



Rapport de l'OFAC concernant la promotion du développement et de l'utilisation de carburants d'aviation durables

dans le cadre de la

Mesure 5 du plan d'action 2021-2023 relatif à la Stratégie pour le développement durable 2030

15.12.2022



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement,
des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Office fédéral de l'aviation civile OFAC

Impressum

Éditeur

Office fédéral de l'aviation civile OFAC

Disponible sur

www.bazl.admin.ch

y compris en allemand et en italien

12.2022

Table des matières

Résumé	4
1 Contexte initial	7
1.1 Stratégie climatique à long terme de la Suisse	7
1.2 Stratégie pour le développement durable 2030	7
1.3 Influence du trafic aérien sur le climat.....	8
1.4 Ambitions du secteur aérien.....	9
2 Mesures visant à réduire les effets climatiques du trafic aérien	11
2.1 Mesures visant à améliorer l'efficacité	11
2.2 Des carburants d'appoint durables	11
2.3 Solutions de stockage alternatives.....	12
2.4 Mesures basées sur le marché	13
2.5 Technologies d'émission négative	14
2.6 Conclusion.....	15
3 Carburants d'aviation durables	16
3.1 Carburants biogènes	16
3.2 Carburants synthétiques (PtL/StL)	19
3.3 Durabilité des systèmes de production	20
3.4 Potentiel de mise à l'échelle.....	22
3.5 Aspects nationaux	24
4 Promotion étatique des CAD	27
4.1 Contexte international	27
4.2 Promotion suisse actuelle	28
4.3 Promotion des ventes.....	28
4.4 Besoins pour la promotion du développement.....	32
4.5 Critères de durabilité	38
4.6 Modèles commerciaux	39
5 Stratégie de l'OFAC pour la promotion des CAD	43
5.1 Objectifs	43
5.2 Mesures.....	44
Annexe A. Systèmes de production de réservoirs d'énergie alternatifs	48
A.1. Besoins en énergie et en ressources.....	48
A.2. Impact climatique	48
A.3. Besoins de développement.....	49
Annexe B. Instruments de promotion suisses actuels pour le développement des CAD .	53
Annexe C. Instruments de promotion d'un marché des CAD	55
C.1. Exigences posées aux instruments.....	55
C.2. Impôts et redevances sur les billets et les émissions de CO ₂	55
C.3. Échange de quotas d'émission et compensation.....	57
C.4. Rétribution de l'injection	57
Annexe D. Position du Conseil fédéral concernant les NET	59
Liste bibliographique	60
Glossaire	63
Table des abréviations	65

Résumé

L'utilisation de carburants d'aviation durables est l'une des approches les plus prometteuses en vue de réduire sensiblement l'impact climatique du trafic aérien. Le présent rapport officiel porte sur la promotion du développement et de l'utilisation de carburants d'aviation durables en Suisse. Il se réfère au plan d'action 2021-2023 relatif à la Stratégie pour le développement durable 2030, qui charge l'OFAC d'élaborer un tel rapport (mesure 5). Il doit aussi servir de base technique aux discussions concernant l'utilisation de carburants durables dans le cadre de la révision de la loi sur le CO₂. Il présente le contexte des effets du trafic aérien sur le climat, analyse des options d'action et met en perspective l'importance des carburants d'aviation durables pour atteindre les objectifs climatiques de l'aviation. L'utilisation de carburants d'aviation durables constitue la principale mesure, mais elle n'est pas isolée. Des objectifs concrets sont fixés et des mesures sont présentées pour en épuiser le potentiel.

Quelque 5,7 millions de tonnes de gaz à effet de serre (équivalents CO₂) ont été émis par année en 2018 et 2019 pour l'ensemble des vols au départ de la Suisse. Ces émissions correspondent, selon le principe de la quantité vendue, à environ 11 % des gaz à effet de serre en équivalents CO₂ émis en Suisse toutes sources confondues. Pour empêcher un réchauffement supplémentaire du climat, il est nécessaire que les émissions de CO₂ d'origine fossile soient abaissées à zéro dans l'aviation également. Quant aux effets climatiques des substances qui ne sont pas recensées comme gaz à effet de serre (« émissions non CO₂ »), il faut aussi les prendre en compte dans le cadre des mesures de réduction des effets de l'aviation sur le climat.

La Stratégie climatique à long terme de la Suisse prévoit que « le transport aérien au départ de la Suisse ne produit si possible plus d'émissions nettes ayant un impact sur le climat à partir de 2050 ». Divers acteurs du secteur aéronautique se sont fixés des objectifs semblables. La « Road Map Sustainable Aviation » Suisse offre une vue d'ensemble des approches envisageables. Selon cette feuille de route, tant les innovations apportées aux avions qu'à l'exploitation peuvent jouer un rôle important pour améliorer l'efficacité, mais elles ne réduisent pas suffisamment les émissions. La même remarque vaut pour les mesures basées sur le marché, comme celles déjà appliquées en Suisse du régime de compensation et de réduction du carbone pour l'aviation internationale (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, CORSIA) de l'OACI et du système d'échange de quotas d'émissions.

Les technologies d'émission négative pourraient contribuer à compenser à l'avenir l'utilisation de carburant fossile dans l'aviation. Cependant, selon le rapport du Conseil fédéral (Captage et stockage du CO₂ (CSC) et technologies d'émission négative (NET), mai 2022), ces technologies ne devraient pas s'appliquer en lieu et place des mesures de réduction directe des émissions fossiles, elles devraient les compléter. Dans tous les secteurs, il faut recourir en priorité aux énergies renouvelables, que l'on consommera avec modération, et éviter de consommer des ressources épuisables.

Les avions munis de batteries électriques ou propulsés à l'hydrogène permettront à long terme une certaine réduction des émissions. Mais cette réduction n'interviendra au plus tôt que dans plusieurs décennies, lorsque les avions correspondants auront été construits et certifiés, que des parts importantes de la flotte actuelle aura été remplacée et que l'infrastructure nécessaire sera disponible. Pour l'heure, il faut commencer par lever les défis du stockage à bord de quantités suffisantes d'énergie et trouver des réponses aux questions liées à ces technologies quant à leur impact sur le climat.

Les carburants d'aviation durables (CAD) peuvent en revanche être déjà utilisés avec la flotte d'appareils et l'infrastructure d'avitaillement actuelles. Pour que ces carburants soient qualifiés de durables, leur utilisation doit induire de nettes réductions des émissions de gaz à effet de serre et leur impact global sur l'environnement doit être justifiable pour l'ensemble de leur cycle de vie. Dans le cas de la Suisse, les critères fixés par la loi sur l'imposition des huiles minérales (Limpmin) et par l'art. 35d de la loi sur la protection de l'environnement (LPE) de même que les critères de l'UE et de l'OACI sont pertinents. En raison de leur composition, les CAD contribuent aussi à réduire les effets sur le climat

des émissions non CO₂ et la pollution de l'air aux aéroports. C'est pourquoi les feuilles de route nationales et internationales confèrent aux CAD un rôle tout à fait essentiel s'agissant de réaliser les objectifs de réduction des émissions. **On trouve déjà sur le marché des CAD provenant de sources biogènes.** Ces carburants sont fabriqués soit à partir de déchets biogènes (huile alimentaire usagée, graisses animales), soit à partir de biomasse cultivée à cet effet. Mais le bilan environnemental de ces derniers est souvent critique et leur production peut entrer en concurrence avec celle de produits alimentaires et de fourrages. C'est pourquoi seuls des carburants issus de déchets biogènes entrent en question pour être utilisés en Suisse. Mais leur quantité étant limitée en raison de la disponibilité des matières premières dont ils proviennent, ils ne peuvent couvrir qu'une petite part des besoins en kérosène.

Des systèmes de production de CAD synthétiques à base de CO₂ et d'eau (d'hydrogène) sont actuellement en développement. Pour que de tels carburants soient durables, aucune ressource fossile ne doit entrer dans leur fabrication, ils doivent provenir uniquement de sources d'énergie renouvelables. Soit on recourt à l'électricité (« power to liquid », PtL), soit directement à l'énergie solaire (« sun to liquid », StL) pour produire ces carburants. À ce stade, l'une et l'autre méthodes n'ont été globalement mises en œuvre que dans des installations de démonstration relativement petites, si bien qu'elles sont actuellement encore entachées de points d'interrogation quant à leur degré d'efficacité et à leur coût. La production à plus large échelle doit améliorer ces points de manière décisive. En choisissant adéquatement l'emplacement et l'énergie primaire, ces deux solutions apparaissent très prometteuses à moyen et à long termes en ce qui concerne la durabilité et la rentabilité. Mais la Suisse n'est guère adéquate comme site de production, car les énergies renouvelables (solaire, éolienne et hydraulique) sont disponibles ailleurs en plus grandes quantités à un coût significativement moindre. Globalement, comme le Conseil fédéral l'a déjà noté dans la Stratégie climatique à long terme de la Suisse, les CAD synthétiques recèlent d'ici à 2050 le plus grand potentiel de réduction des effets de l'aviation sur le climat.

Dans ce contexte, le présent rapport formule trois objectifs en lien avec l'utilisation des CAD :

1. Épuiser le potentiel des CAD dans la réduction de l'impact climatique du trafic aérien

2. Soutenir la mise à l'échelle de systèmes de production de CAD durables et efficaces en termes de coûts

3. Assouplir les conditions-cadres de l'utilisation des CAD

Le premier objectif comprend, grâce à l'utilisation des CAD en Suisse, une diminution des émissions de CO₂ d'origine fossile du trafic aérien de 60 % au moins à l'horizon 2050 (par rapport à un cas de figure où aucune mesure ne serait prise). Les émissions restantes doivent être compensées en recourant à d'autres mesures comme l'amélioration de l'efficacité, l'utilisation de modes de propulsion alternatifs et le cas échéant les NET. Autrement dit, à l'horizon 2050, les besoins en carburants d'aviation fossiles devront être couverts par les CAD ou compensés par les NET. Les mesures à ce stade n'ont pas permis d'établir un marché des CAD en Suisse. Pour y parvenir, on prévoit une obligation légale d'intégrer une part de CAD dans les carburants d'aviation. Les fournisseurs de carburants d'aviation en Suisse seraient ainsi tenus de mélanger des CAD au kérosène. Le Conseil fédéral fixe à cet effet les taux concrets et les critères de durabilité applicables aux CAD utilisés pour assurer l'avitaillement. Dans ce contexte, il est essentiel de veiller à un alignement sur les réglementations internationales correspondantes, en particulier celles de l'UE, qui prévoit également d'introduire une obligation de mélanger des CAD aux carburants traditionnels.

Le deuxième objectif concerne le développement de systèmes de production de CAD : ces systèmes doivent permettre de disposer rapidement de grandes quantités de carburants d'aviation durables à un coût avantageux. Les scientifiques et les industriels sont unanimes : outre la demande de CAD, il faut aussi promouvoir leur développement pour que la production puisse passer à l'échelle

supérieure. Certains acteurs suisses, qui sont justement leaders mondiaux dans le développement de carburants synthétiques, sont en mesure de fournir une contribution essentielle à cet effet. Une promotion déterminée à court terme est nécessaire pour exploiter cette chance. À moyen terme, l'accent portera sur l'encouragement d'installations pilotes et de démonstration auquel la Suisse participera. Une lacune sera ainsi comblée dans les instruments de promotion existants. Y renoncer signifierait que la réalisation des objectifs climatiques dépendrait essentiellement de l'étranger. En outre, ce serait menacer l'accès à un marché en forte croissance.

Le troisième objectif concerne la réduction des obstacles à l'utilisation des CAD en Suisse. Il faut rapidement réduire les entraves techniques au commerce survenant à l'importation de CAD en Suisse et lors de l'établissement des preuves de la durabilité. L'Office fédéral de l'aviation civile (OFAC) continue de s'engager aux côtés des offices partenaires pour que les acteurs suisses soient parfaitement interconnectés. De même, l'OFAC intervient au niveau international en faveur d'une utilisation ambitieuse des CAD à l'échelle mondiale.

1 Contexte initial

1.1 Stratégie climatique à long terme de la Suisse

La Suisse a ratifié en 2017 l'Accord de Paris, s'obligeant ainsi à réduire les émissions de gaz à effet de serre de moitié par rapport à 1990 d'ici à 2030. Le trafic aérien international est toutefois exclu de cet engagement. En 2019, le Conseil fédéral a décidé d'atteindre un objectif plus ambitieux : **la Suisse doit atteindre zéro émission nette de gaz à effet de serre au plus tard à partir de 2050**. En 2021, le Conseil fédéral a défini les lignes directrices de la politique climatique suisse en adoptant la Stratégie climatique à long terme de la Suisse. Cette stratégie fixe des objectifs stratégiques pour les différents secteurs¹. L'aviation internationale y est comprise. Pour autant qu'il soit possible de la concilier scientifiquement et techniquement avec les données de l'inventaire des gaz à effet de serre, la prise en compte des émissions du trafic aérien dans l'objectif de zéro émission nette fait partie de la stratégie climatique (cf. encadré ci-après).

Objectif 2050

Le transport aérien international au départ de la Suisse ne produit si possible plus d'émissions nettes ayant un impact sur le climat à partir de 2050. Cet objectif se concrétise ainsi :

- les émissions de CO₂ d'origine fossile atteignent le niveau de zéro net ;
- les autres effets sur le climat diminuent ou sont compensés par d'autres mesures.

1.2 Stratégie pour le développement durable 2030

L'élaboration de mesures pour l'aviation est ancrée dans la Stratégie pour le développement durable 2030 (SDD 2030) de l'Office fédéral du développement territorial. La SDD 2030 représente la mise en œuvre de l'Agenda 2030 des Nations Unies par la Suisse. Elle montre comment atteindre les 17 objectifs globaux de développement durable. L'un des trois thèmes préférentiels, « Climat, énergie et biodiversité », comprend la réduction des émissions de gaz à effet de serre, une utilisation plus efficace de l'énergie, le développement des énergies durables ainsi que la conservation, l'utilisation durable, le soutien et la restauration de la diversité biologique.

Durant chaque législature, le Conseil fédéral adopte un plan d'action qui, faisant partie de la SDD 2030, contient de nouvelles mesures choisies pour la mettre en œuvre. L'actuel plan d'action 2021-2023 a été adopté en juin 2021 avec la SDD 2030. Parmi les 22 mesures de ce plan, on trouve notamment **le développement, la promotion et l'utilisation des carburants d'aviation durables**, la première étape consistant à élaborer la présente stratégie à cet effet :

¹ Conseil fédéral (2021). Il est en outre possible que, dans le cadre de l'initiative pour les glaciers ou de son contre-projet, un objectif de réduction soit intégré dans la Constitution fédérale. La votation populaire sur cet objet n'interviendra pas avant la fin de 2022.

Mesure 5 Stratégie de développement, de promotion et d'utilisation des carburants durables pour l'aviation

Les carburants de synthèse pour l'aviation produits à partir de sources d'énergie renouvelables représentent l'une des approches les plus prometteuses pour réduire considérablement l'impact climatique de l'aviation. Par conséquent, l'OFAC élabore une stratégie pour encourager leur développement, leur production et leur utilisation. Comme la technologie pour produire des carburants durables pour l'aviation en grande ou très grande quantité n'existe pas encore, une promotion ciblée de la recherche dans ce domaine est nécessaire pour rendre possible la fabrication avec un faible impact climatique, une faible consommation de ressources et de faibles coûts de production. Par ailleurs, on peut créer des incitations pour l'utilisation de ces carburants qui faussent le moins possible le marché des carburants durables.

Dans le cadre de la mise en œuvre de la mesure 5, ce rapport présente pour commencer les mesures climatiques nécessaires dans le domaine de l'aviation, puis il offre un aperçu des mesures technologiques disponibles. On montre ainsi quel rôle les carburants d'aviation durables jouent dans la réalisation des objectifs climatiques de la Suisse. Puis, on examine en détail les technologies impliquées et on présente les instruments envisageables pour promouvoir les carburants renouvelables. Le résultat consiste en une vue d'ensemble des modalités de mise en œuvre possibles des instruments les plus adéquats (dans le cadre de la révision partielle de la loi sur le CO₂). Dans ce contexte, l'attention se concentre sur l'aviation commerciale civile, la principale émettrice de gaz à effet de serre dans la branche aéronautique. Mais un coup de projecteur est aussi donné sur la situation de l'aviation générale et militaire.

Dans ce cadre, l'examen des carburants d'aviation durables couvre le cadre temporel du plan d'action et de la Stratégie pour le développement durable 2030 pour s'étendre jusqu'à l'horizon à long terme de la Stratégie climatique à long terme de la Suisse (2050). Cette période d'observation est indiquée, car la mise à l'échelle supérieure de la production de carburants d'aviation durables prendra des décennies, ce qui implique d'analyser les technologies pour ce laps de temps. Pour qu'une transition continue vers les carburants durables soit réalisée jusqu'en 2050, la mise à l'échelle doit déjà être en route en 2030, ce qui suppose nécessairement que les bases légales correspondantes soient mises en vigueur d'ici à 2025. L'élaboration des bases légales nécessaires survient donc durant la période couverte par le Plan d'action 2021-2023. Compte tenu de la dynamique des développements technologiques et politiques, une mise à jour du présent rapport sera nécessaire au plus tard en 2030.

1.3 Influence du trafic aérien sur le climat

L'ensemble des vols au départ d'aéroports suisses ont généré **quelque 5,7 tonnes de gaz à effet de serre** (équivalents CO₂) par an au cours des deux années qui ont précédé la pandémie de coronavirus, la quasi-totalité de ces émissions survenant hors du territoire de la Suisse.² Ces émissions représentaient environ 11 % de toutes les émissions de gaz à effet de serre en équivalents CO₂ générées par l'ensemble des sources d'émissions en Suisse.

S'agissant des émissions produites par les aéronefs, **le CO₂ est le gaz à effet de serre le plus important**. La plupart des émissions de CO₂ d'origine fossile émises actuellement et au cours des décennies à venir exerceront encore un effet de réchauffement dans plus de 100 ans car le CO₂ subsiste très longtemps dans l'atmosphère. Des émissions annuelles constantes de CO₂ d'origine fossile entraîneraient donc encore une augmentation de la concentration de CO₂ et renforceraient le réchauffement. Pour que l'aviation cesse à l'avenir de contribuer au réchauffement climatique, ses émissions de CO₂ d'origine fossile doivent être effectivement ramenées à zéro comme pour toutes les autres sources. Y

² État en 2018 et en 2019, vols nationaux et internationaux (sans Bâle-Mulhouse, qui se trouve sur sol français) : <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/etat/donnees/inventaire-gaz-effet-serre/transport-aerien.html>

contribuer est l'exigence essentielle posée aux mesures prises dans ce domaine. Cependant, les effets climatiques du trafic aérien ne s'expliquent pas seulement par lesdits gaz à effet de serre, ils sont aussi dus aux **émissions autres que de CO₂**. Sous l'angle de leurs effets sur le climat, les principales émissions du trafic aérien qui ne sont pas liées au CO₂ sont les émissions de poussières fines, d'oxyde d'azote et d'eau (la vapeur d'eau jouant directement un rôle secondaire). L'effet décisif des émissions de vapeur d'eau combinées aux poussières fines est de favoriser la formation de traînées de condensation et de cirrus supplémentaires. La nuit, cette nébulosité a un effet de réchauffement alors que de jour, elle est rafraîchissante. Globalement, les émissions du trafic aérien non liées au CO₂ ont augmenté ces 20 dernières années. Selon des estimations actuelles, les effets quotidiens sur le climat de ces émissions, si elles continuent d'augmenter, peuvent représenter un multiple de ceux du CO₂. La différence essentielle est la suivante : il n'est pas nécessaire de réduire à zéro les émissions autres que de CO₂ pour arrêter les effets sur le réchauffement, leur stabilisation entraînerait déjà un progrès sensible, car leurs effets, contrairement à ceux du CO₂, ne se cumulent pas au fil du temps³. Comme les émissions de CO₂ et les émissions autres que de CO₂ ainsi que leurs effets ne sont pas proportionnels de ce fait, il faut les observer séparément lors du contrôle des mesures et dans le cadre du monitoring de l'évolution des émissions annuelles. Contrairement aux émissions de CO₂, les émissions autres que de CO₂ ne sont en outre pas simplement proportionnelles à la consommation de carburant et à la teneur en carbone de celui-ci, elles sont très disparates selon le type de moteur. Cette situation ouvre des possibilités pour les mesures de réduction des émissions autres que de CO₂ (cf. point 2.1).

En ce qui concerne l'évolution des émissions à ce stade, on peut noter que la demande de transports aériens (passagers et fret) s'est accrue plus rapidement que les émissions de CO₂ n'ont été réduites grâce aux améliorations techniques et autres optimisations. Il en a résulté globalement une augmentation des émissions du secteur aérien. La pandémie de coronavirus a provoqué en 2020-2021 une baisse temporaire de la demande. Une reprise de la demande et des émissions est attendue dès 2022/23.⁴ Mais dans ce contexte, les prévisions de croissance ont néanmoins été adaptées de 4,2 % par an à une moyenne comprise entre 1,2 et 3,6 % de 2018 à 2028 pour le trafic aérien global.⁵ Entre 2018 et 2050, on attend en moyenne 2,9 à 4,2 %⁵, les prévisions restant toutefois entachées d'une certaine incertitude.

1.4 Ambitions du secteur aérien

Le rôle que le trafic aérien peut et doit jouer dans la réalisation des objectifs climatiques est devenu toujours plus clair ces dernières années. Il demeure que l'aviation est considéré comme un secteur où **une réduction des effets sur le climat pose des défis particuliers** parce que les technologies nécessaires à cet effet sont encore en développement. Pourtant, entre 2020 et 2022, toute une série d'organisations ont affiché des objectifs et des feuilles de route ambitieux (cf. ci-après) où elles montrent comment les transports aériens peuvent apporter leur contribution à la réduction des émissions. Le chapitre 2 traite les mesures qui y sont comprises.

L'**Organisation de l'aviation civile internationale (OACI)** a adopté en octobre 2022 un **objectif de zéro émission nette de CO₂ d'ici 2050 pour l'aviation civile internationale**. Un rapport sur la faisabilité de cet objectif a analysé les mesures disponibles et présente leur impact sous forme de scénarios. Les carburants d'aviation durables y jouent un rôle essentiel. Mais globalement, le rapport souligne qu'il faudra en sus des mesures extérieures au secteur aéronautique, comme celles liées aux NET pour atteindre cet objectif. L'OACI s'était déjà donné il y a quelques années pour but d'améliorer l'efficacité de 2 % par an jusqu'en 2050⁶ et de répondre dès 2020 à la demande croissante dans le secteur de l'aviation sans incidence en termes de CO₂. Diverses mesures sont à disposition à cet effet, par exemple :

³ Neu (2021)

⁴ <https://www.icao.int/sustainability/Pages/Economic-Impacts-of-COVID-19.aspx>

⁵ <https://www.icao.int/sustainability/Pages/Post-Covid-Forecasts-Scenarios.aspx>

⁶ Long Term Aspirational Goal (LTAG), cf. OACI / CAEP (2022).

- des technologies inédites et de nouvelles normes : en particulier, on élabore une norme plus sévère en matière de CO₂ pour les nouveaux types d'aéronef et des valeurs limites plus contraignantes concernant les poussières fines et le dioxyde d'azote ;
- la gestion du trafic aérien et l'exploitation, une attention particulière étant accordée à l'interopérabilité et aux instruments à cet effet ;
- Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, CORSIA (cf. point 2.4) ;
- l'utilisation de carburants durables que l'OACI soutient par diverses initiatives.

Par ailleurs, le groupe **ATAG (Air Transport Action Group)** a montré dans son rapport **Waypoint 2050**⁷ que les émissions de CO₂ générées par l'aviation en 2005 peuvent être globalement divisées par deux d'ici à 2050. Il est ainsi possible au secteur des transports aériens d'atteindre le zéro émission nette de CO₂ à l'horizon 2065, voire avant 2060 selon le pays. Le choix de diverses mesures prioritaires est présenté : concentration sur l'amélioration de l'efficacité dans l'exploitation et les infrastructures, sur les carburants d'aviation durables, sur les technologies innovantes (batteries et hydrogène seulement pour les déplacements assez courts) ou compensation hors du secteur.

Sur le plan européen, les associations représentant les compagnies aériennes (A4E, ERA), les aéroports (ACI EUROPE), les constructeurs d'avions (ASD Europe) et la sécurité aérienne (CANSO) ont présenté sous le titre de **Destination 2050**⁸ une vision permettant d'atteindre le zéro émission nette de CO₂ pour l'aviation européenne à partir de 2050. Les mesures consistent surtout en technologies qui améliorent l'efficacité et en carburants d'aviation durables ainsi que, à un moindre degré, en mesures économiques et d'amélioration de l'efficacité d'exploitation.

