



**BRIEFING - NOVEMBRE 2024**

# **Évitement des traînées de condensation : l'opportunité climatique de la décennie pour l'aviation**

Une solution ingénieuse et économique

# Résumé

Les traînées de condensation (ou « contrails ») se forment lorsque les avions traversent des zones froides et humides de l'atmosphère. On estime qu'elles ont un effet aussi néfaste sur le climat que l'ensemble des émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'aviation. Toutefois, ce phénomène est très ciblé : en 2019, moins de 3 % des vols mondiaux ont généré 80 % du réchauffement causé par ces traînées de condensation.

L'évitement des traînées de condensation constitue une stratégie essentielle pour atténuer leur impact. Il s'agit d'ajuster légèrement les trajectoires de vol, notamment par des montées ou descentes mineures, afin de contourner les zones atmosphériques froides et humides où se forment les traînées. Des simulations et des tests en conditions réelles ont montré qu'il était ainsi possible de réduire la formation des traînées de condensation et le réchauffement qui en découle, tout en limitant la surconsommation de carburant.

Le présent rapport a pour objectif d'**analyser les effets climatiques et les coûts liés à l'évitement des traînées de condensation**. Au fil de notre analyse, nous avons formulé différentes hypothèses prudentes tenant compte des incertitudes quant à l'étendue exacte du réchauffement lié aux traînées de condensation et au potentiel des solutions d'atténuation de ces dernières.

Nous avons constaté que **les stratégies d'évitement des traînées de condensation ciblent uniquement les vols les plus polluants constituent un pari sûr**. Dans le cadre d'une estimation prudente, nous avons trouvé que les bénéfices climatiques liés à la réduction des traînées de condensation pourraient être au moins 15 fois supérieurs aux émissions de CO<sub>2</sub> engendrées par la surconsommation de carburant qui en découle. Les tests en conditions réelles ont montré que ces bénéfices pouvaient même atteindre un rapport de 40 pour 1, voire davantage. Il en ressort que **le risque de nuire davantage au climat est quasiment inexistant**, faisant ainsi de cette approche un véritable retour sur investissement positif pour le climat.

La conclusion de notre analyse souligne clairement que **l'évitement des traînées de condensation est une stratégie rentable**. Nous avons examiné un scénario futur dans lequel la moitié du réchauffement dû aux contrails serait atténué d'ici 2040. La réduction de l'équivalent d'une tonne de CO<sub>2</sub> grâce à cette approche coûterait un tiers de moins que les solutions basées sur l'énergie solaire et éolienne, et moins de 10 % du coût représenté par les méthodes de capture et de stockage direct du CO<sub>2</sub> (DACCS).

Rapporté aux vols, le surcoût lié à l'évitement des traînées de condensation serait inférieur à 3,90 € par billet pour un Paris-New York, ou à 1,20 € pour un vol Barcelone-Berlin, ce qui

prouve à quel point cette solution est capable d'offrir un avantage climatique significatif à moindre coût.

Compte tenu de l'immense potentiel de l'évitement des traînées de condensation en tant que solution climatique rapide et efficace, et en tenant compte des obstacles persistants, T&E recommande la mise en place d'un cadre réglementaire complet pour les émissions dites « non-CO<sub>2</sub> », incluant :

1. L'amélioration de la collecte de données et le comblement des lacunes restantes par la surveillance des émissions hors CO<sub>2</sub> de tous les vols au départ de l'UE dans le cadre du marché carbone européen, grâce au déploiement de capteurs d'humidité et de satellites
2. L'instauration d'un ciel sans traînées de condensation par l'adaptation de la gestion du trafic aérien européen afin de favoriser leur évitement
3. L'élimination du réchauffement et de la pollution résiduels grâce à la révision des normes relatives aux carburéacteurs.

# 1. Les traînées de condensation provoquent un réchauffement au moins aussi important que le CO<sub>2</sub> de l'aviation

Outre le dioxyde de carbone, les moteurs d'avion émettent aussi des gaz tels que les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O) et des particules fines. Ces émissions modifient les propriétés chimiques et physiques de la haute atmosphère, influençant ainsi le climat terrestre.

Les traînées de condensation, ou « contrails », représentent le plus important des effets dits « non-CO<sub>2</sub> » de l'aviation. Elles se forment lorsque la vapeur d'eau, émise à la fois par les moteurs d'avion et présente naturellement dans l'atmosphère, se condense autour de particules, souvent issues des gaz d'échappement des moteurs. La plupart de ces contrails se dissolvent en quelques secondes à quelques minutes. Toutefois, celles qui se forment dans les zones froides et humides – appelées régions sursaturées en glace (ISSR) – peuvent persister dans l'atmosphère pendant plusieurs heures et se transformer en cirrus artificiels. Ces traînées persistantes sont celles qui ont le plus d'impact sur le climat.

Les traînées persistantes ont un effet refroidissant lorsqu'elles réfléchissent le rayonnement solaire entrant. Elles ont également un effet réchauffant lorsqu'elles réfléchissent le rayonnement terrestre sortant vers l'espace. L'effet net est réchauffant.

Une [étude majeure](#) a estimé que le forçage radiatif effectif (une mesure de l'impact du réchauffement) des traînées de condensation en 2018 était plus important que celui du CO<sub>2</sub> émis par le secteur de l'aviation depuis 1940. D'autres recherches ont proposé des estimations différentes, mais toutes ont confirmé que l'impact climatique des contrails est d'une ampleur comparable à celui des émissions de CO<sub>2</sub> de l'aviation.

## 1.1 Les bénéfices climatiques de l'atténuation des traînées de condensation sont immédiats

Les contrails sont fugaces, leur effet ne dure que quelques heures. Le CO<sub>2</sub>, quant à lui, reste dans l'atmosphère pendant des siècles. Malgré cette différence de durée, l'impact climatique des deux est comparable sur plusieurs décennies, en raison de l'effet considérable des traînées de condensation durant leur courte existence.

L'effet de réchauffement des contrails disparaît en grande partie à mesure qu'elles se dissipent. Cependant, leur contribution au réchauffement se poursuit, car de nouvelles traînées se forment constamment. En évitant leur formation à grande échelle, l'atmosphère pourrait se refroidir, comme l'a montré [une étude](#) sur l'impact de l'aviation sur les températures pendant la pandémie de Covid-19. Ce bénéfice climatique rapide pourrait jouer un rôle décisif dans la [limitation](#) du réchauffement à 1,5 °C.



Par ailleurs, l'impact climatique des traînées de condensation présente des schémas géographiques distincts, les vols dans les latitudes les plus élevées étant plus susceptibles de former des contrails ayant un effet réchauffant. Par conséquent, l'Amérique du Nord, l'Europe et la région nord-atlantique sont responsables de plus de la moitié des effets de réchauffement des traînées de condensation en 2019.

Le moment de la journée influence également les effets climatiques des traînées de condensation. Celles formées par les vols du soir et de la nuit [contribuent davantage au réchauffement](#), tandis que les vols du petit matin sont plus enclins à produire des contrails ayant un effet refroidissant. En ce qui concerne la saison, les contrails les plus réchauffantes se forment principalement en hiver.

## 2. Des solutions prometteuses pour combattre les traînées de condensation en cours d'essai

La compréhension scientifique du réchauffement causé par les traînées de condensation a considérablement progressé au cours des dernières années. Outre une évaluation de leur impact climatique, la recherche et les essais en cours révèlent l'existence de solutions d'atténuation réellement prometteuses qui pourraient être mises en œuvre dans un avenir proche.

