



Berne, le 21 février 2024

Trafic aérien neutre en termes de CO₂ d'ici 2050

Rapport du Conseil fédéral

en réponse au postulat 21.3973 du 24 août 2021
de la Commission de l'environnement, de l'amé-
nagement du territoire et de l'énergie du Conseil
national

Table des matières

Résumé	3
1 Contexte	3
1.1 Transport aérien et politique climatique	4
1.2 Importance économique du transport aérien	5
1.3 Effet du transport aérien suisse sur le climat	5
1.4 Objectifs climatiques du secteur aérien	6
2 Potentiel des mesures de réduction des émissions de CO ₂	7
2.1 Efficacité énergétique des avions	8
2.2 Efficacité énergétique de l'exploitation des avions	9
2.3 Carburants d'aviation durables	9
2.4 Avions à hydrogène et électriques	10
2.5 Potentiel global des mesures techniques dans le secteur aérien	12
2.6 Technologies d'émission négative	14
2.7 Mesures basées sur le marché	15
3 Plan de mise en œuvre pour la Suisse	16
3.1 Instruments existants	16
3.2 Contexte international	16
3.3 Instruments envisagés d'ici 2030	17
3.4 Perspectives pour 2050	19
4 Vols neutres en termes de CO ₂ au DDPS	19
4.1 Contexte	19
4.2 Mesures de réduction des émissions de CO ₂ dans l'aviation militaire	20
4.3 Mesures d'ici 2030	21
4.4 Perspectives pour 2050	21
4.5 Répercussions financières	21
5 Conclusion	21
Annexe : prise de position actualisée sur le postulat déposé le 6 mai 2020 par le Groupe des Vert-e-s (20.3384 Plan directeur pour le trafic aérien. Établir de nouvelles règles du jeu pour le secteur de l'aviation)	23
Références	24
Abréviations	27

Résumé

Le trafic aérien au départ des aéroports suisses est aujourd'hui responsable de près de 11 % des émissions de gaz à effet de serre de notre pays. La Stratégie climatique à long terme de la Suisse, l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) et le secteur aérien mondial ambitionnent de réduire ces émissions jusqu'à atteindre l'objectif de zéro émission nette à l'horizon 2050. Cet objectif sera inscrit dans la loi en 2025 à la suite de l'acceptation de la loi fédérale sur les objectifs en matière de protection du climat, sur l'innovation et sur le renforcement de la sécurité énergétique (LCI). Le présent rapport indique les pistes possibles pour que l'aviation atteigne la neutralité CO₂ d'ici 2050.

Le recours aux carburants d'aviation durables (CAD) constitue à cet égard la mesure phare. On compte aussi sur les gains d'efficacité dans l'exploitation des aéronefs et au niveau des aéronefs eux-mêmes. Il ne faut en revanche pas attendre de miracles de l'électrification des avions et de l'hydrogène, du moins pas avant 2050. La combinaison de ces mesures techniques permettra au transport aérien de réduire une part importante de ses émissions de CO₂ fossile à l'horizon 2050. On estime cependant que 10 % au moins des émissions de CO₂ du transport aérien devront être compensées par le recours aux technologies d'émission négative (NET).

Les mesures basées sur le marché, qui s'appliquent d'ores et déjà au trafic national et international au départ de la Suisse, peuvent contribuer de manière significative à la réduction des émissions. Et la prochaine extension du système suisse d'échanges de quotas d'émission donnera une impulsion supplémentaire à ces incitations. Les mesures qui touchent le transport aérien international devraient impérativement être coordonnées entre les pays.

L'obligation d'incorporer une part minimale de CAD dans le carburant constitue le moyen le plus efficace pour que le transport aérien atteigne ses objectifs climatiques. En corollaire, il est prévu de promouvoir les mesures techniques, notamment le développement du marché des CAD. Selon le message et après l'examen en première lecture au Parlement, les deux mesures devraient être inscrites dans la loi sur le CO₂ pour la période postérieure à 2024.

L'aviation militaire mise elle aussi en priorité sur des gains d'efficacité et sur les CAD. Les Forces aériennes ont commencé en 2023 à s'approvisionner en CAD et entendent accroître leur part au fil des ans. L'aviation militaire pourra ce faisant aussi concrétiser ses objectifs climatiques, au besoin en recourant aux NETS.

L'aviation suisse peut atteindre la neutralité CO₂ à l'horizon 2050 à condition que les mesures qui s'imposent soient prises sans tarder. La loi sur le CO₂ pour la période postérieure à 2024 joue à cet égard un rôle décisif. Celle-ci - en s'appuyant sur les instruments existants - est à même de créer un cadre permettant de réduire d'ici 2050 plus de 70 % des émissions de CO₂ du transport aérien compte tenu de la prestation de transport. Il s'agira de s'attaquer aux autres effets sur le climat dans le cadre de futures révisions en exploitant l'amélioration des instruments existants ou le développement de nouveaux instruments.

1 Contexte

Le postulat 21.3973 de la Commission de l'environnement, de l'aménagement du territoire et de l'énergie du Conseil national, adopté par le Conseil national le 17 mars 2021, charge le Conseil fédéral « de montrer comment il est possible d'atteindre un trafic aérien neutre en termes de CO₂ d'ici 2050 ». Le présent rapport, rédigé en réponse au postulat précité, décrit les mesures d'ordre technique et basées sur le marché ainsi que les instruments politiques qui permettraient à la Suisse d'atteindre cet objectif.

1.1 Transport aérien et politique climatique

Ces dernières années, le transport aérien a été associé aux efforts de ralentissement du réchauffement climatique dans le cadre de plusieurs accords internationaux et des objectifs nationaux. La Convention-Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) formule à l'intention des 198 parties signataires des conditions-cadres afin de stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Elle a débouché en décembre 2015 sur l'Accord de Paris. Ce dernier vise à contenir l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2 °C et autant que possible en dessous de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels. La Suisse a ratifié l'Accord de Paris en 2017 et s'est engagée à réduire de moitié d'ici à 2030 ses émissions par rapport à 1990. Conformément à la CCNUCC, les émissions de GES de l'aviation internationale sont exclues de cet objectif, mais non le trafic aérien intérieur.

Compte tenu des engagements pris par la Suisse au titre de la CCNUCC et de l'Accord de Paris, le Conseil fédéral a décrété en 2019 que la Suisse devait réduire ses émissions de GES à zéro net d'ici à 2050. Il a par ailleurs adopté en 2021 la « Stratégie climatique à long terme de la Suisse », qui présente les lignes directrices de la politique climatique jusqu'à 2050 (Conseil fédéral 2021). La stratégie climatique intègre les émissions du trafic aérien dans l'objectif de zéro net d'émissions pour autant que cela soit scientifiquement et techniquement faisable.

Le 18 juin 2023, le peuple suisse a accepté la loi fédérale sur les objectifs en matière de protection du climat, sur l'innovation et sur le renforcement de la sécurité énergétique (LCI). Il est prévu qu'elle entre en vigueur en même temps que l'ordonnance correspondante le 1^{er} janvier 2025. La LCI ancre ainsi dans la législation nationale l'objectif zéro net d'émissions de GES à l'horizon 2050. La LCI prend également en considération les émissions de GES du transport aérien international au départ de la Suisse. Aux termes de l'art. 3, al. 4, LCI, les objectifs de réduction doivent être réalisables sur le plan de la technique et économiquement supportables. Ils doivent de plus être atteints dans la mesure du possible grâce à des réductions d'émissions réalisées en Suisse. Le tableau 1 énumère les objectifs climatiques de la Suisse en lien avec le transport aérien.

Base réglementaire	Champ d'application	Émissions de GES par rapport à 1990		
		2030	2040	2050
Projet de loi sur le CO ₂ *	Tous secteurs confondus, uniquement transport aérien intérieur**	50 %		
LCI	Transport, uniquement transport aérien intérieur	43 %	0 %	
LCI	Tous secteurs confondus, uniquement transport aérien intérieur***	25 %	0 %	
LCI	Tous secteurs confondus, y compris transport aérien international au départ de la Suisse			0 %

* Selon message et examen en première lecture au Parlement

** De plus, la réduction doit atteindre 35 % en moyenne sur la période 2021-2030

*** De plus, la réduction doit atteindre 36 % en moyenne sur la période 2031-2040 et 89 % sur la période 2041-2050

Tableau 1 Objectifs climatiques de la Suisse pour le transport aérien (année de référence : 1990)

La réalisation des objectifs climatiques susmentionnés se mesure en appliquant les méthodes développées par la CCNUCC. Le monitoring de la Suisse est fondé sur l'inventaire des gaz à effets de serre, lequel est mis à jour tous les ans. Les émissions de CO₂ fossile découlant des carburants d'aviation embarqués en Suisse tous vols confondus constituent l'indicateur déterminant pour le transport aérien. En fonction de l'objectif, une distinction est établie entre vols à destination de la Suisse et vols à destination de l'étranger. Ainsi, les vols au départ de l'EuroAirport Bâle-Mulhouse ne sont pas pris en compte puisque la fourniture de carburant à l'aéroport est imputée à la France. Le présent rapport reprend la même métrique pour distinguer les émissions. Les expressions « zéro net d'émissions de CO₂ » ou « neutralité CO₂ » s'inscrivent dans ce cadre.

1.2 Importance économique du transport aérien

Le transport aérien suisse a une forte dimension internationale : en 2019, 99,7 % des passagers aériens se sont rendus à l'étranger. Le transport aérien suisse a une forte dimension internationale : en 2019, 99,7 % des passagers aériens se sont rendus à l'étranger. De bonnes liaisons entre la Suisse et le reste du monde sont très importantes pour l'économie : le Rapport 2016 sur la politique aéronautique de la Suisse (LUPO 2016, FF 2016 1675) indique que le transport aérien génère annuellement en Suisse une valeur ajoutée de plus de 12 milliards de CHF, et même de plus de 24 milliards de CHF si l'on tient compte des effets induits (Conseil fédéral 2016, chiffres de 2014). Le secteur aéronautique avec ses organismes de conception, de production et de maintenance joue à cet égard un rôle de premier plan.

La bonne desserte que le transport aérien permet d'assurer contribue à la forte attractivité de la place économique suisse (Conseil fédéral 2016), ce dont profitent les entreprises et organisations internationales qui ont leur siège en Suisse et le secteur touristique indigène. À côté de cela, le fret aérien revêt une grande importance pour les industries exportatrices : près de la moitié des exportations de la Suisse en valeur sont transportées par avion (Université de Saint-Gall 2020). Le transport aérien est en outre le seul mode de transport qui couvre l'essentiel de ses frais d'infrastructure et d'exploitation de manière autonome (INFRAS 2015). À cela s'ajoutent des coûts externes qui se chiffrent annuellement à quelque 1,5 milliard CHF¹ et recouvrent les atteintes à la santé et à l'environnement (bruit, pollution, effet sur le climat) du transport aérien (ARE 2022).

Avant la pandémie de COVID-19, le trafic aérien sur les aéroports suisses était en pleine croissance, accompagnant en cela l'évolution de l'économie. Le nombre de passagers-kilomètres au départ des aéroports suisses (sans l'EuroAirport Bâle-Mulhouse) a ainsi augmenté en moyenne de 5,5 % par an entre 2009 et 2019 (OFS 2022). Il a plus que triplé depuis 1990. En 2019, le chiffre des passagers-kilomètres au départ des aéroports suisses a égalé celui du trafic routier suisse². S'agissant du fret aérien, depuis 1990, entre 300 000 et 500 000 tonnes sont transportées chaque année par avion (importations et exportations, OFS 2022). En volume, cela représente moins de 1 % des importations et exportations de la Suisse, tous moyens de transport confondus (OFS 2021).

La pandémie de COVID-19 a frappé l'aviation civile de plein fouet. En 2020, les aéroports nationaux suisses ont enregistré une baisse de 70 % de leur fréquentation (OFS 2022). Les prestations de fret ont aussi nettement reculé. Les conséquences économiques pour le secteur ont été considérables. Le trafic aérien au départ de la Suisse a toutefois recommencé à croître depuis le printemps 2022. L'Agence européenne de la sécurité aérienne (AESA) s'attend à ce que le nombre de mouvements retrouve son niveau de 2019 en 2024 (AESA 2022). Les chiffres 2020 et 2021 de l'aviation suisse n'étant pas représentatifs, le présent rapport se base sur les chiffres de 2019.

1.3 Effet du transport aérien suisse sur le climat

En 2019, les vols au départ d'aéroports suisses ont généré 5,7 millions de tonnes de GES. De ce total, 98 % sont imputables aux vols internationaux, le reste (2 %) aux vols intérieurs. Entre 1990 et 2019, les émissions de GES de l'aviation suisse ont augmenté de 75 %. Selon l'inventaire des gaz à effet de serre, les émissions de GES du transport aérien suisse comptent pour près de 11 % des émissions totales de GES de la Suisse. À l'échelle mondiale, l'aviation civile est responsable de près de 2,5 % des émissions anthropiques de GES. Autrement dit, 0,5 % des émissions de GES générées par le transport aérien mondial est attribuable à la Suisse. Selon la convention cadre sur les changements climatiques, le CO₂ est pratiquement le seul GES rejeté par le transport aérien³.

