rejetés dans l'atmosphère pendant le vol :

¹ « *Référentiel ISAE-SUPAERO, Aviation et Climat. Version 1.1.* » S. Delbecq, J. Fontane, N. Gourdain, H. Mugnier, T. Planès et F. Simatos, 2021.

la vapeur d'eau, les aérosols (suie et sulfate), le méthane (CH₄) et les oxydes d'azote (NO_x). Les effets directs sur le climat de ces différents composés est faible (quelques pourcents au plus de l'effet total) et sont généralement négligés. Mais ces composés ont des effets indirects.

D'une part, sous certaines conditions météorologiques particulières, les aérosols éjectés des réacteurs entraînent la formation de traînées de condensation (*contrails* en anglais). Certaines traînées ont un effet refroidissant pour le climat via une modification de l'albédo². D'autres, au contraire, augmentent l'effet de serre. Mais en moyenne, les traînées ont un pouvoir réchauffant. La persistance des traînées (de quelques heures à plusieurs jours) dépend des conditions atmosphériques ambiantes à l'altitude du vol (température et humidité relative) et influe fortement sur leur pouvoir réchauffant ; elle est très difficile à prévoir. Les avions passent 10 à 15% de leur temps en croisière dans les régions qui favorisent la création de traînées persistantes.

D'autre part, les NO_x réagissent avec les gaz présents dans l'atmosphère. À court terme, les NO_x réagissent avec l'oxygène de l'air pour créer de l'ozone (O₃), ce qui augmente le forçage radiatif car l'ozone est un gaz à effet de serre. Les oxydes d'azote réagissent également avec le méthane (CH₄), diminuant son abondance et sa durée de vie dans l'atmosphère ; ceci a un effet refroidissant. Au final, la contribution des NO_x à l'effet de serre est un terme de forçage positif.

D'après la figure ci-dessus, quels sont les mécanismes qui contribuent le plus au réchauffement climatique : les effets CO₂ ou les effets non-CO₂ ? Quelles sont selon vous les conclusions principales que l'on peut tirer de ce graphique ?

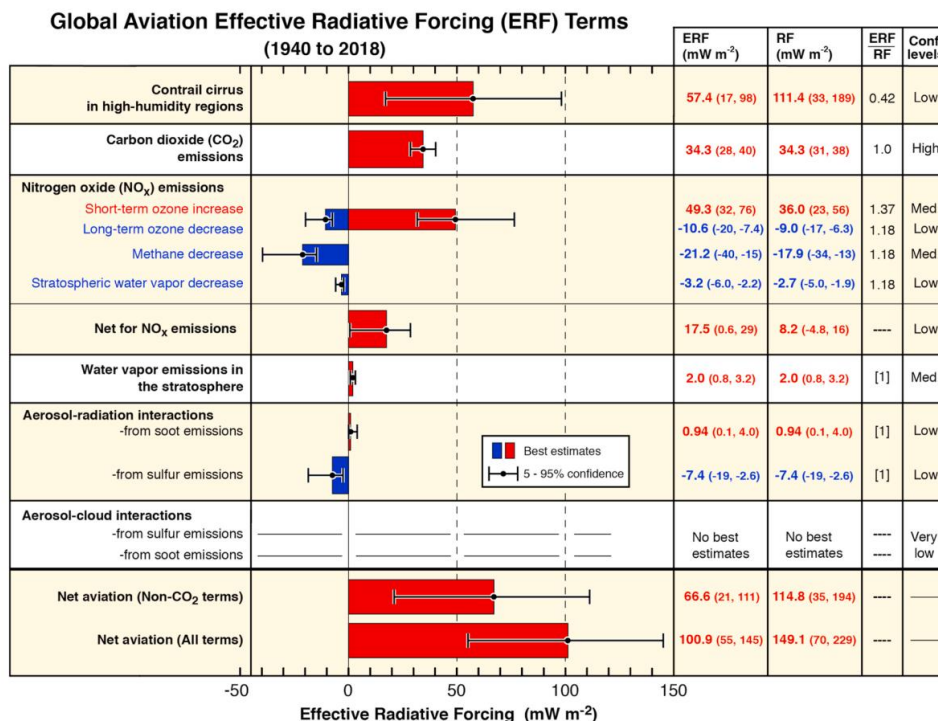


Figure 2 : Répartition des termes du forçage radiatif effectif dus à l'aviation mondiale de 1940

² L'albédo est la fraction de l'énergie solaire incidente renvoyée vers l'atmosphère. La banquise et la neige, par exemple, augmentent l'albédo.