### 2.1 Évitement des traînées de condensation : des déviations mineures pour éviter leur formation

Les régions sursaturées en glace dites "ISSR" (acronyme anglais de *Ice supersaturated regions*) – zones froides et humides de l'atmosphère – favorisent la formation des traînées de condensation persistantes. Ces dernières peuvent s'étendre sur plusieurs [centaines de kilomètres](#), bien que leur épaisseur [n'excède généralement pas 1 km](#).

Pour atténuer la formation de ces traînées, l'une des stratégies clés consiste à les éviter grâce à des ajustements de navigation. Cela consiste à modifier légèrement les trajectoires de vol, par exemple en effectuant des montées ou descentes mineures, afin d'éviter les ISSR. Il s'agit du principe employé pour éviter les tempêtes ou les zones de turbulence dans l'atmosphère.

Pour ce faire, il est essentiel de pouvoir anticiper la localisation des ISSR. Si l'on arrive à obtenir une prévision fiable suffisamment à l'avance, les opérateurs peuvent créer un plan de vol qui évite ces zones. Cette approche est appelée planification pré-tactique. Selon l'initiateur de la déviation, l'évitement des traînées de condensation peut être mené soit par le pilote, soit par le contrôleur aérien.

Aussi, il est crucial de disposer de prévisions fiables de la part des services météorologiques au sujet des ISSR et de mettre en place des processus décisionnels collaboratifs pour en faciliter l'évitement. Ces deux domaines font l'objet de recherches continues, qui doivent se poursuivre dans les années à venir afin de réduire les incertitudes et de généraliser cette solution en faveur du climat.

## 2.2 L'évitement des traînées de condensation en pratique

Pour faire état de la faisabilité de l'évitement des traînées de condensation et de ses avantages, des stimulations et des essais en vol sont en cours. Ces études ont démontré que cette solution ont le potentiel pour considérablement atténuer la formation de traînées de condensation.

Des **essais** en vol réalisés en 2023 par American Airlines et Google ont permis de réduire la formation de traînées de condensation de 54 % grâce à de légers ajustements de trajectoire, entraînant une surconsommation de carburant estimée à 2 % sur les vols déviés.

Divers organismes de recherche ont réalisé des simulations de vol afin d'évaluer le potentiel de cette stratégie. Une **étude** réalisée par Teoh et al. en 2020 a estimé que 60 % du forçage radiatif effectif au-dessus du Japon pourrait être atténué avec une surconsommation de carburant de seulement 0,01 %.

Une autre **étude** menée par Martín Frías et al. en 2024 a conclu que le réchauffement dû aux traînées de condensation pourrait être réduit de 72 % en augmentant la consommation de carburant de 0,11 % à l'échelle de la flotte aérienne. Cette étude a également exploré des stratégies plus ciblées visant à atténuer spécifiquement les traînées de condensation les plus chaudes, ou à effectuer des manœuvres à moindre coût. Dans les deux cas, une réduction de 66 % du réchauffement lié aux contrails a été observée, avec une surconsommation de carburant de 0,05 % et 0,02 % respectivement, prouvant ainsi l'efficacité de ces approches.

## 2.3 La surconsommation de carburant liée à l'évitement des traînées de condensation est limitée

Les avions volent généralement à des altitudes qui permettent d'optimiser leur efficacité énergétique. En volant au-dessus en en dessous de l'altitude requise afin d'éviter les traînées de condensation, ils peuvent consommer davantage de carburant, mais cet impact est limité – surtout si les stratégies mises en place sont bien conçues.

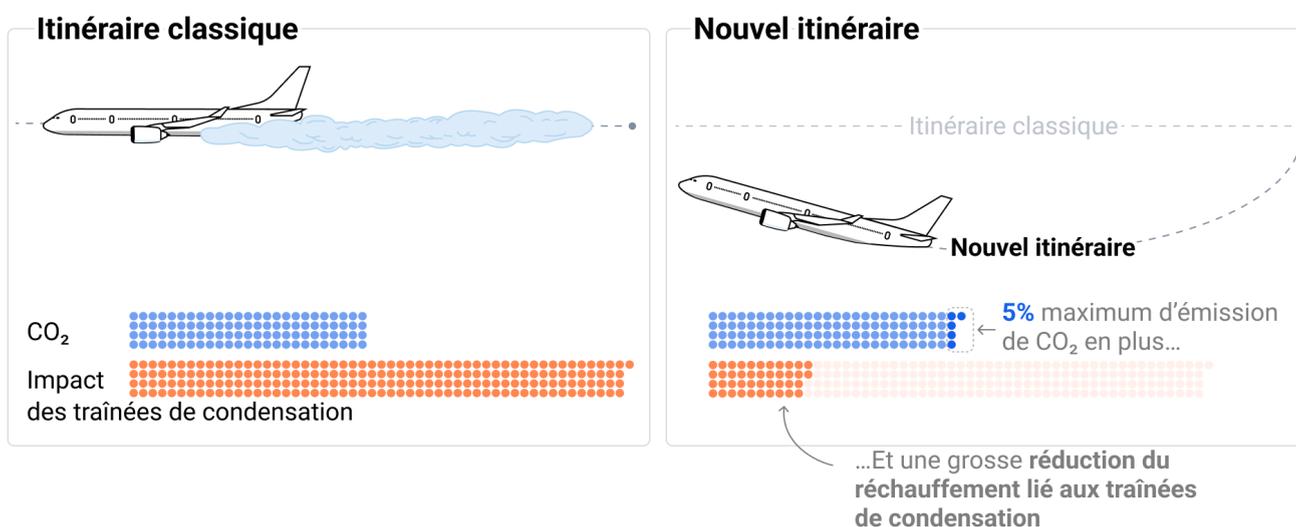
Les stratégies d'évitement ne concerneraient qu'un petit nombre de vols à l'origine de traînées de condensation les plus chaudes. Une approche ciblée, visant par exemple à s'attaquer au faible pourcentage de vols générant 80 % du réchauffement des contrails, permettrait de minimiser le nombre de vols déviés tout en maximisant les bénéfices climatiques.

Les vols concernés ne devront pas être déviés sur l'ensemble de leur trajectoire, mais seulement sur certaines sections. La surconsommation de carburant liée à ces ajustements représente généralement moins de 5 % de la consommation totale du vol.

Ainsi, on estime que la surconsommation de carburant pour l'ensemble de la flotte aérienne se situe entre 0,01 % et 0,03 %, tel qu'indiqué dans la section 2.2. Toutefois, cette estimation pourrait être revue à la hausse à grande échelle, en raison des contraintes liées à l'espace aérien. Une gestion efficace du trafic aérien est donc un levier essentiel pour l'évitement des traînées de condensation, et des essais à grande échelle sont indispensables pour mieux comprendre les défis associés.

## Rerouter les vols pour éviter les contrails : un avantage considérable pour le climat

● Emissions CO<sub>2</sub> ● Réchauffement lié aux traînées de condensation



Source : Teoh et al. (2024), Frías et al. (2024), T&E. Note : Simulation de l'impact climatique net de l'évitement des traînées de condensation pour un vol faisant partie des 5 % de vols européens qui génèrent 80 % du réchauffement dû aux traînées de condensation. Hypothèses : GWP100 utilisé pour comparer l'impact climatique du CO<sub>2</sub> et des traînées de condensation. Le réchauffement des traînées de condensation est réduit de 80 %. La consommation supplémentaire de carburant de 5 % est une estimation très prudente - la consommation supplémentaire de carburant dans les essais en vol et les simulations est de 2 % ou moins.



### 2.3.1 Le sur-ravitaillement (tankering) crée une surconsommation de carburant similaire à celle de l'évitement des traînées de condensation

Les plans de vol sont généralement optimisés en vue de minimiser les coûts, mais rarement pour réduire la consommation de carburant ou l'impact climatique. Bien que le carburant représente un facteur de coût majeur, les compagnies aériennes adoptent souvent des pratiques visant à réduire les coûts, telles que la minimisation des redevances de navigation aérienne. Ces pratiques peuvent parfois conduire à emprunter des trajectoires moins optimales,



entraînant une consommation de carburant plus élevée et donc une augmentation des émissions de CO<sub>2</sub>.