L'objectif de la neutralité CO₂ à l'horizon 2050 implique qu'à partir de cette date, les émissions de CO₂ fossile des carburants d'aviation embarqués en Suisse devront être autant que possible nulles. Les

¹ Cette estimation porte sur 2019, cf. références.

² OFS (2022) et <https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/personenverkehr/leistungen.html> (État : 12 janvier 2024)

³ Il rejette également des traces de protoxyde d'azote (N₂O) et réduit en données nettes la concentration de méthane (CH₄) dans l'atmosphère.

Trafic aérien neutre en termes de CO₂ d'ici 2050

émissions résiduelles de CO₂ fossile devront être compensées en recourant aux technologies d'émission négative (NET) (cf. ch. 2.6). Il existe en outre d'autres effets sur le climat, qui ne sont pas directement causés par les émissions de GES (voir encadré ci-après).

Impact climatique des émissions autres que le CO₂

L'effet du transport aérien sur le climat ne se limite pas aux effets induits par les émissions de CO₂. Le transport aérien a d'autres effets qui ne sont pas directement imputables aux GES. Ces effets hors CO₂ agissent en général de manière indirecte sur le climat. Lorsque les conditions atmosphériques sont réunies, les particules de suie rejetées par les avions aboutissent à la formation de traînées de condensation et de cirrus qui, en général, ont un effet refroidissant la journée et réchauffant la nuit. On voit que l'effet climatique n'est ici pas directement lié au volume d'émissions et que pour l'évaluer, il faut prendre en compte de nombreux autres facteurs qui varient d'un vol à l'autre. Alors que l'effet climatique d'une tonne de CO₂ émise est bien documenté, de grandes incertitudes entourent la mesure et l'évaluation des effets (réchauffants ou refroidissants) hors CO₂ sur le climat (Neu 2021). Sur la base des émissions historiques, on estime que l'impact des effets hors CO₂ sur le climat est à ce jour près du double de l'impact dû aux émissions de CO₂ (Neu 2021, Lee 2023). Cette estimation de l'impact climatique passé n'est pas exploitable pour réaliser des prévisions : si les effets des émissions de CO₂ s'étendent sur plusieurs décennies, voire des siècles, les effets hors CO₂ ne durent que quelques heures, sinon quelques jours. Ils sont donc très sensibles aux variations de trafic et notamment aux mesures de réduction des effets hors CO₂. La Stratégie climatique à long terme de la Suisse assigne aussi des objectifs pour ces effets qui doivent diminuer d'ici 2050 (Conseil fédéral 2021). L'encadré du ch. 2.5 décrit les mesures permettant d'atteindre cet objectif et leur potentiel.

1.4 Objectifs climatiques du secteur aérien

Entre 2020 et 2022, plusieurs associations et organisations du secteur aérien se sont donné pour objectif de parvenir au zéro net d'émissions de CO₂⁴. En Suisse, Aerosuisse, easyJet Switzerland, Swiss, Swiss Business Aviation Association et els aéroports nationaux ont publié une déclaration d'intention par laquelle ces acteurs souscrivent aux objectifs de la Stratégie climatique à long terme de la Suisse et, partant, à l'objectif de zéro net d'émissions de CO₂ à l'horizon 2050 (cf. ch. 1.1). Au niveau international, l'Association du transport aérien international (IATA), l'association faîtière des compagnies aériennes, a annoncé en octobre 2021 que l'ensemble du secteur aéronautique devait atteindre l'objectif zéro net d'émissions de CO₂ à l'horizon 2050⁵.

En octobre 2022, l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) a validé l'objectif de zéro net d'émissions de CO₂ d'ici 2050 pour le transport aérien (OACI 2022a). La Suisse adhère à cet objectif qu'elle a largement contribué à définir.

Émissions des aéroports

Outre les aéronefs, les aéroports rejettent aussi passablement de GES. Ils sont responsables de 4 % des émissions de CO₂ de l'aviation suisse (Ecoplan 2021). Ces émissions ne sont pas comptabilisées avec les émissions du transport aérien mais apparaissent dans l'inventaire des gaz à effet de serre pour les secteurs Industrie, Bâtiment et Transports terrestres. Les aéroports nationaux suisses se sont engagés à atteindre le zéro net d'émissions de CO₂ à l'horizon 2040 (voir plus haut). L'EuroAirport Bâle-Mulhouse entend que cet objectif soit déjà atteint d'ici 2030⁶. Une série de mesures sont prévues à cet effet, notamment une meilleure efficacité énergétique, l'utilisation de sources d'énergie renouvelables

⁴ <https://www.arcs.aero/sites/default/files/downloads/Absichtserkl%C3%A4rung%20Sustainable%20Aviation.pdf> (État : 12 janvier 2024)

⁵ <https://www.iata.org/en/pressroom/pressroom-archive/2021-releases/2021-10-04-03/> (État : 12 janvier 2024)

⁶ <https://www.aci-europe.org/downloads/content/ACI%20EUROPE%20RESOLUTION%202023.pdf> (État : 12 janvier 2024)

et l'électrification du parc de véhicules. Comme les émissions, ces mesures ne sont pas directement imputées à l'aviation. Aussi, elles ne seront pas abordées plus avant dans le cadre du présent rapport.

2 Potentiel des mesures de réduction des émissions de CO₂

En Suisse et sur le plan international, on recense plusieurs rapports et stratégies qui décrivent les moyens à mettre en œuvre et la voie à suivre pour que l'aviation atteigne la neutralité CO₂. Ainsi, l'objectif zéro net d'émissions de CO₂ porté par l'OACI repose sur les travaux de plusieurs centaines d'experts du monde entier qui, conjointement, ont analysé en détail la faisabilité de cet objectif (OACI 2022)⁷. L'Air Transport Action Group (ATAG) a de son côté rédigé un rapport sur la faisabilité des objectifs climatiques dans le transport aérien international (ATAG 2020).

L'Organisation européenne pour la sécurité de la navigation aérienne (Eurocontrol) aborde également la concrétisation de l'objectif zéro net d'émissions de CO₂ (Eurocontrol 2022). Les associations représentant le secteur aérien européen ont également publié un rapport sur cette question (NLR 2021). En Suisse, l'Office fédéral de l'aviation civile (OFAC), l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) et l'Aviation Research Center Switzerland (ARCS) ont chapeauté une étude destinée à montrer comment le transport aérien suisse pourrait atteindre le zéro net d'émissions de CO₂. Cette initiative a débouché sur la publication en 2021 de la *Road Map Sustainable Aviation*, fruit d'une collaboration entre experts du secteur aérien et experts scientifiques (Ecoplan 2021).

Le rapport Perspectives énergétiques 2050+ commandé par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) montre l'évolution de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂ du transport aérien si rien n'était entrepris et si l'objectif zéro net d'émissions de CO₂ était atteint en 2050 (Prognos 2020). Le rapport n'aborde toutefois pas dans le détail les mesures pour y parvenir. Il fait d'ailleurs largement abstraction du trafic aérien international.

En conclusion, les études récentes et bien étayées, notamment les travaux de l'OACI et de l'IATA, sur la faisabilité de l'objectif zéro net d'émissions de CO₂ ne manquent pas. Les études susmentionnées varient quant à leur périmètre (international, européen, national). Vu la forte dimension internationale du transport aérien, leurs conclusions peuvent être transposées à la Suisse⁸; on a donc renoncé à réaliser d'autres analyses dans le cadre du présent rapport.

La présente partie passe en revue les rapports précités et en propose une synthèse consolidée, en mettant l'accent sur l'aviation suisse. Elle s'appuie à cet égard sur le Plan d'action de l'OACI en vue de réduire le CO₂ de l'aviation suisse, lequel, conformément à la résolution A37-19 de l'OACI, dresse tous les trois ans à l'intention de l'OACI l'inventaire des mesures climatiques arrêtées et envisagées pour l'aviation suisse (OFAC 2021). Cette partie est articulée selon les stratégies relatives à cette problématique. Les ch. 2.1 à 2.4 décrivent les mesures techniques : aéronefs plus efficaces⁹, exploitation plus efficace des aéronefs, capacités alternatives de stockage d'énergie et carburants d'aviation durables. Le ch. 2.5 résume le potentiel global de ces mesures. Les ch. 2.6 et 2.7 abordent les NET pour la compensation des émissions de GES résiduelles conformément à la LCI et les mesures basées sur le marché qui incitent à réduire les émissions.

⁷ Le présent chapitre se base uniquement sur les données du scénario le plus ambitieux, à savoir le scénario IS3.

⁸ Le trafic aérien suisse est essentiellement transfrontière. Il est assuré essentiellement par des aéronefs produits par des constructeurs étrangers. La dimension internationale de l'aviation concerne donc également la technologie. De même, le carburant d'aviation est pratiquement entièrement importé et le restera à l'avenir. Une grosse moitié seulement du trafic aérien au départ de la Suisse est assurée par des exploitants d'aéronefs suisses. On trouve aussi de part et d'autre de la frontière suisse des aéroports d'importance internationale et même un aéroport national en territoire français, l'EuroAirport Bâle-Mulhouse. En conséquence, la politique aéronautique est étroitement coordonnée à l'échelle européenne.

⁹ Par commodité, l'expression avion est utilisée dans le présent rapport pour désigner les aéronefs, hélicoptères et autres engins volants.

Prise en considération du cycle de vie

Les effets climatiques générés en vol ne représentent qu'une partie des effets du transport aérien sur l'environnement et sur le climat. Il faut également considérer les émissions indirectes, ainsi que celles en aval et en amont liées par exemple à la production du carburant ou à la construction d'avions. Ces effets peuvent se manifester en Suisse ou à l'étranger. Bien que les objectifs climatiques de la Suisse ne s'étendent pas aux émissions à l'étranger, celles-ci ne sauraient être ignorées dans le contexte de l'aviation, sachant que certaines mesures peuvent entraîner une réduction des émissions en vol tout en générant en fin de compte des effets négatifs sur l'environnement¹⁰. Aussi, cette partie présente-t-elle toujours l'impact global de chaque mesure sur le climat et sur d'autres aspects environnementaux. L'accent est mis sur les carburants d'aviation car ils représentent aujourd'hui comme demain la principale source de pollution (ARE 2022).

2.1 Efficacité énergétique des avions

L'efficacité énergétique du transport aérien s'est sensiblement améliorée au cours des dernières décennies. Depuis 1990, les émissions de CO₂ par prestation de transport (exprimée en passagers-kilomètres ou tonnes-kilomètres) ont, d'optimisation en optimisation, graduellement baissé de près de 50 %¹¹. Cela correspond à une progression de l'efficacité de quelque 2,3 % par an. Cette évolution est due pour l'essentiel aux progrès réalisés dans le domaine des réacteurs, puis aux gains de poids et enfin à l'amélioration de l'aérodynamique. Elle se poursuivra dans les décennies à venir. Certaines améliorations peuvent être apportées en modifiant les avions en service. On estime que les gains d'efficacité s'établiront à 1 % par an jusqu'en 2035 (par rapport à 2019).

Des gains d'efficacité encore plus importants seraient possibles avec des avions et réacteurs de conception nouvelle où l'architecture de l'avion (fuselage, ailes, réacteurs) serait modifiée. En théorie, des gains d'efficacité de 20 % seraient possibles (par rapport à 2019). Suivant le cas, il faudrait également modifier les aéroports pour qu'ils puissent accueillir ces avions d'un genre nouveau. Les exigences élevées en matière de sécurité aérienne font qu'il s'écoule en général de dix à quinze ans entre le développement d'une innovation et son application à la flotte d'avions. De plus, pour avoir un impact réel sur la réduction des émissions, ces innovations doivent être produites et utilisées à grande échelle. Or, comme une petite partie seulement de la flotte est remplacée chaque année, il faudra des décennies pour que ces réductions d'émissions se concrétisent. Les avions étant conçus pour durer une trentaine d'années, la flotte mondiale sera encore largement composée d'avions de la génération actuelle au-delà de 2050.

Les activités de production, d'entretien et d'élimination des avions ont un effet comparativement moindre sur le climat. On estime qu'elles sont à l'origine de 2 % des émissions de GES du transport aérien suisse¹². Ce qui n'empêche pas que des progrès peuvent aussi être réalisés dans ces domaines. Des études chiffrent les gains d'efficacité technique de l'ensemble de la flotte à l'horizon 2050 dans une fourchette comprise entre 10 % et 21 % (cf. illustration 1). Mais le progrès technique finira tôt ou tard par se heurter à des limites physiques¹³. Parallèlement, les normes de sécurité élevées du transport aérien doivent être satisfaites. Développer des innovations est très risqué et très coûteux pour les constructeurs : l'OACI estime le montant des investissements requis d'ici 2050 à quelque 350 milliards de dollars, à mettre en regard des 740 milliards de dollars que la baisse de la consommation de carburant permettrait d'économiser sur la même période.

¹⁰ Ce qui pourrait être le cas lorsque des sources d'énergie non renouvelable sont utilisées pour produire des carburants alternatifs, de l'hydrogène ou de l'électricité pour les avions électriques.

