

FNAM, France Hydrogène, GIFAS, UAF, UFE, UfipEM - mars 2023.

FEUILLE DE ROUTE de décarbonation de l'aérien

Article 301-Loi climat et résilience





Remerciements

Les travaux de l'article 301 pour le transport aérien, synthétisés dans le présent rapport, ont été pilotés par la DGAC et le GIFAS avec une équipe projet incluant le CGDD, la DGEC et Eurogroup Consulting.

L'organisation en groupes de travail a été la suivante :

- Progrès technologiques (co-rapporteurs Airbus/Safran) avec un sous-groupe sur l'adaptation des infrastructures aéroportuaires aux nouvelles énergies (co-rapporteurs ADP/France Hydrogène), Usage et déploiement des énergies décarbonées (co-rapporteurs UFIP/FNAM/EDF),
- Optimisation des Opérations en vol et au sol (co-rapporteurs Thales/DSNA/FNAM),
- Compensation des émissions de CO₂ (co-rapporteurs Air France/I4CE/DGEC).

Avec la participation d'entreprises, d'associations professionnelles, d'instituts de recherche et d'administrations durant l'année 2022, représentant l'ensemble des acteurs de la chaîne de valeur dont les énergéticiens.

Les travaux de modélisation appuyant ce rapport ont été assurés par la conjonction d'un modèle de trajectoire de décarbonation de l'aérien développé par l'ONERA et un modèle d'impact de la hausse des coûts sur la demande de trafic développé par la DGAC.



SOMMAIRE

1	Introduction	6
2	Synthèse des conclusions et du plan d'actions de décarbonation.....	6
3	Principe de la démarche et méthode	10
3.1	L'article 301 de la loi Climat et résilience	10
3.2	Structuration des travaux	10
4	Le transport aérien en France	12
5	Décarbonation du transport aérien : bilan et progrès accomplis	14
5.1	Émissions globales	14
5.2	Émissions unitaires	15
6	Articulation de la présente feuille de route avec la stratégie nationale bas carbone (SNBC)	16
7	Analyse des leviers de décarbonation du secteur	17
7.1	Les progrès technologiques	17
7.2	Usage et déploiement des énergies décarbonées	26
7.3	Opérations en vol et au sol	37
7.4	Adaptation des infrastructures aux nouvelles technologies	45
8	Décarbonation de l'aviation : trajectoires à horizon 2050	47
8.1	La modélisation en deux scénarios volontaristes et crédibles de décarbonation	47
8.2	Périmètre Domestique France : Scénario « Action »	50
8.3	Périmètre Domestique France : Scénario « Accélération »	51
8.4	Périmètre Départ International France : Scénario « Action »	53
8.5	Périmètre Départ International France : Scénario « Accélération »	54
8.6	Importance relative des différents leviers	56
8.7	Enjeux en termes de ressources : tableau récapitulatif	57
8.8	Cohérence avec les scénarios OACI LTAG	59
9	Cas particulier de la compensation des émissions et du prix du CO ₂	62
9.1	Deux dispositifs de compensation visant les émissions domestiques et les émissions internationales	62
9.2	D'autres mécanismes s'ajoutent et donnent un prix aux émissions de CO ₂	64
10	Nécessaire soutenabilité financière de la décarbonation du secteur aérien	65
11	Besoins en emplois et en compétences	68
12	Annexes	70
12.1	Annexe 1 : les effets non-CO ₂ de l'aviation sur le climat	70
12.2	Annexe 2 : précisions concernant l'axe « Garantir la compétitivité et la réactivité de la filière « industrie aéronautique »	74
12.3	Annexe 3 : Revue de littérature des gains d'émissions et gains d'émissions du levier Opérations en vol et au sol	76
12.4	Annexe 4 : l'adaptation des infrastructures aéroportuaires	79
12.5	Annexe 5 : Précisions sur le fonctionnement des modèles Onera et DGAC (effet des surcoûts de la décarbonation sur le trafic)	94
12.6	Annexe 6 : Hypothèses principales et méthodologie de calcul	96
12.7	Annexe 7 : Trajectoires de décarbonation intégrant les émissions CO ₂ sur le cycle de vie	101

