24 mars 2022

Pourra-t-on concilier décarbonation et croissance du traffic aérien?
Colloque annuel Science et Progrès 2022

S. Delbecq **J. Fontane** **N. Gourdain** H. Mugnier T. Planès F. Simatos

ISAE-SUPAERO, Toulouse

Référentiel ISAE-SUPAERO : contexte et chiffres

Contexte

- Polarisation du débat public
- Nombreux rapports : ATAG, NLR, The Shift Project/Aéro Décarbo . . .

Quelques chiffres

- Rapport scientifique de 216 pages
- Synthèse de 16 pages
- 6 auteurs : 5 chercheurs + responsable DD
- $>$ 200 références académiques
- $>$ 1 an de travail
- Objectif de neutralité

Périmètre, organisation et objectif

Périmètre

- **Traite en profondeur** la thématique aviation-climat
- **Aborde** les questions énergétiques
- **N'aborde pas** les questions économiques et sociales

Organisation du référentiel

1. Impact climatique de l'aviation
2. Leviers technologiques (et un peu opérationnels)
3. Scénarios

Objectif de cette présentation

Explication des cinq messages clés principaux du référentiel

Impact climatique de l'aviation

Effets CO_2 = émissions de CO_2

1. Combustion
2. Production du kérosène
3. Ensemble du cycle de vie

Effets non-CO_2

1. Cirrus induits (+++)
2. NO_x(++)
3. Vapeur d'eau stratosphérique (+)
4. Interaction aérosols-radiation (-)
5. Interaction aérosols-nuages (?)

Source: Lee *et al.*, 2021

Message clé n° 1

Des estimations qui dépendent du périmètre

AG = Aviation Globale **C = Combustion**
AC = Aviation Commerciale **HC = Hors Combustion**

Période	AG/AC	C/C+HC	%
Effets CO_2			
2018	AC	C	2,1 %
2018	AG	C	2,4 %
2018	AC	C+HC	2,6 %
2018	AG	C+HC	2,9 %
Effets CO_2 et non-CO_2			
1750–2018	AG	C	3,8 %
2000–2018	AC	C+HC	5,1 %

Valeur de référence pour les scénarios

Effets non-CO_2

- Non-$CO_2 \approx 2 \times CO_2$ (1750–2018)
- Effets des traînées $\approx$ 60 % total
- Incertitudes

Source: GIEC, AR6, 2021 + AIE + Lee *et al.*, 2021

Message clé n° 2

Effets non-CO_2 : des stratégies prometteuses

Effets de court terme → impact rapide

1. Changement de trajectoires

- 2 % des vols génèrent 80 % des traînées
- Détection de zones sursaturées + changement de trajectoires → ΔERF ≈ -40 %
- "Now is the time for action" ou "not yet" ?

2. Biocarburants

- 50 % de biocarburants ⇒ ΔERF ≈ -10/-25 %
- Mais limite sur la disponibilité en biocarburants

Source: Teoh *et al.*, 2020 + Kärcher *et al.*, 2021 + Moore *et al.*, 2017 + Kärcher et Voigt, 2017 + Rojo *et al.*, 2015 + Burkhardt *et al.*, 2018 + `https://www.greenairnews.com/?p=1421` + `https://www.greenairnews.com/?p=1568`

Effets CO_2 : trois leviers

Décomposition de Kaya appliquée au secteur aérien

$$\underbrace{CO_2}_{\text{Émissions de } CO_2} = \underbrace{\frac{CO_2}{E}}_{\text{Intensité carbone}} \times \underbrace{\frac{E}{Trafic}}_{\text{Intensité énergétique}} \times \underbrace{Trafic}_{\text{Trafic}}$$

Trois leviers

- **Efficacité**
- **Décarbonation**

} **Technologiques**

- **Sobriété** } **Politique**

Intensité carbone 0 %

Intensité énergétique -79 %

Trafic +1 236 %

Émissions CO_2 +176 %

Source: AIE + OACI

Leviers pour les effets CO_2 : efficacité et décarbonation

Améliorer l'efficacité énergétique

- Améliorations incrémentales (propulsion, aérodynamique, structure, systèmes)
- Améliorations de rupture (nouvelles architectures et systèmes propulsifs hybrides)

Nouveaux vecteurs énergétiques bas-carbone

- Électricité (stockage batteries)
- Hydrogène (liquide)
- Carburants de synthèse (électro- et biocarburants)

Des leviers pour diminuer les émissions de CO_2, mais limités par :

- La vitesse de déploiement
- La disponibilité énergétique

Budget carbone

Accord de Paris

Article 2 : "[Contenir] l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels et [poursuivre] l'action menée pour limiter l'élévation de la température à 1,5 °C."