¹¹ Ces chiffres valent aussi bien pour la Suisse (OFEV 2023) que pour l'Europe (AESA 2022).

¹² https://www.sccer-mobility.ch/export/sites/sccer-mobility/capacity-areas/dwn_capacity_areas/Jemiolo_Thesis_Final.pdf (État : 12 janvier 2024)

¹³ La feuille de route de l'IATA Net Zero Roadmap 2050 (<https://www.iata.org> > Programs & Policy > Sustainability > Net Zero Roadmaps (État : 12 janvier 2024) et l'appendice M3 Technologies du Rapport de l'OACI sur la faisabilité d'un objectif ambitieux à long terme LTAG) concernant la réduction des émissions de CO₂ (OACI 2022) passent en revue les nouvelles technologies permettant d'améliorer l'efficacité énergétique.

2.2 Efficacité énergétique de l'exploitation des avions

Dans le domaine de l'aviation, l'efficacité énergétique ne dépend pas seulement des types d'avions engagés. Il est aussi possible de diminuer les émissions en agissant sur leur exploitation. Comment ? En optimisant par exemple la planification des vols et en choisissant les itinéraires les plus directs ou en adaptant le trajet en fonction des conditions météorologiques (Ecoplan 2022). Les exploitants d'avions peuvent en outre agir sur le poids des appareils pour réduire les émissions, par exemple en allégeant les équipements ou en diminuant les réserves de carburant, d'eau ou de denrées alimentaires embarquées. Des mesures comme réduire la vitesse de vol ou mieux répartir les charges (notamment le fret) dans l'avion peuvent également contribuer à réduire l'impact climatique. Des moyens de réduire la consommation de carburant existent également au niveau de l'entretien (Ecoplan 2021). Une gestion plus souple du trafic aérien, visant à réduire les détours inutiles et les temps d'attente, présente un grand potentiel (OACI 2022). Le taux de remplissage des avions a une influence directe sur les émissions par passager. Il a progressé de près de 20 % depuis 1990 et s'établit actuellement à 80 % environ. Au sol également, des améliorations sont possibles par exemple en électrifiant le roulage.

L'exploitation du potentiel décrit ici suppose auparavant de surmonter quelques obstacles. Le principal réside dans les dépenses administratives supplémentaires pour les autorités de l'aviation civile, les prestataires de services de navigation aérienne et les compagnies aériennes. Il est notamment apparu que la collaboration au niveau international entre ces acteurs était problématique. L'espace aérien, et plus spécialement en Europe, est fortement fragmenté. Il faut en outre que les adaptations n'entament pas la robustesse du système et que la performance de sécurité se maintienne à un niveau élevé. Actuellement, il arrive que de mauvaises incitations ne récompensent pas les gains d'efficacité mais au contraire les découragent. On songe ici aux conditions posées aux compagnies aériennes pour maintenir leurs créneaux horaires aux aéroports ou les systèmes de redevance, qui font que les avions ont avantage à allonger leur itinéraire et donc favorisent les émissions de CO₂. Il existe cependant des initiatives visant à améliorer cette situation. Comme le Ciel unique européen qui vise à optimiser les espaces aériens et leur gestion et auquel la Suisse participe. Mais pour l'instant, les succès sont timides et les améliorations espérées se font plutôt attendre.

Des rapports font état d'un gain d'efficacité de 6 à 11 % d'ici 2050 par rapport à aujourd'hui (cf. illustration 1). L'OACI estime à quelque 180 milliards de dollars le montant des investissements requis d'ici 2050, principalement à la charge des compagnies aériennes (OACI 2022)¹⁴, à mettre en regard des 490 milliards de dollars que la baisse de la consommation de carburant permettrait d'économiser sur la même période.

2.3 Carburants d'aviation durables

Les carburants d'aviation durables peuvent contribuer à faire nettement baisser les émissions de CO₂ fossile du transport aérien à condition qu'ils soient produits non pas à partir de sources fossiles mais à partir de sources renouvelables et qu'ils remplissent certains critères de durabilité¹⁵ (OFAC 2022). Seuls les carburants répondant à ces critères méritent l'appellation de carburant d'aviation durable (CAD). En vol, les CAD ne rejettent en principe pas de CO₂ fossile. Au contraire du processus de production : actuellement, près de 20 % des émissions durant le cycle de vie du kérosène fossile sont imputables au processus de production. On estime que cette proportion pourrait être ramenée au mieux à moins de 10 % à l'avenir (OFAC 2022). Ces valeurs ne peuvent toutefois pas être atteintes dans tous les cas. C'est pourquoi les critères de durabilité prévoient toujours un pourcentage minimal de réduction.

Il existe actuellement plusieurs méthodes pour produire des CAD. En 2021, neuf d'entre elles avaient été certifiées. D'autres le seront dans les années à venir (AESA 2022). Certaines de ces méthodes utilisent des sources biogènes. La durabilité du carburant dépend alors de l'origine de la biomasse

¹⁴ Le catalogue de mesures établi par Aerosuisse en 2021 (disponible sous https://www.aerosuisse.ch/fileadmin/docu-ments/Klima/20210319_AG_Aerosuisse_CO2_Massnahmen_Luftverkehr_Version2_final.pdf (État : 12 janvier 2024) et l'appendice M4 du Rapport de l'OACI sur la faisabilité d'un objectif ambitieux à long terme (LTAG) pour la réduction des émissions de CO₂ de l'aviation civile internationale (OACI 2022) donnent un échantillon des mesures applicables à court terme.

¹⁵ Dans la révision de la loi sur le CO₂ (cf. ch. 3.2), les carburants d'aviation produits à partir de sources renouvelables sont désignés simplement comme carburants d'aviation durables.

Trafic aérien neutre en termes de CO₂ d'ici 2050

utilisée. Les critères employés varient d'un pays et d'une organisation à l'autre. En Suisse, ils figurent dans la loi sur la protection de l'environnement (LPE, RS 841.01) et la loi sur l'imposition des huiles minérales (Limpmin, RS 641.61). Ils devraient être remaniés dans le cadre de la révision de la loi sur le CO₂ (cf. message) par référence aux dispositions pratiquement identiques de l'UE (cf. ch. 3.2). Il est ainsi interdit d'utiliser des produits alimentaires ou de fourrage pour produire des CAD

Les CAD peuvent aussi être produits sans recourir à la biomasse. Ils sont alors qualifiés de CAD de synthèse. L'énergie entrant dans leur production doit provenir de sources renouvelables (hydraulique, solaire ou éolien). Les CAD élaborés à partir de la biomasse font déjà l'objet d'une production industrielle tandis que la production de CAD de synthèse est encore relativement modeste.

Les CAD purs sont généralement exempts d'hydrocarbures aromatiques (aromatiques). De ce fait, la combustion est non seulement neutre en CO₂ mais elle est nettement moins émissive en résidus nocifs (notamment en poussières fines). Les CAD sont d'ores et déjà compatibles avec les avions en service et avec l'infrastructure des aéroports. Par contre, la part de kérosène fossile dans le mélange embarqué ne peut pour l'instant être inférieure à 50 %¹⁶, cela pour des questions techniques. Le secteur aéronautique estime être en mesure de livrer les premiers avions fonctionnant entièrement aux CAD en 2030¹⁷. Il est également possible de modifier les avions en service. Question sécurité, les CAD sont au moins aussi fiables que le kérosène fossile.

La production mondiale de CAD est estimée à 480 000 tonnes en 2023, soit le double par rapport à 2022¹⁸. Cela correspond à 0,2 % de la consommation actuelle de carburants d'aviation. Autant dire que ce n'est qu'un saut de puce sur la voie de l'objectif fixé. Plusieurs feuilles de route concluent que le plus gros potentiel de diminution des émissions de CO₂ fossile de l'aviation réside dans les CAD. On estime que leur apport à l'objectif zéro net d'émissions de CO₂ se situerait entre 50 % et 56 %, certaines études avançant même le chiffre de 70 % (cf. illustration 1). La gageure consiste ici à développer les capacités de production qui sont actuellement pratiquement inexistantes. Même en comptabilisant les projets en cours, les capacités restent insuffisantes pour atteindre ce potentiel en temps voulu¹⁹. Ce qui nécessite de réaliser rapidement des investissements importants à l'échelle mondiale et de développer significativement la production d'énergie renouvelable sur des sites appropriés. Ce développement entrerait cependant en concurrence avec les besoins en énergie renouvelable d'autres secteurs. Les coûts de production des CAD étant plus élevés que ceux des carburants fossiles, le prix à la pompe est aussi plus élevé. L'OACI estime à 3110 milliards de dollars les investissements nécessaires au niveau mondial dans la production de CAD d'ici 2050 (OACI 2022).

Pour plus détails sur les CAD, on renverra au rapport de l'OFAC concernant la promotion du développement et l'utilisation de carburants d'aviation durables (OFAC 2022). On y lit notamment que la Suisse ne dispose pas des ressources, ni du stock d'énergie renouvelable qui lui permettraient de couvrir par ses propres moyens ses besoins en CAD à un coût économiquement raisonnable. Économiquement et écologiquement parlant, il est plus avantageux de produire à l'étranger dans des régions qui s'y prêtent.

2.4 Avions à hydrogène et électriques

Une manière de supprimer les émissions de CO₂ en vol consisterait à se passer de carburants carbonés. Entrent ici en ligne de compte des capacités alternatives de stockage d'énergie, c'est-à-dire soit l'hydrogène, soit les batteries électriques. Le recours à l'hydrogène ou l'électrification nécessitent de modifier la conception des avions : les réservoirs à kérosène font place à des réservoirs à hydrogène ou à des batteries, les réacteurs doivent être modifiés ou remplacés par des moteurs électriques. Les avions équipés de batteries sont dotés de moteurs électriques, les avions à hydrogène fonctionnent à l'aide de piles à combustible, qui convertissent l'hydrogène en électricité, ou d'un moteur à combustion

¹⁶ En effets, certains matériaux utilisés dans les avions exigent que le carburant contienne des composés aromatiques, cf. <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Conversion-processes.aspx> (État : 12 janvier 2024)

¹⁷ <https://iccaia.org/wp-content/uploads/2023/09/Public-Statement-100-SAF-Commitment-Final.pdf> (État : 12 janvier 2024)

¹⁸ <https://www.iata.org/en/pressroom/2023-releases/2023-12-06-02/> (État : 12 janvier 2024)

¹⁹ <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/SAF-Projections.aspx> (État : 12 janvier 2024)

Trafic aérien neutre en termes de CO₂ d'ici 2050

spécialement modifié pour fonctionner à l'hydrogène. Les deux systèmes présentent des risques techniques plus élevés que les avions conventionnels. Le principal obstacle à ces technologies réside dans leur poids et dans le volume qu'elles occupent (OACI 2022).

Certes, un petit avion fonctionnant à l'aide de batteries électriques a été certifié pour l'exploitation et plusieurs constructeurs planchent actuellement sur des avions électriques ou à hydrogène (AESA 2022). Les prototypes conçus jusqu'à présent sont toutefois loin de pouvoir rivaliser avec les avions de conception conventionnelle s'agissant du rayon d'action, de la charge utile et de la vitesse. Basé sur l'évaluation tirée d'une étude, le tableau 2 montre pour plusieurs catégories d'avions l'année de mise en service potentielle d'avions électriques et à hydrogène (ATAG 2020). On voit qu'aucune alternative aux turboréacteurs et aux carburants de type kérosène ou CAD ne se dessine avant 2050 pour les long- et moyen-courriers qui pèsent ensemble 73 % des émissions de CO₂.

Les capacités alternatives de stockage d'énergie exigent également de modifier sensiblement l'infrastructure aéroportuaire. Les avions électriques ont besoin de stations de recharge haute puissance tandis que les avions à hydrogène doivent être avitaillés localement (ATAG 2020). Les adaptations à apporter à l'infrastructure et au système d'avitaillement génèrent elles aussi des émissions de CO₂ et occasionnent des coûts. La réduction effective des émissions passe par le recours à des sources renouvelables pour produire l'hydrogène et l'électricité nécessaires. Quoi qu'il en soit, les avions à hydrogène et électriques n'atteindront jamais la neutralité CO₂ sur leur cycle de vie.

Il est donc peu probable que les capacités alternatives de stockage de l'énergie fournissent un apport de premier plan à la neutralité CO₂ de l'aviation d'ici 2050. Suivant les études, la contribution de ces technologies à la réduction des émissions oscille tout au plus entre 0 % et 3 % (cf. illustration 1). Certaines études envisagent des valeurs plus élevées (NLR 2021). On peut toutefois douter de leur fiabilité, attendu que ces technologies n'ont de loin pas atteint leur maturité (cf. tableau 2). Les coûts de ces solutions alternatives sont difficilement chiffrables. L'OACI estime le montant des investissements nécessaires à près de 180 milliards de dollars (OACI 2022) et juge que leur potentiel tendra à s'accroître au-delà de 2050, le temps nécessaire pour développer des solutions techniques, bâtir l'infrastructure et constituer le parc d'avions. Le programme de recherche européen « Clean Aviation » se donne pour but d'explorer et d'exploiter le potentiel des sources d'énergie durables dans le transport aérien²⁰.