1 Introduction

Le transport aérien prendra toute sa part au processus de décarbonation indispensable dans tous les domaines de l'activité humaine. Le monde de l'aérien a su ces dernières décennies mener de front les évolutions technologiques et opérationnelles vers un transport aérien plus sûr, mais également plus abordable, grâce à des produits plus compétitifs et plus économes en énergie. Face à l'urgence climatique, il s'agit maintenant d'aller vers une nouvelle révolution, celle de la décarbonation, en mobilisant toutes les capacités du secteur pour atteindre la neutralité carbone. Le défi actuel est de grande ampleur et il s'impose aujourd'hui, à l'échelle internationale, au monde politique comme à l'industrie.

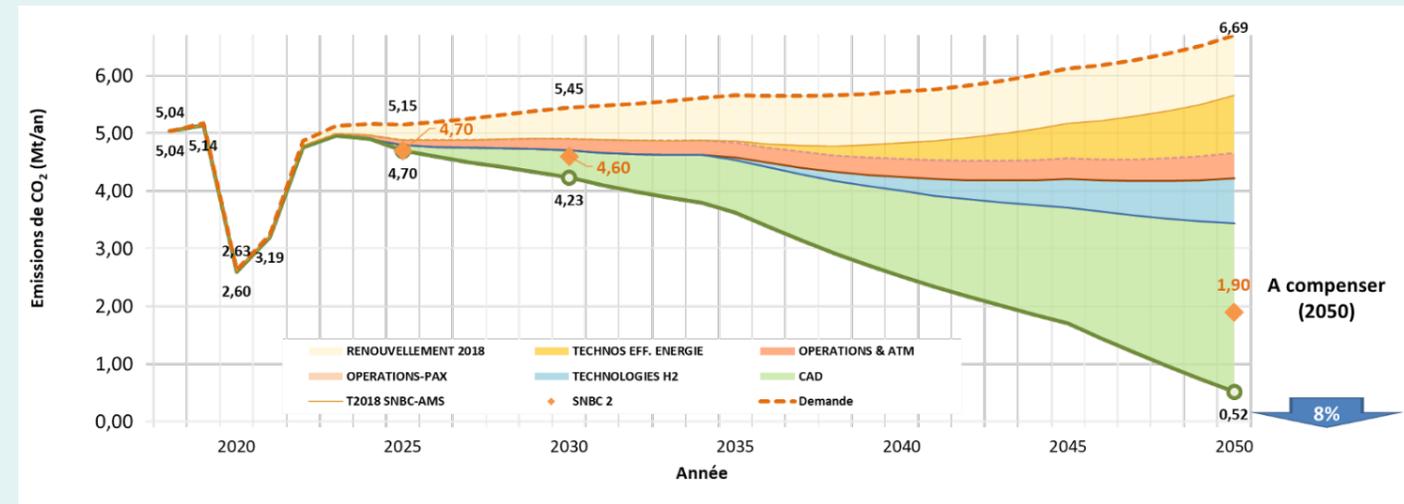
L'Assemblée de l'OACI d'octobre 2022 a fixé l'objectif « aspirational » de la neutralité carbone à l'horizon 2050, agréé par l'ensemble des pays membres. Cela s'inscrit dans la continuité de la déclaration de Toulouse issue du Sommet de l'aviation organisé par la France pendant la présidence française de l'Union européenne, avec désormais une ampleur mondiale.

À la suite des engagements pris au niveau européen, mais aussi par nombre de grands pays aéronautiques, ceci permettra de conjuguer les efforts de tous, acteurs privés et États, pour opérer dans un délai contraint la transition vers un transport aérien durable. La France possède tous les atouts pour s'inscrire en première ligne dans une démarche volontariste et ambitieuse, avec des industriels et des opérateurs de premier plan, sans oublier, et c'est un atout majeur, une capacité de concertation État-Industrie au plus haut niveau.