Le sur-ravitaillement fait également partie des pratiques courantes dans l'industrie aérienne : il s'agit d'embarquer une réserve de carburant supplémentaire afin de réduire les coûts de ravitaillement à destination, lorsque celui-ci est plus coûteux qu'à l'aéroport de départ. Si cette stratégie permet de réduire les coûts, elle entraîne une diminution du rendement global du vol en alourdissant l'avion.

Eurocontrol a estimé que le sur-ravitaillement était responsable de **900 kt d'émissions de CO<sub>2</sub>** en Europe en 2018, ce qui représente une augmentation d'environ 0,5 % des émissions totales de l'aviation européenne – soit une valeur similaire à l'augmentation estimée de la consommation de carburant liée à l'évitement des traînées de condensation à grande échelle.

Les émissions supplémentaires de CO<sub>2</sub> sont souvent évoquées comme un frein à la mise en œuvre de l'évitement des traînées de condensation. Cependant, des pratiques telles que le sur-ravitaillement démontrent que l'industrie se livre à des pratiques qui augmentent la consommation de carburant dans le but de minimiser les coûts. Les bénéfices climatiques présentés dans la section suivante montrent que, même avec une surconsommation de carburant modérée, l'évitement des contrails demeure une solution avantageuse pour le climat.

## **2.4 L'évitement ciblé : un pari sûr aux bénéfices climatiques nets**

Nous avons analysé l'impact climatique net d'une stratégie d'évitement des traînées de condensation ciblant les 5 % de vols européens responsables de 80 % du réchauffement dû aux contrails. Nous avons comparé le coût climatique des émissions supplémentaires de CO<sub>2</sub> avec les avantages qui découlent de la réduction des traînées de condensation dans différents scénarios.

Notre analyse part du principe que toutes les manœuvres ne conduiront pas systématiquement à une réduction des traînées de condensation. Le taux de succès est déterminé par le ratio des déviations de vol qui permettent de réduire effectivement la formation des contrails. Nous comptons les manœuvres de déviation qui échouent comme n'ayant pas d'impact sur l'effet climatique de la traînée de condensation.

Bien que l'on puisse raisonnablement anticiper que les avancées technologiques augmenteront le taux de réussite, les valeurs futures demeurent inconnues. Afin de tenir compte de cette incertitude, nous avons analysé des taux de réussite entre 10 et 100 %. De même, nous avons évalué le taux d'émissions de CO<sub>2</sub> supplémentaires entre 0,5 et 5 %.

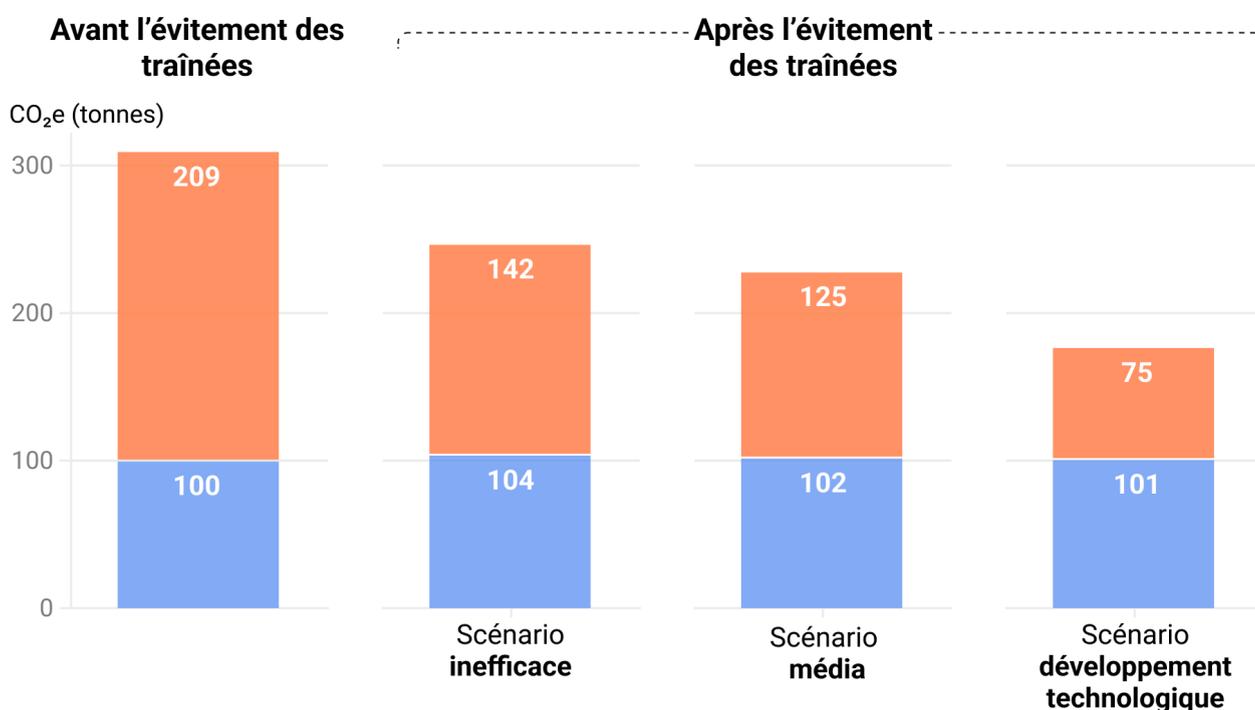
Pour comparer l'impact des traînées de condensation et des émissions de CO<sub>2</sub>, nous avons choisi le GWP100 comme indicateur climatique.

Dans un scénario inefficace, les bénéfices climatiques liés à la réduction du réchauffement dû aux traînées de condensation dépassent de **plus de 15 fois le coût climatique des émissions supplémentaires de carburant**. Ce scénario suppose une augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> de 4 %, soit au-dessus de la limite supérieure des tests et simulations, et un taux de réussite de 40 %.

Dans un scénario plus favorable, les bénéfices climatiques seraient 40 fois plus importants que le coût climatique, avec une augmentation de 2 % des émissions de CO<sub>2</sub> et avec un taux de réussite de 50 %. Ces résultats sont cohérents avec ceux déjà obtenus lors des essais menés par American Airlines et Google.

## Adapter la trajectoire des vols les plus réchauffants est une solution sans dilemme

● CO<sub>2</sub> ● Réchauffement lié aux traînées de condensation



Source : Transport et Environnement (2024), sur la base des données de Teoh et al. (2024). Hypothèse d'une réduction de 80 % du réchauffement lié aux traînées de condensation avec une surconsommation de carburant de 5 %. Les scénarios sont tous basés sur un vol de référence émettant 100 tonnes de CO<sub>2</sub>, faisant partie des 5 % de vols européens responsables de 80 % du réchauffement lié aux traînées de condensation. Hypothèses des scénarios : Inefficace = 40 % de manœuvres réussies, 4 % de surconsommation de carburant ; Moyen = 50 % de manœuvres réussies, 2 % de surconsommation de carburant ; Développement technologique = 80 % de manœuvres réussies, 1 % de surconsommation de carburant.



De façon générale, tous les scénarios d'évitement de traînées de condensation envisagés dans notre analyse entraînent des bénéfices climatiques nets, allant de 2,35 à plus de 300 fois le coût climatique des émissions de CO<sub>2</sub> supplémentaires.

Les recherches scientifiques confirment également les avantages considérables liés à l'évitement ciblé des traînées de condensation. Des simulations réalisées par Martín Frías et al.