Catégorie	Année						
	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Avion de transport de 3^e niveau ≤ 15 places et 1 heure de vol <1 % des émissions de CO ₂	CAD						
		Avions électriques					
Avion régional ≤ 100 places et 1,5 heure de vol ~3 % des émissions de CO ₂	CAD						
		Avions H ₂ /électriques					
Court-courrier ≤ 150 places et 2 heures de vol ~24 % des émissions de CO ₂	CAD						
				H ₂ (év.)	Avions H ₂ /électriques		
Moyen-courrier ≤ 250 places et 2,5 heures de vol ~43 % des émissions de CO ₂	CAD						
							H ₂ (év.)
Long-courrier > 250 places et 2,5 heures de vol ~ 30% des émissions de CO ₂	CAD						

Tableau 2 Potentiel des avions à hydrogène (H₂) et électriques par catégories et par année de mise en service (adapté d'ATAG 2020).

²⁰ https://clean-aviation.eu/sites/default/files/2022-01/CAJU-GB-2021-12-16-SRIA_en.pdf (État : 12 janvier 2024)

2.5 Potentiel global des mesures techniques dans le secteur aérien

Jusqu'ici, le présent rapport s'est attaché à décrire le potentiel des mesures techniques susceptibles de réduire les émissions de GES du transport aérien. Ces mesures peuvent et même doivent être combinées entre elles pour que l'avion atteigne la neutralité CO₂. L'illustration 1 montre le potentiel des mesures techniques. Comme il est difficile de prévoir la demande de transport aérien en 2050 (cf. ch. 2.7 et 3.3), le graphique ne tient pas compte de l'évolution de la demande. Il représente le potentiel de réduction de l'intensité CO₂ du transport aérien, à savoir des émissions par prestation de transport, par rapport à l'année de référence (ici 2019). On estime que les mesures d'ordre technique permettraient de réduire de 77 % les émissions de CO₂ par vol d'ici 2050. Les gains d'efficacité énergétique concernant les avions proprement dits et leur exploitation comptent pour 22 %, mais les CAD offrent le plus grand potentiel puisqu'ils couvrent les 55 % restants²¹.

Les mesures techniques ne permettront pas à elles seules d'aboutir à la neutralité CO₂ du trafic aérien à l'horizon 2050. Quoi qu'il en soit, le remplacement complet des carburants d'aviation fossiles prendra plus de temps. Au moins 10 % des émissions de CO₂ fossile seront compensées par des NET (cf. ch. 2.6). S'agissant des 13 % d'émissions résiduelles, les études citées en référence divergent quant aux moyens à employer pour les diminuer : certaines misent sur des mesures techniques dans le domaine de l'aviation, d'autres sur le recours accru aux NET. La trajectoire des prochaines années sera décisive, notamment en ce qui concerne la rationalité économique des différentes mesures.

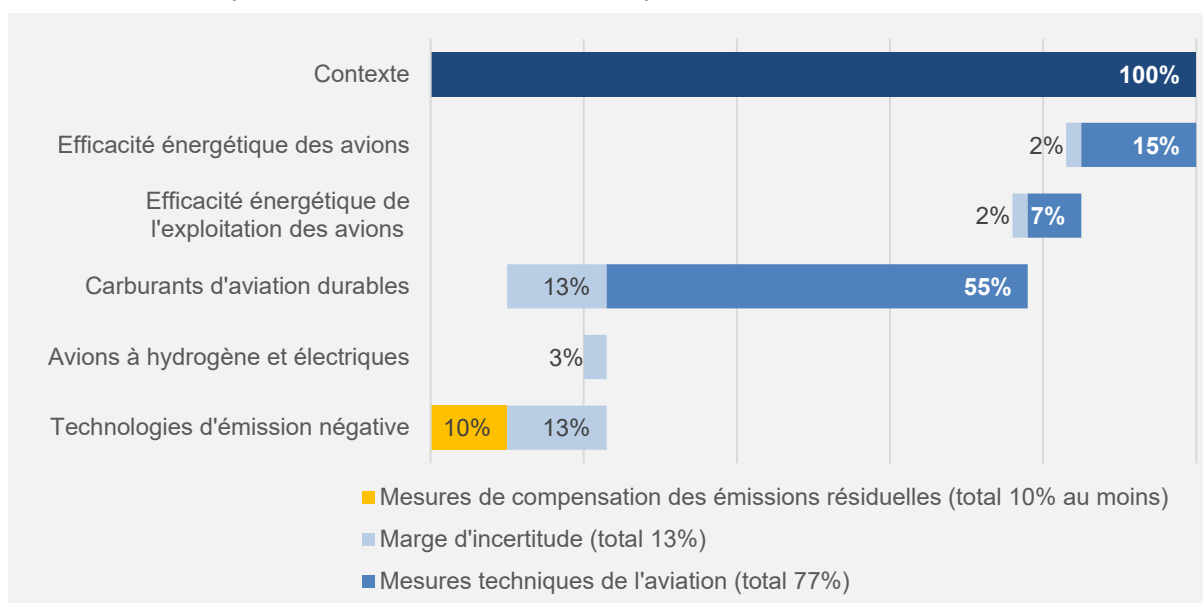


Illustration 1 Contributions potentielles à la neutralité CO₂ du transport aérien à l'horizon 2050 compte tenu de la prestation de transport²², par rapport à 2019

La neutralité CO₂ du trafic aérien est possible à l'horizon 2050 en combinant toutes les mesures techniques avec les NET. Quatre obstacles majeurs doivent être surmontés pour concrétiser le potentiel mis en évidence :

1. Besoins en énergie et en ressources

Le transport aérien suisse représente près de 10 % de la consommation d'énergie finale de la Suisse. Or, dans un contexte où tous les secteurs ont leurs propres objectifs climatiques, produire une telle quantité d'énergie à partir de sources renouvelables ne sera pas une mince affaire. Le transport aérien

²¹ Les gains d'efficacité permettent de réduire la consommation de carburant et donc les émissions de CO₂ de 22 % au moins. Une part de CAD de 70 % (conformément à l'obligation d'incorporation, cf. ch. 3.3) abouti à une réduction de 70 % des émissions restantes, soit 55 % des émissions totales.

²² Synthèse de données tirées de : OACI (2022), ATAG (2020), NLR (2021), Eurocontrol (2022), Ecoplan (2021)

Trafic aérien neutre en termes de CO₂ d'ici 2050

suisse restera largement tributaire des importations (cf. ch. 2.3) pour couvrir ses besoins en énergie. Il en résulte également un important besoin en ressources.

2. Un calendrier ambitieux

La diffusion de technologies dans l'aviation est relativement lente. Cela s'explique par le fait qu'avant d'être appliquée toute nouvelle technologie doit d'abord passer par des processus de certification poussés destinés à s'assurer qu'elle satisfait les sévères exigences de sécurité réglementaires. Ensuite, comme les avions sont en service durant plusieurs décennies, il faut également compter plusieurs décennies avant que de nouvelles technologies s'imposent sur le marché. Le même constat vaut pour l'infrastructure nécessaire, notamment pour la production de carburants. Pour que l'aviation atteigne la neutralité CO₂ à l'horizon 2050, il faudra que les technologies requises, aussi bien les technologies aéronautiques que les NET, montent rapidement en puissance (cf. ch. 2.6).

3. Effet sur l'environnement et l'économie en général

L'objectif zéro net d'émissions de CO₂ mesuré sur les émissions directes des carburants aéronautiques embarqués en Suisse constitue le principal objectif de la politique climatique de la Suisse dans le domaine du transport aérien. Lorsque l'on prend des mesures, il ne faut toutefois pas se focaliser sur la réduction des émissions de CO₂ durant les vols. Toute mesure implique d'autres effets sur le climat, parmi eux, par exemple, les émissions de GES en amont générées lors de la production de carburants. Ces émissions ne relèvent en général pas des objectifs climatiques de la Suisse puisque la production a lieu principalement à l'étranger. Les critères de certification des CAD sont donc d'autant plus importants (cf. ch. 2.3). Il convient également de prendre en considération les effets hors CO₂ (cf. encadré ci-dessous) ainsi que d'autres effets environnementaux.

L'art. 3, al. 4, LCI stipule que les objectifs de réduction (et les mesures pour y parvenir) doivent être économiquement supportables. Ce qui signifie qu'il faut également prendre en compte les effets économiques et sociaux.

4. Investissements nécessaires

De gros investissements doivent être consentis pour que les technologies requises passent à la vitesse supérieure dans le délai souhaité. L'OACI estime le montant des investissements annuels requis sur le plan mondial à 120 milliards de dollars sur la période 2020-2050 (OACI 2022)²³. Compte tenu de sa contribution au trafic aérien, la Suisse devrait consacrer près de 600 millions CHF. Ces investissements sont à mettre en regard du chiffre d'affaires annuel mondial des compagnies aériennes commerciales qui atteint 838 milliards de dollars²⁴. On notera à ce propos que ces coûts sont aussi contrebalancés par des économies, notamment en exploitation, générées par les gains d'efficacité et la baisse correspondante des volumes de carburant requis.

Ces défis sont d'autant plus marqués au vu de la croissance soutenue du secteur (OACI 2022). La décroissance favoriserait la concrétisation de l'objectif puisqu'il faudrait mobiliser moins d'énergie et de ressources (OACI 2022, AIE 2021, AIE 2023, Sacchi 2023). Les technologies concernées se développeraient à un rythme moins important, l'effet sur l'environnement et sur l'économie serait plus faible de même que les investissements nécessaires. Les ch. 2.7 et 3.3 abordent l'évolution de la demande et les moyens de l'influencer.

Répercussion sur les effets hors CO₂

Aujourd'hui, on ne connaît pas avec certitude les effets de l'aviation sur le climat hors effets dus au CO₂ (cf. encadré du ch. 1.3). De fortes incertitudes subsistent également quant à la manière dont les mesures de réduction des émissions agissent sur les effets hors CO₂. En règle générale, une réduction des émissions de CO₂ va de pair avec une réduction des émissions hors CO₂. C'est le cas par exemple

²³ Le Rapport de l'OACI sur la faisabilité d'un objectif ambitieux à long terme (LTAG) pour la réduction des émissions de CO₂ de l'aviation civile internationale présente en détail la ventilation des éléments de coûts en fonction des parties prenantes (OACI 2022).

²⁴ État 2019, cf. www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/airline-industry-economic-performance-june-2020-data-tables/ (État : 12 janvier 2024)

des mesures visant à améliorer l'efficacité des avions ou de leur exploitation. Certaines mesures pourraient en outre générer un effet supplémentaire : les CAD produisent en moyenne nettement moins de poussières fines, ce qui a un effet bénéfique sur la qualité de l'air local et peut réduire les effets hors CO₂ (AESA 2022). Ces mesures ont donc un effet sur le climat qui dépasse le seul effet de réduction des CO₂.

D'autres mesures permettent de réduire les effets hors CO₂ mais au prix d'une hausse potentielle des émissions de CO₂. C'est le cas par exemple de mesures touchant les réacteurs où lorsque les émissions de CO₂ baissent, les émissions d'oxydes d'azote (NOx) s'accroissent, et vice versa. Le contournement de zones nuageuses entraîne généralement une augmentation des émissions de CO₂. Les batteries électriques, si elles éliminent les effets hors CO₂, conduisent indirectement à une augmentation des émissions de CO₂ (cf. ch. 2.4). On ignore encore les effets hors CO₂ des avions à hydrogène. Ces mesures aux effets contradictoires ne devraient être prises que lorsqu'il existe une bonne compréhension des effets qui sont à l'œuvre (Lee 2023). Actuellement, l'UE étudie les moyens d'intégrer les effets hors CO₂ dans le système d'échange de quotas d'émissions en les distinguant des émissions de CO₂ (cf. ch. 3.2).

2.6 Technologies d'émission négative

Aux termes de l'art. 3, al. 1, LCI, l'objectif zéro net d'émissions suppose de compenser l'effet des émissions de GES résiduelles en recourant à des NET en Suisse et à l'étranger. La réduction des émissions de GES est toutefois prioritaire aux termes de l'art. 3, al. 1, let. a, LIC, le recours aux NET n'intervenant qu'à titre subsidiaire lorsque les émissions ne peuvent pas être évitées ou alors difficilement (Conseil fédéral 2022). L'art. 2, let. a, LCI définit les NET comme des procédés biologiques et techniques permettant d'extraire le CO₂ de l'atmosphère et de le fixer durablement dans les forêts, les sols, des produits en bois et d'autres puits de carbone. Le rapport du Conseil fédéral « Captage et stockage du CO₂ (CSC) et technologies d'émission négative (NET). Leur contribution possible, par étapes, à l'objectif climatique à long terme » met en évidence les besoins en NET pour différents secteurs (Conseil fédéral 2022). Les besoins pour l'aviation n'y sont toutefois pas analysés. Sur la base des évolutions attendues décrites à l'illustration 1 et à l'évolution de la demande évoquée à l'encadré du ch. 2.7, on estime les besoins annuels à 1 ou 2 millions de tonnes par an. Le rapport du Conseil fédéral en réponse au postulat 18.4211 dresse l'inventaire des technologies disponibles (Conseil fédéral 2020).

