

Emissions des transports aériens et leur impact sur le climat



Contenu

1. Introduction	4
2. Les composants des émissions et leurs mécanismes d'action.....	5
3. Des propriétés différentes compliquent les calculs comparatifs.....	6
4. Estimation de l'impact climatique total des émissions des transports aériens	7
5. Choix de la métrique.....	9
Bibliographie.....	11

A noter: Le dioxyde de soufre (SO₂), les oxydes d'azote (NO_x) et la suie émis dans les couches d'air proches du sol lors du décollage et de l'atterrissage ont également des effets directs sur la santé et l'environnement. Ces impacts non climatiques des émissions des transports aériens ne sont pas discutés dans ce rapport. Les mesures possibles de réduction des émissions et de leurs effets ne sont pas non plus abordées. Les avantages et inconvénients de mesures politiques sont décrits dans la fiche d'information « Instruments pour une politique climatique et énergétique efficace », publiée par les Académies suisses des sciences en 2019.

IMPRESSUM

Editrice et contact

Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT) • ProClim – Forum pour le climat et les changements globaux
Maison des Académies • Laupenstrasse 7 • Case postale • 3001 Berne • Suisse
+41 31 306 93 50 • proclim@scnat.ch • proclim.scnat.ch

Proposition de citation

Neu U (2021) Emissions des transports aériens et leur impact sur le climat.
Swiss Academies Communications 16 (3).

Auteur

Urs Neu, ProClim

Groupe d'experts responsable

Comité directeur de ProClim
avec le soutien de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Expertes et experts consultés

Dr Erich Fischer, EPF de Zurich • Prof. Fortunat Joos, Université de Berne •
Prof. Ulrike Lohmann, EPF de Zurich • Prof. Thomas Peters, EPF de Zurich • Theo Rindlisbacher, OFAC

Rédaction

Urs Neu et Sanja Hosi, ProClim

Mise en page

Sanja Hosi • Olivia Zwygart

Photo

pxHere

2^e tirage, 2021 (en ligne)

Ce rapport est une version actualisée de la Swiss Academies Communications Vol. 15 (9).

Ce rapport est disponible sous scnat.ch/fr/id/c5x4y

ISSN (en ligne) 2297-1823 • DOI: doi.org/10.5281/zenodo.4767552



Dans cette publication, l'Académie suisse des sciences naturelles apporte une contribution à l'ODD 13.

> un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals

> eda.admin.ch/agenda2030/fr/home/agenda-2030/die-17-ziele-fuer-eine-nachhaltige-entwicklung.html

L'essentiel en bref

- Les émissions des transports aériens contiennent, en plus du dioxyde de carbone (CO₂), plusieurs autres composants qui ont un impact sur le climat. Ce sont notamment la vapeur d'eau (H₂O), les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de soufre (SO₂) et la suie. Les émissions de CO₂ et leur effet sur le climat sont bien connus. Les connaissances sur l'impact climatique des émissions autres que le CO₂ sont encore très floues.
- Parmi les émissions autres que le CO₂, les traînées de condensation et les nuages ténus qu'elles forment à haute altitude (cirrus) ont, dans l'état actuel des connaissances, l'impact climatique le plus important, un effet nettement plus important que celui du CO₂. Les émissions d'oxydes d'azote ont des effets de réchauffement aussi bien que de refroidissement, au total environ la moitié du réchauffement par rapport aux émissions de CO₂. Comparativement, les effets des émissions de suie et de SO₂ sont probablement plutôt faibles.
- Pour stabiliser les émissions des transports aériens, les émissions nettes de CO₂ doivent être abaissées à zéro et les émissions autres que le CO₂ cesser d'augmenter. Pour une réduction de l'impact climatique (conformément à l'objectif de 1,5 °C), une diminution des émissions autres que le CO₂ – en comparaison avec l'état actuel – ou des émissions nettes « négatives » de CO₂ sont nécessaires.
- La métrique de conversion en équivalents de CO₂ (le potentiel de réchauffement global, PRG), utilisée dans le contexte des accords de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) (Paris, Kyoto), ne convient pas pour les substances de courte durée de vie. Une alternative applicable à toutes les questions ne s'est pas établie jusqu'ici. Il est recommandé de se servir chaque fois de la métrique la mieux adaptée à la question abordée et à l'optique dans laquelle elle est considérée.
- Le choix de la métrique en rapport avec des mesures politiques dépend de l'optique, notamment de la pondération des différents impacts, et donc d'échelles de valeurs (socio-)politiques. Les mesures techniques prises à bord des avions ont généralement des effets différents sur les émissions de CO₂ et les autres émissions.

Les facteurs recommandés (multiples d'émissions de CO₂ pour le calcul des équivalents de CO₂ comme mesure de l'impact climatique total), à utiliser en fonction de la question ou de l'optique considérée pour établir l'impact climatique des émissions des transports aériens, sont réunis dans le tableau ci-dessous.

A noter: Ces facteurs comportent une grande part d'incertitude et sont des estimations selon l'état actuel des connaissances. Ils peuvent changer avec le temps et devront éventuellement être adaptés. Des raisons à cela sont l'accumulation de CO₂ dans l'atmosphère (les facteurs deviennent alors plus petits), des mesures de réduction (les facteurs peuvent augmenter ou diminuer, selon le type ou l'ampleur des mesures prises, voir tableau 5) ou des modifications du taux de croissance des émissions de substance de courte durée de vie (affectant le potentiel de réchauffement équivalent, PRG*).

