

# Pas de décarbonation du secteur aérien sans la capture et le stockage du CO<sub>2</sub>

Par Dominique VIGNON

Membre de l'Académie des technologies

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) de l'aviation augmentent de 7 % par an. L'International Air Transport Association (IATA), qui fédère les acteurs du secteur, a annoncé, en septembre 2021, viser l'objectif « Zéro émission nette » en 2050.

Outre une meilleure maîtrise de la croissance du trafic, la réduction des émissions de GES passera essentiellement par la mobilisation de carburants substituables au kérosène, dénommés les SAF (synthetic/sustainable aviation fuels) ; l'hydrogène présentant un potentiel limité d'ici à 2050. Or, ces combustibles restent marginalement carbonés, et leur disponibilité n'est pas suffisante pour couvrir tous les besoins du trafic.

On estime donc que l'aviation devra recourir à des puits de carbone dès la décennie 2020, et que les émissions à compenser devraient atteindre 1,5 Gt de CO<sub>2</sub> par an en 2050. La certification des émissions séquestrées est délicate, d'où la nécessité de la mise en place d'une organisation indépendante de l'industrie. Le besoin en stockage des émissions françaises pour atteindre l'objectif « Zéro émission nette » dépasse les objectifs de la stratégie nationale bas carbone (SNBC).

Le transport aérien contribue au réchauffement climatique au travers de multiples vecteurs, partiellement controversés. Les émissions de gaz à effet de serre (GES) dans la haute atmosphère participent pour environ 25 à 33 % à l'accroissement du forçage radiatif [1]. Cependant, plus de la moitié de la contribution totale de l'aviation résulte de phénomènes non liés aux gaz à effet de serre : ce sont les cirrus de traînées (*contrails*), le NOx, les particules fines solides et aérosols, etc. Ni le protocole de Kyoto, ni les accords ultérieurs n'ont pris en compte ces phénomènes, même si le GIEC souligne la nécessité de les maîtriser [2].

Dans cet article, nous nous attachons à évaluer les perspectives de maîtrise des émissions du trafic aérien jusqu'en 2050. Il présente les principales voies de décarbonation des vols<sup>1</sup> et montre qu'elles ne peuvent pas permettre à elles seules d'atteindre l'objectif de « Zéro émission nette » en 2050. La neutralité carbone de l'aviation requiert donc de compenser ses émissions (*offsets*) en créant des puits de carbone lui étant spécialement dédiés et en participant à des projets d'émissions négatives (développement de carburants à base de bioénergies avec capture et stockage du CO<sub>2</sub> – BECCS) ou de capture directe du CO<sub>2</sub> dans l'air (Direct Air Capture – DAC).

Des évaluations de la capacité d'absorption de ces puits sont proposées selon diverses hypothèses. De même, a été estimé le besoin en puits de carbone pour compenser plus particulièrement les effets des émissions non GES.

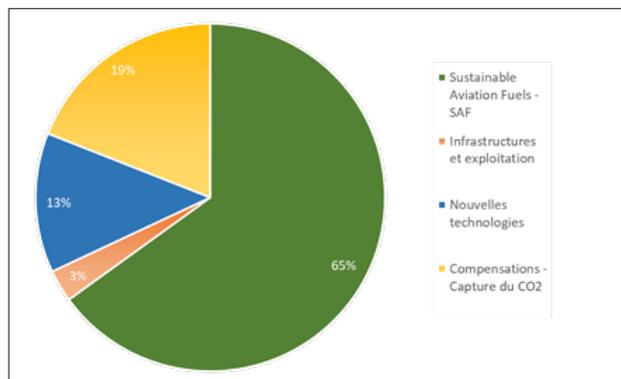
## Perspectives d'évolution des émissions de gaz à effet de serre