Il souligne qu'« actuellement, un grand nombre de questions élémentaires concernant la mise en œuvre des NET – notamment les coûts, les conséquences environnementales, la durée du stockage et les conflits d'objectifs – restent à clarifier tant au niveau national qu'international au point qu'il est difficile d'obtenir des affirmations fiables sur les potentiels durablement réalisables des différentes NET en Suisse. Par ailleurs, soit les procédés discutés n'ont pas encore été éprouvés par la pratique, soit ils ne sont pas suffisamment opérationnels pour contribuer à la réalisation des objectifs climatiques. Afin de combler ces déficits de connaissances, les activités de recherche et de développement relatives aux NET devraient être intensifiées. » (Conseil fédéral 2020). Il est indubitable que le potentiel global des NET en Suisse, mais aussi à l'étranger, est limité. Les NET consomment de l'énergie et des ressources et exigent des investissements. Les coûts estimés des différentes technologies varient énormément et présentent un degré d'incertitude élevé (Conseil fédéral 2020).

Quoi qu'il en soit, il est important de ne pas confondre les mesures usuelles de compensation du CO₂ avec les NET : la compensation d'émissions s'inscrit dans un négoce de réductions d'émissions certifiées dont on compare la réduction par rapport à une situation donnée et qui est comptabilisée en conséquence. À la différence des NET, il ne s'agit en général pas d'émissions négatives. Dans un contexte où tous les secteurs tendent au zéro net d'émissions de CO₂, on estime toutefois que les sources classiques de compensation seront largement tarées d'ici 2050.

2.7 Mesures basées sur le marché

Les mesures basées sur le marché sont censées permettre d'atteindre les objectifs environnementaux à moindre frais et avec un maximum de flexibilité. En substance, elles ont pour but d'inciter les exploitants d'avions à diminuer leurs émissions. Plusieurs mesures basées sur le marché ont été mises en place dans l'aviation suisse pour réduire les émissions de CO₂ : l'art. 16a de la loi fédérale sur la réduction des émissions de CO₂ (loi sur le CO₂, RS 641.71) oblige depuis 2020 les exploitants d'avions à participer au système d'échange de quotas d'émission (SEQUE) suisse. La loi prévoit un plafond d'émissions pour les vols intérieurs et pour les vols internationaux au départ de la Suisse vers l'Espace économique européen et le Royaume-Uni. En sens inverse, les vols sont comptabilisés dans les SEQUE européen et du Royaume-Uni. Ce plafond s'établit à près de 1,2 million de tonnes de CO₂ en 2023. Il est abaissé chaque année de 2,2 % depuis 2021. Les exploitants d'avions sont tenus d'acheter des droits d'émission de CO₂ sur les routes concernées. La tonne de CO₂ se négociait en moyenne en 2023 à 90 francs environ et la valeur marchande de ces droits dépasse les 100 millions CHF. De ces droits, 82 % sont attribués gratuitement, 15 % sont mis aux enchères et 3 % sont gardés en réserve. Le SEQUE suisse et le SEQUE de l'UE sont couplés en vertu d'un accord dit de couplage²⁵. Les deux parties sont convenues d'harmoniser le développement de leurs SEQUE respectifs. Dans l'UE, les recettes tirées des enchères dans le cadre SEQUE, tous secteurs confondus, alimentent sur la période 2021-2030 un fonds destiné à soutenir le développement de technologies permettant d'atteindre les objectifs climatiques. L'UE a décidé le 10 mai 2023 de réviser le SEQUE. Cette révision aura également des répercussions sur le SEQUE suisse (cf. ch. 3.2).

Autre mécanisme basé sur le marché, le régime de compensation et de réduction de carbone pour l'aviation internationale (CORSIA) porté par l'OACI²⁶. Le CORSIA s'inscrit dans l'objectif de croissance neutre en CO₂ du transport aérien international mondial à partir de 2020 souhaité par l'OACI. Il prévoit que les émissions dépassant 85 % des émissions de 2019 soient compensées à partir de 2027. Lorsqu'un exploitant recourt aux CAD, ses obligations de compensation sont réduites d'autant. La Suisse a décidé d'anticiper sa participation au CORSIA : depuis 2021, les émissions doivent être consignées et compensées dès que la valeur limite est dépassée. La pandémie de COVID-19 a retardé la mise en œuvre du CORSIA. Les premières mesures de compensation devraient voir le jour en 2024 seulement. Leur coût est évalué à moins de 10 francs la tonne de CO₂²⁷.

Les mesures basées sur le marché peuvent créer des incitations à réduire les émissions²⁸. Par tonne de CO₂, l'effet incitatif du CORSIA est cependant nettement moindre que celui du SEQUE. Elles ont en outre pour inconvénient de pénaliser les entreprises et pays qui y adhèrent par rapport aux entreprises et pays qui n'y adhèrent pas. Cet écueil n'existe pas entre la Suisse et ses voisins en raison du couplage des SEQUE suisse et européen. Il n'en va pas de même par rapport aux pays hors-Espace économique européen (EEE) : les vols vers des destinations situées hors de l'EEE, de Suisse et du Royaume-Uni ne sont pas soumis au SEQUE. De son côté, le CORSIA est le premier instrument d'application mondiale qui couvre pratiquement toutes les émissions du transport aérien international civil. Il n'en résulte aucune distorsion notable du marché. Cet inconvénient est quasiment inexistant dans le cas d'instruments nationaux qui ne s'appliquent pas aux vols internationaux (cf. ch. 3.1).

Évolution de la demande

L'intrication avec les évolutions sociales et économiques rend hasardeux tout pronostic quant à la demande de voyages en avion à l'horizon 2050. Au lendemain de la pandémie de COVID-19, les prévisions de la demande ont été généralement revues à la baisse, du moins après que le trafic a retrouvé son niveau de 2019. L'OACI table sur une croissance du trafic passagers en Europe de 2,3 % à 3,1 % en rythme annuel (soit près de 10 % de moins qu'avant le COVID-19)²⁹ tandis que l'AESA balance entre un

²⁵ Accord du 23 novembre 2017 entre la Confédération suisse et l'Union européenne sur le couplage de leurs systèmes d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre (RS 0.814.011.268)

²⁶ <https://www.bazl.admin.ch/bazl/fr/home/themen/umwelt/klima/okonomische-massnahmen/corsia.html> (État : 12 janvier 2024)

²⁷ https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_Newsletter_Nov_2021.pdf (État : 12 janvier 2024)

²⁸ Comme les mesures basées sur le marché n'entraînent pas directement de réduction des émissions par prestation de transport, leur contribution n'apparaît pas dans l'illustration 1.

²⁹ <https://www.icao.int/sustainability/Documents/Post-COVID-19%20forecasts%20scenarios%20tables.pdf> (État : 12 janvier 2024)

recul de -0,3 % et une croissance de 1,7 % en rythme annuel, soit 40 % de moins qu'avant le COVID-19 (AESA 2019, AESA 2022). Ces chiffres sont très éloignés de la croissance du trafic aérien suisse entre 1990 et 2019 : 8,5 % en rythme annuel. Les capacités des aéroports nationaux sont aujourd'hui limitées du fait des horaires d'exploitation (couvre-feu général) et des restrictions inscrites dans les règlements d'exploitation. À long terme, le potentiel de croissance est bridé par des infrastructures limitées. Or, il sera difficile d'accroître les capacités compte tenu des importants obstacles à surmonter pour ce faire.

Une baisse de la demande de transport aérien pourrait s'opérer par transfert de certains vols sur le rail. Elle concernerait exclusivement les vols intra-européens de moins de 1000 km, lesquels représentent 14 % des émissions de CO₂ du transport aérien en Europe (T&E 2020). Selon une étude, le potentiel de réduction des émissions du transport aérien par transfert de l'avion au rail est plutôt faible puisqu'il atteindrait au plus 3 % (T&E 2020, Eurocontrol 2021). Pour nombre de destinations relevant de cette classe de distance, il n'existe aucune liaison ferroviaire concurrentielle (OFT 2023). Et leur desserte exigerait de développer l'infrastructure, essentiellement à l'étranger (OFT 2023).

3 Plan de mise en œuvre pour la Suisse

3.1 Instruments existants

Plusieurs mesures basées sur le marché, comme le SEQE ou le CORSIA, s'appliquent d'ores et déjà en Suisse au transport aérien (cf. ch. 2.7). Le CORSIA couvre le trafic aérien international tandis que le SEQE couvre le trafic aérien national et en partie le trafic aérien international.

L'impôt sur les huiles minérales, qui frappe le trafic aérien intérieur, produit également des effets sur l'impact climatique du transport aérien suisse. L'impôt sur les huiles minérales s'élève aujourd'hui à 439 fr. 50 pour 1000 litres de carburant d'aviation, auquel s'ajoute une surtaxe de 300 francs (art. 12 Limpmin). Une partie des recettes tirées de cet impôt est affectée à des mesures dans les domaines de la sécurité, de la sûreté et de l'environnement au titre du Financement spécial du trafic aérien (cf. art. 37a de la loi fédérale concernant l'utilisation de l'impôt sur les huiles minérales à affectation obligatoire (LUMin)). La Limpmin a plusieurs effets bénéfiques, quoique minimes, pour le climat. Premièrement, l'impôt agit comme une incitation à diminuer la consommation de carburant sur les vols intérieurs. Ensuite, elle permet, via le Financement spécial du trafic aérien, d'affecter des ressources à des mesures utiles au climat. Les exploitants d'aéronefs peuvent de plus demander un allègement fiscal lorsqu'ils embarquent des CAD pour des vols intérieurs. Le carburant utilisé doit pour cela satisfaire les critères visés aux art. 12b et 12c, Limpmin. Cet allègement fiscal expirera normalement fin 2024. Selon l'examen en première lecture par le Parlement de la loi sur le CO₂ pour la période postérieure à 2024, il est question cependant d'en prolonger la validité jusqu'à fin 2030.

Aux termes de l'art. 26 de la loi sur le CO₂, les importateurs de carburants sont tenus de compenser les émissions générées par l'utilisation de ces carburants dans les vols intérieurs. Une part des émissions de CO₂ dues au transport doit être compensée au moyen de certificats. Le supplément de compensation ne doit pas dépasser 5 centimes par litre de carburant. Les dispositions d'exécution figurent aux art. 86 à 92 de l'ordonnance sur la réduction des émissions de CO₂ (ordonnance sur le CO₂, RS 641.711).

3.2 Contexte international

En 2021, la Commission européenne a dévoilé son paquet législatif « Ajustement à l'objectif 55 », lequel détaille les mesures prévues pour concrétiser l'objectif climatique de l'UE, soit réduire de 55 % d'ici 2030 les émissions de CO₂ par rapport aux niveaux de 1990. Certaines de ces mesures concernent

Trafic aérien neutre en termes de CO₂ d'ici 2050

directement la Suisse. Les modalités du SEQE ont d'ores et déjà été durcies³⁰ : l'abaissement annuel du plafond des émissions de CO₂ admissibles se fera à un rythme plus soutenu (4,3 % à partir de 2024, 4,4 % à partir de 2028). Les quotas d'émission gratuits vont être réduits puis abolis en 2026. À compter de 2024, le SEQE européen s'appliquera aux régions ultrapériphériques de l'UE. Il est prévu en outre de distribuer entre 2024 et 2030 20 millions de quotas d'émission (d'une valeur estimée de 2 milliards d'euros en 2023) à titre de rémunération pour l'utilisation des CAD et dans le but de réduire le surcoût de ces derniers. Il est en outre prévu d'intégrer les effets hors CO₂ dans le SEQE UE à partir de 2028. Les modalités à cet effet devraient être élaborées dans les années à venir.

Dans le cadre du paquet Ajustement à l'objectif 55, la Commission européenne envisage en outre d'adapter la directive sur la taxation de l'énergie afin que les carburants utilisés pour les vols intra-UE soient taxés³¹. Les États membres seraient également autorisés à taxer les carburants d'aviation utilisés pour les vols hors-UE. Les discussions sur ce projet ne sont pas encore terminées. Des incertitudes pèsent encore sur son adoption et la date de son entrée en vigueur.

Parmi les initiatives du paquet « Ajustement à l'objectif 55 », le règlement ReFuelEU Aviation³² est sans doute celle qui revêt la plus grande signification en termes de réduction de l'impact du transport aérien sur le climat. Le règlement ReFuelEU Aviation introduit l'obligation d'incorporer une part minimale de CAD dans le carburant. Celle-ci est fixée à 2 % à partir de 2025 pour atteindre 70 % en 2050. Le texte entend également promouvoir sans tarder les CAD de synthèse avec l'introduction d'un quota pour ce type de carburant à partir de 2030. L'hydrogène est également admis comme moyen pour concrétiser ces objectifs. Le règlement ReFuelEU Aviation restreint le suremport (fuel tankering), pratique consistant à embarquer plus de carburant que nécessaire pour un vol. Il s'agit de faire éviter que les compagnies aériennes contournent les quotas de CAD lors de vols retours vers des destinations hors UE. Plusieurs pays à travers le monde ont adopté ou s'apprêtent à adopter des réglementations analogues³³.