Diverses autres organisations ont en outre adopté les objectifs de zéro émission nette de CO₂ : le **Conseil international des aéroports d'Europe (ACI EUROPE)**, l'association des aéroports européens, a prévu pour tous les aéroports soumis à son contrôle un objectif de zéro émission nette de CO₂ et proposé des mesures correspondantes. Au niveau international, l'**Association du transport aérien international (AITA)**, soit l'association faitière des compagnies aériennes, a décidé en octobre 2021 d'atteindre dès 2050 l'objectif de zéro émission nette de CO₂ pour l'ensemble de l'industrie aéronautique⁹.

Une analyse se rapportant à la Suisse a été élaborée au moyen de la **Road Map Sustainable Aviation (RMSA)**¹⁰. Dans cette étude commandée par l'OFAC, l'OFEV et l'Aviation Research Center Switzerland (ARCS), divers experts issus de l'industrie et du monde de la science présentent des mesures visant à une aviation durable et quantifient ses possibles effets. Globalement, la branche aéronautique suisse peut ainsi atteindre l'objectif de zéro émission nette de CO₂ d'ici à 2050. À titre d'accompagnement, Swiss, easyJet Switzerland, Aerosuisse et Swiss Business Aviation Association (SBAA) ont publié une déclaration d'intention¹¹ par laquelle ces acteurs souscrivent aux objectifs de la Stratégie climatique à long terme de la Suisse et, partant, à l'objectif de zéro émission nette de CO₂ à l'horizon 2050 (cf. point 1.1). Dans ce cadre, un potentiel de réduction des émissions de 30 % d'ici à 2050 est associé aux mesures visant à améliorer l'efficacité, le potentiel de réduction attribué aux carburants d'appoint durable dépassant même 50 %.

⁷ Air Transport Action Group (2020)

⁸ Royal Netherlands Aerospace Centre (2021)

⁹ <https://www.iata.org/en/pressroom/2021-releases/2021-10-04-03/>

¹⁰ Ecoplan (2021)

¹¹ <https://www.arcs.aero/sites/default/files/downloads/Absichtserklärung%20Sustainable%20Aviation.pdf>

2 Mesures visant à réduire les effets climatiques du trafic aérien

Diverses approches permettent de réduire l'impact de l'aviation sur le climat. Pour atteindre les objectifs climatiques ambitieux de la Suisse, on dispose dans ce domaine de plusieurs mesures techniques. Les sections suivantes fournissent un aperçu des approches disponibles et de leur potentiel de réduction des émissions.

2.1 Mesures visant à améliorer l'efficacité

Ces dernières décennies, l'aviation a amélioré son efficacité énergétique de manière déterminante, de sorte que les émissions de CO₂ par tonne de charge utile transportée et par passager-kilomètre ont nettement diminué¹⁰. Ces améliorations de l'efficacité déjà réalisées ont été notamment possibles grâce aux **progrès techniques dans les aéronefs, en particulier concernant leurs moteurs**. De ce fait, la dernière génération de moteurs est d'ores et déjà proche de l'efficacité de combustion maximale physiquement réalisable. Mais on peut encore progresser dans la conversion en poussée et dans la réduction des émissions autres que de CO₂, raison pour laquelle des conditions-cadres et mesures correspondantes sont nécessaires. Une première mesure a été de développer et d'introduire globalement une certification des moteurs d'avion concernant les poussières fines (l'OFAC y a pris une part déterminante). Cette certification pousse à poursuivre le développement technique dans le domaine de la combustion en vue de réduire les quantités de suie ultrafine, qui joue un rôle important dans la formation de nuages. En plus des émissions de poussières fines, il faut aussi réduire les émissions des autres polluants qui affectent le climat, par exemple les oxydes d'azote. Outre l'amélioration des moteurs, on élabore divers concepts pour parfaire les qualités aérodynamiques des aéronefs, une mesure qui pourrait permettre à elle seule d'économiser 20 % de carburant supplémentaires et qui contribuerait à une réduction correspondante des émissions de CO₂. Les scientifiques spécialisés dans l'impact climatique du trafic aérien signalent que la réduction des émissions autres que de CO₂ ne devrait pas entraîner une augmentation de CO₂ fossile.

L'**exploitation des aéronefs** détermine la consommation de carburant par passager-kilomètre ou par tonne-kilomètre. Des paramètres de vol comme l'altitude, la vitesse et le choix de l'itinéraire en font partie. Le dernier paramètre cité est largement restreint en Europe en raison de la forte fragmentation de l'espace aérien. L'initiative « Single European Sky »¹² œuvre depuis longtemps dans ce domaine à apporter des améliorations qu'entraînent toutefois à ce stade les intérêts nationaux. Divers concepts tentent de réaliser des améliorations malgré les contraintes, par exemple en prévoyant des vols d'approche plus directs ou en optimisant les altitudes de vol pour réduire les traînées de condensation persistantes qui ont durant la nuit une forte incidence climatique. Les **infrastructures au sol**, à commencer par les aéroports, revêtent aussi de l'importance : pour réduire les émissions, on peut par exemple convertir l'approvisionnement en énergie aux sources renouvelables, tant pour les bâtiments que pour les véhicules. Globalement toutefois, de telles mesures ne peuvent empêcher qu'une faible part des émissions de gaz à effet de serre générées par l'aviation : selon la feuille de route RMSA, les mesures concernant l'exploitation et les infrastructures au sol ne peuvent réduire que de 5-10 % les émissions de la branche aéronautique.

2.2 Des carburants d'appoint durables

On dispose déjà de plusieurs alternatives équivalentes aux carburants d'aviation fossiles qui engendrent sensiblement moins d'émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble de leur cycle de vie et qui satisfont certains critères de durabilité. Il est déterminant que ces carburants renouvelables puissent être

¹² https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/single-european-sky_fr

utilisés sans modification de l'aéronef et qu'ils puissent se mélanger aux carburants fossiles. C'est pourquoi on les désigne aussi de « carburants d'appoint » (« drop-in fuels »). La législation suisse qualifie ces carburants de **carburants d'aviation renouvelables**, une désignation abrégée pour **carburants issus de sources renouvelables**. Le présent rapport utilise la notion établie de CAD pour « carburant d'aviation durable » (en anglais : « Sustainable Aviation Fuels » ou SAF). Plusieurs options se présentent quant à leur production. Ce rapport les classe en deux catégories selon la source d'énergie.

Les carburants biogènes durables sont produits à partir de la biomasse, qu'ils utilisent comme source primaire de carbone, d'hydrogène et d'énergie. De ce fait, la combustion de ces carburants n'émet pas directement de CO₂ fossile. Mais tous les types de biomasse ne se prêtent pas comme matière première. Il faut encore, par le choix des matières premières et la conception du système de production, limiter les émissions de gaz à effet de serre (GES) et autres impacts sur l'environnement. Le chapitre 0 analyse de manière plus détaillée ce que cette situation implique.

Les carburants synthétiques durables, par contre, utilisent surtout des sources d'énergie non biogènes et 100 % renouvelables. Si de l'électricité renouvelable est utilisée pour produire un carburant liquide (par électrolyse de l'eau), l'ensemble du processus est appelé **Power-to-Liquid (PtL)**. Une autre méthode de production, qui consiste à utiliser directement l'énergie solaire (**Sun-to-Liquid, StL**), est en cours de développement. Le chapitre 3 présente les technologies ainsi que les sources de carbone et d'hydrogène utilisées. Les carburants synthétiques ne sont pas durables dans tous les cas. On recourt déjà à des systèmes de production basés sur le charbon ou sur le gaz naturel. Mais de tels systèmes ne sauraient être qualifiés de durables, puisqu'ils libèrent d'importantes quantités de CO₂ fossile. Ils ne sont donc pas davantage traités dans le présent rapport.

La feuille de route RMSA désigne les carburants d'appoint durables comme étant **la principale mesure de réduction des effets du trafic aérien sur le climat**. Divers obstacles doivent encore être franchis avant que l'utilisation de ces carburants ne puisse réduire sensiblement les émissions dans l'ensemble du secteur. Selon la technologie concernée, les difficultés à surmonter comprennent la disponibilité insuffisante des matières premières, d'importants besoins en énergie, des coûts importants ou un état de développement embryonnaire et, par conséquent, des risques technologiques élevés. Ces thèmes sont discutés au chapitre 3 et approfondis à l'Annexe A. Les chapitres 4 et 5 présentent les mesures actuelles et celles qui sont prévues à l'avenir pour surmonter les obstacles.

2.3 Solutions de stockage alternatives

On étudie depuis des dizaines d'années des solutions de stockage d'énergie alternatives capables de fournir la totalité de l'énergie nécessaire à l'aviation sans émission directe de CO₂. Par exemple, les **aéronefs électriques à batterie** utilisent des batteries comme réservoir d'énergie et sont propulsés par des moteurs électriques. Une homologation existe déjà pour un petit appareil répondant à cette approche. Le nombre record d'aéronefs électriques actuellement en développement conduira à une augmentation continue des homologations d'aéronefs. Cependant, à moins de ruptures technologiques inattendues dans le développement des batteries (en particulier en ce qui concerne le poids et la sécurité), la propulsion électrique directe restera réservée, à long terme également, aux appareils de moindre taille et à des distances limitées. Même si la portée atteinte est élevée, la charge utile sera réduite, puisque le poids de la réserve d'énergie sera plus important que son équivalent de kérosène. De ce fait, les besoins en énergie par passager ou en fonction de la charge utile seront plus importants, ce qui réduira le potentiel de réduction des effets sur le climat.

L'**hydrogène** représente une autre solution de stockage d'énergie embarquée sous forme liquide dans un réservoir (réfrigération à -253°C). Il peut assurer la propulsion soit en actionnant directement des turbines à gaz, soit en produisant de l'électricité au moyen de piles à combustible pour alimenter des moteurs électriques (systèmes de propulsion électriques hybrides). Actuellement, on expérimente la technologie de l'hydrogène sur de petits aéronefs en recourant à des réservoirs sous pression. Des appareils de plus grande taille, dotés de réservoirs à hydrogène liquide, sont en développement (la sécurité, le poids et le volume des réservoirs d'énergie constituant autant de défis techniques). On peut tout à fait envisager la

propulsion à l'hydrogène d'avions destinés au transport des passagers sur des distances courtes ou moyennes, mais pour les long-courriers, cette technologie ne constitue probablement pas une alternative en raison notamment du volume de stockage requis¹³.

Pour pouvoir estimer la réduction obtenue des effets sur le climat, il faut clarifier l'impact à court terme de la valeur d'eau émise à hauteur de vol. Des émissions importantes d'oxyde d'azote doivent être évitées. La principale condition d'une réduction de l'impact climatique est d'éviter que l'hydrogène ne soit produit à partir de sources d'énergie fossiles : dans ce contexte, l'électrolyse de l'eau au moyen d'électricité renouvelable constitue la première option¹⁴.

En résumé, la situation se présente comme suit en ce qui concerne les solutions alternatives de stockage d'énergie : d'ici à ce que le potentiel des batteries et de l'hydrogène puisse être réalisé pour réduire les émissions, il faut poursuivre le développement de ces accumulateurs d'énergie, les appliquer dans des prototypes et remplacer ensuite la flotte d'aéronefs actuelle. À cet effet, une vaste infrastructure est nécessaire : de la fourniture de l'énergie primaire renouvelable nécessaire à l'approvisionnement de tous les aéroports desservis par de tels aéronefs en passant par le transport et le stockage intermédiaire. En conséquence, les possibilités de couvrir les besoins de transport par les technologies visées ne progresseront que lentement au cours des décennies à venir. On prévoit que le segment des transports de courte portée ne sera assuré de cette manière qu'à partir de 2040, le segment des transports de moyenne portée étant couvert au plus tôt en 2050¹⁵. En d'autres termes, ces technologies ne permettront pas avant 2040 (respectivement 2050) de couvrir les vols qui revendiquent 97 % (respectivement 73 %) des émissions de CO₂¹⁶. L'encouragement des projets suisses visant des solutions de stockage d'énergie alternatives dans l'aviation devrait tenir compte de cette circonstance. À long terme par contre, certaines études prévoient de plus faibles coûts par unité de réduction des effets sur le climat pour les aéronefs propulsés à l'hydrogène qu'avec les carburants d'appoint durables¹⁷. Les possibilités d'éviter des émissions au cours du cycle de vie d'aéronefs à batteries électriques ne sont pas encore quantifiables aujourd'hui, car elles dépendent du futur développement technologique, en particulier de la fabrication de la batterie.

2.4 Mesures basées sur le marché

Diverses approches pour réduire l'impact climatique de l'avion consistent à tarifier les émissions de CO₂, à augmenter indirectement leur coût ou à les compenser en dehors du secteur. Par exemple, le programme **CORSIA** de l'OACI (**Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation**¹⁸) prévoit de rendre obligatoire l'achat de certificats de compensation pour les émissions de CO₂ fossiles générées par l'aviation internationale qui excèdent leur niveau de 2019/2020. Le nombre de certificats que doit acheter une compagnie aérienne peut être abaissé par l'utilisation de CAD. La réduction de la compensation obligatoire est fonction de la réduction des émissions définie dans la norme OACI correspondante, qui prend en compte les émissions produites lors de la fabrication du carburant utilisé. En outre, des critères de durabilité doivent être respectés. La participation à CORSIA est obligatoire dès 2027 pour l'ensemble des 193 États membres de l'OACI, le programme courant selon la planification

¹³ Si les réservoirs de kérosène peuvent largement occuper l'espace disponible dans les ailes, tel n'est pas le cas des réservoirs d'hydrogène qui doivent être isolés parce qu'ils sont sous pression.

¹⁴ Comme alternatives, on peut envisager les sources biogènes (encore qu'elles soient soumises aux mêmes restrictions que les carburants biogènes liquides, cf. chap. **Error! Reference source not found.**), l'« hydrogène bleu » (énergie fossile combinée avec des technologies d'émission négative (NET), les restrictions discutées au ch. 2.5 s'appliquant également), ou l'hydrogène directement produit au moyen de l'énergie solaire à partir d'eau (ce qui n'a été démontré qu'en laboratoire à ce stade).

¹⁵ Il est possible qu'une solution adéquate soit disponible plus tôt pour l'aviation générale.

¹⁶ Air Transport Action Group (2020)

¹⁷ S'agissant de l'hydrogène sur des trajets courts, la vision « Destination 2050 » table sur des coûts de 225 € par tonne d'émission de CO₂ évitée, à comparer avec 289 € pour l'HEFA et 400-800 € pour le PtL. Source : Royal Netherlands Aerospace Centre (2021)

¹⁸ OACI (2018)

actuelle jusqu'en 2035. À ce stade, 118 États, dont la Suisse, ont confirmé qu'ils y participeraient sur une base volontaire d'ici 2027.

En Suisse, le système d'échange de quotas d'émission (SEQE)¹⁹ est également en vigueur. Il est lié au **système européen d'échange de quotas d'émission (SEQE-UE)** et requiert la cession de droits d'émission pour les émissions de CO₂ générées lors des vols intérieurs en Suisse et ceux de la Suisse vers l'Espace économique européen²⁰.

Les vols de l'EEE à destination de la Suisse et les vols à l'intérieur de l'EEE sont couverts par le SEQE-UE. L'utilisation de CAD est aussi prise en compte dans ce cadre, les émissions de CAD recevant la valeur de zéro, à titre d'incitation supplémentaire, quelles que soient les émissions que génère leur production. Le ch. 4.1 fournit des indications plus précises à ce sujet.

Les taxes incitatives sur les billets d'avion, telles que celle prévue dans le cadre de la loi sur le CO₂ qui a été rejetée, constituent une mesure supplémentaire basée sur le marché. Les conséquences d'une telle mesure sont discutées de manière plus détaillée à l'Annexe C.1.

2.5 Technologies d'émission négative

Une alternative directe à la compensation consiste à prélever dans l'atmosphère autant de CO₂ que n'en produit l'aviation, par exemple, et à le séquestrer pour le long terme. Les procédés correspondants, désignés par le terme de « **technologies d'émission négative** » (« **negative emission technologies** », **NET**), permettent à l'aviation d'atteindre efficacement zéro émission nette de CO₂.

Les NET prévoient d'éliminer du CO₂ de l'atmosphère à long terme. En conséquence, elles consistent en deux étapes : **le captage de CO₂, puis le stockage de ce CO₂**. Trois possibilités se présentent pour capter du CO₂ : a) utiliser des plantes pour réaliser ce processus naturellement par la photosynthèse ; b) exfiltrer du CO₂ de l'air environnant au moyen d'installations appropriées ou c) prélever du CO₂ de sources biogènes (cf. ch. 3.2). Diverses approches sont aussi envisageables pour stocker du CO₂ à long terme, par exemple : a) on peut introduire du CO₂ dans des formations géologiques comme les gisements de pétrole et de gaz naturel inactifs ; b) on peut aussi séquestrer le CO₂ au fil du temps de manière permanente dans de la roche, comme le montrent de premiers essais dans des formations rocheuses ; c) en recourant aux plantes, on peut aussi veiller directement à ce que le CO₂ séquestré ne retourne pas dans l'atmosphère, par exemple en produisant et stockant du charbon de bois à long terme.

L'objectif zéro émission nette de CO₂ à l'horizon 2050 implique de prendre également en considération les émissions autres que le CO₂, ce qui est par exemple possible en captant et en stockant davantage de CO₂. La Stratégie climatique à long terme de la Suisse indique que l'emploi des NET vient en complément à la réduction des émissions et n'est envisageable que pour les émissions difficilement évitables. Et de conclure qu'elles ne sont pas un substitut aux autres mesures de réduction²¹. Une étude de l'EPF de Zurich indique que les besoins énergétiques et les coûts des NET sont plus faibles que ceux des CAD synthétiques²². Leur faisabilité n'a pas encore pu être démontrée à grande échelle. Dans un rapport paru en 2002 sur le recours aux NET pour atteindre les objectifs climatiques à long terme, le Conseil fédéral relève que²³ «... le CSC et les NET sont aussi des éléments essentiels pour atteindre l'objectif de zéro émission nette de gaz à effet de serre d'ici 2050 fixé par la Suisse ; ils sont nécessaires pour rendre les

¹⁹ Cf. ordonnance du 30 novembre 2012 sur la réduction des émissions de CO₂, qui régit la disponibilité des droits d'émission.

²⁰ Le SEQE-UE comprendra aussi dès 2024, sans modification, les vols à destination et au départ de l'EEE.

²¹ Conseil fédéral (2021), Conseil fédéral (2022)

²² Becattini / Gabrielli / Mazzotti (2021)

²³ Conseil fédéral (2022)

émissions, qui seront alors difficilement évitables, inoffensives pour le climat. Les approches sont largement connues, mais pas encore suffisamment utilisées à une échelle significative pour le climat ».

2.6 Conclusion

Les études nationales et internationales existantes concordent largement en ce qui concerne l'analyse des mesures identifiées. Une orchestration des mesures disponibles est nécessaire pour assurer la réalisation des objectifs climatiques dans le secteur aéronautique dans son ensemble. En tout cas, les **carburants d'appoint durables** joueront un rôle crucial.

3 Carburants d'aviation durables

Alors que la combustion des carburants d'aviation fossiles libère du CO₂ prisonnier du sous-sol depuis des millions d'années, les carburants d'aviation durables visent un **cycle du carbone court**. En d'autres termes, la quantité de CO₂ captée dans l'atmosphère devrait égaler celle que libère la combustion. Cependant, les carburants d'aviation durables ne sont pas complètement neutres en termes de CO₂, car tout système de production comporte certaines émissions résiduelles.

Dans un tel contexte, les carburants d'aviation durables sont des carburants produits à partir de matières premières et d'énergie de sources renouvelables, qui remplissent certains critères de durabilité et qui sont semblables au kérosène. Les exigences qualitatives actuellement posées au kérosène (typiquement Jet-A1) doivent donc être remplies et les carburants doivent être utilisables sans perdre en sécurité. Diverses méthodes de fabrication sont aujourd'hui certifiées à cet effet, de sorte que ces carburants peuvent d'ores et déjà être incorporés à du kérosène fossile. Les CAD présentent toutefois de légères différences de composition. C'est ainsi qu'une classe de molécule (les aromates) est sensiblement moins présente, voire absente, dans les carburants d'aviation durables. Si le taux de carburant ajouté est trop élevé, la faible teneur en aromates peut causer des problèmes techniques de matériel sur les avions actuellement en exploitation. C'est pourquoi, à ce stade, seuls sont admis **les ajouts de carburants d'aviation durables de 50 % au plus** (en fonction de la teneur en aromates de la part de carburant fossile)²⁴. De légères adaptations du matériel (dans le système de carburation) sont nécessaires pour passer à une part renouvelable de 100 %. Des aéronefs d'essai ont déjà réussi des vols avec 100 % de carburant renouvelable²⁵. Les constructeurs de moteurs et d'aéronefs annoncent de plus en plus cette évolution pour les modèles d'appareils qui seront produits à partir de 2025²⁶.

Vu la plus faible teneur en aromates et l'absence de soufre, les quantités de poussières fines émises lors de la combustion des CAD sont moindres, ce qui réduit la formation de nuages et les émissions de poussières fines aux aéroports²⁷. C'est pourquoi les carburants d'aviation durables **peuvent aussi réduire les effets non liés au CO₂**, ce qui renforce leur importance comme instruments de réduction des effets de l'aviation sur le climat. En outre, la qualité locale de l'air s'en trouve améliorée, un avantage particulièrement appréciable à proximité des aéroports.

Les sections suivantes fournissent un aperçu des technologies concernées pour les CAD biogènes et synthétiques (différence expliquée au ch. 2.2), une analyse comparée des potentiels et une estimation du rôle que la Suisse est susceptible de jouer à ce sujet.

3.1 Carburants biogènes

Les carburants produits à partir de la biomasse présentent un cycle du carbone fermé. Tout le CO₂ libéré par la combustion de ces carburants a été préalablement prélevé dans l'atmosphère par les plantes en croissance. La culture (y compris la préparation des surfaces cultivées) et le processus de raffinage libèrent toutefois des gaz à effet de serre supplémentaires. De ce fait, **le cycle de vie n'est pas complètement neutre en termes de CO₂**. Ces émissions peuvent être considérables, surtout dans le cas de la biomasse destinée exclusivement à la production de carburants. D'autres effets négatifs sur l'environnement s'y ajoutent, comme l'enrichissement en nutriments par le recours aux engrais²⁸.

²⁴ https://www.caafi.org/focus_areas/fuel_qualification.html

²⁵ <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2021-10-this-a319neo-is-the-latest-to-test-100-saf>

²⁶ <https://boeing.mediaroom.com/2021-01-22-Boeing-Commits-to-Deliver-Commercial-Airplanes-Ready-to-Fly-on-100-Sustainable-Fuels>

²⁷ Brenn et al. (2015)

²⁸ Jeswani / Chilvers / Azapagic (2020)

Le choix des matières premières a déjà connu un important développement : les biocarburants de la première génération sont basés sur des plantes alimentaires et fourragères contenant du sucre, de l'amidon ou de l'huile, alors que ceux de la deuxième génération sont nés de la volonté de répondre à la **concurrence que les carburants de première génération font aux denrées alimentaires et fourragères**. Les biocarburants de deuxième génération sont produits à partir de déchets d'origine biogène, ce qui permet la valorisation énergétique de ressources déjà utilisées. Une troisième génération de biocarburants prévoit par exemple d'utiliser des algues spécifiquement cultivées comme matière première. Si l'on ne parvenait pas à valoriser des flux de déchets supplémentaires, il faudrait produire de la biomasse en quantités considérables pour accroître encore l'utilisation des biocarburants. Plusieurs sortes de plantes et processus de transformation sont en développement à cet effet. Le défi, en l'occurrence, réside dans les besoins en sol et en eau, les coûts, l'impact sur le climat et les effets environnementaux causés par les cultures. En Suisse comme dans l'UE, on n'utilisera pas de carburants d'aviation biogènes qui concurrenceraient la production de produits alimentaires ou de fourrages (cf. ch. 3.3 et 0).

Plusieurs processus permettent de transformer la biomasse en carburants d'aviation. Le plus simple est de transformer des matières qui présentent déjà des structures semblables au kérosène. Tel est le cas des graisses et des huiles présentes dans les huiles alimentaires usagées (et dans les déchets animaux). Le carburant qui en résulte, déjà présent sur le marché, est appelé **HEFA-SPK** (« synthesized paraffinic kerosene from hydroprocessed esters and fatty acids »), abrégé HEFA. Cependant, la quantité disponible de matières premières est largement inférieure à la quantité que requerrait un remplacement complet du kérosène fossile.