Question abordée/optique	Facteur
Impact climatique actuel d'émissions passées (base forçage radiative), état en 2018 (Calcul de la contribution des émissions des transports aériens au réchauffement atteint actuellement)	3
Effet sur le budget des émissions et en matière de trajectoire de réduction des émissions permettant d'atteindre les objectifs de température (base PRG*)	3
Paiements compensatoires et interventions politiques côté consommation, en fonction de l'optique:	
– Prise en compte de l'effet sur la température au cours du temps. Accent sur les effets à court terme ou à court et long terme ou à long terme (base PRG; horizon temporel 30/50/100 ans)	3/2,3/1,7
– Accent sur l'effet en matière de respect des budgets d'émission et des trajectoires de réduction; indiqué pour les scénarios d'atténuation (base PRG*)	3
– Effet d'émissions actuelles sur la température à un moment futur, en fonction de l'horizon temporel (30, 50, 100 ans)	1,3/1/1,1
Instruments (d'incitation) politiques visant à promouvoir des mesures chez l'opérateur (recommandation pour l'examen d'émissions autres que le CO ₂ : utiliser l'approche PRG*)	À considérer séparément
(Même traitement que pour les gaz à effet de serre selon CCNUCC/Protocole de Kyoto [PRG ₁₀₀])	(1,7) ¹

¹ Comparaison avec l'inventaire des gaz à effet de serre: Ce facteur, en lien avec l'application de la métrique utilisée actuellement (PRG avec un horizon temporel de 100 ans, PRG₁₀₀, base FR) dans les protocoles de la CCNUCC et dans les inventaires de gaz à effet de serre, est mentionné ici à titre d'information. Il est un peu inférieur à la plupart des autres métriques. Si l'on calculait les équivalents de CO₂ des émissions de méthane (un gaz à effet de serre de courte durée de vie) en se basant sur l'approche PRG*, il en résulterait pour la Suisse une légère diminution des émissions totales, car les rejets de méthane ont un peu baissé pendant les 10-20 dernières années. Ce que ne fait pas l'inventaire des gaz à effet de serre, qui assimile les émissions de méthane à environ 4 Mio t de CO₂, soit à peu près à 8,5 % des émissions totales.

1. Introduction

Le dioxyde de carbone (CO₂) émis dans le monde par les transports aériens représente 2 à 2,5 pour cent des émissions mondiales de CO₂ fossile causées par les activités humaines (AIE 2018). En Suisse, la part des transports aériens nationaux et internationaux s'est élevée en 2019 à environ 13,5 pour cent du total des émissions de CO₂ enregistrées et à quelque 11 pour cent de l'ensemble des gaz à effet de serre (en équivalents de CO₂) selon l'inventaire de ces gaz¹. Du fait de la forte croissance du trafic aérien, cette part augmente continuellement, malgré des mesures techniques et opérationnelles d'amélioration de l'efficacité, qui ne parviennent toutefois pas à compenser la hausse soutenue de la demande. En 2018, les émissions de CO₂ du trafic aérien étaient déjà égales à la moitié de celles des transports motorisés individuels. Si la croissance du trafic aérien se poursuit au rythme actuel et que les niveaux d'émission des voitures continuent de diminuer, ces parts se rapprocheront rapidement. C'est pourquoi l'impact climatique des transports aériens suscite une attention accrue. Cependant, l'impact de la pandémie COVID 19 a stoppé net la croissance du trafic aérien en 2020 et il est difficile de savoir comment son niveau va évoluer dans un avenir proche et si les taux de croissance précédents seront à nouveau atteints.

A part le CO₂, les émissions des transports aériens contiennent plusieurs autres composants qui exercent un effet sur le climat; ce sont notamment la vapeur d'eau, les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de soufre (SO₂) et la

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

L'impact climatique des émissions autres que le CO₂ des transports aériens ne figure pas dans l'inventaire des gaz à effet de serre; , car ils ne sont pas des gaz à effet de serre (dans l'inventaire des gaz à effet de serre, les émissions de l'aviation sont pratiquement identiques aux émissions de CO₂). L'impact est de relativement courte durée, de quelques heures à quelques années. C'est pourquoi il est très difficile de faire une comparaison avec le CO₂. On se sert souvent pour cela du potentiel de réchauffement global (PRG)². Mais c'est faute d'alternative et pour que la méthode de calcul ait l'uniformité souhaitée. Cependant, le PRG est utilisé dans l'inventaire susmentionné pour calculer les équivalents de CO₂ de gaz à effet de serre autres que le CO₂ (méthane, protoxyde d'azote, etc.), mais il ne porte pas sur les impacts à court terme des émissions de ces autres gaz.

Une étude exhaustive récemment publiée (Lee et al. 2021), qui sert également de base au 6^e rapport d'évaluation du GIEC, a analysé en détail l'effet des différents composants. En conséquence, les traînées de condensation induites par l'émission de vapeur d'eau et de particules, et les cirrus persistants qui en découlent, ont l'impact climatique de loin le plus important des émissions autres que le CO₂ des transports aériens – un effet nettement plus important que celui du CO₂ – suivi par l'effet des oxydes d'azote.

Les sections suivantes donnent une brève description du mode d'action des principaux composants des émissions sur le climat et abordent la question de leur quantification ainsi que du recours à des valeurs de comparaison.