Le trafic aérien (passagers et fret) a régulièrement augmenté, au rythme de 7,3 % par an au cours des deux dernières décennies<sup>2</sup>. Dans le même temps, les émissions de GES du transport aérien ont augmenté de 4 à 5 % par an, pour dépasser le milliard de tonnes en 2019. Malgré d'importants efforts, la part du trafic aérien dans les émissions de GES augmente régulièrement, pour atteindre aujourd'hui 2,8 % du total [1]. Cette évaluation, un peu supérieure à celles du GIEC, est fondée sur les consommations de kérosène estimées par l'Agence internationale de l'énergie. Si les émissions mondiales diminuent progressivement avec l'espoir de limiter le réchauffement terrestre à 2°C en 2050, les émissions de l'aviation représenteront néanmoins 15 % des émissions de GES en 2050. Cette part sera bien évidemment beaucoup plus importante si l'on respectait une trajectoire « 1,5°C – Zéro émission nette ».

<sup>1</sup> Une partie des émissions du transport aérien (7 %) résulte de l'exploitation des aéroports et du roulage au sol des avions. Nous ne traitons pas ici de ce sujet.

<sup>2</sup> Airlines for America, "World Airlines Traffic and Capacity", Data and statistics, <https://www.airlines.org/dataset/world-airlines-traffic-and-capacity/>

Trois leviers d'action permettent de réduire les émissions de GES : 1) réduire le trafic ; 2) améliorer l'exploitation des avions et mettre en œuvre de nouvelles technologies (hydrogène, etc.) ; et 3) utiliser des carburants neutres en carbone. Si la mobilisation de ces trois leviers est insuffisante, l'aviation devra alors compenser ses émissions excédentaires en captant et en séquestrant ses GES.



Les leviers d'une décarbonation complète du transport aérien [7] – Source : IATA (2021), "Net-Zero Carbon Emissions by 2050".

Greta Thunberg fustige le trafic aérien. Le Shift project<sup>3</sup> souhaite, quant à lui, une stabilisation du trafic aérien, voire une décroissance de celui-ci de 15 % d'ici à 2035 [3]. Ces objectifs sont cependant irréalistes au regard de la loi d'airain du transport aérien : sa croissance dans chaque pays est fortement corrélée à celle du PNB, avec une élasticité un peu supérieure à 1 [4]. Aujourd'hui, trois-quarts des passagers se déplacent pour leurs loisirs, la visite de leurs proches ou leurs études. Cette demande de voyages aériens n'est pas prête de ralentir, même si tous les voyages ne sont pas indispensables [5]. Des milliards d'individus dans les pays en développement vont intégrer la « classe moyenne », ils seront le moteur de cette croissance du trafic.

Selon l'hypothèse basse du Air Transport Action Group (ATAG<sup>4</sup>), le trafic aérien devrait poursuivre une croissance de 2,7 % par an jusqu'en 2050 [6]. L'Association du transport aérien international (IATA) a présenté, lors de sa dernière assemblée générale (en septembre 2021), une hypothèse de croissance du trafic de 3,2 % jusqu'en 2050, après un rattrapage sur trois ans du creux lié à la pandémie du Covid-19 [7]. L'IATA a également pris l'engagement d'atteindre l'objectif de zéro émission nette en 2050 [7]. Cet engagement est sensiblement plus ambitieux que celui qui prévalait jusque-là, lequel ne visait, dans un premier temps, qu'à stabiliser les émissions au niveau de celles de 2020, puis à les réduire progressivement jusqu'en 2050, pour atteindre à cette échéance des émissions annuelles moitié moindres de celles de 2005. Comment l'objectif de zéro émission nette que l'aviation déclarait inaccessible pourrait-il être finalement atteint ?

<sup>3</sup> Groupe de réflexion animé par Jean-Marc Jancovici.

<sup>4</sup> L'ATAG est une association de compagnies aériennes, d'avionneurs, d'équipementiers, etc., qui est proche de l'IATA.

Une réduction marginale des émissions (3 %) peut être assurée par une meilleure gestion des opérations au sol (roulage), des plans de vol (ciel aérien unique, gestion des atterrissages, etc.) et par certaines mesures techniques (allègement des sièges, installation systématique d'ailettes en bout d'aile (*winglets*), etc.).