C'est pourquoi l'on étudie actuellement l'utilisation d'autres déchets biogènes comme ceux de l'industrie forestière ou les ordures ménagères, mais sans avoir encore atteint la maturité commerciale. À cet effet, d'autres processus de transformation, comme l'« **alcohol to jet** » (**AtJ**), sont nécessaires²⁹. Dans l'AtJ, le processus de fermentation produit au stade intermédiaire un alcool qui peut être transformé par raffinage en carburant d'aviation. Le défi est d'améliorer l'efficacité tout en réduisant les coûts.

Le procédé dit de **gazéification Fischer-Tropsch** (GFT) permettrait la plus grande flexibilité en ce qui concerne les matières premières. Au cours de ce procédé, la biomasse est portée à très haute température pour être transformée en gaz. Il en résulte un mélange d'hydrogène et de monoxyde de carbone (CO). La **synthèse de Fischer-Tropsch (SFT)** est déjà établie pour convertir l'hydrogène et le CO en carburants³⁰. Le faible taux d'efficacité d'environ 75 % et le contrôle limité des produits finaux sont problématiques. Fondamentalement, on obtient toujours un mélange de divers hydrocarbures³¹. Le raffinage qui suit permet de les séparer et soit de les réutiliser dans le processus, soit de les mélanger à divers produits (notamment l'essence, le kérosène et le diesel). Le système de production qui recourt à la SFT est déjà certifié pour fournir un substitut du kérosène et les produits connexes peuvent être utilisés, entre autres, pour les transports routiers ou maritimes.

Si la valorisation d'autres flux de déchets ne devait pas aboutir, il faudrait cultiver des quantités de biomasse considérables pour passer à une échelle supérieure. En l'occurrence, plusieurs espèces de plantes et divers processus de transformation sont en développement, les défis étant le besoin en sol et en eau (et son corollaire : la concurrence à la production de denrées alimentaires et de fourrages), les coûts et les effets sur le climat ainsi que les autres conséquences environnementales de ces cultures.

²⁹ L'Agence internationale de l'énergie (AIE) a élaboré une vue d'ensemble de toutes les méthodes de production en développement : AIE, Bioenergy (2019)

³⁰ Le procédé FTS est utilisé depuis des décennies pour convertir, en quantités industrielles, le charbon et le gaz naturel en carburants synthétiques non durables.

³¹ Danish Energy Agency (2022)

Des carburants d'aviation biogènes durables sont **d'ores et déjà disponibles sur le marché**, surtout grâce à la technologie HEFA. En Europe, l'entreprise Neste (Finlande) dispose des plus grandes capacités de production. À l'échelle mondiale, les entreprises suivantes font aussi partie des leaders du marché : Gevo (États-Unis), Fulcrum (États-Unis), Alder Fuels (États-Unis), Shell (Royaume-Uni), SG Preston (États-Unis), Velocys (Royaume-Uni) et Aemetis, Inc. (États-Unis)³².

³² <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Offtake-Agreements.aspx>

3.2 Carburants synthétiques (PtL/StL)

Les carburants synthétiques durables représentent un parfait substitut des carburants d'aviation fossiles. Par rapport à ces derniers, leur impact climatique est nettement réduit sur l'ensemble du cycle de vie puisqu'ils ne s'appuient que sur des sources d'énergie renouvelables. S'agissant de la production, il s'agit globalement d'une inversion de la réaction de combustion : les produits de la combustion que sont l'eau et le CO₂ sont convertis en carburant. Mais la quantité d'énergie utilisée à cet effet est un multiple de celle que la combustion libère. Aussi, la montée en puissance de la production doit-elle aller de pair avec un développement des énergies renouvelables. Des émissions de CO₂ fossiles sont causées tout au long des étapes du processus, en particulier pour la mise à disposition de l'énergie. De ce fait, **les carburants synthétiques ne sont eux aussi pas complètement neutres en termes de CO₂.**

La première étape consiste en la **mise à disposition de CO₂ concentré**. Les technologies concernées sont déjà suffisamment étudiées et de petites installations sont en exploitation dans le monde entier. L'atmosphère ou des sources ponctuelles sont éligibles comme sources. Le captage de CO₂ dans l'atmosphère, qui nécessite le plus d'énergie, est le plus cher. Cette opération est plus simple là où le CO₂ est disponible en plus fortes concentrations. Les sources ponctuelles de CO₂ biogène, comme les installations de bioénergie, sont les plus avantageuses puisque les carburants produits de cette manière présentent un cycle du carbone fermé. Mais comme la disponibilité de ces sources est très limitée, on peut aussi se rabattre sur des sources ponctuelles non biogènes ou non complètement biogènes (par ex. les cimenteries)³³. Dans ce cadre, il faut noter que la production de ciment et la production de carburant ne peuvent pas être simultanément neutres en termes de CO₂ : au mieux, l'ensemble des émissions de CO₂ ne peuvent être réduites que de moitié pour les deux systèmes. Il faut donc considérer les avantages et les inconvénients économiques et écologiques de manière différenciée, notamment si l'on prend en compte les systèmes basés sur le marché.

Dans une étape suivante, de l'eau est transformée en hydrogène et le CO₂ capté est réduit en CO. La majeure partie de l'énergie est nécessaire pour ces opérations : le processus PtL utilise de l'électricité³⁴, tandis que le processus StL recourt directement à l'énergie solaire. Comme dans le procédé GFT (cf. ch. 3.1), ce mélange gazeux est transformé en carburant d'aviation par la **synthèse de Fischer-Tropsch (FTS)** suivie d'un raffinage. Un **système de production avec du méthanol** est aussi envisagé comme alternative aux procédés recourant au CO et à la SFT. Selon ce procédé, le CO₂ et l'hydrogène sont directement convertis en méthanol, lequel est retransformé en carburants. Cette méthode n'a pas encore été déployée industriellement, mais elle pourrait éventuellement offrir un plus haut niveau de flexibilité, d'efficacité ou de contrôle des produits. L'entreprise suisse Metafuels, notamment, conduit des recherches sur cette technologie.

Actuellement, seules de **petites installations PtL et StL de recherche et de démonstration** sont en exploitation. Tel est le cas en Suisse de la plateforme d'intégration du système énergétique (« Energy System Integration », ESI), à l'institut Paul Scherrer (PSI). En 2021, Atmosfair a mis en exploitation une installation de démonstration PtL en Allemagne. En 2022, également en Allemagne, une installation d'essai StL a été mise en service. Elle est exploitée par Synhelion, une entreprise essaimée de l'EPF de Zurich³⁵. Mais avec une capacité de production (pour une part largement) inférieure à une tonne de carburant par jour, ces installations ne se prêtent pas encore à une production économique, elles servent surtout de plateformes d'essai pour une mise à l'échelle des modules technologiques concernés. Les installations commerciales de plus grande ampleur n'en sont aujourd'hui qu'au stade de la planification.

³³ En admettant que les autres secteurs atteignent leurs objectifs climatiques, la disponibilité du CO₂ provenant de sources ponctuelles, en particulier non biogènes, diminuera fortement d'ici 2050.

³⁴ Pour obtenir une réduction globale des émissions de gaz à effet de serre générées par un carburant PtL, l'électricité utilisée pour le produire doit provenir de sources renouvelables (cf. ch. 3.3).

³⁵ <https://synhelion.com/news/synhelion-receives-funding-from-german-federal-ministry-for-economic-affairs-and-energy>

Le défi des technologies PtL et StL est de **réduire les pertes énergétiques et les coûts de production**. La technologie actuelle permet au mieux de transformer la moitié de l'énergie utilisée en CAD PtL³¹. L'intégration des processus jouera un rôle crucial dans la suite du développement. Par exemple, les importants rejets de chaleur de la SFT peuvent être utilisés en amont pour capter le CO₂, ce qui minimise les apports supplémentaires d'énergie. Le choix du site est lui aussi décisif : toutes les matières premières requises doivent être disponibles à un coût avantageux, notamment l'énergie issue de sources renouvelables. Cette énergie doit être produite en grandes quantités à un coût avantageux, elle doit être temporairement stockée s'il s'agit de sources d'énergie fluctuantes et elle doit être transportable jusqu'à l'installation de production. En Suisse, il n'est guère possible de remplir ces conditions, mais certains sites en Europe et dans le monde le permettent³⁶.

3.3 Durabilité des systèmes de production

Pour être qualifiés de durables, les méthodes de production des CAD doivent satisfaire à divers critères. La présente section aborde les critères les plus exigeants: les besoins en ressources et en sol ainsi que la réduction des émissions de gaz à effet de serre. La mise en œuvre réglementaire de ces critères est présentée au ch. 0.

Les **besoins en ressources** quant au sol, à l'eau et aux matières premières sont un facteur important de durabilité. Si les sources d'énergie primaire renouvelables (soleil, vent) sont globalement disponibles à foison, leur utilisation implique d'importants besoins en sol et en matières premières, de sorte qu'elle concurrence d'autres secteurs. C'est pourquoi des besoins importants en sol ou en ressources peuvent fortement limiter le potentiel d'une approche. Même si les données disponibles ne sont pas encore suffisantes pour comparer définitivement toutes les approches, des conclusions importantes sont d'ores et déjà possibles.

Le **Tableau 1** présente un **aperçu des besoins en sol et en ressources** de divers systèmes de production de carburants alternatifs. Les systèmes de production de CAD à partir de déchets biogènes causent le moins de besoins en sol et en ressources, puisque la production est affectée à la première utilisation de la biomasse et que seuls sont considérés la collecte et le raffinage. Mais comme la disponibilité des matières premières en limite le potentiel, d'autres technologies doivent aussi être considérées.

Il apparaît donc que le remplacement des énormes quantités d'énergie d'origine fossile nécessite **d'importantes surfaces**. Parmi les technologies considérées, les plus grands besoins en eau et en sol sont ceux liés aux carburants à base de biomasse spécifiquement produite. Par exemple, pour couvrir tous les besoins en carburants d'aviation de la Suisse en 2019 avec de l'huile de colza, une surface d'environ 16 000 km² serait nécessaire, soit plus que l'ensemble des surfaces agricoles de notre pays.³⁷ Les carburants à base d'algues peuvent être produits avec moins d'eau et sur des surfaces plus petites, qui ne doivent pas correspondre à du sol fertile. Les carburants synthétiques durables requièrent moins d'eau et de sol, encore que les surfaces nécessaires au photovoltaïque ou au StL soient énormes.

L'un des éléments essentiels de la durabilité consiste en la **réduction des émissions de gaz à effet de serre** tout au long du cycle de vie par rapport aux carburants fossiles. La production, la chaîne logistique et la combustion y sont comprises. S'agissant de la production des carburants à base de biomasse spécifiquement produite, diverses émissions peuvent survenir, notamment du CO₂, du CH₄, et de l'oxyde d'azote (y compris le N₂O). La quantité de ces émissions dépend de la variété de plante utilisée et de sa culture, comme le montre l'analyse précitée (cf. Tableau 1). En ce qui concerne l'huile d'algue, par exemple, les émissions de gaz à effet de serre ne peuvent être réduites que d'environ 40 % par rapport au kérosène fossile. D'autres méthodes de production avec de la biomasse spécifiquement produite, comme l'huile de palme ou l'huile de colza, permettent d'atteindre des taux de réduction des

³⁶ Rojas / Crone / Löchle (2019), Ram et al. (2020)

³⁷ <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/raum-umwelt/bodennutzung-bedeckung.html>

émissions plus élevés, mais aussi des taux nettement plus faibles, voire une augmentation des émissions comparativement au kérosène fossile. La raison en est la réaffectation des sols aux endroits cultivés : par exemple, si la production de biocarburants implique un déboisement, la réduction de CO₂ qu'assurait la végétation antérieure disparaît et du CO₂ stocké dans le sol et la biomasse est libéré. C'est aussi pourquoi, outre la concurrence faite à la production de denrées alimentaires et de fourrages, les carburants biogènes de première génération doivent être qualifiés de non durables.

Système de production	Besoins en sol (m ² /L _{jet-fuel-eg} /an)	Besoins en eau (L _{H2O} /L _{jet-fuel-eg})	Réduction des émissions vs. kérosène*
Huiles alimentaires usagées (HEFA)	-	-	84% ₃
Huile de palme (HEFA)	2.2 ₁	5'204 ₁	< 58% ₁
Huile de colza (HEFA)	7.4 ₁	5'724 ₁	< 55% ₁
Huile d'algue (HEFA)	0.9-2.3 ₁	497-1'839 ₁	43% ₁
Power-to-Liquid	~ 0.3 ₁	~ 6.7 ₂	< 95% ₂
Sun-to-Liquid	~ 0.2 ₂	~ 3.5 ₂	< 99% ₂

Tableau 1 : Besoins en sol et en ressources et réduction des émissions de divers systèmes de fabrication de carburants alternatifs

Source 1 : Schmidt / Weindorf et al. (2016)

Source 2 : Treyer / Sacchi / Bauer (2021)

Source 3 : OACI (2022)

*en comparaison avec les émissions de gaz à effet de serre durant le cycle de vie du kérosène selon CORSIA (les effets sans lien avec le CO₂ ne sont pas pris en compte par manque de données fiables)

Les **carburants issus de déchets biogènes** peuvent sensiblement réduire les émissions au cours du cycle de vie, puisque les émissions inhérentes à la production de biomasse sont imputées à la première utilisation, de sorte que seuls sont pris en compte le raffinage et la logistique entre la première et la deuxième utilisation. Comparés aux carburants d'aviation fossiles, les carburants provenant de déchets biogènes peuvent réduire les émissions de gaz à effet de serre de 84 %³⁸.

Une étude confiée par l'OFAC au PSI³⁹ a montré que les **CAD synthétiques** (PtL et StL) peuvent atteindre une réduction des émissions supérieure à 90 % au cours du cycle de vie, mais que cette performance dépend très fortement de l'intensité en CO₂⁴⁰ de la totalité de l'énergie primaire utilisée. Actuellement, durant la production, plus de la moitié de l'énergie primaire finit non pas en carburant mais en rejets de chaleur, de sorte que l'intensité en CO₂ de l'énergie primaire est multipliée par plus de deux. De ce fait, l'énergie primaire doit être très pauvre en CO₂ fossile pour que le produit final apporte une contribution notable à la réduction des émissions.

S'agissant des installations PtL, il est crucial de **tenir compte de toute l'infrastructure d'approvisionnement en électricité et en eau** : cette infrastructure ne comprend pas seulement les sources d'électricité, elle couvre aussi le transport et l'entreposage jusqu'à l'utilisation lors de la production de CAD. On ne peut miser sur les infrastructures existantes ni pour la production, ni pour le transport, ni pour

³⁸ Pavlenko / Searle (2021)

³⁹ Treyer / Sacchi / Bauer (2021)

⁴⁰ L'intensité en CO₂ indique les quantités de CO₂ émises à la production d'une unité énergétique.

l'entreposage, car elles seront déjà de plus en plus sollicitées par l'électrification imminente d'autres secteurs et leurs capacités devraient être accrues en conséquence.

3.4 Potentiel de mise à l'échelle

Les stratégies tablent pour la plupart sur la **capacité des CAD à couvrir la majeure partie des besoins en kérosène en 2050**⁴¹. On peut estimer la contribution respective des méthodes de production en se fondant sur les limites de la disponibilité des matières premières. Par exemple, le HEFA dépend des déchets contenant des huiles et des graisses, raison pour laquelle cette technologie peut couvrir au plus 5% des besoins en carburant⁴². Les autres carburants biogènes connaissent des limitations semblables, mais il est plus difficile d'en quantifier les restrictions, car on ne sait pas encore clairement de quelles matières premières seront tributaires les méthodes de production durables qui s'établiront. Néanmoins, en l'occurrence également, les prévisions supposent qu'un maximum de 50 % des méthodes de production biogènes (HEFA compris) pourront être couvertes⁴³. Les CAD synthétiques ne sont en principe pas limités, puisque les matières premières nécessaires à leur production abondent, à tout le moins à l'échelle mondiale. En ce qui les concerne, la seule limitation réside dans le développement de l'utilisation d'énergie primaire renouvelable. En outre, toutes les méthodes de production sont entachées d'incertitude en raison du développement des systèmes énergétiques globaux : la disponibilité de la biomasse et de l'énergie primaire renouvelable dépend de leur utilisation dans les autres secteurs.

Les coûts de carburant prévus diffèrent fortement selon les technologies. Les **CAD biogènes** peuvent être produits aux prix de vente minimaux de 1 à 2 dollars par litre⁴³. Selon les coûts de la biomasse requise, ces prix pourront augmenter ou diminuer d'ici à 2050, les coûts des matières premières pouvant aussi fluctuer fortement à court terme, comme on a déjà pu le voir en 2022 pour les CAD basés sur le HEFA-SPK. En ce qui concerne les **CAD synthétiques**, on prévoit une nette réduction des coûts de production ces prochaines décennies. Cette évolution est surtout due à la baisse du prix de l'utilisation des énergies renouvelables et aux gains d'efficacité dans les processus. De ce fait, les coûts devraient baisser de 1,6-5,0 dollars par litre actuellement à 1,2-2 dollars par litre en 2050⁴⁴. Les sources de CO₂ et l'énergie constituent les principaux inducteurs de coût. Le CO₂ de source ponctuelle est nettement plus avantageux que le CO₂ obtenu par extraction directe dans l'air (EDA), mais, si l'on en croit les prévisions, il ne sera plus guère disponible en grandes quantités en 2050. Les coûts de l'énergie dépendent fortement du lieu : les sites de production disposant de beaucoup d'énergie solaire ou éolienne sont les plus avantageux.

Quelque **80 000 tonnes de CAD** ont été produites dans le monde en 2021⁴⁵, soit 0,04 % des besoins en kérosène de l'ensemble des compagnies aériennes la même année⁴⁶. Pour couvrir la majeure partie des besoins en kérosène en 2050, **la production de CAD doit augmenter d'environ 30 % par année**. Des projets visant à couvrir environ 3 % des besoins mondiaux en kérosène à l'horizon 2030 sont déjà en cours de planification⁴⁷. Le HEFA revendique 90 % de la production issue de ces projets, puisqu'il s'agit de la méthode présentant le plus faible risque technologique⁴⁷. Parallèlement, toutefois, diverses installations de démonstration doivent déjà tester et développer la production d'autres CAD biogènes et synthétiques pour que ceux-ci puissent épuiser leur potentiel dans la production à grande échelle au-delà de 2030. L'OACI fournit une vue d'ensemble des projets CAD qui est régulièrement mise à jour³²⁴⁸.

⁴¹ En Suisse : Ecoplan (2021), en Europe : Royal Netherlands Aerospace Centre (2021), sur le plan mondial : OACI / CAEP (2022), Air Transport Action Group (2020)

⁴² Sur la base d'une analyse à l'échelle de l'UE, source : van Grinsven et al (2020)

⁴³ OACI / CAEP (2022)

⁴⁴ OACI / CAEP (2022), Rojas / Crone / Löchle (2019)

⁴⁵ <https://www.iata.org/en/programs/environment/sustainable-aviation-fuels/>

⁴⁶ <https://www.statista.com/statistics/655057/fuel-consumption-of-airlines-worldwide/>

⁴⁷ Mission Possible Partnership (2022)

⁴⁸ <https://datastudio.google.com/s/iWy-HY00860>

Pour permettre cette mise à l'échelle supérieure, des investissements d'environ 100 millions de dollars par an sont nécessaires au niveau mondial⁴³. Ce montant correspond à quelque 4 % des investissements mondiaux actuels dans le secteur de l'énergie, selon l'Agence internationale de l'énergie. Le **financement du développement** constitue un défi en raison de divers facteurs : des investissements sont nécessaires durant toute la durée, de la recherche en laboratoire aux installations commerciales, mais un rendement peut être attendu au plus tôt à partir de la deuxième ou de la troisième installation. En outre, à partir d'une certaine taille, une installation ne peut être construite que si l'intégralité de sa production de carburant est déjà vendue. Les risques technologiques et d'investissement sont importants, puisque les décisions d'investissement doivent être prises alors que la technologie n'est pas encore complètement connue et que les coûts de production ainsi que le rendement potentiel sont encore très incertains, notamment par rapport aux technologies concurrentes. Les exploitants d'aéronefs se trouvent donc dans une position difficile : ils ne peuvent pas recourir à un marché existant mais doivent participer activement au développement de la production des CAD. Par conséquent, il faut une **intégration verticale**, c'est-à-dire une coopération entre producteurs et consommateurs, qui n'était pas nécessaire dans cette mesure à ce stade.

La mise à l'échelle des CAD et, partant, la réalisation des objectifs climatiques de l'aviation ne deviendront possibles que grâce à un **développement intensif des technologies impliquées**. Le but de ce développement est de mettre à disposition, de manière aussi économique et écologique que possible, de grandes quantités de CAD. Par analogie aux technologies déjà établies dans le domaine des énergies renouvelables, on peut estimer les effets d'apprentissage probables. Seuls ces effets d'apprentissage basés sur une activité de recherche intensive permettront les réductions de coût mentionnés ci-dessus. Les technologies seront continuellement développées sur plusieurs générations d'installations, des prototypes de laboratoire à la grande installation économique. La **Figure 1** fournit un aperçu de ce processus, y compris l'indication des domaines où des projets suisses peuvent apporter une contribution. L'attention se concentrera sur une réduction aussi rapide que possible des risques technologiques, afin que le potentiel des technologies puisse être estimé précocement. Pour que le passage à l'échelle supérieure des productions de CAD soit fructueux, ces risques doivent être minimisés en diversifiant le développement entre plusieurs technologies différentes. En conséquence, le développement technologique dans ce domaine générera une part importante des coûts nécessaires au passage à l'échelle supérieure.

	TRL 1-4		TRL 5-6		TRL 6-7		TRL 8-9	
	Laboratoires		Installations pilotes		Installations de démonstration		Installations de production	
	Objectif: Bases technologiques		Objectif: Optimisation Système partiels		Objectif: Intégration Système global		Point de mire: Mise en œuvre durable	
HEFA	Depuis 2000		Depuis 2005		Depuis 2010		Depuis 2015 	
Biogènes	Depuis 2010		Depuis 2010		Depuis 2020		Dès 2025	
PtL	Depuis 2010 		Depuis 2015 		Depuis 2020 		Dès 2025	
StL	Depuis 2010 		Depuis 2015 		Depuis 2020 		Dès 2025 	

Figure 1 : Aperçu des phases du développement des CAD, réparties par périodes et types d'installations. Le NMT indique le niveau de maturité technologique, les croix suisses signalent des projets suisses prévus ou en cours.

Les carburants synthétiques durables représentent la technologie la plus prometteuse tant sur le marché suisse qu'à l'international. On ne doit donc pas franchir des limites insurmontables pour augmenter l'échelle de production et les besoins en sol et en ressources sont plus faibles que pour les CAD biogènes. Par contre, les besoins en énergies renouvelables sont élevés et il faut en tenir compte dans la mise à l'échelle. Le Conseil fédéral s'est positionné en conséquence et, dans la Stratégie climatique à long terme de la Suisse, il note : « Par conséquent, l'utilisation de carburants synthétiques neutres en CO₂ devrait être la seule véritable alternative d'ici 2050 ». Cependant, les systèmes de production de carburants biogènes durables à partir de matières premières ou de déchets appropriés occuperont une importante part du marché international dans un futur prévisible. Les CAD biogènes entrent seulement en question pour le marché suisse à condition que les critères de durabilité correspondants soient respectés et s'il peut être exclu que la production de denrées alimentaires et de fourrages soit concurrencée.

3.5 Aspects nationaux

À long terme, la **production propre** de la Suisse ne couvrira guère les besoins en carburants d'aviation durables de notre pays pour une large part. Des aspects économiques sont ici déterminants : les matières premières et l'énergie nécessaire devraient être disponibles en Suisse et pouvoir concurrencer économiquement une production à l'étranger. Il faudrait plus de 70 % de l'électricité actuellement produite en Suisse pour couvrir la totalité des besoins en carburant d'aviation de la Suisse en recourant aux processus **PtL**⁴⁹. Pour assurer une production commerciale de CAD au moyen des processus PtL, il faudrait donc fortement développer la production d'électricité renouvelable en Suisse, infrastructures de transport et de stockage comprises. Ce n'est pas réalisable en temps utile et n'est pas non plus prévu actuellement dans les Perspectives énergétique 2050⁵⁰. Le flou règne encore quant aux coûts supplémentaires d'une production de carburants PtL en Suisse. Une étude les chiffre à environ 30 %

⁴⁹ En revanche, les besoins en eau pour produire cette quantité de CAD synthétiques n'est que d'environ 0,3 % de l'eau potable de la Suisse.