3.3 Instruments envisagés d'ici 2030

Les mesures existantes incitent l'aviation à accroître son efficacité et se traduisent par la compensation et la réduction d'une partie de ses émissions de CO₂ fossile. Il s'agit d'un premier pas. Vu les défis à relever (cf. ch. 2.5), il faudra prendre d'autres mesures à brève échéance pour réaliser la neutralité CO₂ du trafic aérien à l'horizon 2050. Le calendrier ambitieux retenu exige que soit rapidement créé un cadre favorisant l'essor des CAD. Ce qui passe notamment par le ralliement de la Suisse à l'obligation d'incorporation des carburants d'aviation durables harmonisée sur le plan européen. À titre subsidiaire, le Conseil fédéral envisage d'encourager le développement et l'utilisation de technologies innovantes en matière de réduction de l'impact climatique du transport aérien. Il est question également de développer les mesures internationales basées sur le marché. La Suisse adoptera les adaptations du SEQE UE en se basant sur le couplage des deux systèmes. Même en mettant fin en 2026 à la distribution de quotas d'émission gratuits, la révision du SEQE renforcera l'incitation à accroître l'efficacité des avions et de leur exploitation au prix toutefois d'une augmentation des coûts pour les exploitants d'aéronefs.

En septembre 2021, le Conseil fédéral a publié son message relatif à la révision de la loi sur le CO₂ qui présente en quoi consisterait l'obligation d'incorporation de CAD dans le carburant. Le message souligne que cette obligation serait calquée sur la réglementation européenne. Il s'agit de faire éviter toute distorsion du marché. Depuis la parution du message, l'UE a précisé les modalités de l'obligation qui ont reçu l'aval du Parlement européen. Les dispositions du règlement ReFuelEU Aviation et celles de la loi sur le CO₂ se rejoignent en substance³⁴. L'administration a proposé que la Suisse reprenne cette réglementation dans

³⁰ Directive (UE) 2023/958 du Parlement européen et du Conseil du 10 mai 2023 modifiant la directive 2003/87/CE en ce qui concerne la contribution de l'aviation à l'objectif de réduction des émissions dans tous les secteurs de l'économie de l'Union et la mise en œuvre appropriée d'un mécanisme de marché mondial, JO L 130 du 16.5.2023, p. 134.

³¹ Proposition de directive du Conseil du 14 juillet 2021 restructurant le cadre de l'Union de taxation des produits énergétiques et de l'électricité (refonte)

³² Règlement (UE) 2023/2405 du Parlement européen et du Conseil du 18 octobre 2023 relatif à l'instauration d'une égalité des conditions de concurrence pour un secteur du transport aérien durable (ReFuelEU Aviation), JO L, 2023/2405, 31.10.2023, ELI: <http://data.europa.eu/eli/reg/2023/2405/oj>

³³ Voir à ce propos <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Politiques.aspx> (État : 12 janvier 2024)

³⁴ Accord du 21 juin 1999 entre la Confédération suisse et l'Union européenne sur le transport aérien (RS 0.748.127.192.68)

Trafic aérien neutre en termes de CO₂ d'ici 2050

le cadre de l'accord sur le transport aérien avec l'UE estimant cette manière de procéder plus avantageuse que d'élaborer des modalités d'application propres dans le cadre de la loi CO₂. L'exécution en serait grandement simplifiée et cela réglerait les problèmes de distorsions de la concurrence. Les experts de l'UE ont avisé la Suisse que la reprise de l'obligation dans le cadre de l'accord sur le transport aérien serait vue d'un bon œil par l'UE. Le Conseil national s'est rallié à cette solution. Le Conseil des États doit délibérer lors de la session de printemps 2024. Les quotas instaurés par le règlement ReFuelEU Aviation permettront de réduire de 70 % les émissions de CO₂ fossile d'ici 2050. De sévères critères de durabilité garantissent que les effets globaux sur l'environnement soient pris en compte.

Le Conseil fédéral entend débloquer des moyens supplémentaires pour favoriser l'essor des CAD et d'autres technologies s'inscrivant dans l'objectif de la neutralité CO₂ du trafic aérien. Le message relatif à la révision de la loi sur le CO₂ énonce le chiffre de 150 millions CHF jusqu'en 2030. Le Conseil des États a également introduit dans la révision de la loi sur le CO₂ une affectation liée pour le SEQE suisse qui alloue de manière générale les recettes des enchères à la promotion de mesures dans le même secteur. De même, le Conseil fédéral a la possibilité de prévoir un mécanisme de rétribution de l'avitaillement en CAD analogue à celui appliqué dans le cadre du SEQE UE. Enfin, le produit des sanctions - en cas de reprise de l'obligation d'incorporation de l'UE - ira aussi alimenter la promotion des CAD. Il s'agit de coordonner l'utilisation de ces nouvelles ressources à travers un instrument, le but étant de soutenir aussi efficacement que possible les mesures qui sont en instance de commercialisation, à l'instar de technologies suisses innovantes de nature à améliorer les impacts sur l'environnement et l'économie. Une stratégie de promotion incluant une feuille de route pour le développement à grande échelle des optimisations technologiques et aéronautiques nécessaires est en cours d'élaboration sous la direction de l'OFAC, l'objectif étant que la promotion déploie ses effets de manière ciblée peu après l'entrée en vigueur. Les bases d'une promotion efficace pour favoriser l'essor des CAD figurent dans les rapports correspondants de l'OFAC, de l'OACI et de la Conférence européenne de l'aviation civile (CEAC) (OFAC 2022, OACI 2022, CEAC 2023).

Action sur la demande

Ces dernières années ont vu fleurir les interventions parlementaires exigeant de mettre un terme à l'exonération de l'impôt sur les huiles minérales dont bénéficie le carburant utilisé sur les vols internationaux³⁵ dans l'espoir de faire baisser la demande de transport aérien. Or, juridiquement, la Suisse a les mains liées : l'exonération fiscale accordée aux carburants d'aviation utilisés sur les vols internationaux s'exerce partout dans le monde et est inscrite dans le droit international public. Cette disposition figure dans les accords bilatéraux sur les services aériens conclus par la Suisse, dans le droit fil des recommandations de l'UE, elles-mêmes basées sur la Convention de Chicago. Il n'est pas possible de modifier unilatéralement cette pratique. Il faut un accord international. À ce propos, le Conseil fédéral relève dans sa réponse à la motion Masshardt (20.3523 « Modification de la Convention de Chicago. Il est temps d'imposer le trafic aérien ») que « s'il devait y avoir une ouverture sur la question de l'imposition générale des carburants d'aviation dans le trafic aérien mondial, le Conseil fédéral donnerait son appui aux initiatives en ce sens. » (cf. ch. 3.2).

Par contre, il serait possible d'agir sur la demande en instaurant une taxe sur les billets d'avion. Les pays voisins de la Suisse appliquent des taxes par passager modestes : entre 5 et 20 euros en moyenne sur les vols internationaux (Commission européenne 2019). On peut toutefois s'interroger sur la pertinence d'une taxe nationale sur des vols internationaux : si la Suisse appliquait des taxes nettement plus élevées que celles pratiquées sur les aéroports situés à proximité de sa frontière cela reviendrait automatiquement à pénaliser ses propres aéroports par rapport à leurs concurrents étrangers et entraînerait sans doute le report du trafic sur ces plateformes avec en corollaire une augmentation des émissions de CO₂. À l'inverse, des taxes peu élevées n'auraient aucun effet significatif sur la demande vu la faible élasticité-prix des voyages en avion (Ecoplan 2021).

³⁵ Ip. 19.3508 Schneider Schüttel « Exempter le kérosène de l'impôt sur les huiles minérales est dépassé. Modification de la Convention de Chicago, Mo. 20.3383 Groupe des Vert-e-s « Le Conseil fédéral s'engage au niveau international en faveur de l'introduction d'une taxe sur le kérosène », Mo. 20.3523 Masshardt « Modification de la Convention de Chicago. Il est temps d'imposer le trafic aérien ».

Le message du Conseil fédéral relatif à la révision de la loi sur le CO₂ ne prévoit en principe pas de nouvelles taxes, ni d'augmenter les taxes en vigueur. Depuis la votation populaire sur la dernière révision de la loi sur le CO₂, le Parlement a systématiquement refusé toute initiative visant à taxer davantage le transport aérien. La Confédération dissocie les instruments nationaux et les instruments internationaux : les mesures nationales comme l'obligation de compenser les émissions et l'impôt sur les huiles minérales ne s'appliquent qu'aux vols intérieurs. Elles aboutissent à des effets immédiats sans fausser le marché. Le programme CORSIA et le SEQUE sont des instruments coordonnés entre les pays et taillés pour le trafic aérien international. La Confédération s'implique activement dans leur développement et, dans le cas du SEQUE, cherche à en étendre la portée (cf. ch. 3.2).

3.4 Perspectives pour 2050

L'art. 12, al. 1, LCI énonce que les actes fédéraux portant sur une série de domaines, dont le transport aérien, doivent être conçus et appliqués de sorte à contribuer à atteindre les objectifs climatiques. Le ch. 3.3 décrit les besoins à cet effet : les instruments existants et ceux qu'il est prévu d'instaurer permettraient de réduire plus de 70 % des émissions de CO₂ de l'aviation à l'horizon 2050. Il faudrait à cet effet pérenniser et perfectionner ces instruments, notamment l'obligation d'incorporation conjuguée à une promotion ciblée, le SEQUE (couplé à celui de l'UE) et le programme CORSIA.

Même en tenant compte des modifications législatives envisagées, les incitations ne permettraient pas de réduire les émissions résiduelles. Pour s'attaquer à ces émissions, il faudrait développer les instruments existants (obligation d'incorporation, SEQUE, CORSIA) ou en créer de nouveaux. Mais avant cela, il faut que les mesures et instruments envisagés fassent leurs preuves. Leur mise en œuvre intervient en cours de révision de la loi sur le CO₂ pour la période postérieure à 2030. Renvoyer les décisions à une date ultérieure compromettrait la concrétisation de l'objectif zéro net dans le délai souhaité ou entraînerait des conséquences économiques insupportables, notamment pour les NET. Dans ce domaine, le Conseil fédéral prévoit une phase d'extension progressive ciblée à partir de 2031 (Conseil fédéral 2022). Cela suppose de mettre sur pied un cadre clair, d'assurer un financement répondant autant que possible au principe du pollueur-payeur et une coordination entre tous les secteurs en fonction des besoins. Le Conseil fédéral examinera des propositions concrètes d'ici fin 2024 (Conseil fédéral 2022).

Pour chaque instrument, il faut embrasser tous les effets sur l'économie et sur l'environnement, autrement dit englober les émissions en amont et les effets hors CO₂. Il faudra également prendre en considération la dimension internationale du transport aérien en intégrant les conséquences économiques et écologiques des distorsions de marché engendrées par les instruments nationaux. L'accent est ainsi clairement mis sur la coordination internationale. Il s'agit d'une part de tenir compte des évolutions au sein de l'UE pour l'après-2030, de l'autre, d'accompagner et d'influencer les démarches de l'OACI. Des décisions cruciales devront être prises eu égard à la mise en œuvre de l'objectif zéro émission nette de CO₂ porté par l'OACI et à la prolongation du programme CORSIA, voire son remplacement par un autre instrument, au-delà de l'échéance de 2035. La Confédération a ici un rôle à jouer et peut obtenir des résultats qui dépassent le strict cadre suisse. Le secteur aérien suisse peut aussi s'investir et envoyer un signal de demande clair au-delà de la Suisse pour des technologies plus efficaces.

4 Vols neutres en termes de CO₂ au DDPS

4.1 Contexte

Les Forces aériennes consomment environ 2 % du kérosène utilisé dans l'aviation en Suisse et sont à l'origine de 0,3 % des émissions CO₂ imputables aux carburants et combustibles en Suisse. En 2002, les carburants d'aviation utilisés par les Forces aériennes représentent près de la moitié des quelque 200 000 t de CO_{2eq} enregistrées annuellement par le Département fédéral de la défense, de la protection

Trafic aérien neutre en termes de CO₂ d'ici 2050

de la population et des sports (DDPS). Un arrêté du Conseil fédéral datant de 2019 impose au DDPS de réduire d'ici à 2030 ses émissions de CO₂ d'au moins 40 % par rapport à 2001.

À cet effet, le DDPS a adopté le plan d'action Énergie et climat³⁶ qui est entré en force en 2021 et qui comprend encore d'autres objectifs. Le département vise l'autosuffisance énergétique en privilégiant les sources d'énergie renouvelables et le développement de capacités de stockage d'énergie. Il souhaite également promouvoir ces prochaines années les solutions innovantes en matière de carburants et de motorisation.

La LCI ayant été acceptée par le peuple le 18 juin 2023, l'administration fédérale centrale est tenue d'atteindre au moins l'objectif de zéro émission nette d'ici 2040. Les exigences légales en matière de réduction du CO₂ en vigueur dès le 1^{er} janvier 2025 sont par conséquent plus sévères que ce que prévoit le plan d'action Énergie et climat du DDPS (zéro émission nette de GES d'ici 2050). Aux termes de l'art. 10, al. 3, LCI, le Conseil fédéral peut prévoir « des exceptions liées à la sécurité du pays et à la protection de la population ». Les dispositions d'exécution de la LCI sont en cours d'élaboration.