à 2018. Les barres et les moustaches indiquent respectivement les meilleures estimations du forçage radiatif effectif et les intervalles de confiance à 90 %. Les barres rouges indiquent les termes de réchauffement et les barres bleues les termes de refroidissement³. Tous droits réservés ©.

Question 3 : Commentez ces différentes phrases suivant leur exactitude, neutralité, et utilisation dans l'espace public :

1. « En France, les émissions du secteur aérien représentent une part minime, selon l'inventaire national des émissions 2018, qui attribue au secteur aérien 4 % des émissions de CO₂ globales du secteur des transports et 1,6 % des émissions totales du pays » (Les Echos, 22 mars 2021).
2. « Les rejets de CO₂ de ce secteur ne représentent que 2 % des émissions dans le monde (1,4 % en France) » (La Dépêche, 12 avril 2021).
3. « Pour la période entre 1940 et 2018, le forçage radiatif effectif net de l'aviation est de +100,9 mW m⁻² (...). Le pourcentage de contributions de l'aviation au forçage radiatif effectif en 2011 est de 3,5 % » (Lee et al., article scientifique³ de 2021).
4. « Dans leur analyse, [Lee et ses collègues] révèlent que prendre en compte les effets CO₂ et non-CO₂ porterait la contribution de l'aviation à 3,5 % des émissions de CO₂ équivalent. » (P. Chiambaretto, scientifique dont la chaire de recherche est financée par le secteur de l'aviation, dans un article sur le flight shame⁴).
5. « Même si l'on ne voit pas de tendance particulière au sein de la période 2000-2018, il est néanmoins possible de calculer une part moyenne sur cette période, donnant lieu à une valeur de 4,8% d'augmentation du forçage radiatif effectif, une valeur plus importante que les 3,8% de Lee et al. [les auteurs font bien allusion aux 3,5% de Lee et al., mais avec une valeur recalculée à partir de données mises à jour, NDLR] de la période 1750-2018 (cf. Figure 3)" - scientifiques d'ISAE Sup'Aéro (citation reformulée à partir d'un paragraphe du [Référentiel Aviation et Climat](#)).

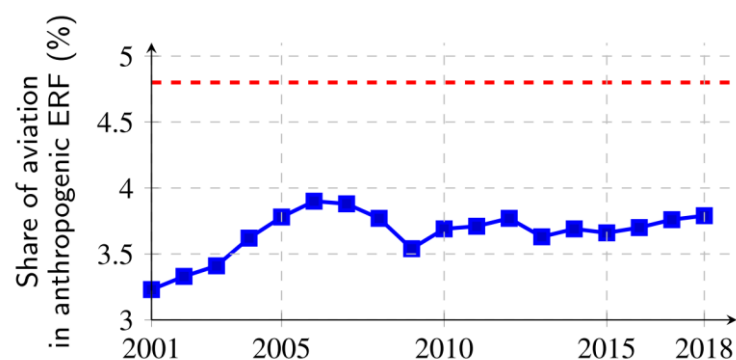


Figure 3 : La ligne inférieure représente pour chaque année la part de l'aviation dans le forçage radiatif effectif (ERF) calculé depuis 1750. Par exemple, la valeur de la courbe en

³ « [The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018](#) », D.S. Lee et al., Atmospheric Environment 244, 117834 (2021)

⁴ « [Where does flygskam come from? The role of citizens' lack of knowledge of the environmental impact of air transport in explaining the development of flight shame](#) », Journal of Air Transport Management 93, 102049 (2021)

2010 correspond au rapport entre l'ERF due à l'aviation entre 1750 et 2010, divisée par l'ERF global sur la même période. La ligne supérieure en pointillé, située à 4,8 %, représente la part de l'ERF due à l'aviation sur la période 2000-2018, ce qui montre que la part de l'aviation dans l'augmentation de l'ERF est plus élevée sur les périodes récentes que sur les périodes plus longues⁵.