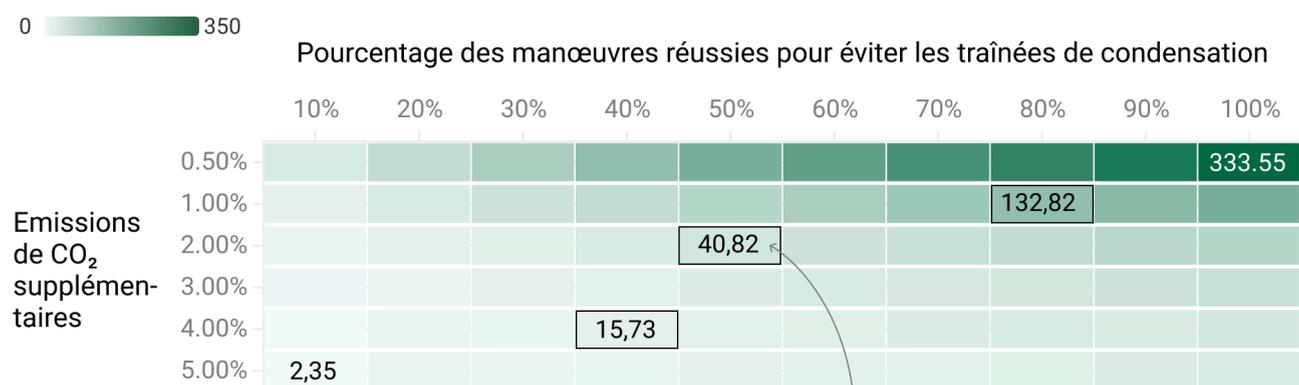
ont estimé que ces avantages seraient plus de 100 fois supérieurs aux émissions de CO<sub>2</sub> supplémentaires. Par ailleurs, [Cornec et al. \(2024\)](#) ont introduit le concept d'indice de sévérité des contrails, soulignant les bénéfices nets significatifs d'une approche ciblant les traînées les plus nocives.

Ces résultats montrent que le risque de nuire à l'environnement est pratiquement inexistant lorsqu'on cible les vols générant les contrails les plus réchauffantes.

Ce risque peut être encore réduit en adoptant des mesures de précaution, telles que la limitation des déviations aux cas où les bénéfices climatiques attendus sont 100 fois supérieurs au coût climatique des émissions supplémentaires de carburant. Dans notre analyse des 5 % de vols européens générant 80 % du réchauffement lié aux traînées de condensation, toute déviation entraînant une surconsommation de carburant inférieure à 1,5 % respecterait cette mesure de précaution.

## Éviter les traînées de condensation les plus réchauffantes, un pari toujours gagnant

Modifier les trajectoires entraîne un bénéfice climatique net, même dans un scénario prudent



Pour les manœuvres créant 2 % d'émissions de CO<sub>2</sub> supplémentaires et réussies dans 50 % des cas, **les effets positifs** liés à la réduction de la formation de traînées de condensation sont **40 fois** plus élevés que les effets négatifs liés au CO<sub>2</sub> supplémentaire. Les tests en conditions réelles montrent des résultats similaires.

Sources : T&E, Google (2023), Teoh et al. (2024), Frías et al. (2024). Note : les valeurs indiquées dans les cellules représentent le rapport entre les bénéfices climatiques nets liés aux manœuvres d'évitement des traînées de condensation par rapport à l'impact climatique des émissions de CO<sub>2</sub> supplémentaires. Les valeurs supérieures à 0 indiquent des bénéfices climatiques nets. Le GWP100 sert d'indicateur climatique.



### 2.4.1 L'évitement ciblé des traînées de condensation est avantageux pour le climat, quel que soit l'indicateur choisi

L'utilisation d'un indicateur climatique (GWP, GTP, ATR) et d'un horizon temporel (20, 50, 100 ans) permet de convertir l'impact des traînées de condensation en équivalent CO<sub>2</sub>, facilitant ainsi la comparaison avec les émissions de CO<sub>2</sub>.



Malgré les progrès récents, le choix de l'indicateur climatique et de l'horizon temporel reste un sujet de débat scientifique et politique, souvent cité comme une source d'incertitude dans l'évaluation des bénéfices de l'évitement des traînées de condensation.

Cependant, une [étude de 2024](#) menée par Borella et al. a démontré que l'évitement des traînées de condensation les plus réchauffantes génère des bénéfices climatiques nets, et ce, en grande partie indépendamment de l'indicateur choisi. L'étude conclut que l'absence de consensus sur l'indicateur d'équivalence du CO<sub>2</sub> n'empêche en rien la mise en œuvre de politiques d'évitement des traînées de condensation.

### **3. L'évitement des traînées de condensation coûte moins cher que de nombreuses solutions climatiques**

Nous avons analysé un scénario futur dans lequel la moitié du réchauffement dû aux traînées de condensation serait atténué d'ici 2040.

Les résultats montrent que les coûts d'évitement des traînées de condensation d'ici 2040 pourraient être inférieurs à 20 €/tCO<sub>2</sub>eq – soit 20 € par tonne d'équivalent CO<sub>2</sub> évitée, en utilisant l'indicateur GWP100. Cette estimation est supérieure à celles de certaines autres sources. Par exemple, Roland Berger estime que les coûts d'abattement en 2040 se situeront entre [2 et 6 €/tCO<sub>2</sub>eq](#), tandis que Google estime que ces coûts pourraient à une fourchette de 5 à 25 €/tCO<sub>2</sub>eq dès aujourd'hui.

Le coût de l'évitement des traînées de condensation est principalement déterminé par les coûts opérationnels (notamment la consommation de carburant) ainsi que les investissements en infrastructure ou en équipement (tels que les satellites et les caméras au sol pour les observations, ainsi que les capteurs d'humidité installés sur les avions).

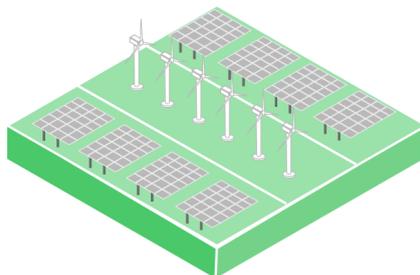
L'évaluation des coûts en €/tCO<sub>2</sub>eq permet de comparer l'impact climatiques de l'évitement des traînées de condensation avec celui d'autres solutions climatiques, en termes de bénéfice climatique par unité. Par exemple, la production d'énergie solaire et éolienne est estimée à un coût de [60 €/tCO<sub>2</sub>eq](#) évitée, tandis que la capture et le stockage direct du carbone dans l'air (DACCS) pourrait coûter [360 €/tCO<sub>2</sub>](#) évitée une fois la technologie mature, avec des coûts actuels se situant dans une fourchette de [600 à 1 000 €/tCO<sub>2</sub>](#).

## L'évitement des traînées de condensation fait partie des solutions climatiques les moins coûteuses

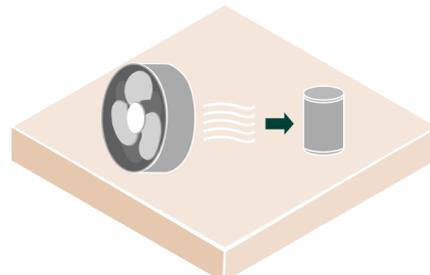
L'évitement coûte environ 15 fois moins cher que la capture et le stockage directs du CO<sub>2</sub>



**€20/tCO<sub>2</sub>e**  
Évitement des traînées  
de condensation



**€60/tCO<sub>2</sub>e**  
Production d'énergie  
éolienne et solaire



**€360/tCO<sub>2</sub>e**  
Capture et stockage  
directs du CO<sub>2</sub>

Sources : RMI, Roland Berger (2024), Sievert et al. (2024), Thunder Said Energy (2023), T&E. Note : Coûts indicatifs par tonne d'équivalent CO<sub>2</sub> évitée pour différentes technologies. La parité entre l'euro (€) et le dollar (\$) a été retenue pour ces calculs.