Plus problématique est le recours à de nouvelles technologies sensées permettre une baisse de 13 % des émissions. Pour l'IATA, il s'agit de l'utilisation de motorisations électriques et de celle de l'hydrogène comme carburant. Cependant, les motorisations électriques n'ont qu'un avenir très restreint dans le secteur aérien, essentiellement du fait du poids des batteries. Les avions électriques seront de très petite taille pour couvrir de faibles distances : leur concours à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ne sera donc que marginal [8].

L'hydrogène (H<sub>2</sub>) fait l'objet d'un intérêt certain en France : c'est largement dû au fait qu'Airbus s'est engagé à développer cette technologie en contrepartie des aides dont il a bénéficié lors de la crise du Covid-19. Cependant, les difficultés sont considérables. On ne peut embarquer l'hydrogène sous sa forme gazeuse sous pression, car le poids des réservoirs serait disproportionné. C'est donc l'hydrogène liquide qui est envisagé. Or, sa densité n'est que de 0,07, soit onze fois inférieure à celle du kérosène. Malgré les hautes performances énergétiques de l'hydrogène par unité de masse, l'énergie de l'hydrogène liquide par unité de volume est 4,25 fois inférieure à celle du kérosène. Les stockages doivent en outre être très bien isolés, ce qui implique de fortes épaisseurs de calorifuge rendant impossible le stockage dans les ailes. La longueur des fuselages des avions doit donc être augmentée d'environ un tiers pour pouvoir embarquer le carburant nécessaire pour un vol de moyenne distance (< 1 500 km). Les vols longue distance (représentant plus de la moitié des émissions) ne seront pas éligibles à l'hydrogène.

L'hydrogène présente d'autres inconvénients. Ce n'est pas un combustible « drop-in » qui pourrait se substituer simplement au kérosène en utilisant les mêmes infrastructures. Il nécessite une logistique nouvelle non seulement en matière de production, mais aussi de transport et de stockage. En outre, le rendement énergétique de la production d'hydrogène liquide est médiocre. Pour de multiples raisons, la pénétration de l'hydrogène restera au mieux très limitée d'ici à 2050. On notera en particulier que Boeing ne s'y intéresse pas du tout, il est donc peu probable qu'une infrastructure hydrogène se développe aux États-Unis. Il faudra donc trouver d'autres leviers pour arriver à hauteur des 13 % d'émissions que l'IATA espère éviter en recourant à l'électricité et à l'hydrogène. Quel rôle pourront jouer en la matière les carburants de synthèse (Sustainable, ou Synthetic Aviation Fuels –SAF) ?

Les SAF sont le grand espoir, si ce n'est le grand pari de l'aviation pour assurer sa décarbonation. On les classe en deux familles :

- d'une part, les BtL (Bio to Liquid), qui sont des bio-carburants de deuxième génération. Ils ne font appel ni aux oléagineux ni aux sucres et donc ne concurren-

rencent pas les besoins alimentaires. En revanche, ils utilisent la lignocellulose fournie par les déchets forestiers, la paille et certaines cultures dédiées (le miscanthus, une herbacée vivace). Ils peuvent aussi mobiliser des déchets urbains solides, des déchets d'exploitation forestière, des huiles et des graisses récupérées, etc. Leur production peut être améliorée en injectant de l'hydrogène vert (obtenu par électrolyse) durant le *process* ; ils sont alors appelés e-BtL ;

- et, d'autre part, les PtL (Power to Liquid). Cette technique combine directement du CO<sub>2</sub> capturé et de l'hydrogène vert pour synthétiser des chaînes hydrocarbonées. La faisabilité de cette solution ne fait aucun doute, mais elle est très fortement consommatrice d'électricité.