¹ Selon l'inventaire des gaz à effet de serre de la Suisse, les émissions se sont élevées en 2019, trafic aérien international inclus, à 42,5 Mio t de CO₂ resp. 52 Mio t d'équivalents de CO₂. Les émissions des transports aériens nationaux et internationaux ont été d'env. 5,8 Mio t de CO₂ (dont à peu près 0,11 Mio t pour les nationaux), resp. 5,9 Mio t d'équivalents de CO₂. Ces chiffres sont estimés sur la base de la vente de kérosène et d'essence d'aviation dans les aéroports suisses. Ils représentent à peu près les émissions des vols à partir des aéroports suisses (sans Bâle-Mulhouse) jusqu'au prochain atterrissage. Les émissions de CO₂ des transports aériens recensées d'après le Protocole de Kyoto (vols au départ de la Suisse) se sont élevées en 2019 à quelque 13,5 % des émissions totales de CO₂, resp. 11 % des émissions totales de gaz à effet de serre (en équivalents de CO₂), ces totaux incluant les transports aériens internationaux. En comparaison, les transports motorisés individuels ont contribué à raison de 25,5 %, resp. 21 %, aux émissions de CO₂, resp. d'équivalents de CO₂. Selon un microrecensement de l'OFS sur le comportement de la population suisse en matière de transports, la distance parcourue en avion en 2015 a été en moyenne d'env. 9000 km par habitant. A raison de 90 g de CO₂ par passager et kilomètre (moyenne pour les vols au départ de la Suisse), ceci correspond à env. 810 kg de CO₂ par habitant et année, soit approximativement 6,9 Mio t de CO₂ pour l'ensemble de la population. La comparaison avec les émissions des transports aériens dans l'inventaire des GES, de 5,1 Mio t en 2015, permet d'estimer les émissions « grises » de CO₂ des transports aériens de la population suisse à env. 2 Mio t. Si l'on tient compte également des émissions « grises » de gaz à effet de serre dues à la production à l'étranger de biens consommés en Suisse, ainsi que des effets autres que le CO₂ des transports aériens, la part des transports aériens aux émissions totales se situe également dans une fourchette de 10-15 %.

² Le potentiel de réchauffement global (PRG) est calculé à partir du forçage radiatif intégré sur une période de temps déterminée d'une émission ponctuelle d'un gaz donné, par rapport au forçage radiatif d'une émission ponctuelle d'une même quantité de CO₂. Le PRG dépend de l'horizon temporel considéré, fixé le plus souvent à 100 ans (PRG₁₀₀).

2. Les composants des émissions et leurs mécanismes d'action

Les émissions de SO₂ et NO_x ainsi que la suie entraînent, d'une part, un forçage radiatif direct³ par réflexion de rayonnement solaire ou absorption de rayonnement thermique. Ces composants induisent, d'autre part, des modifications de la concentration d'ozone ou conduisent – conjointement aux émissions de vapeur d'eau et à la vapeur d'eau de l'air ambiant – à la formation de traînées de condensation et à des nuages de haute altitude et ont ainsi une influence supplémentaire indirecte sur le climat. Pour quantifier les différents effets climatiques des composants des émissions, il faut connaître et avoir analysé en détail les nombreux processus chimiques et physiques qui se déroulent dans l'atmosphère dans différentes conditions météorologiques.

Tableau 1: Substances émises par la combustion de kérosène et leurs effets sur le forçage radiatif et le climat.

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

³ Le forçage radiatif (FR) est la modification du rayonnement net qui, à une altitude d'env. 10 km (tropopause), s'écoule en direction de la surface terrestre; il est dû à des changements des conditions de l'équilibre radiatif de l'atmosphère terrestre, causés par des facteurs internes ou externes (voir IPCC AR5 WGI encadré 8.1, www.ipcc.ch).

L'état actuel des connaissances sur les principaux processus et effets est très variable de même que l'incertitude des données quantitatives correspondantes (entre autres OACI 2016; Lee et al. 2021; Rapport CE 2020; voir tableau 2).

Tableau 2: Substances émises par la combustion de kérosène et forçage radiatif correspondant par rapport aux conditions préindustrielles (entre parenthèses, la marge d'incertitude de 90 pour cent). Le forçage radiatif augmente d'année en année, tant que les émissions continuent de croître.

Composants	Forçage radiatif pour 2005 [mW/m ²]	Forçage radiatif pour 2018 [mW/m ²] ⁴
CO ₂	+25 (+21 à +29)	++34 (+28 à +40)
Traînées de condensation (traînées persistantes et cirrus issus de traînées)	+35 (+10 à +60)	+50 (+20 à +150) (+57 (+15 à +100))
NO _x (net) par	+13 (+2 à +20)	+17.5 (0 à +30)
• Augmentation de l'ozone	+33 (+21 à +51)	+49 (+32 à +76)
• Diminution du méthane	-13 (-9 à -25)	-21 (-15 à -40)
• Diminution de l'ozone par le méthane	-7 (-4 à -13)	-11 (-7 à -20)
• Diminution de la vapeur d'eau via méthane	-2 (-1 à -4)	-3 (-2 à -6)
H ₂ O (émission)	+1.5 (+0,5 à +2,5)	+2 (+1 à +3)
SO ₂ (effet direct de l'aérosol)	-5 (-2 à -13)	-7 (-2 à -19)
Suie	+0,7 (+0,1 à +3)	+1 (+0,1 à +4)
SO ₂ (par le biais des la formation d'aérosols) et suie (par le biais de la formation de nuages)	Quantification très incertaine	Quantification très incertaine
Impact net non-CO ₂ total	+42 (+14 à +69)	+67 (+21 à +110)

Source: Lee et al. 2021.