2 Synthèse des conclusions et du plan d'actions de décarbonation

Sur le périmètre France incluant les vols métropole et outre-mer, le transport aérien a émis 5,4 Mt de CO₂ en 2019, soit 4 % des émissions du secteur des transports et 1,2% de celles de l'économie française. Sur ce périmètre France, la filière projette dans un scénario « Action » une activité décarbonée à près de 80 % à horizon 2050. Les émissions résiduelles sont compensées et le net zéro carbone ainsi atteint. Le renouvellement des flottes, l'utilisation d'avions plus performants, des opérations aériennes optimisées et l'incorporation de carburants d'aviation durables (CAD) permettent d'atteindre ce résultat. Ce scénario est compatible avec les objectifs de la SNBC 2 à horizon 2030 et permet des objectifs réhaussés à horizon 2050. La décarbonation s'accélère après 2030 grâce notamment au recours accru de CAD et à l'arrivée d'avions plus performants.

Un scénario « Accélération » projette une activité décarbonée à hauteur de 92 % à horizon 2050 et plus volontariste dès 2030 où les objectifs de la SNBC 2 seraient améliorés de 43 % (-1,22 Mt contre -0,85 Mt), notamment grâce à plus d'incorporation de CAD dès 2030 (10 % en 2030 et max de 85% d'incorporation en 2050 vs. 63 % dans le scénario Action, en lien avec Refuel EU Aviation) et à une accélération de l'innovation.



Trajectoire de décarbonation périmètre France – Scénario Accélération

Ces deux scénarios prennent en compte une croissance du trafic de 0,8 % par an (en passagers-kilomètres-PKT) sur le périmètre de la SNBC intégrant la prise en compte du surcoût des CAD par rapport au kérosène ainsi que l'effet des politiques environnementales mises en place au niveau national et européen (Fit for 55).

Ces scénarios apparaissent réalistes quant au besoin en biomasse et en électricité mais également cohérents avec l'état de la recherche technologique et sur le plan financier dès lors que l'ensemble des recommandations du rapport sont mises en œuvre.

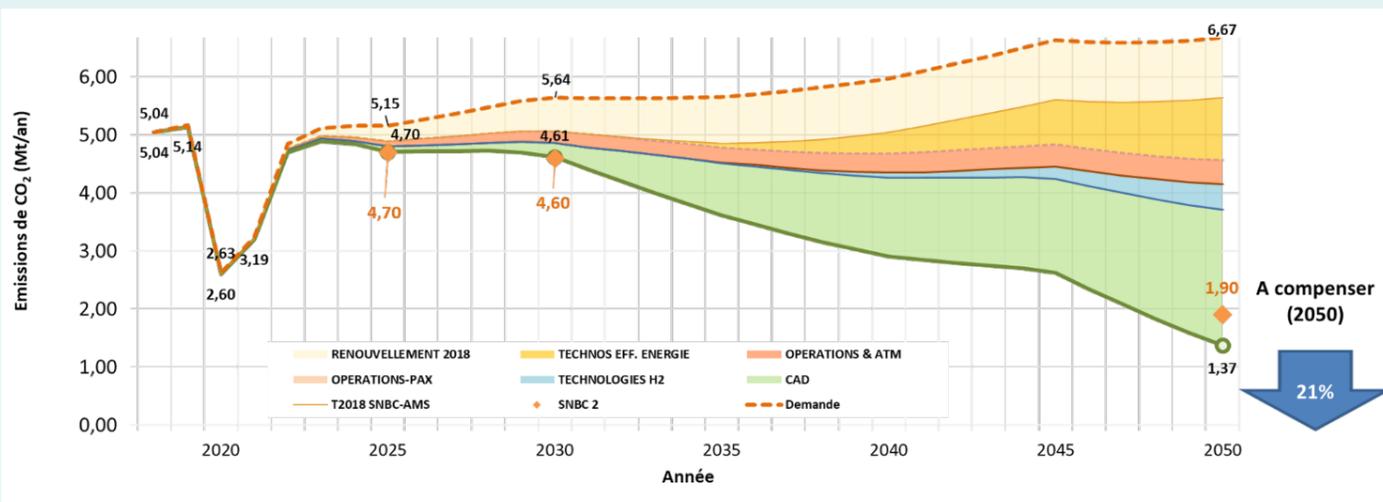
Sur le périmètre international incluant les vols au départ de la France vers l'international, le transport aérien a émis 19,2 Mt de CO₂ en 2019. Ensemble avec le domestique, cela représente 5,4% des émissions de l'économie française.