Le secteur aérien soutient que la disponibilité des BtL sera suffisante, et ce sans impacter les usages alimentaires des terres. C'est un sujet sur lequel plus de recherches seraient nécessaires, les seules études réalisées confirmant cette affirmation émanant du secteur aérien ([6] et [9]). En tout état de cause, les SAF n'ont pas la capacité d'être 100 % décarbonés, leur production peut en effet émettre du CO<sub>2</sub>. Et il faut également prendre en compte les changements dans l'utilisation et l'affectation des terres et la foresterie (UTCATF). Ces effets se quantifient à travers un facteur de réduction d'émissions (ERF). Sa valeur moyenne pour les différents vecteurs de production du PtL est actuellement d'environ 70 % [6], avec un potentiel d'amélioration certain.

## Quels sont les besoins en matière de compensation des émissions ?

Si l'on retient l'hypothèse basse de croissance du transport aérien formulée par l'ATAG (2,7 % par an) et des gains de gestion et d'optimisation de 3 % par an, les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur aérien, sans recours à des carburants neutres en carbone, dépasseraient les 2,1 Gt en 2050. L'IATA et l'ATAG ([6] et [7]) estiment que les SAF seraient disponibles en 2050 à hauteur de 450 Mm<sup>3</sup> (360 Mt) et émettraient environ 1,2 Gt de GES<sup>5</sup>, dont l'essentiel – hors ERF – serait neutre en carbone. Une partie des SAF pourraient être des PtL à émissions négatives (le CO<sub>2</sub> issu de leur production serait capturé et séquestré (la bioénergie avec capture et stockage du CO<sub>2</sub> – BECCS)). Cette part est très difficile à estimer, mais l'on peut admettre qu'elle correspondrait à environ 10 % des SAF, soit 36 Mt.

En considérant comme négligeable le concours des vecteurs hydrogène et électrique et en tenant compte de ces 36 Mt d'émissions négatives, il serait donc nécessaire, en 2050, de compenser des émissions de CO<sub>2</sub> à hauteur :

- de 0,9 Gt, du fait de l'insuffisante quantité des SAF et de la nécessaire combustion du kérosène fossile (2,1 - 1,2) ;

<sup>5</sup> La combustion parfaite d'une tonne de kérosène engendre 3,14 tonnes de CO<sub>2</sub>, auxquelles il faut ajouter le CO<sub>2</sub> généré par le cycle de production et de distribution du kérosène. Nous arrivons à un total de 3,2 tonnes.

- et, en admettant un ERF de 85 % des SAF à cette date, de 0,18 Gt tenant au fait que les SAF ne sont pas complètement neutres (15 % x 1 200).

Soit un peu plus de 1,0 Gt à stocker en 2050 pour compenser les émissions de GES.

Cependant, les besoins de stockage pourraient également être importants dans la période transitoire (d'ici à 2050), durant laquelle les SAF ne seront disponibles qu'en quantité limitée. L'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) rattachée à l'ONU estime qu'il faudrait compenser environ 80 % de l'accroissement des émissions de la période 2019 à 2050 [6], soit en moyenne 0,42 Gt par an. Pour cela, elle a mis en place un programme de compensation des émissions dénommé Corsia, qui, basé sur le volontariat jusqu'en 2026, deviendra obligatoire à partir de cette date. Corsia, à l'instar des Clean Development Mechanisms du Protocole de Kyoto, propose aux opérateurs aériens de financer des opérations de séquestration du CO<sub>2</sub> (reforestation, stockage géologique, etc.). Le programme n'en est qu'à ses tout débuts. Nous devons cependant insister sur la rigueur qu'il est nécessaire d'observer au niveau des certifications pour s'assurer de l'additionalité, de la transparence ou de l'absence de double compte : en effet, un crédit utilisé pour compenser une tonne de GES dans le cadre du programme Corsia ne doit pas également servir à remplir les obligations d'un pays vis-à-vis de l'Accord de Paris comme l'a souligné la SNBC (2021). Le contrôle de ce système peut-il dès lors être laissé à l'industrie ? En tout état de cause, un recensement extrêmement fin des projets, de leurs performances et de leur évolution sera nécessaire.