⁵⁰ Prognos / TEP Energy / Infras / Ecoplan (2020)

par rapport aux sites de production globalement optimisés⁵¹. Il n'est également pas envisageable d'augmenter la production de **StL** en Suisse, puisque l'ensoleillement annuel requis n'est pas atteint⁵². Les **CAD biogènes** produits à partir de biomasse spécifiquement cultivée à cet effet n'entrent pas en ligne de compte eu égard au manque de surface cultivable excédentaire et aux soucis mentionnés que suscite l'aspect de la durabilité. Les déchets biogènes disponibles ne suffisent également pas (même avec les technologies potentielles du futur) à couvrir les besoins en kérosène de la Suisse. En principe, il est possible de produire des CAD commercialement à partir des déchets biogènes disponibles; le défi réside dans la rentabilité économique par rapport à une production à l'étranger. C'est ainsi que Helvoil prévoit une installation commerciale (cf. **Figure 3** au ch. 4.4).

Une production économique est en particulier possible dans des marchés de niche où la production de carburants en Suisse revêt une importance supérieure. Une telle situation est par exemple envisageable pour les Forces aériennes qui, sur la base du plan d'action Énergie et climat du DDPS⁵³, mise également sur les CAD. Dans ce cadre, il faut réduire la dépendance aux sources d'énergie fossiles et développer l'utilisation des énergies renouvelables, également par une production d'énergie indigène. Les possibilités de couvrir partiellement les besoins en kérosène par une production locale sont actuellement à l'examen, en coopération avec divers partenaires.

Dans l'ensemble, il est probable que les CAD proviennent surtout de la production étrangère à large échelle. La mise à l'échelle supérieure de l'utilisation des CAD en Suisse ne devrait donc guère entraîner de charge notable pour le système énergétique suisse. Quant à la production à l'étranger, il convient de s'assurer par des critères de durabilité correspondants que le système énergétique local ne soit également pas malmené (cf. ch. 0). C'est en principe possible pour chaque processus technologique mentionné. L'un des effets positifs de la mise à l'échelle supérieure de l'utilisation des CAD réside dans la possibilité d'accroître la sécurité de l'approvisionnement en le diversifiant. Alors que la disponibilité des ressources fossiles est très locale, 90 % de la production d'huile brute proviennent de 22 États⁵⁴ : le nombre de lieux de production peut donc être sensiblement augmenté. Cette remarque vaut en particulier pour les CAD synthétiques basé sur le captage de CO₂ dans l'atmosphère.

La **recherche et développement** de la Suisse peut fournir une contribution importante à la mise à l'échelle supérieure des carburants d'aviation durables. Dans le domaine des CAD synthétiques, notre pays dispose de plusieurs entreprises innovantes dont certaines sont leaders mondiaux du marché (cf. ch. 3.2 et 4.4). Par exemple, s'agissant de séparer le CO₂ de l'atmosphère, Climeworks Technologie a apporté sur le marché ce qui est essentiel pour produire des CAD synthétiques et qui fait d'ores et déjà l'objet d'études à cet égard. Synhelion a développé la technologie StL et a déjà pu la démontrer dans une installation pilote à Jülich (Allemagne). Metafuels développe une technologie visant à produire des CAD synthétiques en contournant la faible efficacité et la sélectivité de la SFT. Airborn Fuels Switzerland étudie la possibilité d'une installation combinée de production et de développement de CAD synthétiques en Suisse. swiss aeropole, à Payerne, analyse la faisabilité d'une production de CAD synthétiques. La longue expérience de divers instituts techniques de recherche s'y ajoutent : entreprises essayées de l'EPF de Zurich, Climeworks et Synhelion tablent sur les recherches au long cours de leur maison mère. L'antenne valaisanne de l'EPFL participe à l'étude mentionnée sur le site de Payerne. Des chercheurs de la ZHAW et de l'OST participent aux travaux de Airborn Fuels Switzerland. En outre, depuis 2021, une initiative commune de l'Empa et du PSI, « SynFuels », poursuit l'étude de technologies clés pour la production de CAD.

⁵¹ Ram et al (2020)

⁵² Selon Synhelion, les valeurs maximales suisses atteintes en Valais, d'environ 1400 kWh/m², et le nombre trop faible d'heures de pleine charge ne suffisent pas à une exploitation économique.

⁵³ <https://www.vbs.admin.ch/de/umwelt/umweltschutz/energie-und-klima.html>

⁵⁴ BP (2022)

Ces projets et installations permettent notamment de créer en Suisse un savoir-faire supplémentaire susceptible de faire progresser la mise à l'échelle supérieure des technologies visées. Dès que de nouvelles technologies font leurs preuves en laboratoire, des installations pilotes de plus grande taille sont nécessaires en Suisse. En outre, pour assurer une progression du savoir-faire, il sera indispensable de monter les **installations de démonstration PtL et StL là où, à l'étranger**, la production aura lieu à long terme. Il faut gagner de l'expérience à un stade précoce sur toute la chaîne de création de valeur, en particulier sur de tels sites. Mais à ce stade, aucune installation semblable n'a été financée où que ce soit au monde. Cette situation montre qu'une **coopération multinationale** renforcée est nécessaire. La Suisse peut favoriser une telle coopération en s'engageant résolument dans divers organismes internationaux (en particulier spécifiques à l'aviation) aux fins d'accroître la production des CAD et en jouant activement un rôle de coordination. le ch. 4.4 explique plus précisément les installations pilotes et de démonstration mentionnées et une participation de la Suisse à une mise à l'échelle supplémentaire à l'étranger.

4 Promotion étatique des CAD

Il est actuellement possible, en Suisse, de avitailler les appareils en CAD (biogènes) sur une base librement consentie. Cette opération entraîne des coûts supplémentaires pour les exploitants de l'aéronef, raison pour laquelle elle ne survient que pour des volumes proportionnellement faibles. Dans un tel contexte, réaliser les objectifs climatiques de la Suisse dans le secteur de l'aviation est tout sauf garanti. Il faut des conditions-cadres juridiques claires, qui donnent les bonnes incitations à tous les acteurs impliqués afin que le marché des CAD croisse rapidement au cours des prochaines décennies. Diverses études ont examiné comment ces conditions-cadres devraient être conçues pour qu'elles soient aussi efficaces que possible et permettent de mettre les CAD à l'échelle supérieure visée⁵⁵. Toutes ces stratégies concordent sans exception pour admettre qu'une **promotion étatique tant de la demande que du développement est nécessaire** pour que les objectifs climatiques soient atteints dans le secteur de l'aviation. Le présent chapitre présente quelles mesures existent déjà aux niveaux national et international et quels sont les besoins de promotion supplémentaire.

4.1 Contexte international

La prise en compte des développements internationaux est décisive pour créer et utiliser des alternatives durables aux carburants d'aviation fossiles. Pour l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), les CAD représentent un important pilier pour abaisser les émissions des transports aériens. C'est ainsi que l'OACI a adopté dès 2017 une **Vision 2050 pour les carburants d'aviation durables** dans laquelle elle exhorte les États, l'industrie et les autres groupes d'intérêts à remplacer à l'horizon 2050 une part significative des carburants d'aviation conventionnels par des carburants d'aviation durables (CAD). Dans le programme **CORSIA** de l'OACI, l'utilisation des carburants durables conduit à une réduction des obligations de compensation des compagnies aériennes (cf. ch. 2.4). Les règles de l'OACI contiennent des critères standardisés concernant la mesure des réductions de CO₂ par les CAD. Dans le rapport sur un objectif climatique ambitieux pour l'aviation internationale, l'OACI attribue le plus fort potentiel aux CAD, parmi toutes les mesures examinées⁴³.

L'UE connaît déjà, avec le SEQUE, une certaine promotion des CAD (cf. ch. 2.4). Le paquet « **Ajustement à l'objectif 55** » prévoit un net développement de cette promotion, qui comprend les projets de loi visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre de 55 % à l'horizon 2030 (par rapport au niveau d'émission de 1990). Trois initiatives sont importantes dans le contexte de la promotion : une **modification du SEQUE** prévoit, à partir de 2024, une réduction annuelle de 4,2 % au lieu de 2,2 % de la quantité totale des droits d'émission disponibles. En outre, la part des droits d'émission attribués gratuitement doit être progressivement réduite à zéro entre 2024 et 2026. Cette mesure a un impact sur le SEQUE de la Suisse, qui est couplé à celui de l'UE : en vertu de l'Accord avec l'UE sur le couplage des systèmes d'échange de quotas d'émission⁵⁶, les deux systèmes doivent être développés de manière équivalente (principe d'équivalence). La **modification de la directive sur la taxation de l'énergie**, proposée dans le cadre du paquet « Ajustement à l'objectif 55 », concerne également l'aviation : la taxation du kérosène utilisé pour les vols intérieurs à l'UE doit être renouvelée (cf. Annexe C.1.). De plus, l'UE prévoit de n'appliquer CORSIA qu'aux vols à l'extérieur de l'EEE et, en lieu et place, de n'appliquer que le SEQUE-UE aux vols intérieurs à l'EEE et à destination du Royaume-Uni.

⁵⁵ Air Transport Action Group (2020), Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany e.V. (2020), Deutsche Bundesregierung (2021), Ecoplan (2021), OACI / CAEP (2022), Mission Possible Partnership (2022), Royal Netherlands Aerospace Centre (2021), WEF Clean Skies for Tomorrow (2021),

⁵⁶ 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

L'initiative **ReFuelEU Aviation** prévoit en outre dans l'UE une obligation de mélange pour les carburants d'aviation durables. Les détails de cet instrument sont discutés au ch. 4.3. Actuellement, on ne sait toutefois pas au juste dans quelle mesure le paquet « Ajustement à l'objectif 55 » sera encore modifié par le processus législatif.

Cependant, les **États-Unis** misent sur des objectifs absolus d'avitaillement en CAD, sur l'encouragement au développement technologique et sur des allègements fiscaux pour les producteurs de CAD.

4.2 Promotion suisse actuelle

La promotion des CAD en Suisse se compose actuellement de deux éléments : un soutien au marché sous forme d'un allègement fiscal et quelques instruments propices au développement.

La Suisse dispose d'une promotion des ventes de carburants biogènes dans le cadre de la **loi sur l'imposition des huiles minérales (Limpmin)**. Cette promotion est prévue jusqu'à la fin de 2024 sous réserve de la nouvelle version de la loi sur le CO₂ (cf. ch. 5.2). Les carburants biogènes bénéficient d'un allègement de l'impôt sur les huiles minérales s'ils remplissent certains critères de durabilité (cf. ch. 0). Pour l'aviation suisse toutefois, cette exonération n'a **pas de grande importance** puisque 96 %⁵⁷ de la consommation suisse de kérosène concernent les transports aériens internationaux, qui sont déjà exemptés de l'impôt sur les huiles minérales. En outre, à ce stade, il n'a été possible dans aucun cas de faire valoir un allègement fiscal pour des carburants d'aviation biogènes, car il faudrait nécessairement à cet effet une chaîne logistique distincte : il serait en effet inadmissible que d'autres carburants issus de matières premières non durables y soient mélangés. Jusqu'ici, aucun fournisseur de CAD n'a pu le réaliser.

En outre, la Suisse connaît déjà des **instruments d'encouragement dans le domaine de la recherche énergétique et environnementale**. Ces instruments sont susceptibles d'être utilisés entre autres pour des projets de développement dans le domaine des CAD. Concrètement, il s'agit de contributions provenant du financement de base des hautes écoles selon la loi sur l'encouragement et la coordination des hautes écoles (LEHE), de la contribution au financement du domaine des EPF, du Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS) et de l'encouragement de projets et de programmes par Innosuisse. S'y ajoutent des instruments de l'OFEV, de l'OFAC et de l'OFEN. L'Annexe B fournit une vue d'ensemble détaillée.

Le développement des carburants d'aviation alternatifs durables peut donc d'ores et déjà bénéficier de diverses mesures d'encouragement, ce qui explique notamment l'excellent état actuel du savoir-faire de la Suisse dans ce domaine. Le financement spécial du trafic aérien de l'OFAC, qui soutient Synhelion et les projets de la ZHAW et de l'OST mentionnés sous ch. 3.5, y a également contribué. Comme la thématique des carburants durables n'est pas clairement dissociable d'autres thèmes, il n'est pas possible de quantifier précisément la totalité des ressources promotionnelles disponibles dans le domaine des CAD⁵⁸. Mais il est clair que les besoins de soutien pour les futures phases d'innovation de la mise à l'échelle supérieure des CAD dépassent les ressources disponibles (cf. ch. 4.4).

4.3 Promotion des ventes

La présente section compare les diverses mesures d'encouragement susceptibles de soutenir l'établissement d'un marché des CAD. Il reprend une analyse de l'Université technique de Hambourg⁵⁹. Cette ana-

⁵⁷ Source: https://www.bazl.admin.ch/dam/bazl/de/dokumente/Politik/Umwelt/co2_emissionen_grundsatzliches_zahlen.pdf.download.pdf/CO2-Emissionen_des_Luftverkehrs.pdf

⁵⁸ Par exemple, les projets de développement du captage de CO₂ atmosphérique ou de l'électrolyse ne sont pas directement attribuables au domaine des CAD, mais ils sont néanmoins essentiels s'agissant des CAD synthétiques.

⁵⁹ Bullerdiek / Kaltschmitt (2020)

lyse examine les instruments de promotion du marché envisageables de manière à permettre une classification indicative de leur degré d'adéquation. Le **Tableau 2** offre une présentation synoptique des destinataires de l'instrument et, partant, des responsables de la mise en œuvre ainsi que du financement des coûts. Il apparaît que les instruments discutés couvrent un large domaine de la structure du marché. De plus, ce **Tableau 2** récapitule les exigences essentielles posées aux instruments d'encouragement analysés dans le cadre de l'étude : l'efficacité, l'influence de facteurs externes, l'efficacité statique et dynamique (cf. Annexe B pour des explications détaillées). Les auteurs soulignent que ces quatre exigences n'étant pas exhaustives, elles ne permettent pas une estimation comparée quantitative de leur adéquation, mais seulement une première classification indicative.

Critère	Impôt sur les transports aériens	Impôt sur le CO ₂	SEQUE-JE	CORSIA	Taux d'incorporation	Taux de réduction des GES	Rétribution fixe	Appels d'offres
Efficacité	-	-	-	-	+	+	o	+
Influence du prix du pétrole brut	Non applicable	-	-	-	+	+	o	+
Efficacité statique	Non applicable	+	+	+	+	+	-	+
Efficacité dynamique	Non applicable	+	o	+	o	+	-	+
Destinataire de l'instrument	Compagnie aérienne				Responsable de la mise sur le marché du carburant		Producteur du carburant	
Destinataire des coûts supplémentaires	Compagnie aérienne / passager						Administration fiscale	

Tableau 2 : Évaluation d'instruments d'encouragement possibles en vue de l'utilisation de carburants d'aviation durables (extrait de Bullerdiek / Kaltschmitt (2020)⁶⁰). Les instruments examinés ont été classés qualitativement pour chaque point soit comme « très adéquat (+) », « moyennement adéquat (neutre) (o) », « peu adéquat (-) » ou « non applicable ».

En Suisse, les instruments envisageables dont les coûts ne seraient financés que par l'État sont éliminés parce qu'ils ne sont pas réalisables (rétributions fixes et appels d'offres)⁶¹.

Quant aux autres instruments, une faible adéquation est attribuée au SEQUE et à CORSIA, des instruments actifs en Suisse. Cette évaluation est justifiée par le prix élevé de l'utilisation des CAD comparativement aux droits d'émission ou aux compensations. Parmi les instruments incitatifs alternatifs, l'imposition des titres de transport et du CO₂ obtient aussi un résultat négatif. À l'instar de toute taxe sur les billets d'avion, l'impôt allemand sur les transports aériens n'entraîne fondamentalement aucune incitation à l'avitaillement en CAD. Même si une telle incitation est aménagée, elle peut entraîner une distorsion du marché, comme on l'a relevé dans le cadre de la taxe sur les billets d'avion proposée en Suisse.

⁶⁰ L'ordre des colonnes a été adapté pour améliorer la lisibilité.

⁶¹ L'approche consistant à alléger la charge fiscale des producteurs, appliquée aux États-Unis, n'est elle aussi pas réalisable dans notre pays, si bien qu'elle n'a pas été retenue : comme la Suisse dépend des importations de CAD, cette mesure n'aurait qu'un effet marginal.

Pour que des impôts sur le CO₂ soutiennent effectivement l'établissement d'un marché des CAD, ils devraient entraîner des coûts supplémentaires plus élevés que l'avitaillement en CAD. Des impôts sur le CO₂ aussi élevés sont inenvisageables en particulier au début de l'intensification de la production de CAD. En outre, le niveau de taxation nécessaire varie fortement selon le niveau de prix du pétrole brut et des CAD, ce qui entrave sensiblement la planification. Par contre, les modèles de quotas sont apparus particulièrement adéquats, qu'ils soient basés sur le volume d'avitaillement (taux d'incorporation d'énergie, de masse ou de volume) ou sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre (taux de réduction des GES) que ce taux d'incorporation permet d'obtenir. Ces approches font donc l'objet d'explications plus précises, tandis qu'une description détaillée des autres mesures mentionnées se trouve à l'Annexe C.

Un **modèle de quotas** prescrit aux acteurs du marché, pendant une certaine période, une proportion minimale de CAD. La responsabilité d'atteindre le quota peut être imposée soit aux fournisseurs de carburants, soit aux compagnies aériennes. En l'occurrence, donner la responsabilité aux compagnies aériennes est moins efficace, puisqu'elles commandent la majeure partie du carburant par l'intermédiaire de fournisseurs : il en résulterait une charge administrative supplémentaire pour chaque compagnie aérienne dans tous les aéroports. Pour qu'un modèle de quotas fonctionne, les inconvénients économiques entraînés par la non-réalisation des objectifs doivent être plus importants que ceux requis par la réalisation de ces objectifs. Autrement dit, un objectif d'avitaillement devrait être assorti de **sanctions** si les quotas fixés ne sont pas atteints.

Chaque technologie (CAD biogènes, StL, PtL) présente des **besoins de soutien différents** : l'introduction d'un quota pour toutes les technologies aurait pour effet que la variante la plus avantageuse serait employée. L'inconvénient serait alors que seule cette technologie bénéficierait d'économies d'échelle (des volumes de production supérieurs entraînent des prix plus bas), ce qui accentuerait son avantage par rapport aux autres technologies. Le principe des multiplicateurs ou sous-quotas permet d'y remédier : des multiplicateurs signifieraient que, face à un objectif d'avitaillement donné, certaines technologies (moins développées) seraient munies d'un coefficient multiplicateur par rapport aux technologies établies. Mais pour le législateur, une telle approche complique extrêmement la planification de la réduction réalisable des émissions. En outre, la quantification du multiplicateur est difficile : il faudrait sopeser les différences entre prix, bilan climatique et effets environnementaux généraux. Comme alternative, des sous-quotas peuvent tenir compte de la disparité des systèmes de production quant à leur état de développement : à chaque technologie correspondrait un objectif spécifique d'avitaillement, ce qui reviendrait à limiter la concurrence aux producteurs recourant à la même technologie⁶². Il est ainsi possible de planifier à court terme la réduction des émissions réalisable tout en orientant le développement technologique à long terme vers les technologies à fort potentiel. Une autre étude de l'Université technique de Hambourg parvient à la conclusion que les sous-quotas constituent l'approche la mieux à même de procéder à une différenciation selon les technologies⁶³. Ainsi, les risques technologiques peuvent être réduits pour les fournisseurs et les consommateurs de carburant, les coûts d'investissement pour chaque technologie étant répartis sur tous les utilisateurs.

De surcroît, les modèles de quotas risquent d'être déjoués par des **stratégies d'avitaillement opportunistes (« tankering »)** : on remplira les réservoirs au-delà du nécessaire aux escales où les prix du kérosène sont bas pour réduire l'avitaillement à l'escale suivante où les prix sont plus élevés. Une telle pratique entraîne une consommation de carburant accrue et, par conséquent, une charge climatique supplémentaire qu'il convient d'éviter. Si un quota entraîne un prix du carburant très différent de celui des pays environnant, des mesures doivent être prises contre l'avitaillement opportuniste, qui menace pour les vols entre les zones soumises aux quotas de CAD et celles exemptes de quotas, puisque la différence de prix peut être considérable entre les unes et les autres. Il est donc crucial d'harmoniser

⁶² S'agissant des quotas de réduction des GES, un sous-quota peut aussi être prévu pour les NET.

⁶³ Bullerdiek / Neuling / Kaltschmitt (2021) parviennent à cette conclusion pour les taux de réduction des GES, mais elle s'applique aussi aux taux d'incorporation.

les quotas par-delà les frontières nationales ou, si ce n'est pas possible, de prévoir un mécanisme empêchant l'avitaillement opportuniste.

L'**efficacité** est avérée pour les approches du taux d'incorporation et du taux de réduction des GES : l'utilisation d'une quantité définie de CAD (même si les modalités de cette définition diffèrent) est indépendante de facteurs externes comme l'écart entre le prix des CAD et celui du kérosène classique. La différence entre les deux approches se situe surtout dans les incitations pour le producteur. Si une incitation à **minimiser les coûts** est créée pour les deux approches en raison de la concurrence entre producteurs, l'approche du taux de réduction des GES apporte en outre une plus forte incitation à **minimiser les effets sur le climat**. En ce qui concerne les taux d'incorporation, il faut définir des critères de durabilité qui ne puissent créer une incitation que dans un certain domaine. Comme l'une et l'autre approche sont dénuées d'une incitation à minimiser d'autres charges environnementales, cet aspect doit être garanti dans les deux cas par des critères de durabilité stricts.

Des modèles de quotas sont actuellement mis en œuvre ou en voie de planification dans plusieurs États européens, par exemple en Allemagne, en Finlande, en France, aux Pays-Bas, en Norvège, en Suède et au Royaume-Uni⁶⁴. L'approche allemande se concentre sur les CAD synthétiques, un taux étant prévu dans la loi⁶⁵. Mais le cas échéant, les obligations d'incorporation nationales ou régionales des États membres de l'UE sont remplacées par une proposition de l'UE. C'est ainsi qu'un taux d'incorporation constitue le cœur de l'initiative ReFuelEU Aviation, qui s'inscrit dans le paquet « **Ajustement à l'objectif 55** »⁶⁶. Les quotas prévus dans l'UE, y compris la comparaison avec le sous-quota allemand, sont représentés à la **Figure 2**. Les carburants biogènes de première génération sont exclus de la réalisation du quota. La proposition de loi de la Commission européenne se limite aux aéroports dont le trafic dépasse un million de passagers ou 100 000 tonnes de fret par année. Ainsi, 95 % du trafic au départ (de l'UE) sont couverts sans que les petits aéroports ne soient soumis sans nécessité à des charges administratives importantes. Les exploitants d'aéronefs ne sont concernés que s'ils proposent au moins 729 départs par an à partir des aéroports visés. Mais en définitive, les fournisseurs de carburant sont responsables du respect du quota (les fournisseurs étant significativement moins nombreux que les exploitants d'aéronefs, la mise en œuvre s'en trouve facilitée). Les fournisseurs de moindre taille ne font pas exception. Si un quota n'est pas tenu, la quantité manquante doit être fournie en plus l'année suivante. S'y ajoute une sanction : elle se monte à au moins le double du montant économisé l'année précédente par le non-respect du quota. Un mécanisme est aussi prévu pour éviter le phénomène de l'avitaillement opportuniste (« tankering »). Ce mécanisme prévoit que 90 % du kérosène consommé sur des vols au départ de l'UE doit être embarqué sur le territoire de l'UE. Cette mesure comprend pour les compagnies aériennes une obligation de communiquer agrégée par aéroport, pour autant qu'elles dépassent une certaine taille (cf. ci-dessus).

⁶⁴ WEF Clean Skies for Tomorrow (2020) fournit une vue d'ensemble.