Sur ce périmètre international, la filière projette dans un scénario « Action » une activité décarbonée à 77% à horizon 2050. Un scénario « Accélération » permet une décarbonation à hauteur de 91% grâce à plus d'incorporation de CAD dès 2030 et à une accélération de l'innovation.

Ces scénarios permettent de respecter les objectifs de la SNBC 2 dès 2030 et même de décarboner bien au-delà (effort de décarbonation quasiment doublé en 2030 avec le scénario Accélération).

Ces deux scénarios prennent en compte une croissance du trafic de 1,1 % par an (en PKT) intégrant la prise en compte du surcoût des CAD par rapport au kérosène ainsi que l'effet des politiques environnementales mises en place au niveau national et européen (Fit for 55).

Les scénarios proposés sont cohérents avec les scénarios du rapport OACI LTAG (Long-Term Aspirational Goal), comme précisé au chapitre 8.



Trajectoire de décarbonation périmètre France – Scénario Action

3 Principe de la démarche et méthode

3.1 L'ARTICLE 301 DE LA LOI CLIMAT ET RÉSILIENCE

L'article 301 de la loi n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets, dite « loi Climat et Résilience », dispose que, pour chaque secteur fortement émetteur de gaz à effet de serre, une feuille de route soit établie conjointement par les représentants des filières économiques, le Gouvernement et les représentants des collectivités territoriales pour les secteurs dans lesquels ils exercent une compétence. Cette feuille de route coordonne les actions mises en œuvre par chacune des parties pour atteindre les objectifs de baisse des émissions de gaz à effet de serre fixés par la stratégie nationale bas carbone.

L'élaboration de chacune des feuilles de route prévues par la loi suit une démarche itérative afin d'impliquer les filières économiques dans la planification écologique :

- dans un premier temps, tout au long de l'année 2022, chaque filière a élaboré une proposition de feuille de route de décarbonation qui recense les leviers de décarbonation qu'elle privilégie, les freins à lever, les actions qu'elle se propose de mettre en place et les propositions d'évolution des politiques publiques qu'elle adresse aux pouvoirs publics pour accompagner cette transition ;
- ces propositions de feuille de route de décarbonation émanant des différentes filières sont remises au Gouvernement au début de l'année 2023. Elles viendront utilement nourrir les décisions et orientations qui seront prises dans le cadre de la planification écologique (répartition des objectifs de baisse des émissions entre secteurs, plans de financement, arbitrages intersectoriels pour répartir les ressources rares, évolution des usages et place de la sobriété...);
- une fois les orientations de la planification écologique décidées, les feuilles de route seront retravaillées par chaque filière conjointement avec l'Etat et les représentants des collectivités locales pour y intégrer les objectifs fixés par la stratégie nationale bas-carbone et plus largement la planification écologique. Elles seront alors transmises au Parlement et constitueront dès lors le plan d'action commun entre les pouvoirs publics et les filières économiques pour garantir l'atteinte des objectifs climatiques.

Le présent document constitue donc la proposition de feuille de route élaborée par le secteur aérien et adressée aux pouvoirs publics début 2023 pour alimenter les chantiers de la planification écologique.

Les propositions d'évolution des politiques publiques qu'il contient n'engagent pas le Gouvernement.