Enfin, il ne faut pas oublier les effets des émissions non GES de l'aviation, dont l'impact radiatif est sensiblement supérieur à celui des GES. Par chance, les SAF sont dépourvus de composants aromatiques et de sulfures, ce qui a un effet bénéfique sur les cirrus formés par les traînées de condensation des avions. Si l'on admet que ce bénéfice induit conduira les effets des émissions non GES à ne représenter que 80 % des effets des GES, il faudra alors, pour les compenser, séquestrer environ 1,6 Gt de GES par an en 2050. L'addition des besoins en compensation des GES et des émissions non GES porte le besoin de stockage à 1,2 Gt en moyenne par an d'ici à 2050 et à 2,64 Gt à cette échéance.

Il est très difficile d'anticiper la répartition entre besoins de stockage géologique et besoins de séquestration naturelle (reforestation, afforestation, etc.) ; cette dernière n'est pas nécessairement la panacée et se heurte à des conflits d'usage. Mais l'on peut penser que l'aviation devra à partir de 2050 compenser au moins 1,5 Gt de CO<sub>2</sub> par an en stockages géologiques. C'est loin d'être insurmontable au regard du potentiel de stockage évalué par l'Agence internationale de l'énergie [10]. Mais l'arrivée tardive des SAF implique de commencer sans tarder à opérer des compensations.

Et la France dans tout cela ? Elle ne semble pas avoir perçu l'ampleur, ni même l'existence de la question. La Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) fixe un objectif de développement des biocarburants de 5 % en

2030 et de 50 % en 2050, ce qui est très en deçà des besoins. Par cohérence avec la stratégie de l'IATA, il devrait être doublé. Les émissions totales de CO<sub>2</sub> pour l'ensemble du trafic aérien français<sup>6</sup> se sont élevées à 24,3 Mt en 2019 [11]. Compte tenu des effets indirects de l'aviation et après recours à 100 % aux SAF, c'est cet ordre de grandeur qu'il faudrait compenser chaque année à partir de 2050. La croissance du puits de carbone « Sols et forêts » est déjà mobilisée pour concrétiser les ambitions de la Stratégie nationale bas carbone (SNBC). **Il faudra donc recourir au stockage géologique : le volume sera du même ordre de grandeur que celui de l'objectif de la SNBC pour 2050, mais pour couvrir la totalité des besoins.** Faudra-t-il alors que les entreprises françaises soient contraintes de financer des opérations de reforestation ou de stockage hors de France ?

## Bibliographie

[1] LEE D. S. *et al.* (2021), "The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018", *Atmospheric Environment*, 2044.

[2] IPCC (2018), "Global Warming of 1.5°C", an IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways.

[3] The Shift Project et Supaero Decarbo (2021), « Pouvoir voler en 2050 – Quelle aviation dans un monde contraint ? ».

[4] BOURGUIGNON F. & DARPEIX P.-E. (2016), "Air traffic and economic growth: the case of developing countries", HAL Id: halshs-01305412.

[5] GÖSSLING S. *et al.*, "Can we fly less? Evaluating the 'necessity' of air travel", *Journal of Air Transport Management*, vol. 81, October, 101722.

[6] Air Transport Action Group (2020), "Balancing growth in connectivity with a comprehensive global air transport response to the climate emergency", Waypoint, 2050.

[7] IATA (2021), "Net-Zero Carbon Emissions by 2050".

[8] Académie de l'air et de l'espace (2021), « Transport aérien en crise et défi climatique : vers de nouveaux paradigmes ».

[9] World Economic Forum (2020), "Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation", in collaboration with McKinsey.

[10] IEA (2021), "Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage".

[11] DGAC (2020), « Les chiffres clés du transport aérien ».

---

<sup>6</sup> Vols intérieurs et la moitié des vols internationaux.