### 3.1 L'augmentation du prix des billets d'avion serait d'1 %, ou moins

Nous avons utilisé notre modèle de coût pour évaluer l'impact financier de l'évitement des traînées de condensation sur 12 trajectoires représentatives, tant en Europe qu'en transatlantique.

L'augmentation moyenne de coût estimée pour un vol intra-européen serait de moins de 1,60 € par passager. Par exemple, pour un vol Barcelone-Berlin, cette augmentation serait de 1,20 €.

Pour les vols transatlantiques, l'augmentation du coût serait inférieure à 4,30 € par passager – 3,90 € en sus pour un Paris-New York, par exemple.

On s'attend à ce que ces hausses de prix soient réparties entre tous les passagers, même si ceux qui voyagent en classe économique devraient constater une augmentation plus modeste que ceux en première classe.

L'évitement des traînées de condensation offre ainsi un potentiel de réduction significatif de l'empreinte environnementale de l'aviation, avec un impact économique négligeable sur l'industrie et ses passagers.

## L'évitement des traînées de condensation coûte moins cher qu'un café à l'aéroport

Coût moyen de l'évitement



Sources : RMI, Roland Berger (2024), Teoh et al. (2024), T&E. Note : Coûts indicatifs par passager pour un vol classique sur les itinéraires Paris - New York et Barcelone - Berlin. Le coût supplémentaire de vols avec évitement des traînées de condensation est étalé sur tous les vols, y compris ceux qui ne génèrent pas de traînées réchauffantes. Les données sur l'impact des contrails pour chaque itinéraire sont tirées de Teoh et al. (2024).



### 4. Il est urgent d'agir pour saisir cette opportunité climatique

Les traînées de condensation ont un impact de réchauffement important sur le climat, comparable à celui des émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'aviation. Si certains aspects scientifiques liés aux contrails sont encore à l'étude, les connaissances actuelles suffisent amplement à démontrer que leur évitement représente une solution à la fois évidente et rentable pour réduire les émissions liées à ce problème climatique.

L'incertitude liée aux compromis entre la réduction du réchauffement causé par les contrails et l'augmentation potentielle des émissions de CO<sub>2</sub> dues aux manœuvres d'évitement est souvent citée comme un frein à l'action. Cependant, après avoir analysé une stratégie ciblant les vols responsables des traînées les plus réchauffantes dans une large gamme de scénarios, nous avons constaté que, même dans les situations les moins favorables, les avantages climatiques l'emportent largement sur les effets négatifs, entraînant ainsi des bénéfices climatiques nets.

Cette conclusion reste valide, quel que soit l'indicateur climatique employé pour comparer les émissions de CO<sub>2</sub> et le réchauffement causé par les traînées de condensation.

Ces résultats, étayés par la recherche scientifique, démontrent qu'avec des stratégies d'évitement ingénieuses, ciblant le faible pourcentage de vols responsables de la majorité du réchauffement dû aux contrails, le risque de nuire au climat est presque inexistant.

L'évitement des traînées de condensation constitue une solution extrêmement rentable : la hausse du prix des billets d'avion est estimée à moins de 1 %. Concrètement, cela représenterait un supplément de 4,30 € pour les vols transatlantiques et de 1,60 € pour les vols intra-européens.

Bien que les avantages de l'évitement des traînées de condensation soient démontrés à la fois vol par vol et dans le cadre de simulations, plusieurs défis demeurent pour sa mise en œuvre à grande échelle. Tout d'abord, la précision des prévisions doit être améliorée. Ensuite, l'espace aérien doit être optimisé afin de faciliter l'évitement des contrails. Heureusement, un écosystème dynamique, composé de chercheurs, de pionniers et d'acteurs industriels, progresse de manière significative sur ces deux fronts. Pour garantir un déploiement réussi de cette stratégie à l'échelle mondiale, un soutien continu à cet écosystème, ainsi qu'aux autres parties prenantes, sera essentiel.

Enfin, et surtout, l'absence d'incitations claires pour réduire les traînées de condensation au sein de l'industrie aéronautique a constitué un frein majeur à l'action. La mise en place d'un cadre politique approprié sera essentielle pour surmonter cet obstacle et exploiter pleinement cette opportunité climatique.

## **4.1 Recommandations politiques**

Sur la base des conclusions du présent rapport, Transport et Environnement recommande de combiner les politiques suivantes pour atténuer le réchauffement lié aux traînées de condensation dans le secteur de l'aviation. L'intégration de ces mesures au sein d'un cadre réglementaire européen plus large de réduction des émissions est cruciale pour aborder l'impact environnemental global de l'industrie et atteindre nos objectifs climatiques.

Si la liste ci-après se concentre sur l'action politique interne de l'UE, nous tenons à souligner l'importance de la collaboration internationale dans ce domaine, en particulier d'une coopération régionale entre l'UE, les États-Unis, le Royaume-Uni et le Canada afin de mettre en œuvre des essais à grande échelle d'évitement des traînées de condensation au-dessus de l'Atlantique Nord.

## 1. Établir un cadre réglementaire pour les émissions hors CO<sub>2</sub>

Pour intégrer efficacement les émissions non-CO<sub>2</sub> du secteur l'aviation dans la lutte contre le réchauffement climatique, il est essentiel de les inclure dans les objectifs climatiques de l'UE, notamment dans le cadre de la stratégie pour 2040, ainsi que dans les plans nationaux en matière d'énergie et de climat (PNEC). Sans cette inclusion, il sera impossible de traiter efficacement ce problème et d'en limiter l'impact sur le climat.

L'intégration des émissions non-CO<sub>2</sub> dans les politiques existantes de l'UE – telles que le marché carbone européen, l'initiative « Ciel unique européen » et ReFuelEU Aviation – permettrait de créer un cadre réglementaire cohérent, favorisant ainsi la gestion du trafic aérien et l'établissement de normes strictes en matière de carburant. Cette approche globale stimulerait également l'innovation technologique dans le secteur de l'aviation, améliorerait la santé publique en réduisant la pollution autour des aéroports et permettrait aux consommateurs de faire des choix éclairés grâce au label environnemental. En s'attaquant aux émissions non-CO<sub>2</sub>, l'UE pourrait renforcer son leadership en matière d'aviation durable et accroître la compétitivité de son industrie, dans un contexte mondial de transition vers une aviation zéro émission nette.

### 1.1 Améliorer la collecte de données et combler les lacunes restantes

#### 1.1.1 Un suivi complet des émissions non-CO<sub>2</sub> dans le cadre du marché carbone européen

L'UE a pris une position de leader mondial en exigeant la collecte de données sur les émissions non-CO<sub>2</sub> de l'aviation via un système de surveillance, de déclaration et de vérification ("MRV", acronyme de Monitoring reporting & verification) qui est entré en vigueur le 1er janvier 2025. Bien que la portée géographique du MRV ait malheureusement été réduite aux vols intra-UE pour 2025 et 2026, cette initiative constitue un outil clé pour améliorer la compréhension et la mesure des émissions hors CO<sub>2</sub> de l'aviation.

Les données collectées joueront un rôle crucial dans l'élaboration des futures normes de l'UE à partir de 2027. Elles permettront également d'améliorer la modélisation scientifique, d'affiner les prévisions et d'optimiser la planification des vols pour réduire la formation des traînées de condensation. Dans cette optique, **il est essentiel que le dispositif soit automatiquement étendu à l'échelle mondiale**, comme prévu dans le cadre du marché carbone européen. Nous recommandons également que d'autres pays, à l'instar du Royaume-Uni, des États-Unis et du Canada, suivent cette voie en développant leurs propres systèmes de surveillance des émissions non-CO<sub>2</sub> dans l'aviation.