4.2 Mesures de réduction des émissions de CO₂ dans l'aviation militaire

Les Forces aériennes cherchent à atteindre la neutralité CO₂ en s'appuyant essentiellement sur le même arsenal de mesures que l'aviation civile : gains d'efficacité des avions et de leur exploitation, y compris au niveau de l'instruction, recours aux CAD, utilisation d'avions à hydrogène et électriques, recours aux NET. Le remplacement des avions de conception ancienne par des avions modernes et plus efficaces constitue un moyen de réduire les émissions de CO₂. Cela étant, les appareils militaires restent souvent plus longtemps en service que les avions civils. Les Forces aériennes ne peuvent par conséquent pas intégrer aussi rapidement que l'aviation civile les innovations technologiques et les aéronefs plus efficaces. L'achat de nouveaux appareils est soumis à la nouvelle stratégie du DDPS en matière d'acquisitions du 1^{er} février 2023, laquelle prend en compte la rentabilité, l'écologie et les aspects sociaux tout au long du cycle de vie et du processus d'acquisition et ouvre les procédures d'acquisition à des solutions innovantes (DDPS 2023).

Les émissions de CO₂ des Forces aériennes peuvent être contenues en limitant au maximum les heures de vol, par exemple en recourant pour l'instruction aux simulateurs de vol qui sont d'ailleurs déjà utilisés chaque fois que cela est possible. Les mouvements et heures de vol sont en outre déterminés par la flotte d'avions. Les nouveaux F-35A n'auront pas besoin de voler autant que les avions de combat actuellement en service et leur consommation de carburant annuelle sera inférieure de 25 % à celle de ces derniers.

Comme c'est le cas pour l'aviation civile, les CAD sont également certifiés pour l'aviation militaire au taux maximum d'incorporation de 50 %. Les armées de plusieurs pays, dont la Suisse, utilisent d'ores et déjà les CAD. À terme, on estime que les systèmes aéronautiques militaires seront capables de fonctionner intégralement aux CAD.

Pour diverses raisons, les avions à hydrogène et électriques se prêtent mal à un usage militaire. Ce type d'avion n'est pas en mesure de couvrir l'éventail des missions et des performances des avions de combat. Ils pourraient à la rigueur servir à l'instruction ou trouver un débouché dans le domaine des drones. De manière générale, il est hautement improbable que ces motorisations contribuent dans l'immédiat de manière significative à la neutralité CO₂ de l'aviation militaire.

Les mesures prises par le DDPS en faveur du climat ne doivent pas se faire au détriment de la mission de l'armée. En conséquence, la mise en œuvre de la LCI se traduira probablement par le recours aux NET pour compenser en partie l'impact climatique du DDPS.

³⁶ <https://www.vbs.admin.ch/fr/plan-action-energie-climat> (État : 12 janvier 2024)

4.3 Mesures d'ici 2030

Selon le plan d'action Énergie et climat du DDPS, les Forces aériennes doivent fournir d'ici 2030 une contribution substantielle à la réduction des émissions de CO₂ fossile du DDPS. Pour ce faire, le DDPS mise sur les CAD et le remplacement de la flotte, notamment par l'introduction progressive du F-35A. A priori, les Forces aériennes auront entièrement renouvelé leur flotte d'ici 2040. On escompte aussi une réduction de la consommation de carburant via l'amélioration des processus au sol et en vol.

Le Groupement défense a commencé en 2023 à incorporer les CAD dans le kérosène fossile. Près de 700 tonnes de CAD (prémélangés au carburant fossile) seront achetés chaque année entre 2023 et 2027, soit 2 % environ de la consommation de kérosène des Forces aériennes. Entre 2027 et 2030, l'armée prévoit de faire passer le taux de CAD à 10 %, soit 4000 tonnes de CAD par an.

Sur la période 2020-2030 et conformément au train de mesures sur le climat pour l'administration fédérale décidé par le Conseil fédéral, les émissions de GES résiduelles seront entièrement compensées par l'acquisition de certificats.

4.4 Perspectives pour 2050

Les Forces aériennes devront prendre des mesures s'étendant au-delà de 2030 si elles entendent rester dans les clous de la LCI et contribuer à l'objectif de la neutralité CO₂ de l'aviation à l'horizon 2050. Le remplacement de la flotte devrait entraîner à l'avenir aussi des gains d'efficacité. Les CAD constitueront à n'en pas douter le fer de lance de la réduction des émissions de CO₂ fossile. Le solde des émissions devra être compensé en recourant aux NET. Il est pour l'instant impossible de chiffrer précisément le potentiel de réduction des émissions de CO₂ fossile de chaque mesure entre 2023 et 2050 puisqu'il dépend de l'évolution technologique. La certification de systèmes militaires capables de fonctionner intégralement aux CAD revêt à cet égard une importance déterminante.

4.5 Répercussions financières

Pour le DDPS, la réduction des émissions de CO₂ d'origine fossile constitue non seulement un défi technologique mais également financier. Les CAD sont pour l'instant disponibles en quantité limitée et coûtent cher. On estime que l'incorporation entre 2023 et 2027 de 2 % de CAD dans le carburant ordinaire alourdira la facture d'un montant allant de 1,1 à 2,2 millions CHF. Au taux d'incorporation de 10 %, prévu par le DDPS à partir de 2030, les coûts supplémentaires devraient osciller entre 5 et 10 millions CHF. Et l'entrée en vigueur du règlement ReFuelEU Aviation brouillera encore davantage les cartes quant à la disponibilité et au prix des CAD. On s'attend à ce que les Forces aériennes aient un important besoin de ressources supplémentaires pour régler la facture des CAD d'ici 2050.

5 Conclusion

Les nouvelles technologies peuvent permettre au transport aérien d'éviter dans une large mesure de rejeter des émissions de CO₂ fossile et de réduire par la même occasion ses coûts externes à l'horizon 2050. Le recours aux carburants durables constitue à cet égard la mesure phare. Il ne faut par contre pas espérer une substitution complète des carburants fossiles d'ici 2050. Jusqu'à cette date au moins, on estime qu'il restera un socle de 10 % à 23 % au plus d'émissions de CO₂ fossile que l'on ne pourra éviter. La compensation de ces émissions passera par le recours aux NET. Ces mesures combinées permettront au transport aérien suisse d'atteindre la neutralité CO₂ à l'horizon 2050.

Le parcours est toutefois semé d'embûches. D'abord, les CAD et les NET sont très gourmands en matières premières et en énergie provenant de sources renouvelables si bien que l'aviation est ici en

Trafic aérien neutre en termes de CO₂ d'ici 2050

concurrence avec d'autres secteurs. Globalement, le potentiel des NET est actuellement limité. Le calendrier ambitieux retenu représente une autre gageure. Pour que l'aviation atteigne la neutralité CO₂ à l'horizon 2050, il faudra donner rapidement un coup d'accélérateur au niveau international aux technologies requises pour la production de CAD et aux avancées dans le domaine technique et opérationnel. Cela n'ira pas sans conséquences sur l'environnement et sur l'économie, conséquences qu'il y aura lieu de limiter autant que possible. La clé réside également dans le financement des mesures qui doit être suffisant et intervenir en temps et en heure.

Plusieurs mesures basées sur le marché sont déjà en vigueur dans l'aviation suisse, notamment le SEQUE et le CORSIA qui tiennent compte de l'aviation internationale. Bien que ces instruments procurent déjà certaines incitations en matière de gains d'efficacité, ils ne sauraient suffire pour que l'aviation atteigne la neutralité CO₂. La loi sur le CO₂ pour la période postérieure à 2024 comprend (avant élimination des divergences au Parlement) l'amélioration des instruments existants et le développement de nouveaux instruments qui s'attaquent aux défis les plus importants. L'introduction de quotas de CAD doit aller de pair avec la création d'un cadre contraignant et durable pour faire passer la production de CAD à la vitesse supérieure. On pourrait notamment allouer à titre subsidiaire et temporaire des moyens supplémentaires à la promotion des nouvelles technologies afin de rendre les investissements moins risqués. Le SEQUE sera en outre plus contraignant. Par ces instruments, la Confédération pose les jalons d'une réduction de plus de 70 % des émissions de CO₂ fossile dans le transport aérien.

Ces instruments permettent au transport aérien d'internaliser en partie ses coûts externes, au prix d'un renchérissement du billet d'avion. Il en résulte aussi un effet modérateur sur la croissance de la demande de transport aérien, favorable à la réalisation des objectifs climatiques. La coordination des mesures entre les pays permet d'éviter les distorsions du marché. Des initiatives s'imposeront dans le cadre de la révision de la loi sur le CO₂ pour la période postérieure à 2030 afin de réduire et de compenser les émissions résiduelles. Vu la dimension très internationale du transport aérien suisse, il faudra là aussi tenir compte du contexte international.

Les Forces aériennes cherchent à atteindre la neutralité CO₂ en s'appuyant essentiellement sur le même arsenal de mesures que l'aviation civile. Compte tenu de l'éventail de missions dévolues aux aéronefs militaires, les carburants durables jouent un rôle particulièrement important dans l'aviation militaire. Dans l'aéronautique militaire, les technologies de réduction des GES ne se développent toutefois pas aussi rapidement que dans le secteur civil.

La neutralité CO₂ de l'aviation est fortement conditionnée aux nouvelles technologies, cela dans tous les domaines. Celles-ci étant souvent au stade de la recherche et du développement, il est difficile d'évaluer avec précision leur potentiel et leurs coûts. Une mise à jour du présent rapport s'imposera dès que l'on y verra plus clair. De même, les effets des mesures envisagées aujourd'hui de même que le développement d'autres instruments dans le contexte international se feront plus tangibles au fil des ans. D'ici là, l'efficacité des mesures de réduction des effets hors CO₂ sera également connue avec plus de précision, ce qui permettra de les inclure.

Annexe : prise de position actualisée sur le postulat déposé le 6 mai 2020 par le Groupe des Vert-e-s (20.3384 Plan directeur pour le trafic aérien. Établir de nouvelles règles du jeu pour le secteur de l'aviation)

Le postulat déposé le 6 mai 2020 par le Groupe des Vert-e-s (20.3384 « Plan directeur pour le trafic aérien. Établir de nouvelles règles du jeu pour le secteur de l'aviation ») demande au Conseil fédéral d'élaborer les actions à engager concrètement afin de garantir la compatibilité du transport aérien avec les objectifs de l'accord de Paris sur le climat. Le Conseil fédéral a proposé de rejeter le postulat invoquant les mesures déjà mises en place et la révision de la loi sur le CO₂. Le Groupe des Vert-e-s a retiré son postulat le 9 mai 2022 demandant en contrepartie que le Conseil fédéral aborde les huit revendications énumérées dans ledit postulat dans son rapport en réponse à un postulat déposé par la Commission de l'environnement, de l'aménagement du territoire et de l'énergie du Conseil national (21.3973 Trafic aérien neutre en termes de CO₂ d'ici 2050). La présente partie satisfait cette requête en intégrant les mutations intervenues depuis le dépôt du postulat.

Les compagnies aériennes et les aéroports sont impliqués dans la réalisation des objectifs de l'accord de Paris

L'art. 5 LCI stipule que toutes les entreprises, parmi elles les compagnies aériennes et exploitants d'aéroports suisses, doivent avoir ramené leurs émissions à zéro net d'ici à 2050 au plus tard. Le Conseil fédéral estime dès lors que cette demande est satisfaite.

Le Conseil fédéral définit des prescriptions sur la promotion et l'utilisation de carburants synthétiques et d'avions plus efficaces, notamment au moment du renouvellement des flottes

Des règles concernant l'utilisation des CAD et notamment des CAD de synthèse sont en préparation. Il est question que les carburants d'aviation contiennent obligatoirement une certaine proportion de CAD. Sous l'effet des progrès technologiques et parce que le carburant représente un poste de coût majeur pour les compagnies aériennes, la flotte d'avions desservant la Suisse ne cesse de se moderniser avec la mise en service d'avions plus efficaces.

Il mène des négociations internationales pour la mise en place d'un impôt sur le kérosène et l'intégration de l'aviation dans les futurs accords sur le climat

Il y a peu de chances actuellement pour que le carburant utilisé sur les vols internationaux soit taxé, faute de consensus à ce sujet dans le concert des nations. Pour le détail, on renverra aux ch. 2.7, 3.1 et 3.2. Membre des Amis de la réforme des subventions aux énergies fossiles, la Suisse plaide dans le cadre de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) en faveur de l'élimination des subventions aux carburants et combustibles fossiles. Si les lignes devaient bouger sur la taxation des carburants d'aviation utilisés sur les vols internationaux, la Confédération examinerait les tenants et aboutissants des initiatives proposées et, le cas échéant, leur donnerait son appui. Voir à ce propos la réponse du Conseil fédéral à l'interpellation Schneider Schüttel (19.3508 « Exempter le kérosène de l'impôt sur les huiles minérales est dépassé. Modification de la Convention de Chicago »).