Les effets non-CO₂ sont fortement dépendants de l'altitude de vol, de la position géographique, du moment du jour et de la situation météorologique. Il est donc très exigeant de calculer leur impact climatique. Les composants et les effets les plus importants sont (voir également le tableau 1):

Le forçage radiatif direct, resp. l'effet de serre du CO₂, peut être calculé quantitativement de façon relativement précise à partir de la consommation de carburant et de la teneur de ce dernier en carbone.

⁴ Les valeurs indiquées, tirées du rapport du GIEC de 2013, correspondent au forçage radiatif effectif (FRE), qui tient compte d'adaptations dans la couche inférieure de l'atmosphère (troposphère), ce qui n'est pas le cas du forçage radiatif (FR), qui ne permet que des ajustements dans la stratosphère. Dans ce document, le FRE est utilisé pour le forçage radiatif, qui prend en compte l'effet différent des RF des différents composants sur la température. Les valeurs du FER ont également été utilisées pour le calcul du PRG.

Au sujet des traînées de condensation, la distinction est faite entre les effets de traînées de condensation linéaires persistantes et ceux des cirrus qui se forment à haute altitude à partir de ces traînées. Les deux ont un effet réchauffant, qui est cependant nettement plus marqué pour les seconds. Ces dernières années, les modèles climatiques ont permis de simuler de plus en plus précisément les effets de couplage et de rétroaction.

Les NO_x influencent les concentrations d'ozone et de méthane. Ils ont ainsi des effets refroidissant aussi bien que réchauffant et dépendent du lieu d'émission et des concentrations de fond de NO_x . Les effets refroidissants et réchauffants sont d'ampleurs à peu près égales, mais se produisent à des moments différents, ils ne font donc pas simplement que s'annuler réciproquement. Des valeurs estimées pour les effets individuels ainsi que l'effet total sont disponibles ici.

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

Les effets possibles du SO_2 et de la suie sur la couverture nuageuse en général (en plus des effets de traînées de condensation) ont été étudiés et sont mal compris. Les données que l'on trouve dans la littérature spécialisée divergent fortement et il n'y a pas encore d'estimation intégrale.

Comme il ressort du tableau 2, les traînées de condensation et les cirrus qui se forment à leur suite à haute altitude constituent l'effet de loin le plus important des émissions autres que le CO_2 .

3. Des propriétés différentes compliquent les calculs comparatifs

Durées de vie différentes

Les divers composants des émissions des transports aériens causent des perturbations de durées différentes. Alors que l'effet climatique des traînées de condensation et des émissions NO_x , de suie et de soufre décline en l'espace de quelques heures à quelques années, une part substantielle des émissions de CO_2 reste dans l'atmosphère pendant des siècles, voire des millénaires.

Une différence essentielle entre le CO_2 et les substances de courte durée de vie apparaît dans l'hypothèse d'une stabilisation des émissions des transports aériens : la concentration et l'impact climatique des substances moins persistantes reste constante après quelques années et n'occasionne alors aucun réchauffement supplémentaire. Le CO_2 , en revanche, continue de s'accumuler dans l'atmosphère et de réchauffer toujours plus notre espace de vie même si les émissions de ce gaz sont constantes. Pour stabiliser l'impact climatique des transports aériens, il faudrait donc abaisser à zéro leurs émissions nettes de CO_2 . Alors qu'il « suffirait » de stabiliser celles des substances de courte durée de vie – leur diminution entraînerait un effet refroidissant par rapport à aujourd'hui. Une réduction des émissions autres que le CO_2 , en revanche, entraîne une réduction de l'impact sur le climat.

Dans le cas du CO_2 , une réduction nécessite des émissions « négatives », c'est-à-dire un enlèvement du CO_2 de l'air. Une réduction du forçage radiatif, qui est probablement nécessaire pour atteindre l'objectif de $1,5^\circ\text{C}$, peut donc être obtenue à la fois par une réduction des émissions autres que le CO_2 – par rapport aux niveaux actuels – et par des émissions négatives de CO_2 .

Différences spatiales

Un défi que pose le calcul de l'impact climatique des émissions autres que le CO_2 tient au fait que leur action varie en fonction des conditions environnementales, telles que l'humidité ou la concentration de fond. A ceci s'ajoute la répartition non homogène de ces émissions. C'est ainsi que l'effet sur l'ozone a une répartition régionale ou qui s'étend même sur tout un hémisphère, mais que celui des traînées de condensation se concentre sur les principales routes aériennes. Il n'existe encore que très peu d'études à ce sujet (p. ex. Schumann & Mayer 2017) et leurs résultats diffèrent. Toutefois, on ne peut guère distinguer des différences régionales du régime de réchauffement qui seraient dues à des inhomogénéités spatiales de variations du rayonnement.