3.2 STRUCTURATION DES TRAVAUX

Le copilotage de l'élaboration de cette feuille de route pour le secteur de l'aérien a été assuré par la Direction générale de l'Aviation civile (DGAC) et le Groupement des industries françaises aéronautiques et spatiales (GIFAS). L'objectif poursuivi est de parvenir à un consensus de l'ensemble des acteurs économiques du secteur de l'aérien sur la dynamique de réduction des émissions de CO₂ à moyen (2030) et long (2050) termes, en mettant en lumière les actions concrètes à mettre en œuvre, et, le cas échéant, en identifiant les conditions de succès et les besoins de soutiens publics.

Ces travaux visent à contribuer à l'atteinte des objectifs de la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC) (outil de planification de la France en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES)). La SNBC 2 en vigueur adoptée en 2020 vise, tous secteurs confondus, une réduction des émissions de GES à l'horizon 2030 de -40% par rapport à 1990. La future SNBC 3 qui sera adoptée en 2024 traduira pour la France, le rehaussement de l'objectif climatique européen (le nouvel objectif de la France à l'horizon 2030 pourrait s'élever à -50% brut des émissions en 2030 par rapport à 1990). Cette feuille de route a été élaborée à la jonction entre ces deux exercices et constitue un engagement essentiel du secteur de l'aérien dans ce travail permanent d'amélioration et d'accélération de la décarbonation de cette filière à l'échelle française et internationale.

Sur la base d'une revue de la littérature existante, déjà fournie¹, relative aux moyens de décarboner l'aérien, des **groupes de travail** ont été mis en place par levier de décarbonation :

- **progrès technologiques**, avec un sous-groupe sur l'adaptation des infrastructures aéroportuaires aux nouvelles énergies,
- **usage et déploiement des énergies décarbonées**,
- **opérations en vol et au sol**.

Il a aussi été décidé de constituer un groupe de travail dédié à la **compensation des émissions de CO₂**, tant les acteurs de l'aérien s'engagent dans des programmes de compensation et tant cette dimension pose des questions de différentes natures qu'il a été jugé opportun de faire figurer dans la présente feuille de route. On souligne que la compensation des émissions de CO₂ ne réduit pas en tant que telle, de manière brute, les émissions de CO₂ du secteur, mais constitue une action transitoire utile et nécessaire dans l'attente de la décarbonation effective du secteur. Pour mémoire, l'article 147 de la loi « Climat et Résilience » oblige les compagnies aériennes à compenser leurs émissions de gaz à effet de serre de leurs vols intérieurs.

Pour chacun de ces leviers, les travaux animés par des co-rapporteurs issus de la filière ont consisté à identifier le potentiel de décarbonation associé, exprimé en réduction de tonnes de CO₂ émises en veillant à le confronter avec les conditions concrètes, notamment législatives, techniques ou industrielles et économiques. L'objectif était de pouvoir esquisser des scénarios qui soient réalistes si certaines conditions, identifiées et spécifiées, sont réunies. Ainsi, deux scénarios à l'ambition graduelle ont été définis.

Il a été jugé nécessaire de retenir deux périmètres géographiques compte tenu des spécificités de l'aérien :

- **un périmètre français** défini comme tous les vols dont à la fois l'origine et la destination se situe en France métropolitaine ou en Outre-mer. Ce périmètre est celui de la SNBC mais aussi celui où les acteurs impliqués dans l'élaboration de la feuille de route ont la marge d'action la plus grande, en particulier sur le plan réglementaire.
- **un périmètre international** défini comme l'ensemble des vols au départ de la France vers l'international. Il est important que la présente feuille de route fixe des ambitions à ce périmètre en raison du caractère intrinsèquement international de l'aérien et de la capacité de nos industries (avionneurs et motoristes) à entraîner un mouvement global vers l'ultra efficacité énergétique. Il est à noter qu'en application de la loi énergie-climat de 2019, la future SNBC comprendra un budget carbone indicatif sur ce périmètre.