Un moratoire est instauré sur l'augmentation de la capacité des infrastructures aéroportuaires jusqu'à ce qu'il soit prouvé que de telles extensions sont compatibles avec la nécessaire réduction des émissions de gaz à effet de serre du secteur

Le développement de l'infrastructure aéroportuaire est encadré par le Plan sectoriel des transports, partie Infrastructure aéronautique (PSIA). Il n'y a actuellement en Suisse aucun projet d'extension des aéroports qui se traduirait par une augmentation sensible de la capacité de pointe. Les optimisations envisagées aujourd'hui par les aéroports ont pour objectif d'améliorer la ponctualité des vols. Quoi qu'il en soit, les projets d'extension ayant des incidences sur les capacités sont examinés sous l'angle de leur impact environnemental dans le cadre de la planification sectorielle et des procédures d'approbation des plans. Le Conseil fédéral estime que cette revendication est déjà largement satisfaite.

Les vols de nuit sont interdits pour une période d'au moins 8 heures

Des couvre-feux contraignants, destinés à protéger la population contre le bruit des avions la nuit, sont déjà en vigueur sur les aéroports suisses. Le Rapport 2016 sur la politique aéronautique de la Suisse indique que « de nouvelles limitations des heures d'ouverture des aéroports nationaux ne devraient entrer en ligne de compte que lorsque des périodes de repos nocturne plus étendues que ce que pratique la Suisse s'imposent en Europe » (Conseil fédéral 2016). Le Conseil fédéral a réaffirmé ce principe à plusieurs reprises, notamment dans sa réponse à la motion Schlatter (20.3275 « Redémarrage de l'aviation. Pour une interdiction des vols de nuit »). En admettant que les capacités diurnes restent ce qu'elles sont, l'extension des couvre-feux nocturnes aboutirait à une réduction des capacités. L'effet bénéfique de ce genre de mesures sur le climat est discutable (cf. ch. 3.3), puisqu'il est probable que le trafic se reporterait sur les pays voisins et que l'économie serait pénalisée.

Les vols commerciaux intérieurs, y compris de transit, sont transférés vers le rail

Les vols commerciaux intérieurs en correspondance représentent moins de 1 % des émissions de CO₂ du trafic aérien suisse. La part des autres vols intérieurs avoisine aussi le pourcent. Il n'est d'ailleurs pas sûr qu'il existe une alternative ferroviaire à ces derniers qui recouvrent pour une large part du transport par hélicoptère. Le transfert sur le rail est abordé au ch. 2.7.

Un soutien est fourni au secteur ferroviaire, notamment pour la mise en place de lignes internationales et de trains de nuit

Le message du Conseil fédéral relatif à la révision de la loi sur le CO₂ contient un volet sur le soutien au trafic ferroviaire transfrontière. Un montant de 180 millions CHF provenant du SEQE du transport aérien sera ainsi affecté au rail entre 2025 et 2030 hors plafond budgétaire. Cette question sera également traitée dans le rapport du Conseil fédéral *Transports sans énergie fossile à l'horizon 2050*.

Un fonds de reconversion et de formation continue est créé pour offrir de nouvelles perspectives dans les secteurs des transports publics respectueux de l'environnement

Le présent rapport se penche sur les moyens de rendre le transport aérien climato-compatible. La reconversion du personnel dans d'autres secteurs n'entre pas dans cette problématique et n'est dès lors pas abordée dans le présent rapport.

Références

Agence européenne de la sécurité aérienne (AESA) (2019) : *European Aviation Environmental Report 2019*. <https://www.eurocontrol.int> > Library (État : 12 janvier 2024).

Agence européenne de la sécurité aérienne (AESA) (2022) : *European Aviation Environmental Report 2022*. <https://www.eurocontrol.int> > Library (État : 12 janvier 2024).

Agence internationale de l'énergie (AIE) (2021) : *Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector*. <https://www.iea.org> > Reports > Net Zero by 2050 (État : 12 janvier 2024).

Agence internationale de l'énergie (AIE) (2023) : *World Energy Outlook 2023*. <https://www.iea.org> > Reports > World Energy Outlook 2023 (État : 12 janvier 2024).

Air Transport Action Group ATAG (2020) : *Waypoint 2050*. <https://aviationbenefits.org/> > Download Waypoint 2050 report (État : 12 janvier 2024).

Commission européenne, DG MOVE (2019) : *Taxes in the field of aviation and their impact. Final report*. <https://op.europa.eu> (État : 12 janvier 2024).

Conférence européenne de l'aviation civile (CEAC) (2023) : *ECAC Guidance on Sustainable Aviation Fuels (SAF)*. <https://www.ecac-ceac.org/> > Activities > Environment > European Aviation and Environment Working Group (EAEG) > SAF Task Group (État : 12 janvier 2024).

Trafic aérien neutre en termes de CO₂ d'ici 2050

Conseil fédéral (2016) : *Rapport sur la politique aéronautique de la Suisse 2016* (Lupo 2016).

<https://www.fedlex.admin.ch> > Feuille fédérale > Éditions de la FF > 2016 > Mars > 2016 > FF 2016 1675 (État : 12 janvier 2024).

Conseil fédéral (2020) : *Quelle pourrait être l'importance des émissions négatives de CO₂ pour les futures politiques climatiques de la Suisse ?* Rapport du Conseil fédéral en réponse au postulat 18.4211 Thorens Goumaz du 12 décembre 2018. <https://www.parlament.ch> > Travail parlementaire > Recherche Curia Vista (État : 12 janvier 2024).

Conseil fédéral (2021) : *Stratégie climatique à long terme de la Suisse*. <https://www.bafu.admin.ch> > Thèmes > Thème Climat > Informations pour spécialistes > Stratégie et objectifs de la politique climatique > Objectifs de réduction > Objectif de zéro net d'ici à 2050 > Stratégie climatique 2050 (État : 12 janvier 2024).

Conseil fédéral (2022) : *Captage et stockage du CO₂ (CSC) et technologies d'émission négative (NET). Leur contribution possible, par étapes, à l'objectif climatique à long terme*. <https://www.bafu.admin.ch> > Thèmes > Thème Climat > Informations pour spécialistes > Extraction et stockage du CO₂ (État : 12 janvier 2024).

Département fédéral de la défense, de la protection de la population et des sports (DDPS) (2023) : *Stratégie du DDPS en matière d'acquisitions*. <https://www.vbs.admin.ch> > Autres thèmes > Sécurité > Stratégie d'acquisitions (État : 12 janvier 2024).

Ecoplan (2021) : *Schweizer «Road Map Sustainable Aviation»*. <https://arcs.aero> > Projekte > Schweizer «Road Map Sustainable Aviation» (État : 12 janvier 2024).

Eurocontrol (2021) : *Plane and train: Getting the balance right*. <https://www.eurocontrol.int> > Library (État : 12 janvier 2024).

Eurocontrol (2022) : *Eurocontrol Aviation Outlook 2050*. <https://www.eurocontrol.int> > Library (État : 12 janvier 2024).

INFRAS (2015): *Luftverkehr und Nachhaltigkeit. Update 2015*: <https://www.bazl.admin.ch> > Themen > Umwelt > Weitere Themen > Nachhaltige Entwicklung (État : 12 janvier 2024).

Lee, David S. et al. (2023) : *Uncertainties in mitigating aviation non-CO₂ emissions for climate and air quality using hydrocarbon fuels*. *Environmental Science: Atmospheres*. <https://doi.org/10.1039/D3EA00091E> (État : 12 janvier 2024).

Neu, Urs (2021) : *Émissions des transports aériens et leur impact sur le climat*. *Swiss Academies Communications* 16 (3). <https://scnat.ch> > Publications > Swiss Academies Communications (État : 12 janvier 2024).

Office fédéral de l'aviation civile (OFAC) (2021) : *ICAO Action Plan on CO₂ Emission Reduction of Switzerland*. <https://www.bazl.admin.ch> > Thèmes > Environnement > Climat > Plan d'action de l'OACI (État : 12 janvier 2024).

Office fédéral de l'aviation civile (OFAC) (2022) : *Rapport de l'OFAC concernant la promotion du développement et l'utilisation de carburants d'aviation durables*. <https://www.bazl.admin.ch> > Thèmes > Environnement > Climat > Carburants durables (État : 12 janvier 2024).

Office fédéral de l'énergie (2020) : *Statistique globale de l'énergie suisse 2019*. <https://www.bfe.admin.ch> > Approvisionnement > Statistiques et géodonnées > Statistiques de l'énergie > Statistique globale de l'énergie (État : 12 janvier 2024).

Office fédéral du développement territorial (ARE) (2022) : *Coûts et bénéfices externes des transports en Suisse. Transports par la route et le rail, par avion et par bateau 2019*. <https://www.are.admin.ch> > Mobilité > Bases et données > Coûts et bénéfices externes des transports (État : 12 janvier 2024).

Trafic aérien neutre en termes de CO₂ d'ici 2050

Office fédéral de la statistique (OFS) (2021) : *Le transport de marchandises en Suisse en 2019*.

<https://www.bfs.admin.ch> > Trouver des statistiques > Catalogues et banques de données (État : 12 janvier 2024).

Office fédéral de la statistique (OFS) (2022) : *Statistique de l'aviation civile suisse 2021*

<https://www.bfs.admin.ch> > Trouver des statistiques > Thèmes transversaux (transports publics, aviation) > Aviation civile (État : 12 janvier 2024).

Office fédéral des transports (OFT) (2023) : *Perspektive BAHN 2050. Hintergrundbericht Vision, Ziele und Stossrichtung*.

<https://www.bav.admin.ch> > Moyens de transport > Chemin de fer > Infrastructure ferroviaire > Programmes d'aménagement > Perspective RAIL 2050 (État : 12 janvier 2024).

Office fédéral de l'environnement (OFEV) (2020) : *Émissions négatives : les approches principales. Fiche d'information*.

<https://www.bafu.admin.ch> > Thèmes > Thème Climat > Informations pour spécialistes > Extraction et stockage du CO₂ (État : 2 janvier 2024).

Office fédéral de l'environnement (OFEV) (2023) : *Indicateurs de l'évolution des émissions de gaz à effet de serre en Suisse (1990-2021)*.

<https://www.bafu.admin.ch> > Thèmes > Thème Climat > Données, indicateurs et cartes > Données > Inventaire des gaz à effet de serre (État : 12 janvier 2024).

Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) (2022) : *Rapport sur la faisabilité d'un objectif ambitieux à long terme (LTAG) pour la réduction des émissions de CO₂ de l'aviation civile internationale*.

<https://www.icao.int> > Priorités mondiales > Protection de l'environnement > Changement climatique > LTAG > LTAG Report (État : 12 janvier 2024).

Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) (2022a) : *Résolution A41-21 : Exposé récapitulatif de la politique permanente et des pratiques de l'OACI dans le domaine de la protection de l'environnement — Changements climatiques*.

<https://www.icao.int> > Priorités mondiales > Protection de l'environnement (État : 12 janvier 2024).

Prognos AG (2020) : *Perspectives énergétiques 2050+. Rapport succinct*.

<https://www.bfe.admin.ch> > Politique > Perspectives énergétiques 2050+ (État : 12 janvier 2024).

Royal Netherlands Aerospace Centre NLR (2021) : *Destination 2050*.

<https://www.destination2050.eu> (État : 12 janvier 2024).

Sacchi, Romain et al. (2023) : *How to make climate-neutral aviation fly*. *Nature Communications*.

<https://doi.org/10.1038/s41467-023-39749-y> (État : 12 janvier 2024).

Transport & Environment (2020) : *Maximising air to rail journeys*. Abrufbar unter <https://www.transportenvironment.org>

> Latest > Select Priority: Planes > Select sub-topics: Passenger rail (État : 12 janvier 2024).

Université de Saint-Gall, Institut de gestion des approvisionnements (2020) : *Étude sur la logistique du fret aérien en Suisse 2020*.

<https://igaircargo.ch> > Projects > Swiss Air Freight Logistics Study 2020 (État : 12 janvier 2024).

Abréviations

ARE	Office fédéral du développement territorial
AESA	Agence européenne de la sécurité aérienne
CAD	Carburants d'aviation durables
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CEAC	Conférence européenne de l'aviation civile
CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation
DDPS	Département fédéral de la défense, de la protection de la population et des sports
Eurocontrol	Organisation européenne pour la sécurité de la navigation aérienne
IATA	Association internationale du transport aérien
LCI	Loi fédérale sur les objectifs en matière de protection du climat, sur l'innovation et sur le renforcement de la sécurité énergétique
Limpmin	Loi sur l'imposition des huiles minérales (RS 641.61)
LPE	Loi fédérale sur la protection de l'environnement (RS814.01)
LUMin	Loi fédérale concernant l'utilisation de l'impôt sur les huiles minérales à affectation obligatoire et des autres moyens affectés à la circulation routière et au trafic aérien (RS 725.116.2)
Lupo 2016	Rapport 2016 sur la politique aéronautique de la Suisse (FF 2016 1675)
NET	Technologies d'émission négative
OACI	Organisation de l'aviation civile internationale
OFAC	Office fédéral de l'aviation civile
OFEN	Office fédéral de l'énergie
OFEV	Office fédéral de l'environnement
OFS	Office fédéral de la statistique
SEQE	Système d'échange de quotas d'émissions