⁶⁵ § 37a, al. 4a, de la loi fédérale allemande sur la protection contre les émissions (Bundes-Immissionsschutzgesetz, BImSchG), dans la version publiée le 17 mai 2013, état au 24 septembre 2021,

⁶⁶ L'initiative correspondante pour la navigation maritime, FuelEU Maritime, s'inscrit également dans « Ajustement à l'objectif 55 ». Elle contient un taux de réduction des GES tel que la variété technologique plus importante de ce secteur ne soit pas restreinte

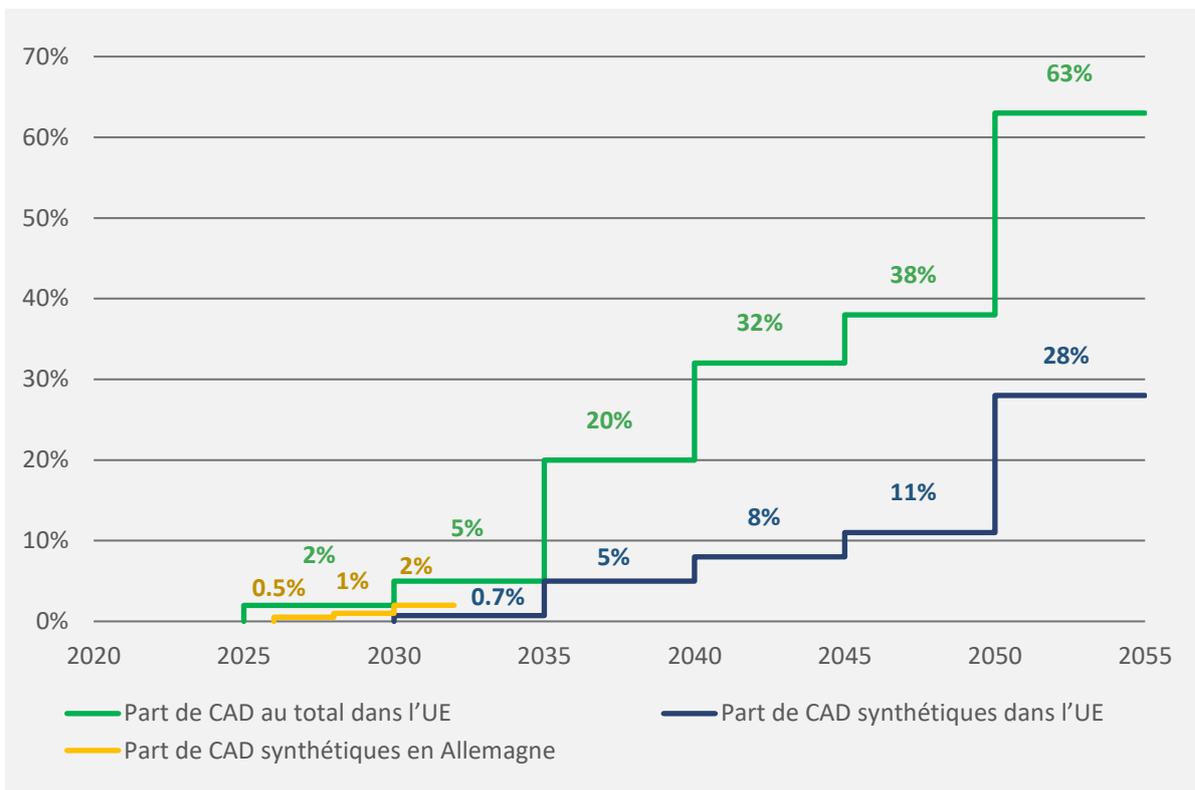


Figure 2 : Taux d'incorporation prévus de CAD dans l'UE et taux actuels en Allemagne

Pour que les CAD puissent atteindre leur potentiel de réduction des émissions de l'aviation, il faut sensiblement accélérer l'établissement du marché des CAD en Suisse et dans le monde. Parmi les mesures envisageables, l'obligation d'incorporation s'est avérée la plus adéquate. Le taux visé se définit soit par la quantité de carburant de l'avitaillement (taux d'incorporation), soit par la réduction des émissions ainsi recherchée (taux de réduction des GES). Les taux de réduction des GES comportent de plus fortes incitations à la réduction des émissions, alors que les taux d'incorporation doivent être accompagnés par des critères de durabilité pour garantir cet effet. Eu égard au caractère international du secteur des transports aériens, un taux d'incorporation est toutefois préférable : ainsi, la Suisse ne fera pas cavalier seul et sa démarche sera coordonnée avec ses partenaires à l'international. À cet effet, le niveau du taux et, partant, les coûts supplémentaires de l'incorporation devraient correspondre à peu près à ceux des États environnants. Un marché international exempt de distorsion à la concurrence et ne pénalisant pas les acteurs suisses peut être ainsi établi, ce qui instaure les conditions voulues pour atteindre les objectifs climatiques et la sécurité de planification attendue par les exploitants d'aéronefs, les exploitants d'aéroport de même que les producteurs et distributeurs de carburants.

4.4 Besoins pour la promotion du développement

L'OFAC a identifié les besoins de soutien étatique au développement en vue de permettre la mise à l'échelle supérieure, présentée au ch. 3.4, dans les délais voulus pour atteindre les objectifs climatiques. Ces besoins correspondent à l'ensemble des sources énumérées au chapitre 4. Laisser complètement à l'industrie le soin de financer le développement comporterait plusieurs risques : les premières années, les investissements se limiteraient principalement aux technologies à faibles risques, comme les CAD biogènes. Il en résulterait un effet de verrouillage, les investissements dans les technologies plus risquées pour les CAD synthétiques manqueraient et la disponibilité des CAD serait menacée à long terme. En outre, le potentiel d'amélioration de l'efficacité des méthodes de production n'étant guère utilisé de manière optimale, les effets d'apprentissage ne surviendraient pas, ce qui entraînerait une hausse des prix et, le cas échéant, une charge plus importante sur l'environnement. Enfin, sans mesure

supplémentaire, les investisseurs et d'autres parties prenantes ne seraient pas incités à partager leurs résultats de recherche, ce qui réduirait le potentiel de réduction des émissions. Même si l'industrie aéronautique n'est pas seule à financer le développement des CAD, son rôle est crucial (cf. ch. 3.4), notamment en ce qui concerne l'achat de carburants provenant des premières générations d'installations qui ne sont pas encore rentables.

Cette promotion du développement a déjà commencé, en Suisse comme à l'internationale. Du point de vue de l'OFAC, un soutien sera nécessaire aussi longtemps que les besoins en CAD ne seront pas couverts économiquement. Outre les installations destinées à l'HEFA (dont le potentiel est globalement très limité), il n'existe encore nulle part au monde une installation économique de production de CAD. Plusieurs générations d'installations seront encore nécessaires jusqu'à ce que l'on dispose d'une telle installation. Laisser la promotion de ce développement exclusivement à d'autres pays créerait une dépendance intolérable s'agissant de réaliser les objectifs climatiques. Comme le montre l'exemple de Synhelion (cf. fiche), il en résulterait aussi un risque d'exode d'entreprises suisses innovantes. Il faut en l'occurrence plutôt miser sur une coopération aussi active que possible pour exploiter au mieux les synergies. Pour que les technologies de CAD prometteuses soient mises à l'échelle supérieure, il faut combiner au mieux les technologies phares de différents États. La contribution de la Suisse ira très probablement là où un savoir-faire existe déjà.

La promotion du développement de CAD par la Suisse (cf. ch. 3.5) génère plusieurs utilités : la réalisation des objectifs climatiques n'est possible que si les réservoirs sont alimentés en CAD ; en outre, la place scientifique et industrielle suisse en profite. La création de valeur réside dans le développement lui-même et, ultérieurement, dans l'exportation des technologies développées. Les CAD représentent un marché en croissance prometteur et, partant, une grande opportunité pour la place suisse. Dans ce contexte, il importe beaucoup que des technologies suisses soient utilisées dans des installations de démonstration et, plus tard, dans des installations de production à l'étranger. Ce doit être explicitement possible dans le cadre du soutien au développement par la Suisse (financement initial) (cf. ch. 5.2). L'avitaillement en CAD produits dans ces installations peut contribuer directement à la réalisation des objectifs climatiques de notre pays.

On ne dénombre actuellement qu'un seul acteur suisse à avoir annoncé publiquement un projet dans le domaine des **CAD biogènes** : Helvoil a annoncé la construction d'une **installation de production** en Valais dans laquelle des carburants pour le trafic aérien et routier doivent être fabriqués à partir d'huiles alimentaires usagées (cf. **Figure 3**). Le soutien nécessaire pour cette installation est encore incertain, puisque la rentabilité de la production tout comme l'aspect de la recherche sur les carburants d'aviation sont encore inconnus.

		<ul style="list-style-type: none"> • Créée en 2021 • Production prévue en Suisse de carburants à partir d'huiles alimentaires usagées et de graisses animales, dont les CAD • Dès 2024 : production prévue de 100 000 tonnes de carburant par an 		
2020-24	<ul style="list-style-type: none"> • Planification et construction de l'installation • Optimisation du processus HEFA • Demande de permis de construire déposée en 2022 	\$	Financement propre assuré jusqu'à la part CAD	TRL 9
Ab 2024	<ul style="list-style-type: none"> • Production d'env. 100 000 tonnes/an • Utilisation des infrastructures existantes • Utilisation possible comme plateforme de recherche 	\$	Investissement d'env. 100 millions de francs Soutien par le fonds UBS Des besoins de soutien à la production de CAD sont avérés	TRL 9

Figure 3 : Aperçu du développement d'une installation suisse de production de CAD biogène. L'exemple de l'entreprise suisse Helvoil SA

Dans le domaine **StL**, les besoins de soutien peuvent déjà être présentés (cf. **Figure 4**). Le budget du domaine des EPF et le soutien de l'UE ont permis la **recherche** sous-jacente menée à l'EPF de Zurich. Une petite installation d'essai placée sur le toit de l'EPFZ en fait partie.

Une étape suivante de mise à l'échelle supérieure, se déroulera entre 2022 et 2024 dans une **installation pilote** à Jülich (Allemagne) qui bénéficie du soutien prépondérant de l'Allemagne. Cet exemple illustre le risque d'une fuite de la technologie suisse. Une **installation de démonstration** de la catégorie de taille juste supérieure sera construite et exploitée entre 2024 et 2026 en Espagne. Une étude de planification de cette installation bénéficie déjà du soutien apporté par le financement spécial du trafic aérien. Dans l'optique de la commercialisation, il existe un accord de coopération avec Swiss qui se fournira en carburant produit dans ces installations pour avitailler sa flotte. Le développement fructueux à ce stade de Synhelion illustre donc le potentiel de la technologie suisse. La suite du développement doit désormais contribuer à minimiser au plus vite les risques technologiques, afin de pouvoir déterminer plus précisément le potentiel de cette technologie. Si son potentiel devait se confirmer au niveaux des générations d'installations suivantes, une **première installation de production** pourrait être construite lors d'une prochaine étape entre 2025 et 2030. Cette installation ne sera pas encore rentable et présentera certains besoins de soutien le cas échéant.

 <ul style="list-style-type: none"> • Créée en 2016 par essaimage de l'EPF • Leader mondial dans la technologie des StL • Production annuelle prévue dès 2030 : 700 000 t de CAD 				
2010-20	<ul style="list-style-type: none"> • Prototypes (Zurich, Espagne) • Production de CAD en petites quantités • Conception de composants industriels 	\$	Encouragement par la Suisse, l'Allemagne et l'UE	TRL 1 ⇨ 5
2021-22	<ul style="list-style-type: none"> • Prototype installé sur une tour solaire à Jülich (DE) • Démonstration de la production de syngas 	\$	Participation de la Suisse : 0,33 million CHF, de l'Allemagne : 0,4 million EUR	TRL 5 ⇨ 6
2022-24	<ul style="list-style-type: none"> • Installation de démonstration à Jülich (DE) • Démonstration pour toute la chaîne de processus • Production de plusieurs tonnes par an 	\$	Participation de la Suisse : 0,75 million CHF, de l'Allemagne : 3,9 millions EUR	TRL 6 ⇨ 7
2024-26	<ul style="list-style-type: none"> • Installation de démonstration à proximité de Madrid (Espagne) • Début de la planification en 2022, début de la construction en 2024 • Démonstration de la production commerciale • Production d'environ 1000 tonnes par an 	\$	Aide à la planification par l'OFAC	TRL 7 ⇨ 9
		\$	Besoin d'un soutien pour la construction/l'exploitation	
		\$	Volume des investissements encore incertains (fourchette estimée : env. 20-40 millions CHF)	
		\$	Reprise de CAD par Swiss et par Lufthansa	

Figure 4 : Aperçu du développement d'une installation suisse de production de CAD par procédé StL. L'exemple de l'entreprise technologique suisse Synhelion SA

Contrairement au StL, le domaine PtL comporte nettement plus de technologies pertinentes et d'acteurs correspondants dans l'environnement international. Une étude de Transport & Environment⁶⁷ offre une vue d'ensemble pour l'Europe. Elle montre qu'il n'existe encore aucune capacité de production, seule une installation pilote étant en activité en Allemagne. Les _besoins de soutien sont donc importants pour obtenir une rapide mise à l'échelle. En Suisse, un **projet de recherche** conjoint de l'Empa et du

⁶⁷ Transport & Environment (2022)

PSI – SynFuels – court depuis 2021. D’une durée de trois ans, il a pour but de développer de nouveaux procédés de production des CAD synthétiques. L’entreprise suisse Metafuels est également active dans ce domaine : elle étudie un procédé de synthèse différent, passant par le méthanol, en lieu et place du procédé Fischer-Tropsch (cf. **Figure 5**). Au stade précoce, on peut souvent recourir à l’infrastructure existante pour de tels projets (par ex. la plateforme du PSI Energy System Integration, ESI). Mais une mise à l’échelle supplémentaire, telle qu’elle est probable ces prochaines années, requiert une nouvelle infrastructure. Une **installation pilote** pourrait, à titre de projet phare, permettre de regrouper les activités d’innovation suisses sur une plateforme de recherche. Outre le développement de nouvelles technologies, il est aussi possible de développer et d’intégrer la technologie existante en Suisse. Une **installation de démonstration locale** pourrait encore faire progresser le développement technologique et produire d’ores et déjà commercialement des carburants.

Plusieurs acteurs œuvrent actuellement, avec Airborn Fuels Switzerland et swiss aeropole, à l’évaluation de cas d’affaire dans ce domaine. Leur principal défi consiste à obtenir suffisamment d’énergie de sources renouvelables en plus de la production actuelle et sans charger davantage encore le système énergétique suisse. Une **installation de démonstration à l’étranger**, établie en un lieu plus propice à l’utilisation d’électricité renouvelable, représente probablement une option plus économique. Il est en particulier avantageux qu’une installation de démonstration soit construite sur un site qui se prête au passage ultérieur à une installation de production. S’agissant d’installations à l’étranger également, la technologie suisse est au cœur du soutien apporté par la Suisse. Pour le StL comme pour le PtL, le développement (non rentable) peut s’étendre jusqu’à une **première installation de production**, pour laquelle la Suisse peut envisager de fournir son soutien.

 <ul style="list-style-type: none"> • Créée en 2021 • Actif dans la synthèse de CAD à partir de méthanol • Objectif : remplacer le procédé inefficace de Fischer-Tropsch 			
2020-24	<ul style="list-style-type: none"> • Développement d’un catalyseur d’un type inédit • Optimisation du processus 	\$ Financement propre	TRL 1 ⇄ 3
2022-24	<ul style="list-style-type: none"> • Installation pilote au PSI • Objectif de certification comme CAD pour une incorporation ≤ 10 % • Rendement d’env. 100 l par jour 	\$ Besoins d’investissement d’env. 10 millions de francs \$ Des besoins de soutien à la construction/l’exploitation sont avérés	TRL 3 ⇄ 6
2024-26	<ul style="list-style-type: none"> • Installation de démonstration comme projet consécutif • Objectif de certification comme CAD pour une incorporation jusqu’à et au-delà de 50 % • Production d’env. 4000 tonnes par an 	\$ Volume d’investissements encore incertain (15-25 millions de francs attendus) \$ Des besoins de soutien à la construction/l’exploitation sont avérés	TRL 6 ⇄ 9

Figure 5 : Aperçu du développement d’une installation suisse de production de CAD par procédé PtL. L’exemple de l’entreprise technologique suisse Metafuels SA

Il est établi que **les ressources disponibles provenant des instruments existants ne suffisent pas** à couvrir ces besoins de soutien. On observe en particulier une lacune de financement dans le domaine allant des installations pilotes et de démonstration à l’introduction sur le marché. Au cours de ces phases, les fonds de soutien de loin les plus importants (contributions des hautes écoles et FNS) ne sont pas à disposition. De ce fait, le soutien fourni par les instruments restants est nettement moindre. Comme expliqué ci-dessus, il s’agit des phases actuelles de développement des CAD synthétiques. Le site web de l’OFEV « Paysage de l’innovation » fournit un aperçu graphique de cette lacune des fonds

de soutien existants⁶⁸. Comme il n'est pas possible d'attribuer clairement les ressources actuelles au domaine des CAD (cf. ch. 4.2), la lacune qu'elles comportent n'est pas précisément quantifiable. Le manque de ressources se chiffre entre 20 et 50 millions de francs par an, soit environ 10 % des moyens investis dans la promotion de la recherche énergétique en Suisse.

D'ici la réalisation d'un soutien supplémentaire, les instruments existants doivent être utilisés aussi efficacement que possible dans ce domaine. À cet effet, il faut prioriser ce thème en conséquence et coordonner tous les instruments de l'administration fédérale qui visent ce domaine. En font partie le financement spécial du transports aérien de l'OFAC de même qu'à l'OFEN, le programme pilote et de démonstration et SWEET (Swiss Energy Research for the Energy Transition). Dans ce contexte, on veille à ce que les activités d'encouragement soient coordonnées l'une avec l'autre en faisant coopérer étroitement les offices concernés. On estime entre 6 et 10 millions de francs les moyens annuels disponibles. Un tel montant permet de soutenir les installations pilotes et de recherche de même que les études de planification d'installations de démonstration et, le cas échéant, de production. Mais il ne sera guère possible de soutenir ces dernières à un stade ultérieur sur cette base.

Un soutien supplémentaire devrait être clairement de nature **subsidaire** et viser prioritairement à déclencher des investissements supplémentaires de l'industrie. L'activité promotionnelle devrait se limiter aux cas où des **effets supplémentaires** peuvent être obtenus comparativement aux projets existants (également à l'étranger). La mise à l'échelle supérieure de méthodes de production ne doit bénéficier d'un soutien que si elles respectent les **critères de durabilité** autorisant leur utilisation en Suisse (cf. ch. 0). Ce soutien supplémentaire doit correspondre à un **financement de départ**. Il faudra donc lever les mesures promotionnelles dès que la production totale de CAD permettra de couvrir les besoins de manière rentable ou que les investissements suffiront à ce développement.

D'ici là, il est crucial d'assurer la **compatibilité** avec les instruments existants, puisque ceux-ci devraient encore être utilisés dans le domaine des CAD. Au lieu de créer de nouveaux instruments, mieux vaudrait dès lors **perfectionner les instruments existants**. Le défi consiste alors à répondre aux exigences posées à des instruments qui peuvent changer fortement au cours des phases d'innovation. À mesure que la taille des installations s'accroît, le volume des investissements augmente, mais simultanément les risques d'investissement diminuent et les besoins de soutien correspondants se réduisent. En lieu et place de ressources à fonds perdus, demandées dans la phase initiale des projets de recherche, les cautions (par exemple) sont pertinentes s'agissant d'installations à un stade de développement ultérieur.

Le plus grand défi auquel fait actuellement face le développement des CAD est le défaut de **conditions-cadres** claires à long terme. Cet aspect concerne en particulier la promotion des ventes, la taille du marché dépendant de décisions politiques attendues. Le premier pas devrait consister à clarifier ce point. Pour compléter, il faudrait aussi qu'une décision soit prise quant à l'encouragement du développement (cf. chapitre 5). Dès que ces conditions seront réunies, il conviendra d'établir un concept promotionnel plus détaillé dans ce domaine. Ce concept devra tenir compte des développements propres à ce domaine dynamique et tenir compte de l'ensemble du processus de développement de manière à ce que la mise à l'échelle et les réductions d'émissions correspondantes puissent se réaliser.

⁶⁸ Source (état 2016): <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/formation/recherche-environnementale--mandat--objec-tifs--financement/paysage-de-l-innovation.html>

Moyennant une promotion résolue du développement, la Suisse peut fournir une grande contribution au développement des technologies de CAD existantes. Ainsi, les carburants d'aviation renouvelables nécessaires pourront être rapidement produits et utilisés. De plus, les acteurs suisses, dont certains sont d'ores et déjà leaders mondiaux, pourront maintenir et conforter leur avance. Cette situation, qui représente une grande opportunité pour la place scientifique et économique suisse, requiert toutefois un concept d'encouragement coordonné. Les instruments de soutien existants doivent être utilisés à cet effet jusqu'en 2025. Mais au-delà de 2025, les onéreuses installations de la génération suivante, plus grandes, requerront des moyens supplémentaires substantiels. Ces installations de deuxième génération doivent permettre aux technologies suisses de passer du laboratoire au stade d'installations pilotes et de démonstration avant d'être finalement utilisées comme installations de production dans le monde entier. Une contribution à l'approvisionnement de la Suisse en CAD et, ce faisant, à la réalisation des objectifs climatiques, est ainsi possible.

4.5 Critères de durabilité

Pour que les CAD remplissent effectivement le potentiel de réduction des charges environnementales et climatiques par rapport aux carburants fossiles, ils doivent répondre à certains critères de durabilité. Les critères pertinents pour l'aviation suisse sont ceux de la loi sur l'imposition des huiles minérales (Limpmin) et de la loi sur la protection de l'environnement (LPE), de l'UE et de l'OACI, ces deux dernières déterminant l'imputabilité au SEQE ou à CORSIA.

Dans l'**UE**, les critères visant les carburants et combustibles durables sont réglementés à l'art. 29 de la deuxième version de la directive sur les énergies renouvelables (Renewable Energy Directive, RED II)⁶⁹. Les aspects suivants y sont couverts :

- Les émissions de GES des carburants biogènes durant le cycle de vie doivent être inférieures d'au moins 65 % par rapport à celles du carburant fossile⁷⁰.
- L'utilisation de matières premières biogènes doit satisfaire à des exigences et critères complets visant la protection de la biodiversité, de la qualité des sols et, en particulier, des sols contenant d'importants stocks de carbone.
- Quant aux carburants synthétiques, une réduction des GES d'au moins 70 % par rapport au carburant fossile est prescrite durant leur cycle de vie.

Alors que ces directives s'appliquent dans tous les secteurs, celui du trafic aérien doit en outre connaître la restriction, prévue par l'initiative ReFuelEU Aviation, que les CAD provenant de biomasse spécifiquement cultivée ne peuvent pas être pris en compte s'agissant de l'obligation d'incorporation⁷¹.

Dans le cadre de **CORSIA**, l'utilisation de carburants durables peut conduire à la réduction de l'obligation de compensation⁷². Cette réduction correspond à la part des émissions évitées durant le cycle de vie du carburant durable par rapport au carburant fossile classique. Pour qu'un carburant puisse être pris en compte, il doit répondre aux directives suivantes :

- La réduction des émissions de GES durant le cycle de vie, par rapport au carburant fossile, doit être d'au moins 10 %.
- L'utilisation de matières premières biogènes doit répondre à des directives visant la protection de la qualité des sols, notamment la protection des sols contenant d'importants stocks de carbone.

De plus, d'autres directives relatives à la protection de l'environnement et à des thèmes sociaux doivent être respectées.

En Suisse, au cas où un carburant non fossile⁷³ devait être exempté de l'impôt sur les huiles minérales, les exigences de l'art. 12b de la **loi sur l'imposition des huiles minérales (Limpmin)** et de l'art. 19c de l'ordonnance sur l'imposition des huiles minérales (Oimpmin) (selon leur libellé actuel jusqu'à la fin de 2024) s'appliqueraient en outre (cf. ch. 4.2) :

- Durant le cycle de vie, les émissions de GES doivent être réduites d'au moins 40 % par rapport au carburant fossile.

⁶⁹ Directive (UE) 2018/2001 du Parlement européen et du Conseil du 11 décembre 2018 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables

⁷⁰ Pour les installations mises en exploitation avant 2021, le taux de réduction minimal est ramené à 60 % ; ce taux n'est même que de 50 % pour les installations mises en exploitation avant 2015.

⁷¹ La seule exception concerne l'huile d'algues issue d'algues cultivées sur terre : ce procédé ne requiert pas de terres fertiles et, de ce fait, il ne constitue pas une concurrence directe à la production de denrées alimentaires et de fourrages.

⁷² OACI (2018)

⁷³ Dans la Limpmin, l'Oimpmin et la loi sur la protection de l'environnement (LPE), les carburants durables sont actuellement compris sous le terme de « biocarburants ».

- Durant le cycle de vie, les charges supplémentaires globales sur l'environnement ne doivent pas excéder 25 % par rapport au carburant fossile.
- Il est interdit de cultiver les matières premières biogènes sur des surfaces qui, réaffectées après 2007, présentaient avant cette réaffectation un important stock de carbone ou une grande biodiversité.
- En outre, ces surfaces cultivées doivent avoir été acquises en pleine propriété.
- Les carburants doivent être produits dans des conditions socialement acceptables.
- De plus, le Conseil fédéral peut introduire l'exigence que la production ne soit pas au détriment de la sécurité alimentaire.