### 1.1.2 Comblent l'écart de données grâce aux avancées technologiques

Pour prévenir la formation des contrails, on déplore encore un manque de précision dans les prévisions météorologiques, ainsi que des lacunes dans l'identification des régions sursaturées de glace (ISSR). Dans ce contexte, le développement et l'adoption de technologies telles que les **capteurs d'humidité** embarqués ou les **satellites** d'observation devraient être vivement encouragés. En effet, ces solutions permettraient de suivre les conditions atmosphériques en temps réel et d'améliorer les modèles de prévision, facilitant ainsi la détection des zones à risque. Cela offrirait aux compagnies aériennes et aux contrôleurs aériens des outils précieux pour éviter les régions propices à la formation des traînées de condensation.

À mesure que les connaissances scientifiques sur l'évitement des contrails se développent et que la précision des capteurs d'humidité s'améliore, **l'installation de ces dispositifs sur les nouveaux appareils, ainsi que la mise à niveau des flottes existantes, pourraient progressivement être rendues obligatoire dans le cadre du marché carbone européen.**

### 1.1.3 Encourager les premiers utilisateurs grâce à des incitations financières

Pour accélérer la transition vers les technologies d'évitement des traînées de condensation, l'UE doit privilégier le financement via le Fonds d'innovation en ciblant particulièrement les premiers utilisateurs et les systèmes de surveillance satellitaire. En mettant l'accent sur les projets de **recherche, développement et démonstration (RD&D)** liés à l'évitement des contrails – notamment les essais à grande échelle qui tirent parti de la technologie satellitaire –, le secteur sera plus à même de mesurer, prédire et éviter efficacement la formation de ces traînées.

De plus, l'UE doit **encourager les compagnies aériennes et les constructeurs à adopter rapidement ces technologies** en leur offrant des incitations financières, à l'instar d'un soutien temporaire à des initiatives telles que l'installation et la modernisation des capteurs d'humidité. En priorisant le financement des premiers utilisateurs dans le cadre du Fonds d'innovation, l'UE pourra accélérer l'adoption des mesures liées à l'évitement des traînées de condensation, facilitant ainsi leur intégration et leur normalisation au sein de l'industrie aéronautique.

### 1.1.4 Augmenter la transparence grâce au système de label des émissions de vol

La transparence et le choix des consommateurs jouent un rôle clé dans la promotion des pratiques aéronautiques durables, mais cela n'est possible que si les passagers disposent des informations nécessaires pour prendre des décisions éclairées. Ainsi, dans le cadre de son [système de label des émissions de vol](#), l'UE **devrait intégrer des données sur les impacts climatiques hors CO<sub>2</sub>**, comme ceux liés aux traînées de condensation. En fournissant aux passagers une vision plus claire de l'empreinte environnementale de leurs trajets, cette initiative inciterait les compagnies aériennes à adopter des mesures visant à éviter la formation des contrails et à investir dès le départ dans des technologies de réduction des émissions non-CO<sub>2</sub>.

## 2. Imposer un ciel exempt de traînées de condensation

### 2.1 Adapter la gestion du trafic aérien européen à l'évitement des contrails

Les compagnies aériennes ne peuvent pas mettre en œuvre des manœuvres d'évitement des traînées de condensation sans le soutien actif des prestataires de services de navigation aérienne (PSNA). Que l'initiative soit menée par les compagnies aériennes ou par les PSNA, ces derniers jouent un rôle crucial, tant dans l'approbation des plans de vol à l'avance (phase pré-tactique) que dans l'autorisation des déviations pendant le vol (phase tactique) pour éviter la formation des contrails.

Aussi, **l'UE devra développer un cadre réglementaire visant à intégrer l'évitement des traînées de condensation dans la gestion du trafic aérien (ATM)**. Il faudra donc adapter les protocoles de planification des vols et de contrôle du trafic aérien pour prendre en compte les impacts environnementaux, en complément des critères de sécurité et d'efficacité. De plus, **les objectifs liés aux émissions hors CO<sub>2</sub> devront être intégrés aux indicateurs de performance environnementale (KPI) à la fois au niveau de l'UE et des PSNA**, pour chaque période de référence.

Il est également essentiel **d'établir des orientations claires pour les contrôleurs aériens et les compagnies aériennes, via l'EASA, la temporalité et les modalités de la mise en œuvre des déviations** visant à éviter la formation de traînées de condensation. Ces lignes directrices devront tenir compte des données météorologiques, de la congestion du trafic et des restrictions liées à l'espace aérien.

L'UE pourrait également envisager une utilisation plus souple de l'espace aérien européen, permettant une allocation dynamique des trajectoires de vol afin de favoriser l'évitement des traînées de condensation. Toutefois, tout assouplissement de l'espace aérien doit être strictement orienté vers la réduction des contrails et non vers l'augmentation du trafic aérien.

### 2.2 Renforcer la coopération entre les services météorologiques nationaux et Eurocontrol

Afin d'améliorer l'identification des ISSR, l'UE pourrait exploiter les capacités du [programme Copernicus](#) en vue de renforcer la collaboration entre les services météorologiques nationaux et Eurocontrol. Le partage de données et la mise en place d'initiatives de recherche conjointes permettraient d'améliorer la précision des prévisions, tout en contribuant à harmoniser les protocoles de prévisions des ISSR à l'échelle de l'UE. Ces mesures favoriseraient une planification optimale des vols en termes d'évitement des traînées de condensation.

### 3. Éliminer la pollution et le réchauffement résiduels grâce à une mise à jour des normes en matière de carburants d'aviation

Bien que le présent rapport n'aborde pas ce sujet en détail, il est également possible de réduire le réchauffement causé par les traînées de condensation en utilisant des carburants d'aviation à faible teneur en composés aromatiques et en soufre. Ces carburants génèrent moins de suie, ce qui diminue la probabilité de formation de contrails. Si les carburants d'aviation durables (SAF) à faible teneur en composés aromatiques et en soufre joueront un rôle clé dans la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et hors CO<sub>2</sub>, des solutions transitoires à court et moyen terme seront nécessaires, en attendant que leur production atteigne l'échelle suffisante pour répondre à la demande. **Par conséquent, l'UE devrait établir des normes pour les carburants d'aviation, imposant l'utilisation de ces carburants plus propres.**

Le [projet pilote de l'EASA](#) sur la viabilité d'un organisme européen dédié aux normes des carburants d'aviation constitue une occasion idéale pour réévaluer les réglementations en vigueur, qui n'ont guère évolué depuis les années 1970. Cette initiative pourrait aboutir à l'établissement de nouvelles normes visant à réduire la teneur en composés aromatiques et en soufre des carburants, optimisant ainsi les avantages à la fois climatiques et sanitaires.

## Pour en savoir plus

### Carlos López de la Osa García

Aviation Technical Manager

Transport & Environment

[carlos.lopez@transportenvironment.org](mailto:carlos.lopez@transportenvironment.org)

Mobile: +34 626053843

### Krisztina Hencz

Aviation Policy Manager

Transport & Environment

[krisztina.hencz@transportenvironment.org](mailto:krisztina.hencz@transportenvironment.org)

Mobile: +32 (0) 490 51 07 63

# Annexe

## I. Choix de la référence pour l'impact climatique des traînées de condensation

Si l'impact considérable des traînées de condensation sur le réchauffement climatique fait consensus, son étendue exacte fait encore l'objet de recherches.