Sur la base des conclusions des groupes de travail :

- **C'est à l'échelle de ces deux périmètres géographiques que les simulations des émissions CO₂ sur la période 2022-2050 ont été réalisées en utilisant le modèle développé par l'ONERA** (Office national d'études et de recherches aérospatiales) dans lequel plusieurs hypothèses-clés chiffrées ont été intégrées. Les hypothèses utilisées (évolution du trafic, performance des futurs avions, déploiement des carburants non fossiles, etc.) ont été établies de façon collégiale entre les différents partenaires, en veillant à les inscrire dans des dynamiques cohérentes (Cf. chapitre 8 sur les hypothèses retenues). C'est aussi sur ces deux périmètres que les actions à mettre en œuvre ont été déclinées.
- Les travaux ont été focalisés sur les émissions CO₂ dans le cadre de cet exercice sur l'Article 301 et **ne traite pas des autres externalités environnementales** : bruit, émissions de NOx et de particules fines.
- Par ailleurs, concernant les **effets non CO₂** du transport aérien sur le climat, i.e l'effet des traînées de condensation et des nuages d'altitude induits par ces traînées, les émissions d'oxyde d'azote et des interactions entre particules et nuages, ce sujet fait l'objet depuis 30 ans de recherches scientifiques à l'échelle internationale. La quantification des conséquences sur le climat de ces phénomènes, impliquant la mise en œuvre de modèles multi-échelles complexes, demeure encore assortie d'incertitudes très importantes. L'Annexe 1 détaille l'état de la recherche et les enjeux liés à ces effets non-CO₂ de l'aviation. L'ensemble des participants à l'élaboration de la présente feuille de route ont pleine connaissance de ces enjeux qu'ils intègrent d'ores et déjà dans leurs réflexions, stratégies et travaux de recherche, en parallèle des très nombreux travaux menés par la communauté scientifique en la matière.

¹ Deuxième édition ATAG Waypoint 2050, septembre 2021, https://aviationbenefits.org/media/167417/w2050_v2021_27sept_full.pdf

CORAC, décarbonation du transport aérien, décembre 2021

<https://aerorecherchecorac.com/wp-content/uploads/2022/01/decarbonation-corac-rapport-complet-decembre2021.pdf>

Destination 2050, a route to net zero european aviation, février 2021, de A4E (Airlines For Europe), ACI-Europe (Airports Council International), ASD (AeroSpace and Defence Industries Association of Europe), CANSO (Civil Air Navigation Services Organisation) et ERA (European Regions Airline Association) www.destination2050.eu

Le périmètre d'émissions traité dans ce rapport est le suivant, en accord avec les demandes de l'Etat

- les seules émissions de CO₂ ont été considérées.
- les émissions générées lors de l'élaboration des carburants, fossiles ou renouvelables, ne sont pas comptabilisées. Dans la méthodologie Article 301, ces émissions liées à la production et à la logistique sont allouées à la filière de l'énergie.
- seules les émissions directes des aéronefs en phase d'exploitation ont été considérées. Cela correspond au Scope 1 des compagnies aériennes, selon la classification du Green House Gas Protocol (GHG Protocol). N'ont donc pas été considérées ici les émissions générées pendant les phases de fabrication, de maintenance et de déconstruction des aéronefs, ni celles générées par l'activité aéroportuaire autour des aéronefs. Ceci est justifié par le fait qu'elles représentent une fraction très faible des émissions sur le cycle de vie des aéronefs (moins de 1%).

Néanmoins, il faut noter que les entreprises leaders du secteur en France (Air France, ADP, Airbus, Safran, Thales) se sont d'ores et déjà engagées dans une démarche de réduction de leurs émissions pour l'ensemble du cycle de vie suivant la méthodologie SBTi².

Ces travaux « Article 301 » ont rassemblé une vingtaine d'entreprises, associations professionnelles, instituts de recherche ou administrations durant l'année 2022. L'ensemble des acteurs de la chaîne de valeur s'est impliqué car la décarbonation de l'aérien constitue un véritable défi nécessitant de rassembler toutes les forces et tous les moyens de manière coordonnée au sein d'un écosystème élargi. Les entités suivantes ont été impliquées : compagnies aériennes, constructeurs et motoristes, aéroports, assistants en escale, énergéticiens, acteurs de la compensation, laboratoires de recherche.