De plus, l'art. 35d de la **loi sur la protection de l'environnement (LPE)** prévoit actuellement que le Conseil fédéral peut édicter des exigences écologiques et sociales à la mise en circulation si des carburants non fossiles sont commercialisés « en grandes quantités » sans remplir ces critères. Dans la nouvelle version de loi sur le CO₂, les critères de durabilité applicables en Suisse quant au taux d'incorporation doivent être harmonisés avec ceux de l'UE (cf. chapitre 5).

4.6 Modèles commerciaux

La chaîne logistique – de la production à l'avitaillement – s'est avérée constituer un défi en ce qui concerne l'utilisation des CAD, en faibles quantités à ce stade. Or, la traçabilité doit être garantie pour que les utilisateurs puissent faire valoir le recours aux CAD dans le cadre des mesures basées sur le marché (cf. ch. 4.1). À cette fin, il est en principe possible de **séparer physiquement** les CAD tout au long de la chaîne d'approvisionnement. Mais une telle mesure implique de constituer une infrastructure parallèle, ce qui est inefficace économiquement et écologiquement, en particulier pour de petites quantités. Il faudrait donc, dans le cadre de la mise à l'échelle supérieure du recours aux CAD, viser une utilisation aussi efficace que possible des infrastructures déjà affectées au transport de kérosène fossile. Afin d'assurer la traçabilité de la part durable des mélanges de carburant au long de la chaîne d'approvisionnement, on peut employer divers systèmes commerciaux déjà utilisés fructueusement dans d'autres secteurs⁷⁴. Il faut empêcher en tout cas une double imputation des quantités de CAD fournies quel que soit le système. À cet effet, il importe de distinguer les CAD des carburants fossiles et des carburants non fossiles issus de matières premières qui ne respectent pas les critères de durabilité.

Une option de solution évidente serait de mélanger les CAD et les autres carburants une seule fois et à injecter ce **mélange** dans les infrastructures existantes. La part durable resterait ainsi clairement traçable. Par exemple, on peut charger un tel mélange sur un train de marchandises.

Une autre piste consiste à attribuer une certaine part de CAD, qui peut différer de la part physique effective, à un mélange de deux produits et à la distribution subséquente des sous-quantités respectives. Dans cette option, il faut toutefois que la quantité totale de carburant qualifiée de durable correspondent à la quantité précédant le mélange. On appelle ce système **méthode du bilan massique**⁷⁵. On peut y recourir notamment pour les systèmes de distribution de carburant aux aéroports. Une compagnie aérienne paie une livraison de CAD et l'incorpore au dépôt de carburant (souvent unique) de l'aéroport. En adoptant l'approche du bilan massique, cette compagnie aérienne peut s'attribuer intégralement l'utilisation de cette fourniture de CAD et la réduction des émissions de CO₂ correspondante, même si tous les utilisateurs de cet aéroport en utilisent une petite part. Ce système implique une surveillance de toutes les étapes de transport, mais les infrastructures peuvent être intégralement utilisées.

⁷⁴ On trouve par exemple des systèmes commerciaux permettant de tracer les parts de produit durables dans les marchés du gaz et de l'électricité de même que dans le marché de l'huile de palme.

⁷⁵ Suivant le contexte, cette expression n'est utilisée que pour différencier les carburants non fossiles en fonction de leurs caractéristiques de durabilité, notamment dans le contexte de l'UE conformément à la directive sur l'énergie produite à partir de sources renouvelables (directive 2018/2001).

Un système plus avancé, **Book & Claim**, prévoit de ne pas surveiller chaque étape de transport, mais seulement les entrées et les sorties des infrastructures de transport. Les flux physiques sont ainsi dissociés largement du commerce (virtuel) des certificats de durabilité.

Les possibilités d'appliquer ces systèmes commerciaux dépendent du système d'imputation pour l'utilisation des CAD. Le **Tableau 3** en fournit un aperçu. De manière générale, en cas d'importation en Suisse (ou d'exportation à partir de la Suisse) de mélanges de CAD et de carburants fossiles, la part physique de CAD doit être déclarée correctement. Le système Book & Claim ou la méthode du bilan massique ne sont donc pas possibles s'agissant de CAD et de kérosène fossile. Tel est le cas de tous les systèmes d'imputation qui requièrent qu'un avitaillement en CAD soit effectué en Suisse. Le droit douanier, qui exige la déclaration correcte de marchandises physiquement distinguables, est déterminant à cet égard⁷⁶. En revanche, la plupart des systèmes d'imputation (à l'exception de l'allègement de l'impôt sur les huiles minérales, cf. ci-dessous) permettent d'appliquer la méthode du bilan massique à différentes parts non fossiles au niveau de la production, du transport ou de l'importation. L'utilisation de tels ou tels systèmes commerciaux en Suisse dépendra du système d'imputation applicable, les systèmes commerciaux pouvant s'appliquer par analogie aux parts non fossiles et aux parts fossiles.

Un **allègement de l'impôt sur les huiles minérales** exige que l'avitaillement en CAD soit effectué en Suisse, ce qui implique soit une importation, soit une production locale de CAD. Selon l'OFDF, il est nécessaire de distinguer physiquement – tout au long de la chaîne logistique, de la production à l'utilisation – les CAD des carburants qui ne respectent pas les critères de durabilité au sens de la Limpmin. Cette condition, couplée à la certification séparée des produits répondant aux exigences de la Limpmin, s'est avérée constituer un obstacle, puisque seule la Suisse pose ces deux exigences sous cette forme. Selon les indications données par des acheteurs, aucun producteur n'est à ce jour en mesure de fournir des CAD séparément avec les certificats correspondants. Jusqu'ici, les importations de CAD n'ont été réalisées qu'en renonçant à l'allègement fiscal⁷⁷. Le système commercial intérieur de la Suisse qui serait nécessaire à un allègement fiscal est également ouvert actuellement.

Les dispositions du SEQE de l'UE sont déterminantes concernant la prise en compte dans le cadre du **système suisse d'échange de quotas d'émissions**¹⁹. Il en découle qu'une prise en compte en Suisse exige un avitaillement en Suisse. Sur le territoire national, il est possible d'utiliser la méthode du bilan massique pour les parts de CAD et les parts de carburants fossiles. Les mêmes dispositions sont prévues dans l'éventualité d'une future **obligation d'incorporation** (cf. ch. 5.2), sous réserve du complément qu'outre la méthode du bilan massique, le système Book & Claim doit aussi être applicable en Suisse.

La prise en compte de la réduction d'émissions induite par les CAD dans **CORSIA** est soumise aux systèmes de certification de la durabilité approuvés dans ce cadre (**CORSIA Approved Sustainability Certification Schemes**). Deux systèmes sont actuellement admis (ISCC, RSB), qui permettent l'un et l'autre la méthode du bilan massique pour les parts de CAD et les parts de carburants fossiles. La compagnie aérienne est responsable d'éviter les imputations doubles. L'indication du CAD avitaillé figure dans la déclaration d'émissions destinée à l'État d'origine de la compagnie aérienne, indépendamment du lieu de l'avitaillement. Le mécanisme CORSIA présente ainsi certaines similitudes avec le système Book & Claim. Par conséquent, tant les acteurs suisses que ceux dont le siège est à l'étranger peuvent soit importer des CAD en Suisse pour les y utiliser, soit utiliser des CAD à l'étranger.

La prise en compte des CAD est aussi possible dans d'autres **systèmes librement adoptés**, par exemple pour suivre la réalisation des objectifs de réduction des émissions des entreprises. Dans ces

⁷⁶ La même restriction s'applique à l'importation de biogaz ou de gaz naturel, puisqu'on peut les distinguer. Par contre, il est possible d'importer virtuellement des parts de courant vert, puisqu'elles ne se distinguent pas par leurs propriétés physiques.

⁷⁷ Pour les compagnies aériennes, ce point est de peu d'importance, puisque la majeure partie du carburant est consommée par le trafic aérien international, qui est déjà exonéré de l'impôt sur les huiles minérales. Cet aspect revêt davantage d'importance pour les acheteurs qui opèrent en Suisse de même que dans l'aviation générale et l'armée de l'air.

systèmes, les exigences propres aux systèmes constituent l'élément déterminant la prise en compte de l'utilisation de CAD. En principe, un avitaillement local n'est pas nécessaire. Autrement dit, en l'absence d'un avitaillement local en CAD, du kérosène d'origine fossile est importé, taxé et utilisé, mais une utilisation de CAD est comptabilisée dans le système concerné. En contrepartie, la quantité de CAD correspondante est utilisée à l'étranger, mais sans que cette utilisation n'entraîne le paiement d'un supplément de prix sur le kérosène fossile ni que cette consommation de CAD puisse être imputée à un système.

Il est possible que les dispositions régissant le commerce des CAD dans l'UE évoluent encore au cours des années à venir. Le Parlement européen a ajouté au projet ReFuelEU Aviation de la Commission européenne la possibilité d'un mécanisme de flexibilisation. Selon la forme que prendra ce mécanisme, il pourrait permettre la méthode du bilan de masse ou le système Book & Claim à l'intérieur de l'UE. En outre, à l'instar de la proposition de loi suisse sur l'obligation de mélange), l'UE prévoit de permettre la méthode du bilan de masse pour des CAD répondant à divers critères de durabilité.

Instrument	Prise en compte sans avitaillement local	Prise en compte avec avitaillement local	Système commercial pour la production et le transport jusqu'à l'importation		Système commercial à l'intérieur de la Suisse
			pour divers composants non fossiles	composants fossiles	
Allègement de l'impôt sur les huiles minérales	Impossible	Possible	Séparation nécessaire	Mélange possible	Incertain
Obligation de mélange selon le projet de nouvelle version de la loi sur le CO ₂	Impossible	Possible	Méthode du bilan de masse possible	Mélange possible	Système Book & Claim possible
SEQE	Uniquement possible dans l'État de l'avitaillement, si UE	Possible en Suisse	Méthode du bilan de masse possible	Mélange possible	Méthode du bilan de masse possible
CORSIA pour les compagnies dont le siège est à l'étranger	Uniquement possible dans l'État d'origine	Uniquement possible dans l'État d'origine	Méthode du bilan de masse possible	Mélange possible	Méthode du bilan de masse possible
CORSIA pour les compagnies dont le siège est en Suisse	Possible en Suisse	Possible en Suisse	Méthode du bilan de masse possible	Mélange possible	Méthode du bilan de masse possible
Systèmes librement choisis	Globalement possible	Possible en Suisse	Méthode du bilan de masse possible	Mélange possible	Système du Book & Claim possible

Tableau 3: Aperçu de systèmes commerciaux autorisés en Suisse en relation avec diverses mesures basées sur le marché

En Suisse, l'OFEV, l'OFDF, l'OFAC et l'OFEN travaillent actuellement à une plateforme destinée au traçage en Suisse des carburants provenant de sources renouvelables : le **registre des carburants et combustibles renouvelables**. Ce registre doit comprendre l'ensemble des carburants et des combustibles durables négociés en Suisse et remplacer les systèmes actuels pour certaines de ces matières. Il pourra donc servir aussi en particulier à établir des bilans de masse ou pour le système Book & Claim. Le suivi doit être possible à partir de l'importation (ou du lieu de production local) et compatible avec la loi sur l'imposition des huiles minérales, le SEQE, CORSIA et les futurs taux de mélange. L'établissement et l'exploitation du registre sont ancrés dans la loi sur l'énergie. La mise en service est actuellement prévue pour 2024.

5 Stratégie de l'OFAC pour la promotion des CAD

Ce chapitre présente les objectifs et mesures par lesquels la Suisse peut promouvoir le développement et l'utilisation de carburants d'aviation durables afin de réduire autant que possible les effets climatiques du trafic aérien. Le recours aux CAD constitue la mesure la plus prometteuse, mais non pas la seule, en vue de réaliser les objectifs de la Stratégie climatique à long terme de la Suisse. D'autres mesures doivent aussi être mises en œuvre dans le secteur et au-delà (cf. chap. 2). Conformément à la Stratégie climatique à long terme de la Suisse, les objectifs et mesures suivants valent également jusqu'en 2050 dans le domaine des CAD (cf. ch. 1.1 et 1.2). Ils devront être régulièrement adaptés aux développements techniques et réglementaires.

Le 17 septembre 2021, le Conseil fédéral a chargé le DETEC d'élaborer une nouvelle version de la loi sur le CO₂ (« loi fédérale sur la réduction des émissions de CO₂ »). Le 16 septembre 2022, le Conseil fédéral a adopté le message relatif à la révision de la loi sur le CO₂. Le ch. **Error! Reference source not found.** montre comment créer avec ce projet les bases légales en vue de mettre les

5.1 Objectifs

1. Épuiser le potentiel des CAD dans la réduction de l'impact climatique du trafic aérien

La Suisse doit épuiser le potentiel des CAD pour réduire les émissions du trafic aérien, conformément aux analyses réalisées dans le cadre de la feuille de route suisse « Road map Sustainable Aviation »¹¹, et réduire ainsi d'au moins 60 %⁷⁸ à l'horizon 2050 les émissions de CO₂ fossiles générées par l'aviation suisse (par rapport à un cas de figure où aucune mesure ne serait prise). Les émissions restantes doivent être compensées en recourant à d'autres mesures comme l'amélioration de l'efficacité, l'utilisation de modes de propulsion alternatifs et le cas échéant les NET.

2. Soutenir la mise à l'échelle de systèmes de production de CAD durables et efficaces en termes de coûts

La Suisse apporte une contribution à une mise à l'échelle rapide de la production des CAD. Les économies d'échelle doivent ainsi être exploitées aussi rapidement que possible pour abaisser les coûts de production. Dans ce contexte, des critères de durabilité sévères doivent être systématiquement respectés pour limiter les effets climatiques et environnementaux. Concrètement, ces conditions signifient que la priorité va aux carburants d'aviation synthétiques et qu'aucun carburant d'aviation biogène de première génération ne sera utilisé.

3. Assouplir les conditions-cadres de l'utilisation des CAD

Divers obstacles compliquent actuellement l'utilisation à large échelle des CAD. Cette remarque concerne en particulier la certification, de la production à l'utilisation en passant par l'importation (sans part fossile) des réacteurs. La Suisse s'emploie activement à réduire au mieux ces entraves en tenant compte au mieux des développements sur le plan international.

⁷⁸ L'objectif reflète les conclusions d'études suisses (Ecoplan [2021]), européennes (Royal Netherlands Aerospace Centre [2021]) et internationales (ICAO CAEP [2022], Air Transport Action Group [2020])

5.2 Mesures

1. Croissance ambitieuse du marché de vente des CAD par une obligation d'incorporation coordonnée sur le plan européen

À la fin de 2021, les premières livraisons de CAD avaient été importées en Suisse et les premiers avitaillements avaient eu lieu. Mais pour atteindre le premier objectif et abaisser ainsi le potentiel élevé, l'impact climatique du trafic aérien (cf. ch. 2.2 et 1.4), il est nécessaire d'accélérer la croissance du marché des ventes.

Pour établir un marché des ventes de CAD en Suisse, il faut introduire une mesure qui rende l'avitaillement en CAD économiquement intéressant pour tous les fournisseurs et utilisateurs de carburants d'aviation. Une obligation d'incorporation (cf. ch. 4.3) est la mesure la mieux appropriée pour servir de base à la stabilisation du marché des ventes. Elle peut permettre de réduire les risques liés à l'investissement dans les installations de production de CAD. Ainsi, les fournisseurs et les acheteurs de carburant d'aviation sont responsables du développement d'un approvisionnement économique correspondant en CAD. Il manque actuellement en Suisse une base légale permettant l'obligation d'incorporer des CAD dans le secteur du trafic aérien.

La conception d'une obligation d'incorporation doit être compatible avec les directives européennes y relatives. S'en écarter entraînerait des distorsions de la concurrence⁷⁹, ce qui comporterait le risque de pratiques d'avitaillement opportunistes et d'un trafic d'évitement dans les pays étrangers voisins (cf. ch. 4.3), des conséquences qui impliquent une augmentation des émissions. En particulier, il faut coordonner les critères de durabilité des CAD avec les critères en usage dans l'UE. Des écarts menaceraient la disponibilité de CAD sur le marché suisse, car notre pays dépend fortement des importations⁸⁰. Une obligation d'incorporation harmonisée à l'échelle de l'Europe induit aussi des contraintes variables sur les vols intercontinentaux : l'obligation d'incorporation de CAD sur un vol avec escale hors d'Europe ne s'appliquerait qu'à la première partie du vol alors qu'elle s'appliquerait intégralement dans le cas d'un vol sans escale.

En outre, un soutien spécifique aux CAD synthétiques est nécessaire pour que leur production passe rapidement à l'échelle supérieure et qu'elle devienne ainsi rentable aussi tôt que possible. Cette mesure doit permettre d'éviter un verrouillage sur les carburants biogènes dont la disponibilité est limitée. Le niveau du taux doit être fixé plusieurs années à l'avance afin de garantir une sécurité suffisante des investissements pour les producteurs, les fournisseurs et les utilisateurs de CAD (compagnies aériennes). En contrepartie, il faut prendre des dispositions pour le cas d'une éventuelle disponibilité insuffisante des carburants d'aviation durables.

⁷⁹ Il importe en particulier que les aéroports nationaux soient soumis à des conditions semblables, puisque l'Euroairport propose également des vols régis par le droit français des transports. On observe aussi des effets éventuels de distorsion du marché dus à une obligation d'incorporation dans le segment des vols long courrier.

⁸⁰ Comme une forte demande est de toute manière probable en Europe, les producteurs de CAD fourniraient la Suisse au mieux en facturant les coûts supplémentaires des CAD présentant des spécifications divergentes.

La proposition de nouvelle version de la loi sur le CO₂ soumise par le DETEC contient une obligation d'incorporation (art. 28j à 28n). Les exigences applicables aux CAD et le taux d'incorporation doivent être réglés par voie d'ordonnance, l'option d'un sous-quota pour les CAD synthétiques étant aussi prévue. Conformément aux explications de cette stratégie (et des plans de l'UE), les carburants d'aviation biogènes ne doivent être admis que s'ils ne concurrencent pas la production de denrées alimentaires et de fourrages (cf. ch. **Error! Reference source not found.**). Cette précaution couvre la problématique visée dans la Limpin par les critères de durabilité sociale. L'art. 35d LPE régit les critères de durabilité pour tous les carburants et combustibles durables. Le taux d'incorporation et les CAD admis dans la perspective de la durabilité s'orientent largement selon les développements européens (on veille en particulier à la compatibilité avec l'initiative ReFuelEU Aviation). L'obligation d'incorporation vise tous les fournisseurs de carburants d'aviation en Suisse, quel que soit l'aérodrome où l'avitaillement s'effectue. On évite ainsi une distorsion du marché. Pour assurer l'application de l'obligation d'incorporation, des sanctions seront infligées aux fournisseurs de carburants d'aviation qui ne s'acquitteraient pas de leur obligation. Par ailleurs, on tient compte des pratiques d'avitaillement opportunistes: des mesures ou des sanctions sont prévues au besoin. Seul le kérosène est concerné, l'essence d'aviation étant exceptée parce qu'il n'y a pas encore pour elle d'alternative durable et que le faible chiffre d'affaires ne justifie pas le coût supplémentaire important d'une telle mesure. La proposition de loi prévoit, à titre de mesure d'encouragement supplémentaire, de proroger l'allègement de l'impôt sur les huiles minérales pour les CAD, ce qui réduit

Il faut aussi s'attendre, le cas échéant, à ce que la reprise de l'obligation d'incorporation de l'UE soit demandée dans le cadre de l'accord sur le transport aérien. Les conséquences précises d'une telle reprise sont encore incertaines à ce stade, car l'obligation d'incorporation de l'UE n'existe que sous forme d'une proposition de la Commission européenne qui est encore susceptible d'évoluer (cf. ch. 4.3). Il faut cependant partir du principe qu'en pareil cas, la réglementation de l'obligation par la loi sur le CO₂ serait caduque. En l'absence de l'actuelle proposition de l'UE, l'objectif de cette stratégie serait atteint, puisque l'UE prévoit aussi une ambitieuse mise à l'échelle avec une promotion explicite des CAD synthétiques et des sanctions concrètes. Grâce à la coordination paneuropéenne des taux d'incorporation, le danger de pratiques d'avitaillement opportunistes est minime. On ne sait également pas au juste si l'UE tiendrait à ce que sa directive soit reprise dès lors que la Suisse disposerait d'un instrument équivalent, comme il apparaît dans la présente section.

2. Promotion complète de projets de développement de CAD promoteurs impliquant la Suisse

Les scientifiques et les représentants de l'industrie sont d'accord pour admettre qu'une mise à l'échelle supérieure fructueuse des CAD nécessite un soutien au développement, outre des mesures du côté des repreneurs. C'est pourquoi, dans ce rapport, l'OFAC présente les besoins de soutien au développement (cf. ch. 4.4).

Des améliorations sensibles en termes d'efficacité des coûts et d'effet climatique sont ainsi probables au cours de la mise à l'échelle de la production. La mise à l'échelle, en particulier celle des méthodes de production des CAD synthétiques, qui n'ont pas encore été mises en œuvre à l'échelle industrielle, devrait donc être accélérée aussi rapidement que possible. Un défaut de soutien mettrait en péril la disponibilité de CAD en quantité suffisante, ce qui entraînerait une dépendance intolérable pour atteindre les objectifs climatiques. Cependant, un financement de départ résolu à l'échelle nationale recèle de grandes opportunités : la Suisse dispose d'institutions de recherche et d'entreprises dont certaines sont des leaders mondiaux dans ce domaine.

Les instruments actuels ont apporté une contribution essentielle à l'état présent de la recherche suisse, qui est leader mondial à certains égards dans le domaine des CAD. Mais les instruments d'encouragement disponibles jusqu'ici ne suffiront pas pour les phases de développement au cours des années à venir. Or, justement, le domaine des installations pilotes et de démonstration dispose actuellement du

moins de ressources. Un soutien supplémentaire peut générer en l'occurrence une multiple valeur ajoutée : premièrement, la place de la recherche s'en trouve renforcée ; deuxièmement, l'économie bénéficiée des exportations de technologies développées en Suisse dans ce marché à forte croissance. Une coopération du monde de la science, de l'industrie et de la Confédération est nécessaire à cet effet. Si une large part des investissements doit venir de l'industrie, la Confédération se doit d'intervenir à titre subsidiaire pour réduire les risques technologiques à un stade précoce et pour générer un effet de levier en déclenchant des investissements supplémentaires. Il faut orienter les mesures d'encouragement vers cet objectif et les lever dès que seront établies les technologies capables de couvrir écologiquement et économiquement les besoins en carburant d'aviation. Dans ce contexte, il s'agit d'assurer une interaction avec les instruments d'encouragement existants de même qu'avec la promotion des ventes. Les critères de durabilité doivent s'appliquer également aux installations pilotes et de démonstration. Le carburant d'aviation produit en Suisse dans le cadre de projets doit donc pouvoir s'écouler sur le marché suisse.

Il faut coordonner les instruments actuels de la Confédération pour que les activités promotionnelles soient efficaces. Tel fut déjà le cas dans le cadre de l'appel d'offres SWEET de l'OFEN concernant les carburants renouvelables : les échanges soutenus entre l'OFEN, l'OFAC et armasuisse ont permis à cet appel d'offres de prendre en compte les intérêts de tous les offices concernés. C'est ainsi que, selon le plan d'action publié « Énergie et climat », le DDPS confère un rôle essentiel aux carburants (d'aviation) durables dans la réduction des émissions⁵⁵ et qu'il prévoit de l'utilisation de CAD. Une production de CAD en Suisse peut représenter une valeur ajoutée pour le DDPS en qualité de repeneur, puisqu'elle réduit la dépendance d'approvisionnement envers l'étranger. Il faut déjà tenir compte de cette valeur ajoutée supplémentaire en ce qui concerne les installations de démonstration en Suisse. Le financement spécial du trafic aérien de l'OFAC peut aussi fournir une contribution promotionnelle : les CAD représentent une priorité de l'actuel programme pluriannuel. Plusieurs projets ont déjà bénéficié d'un soutien dans ce domaine.