Définition

Quantité cumulée maximale de CO_2 que l'on peut émettre dans l'atmosphère avant d'atteindre la neutralité carbone tout en limitant le réchauffement sous une température donnée

Objectif	Budget carbone mondial 2018
+1,5 °C	395 $GtCO_2$
+2 °C	1315 $GtCO_2$

Respect budget carbone 1,5 °C

- **-10 % par an**

Source: GIEC, SR 1.5, 2019 + GCB 2019/2020 + Accord de Paris + `https://www.un.org/fr/climatechange/paris-agreement`

Analyse de scénarios (effets CO_2)

Méthodologie

Équilibrer les émissions cumulées du secteur aérien en 2050 avec un budget carbone alloué en s'appuyant sur CAST (outil développé à l'ISAE-SUPAERO)

1. **D'abord : hypothèses technologiques**
2. **Puis : analyse de sensibilité sur les deux variables restantes**
   → Taux de (dé)croissance du trafic VS Budget carbone alloué au secteur aérien

Hypothèses technologiques

Scénario	Description	Facteur d'émission en 2050
T	tendanciel	89 gCO_2-eq/pass.km
TD	tendanciel + décarbonation partielle	52 gCO_2-eq/pass.km
RT	rupture technologique + décarbonation totale	17 gCO_2-eq/pass.km

Comparaison	
Moyenne en 2019	130 gCO_2-eq/pass.km
Dernière génération	$<$ 100 gCO_2-eq/pass.km

Détails des scenarios

Scénario	T	TD	RT
Amélioration annuelle de l'efficacité énergétique entre 2020 et 2050	1 %	1 %	1.5 %
Taux de remplissage moyen en 2050	89 %	89 %	92 %
Réduction de consommation via les opérations en 2050 par rapport à 2020	0 %	8 %	12 %
Part de la flotte qui utilisera des carburants bas-carbone en 2050	0 %	50 %	100 %

Source: Planès *et al.*, 2021

Budget carbone du secteur aérien

Part allouée au secteur aérien

- De multiples allocations sont possibles
  $\rightarrow$ choix politique
  $\rightarrow$ analyse de sensibilité, paramètre variable
- Part de référence du secteur aérien : 2,6 % $\Leftrightarrow$ -10 % par an pour le secteur aérien

Analyse de sensibilité : évolution du trafic vs part allouée

Budgets carbone médians (sans capture de carbone : afforestation, BECSC, DAC...)

- Lignes pleines : +1,5 °C
- Lignes pointillées : +2 °C

Lignes pointillées noires

- Verticale : part de référence (2,6 %)
- Horizontale : prévision industrielle (+3 % par an)

Résultats pour +1,5 °C

Baisse du trafic **OU** part allouée >5 %

Message clé n° 3

Effets CO_2 : des opportunités technologiques limitées à court terme

Urgence climatique

- **Avant 20250, la technologie seule ne suffit pas à baisser les émissions à la vitesse moyenne requise**
- **Les futurs avions bas-carbone sont nécessaires à la transition...**
- **... et permettent d'envisager une aviation bas-carbone après 2050**

Cohérent avec état de l'art scientifique

- **"The climate impact of aviation will not meet the goals of the Paris Agreement"**
- **"Aviation's current goals are inconsistent with the Paris Agreement"**

Source: Grewe *et al.*, 2021 + Lee, 2018 + GIEC, Rapport 1.5, 2018

Message clé n° 4

Un arbitrage nécessaire entre le niveau de trafic et la part du budget carbone mondial allouée au secteur aérien

Nécessite de bien poser le problème

- **Quel objectif climatique ?**
- **Priorité secteur aérien ↔ autres secteurs ?**

Rôle politique

- **Arbitrage entre les différents secteurs**
- **Trafic = levier : mécanismes de régulation ?**
- **Questionnement des usages**

Message clé n° 5

Des incertitudes sur la disponibilité énergétique et une augmentation de la consommation d'énergie primaire

Exemple : rapport "Hydrogen-powered aviation"

- Mix en 2050 : électrocarburant et H_2

→ 30 à 85 % de l'électricité bas-carbone

- Croissance du trafic, rendement de la production énergétique

Comparaison en 2019

- 8 % du pétrole
- 2-3 % de la consommation totale d'énergie

Source: Flat icons + Freepik + Ultimatearm + Clean Sky JU et Fuell Cells and Hydrogen JU, Hydrogen-Powered Aviation, 2020 + GIEC, SR 1.5, 2018 + IEA, Key World Energy Statistics 2021 + Steffen *et al.*, 2015

Récapitulatif des cinq messages clés

1. **Impact climatique de l'aviation :** des estimations qui dépendent du périmètre
2. **Effets non-CO_2 :** des stratégies prometteuses
3. **Effets CO_2 :** des opportunités technologiques limitées à court terme
4. **Un arbitrage nécessaire :** niveau de trafic vs. part du budget carbone mondial allouée au secteur aérien
5. **Des incertitudes sur la disponibilité énergétique :** compétition avec les autres secteurs et augmentation de la quantité d'énergie primaire nécessaire

Planches supplémentaires

Effets non-CO_2

Source: Lee *et al.*, 2021

Analyse de sensibilité pour différents budgets carbone (1)

Choix

- Hypothèses technologiques
- Budget carbone mondial
- Part allouée à l'aviation

Résultat

- Taux de croissance maximal

Exemple : Hypothèses technologiques intermédiaires (scénario TD)

- Budget carbone +2 °C, pas de capture de carbone, part de référence
- Résultat : stagnation du trafic

Analyse de sensibilité pour différents budgets carbone (2)

Choix

- Hypothèses technologiques
- Budget carbone mondial
- Part allouée à l'aviation

Résultat

- Taux de croissance maximal

Exemple : Hypothèses technologiques optimistes (scénario RT)

- Budget carbone +2 °C, pas de capture de carbone, part de référence
- Résultat : +3 %

Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace

10 avenue Édouard Belin – BP 54032

31055 Toulouse Cedex 4 – France

Phone: +33 5 61 33 80 80

www.isae-supaero.fr