4. Estimation de l'impact climatique total des émissions des transports aériens

Actuellement, les inventaires de gaz à effet de serre dans le cadre de la CCNUCC ne couvrent que les gaz à effet de serre. Comme le CO₂ est le seul gaz à effet de serre pertinent dans les émissions des avions, les émissions d'équivalent CO₂ sont pratiquement les mêmes que les émissions de CO₂. L'impact climatique des émissions autres que le CO₂ n'est pas pris en compte. Les efforts se multiplient pour inclure également ces émissions.

Jusqu'à présent, les émissions de CO₂ étaient généralement multipliées par un facteur de conversion pour estimer l'impact total du trafic aérien sur le climat. Ce facteur peut être déterminé sur la base de différentes mesures de l'impact climatique des émissions autres que le CO₂. Les facteurs des différentes mesures sont énumérés dans le tableau 3.

La comparaison de l'impact climatique du CO₂ avec celui d'émissions autres que le CO₂ de courte durée de vie est en général difficile à établir et entachée d'incertitudes relativement importantes. Le PRG₁₀₀ est utilisé comme norme de comparaison par la Convention sur le climat et dans les inventaires de gaz à effet de serre, mais n'est pas bien adapté pour cela, car il s'applique à des gaz à effet de serre qui séjournent longtemps dans l'atmosphère et y sont répartis de façon assez homogène; à ceci s'ajoute que cette grandeur porte sur un horizon temporel de 100 ans. Néanmoins, le PRG et des mesures similaires sont utilisés faute de mieux.

Les grandeurs usuelles que sont le forçage radiatif, le PRG et le potentiel de température global (PTG)⁵ décrivent divers aspects de l'impact climatique (tableau 3). C'est pourquoi il importe de se servir de la grandeur la mieux adaptée au traitement de la question considérée et à la description de ses caractéristiques.

Le forçage radiatif décrit un effet momentané sur la base des émissions observées depuis l'ère préindustrielle. Toutefois, cette mesure est inappropriée pour comparer l'impact futur d'émissions actuelles, parce que le CO₂ s'accumule et que son action augmente ainsi avec le temps par rapport à celle des substances autres que le CO₂. Pour comparer des impacts futurs, on se sert du PRG ou du PTG. Le PRG correspond au forçage radiatif d'une émis-

sion unique intégré sur une période déterminée, typiquement de 20, 50 ou 100 ans. Du fait de cette intégration dans le temps, il tient compte aussi d'effets de courte durée de vie. Le PGT indique le changement de la température induit à un moment donné du futur par une émission ponctuelle unique. Du fait qu'elle considère l'effet loin dans l'avenir, dans un horizon temporel long (50 à 100 ans), cette grandeur n'associe pratiquement pas l'action de substances de courte durée de vie. Le choix de l'horizon temporel du PRG ou du PTG considéré dépend de la question traitée et de l'importance attribuée au réchauffement pendant les toutes prochaines décennies. Si l'horizon temporel considéré est de 20 ans, les impacts de courte durée de vie sont fortement surévalués; s'il est de 100 ans, ils sont sous-estimés (voir figure 1).

Tableau 3: Facteurs de conversion les plus utilisés dans la littérature spécialisée pour calculer l'impact climatique total des émissions des transports aériens en comparaison avec celui du CO₂ seul.

Verwendete Metrik	Contenu	Facteur de conversion (estimation)
Forçage radiatif (FRE)	Effet radiatif momentané à raison des émissions antérieures et actuelles	3 ⁶
Potentiel de température global (PTG)	Effet d'une émission ponctuelle actuelle sur la température après x années	20 ans: env. 1,3 50 ans: env. 1 100 ans: env.1,1
Potentiel de réchauffement global (PRG)	Forçage radiatif résultant d'une émission ponctuelle actuelle, intégré sur les x prochaines années	20 ans: env. 4, 50 ans: env. 2,3 100 ans: env. 2
Potentiel de réchauffement équivalent (PRG*)	Changement de la température globale dû à la modification des émissions de substances de courte durée de vie	env. 3

Sources: Lee et al. 2021; Allen et al. 2018.

Une valeur supplémentaire est apparue récemment dans la littérature spécialisée: le potentiel de réchauffement équivalent (PRG*) (Allen et al. 2018; Cain et al. 2019), qui tient compte du fait qu'à émissions constantes, les effets de courte durée – contrairement à ceux du CO₂ – n'induisent plus d'augmentation de la température, et que s'il y a augmentation de la température, elle tient principalement à un changement des émissions. Le PRG* est plus

⁵ Le potentiel de température global (PTG) décrit l'effet d'émissions actuelles sur la température à un instant donné du futur en comparaison d'une émission de la même quantité de CO₂. Le PTG dépend de l'horizon temporel considéré.

⁶ Appelé souvent indice de forçage radiatif dans la littérature spécialisée.

grand que zéro si les émissions de substances de courte durée de vie croissent et inférieur à zéro si ces émissions diminuent. Le PRG* a été développé pour calculer les budgets d'émissions encore disponibles pour respecter certains objectifs de température et des trajectoires de réduction des émissions. Le PRG* est relativement indépendant de l'horizon temporel (voir figure 2).