La nouvelle version de la loi sur le CO₂ prévoit aussi un soutien supplémentaire au développement des CAD synthétiques. Ce soutien est ancré à l'art. 103b de la loi fédérale sur l'aviation (LA). Il est prévu de relever le plafond par un soutien annuel de 20 millions de francs. L'al. 3 définit les critères qui caractérisent les mesures particulièrement prometteuses. Celles-ci doivent notamment permettre une réduction durable des émissions de GES, avoir une efficacité des coûts à long terme et présenter un potentiel d'application et de succès important. En font en particulier partie les projets disposant de partenaires tout au long de la chaîne de création de valeur. La priorité doit en outre être donnée à la technologie suisse et à la création de valeur en Suisse. Cependant, il est explicitement prévu que des installations puissent être aussi soutenues à l'étranger.

Parallèlement au traitement de la nouvelle version de la loi sur le CO₂ au Parlement, l'OFAC, l'OFEV et l'OFEN s'emploient déjà à concrétiser l'utilisation de potentielles ressources supplémentaires. Ces ressources doivent renforcer si possible des instruments existants plutôt que de contribuer à en créer un nouveau. Dans ce contexte, il faut en particulier prêter attention à l'évolution des exigences posées aux instruments d'encouragement au cours des phases de développement.

3. Soutien actif de la coopération entre tous les acteurs impliqués aux niveaux national et international

La coordination avec les mesures environnementales déjà existantes et planifiées dans le domaine du trafic aérien est décisive en ce qui concerne l'efficacité des instruments (obligation d'incorporation et promotion du développement). Dans cette perspective et compte tenu du troisième objectif de cette stratégie, ces mesures sont complétées par des tâches de soutien de l'administration fédérale.

La **mise en réseau des acteurs suisses** en fait partie. Eu égard au rôle essentiel déjà mentionné du développement des CAD synthétiques en Suisse, il s'agit surtout de fédérer les capacités d'innovation présentes en Suisse. En ce sens, une initiative a déjà été lancée pour coordonner les instituts suisses actifs dans la recherche, dans la branche de l'énergie et dans la branche de l'aéronautique.

Au sein de l'administration fédérale, **l'établissement du registre national des combustibles et carburants renouvelables** est proche. Ce registre, qui est rattaché à l'OFEV et à l'OFEN, facilitera aussi dans le domaine des carburants d'aviation le traçage des livraisons de carburants et leur prise en compte pour les mesures basées sur le marché. Le traitement des entraves à l'importation des CAD (cf. ch. 0) est aussi concerné.

À long terme, il est possible qu'un **mécanisme de flexibilisation** entre en vigueur (cf. explications au ch. 4.6). En cette matière, l'administration fédérale doit poursuivre et le cas échéant soutenir des développements correspondants de manière à ce qu'un système opérationnel soit accessible également pour la Suisse.

Au niveau international, il est nécessaire d'assurer un **accompagnement du développement et de la certification** des nouveaux systèmes de production, réacteurs et systèmes d'aéronef dans le domaine des CAD. Concrètement, cet accompagnement est effectué par des représentants de l'industrie et au sein d'organismes internationaux correspondants où des experts de l'OFAC et de l'OFEN représentent la Suisse. De plus, il faut **soutenir la coopération (facilitation) au niveau international**. Il s'agit d'une contribution supplémentaire à la réalisation du deuxième objectif. Dans ce contexte, on mise en particulier sur le développement de CORSIA et d'autres instruments semblables, on recueille de nouvelles connaissances sur les effets environnementaux des CAD (en particulier sur les émissions autres que de CO₂) et l'on identifie les besoins de promotion concernant les projets internationaux dans le domaine des installations de démonstration et de production destinées aux CAD.

Cette mesure n'exige pas d'adaptation des conditions-cadres légales, raison pour laquelle le projet de loi ne contient pas d'article y relatif.

Annexe A. Systèmes de production de réservoirs d'énergie alternatifs

La présente annexe contient une analyse approfondie des solutions de stockage d'énergie alternatives dans l'aviation ainsi que des activités actuelles et planifiées de divers acteurs dans ce sens.

A.1. Besoins en énergie et en ressources

Les besoins en ressources liés à l'énergie primaire, au sol, à l'eau et aux matières premières constituent un important facteur dans la mise en œuvre de solutions de stockage d'énergie alternatives. Alors que les sources d'énergie primaire (soleil, vent) sont globalement disponibles en surabondance, leur utilisation implique quant à elle d'importants besoins de matières premières et des coûts de production, des besoins qui entrent en concurrence avec ceux d'autres secteurs. De ce fait, d'importants besoins en énergie ou en ressources peuvent fortement limiter le potentiel d'une technologie. Même si les données disponibles ne sont pas encore suffisantes pour comparer toutes les approches, des conclusions importantes sont d'ores et déjà possibles.

S'agissant des besoins en énergie primaire, les taux d'efficacité de toutes les étapes de processus sont déterminants et, de ce fait, leur développement est au cœur de l'attention. En principe, le classement est clair : si l'on peut recourir directement à la production électrique sans stockage en amont pour charger les batteries, les avions électriques à batterie consomment le moins d'énergie primaire. Viennent ensuite les avions à hydrogène, pour lesquels seule l'efficacité de l'électrolyse et de la compression ou de la liquéfaction joue un rôle. Les procédés PtL et StL suivent, car ils requièrent en outre du CO₂ comme matière première et comptent des étapes de processus supplémentaires. Les systèmes de production de CAD biogènes ferment la marche, car les processus biologiques équivalents sont moins efficaces.

En revanche, observer les taux d'efficacité ne suffit pas pour évaluer les besoins en énergie totaux, puisque toutes les variantes ne requièrent pas la même quantité d'énergie pour un vol : par exemple, les avions électriques à batterie et à hydrogène sont probablement significativement plus lourds que leurs équivalents propulsés grâce aux réservoirs d'énergie que constituent les carburants liquides. Ainsi, une étude actuelle⁸¹ calcule pour les avions long courrier à hydrogène une masse supérieure de 23 %, qui implique des besoins en énergie plus importants de 42 %. Des chiffres plus précis ne seront probablement pas disponibles avant l'introduction sur le marché d'appareils commerciaux dotés de réservoirs d'énergie alternatifs.

A.2. Impact climatique

L'exploitation des avions dotés de batteries cause le moins d'émissions pour autant que l'électricité utilisée présente une faible intensité en CO₂. Mais l'incertitude n'est pas levée quant à l'importance des besoins en matières premières pour l'ensemble de la chaîne cinématique électrique, la production de la batterie et l'infrastructure de chargement. Ces besoins dépendent de l'intensité en CO₂ de l'extraction des matières premières et de leur futur recyclage, des sources d'énergie utilisées pour produire la batterie et de la durée de vie de celle-ci. Pour les batteries ou la chaîne cinématique électrique, les besoins en matières premières sont considérables, une large part de celles-ci devant être extraites du sol pour

⁸¹ McKinsey & Company (2020).

la première fois. Il faut aussi tenir compte de l'infrastructure de chargement, y compris les dispositifs de stockage permettant de fournir de grandes capacités de chargement électrique. Comme des systèmes adéquats font encore défaut pour l'aviation commerciale, il n'est pas encore possible de se prononcer définitivement sur les carburants renouvelables en regard du coût qu'ils impliquent.

Pour les aéronefs propulsés à l'hydrogène également, l'intensité en CO₂ de l'énergie primaire importe, mais d'autres facteurs sont aussi déterminants en l'occurrence : si les aéronefs à hydrogène n'émettent guère de CO₂, la quantité de vapeur d'eau qu'ils produisent est plus importante que celle des aéronefs à propulsion classique. La vapeur d'eau rejetée peut éventuellement renforcer la formation de traînées de condensation et de cirrus ou l'absorption de leur rayonnement thermique et avoir un important effet sur le climat. Ce phénomène dépend toutefois fortement de l'altitude de vol et, s'agissant d'appareils à hydrogène, il n'a pas encore été précisé par des mesures. À ceci s'ajoute, lors de la combustion dans les turbines à gaz, l'émission d'oxydes d'azote : leur quantité dépendant de la construction précise de la turbine, elle est encore inconnue. Dans le cas de piles à combustible, il n'y a pas d'émission d'oxydes d'azote, mais les systèmes actuellement disponibles ont une puissance limitée, ils sont plus lourds et ils augmentent ainsi la consommation énergétique de l'aéronef.

La Figure 6 offre un aperçu de la réduction réalisable des effets climatiques dus aux émissions. La réduction est caractérisée comme suit : 0 (pas de changement), - (réduction partielle), -- (réduction nette), --- (élimination) ou ? (changement peu clair).

CO ₂	PM	NO _x	H ₂ O	Total	
--	---	---	---	--	Batterie électrique
--	---	?	?	-	Hydrogène liquide
--	-	o	o	--	Power to Liquid (PtL)
--	-	o	o	--	Sun to Liquid (StL)
-	-	o	o	-	Biomass to Liquid (BtL)
---	o	o	o	---	Technologies d'émission négative (NET)

Figure 6 : Aperçu qualitatif de la réduction nette des effets climatiques dus aux émissions (CO₂ et non-CO₂) grâce à l'utilisation des diverses approches technologiques

A.3. Besoins de développement

Aéronefs électriques à batterie

La densité énergétique – c'est-à-dire le poids et le volume revendiqués par le stockage de l'énergie nécessaire – est décisive en ce qui concerne l'adéquation d'une solution de stockage d'énergie pour les aéronefs commerciaux. Les batteries à haute performance aujourd'hui disponibles sont extrêmement grandes et lourdes par rapport au kérosène : 1 kg du système de batterie total ne permet de stocker que

1/60 de l'énergie du kérosène (le ratio étant de 1/20 par m³)⁸². Certes, l'efficacité des moteurs électriques peut atteindre le double de celle des turbines à gaz, de sorte qu'ils n'ont besoin que de la moitié environ de l'énergie, mais les valeurs réalisables sont beaucoup trop faibles pour qu'ils soient utilisés. La recherche est en cours, mais les pronostics actuels annoncent « seulement » un doublement de la densité énergétique. Une longue durée de vie des batteries à haute performance dans les applications des aéronefs revêtira une très haute importance des points de vue environnemental et économique. Des progrès sont aussi nécessaires en ce qui concerne la densité de puissance. Cette remarque concerne toute la chaîne cinématique, comprenant les câbles et les onduleurs, de la batterie au moteur. L'importance de la densité énergétique et de la densité de puissance décroît pour les aéronefs dont la charge utile, la vitesse et la portée sont moindres. Ceci explique pourquoi des petits aéronefs à propulsion électrique sont déjà homologués aujourd'hui alors que les avions de ligne (long courrier) de taille supérieure ne sont pas encore réalisables.

La sécurité et la gestion de la chaleur constituent des obstacles supplémentaires à la réalisation d'aéronefs électriques commerciaux. L'incendie d'une batterie représente le plus grand risque. Des progrès ont été réalisés ces dernières décennies dans l'industrie automobile et dans le domaine des appareils électriques portables. Mais selon une étude à ce sujet, les systèmes susceptibles d'empêcher un incendie sont actuellement trop lourds pour être utilisés dans l'aéronautique⁸³. Le défi de la gestion de la chaleur consiste à mettre à disposition la chaleur requise pour la cabine des passagers et les équipements de dégivrage alors que les moteurs fournissent bien moins de chaleur résiduelle que les réacteurs classiques.

Par rapport à un aéronef à propulsion classique, quelques adaptations sont nécessaires. L'intégration du moteur, alimentation en énergie comprise, doit être adaptée aux moteurs électriques. C'est une différence en particulier par rapport à l'utilisation antérieure de turbines à gaz. S'y ajoute le processus de chargement au sol : à cet égard, le temps nécessaire est un aspect critique, car un chargement rapide abrège la durée de vie de la batterie et requiert, pour de nombreux aéronefs de grande taille, une puissance exorbitante. La phase de préparation est elle aussi critique en l'occurrence : il n'est possible de remplacer une flotte d'aéronefs classiques que si l'infrastructure visée est disponible dans tous les aéroports fréquentés. On pourrait aussi envisager d'échanger les batteries vides par des pleines, mais ce choix limiterait l'intégration des batteries dans l'appareil et poserait de hautes exigences aux infrastructures aéroportuaires. Une large utilisation d'aéronefs électriques exige aussi un concept indiquant comment sera fournie aux aéroports, à partir de sources renouvelables, la puissance électrique de chargement qui est très élevée par moments (puissance sur demande). Comme la puissance de la plupart des sources renouvelables (en particulier l'électricité solaire et éolienne) est soumise à de fortes fluctuations et qu'elle n'est donc pas fiable, il faut d'énormes stocks d'énergie capables de fournir à court terme des puissances électriques très élevées pour recharger les aéronefs. Les charges qui en résulteront pour le système énergétique doivent être prises en considération.

En 2020, le premier aéronef électrique jamais certifié au monde, le Pipistrel Velis Electro, recevait sa certification de type⁸⁴. Vu son autonomie de vol maximale limitée à 50 minutes (plus 10 minutes de réserve), ce deux-places sera surtout utilisé comme avion-école. Actuellement, plus de 200 aéronefs électriques sont en développement⁸⁵, dont les projets suisses du quatre-places Smartflyer SFX1 et du deux-

⁸² Office fédéral de l'aviation civile (2020)

⁸³ Courtin / Hansman (2018)

⁸⁴ <https://www.admin.ch/gov/fr/accueil/documentation/communiqués.msg-id-79969.html>

⁸⁵ Thomson (2020).

places à décollage vertical aEro de Dufour Aerospace. On connaît aussi Solar Impulse 2, un aéronef expérimental développé en Suisse et le premier monoplace électrique à avoir réalisé le tour du monde (par étapes)

Hydrogène liquide (LH₂)

S'agissant d'utiliser de l'hydrogène comme carburant d'aviation, le défi essentiel est la question du stockage. En soi (sans réservoir), un kilogramme d'hydrogène contient trois fois l'énergie d'un kilogramme de kérosène. Mais le contenu énergétique par litre (volume) est problématique : seuls des réservoirs d'hydrogène liquide permettent d'atteindre des valeurs sensées pour l'aviation commerciale⁸⁶. Or, ces réservoirs sont aujourd'hui encore quatre fois plus lourds et cinq fois plus grands que les réservoirs de kérosène. Comme l'hydrogène qui s'y trouve est refroidi à -253°C, le réservoir doit être bien isolé. En outre, il faut prendre en compte la fatigue des matériaux sous l'effet des variations de pression lors des cycles de charge et de l'action directe de l'hydrogène. C'est pourquoi toutes les formes de construction ne sont pas possibles. Par exemple, contrairement au réservoir de kérosène, le réservoir d'hydrogène ne peut pas être logé dans les ailes. Il faudrait donc adapter la construction de l'aéronef dans son ensemble.

Compte tenu des besoins de puissance, seules des turbines à gaz entrent en ligne de compte, même à long terme, pour la motorisation des grands aéronefs. Les réacteurs doivent être adaptés à la combustion d'hydrogène, car celui-ci se comporte différemment du kérosène lors de la combustion. Comme l'air intervient dans le processus de combustion et que des températures très élevées sont atteintes, la combustion d'hydrogène entraîne d'importantes émissions d'oxyde d'azote si des mesures spéciales ne sont pas prises. Les technologies visant à réduire ces émissions dans les brûleurs à hydrogène sont encore au stade du laboratoire⁸⁷. Les effets climatiques globaux des aéronefs à hydrogène sont encore largement inconnus, car les travaux de développement viennent de débiter et parce que les mesures de l'impact climatique des principales émissions (de vapeur d'eau) font encore défaut.

Une solution alternative de propulsion électrique comportant une pile à combustible et des moteurs électriques est en développement, en particulier pour les aéronefs de petite taille, vu que leurs besoins en termes de puissance et de portée sont moindres. Les chercheurs se promettent d'une telle solution un taux d'efficacité plus élevé et un impact environnemental plus faible. Fondamentalement, on peut envisager de condenser la vapeur d'eau plutôt que d'en émettre directement : l'impact sur l'environnement pourrait en être réduit. Mais le développement de la construction légère de piles à combustible doit encore progresser à cet effet. En ce qui concerne le moteur, les adaptations nécessaires correspondent à celles des aéronefs électriques.

Les aéronefs à hydrogène comportent un potentiel de danger plus important que ceux à kérosène en raison des réservoirs cryogéniques ou hautement pressurisés. En cas de défaillance des joints, l'hydrogène se gazéifie rapidement, ce qui représente un risque d'explosion important. Plus important que dans le cas du kérosène, ce risque d'explosion se dissipe aussi de nouveau plus rapidement à l'air libre. C'est pourquoi il faut définir des mesures permettant d'assurer le transport et l'entreposage d'hydrogène dans

⁸⁶ Des réservoirs sous pression entrent aussi en question pour les aéronefs de l'aviation générale dont le rayon d'action ou la charge utile sont moindres.

⁸⁷ La Russie a étudié et démontré, avec le TU-155, la propulsion d'un grand aéronef au moyen de turbines à gaz alimentées avec de l'hydrogène liquide. Cependant, la réduction de l'oxyde d'azote n'a pas été thématiquée dans ce cadre.

l'environnement aéroportuaire, le processus d'avitaillement et le traitement de toutes situations d'urgence éventuelles dans les conditions de sécurité voulues. Cette problématique a fait l'objet de plusieurs études. À ce stade, aucun problème n'a été qualifié d'insoluble⁸⁸.

La mise sur pied d'infrastructures complètement nouvelles est nécessaire à l'utilisation de l'hydrogène à large échelle dans les aéroports. Comme pour toutes les solutions de stockage d'énergie alternatives, le processus commence par la fourniture d'énergie primaire à partir de sources renouvelables. Il faut instaurer des solutions totalement inédites pour assurer la production et la distribution aux aéroports, y compris l'entreposage et la liquéfaction. La gestion de l'hydrogène est un défi technique, car il s'agit d'une substance volatile qui fragilise de nombreux matériaux. De plus, il faut veiller à son intégration adéquate dans le système énergétique existant. Dans ce contexte, il ne faut pas négliger les pertes d'énergie qui surviennent en particulier lors de l'électrolyse, de la liquéfaction et du transport ou du stockage à long terme. La phase de conversion à l'hydrogène, surtout, sera critique : pour qu'une destination soit desservie, les deux aéroports de départ et d'arrivée doivent déjà disposer de l'infrastructure nécessaire. Pendant la période de conversion, il faudra donc maintenir l'infrastructure pour le kérosène parallèlement à la nouvelle infrastructure pour l'hydrogène.

Divers petits aéronefs ont déjà fait l'objet de tests réussis avec un réservoir à hydrogène pressurisé, une pile à combustible et un moteur électrique. Ils ont été développés par Boeing (Fuel Cell Demonstrator), le Centre aérospatial allemand (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR : Hy4) et la jeune pousse Zeroavia. Cette dernière s'emploie au développement de petits aéronefs à hydrogène, tandis qu'avec l'Electric Flight Demonstrator, DLR prévoit des prototypes de plus grande taille. Les plus grands aéronefs à hydrogène, qui nécessitent donc un stockage cryogénique de l'hydrogène, sont actuellement à l'étude dans le cadre du projet EROe d'Airbus.

⁸⁸ Airbus (2003), McKinsey & Company (2020).

Annexe B. Instruments de promotion suisses actuels pour le développement des CAD

Il existe en Suisse divers instruments promotionnels, dans le domaine de la recherche énergétique et environnementale, qui peuvent être affectés à des projets de développement dans le domaine des CAD. La présente section fournit un aperçu de ces instruments. La majeure partie des actuels instruments de promotion étatiques dans le domaine de l'énergie proviennent du **financement de base des hautes écoles selon la LEHE (RS 414.20) et de la contribution au financement du domaine des EPF**. Ce financement est de l'ordre de 140 millions de francs pour le domaine de l'énergie et de 500 millions de francs pour le domaine de l'environnement⁸⁹. S'y ajoutent des ressources du **Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS)**, de l'ordre de 35 millions de francs pour le domaine de l'énergie, respectivement de 116 millions de francs pour le domaine de l'environnement⁹⁰. En outre, la **division Encouragement des projets et des programmes d'Innosuisse** met des fonds à disposition pour le domaine de l'énergie (38 millions de francs) et le domaine de l'environnement (12 millions de francs). Ces montants couvrent toutefois seulement la recherche fondamentale et la recherche appliquée ainsi que les prototypes de laboratoire.

On trouve des interfaces, notamment dans le domaine de la recherche énergétique ou de la recherche sur l'innovation, avec plusieurs programmes de l'**OFEN** qui soutient subsidiairement des projets de recherche correspondant à la priorité du concept actuel de recherche énergétique. Les projets de recherche axés sur l'application et à caractère de développement sont prioritaires. La Commission fédérale pour la recherche énergétique (CORE) a publié fin novembre 2020 le **Plan directeur de la recherche énergétique de la Confédération 2021 à 2024**. Les accents y portent notamment sur l'efficacité du « couplage des secteurs » et les « processus industriels », ce qui inclut la « réduction des émissions de CO₂ dans le trafic aérien commercial grâce à l'utilisation de carburants renouvelables ». Par exemple, la déduction de scénarios pour la construction d'infrastructures de synthèse et de distribution de carburants synthétiques dans les transports routiers, maritimes et aériens est mentionnée comme thème de recherche dans le domaine Mobilité / remplacement des combustibles fossiles. En outre, l'OFEN encourage, dans le cadre du programme pilote et de démonstration (**programme P+D**), « le développement et l'expérimentation de nouvelles technologies, solutions et approches dans les domaines de l'utilisation économe et efficace de l'énergie, du transfert et du stockage d'énergie et de l'utilisation des énergies renouvelables. » Mentionnons aussi les pôles de compétence suisses en recherche énergétique (**Swiss Competence Centers for Energy Research, SCCER**), qui ont conduit des recherches entre 2013 et 2020 sur divers aspects liés au virage énergétique. Plusieurs interfaces existent entre les SCCER et le thème des carburants d'aviation durables. Les SCCER ont été relayés par le programme d'encouragement **SWEET (Swiss Energy research for the Energy Transition)**. L'objectif de SWEET est d'encourager à partir de 2021 les innovations nécessaires à la mise en œuvre fructueuse des Perspectives énergétiques 2050+ et à la réalisation des objectifs climatiques de la Suisse. SWEET couvre une large part du cycle de l'innovation (de la recherche fondamentale à la mise en œuvre en passant par la recherche axée sur l'application). Actuellement, sur toute sa durée, ce programme d'encouragement prévoit de répartir 136,4 millions de francs entre des mesures de soutien dans l'ensemble du domaine de l'énergie.

⁸⁹ Source (état 2016): <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themen/bildung/umweltforschung/innovationslandschaft-umwelt-energie.html>

⁹⁰ État 2014-2016, *ibid.*

Par le **financement spécial du transport aérien**, l'OFAC encourage des projets de recherche et de développement dans le domaine de l'environnement. En 2019, il a surtout soutenu, à hauteur de 2,2 millions de francs au total, des projets de recherche appliquée. Selon la 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 (LUMin) et son ordonnance (OMinTA), seul est admis le soutien à des mesures librement consenties qui déploient leurs effets ou démontrent leur utilité en Suisse. Concernant la protection de l'environnement, la LUMin cite notamment les domaines suivants : protection contre les effets du bruit causés par le trafic aérien, protection contre les effets des émissions de substances polluantes de l'infrastructure aéronautique et des aéronefs, travaux de recherche sur les effets du trafic aérien sur l'environnement, mesures d'adaptation des aéronefs destinées à protéger la population contre les immissions de bruit et de substances polluantes et développement de procédures de vol respectueuses de l'environnement. Conformément à l'OMinTA, le montant des contributions est fonction du rapport utilité-objectif, de la capacité économique du requérant, de l'intérêt propre du requérant. Ces exigences ont eu pour effet que relativement peu de requêtes ont été déposées à ce stade dans le domaine de l'environnement, de sorte que le montant annuel n'a pas été épuisé. S'agissant du domaine des CAD, diverses demandes ont été déjà reçues, dont certaines ont été évaluées positivement : environ 5 millions de francs ont été alloués à titre de soutien. Le soutien apporté aux projets CAD correspond à une priorité du programme pluriannuel actuel du financement spécial⁹¹.

L'OFEV dispose actuellement, avec le **Fonds de technologie** et la **promotion des technologies environnementales** (y compris les **mesures d'accompagnement**), de programmes supplémentaires dont les technologies des carburants durables peuvent bénéficier. Ces programmes se répartissent sur les phases d'innovation, de la recherche appliquée à la diffusion sur le marché et à l'export. Au total, ventilés sur l'ensemble des thèmes environnementaux, quelque 36 millions de francs sont à disposition⁹².

⁹¹ <https://www.bazl.admin.ch/bazl/fr/home/themen/finanzhilfen-luftverkehr/mehrjahresprogramm.html>

⁹² Dont 25 millions de francs reviennent au Fonds de technologie, qui est un instrument de cautionnement.