Question 4 : Quelles sont d'après vous les principales pistes envisagées par le secteur aérien pour réduire sa contribution au réchauffement climatique ?

Question 5 : Ordres de grandeurs liés à une éventuelle aviation bas-carbone.

L'objectif de ce problème est de calculer quelques ordres de grandeur au sujet d'une éventuelle aviation « bas-carbone ». Deux types de carburants « bas-carbone » seront évalués : l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau et les agrocarburants. Pour faire parler les chiffres de production électrique trouvés, on les comparera à la production électrique française actuelle, et on les convertira en nombres de réacteurs nucléaires, en surface de fermes photovoltaïques ou surfaces de fermes éoliennes. Pour les agro-carburants, on pourra comparer les surfaces agricoles nécessaires à la surface agricole utile (S.A.U.) de la France. Les données de l'exercice concernent l'aéroport de Roissy, le principal aéroport international français. Pour obtenir les chiffres pour l'ensemble de l'aviation française, il suffit de multiplier tous les résultats obtenus par 1,73.

Voici la liste des étapes que vous pourrez suivre pour résoudre l'exercice : i) redémontrer la relation entre les MJ et les kWh. ii) Calculer l'énergie contenue dans le kérosène utilisé à Roissy. iii) Calculer le rendement énergétique de la production d'hydrogène liquide. iv) Calculer l'électricité qui serait nécessaire si tous les avions de Roissy volaient à l'hydrogène, et la convertir en chiffres parlant. v) Calculer la quantité d'agrocaburant nécessaire et la surface agricole associée. vi) Déduire de ce qui précède les chiffres pour la France. vii) Commenter les résultats.

DONNEES SUR L'ENERGIE

- En 2018, les vols de l'aéroport de Roissy Charles-de-Gaulle ont émis 13,1 MtCO₂.
- Lorsque l'on brûle du kérosène, la relation entre l'énergie libérée et les émissions de CO₂ est donnée par relation 1 MJ ↔ 71 gCO₂.

DONNEES SUR L'HYDROGENE

- La quantité d'énergie maximale que l'on peut récupérer en brûlant de l'hydrogène est 39,7 kWh/kgH₂.
- L'énergie nécessaire pour liquéfier l'hydrogène est de 11,5 kWh/kgH₂.
- L'électricité nécessaire pour produire de l'hydrogène gazeux par électrolyse est de 56,8 kWh/kgH₂.

DONNEES SUR LA PRODUCTION D'ELECTRICITE ET LES AGRO-CARBURANTS

- Une ferme photovoltaïque d'1 km² produit entre 40 et 100 GWh par an.

⁵ « *Sustainable aviation in the context of the Paris Agreement: a review of prospective scenarios and their technological mitigation levers* », S. Delbecq et al, Progress in Aerospace Sciences 141, 100920 (2023)

- Pour une ferme éolienne, on peut avoir une idée des densités surfaciques de puissance à partir des données suivantes : les éoliennes terrestres ont un facteur de charge de 20% ; dans les fermes éoliennes, la densité surfacique d'éoliennes d'une puissance crête de 3 MW est dans la gamme 2,85 – 4,76 éoliennes / km².
- Un réacteur nucléaire typique produit 6,5 TWh par an. Un hectare de colza permet de produire environ 1200 litres de bio-diesel. Ce dernier contient une énergie d'environ 9,8 kWh/litre.
- En France métropolitaine, la surface agricole utilisée (S.A.U.) représente 45% du pays, et donc 26,8 millions d'hectares.
- La production d'électricité française est d'environ 480 TWh/an.

Ce TD a été mutualisé dans le cadre d'un partenariat entre le Groupe INSA et la Fondation UVED pour la déclinaison disciplinaire de l'enseignement des enjeux de transition écologique et sociétale (TEDS).

Il est mis à disposition selon les termes de la [Licence Creative Commons- 4.0 International : Attribution- Pas d'Utilisation Commerciale- Partage dans les Mêmes Conditions](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



Pour la formation continue ou professionnelle, les modalités d'usage sont à déterminer avec UVED et doivent faire l'objet d'un contrat définissant les conditions d'usage et de commercialisation. Contact : contact@fondation-ued.fr

Première édition : Juillet 2025