Dans ce qui suit, nous abordons brièvement quelques questions importantes et le choix du facteur adéquat. Il convient de noter à ce propos que les facteurs mentionnés changent avec le temps, notamment en fonction des mesures de réduction du CO₂ (voir tableau 5). Si l'on utilise la technique actuelle, le facteur diminuera à la longue, vu que du CO₂ s'accumule. Mais si l'on recourt à des carburants de substitution, à bilan de CO₂ partiellement ou totalement neutre, tels que le biokérosène ou le kérosène synthétique, le facteur pourrait augmenter, car dans ce cas, la formation de traînées de condensation et de cirrus ne diminuera pas dans la même mesure que les émissions de CO₂. Lors de l'utilisation du PRG*, le facteur doit également être ajusté si le taux de variation des émissions autres que le CO₂ change, par exemple si l'augmentation des émissions devient plus faible.

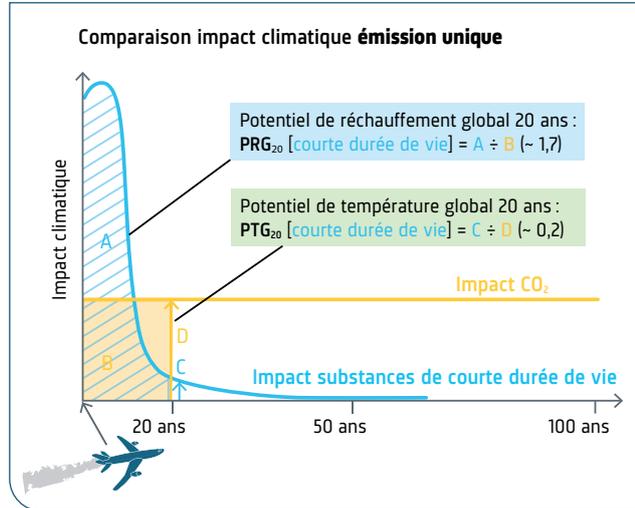


Figure 1: Représentation schématique du calcul de l'impact climatique d'une émission unique: calcul à l'aide du potentiel de réchauffement global (PRG) et du potentiel de température global (PTG) pour les substances à courte et à longue durée de vie ayant un impact sur le climat (à longue durée de vie en utilisant le CO₂ comme exemple). Le PRG et le PTG sur 100 ans sont calculés de la même manière que le PRG et le PTG sur 20 ans.

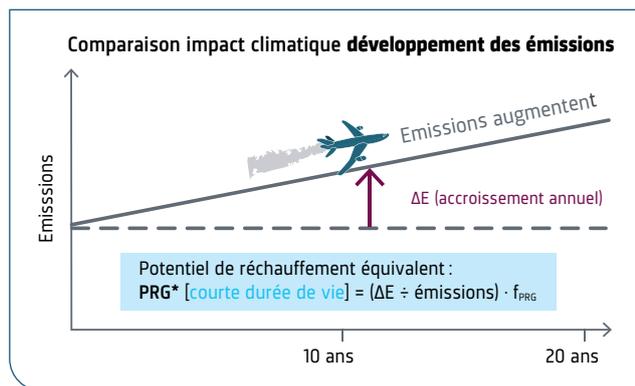
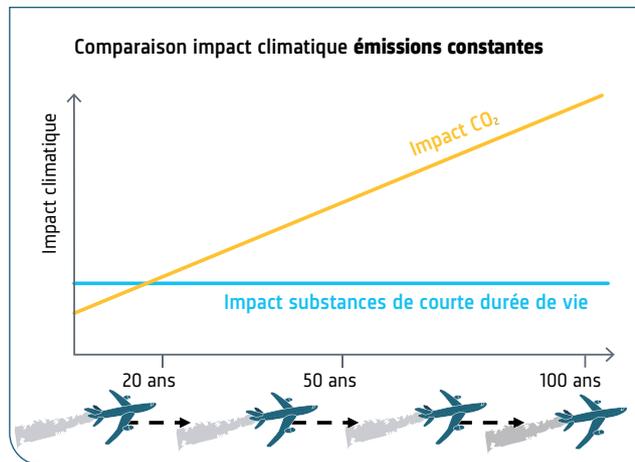


Figure 2: Comparaison de l'impact climatique d'émissions constantes: Ci-dessus: Comparaison de l'impact climatique d'émissions constantes de substances à courte et longue durée de vie (en utilisant le CO₂ comme exemple).

Ci-dessous: Calcul du PRG* du potentiel de réchauffement équivalent sur la base de l'évolution des émissions des substances à courte durée de vie (ΔE : évolution des émissions au cours des dernières années; f_{PRG} : facteur dépendant du potentiel de réchauffement climatique de la substance à courte durée de vie)

5. Choix de la métrique

Impact climatique actuel

Le forçage radiatif actuel est une mesure judicieuse de l'impact des émissions qui se sont produites jusqu'à maintenant. En se référant aux estimations présentes (statut 2018), on obtient un facteur égal à environ 3 pour l'indice de forçage radiatif (voir tableau 3).

Réalisation de l'objectif de température

La question de l'influence des émissions actuelles sur la stabilisation de la température dépend de façon décisive de leur effet sur la température au moment où cet objectif doit être atteint. C'est ce qu'exprime le PTG.

Comment les émissions doivent-elles évoluer pour permettre d'atteindre cet objectif? Le PTG et le PRG ne sont pas adaptés pour traiter cette question, car ils n'ont pour objet ni les émissions décroissantes ni les substances de courte durée de vie. Il en va autrement du PRG* : développé pour aborder cet aspect, il permet de comparer des substances de courte et de longue durée de vie et de saisir l'effet de différentes trajectoires d'émission, notamment de courbes de réduction et de scénarios d'atténuation (Allen et al. 2018). Le PRG* est également la métrique qui convient le mieux pour calculer des budgets d'émissions – c'est-à-dire la quantité d'émissions encore à disposition compte tenu de l'objectif de température que l'on veut atteindre ou le calcul des équivalents CO₂ pour les inventaires de gaz à effet de serre.