Une étude de référence de Lee et al. (2021) a estimé que forçage radiatif moyen des traînées de condensation en 2018 s'élevait à 111,4 (33, 189) mW/m<sup>2</sup> (milliwatts par mètre carré). Une autre étude de Teoh et al. (2024) a évalué ce forçage à une moyenne de 62,1 (34,8, 74,8) mW/m<sup>2</sup> en 2019.

Pour notre analyse, nous avons choisi d'utiliser l'estimation de l'impact des traînées de condensation fournie par Teoh et al. comme scénario de référence. Cette estimation est inférieure à celle de Lee et al., mais elle se situe dans l'intervalle de l'incertitude de cette dernière.

## II. Choix de l'indicateur et de l'horizon temporel

Tel que décrit à la section 2.4.1, le choix de l'indicateur climatique et de l'horizon temporel pour comparer l'impact des traînées de condensation à celui des émissions de CO<sub>2</sub> fait encore l'objet de débats scientifiques et politiques.

Dans le cadre de notre analyse, nous avons sélectionné le GWP (Global Warming Potential) comme indicateur climatique. Il s'agit de l'indicateur le plus couramment employé dans les politiques environnementales, et il sera également intégré au système de mesure, de notification et de vérification (MRV) des effets non-CO<sub>2</sub> dans le cadre du marché carbone européen.

Concernant l'horizon temporel, nous nous sommes basés sur une période de cent ans, c'est-à-dire que nous avons intégré les effets des traînées de condensation et du CO<sub>2</sub> sur un siècle.

Un cadre temporel de 100 ans confère effectivement davantage de poids à l'impact du CO<sub>2</sub> par rapport aux traînées de condensation, comparé à des périodes plus courtes, comme 20 ans. Ce phénomène est dû au fait que l'effet de réchauffement des contrails est très fugace, tandis que le CO<sub>2</sub> persiste dans l'atmosphère pendant plusieurs décennies, voire des siècles.

Ce choix ne privilégie pas nécessairement les horizons temporels plus longs. Nous saluons cependant le fait que le marché carbone européen prenne en compte des horizons temporels de 20, 50 et 100 ans pour le MRV des effets non-CO<sub>2</sub>.

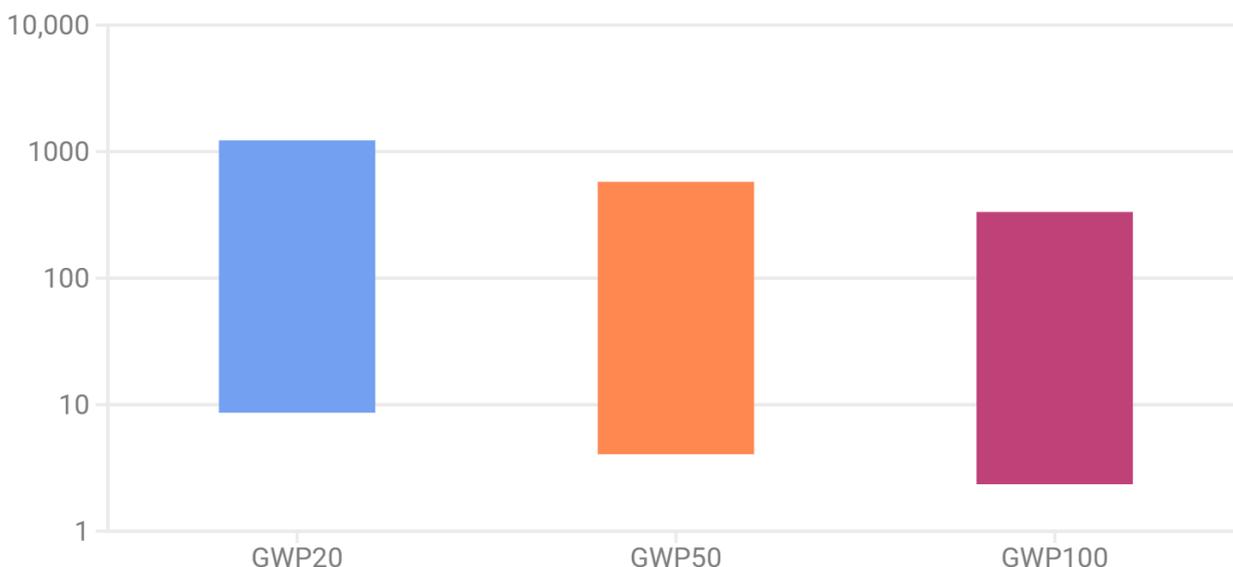
Le graphique présente les multiplicateurs issus des études de Lee et al. et de Teoh et al. pour les horizons GWP20, GWP50 et GWP100. Ces multiplicateurs permettent d'exprimer l'impact climatique des traînées de condensation en termes d'équivalent CO<sub>2</sub>, afin de le comparer à celui des émissions de CO<sub>2</sub>.

Plus le multiplicateur est élevé, plus l'impact des contrails est significatif par rapport à celui du CO<sub>2</sub>.

## Bénéfice climatique net lié à l'évitement des traînées de condensation par rapport aux émissions de CO<sub>2</sub> supplémentaires

Indicateur et horizons temporels ● GWP20 ● GWP50 ● GWP100

Ratio de bénéfice climatique net par rapport aux émissions de CO<sub>2</sub> supplémentaires



Cette combinaison de scénario de référence et d'horizon temporel fournit l'estimation la plus conservatrice de l'impact climatique des traînées de condensation par rapport au CO<sub>2</sub>. Ce choix s'inscrit dans une démarche prudente, privilégiant des hypothèses modestes chaque fois que cela est possible.

L'utilisation d'un horizon temporel plus court mettrait en évidence l'impact plus marqué des contrails par rapport à celui du CO<sub>2</sub>, renforçant ainsi davantage l'argument en faveur de la réduction de la formation de ces traînées.



### **III. Hypothèses des bénéfices climatiques de l'évitement des traînées de condensation**

Pour évaluer les bénéfices environnementaux de l'évitement des traînées de condensation à la section 2.4, nous sommes partis du principe qu'une déviation réussie permettrait de réduire de 80 % le réchauffement causé par les contrails. Cette estimation prend en compte la possibilité que les manœuvres d'évitement ne soient pas toujours totalement efficaces, notamment dans les situations où les déviations nécessaires sont trop importantes. Cette hypothèse s'accorde avec les conclusions tirées par Martín Frías et al. (2024).

L'analyse s'appuie sur les données de 2019 de Teoh et al. concernant les vols européens – c'est-à-dire les vols au départ, à destination ou à l'intérieur de l'Europe. Nous avons estimé l'impact environnemental net de l'évitement des traînées de condensation sur les 5 % de vols européens responsables de 80 % du réchauffement lié aux contrails. Nous avons supposé qu'un vol émettrait 100 tonnes de CO<sub>2</sub>.