Annexe C. Instruments de promotion d'un marché des CAD

C.1. Exigences posées aux instruments

Une publication de l'Université technique de Hambourg⁹³ analyse quatre exigences essentielles posées aux mesures d'encouragement des carburants durables (cf. section suivante) : l'efficacité, l'influence de facteurs externes, l'efficacité statique et l'efficacité dynamique.

L'**efficacité** décrit l'effet exercé par un instrument, c'est-à-dire qu'elle indique si l'objectif visé a été atteint. En l'occurrence, l'objectif consiste à augmenter significativement la part d'utilité des CAD, c'est-à-dire à obtenir une certaine réduction des émissions par le recours aux CAD. Il s'agit d'une exigence essentielle en fonction de laquelle divers instruments de promotion doivent être soigneusement examinés.

Les divers types de soutien sont différemment sensibles aux **influences externes**. Il faut donc analyser dans quelle mesure la réalisation des objectifs des instruments dépend des changements des conditions économiques. La différence de prix entre les carburants d'aviation classiques et durables, déterminée par exemple par le prix du pétrole brut et le niveau actuel des taux d'intérêt, en fait notamment partie.

L'**efficacité des coûts** (également appelée efficacité statistique) évalue si les moyens engagés fournissent la meilleure contribution possible à la réalisation des objectifs fixés. Cette évaluation doit montrer, sur la base de données actuelles, si la combinaison technologique la plus efficace en termes de coûts est appliquée au meilleur endroit.

Pour garantir une efficacité élevée de l'instrument, l'**efficacité dite dynamique** joue un rôle important. Ce critère mesure si un instrument fixe les bonnes incitations pour influencer sur le progrès technologique en faveur d'une réduction des coûts de production et de l'impact environnemental.

D'autres aspects importants pour la décision sont cités dans la même source : la rapidité de la mise en œuvre, les modalités légales ou réglementaires, la capacité d'adaptation, les exigences administratives.

C.2. Impôts et redevances sur les billets et les émissions de CO₂

En vertu de l'**impôt allemand sur les transports aériens**, introduit en 2011, les passagers de vols commerciaux au départ de l'Allemagne sont imposés. Le montant de la taxe, qui est fonction de la distance entre l'Allemagne et le pays de destination (trois classes de distance), est actuellement compris entre 12 et 59 euros. L'objectif de cet impôt est surtout d'influencer le comportement de mobilité de manière à réduire le volume de trafic. En revanche, il ne se prête pas à créer une incitation à l'avitaillement en CAD, puisque les vols recourant aux CAD sont imposés exactement comme le sont les vols avec des carburants classiques.

Une **taxe sur les billets d'avion** était prévue dans le cadre de la révision de la loi sur le CO₂, rejetée en 2021, afin d'inciter à un comportement de mobilité plus durable et d'obtenir ainsi une réduction des

⁹³ Bullerdiek / Kaltschmitt (2020)

émissions. La distance de vol et la classe de transport auraient déterminé le montant de la taxe incitative, qui aurait été comprise entre 30 et 120 francs. Conformément au principe d'une taxe incitative, la moitié au moins des recettes aurait été restituée à la population, le reste alimentant un fonds pour le climat qui aurait notamment subventionné les activités de recherche sur les CAD. Une telle approche cumule plusieurs défis (cf. feuille de route RMSA¹⁰):

- Il faut veiller à ce que la législation en vigueur à l'EuroAirport de Bâle ne soit pas contournée, des vols étant régis par le droit des transports français plutôt que suisse. Des taxes disparaîtraient ainsi, ce qui conduirait à une distorsion de la concurrence et restreindrait éventuellement l'efficacité de la mesure.
- Le montant de la taxe devrait être fixé en proportion des émissions causées. Un échelonnement en fonction des classes de distance n'y parvient pas dans tous les cas et peut même, selon le modèle d'affaires, grever nettement plus certaines compagnies aériennes que d'autres.
- Il faut considérer les effets économiques sur les compagnies aériennes dont le nombre de vols au départ de la Suisse est proportionnellement important. Car elles ne peuvent répartir une augmentation des coûts que sur un nombre nettement inférieur de passagers.

Il est possible d'instaurer une incitation à éviter les émissions de l'aviation nuisibles pour le climat directement par un **impôt sur le CO₂** (ou généralement par un impôt sur le carburant ou sur les gaz à effet de serre). Pour qu'un tel impôt agisse efficacement sur la promotion des CAD, il faut nécessairement tenir compte des émissions inhérentes à la production, car les émissions de CO₂ causées par les CAD correspondent à celles dues aux carburants classiques. L'OACI recommande toutefois expressément de ne percevoir sur les émissions et autres effets environnementaux des vols internationaux, au lieu d'impôts, que des taxes à affectation liée en les combinant aux coûts effectivement survenus⁹⁴. Selon l'OACI, le carburant des avitaillements destinés aux vols internationaux doit être exonérés de tout impôt et de toute taxe⁹⁵. C'est pourquoi les impôts correspondants n'ont été perçus à ce stade que pour les vols nationaux.

Un tel impôt est prévu par la **directive sur la taxation de l'énergie** révisée, dans l'« Ajustement à l'objectif 55 », de la Commission européenne : le kérosène doit être imposé au taux minimal de 10,75 €/GJ, soit environ 38 cents par litre, pour les vols intérieurs de l'UE. Cette réglementation doit être introduite au terme d'un délai transitoire de dix ans pendant lequel le taux minimal de 0 doit être relevé de 1,075 €/GJ par an. Pour les biocarburants, le taux minimal est de 5,38 €/GJ et il n'est même que de 0,15 €/GJ pour les carburants renouvelables d'origine non biogène. Cette différence constitue une incitation à utiliser les CAD, elle dépend toutefois directement de la différence de prix entre les CAD et le carburant d'aviation classique.

En Suisse, l'**impôt sur les huiles minérales** remplit cette fonction. La loi sur l'imposition des huiles minérales (Limpmin) et l'ordonnance sur l'imposition des huiles minérales (Oimpmin) prévoient un impôt sur le carburant d'aviation de 44 centimes par litre actuellement, auquel s'ajoute une surtaxe sur les huiles minérales de 30 centimes par litre. Tandis qu'une partie des recettes de l'impôt sur les huiles minérales alimente les ressources générales de la Confédération, 50 % de cet impôt et 100 % de la surtaxe sur les huiles minérales vont au financement spécial du trafic aérien conformément à

⁹⁴ OACI (1996)

⁹⁵ OACI (2000)

l'art. 87b Cst. (cf. ch. 4.2). Des allègements fiscaux pour les carburants d'aviation durables sont théoriquement possibles, ce qui conférerait à cet instrument, à tout le moins pour les vols intérieurs à la Suisse (env. 4 % des besoins en kérosène en Suisse), un certain effet incitatif. Mais en pratique, les producteurs de CAD ne sont pas en mesure de fournir actuellement les CAD séparément et avec les preuves requises de durabilité (cf. ch. 4.5).

C.3. Échange de quotas d'émission et compensation

Les mécanismes d'encouragement des CAD dans le cadre de CORSIA et du système européen d'échange de quotas d'émission ont déjà été expliqués au ch. 4.1. Selon les auteurs⁹⁶, à en juger aujourd'hui, le SEQE-UE et CORSIA sont impropres à soutenir activement une large introduction des carburants d'aviation renouvelables sur le marché, car l'acquisition de droits d'émission (SEQE-UE) ou de compensations (CORSIA) présente des coûts d'opportunité nettement moindres que l'utilisation de carburants d'aviation renouvelables. Dans les deux cas, l'**efficacité** dépend directement des prix du kérosène classique, des CAD et des émissions.

Tant CORSIA que le SEQE conduisent à ce que la variante la plus avantageuse en termes de coûts s'impose parmi les fournisseurs de CAD. Une incitation claire à l'**efficacité des coûts** est ainsi donnée. CORSIA comporte même une incitation à maximiser la réduction des émissions, puisque seules sont exemptées de l'obligation de compensation les émissions évitées grâce à l'utilisation de CAD. Une telle incitation fait défaut dans le SEQE, car l'utilisation de CAD peut y être prise en compte avec zéro émission, des critères de durabilité stricts étant utilisés pour contrôler l'impact climatique et les charges générales sur l'environnement.

C.4. Rétribution de l'injection

Les rétributions de l'injection consistent en subventions étatiques destinées aux producteurs en proportion de la quantité de CAD produite. Deux principes différents peuvent être ainsi poursuivis : une **rétribution fixe** est indépendante de la quantité livrée et de la concurrence éventuelle, la rétribution reste constante. Par contre, les **modèles d'appel d'offres** reposent sur des mises au concours de certaines quantités de livraison, les prestataires pouvant soumettre leurs offres. Lors de l'adjudication, l'État peut accorder la priorité à des offres plus avantageuses, mais il devrait alors tenir compte de tous les éléments des critères de durabilité, réductions des émissions comprises. Les modèles de rétribution de l'injection peuvent ainsi accélérer la compétitivité de nouveaux systèmes de production. Un exemple actuel est la rétribution à prix coûtant du courant injecté (RPC), par laquelle la production d'électricité renouvelable est encouragée en Suisse. Des rétributions de l'injection sont envisageables par analogie pour établir le marché des CAD. Les bénéficiaires seraient dans ce cas les producteurs de CAD.

En lieu et place de quantités à fournir, par analogie avec les taux de réduction des GES remplaçant les taux d'incorporation, l'objet de l'appel d'offres pourrait être une certaine réduction des émissions de GES (par ex. par litre de carburant fourni). Une incitation est ainsi donnée à réaliser la réduction des émissions de GES au coût le plus bas possible. Si cela est souhaité, comme pour les taux de réduction des émissions de GES, il est aussi possible d'encourager les technologies d'émission négative (NET).

⁹⁶ Bullerdiel / Kaltschmitt (2020)

Avec les rétributions fixes, la production effectivement réalisable de CAD dépend fortement du niveau de la rétribution et du prix des carburants classiques, de sorte qu'il est difficile de prédire l'**efficacité**. Une rétribution trop basse induit un effet insuffisant, mais un niveau de rétribution trop élevé excède le niveau de satisfaction. Grâce à la limitation quantitative et à la concurrence pour les rétributions de l'injection, les appels d'offres permettent par contre d'atteindre un degré d'efficacité élevé. Ils s'avèrent aussi moins dépendants des facteurs externes, par exemple les fluctuations de prix des carburants, qui suffiraient à induire une hausse des rétributions si l'écart de coût entre les CAD et le kérosène fossile se creusait.

Une rétribution constante exclut la concurrence entre les producteurs alors qu'elle favoriserait l'**efficacité des coûts**. L'incitation à minimiser les coûts réside pour les producteurs uniquement dans leur souci d'optimiser leur marge bénéficiaire. Pour instaurer une incitation supplémentaire au développement de la technologie, il faudrait fixer des rétributions dégressives (des rétributions qui diminuent au fil du temps). L'approche considérée ne comporte aucune incitation à minimiser l'intensité des GES ou la charge sur l'environnement. Des critères de durabilité doivent aussi être ajoutés à cette fin. En revanche, par la concurrence qu'ils instaurent entre les producteurs, les modèles d'appel d'offres créent des incitations claires à l'optimisation des coûts. Selon cette approche, les producteurs doivent investir également à long terme dans l'optimisation de la technologie s'ils veulent rester concurrentiels. Lorsque l'appel d'offres prévoit une réduction des GES plutôt qu'une quantité à fournir, il constitue même une incitation directe à réduire les effets sur le climat. Des incitations à améliorer la performance climatique et environnementale peuvent aussi être générées lorsque la rétribution repose sur cette performance et non pas seulement sur des aspects économiques.

Dans le cas de la rétribution de l'injection, l'État assume une part essentielle des coûts supplémentaires des CAD. En conséquence, une source de financement devrait être définie pour fournir les moyens financiers considérables nécessaires à cet effet. Une telle disposition n'est pas possible sans **une nouvelle imposition ou taxation**. Le fait que la Suisse ne produira guère elle-même des quantités notables de CAD plaide contre la rétribution de l'injection : ce subventionnement s'écoulerait en grande partie vers l'étranger. En outre, il n'est pas sûr que la Confédération veuille s'engager ainsi activement dans le négoce des CAD. Jusqu'ici, des rétributions de l'injection n'ont pas été appliquées dans ce domaine sur le plan international. Fondamentalement, cet instrument serait approprié comme complément à une solution générale de quotas en soutien aux diverses technologies, en lieu et place d'un sous-quota ou de multiplicateurs.

Annexe D. Position du Conseil fédéral concernant les NET

Le 2 septembre 2020, le Conseil fédéral a publié un rapport sur l'importance des NET dans la politique climatique suisse⁹⁷. Ce rapport fournit une vue d'ensemble des diverses technologies et présente une stratégie qui prévoit de recourir aux NET là où les émissions ne peuvent pas être empêchées (agriculture, usines d'incinération des ordures ménagères, fabriques de ciment). Quant à savoir si les NET doivent intervenir pour compenser les émissions de l'aviation, il faut en juger, selon ce rapport, en considérant les principes suivants⁹⁸:

- Le **principe de précaution** : les NET ne devraient être utilisées pour compenser les émissions de l'aviation que si les mesures visant à éviter directement les émissions s'avèrent inappropriées.
- On peut déduire du **principe de causalité** que le secteur des transports aériens est responsable de compenser ses émissions et qu'il doit financer les mesures prises à cet effet.
- Selon le principe de **prévention à la source**, il faut donner la priorité à la réduction des émissions sur les mesures visant à les compenser.
- Une **approche holistique** exige de choisir la mesure qui réduit le plus la charge sur l'environnement.
- Le **principe de coopération** indique qu'une coopération du secteur aéronautique avec d'autres secteurs est envisageable pour compenser les émissions.

Le principe de précaution et le principe de prévention à la source s'opposent donc foncièrement à l'utilisation des NET pour compenser les émissions de l'aviation tant que des mesures sont envisageables pour éviter directement les émissions. Cette approche a été confirmée dans un récent rapport publié en mai 2022 par le Conseil fédéral⁹⁹. Mais dans l'esprit d'une perspective holistique, il convient de soupeser les effets environnementaux et les coûts de toutes les mesures envisageables. Si cette approche globale devait plaider en faveur d'une utilisation des NET, les technologies d'émission négative seraient une option valable.

⁹⁷ Conseil fédéral (2020)

⁹⁸ Ibid., Office fédéral de l'environnement (2013).

⁹⁹ Conseil fédéral (2022)

Liste bibliographique

AIE Bioenergy (2021) : Progress in Commercialization of Biojet /Sustainable Aviation Fuels (SAF): Technologies, potential and challenges. AIE Bioenergy Task 39.

Air Transport Action Group (2020) : Waypoint 2050. Genève.

Airbus Deutschland (2003) : Cryoplane. Liquid Hydrogen Fuelled Aircraft – System Analysis. Final Report. Hambourg.

Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany e.V. (2020): Nachhaltige Flugkraftstoffe Status, Optionen, Handlungsnotwendigkeiten. aireg Roadmap zur Markteinführung von Sustainable Aviation Fuels. Berlin. Becattini Viola / Gabrielli Paolo / Mazzotti Marco (2021) : Role of Carbon Capture, Storage, and Utilization to Enable a Net-Zero-CO₂-Emissions Aviation Sector. Industrial & Engineering Chemistry Research.

BP (2022): Statistical Review of World Energy. 71. Edition. Londres.

Brenn Benjamin / Durdina Lukas / Siegrist Frithjof / Beyerle Peter / Bruderer Kevin / Rindlisbacher Theo / Rocci-Denis Sara / Andac M. Gurhan / Zelina Joseph / Penanhoat Olivier / Wang Jing (2015) : Effects of Fuel Aromatic Content on Nonvolatile Particulate Emissions of an In-Production Aircraft Gas Turbine. Environmental Science & Technology.

Bullerdiel Nils / Kaltschmitt Martin (2020) : Analyse und Bewertung vorhandener und alternativer Lenkungsinstrumente zur Markteinführung erneuerbarer Flugkraftstoffe. Zeitschrift für Energiewirtschaft. Wiesbaden.

Bullerdiel Nils / Neuling Ulf / Kaltschmitt Martin (2021) : A GHG reduction obligation for sustainable aviation fuels (SAF) in the EU and in Germany. Journal of Air Transport Management.

Commission européenne (2011) : Décision de la Commission du 26 septembre 2011 relative aux référentiels à utiliser pour allouer à titre gratuit des quotas d'émission de gaz à effet de serre aux exploitants d'aéronefs conformément à l'article 3 sexies de la directive 2003/87/CE du Parlement européen et du Conseil. Journal officiel de l'Union européenne. 2011/638/UE. Bruxelles.

Conseil fédéral (2020) : « Quelle pourrait être l'importance des émissions négatives de CO₂ pour les futures politiques climatiques de la Suisse ? ». Rapport établi en réponse au postulat 18.4211 Thorens Goumaz du 12 décembre 2018. Berne.

Conseil fédéral (2021) : Stratégie climatique à long terme de la Suisse. Berne. Conseil fédéral (2022) : Captage et stockage du CO₂ (CSC) et technologies d'émission négative (NET), Berne.

Courtin Christopher / Hansman John (2018) : Safety Considerations in Emerging Electric Aircraft Architectures. 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Atlanta GA.

Danish Energy Agency (2022): Technology Data Renewable Fuels. Copenhague.

Ecoplan (2021) : Schweizer «Road Map Sustainable Aviation». Berne.

Gouvernement fédéral allemand (2021): PtL-Roadmap. Nachhaltige strombasierte Kraftstoffe für den Luftverkehr in Deutschland. Berlin.

Jewswani Harish K. / Chilvers Andrew / Azapagic Adisa (2020): Environmental sustainability of biofuels: a review. Proceedings of the Royal Society A.

McKinsey & Company (2020) : Hydrogen-powered aviation. A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050. Pour Clean Sky 2 JU and Fuel Cells and Hydrogen 2 JU. doi:10.2843/471510. Luxembourg.

Mission Possible Partnership (2022): Making net-zero aviation possible. An industry-backed, 1.5°C-aligned transition strategy.

Neu Urs (2020) : Die Auswirkungen der Flugverkehrsemissionen auf das Klima. In : Swiss Academies Communications 16 (3).

OACI (1996) : Résolution du Conseil sur les redevances et taxes environnementales. 9 décembre 1996. Montréal.

OACI (2000) : Politique de l'OACI en matière d'imposition dans le domaine du transport aérien international (Doc 8632). 3^e édition. Montréal.

OACI (2018) : Convention relative à l'aviation civile internationale, Annexe 16 Protection de l'environnement, Volume IV – Régime de compensation et de réduction de carbone pour l'aviation internationale (CORSIA). Montréal.

OACI (2022) : CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels. Montréal.

OACI CAEP (2022) : Report on the feasibility of a long-term aspirational goal (LTAG) for international civil aviation CO₂ emission reductions. Montréal.

Office fédéral de l'aviation civile (2020) : L'électrification des aéronefs. Ittigen.

Office fédéral de l'environnement (2013) : Le droit de l'environnement en bref. Aperçu du droit fédéral de l'environnement. Berne.

Pechstein Jan / Bullerdiel Nils / Kaltschmitt Martin (2019) : A "book and Claim"-Approach to account for sustainable aviation fuels in the EU-ETS – Development of a basic concept. Energy Policy.

Prognos / TEP Energy / Infrac / Ecoplan (2020) : Perspectives énergétiques 2050+. Rapport succinct, sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie. Berne.

Ram M., Galimova T., Bogdanov D., Fasihi M., Gulagi A., Breyer C., Micheli M., Crone K. (2020): Powerfuels in a Renewable Energy World – Global volumes, costs and trading 2030 to 2050. LUT Universität und Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Lappeenranta, Berlin.

Rojas Diego / Crone Kilian / Löchle Sebastian / Siegemund Stefan (2019) : Global Alliance Powerfuels. Powerfuels in Aviation. Pour l'Agence allemande de l'énergie. Berlin.

Royal Netherlands Aerospace Centre (2021) : Destination 2050. Amsterdam.

Schmidt Patrick / Weindorf Werner / Roth Arne / Batteiger Valentin / Riegel Florian (2016) : Power-to-Liquids – Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel. Pour l'Office fédéral allemand de l'environnement. Munich.

Thomson Robert (2020) : Electrically propelled aircraft development exceed 200 for the first time. Roland Berger Insights. Londres.

Transport & Environment (2022): Analysis of green jet fuel production in Europe. Bruxelles.

Treyer Karin / Sacchi Romain / Bauer Christian (2021) : Life Cycle Assessment of synthetic hydrocarbons for use as jet fuel: "Power-to-liquid" and "Sun-to-liquid" processes. Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen. Sur mandat de l'OFAC.

Van Grinsven Anouk / van den Toorn Emiel / van der Veen Reinier / Kampman Bettina (2020): Used Cooking Oil (UCO) as biofuel feedstock in the EU. CE Delft. Delft.

WEF Clean Skies for Tomorrow (2020): Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation. Insight Report. Cologne.

WEF Clean Skies for Tomorrow (2021): Sustainable Aviation Fuel Policy Toolkit. Cologne.

Glossaire

Book & Claim	Option commerciale qui dissocie les flux physiques de marchandises du commerce des certificats de durabilité.
CAD biogènes	L'expression « carburants d'aviation biogènes durables » désigne les CAD dont la teneur énergétique provient principalement de sources biogènes.
CAD synthétiques	Les carburants d'aviation durables synthétiques désignent des CAD dont la teneur énergétique provient principalement de sources non biogènes.
Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)	Programme de l'OACI basé sur le marché dont le but est de rendre neutre en CO ₂ la croissance du trafic aérien international dès 2020.
Carburants d'aviation durables (CAD)	Dans le cadre du présent rapport, on qualifie de carburants d'aviation durables (CAD) les carburants d'aviation qui peuvent être utilisés comme substituts des carburants fossiles et qui remplissent certains critères de durabilité. Dans la législation suisse, ces carburants sont appelés « carburants d'aviation renouvelables » (pour « carburants d'aviation issus de sources renouvelables »).
Émissions autres que de CO ₂	Les émissions autres que de CO ₂ désignent tous les effets climatiques qui ne reposent pas sur des émissions de CO ₂ . Il ne s'agit pas seulement de gaz à effet de serre.
Feuille de route RMSA	La feuille de route pour l'aviation durable RMSA (Schweizer Road Map Sustainable Aviation) est une étude mandatée par l'OFEV et l'OFAC en vue de décarboniser le trafic aérien en Suisse.
Gaz à effet de serre	Les gaz à effet de serre comprennent tous les gaz qui contribuent à l'effet de serre de la Terre.
Installation de démonstration	Installation utilisée dans une phase de développement assez tardive pour tester des aspects systémiques d'une technologie, généralement à l'échelle 1:1.
Installation pilote	Installation utilisée dans une phase relativement précoce du développement pour tester la faisabilité technique (généralement limitée à un système partiel).
Méthode du bilan de masse	Option commerciale qui procède par l'attribution arithmétique de critères de durabilité pour les flux de matières mélangées

Obligation de mélange, taux de mélange	Obligation légale de mélanger une certaine part de carburants durables. Dans l'UE, l'expression « obligation d'incorporation » est équivalente à « obligation de mélange ».
Organisation de l'aviation civile internationale (OACI)	L' Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) est une organisation spécialisée des Nations Unies dont le siège est à Montréal.
Power-to-Liquid (PtL)	Power-to-Liquid (PtL) désigne les technologies de production de carburants liquides à partir d'électricité.
Sun-to-Liquid (StL)	Sun-to-Liquid (StL) désigne les technologies qui visent à produire des carburants liquides à partir de l'énergie solaire.
Système d'échange de quotas d'émissions européen (SEQE-UE)	Instrument basé sur le marché qui met au enchères des droits d'émission. Le SEQE-UE est lié au SEQE-CH.
Système d'échange de quotas d'émissions suisse (SEQE-CH)	Instrument basé sur le marché qui met au enchères des droits d'émission. Le SEQE-CH est lié au SEQE-UE.
Technologies d'émission négative (NET)	L'abréviation NET regroupe les technologies dont l'utilisation permet de réduire la concentration de CO ₂ dans l'atmosphère.
Zéro émission nette	Équilibre entre émission et absorption, généralement en lien avec le CO ₂ ou d'autres gaz à effet de serre.

Table des abréviations

CAD	Carburants d'aviation durables
GES	Gaz à effet de serre
NET	Technologies d'émission négative
PtL	Power to liquid (carburants synthétiques durables produite à partir de sources renouvelables)
SEQE	Système d'échange de quotas d'émissions
SEQE-UE	Système d'échange de quotas d'émissions de l'Union européenne
StL	Sun to liquid (carburants synthétiques durables issus de l'énergie solaire)