Compensation des émissions actuelles

Dans le contexte des mesures de compensation des émissions actuelles, le choix de la métrique adéquate dépend d'échelles de valeurs, c'est-à-dire de choix (socio)politiques quant à l'aspect ou les aspects à mettre en avant. S'il s'agit de compenser surtout l'impact futur des émissions actuelles, ce sont le PRG et le PTG qui priment. S'il faut considérer les effets à court et à long terme, le PRG est la grandeur la plus représentative. Le PTG ne saisit pratiquement que l'effet dans le futur, en fonction de l'horizon temporel choisi. Un horizon temporel de 100 ans est courant dans une perspective à long terme. Dans ce cas, il est surtout tenu compte du fait que certains effets disparaissent relativement vite et diminuent donc d'importance à la longue. En revanche, si l'on met en avant l'évolution dans le futur proche, c'est-à-dire pendant les prochaines décennies jusqu'en 2050, l'horizon temporel correspond à une trentaine d'années.

Dans un horizon temporel de 50 ans, les effets à court et à long terme auraient sensiblement le même poids.

Tableau 4: Estimations des facteurs de conversion pour le calcul des émissions totales d'équivalents de CO₂ à partir des émissions de CO₂ en fonction de l'horizon temporel considéré; ces valeurs sont calculées sur la base du potentiel de réchauffement global (PRG), resp. du potentiel de température global (PTG).

Mode de considération (aspects mis en avant)	Horizon temporel	Facteur fondé sur le PRG	Facteur fondé sur le PTG
<ul style="list-style-type: none"> Horizon temporel de l'objectif zéro net (2050) Horizon temporel significatif pour la population d'aujourd'hui Pondération excessive des effets à court terme d'émissions autres que le CO₂ 	30 ans	3	1,3
<ul style="list-style-type: none"> Pondération équilibrée de l'impact à court et à long terme 	50 ans	2,3	1
<ul style="list-style-type: none"> Pondération excessive de l'impact à long terme Accent sur les effets irréversibles sur le long terme 	100 ans	1,7	1,1

Source: Lee et al. 2021.

Le tableau 4 indique les estimations des facteurs de conversion pour ces différents horizons temporels, calculées sur la base du PRG et compte tenu de l'impact effectif sur la température ainsi que du PTG.

En revanche, si l'on met en avant l'impact des émissions actuelles sur la trajectoire de réduction des émissions que l'on souhaite suivre ou sur le respect des budgets d'émissions, le PRG* est la métrique adéquate. Le PRG* est relativement indépendant de l'horizon temporel considéré.

L'effet d'interventions politiques

Dans le cas d'interventions politiques, l'utilisation de facteurs de conversion généraux pour évaluer l'effet climatique des émissions autres que le CO₂ peut éventuellement créer de fausses incitations.

Des interventions politiques côté consommation, telles qu'une taxe sur les billets d'avion, visent avant tout à diminuer le trafic aérien. Elles ont pour but de réduire les émissions et les impacts climatiques dans leur

ensemble et sont de ce fait les mesures d'atténuation les plus efficaces. L'utilisation d'un facteur constant (selon tableau 4) pour calculer l'impact climatique total est judicieux dans ce cas. Le choix de la métrique dépend de nouveau de la pondération des différents aspects, comme décrit dans la section précédente.

En revanche, des interventions politiques auprès de l'opérateur, par exemple en faveur d'un système d'échange de quotas d'émission ou du système mondial CORSIA (OACI 2016), peuvent éventuellement créer de fausses incitations. En effet, l'influence de mesures techniques ou opérationnelles peut différer fortement d'une composante à l'autre des émissions (voir tableau 5), ce qui modifie alors le facteur de conversion. Il se peut, par exemple, que des mesures techniques entraînant une réduction de la consommation de carburant conduisent à une augmentation des émissions de NO_x. Ou que le recours à des carburants à bilan de CO₂ plus ou moins neutre, tels que les biocarburants ou le kérosène synthétique, réduise certes fortement l'effet CO₂, mais n'ait guère d'influence sur les émissions autres que le CO₂ et leur impact. Le contournement par les avions des masses d'air humide ou l'abaissement de l'altitude de vol peut certes diminuer la formation de traînées de condensation, mais augmente en même temps le besoin de carbu-

rant et donc les émissions de CO₂. Toutes ces mesures entraînent des conflits d'objectifs, c'est pourquoi il est recommandé de considérer séparément les émissions de CO₂ et celles d'autres composants. L'approche par le PRG* est celle qui se prête le mieux à l'évaluation de l'impact des émissions autres que le CO₂, car l'effet des mesures n'affecte pas de la même manière les émissions de CO₂ et les autres émissions.

Tableau 5 : Influence de mesures techniques ou opérationnelles dans les transports aériens sur l'impact climatique des émissions de CO₂ et autres (traînées de condensation, NO_x, SO₂, suie).