### **IV. Influence de l'horizon temporel sur les bénéfices climatiques**

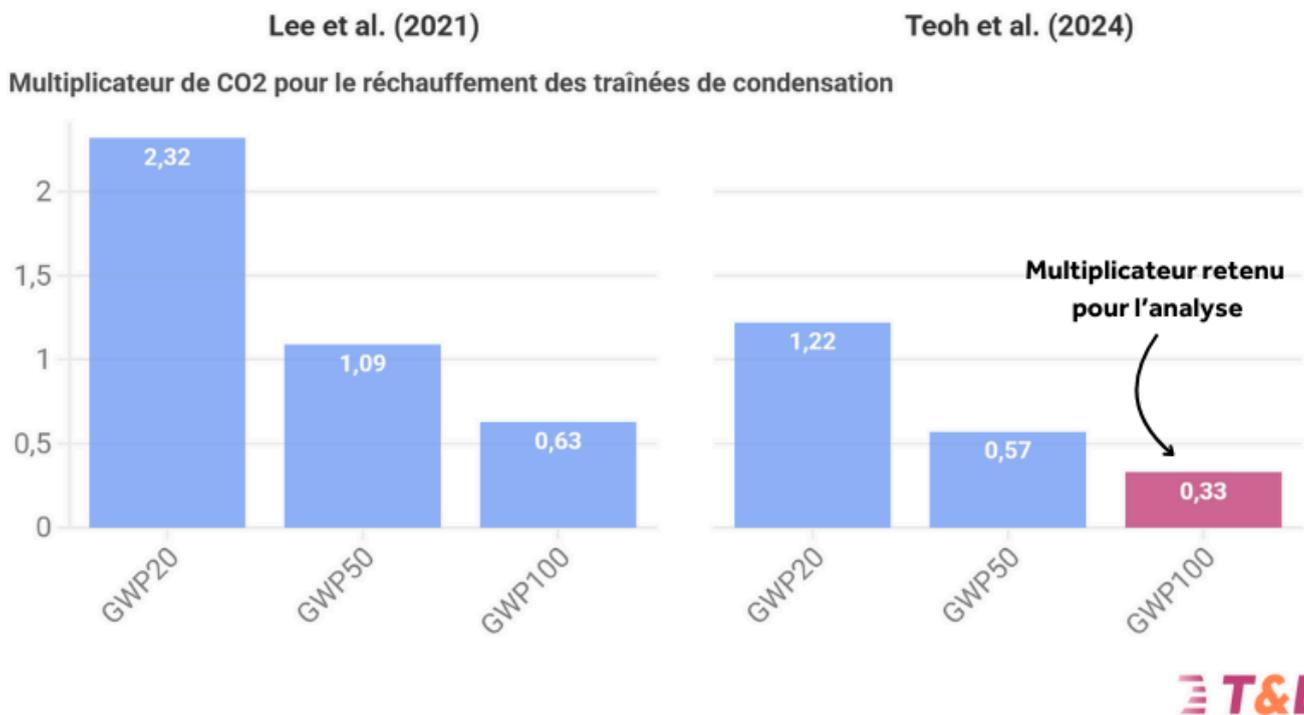
Nous avons examiné l'influence de l'horizon temporel sur les bénéfices climatiques liés à l'évitement des traînées de condensation, tel que présenté à la section 2.4. En utilisant l'indicateur GWP100, il ressort que la déviation des trajectoires qui contribuent le plus au réchauffement génère des bénéfices climatiques nets, même dans les scénarios les plus pessimistes. Le ratio des bénéfices climatiques nets par rapport aux émissions supplémentaires de CO<sub>2</sub> varie entre 2,35 et 333. Cela peut être perçu comme un « retour sur investissement climatique » : pour chaque tonne supplémentaire de CO<sub>2</sub> émise par les manœuvres d'évitement des traînées de condensation, entre 2,35 et 333 tonnes de CO<sub>2</sub> sont évitées.

Ces bénéfices climatiques sont encore plus prononcés lorsque l'on utilise les indicateurs GWP20 et GWP50 – ce qui s'explique aisément, puisqu'un horizon temporel plus court accentue l'impact environnemental des contrails par rapport au CO<sub>2</sub>.

Pour le GWP50, pour chaque tonne supplémentaire de CO<sub>2</sub> émise par les manœuvres d'évitement des traînées de condensation, il est possible de réduire entre 4,06 et 577 tonnes de CO<sub>2</sub>. Quant au GWP20, cette réduction atteint un intervalle compris entre 8,64 et 1 228 tonnes de CO<sub>2</sub>. En analysant les bénéfices climatiques nets dans le cadre de ces horizons temporels plus courts, il devient encore plus évident que le risque de causer un préjudice climatique est pratiquement nul.

## Horizons temporels et multiplicateurs CO2 issus des principales sources scientifiques

- Multiplicateurs CO2 pour le réchauffement lié aux traînées de condensation
- Multiplicateur retenu pour l'analyse



La section 2.4 a présenté trois scénarios différents de l'analyse de sensibilité, désignés comme « inefficace », « moyen » et « développement technologique ».

En simulant ces scénarios dans le cadre du GWP20 et du GWP50, nous observons un impact de réchauffement des traînées de condensation bien plus élevé dans le scénario de référence sans évitement des traînées. Nous constatons également un bénéfice climatique net plus important, car nous avons supposé la même réduction du réchauffement dû aux traînées de condensation.

## Incidence de l'horizon temporel sur l'impact climatique net de l'évitement des traînées de condensation

CO2 Réchauffement lié aux traînées



## V. Hypothèses du modèle de coûts

Nous avons évalué les coûts associés à l'évitement des traînées de condensation d'ici 2040 en nous appuyant sur notre propre analyse et sur le modèle de coûts mis au point par Roland Berger dans le rapport « Understanding Contrail Management » (Comprendre la gestion des traînées de condensation).

Notre analyse repose sur un scénario où seul un faible pourcentage de vols, responsables de 80 % du réchauffement, est ciblé. Nous avons également supposé que 80 % des manœuvres d'évitement seraient efficaces. Enfin, nous avons imaginé que, pour chaque manœuvre réussie, 80 % du réchauffement lié aux traînées serait atténué, ce qui conduit à une réduction totale du réchauffement des contrails de 51,2 %.

## Dépenses opérationnelles (opex)

On prévoit que le principal poste des dépenses opérationnelles liées à l'évitement des traînées de condensation sera la surconsommation de carburant. D'autres coûts, tels que l'ajout de personnel pour les opérateurs aériens ou les services de contrôle aérien, devraient rester

relativement faibles et sont plus difficiles à estimer à ce stade. Aussi n'ont-ils pas été inclus, conformément au modèle de Roland Berger.

Nous avons estimé une surconsommation de carburant de 0,5 % à l'échelle de la flotte. Cette estimation est 10 à 25 fois plus élevée que celle formulée par Martín Frías et al., qui avaient évalué l'impact des stratégies d'évitement des traînées visant les vols les plus polluants.

Pour les coûts du carburant, nous nous sommes basés sur un mélange de 66 % de kérosène fossile au prix du carbone, 24 % de SAF d'origine biologique et 10 % de SAF synthétique, conformément au mélange imposé par ReFuelEU pour 2040.

Le prix moyen de ce mélange de carburant s'élève à environ 2 000 €/tonne.

## **Dépenses en capital (capex)**

Pour l'estimation des dépenses en capital, nous avons adopté le modèle de Roland Berger, qui se concentre principalement sur l'acquisition et l'installation de capteurs d'humidité à bord des aéronefs ainsi que sur les systèmes d'observation associés.

Ce modèle suppose que tous les aéronefs commerciaux seront équipés de capteurs d'humidité d'ici 2040, avec une durée de vie estimée à 10 ans. Cette hypothèse se veut prudente, car il n'est peut-être pas nécessaire d'équiper l'ensemble de la flotte aérienne commerciale de capteurs d'humidité pour assurer une détection et un suivi efficaces des ISSR.

Le modèle prévoit également le déploiement d'une constellation de satellites en orbite basse, dédiée à l'observation des traînées de condensation. Cette constellation pourrait également servir à d'autres fins, permettant ainsi d'amortir les coûts globaux, car des sources de financement complémentaires pourraient être mobilisées pour soutenir son développement.

## **VI. Influence de l'horizon temporel sur les coûts**

L'adoption de différents horizons temporels influence les coûts associés à l'évitement des traînées de condensation. En effet, des horizons temporels plus courts abaissent les coûts par tonne de CO<sub>2</sub> équivalent évité.

Ainsi, en utilisant le GWP50, les coûts se situent en dessous de 12 €/tonne de CO<sub>2</sub>eq évité. L'utilisation du GWP20 réduit encore les coûts, en dessous de 6 €/tonne de CO<sub>2</sub>eq évité.