Groupe de mesures	Impact CO ₂	Impacts autres que le CO ₂
Recours au biokérosène ou au kérosène synthétique	diminue	tendent un peu à diminuer
Réduction de la consommation de carburant (par tonne- ou passager-kilomètre)	diminue	diminuent
Contournement de masses d'air humide	augmente	diminuent
Propulsion à l'hydrogène (petits avions, courts trajets)	diminue	tendent à augmenter
Hybride kérosène-électricité (avec courant vert; courts trajets)	diminue	diminuent

Bibliographie

- Académies suisses des sciences (2019) **Instruments pour une politique climatique et énergétique efficace**. Swiss Academies Factsheets 14 (4). www.proclim.ch/id/ejUCr
- AIE (2018) **International Energy Agency** www.iea.org
- Allen MR et al. (2018) **A solution to the misrepresentations of CO₂-equivalent emissions of short-lived climate pollutants under ambitious mitigation**. *Npj Climate and Atmospheric Science* 1: 16. doi:10.1038/s41612-018-0026-8
- Bickel M et al. (2019) **Effective radiative forcing and rapid adjustments of contrail cirrus**. 27. IUGG General Assembly, 8-18 Jul 2019, Montreal, Canada. https://elib.dlr.de/129731/1/Bickel_IUGG_2019.pdf
- Bock L, Burkhardt U (2016) **The temporal evolution of a long-lived contrail cirrus cluster: Simulations with a global climate model**. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121: 3548–3565. doi:10.1002/2015JD024475
- Brasseur GP et al. (2015) **Impact of aviation on climate: FAA's Aviation Climate Change Research Initiative (ACCR) Phase II**. *Bulletin of the American Meteorological Society* 98: 561–584. doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00089.1
- Cain M et al. (2019) **Improved calculation of warming-equivalent emissions for short-lived climate pollutants**. *Npj Climate and Atmospheric Science* 2: 29. doi.org/10.1038/s41612-019-0086-4
- Chen C-C, Gettelman A (2013) **Simulated radiative forcing from contrails and contrail cirrus**. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13: 12525–12536.
- Fahey DW et al. (2016) **White Paper on Climate change Aviation Impacts on Climate: State of Science**. ICAO, Environmental Report 2016: 99–107.
- GIEC (Boucher O, Randall D et al.) (2013) **Clouds and Aerosols**. In: **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1
- Jungbluth N, Meili C (2019) **Recommendations for calculation of the global warming potential of aviation including the radiative forcing index**. *International Journal of Life Cycle Assessment* 24: 404–411. doi.org/10.1007/s11367-018-1556-3
- Kärcher B (2018) **Formation and radiative forcing of contrail cirrus**. *Nature Communications* 9: 1824.
- Lee DS et al. (2021) **A comprehensive analysis of the contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing in 2018**. *Atmospheric Environment* 244: 117834. doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834
- Lund MT et al. (2017) **Emission metrics for quantifying regional climate impacts of aviation**. *Earth System Dynamics* 8: 547–563. doi.org/10.5194/esd-8-547-2017
- OACI (2016) **What is CORSIA and how does it work?** www.icao.int/environmental-protection/Pages/A39_CORSIA_FAQ2.aspx
- Rapport CE. (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)**. European Commission, SWD(2020) 277 final, Part 1/3. eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=SWD:2020:277:FIN
- Schumann U, Mayer B (2017) **Sensitivity of surface temperature to radiative forcing by contrail cirrus in a radiative-mixing model**. *Atmospheric Chemistry and Physics* 17: 13833–13848.
- Søvde OA et al. (2014) **Aircraft emission mitigation by changing route altitude: A multimodel estimate of aircraft NO_x emission impact on O₃ photochemistry**. *Atmospheric Environment* 95: 468–479.

Qui sommes-nous ?

Les **Académies suisses des sciences (a+)** regroupent les cinq académies scientifiques suisses, l'Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT), l'Académie suisse des sciences humaines et sociales (ASSH), l'Académie suisse des sciences médicales (ASSM), l'Académie suisse des sciences techniques (SATW) et la Jeune Académie Suisse (JAS). Elles comprennent en outre les centres de compétences TA-SWISS et Science et Cité ainsi que d'autres réseaux scientifiques. Les Académies suisses des sciences promeuvent la collaboration entre les scientifiques à l'échelon régional, national et international. Elles représentent la communauté scientifique aussi bien sur le plan des disciplines qu'au niveau interdisciplinaire et indépendamment des institutions et des branches spécifiques. Leur activité est orientée vers le long terme et vise l'excellence scientifique. Elles se fondent sur les savoirs scientifiques pour conseiller les politiques et le public sur des questions touchant de près la société.

SCNAT – un savoir en réseau au service de la société

L'**Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT)** s'engage à l'échelle régionale, nationale et internationale pour l'avenir de la science et de la société. Elle renforce la prise de conscience à l'égard des sciences naturelles afin que celles-ci deviennent un pilier central de notre développement culturel et économique. Sa large implantation dans le milieu scientifique en fait un partenaire représentatif pour la politique. La SCNAT œuvre à la mise en réseau des sciences, met son expertise à disposition, encourage le dialogue entre la science et la société, identifie et évalue les progrès scientifiques de manière à construire et à renforcer les bases de travail de la prochaine génération de chercheuses et de chercheurs. Elle fait partie des Académies suisses des sciences.

ProClim est le forum pour le climat et les changements globaux de l'Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT). ProClim sert d'interface dans la communication entre la science, l'administration, la politique, l'économie et le public.