4 Le transport aérien en France

En France en 2019, soit avant la crise sanitaire, l'aérien français (domestique et international) a permis à 180 millions de passagers de se déplacer depuis ou vers l'international, depuis ou vers les Outre-mers et en métropole, en prenant un total de 1,57 millions de vols³.

De manière notable, à l'échelle de ce périmètre français domestique, 70 % des distances parcourues par les passagers (PKT) l'ont été pour relier la métropole aux Outre-mers. Ces vols sont le vecteur principal pour assurer la continuité territoriale républicaine et n'ont pas à l'heure actuelle de substituts disponibles.

Les vols intra-métropolitains sont nombreux mais ne représentent que 30 % des distances parcourues par les passagers. Au sein de la métropole, les axes les plus utilisés sont, parmi les liaisons radiales, Paris-Toulouse et Paris-Nice (3,2 M de passagers chacun) puis, parmi les liaisons transversales, Bordeaux-Lyon (0,6 M de passagers). Ces liaisons aériennes fortement plébiscitées correspondent à celles où les solutions de transport alternatives notamment ferroviaires proposent un temps de trajet nettement plus long. En cela, l'existence de ces liaisons aériennes permet une connectivité des territoires et des personnes qui ont à se déplacer pour des raisons professionnelles ou privées.

L'amélioration de l'offre ferroviaire, avec le déploiement progressif des lignes à grande vitesse (LGV), a permis un report modal de l'avion vers le train qui a conduit à la suppression de certaines routes aériennes au sein de la métropole. Il y avait ainsi 11 000 mouvements entre Paris et Strasbourg en 2000 contre plus aucun aujourd'hui. Le nombre de vols entre Paris et Bordeaux a quant à lui baissé de 16 % entre 2016 et 2019, du fait notamment de la mise en service, en 2017, de la LGV Sud Europe Atlantique, une large part du trafic résiduel étant le fait de passagers en correspondance sur des vols long-courriers. L'amélioration de l'intermodalité avion-train, à laquelle travaillent conjointement Air France et la SNCF, pourrait accentuer ce mouvement de report modal et contribuer à la réduction de l'impact climatique de ces trajets, en profitant au mieux de la complémentarité entre modes de transports, chacun sur son domaine de pertinence.

En termes économiques, le secteur de l'aérien est majeur pour l'économie française depuis son émergence dans les années 1960. Il contribue de manière nette à la richesse nationale grâce à des champions nationaux et à un écosystème industriel dense de petites et moyennes entreprises touchant l'ensemble de la chaîne de valeur de la construction aérienne. La filière manufacturière rassemble sur tout le territoire, des acteurs majeurs dans tous les segments de marché, aviation commerciale, aviation d'affaires, aviation générale, régionale, hélicoptères. L'excellence de la filière française, inscrite dans un cadre européen solide, dans lequel ce secteur a joué un rôle majeur d'intégration, se traduit en impact largement positif sur la balance commerciale⁴, en emplois de haute technicité ancrés sur le territoire national⁵ et entraîne tout un tissu industriel, des grands groupes aux ETI-PME et aux laboratoires. Pour rappel, la France est à ce jour le seul pays, avec les Etats-Unis, à maîtriser de bout en bout la fabrication d'un aéronef. Ainsi, le défi de la décarbonation du secteur de l'aérien se pose avec encore plus de gravité en France et requiert des attentions d'autant plus accrues de la part de l'ensemble du pays.

Le secteur de l'aérien, y compris la construction aéronautique, totalise 1 142 000 emplois directs et indirects⁶. Il génère une richesse annuelle de 90 Mds € de chiffre d'affaires, soit une contribution au PIB de 3,8 %. Il contribue positivement à la balance commerciale française à hauteur de 31 Mds € tandis que celle-ci est au global déficitaire (-59 Mds €)⁷. Le secteur de l'aérien en France participe aussi de manière massive aux efforts de recherche et d'innovation fondamentales et technologiques (12% des chiffres d'affaires sont consacrés à la R&D) avec des effets d'entraînement sur d'autres secteurs. Il contribue au rayonnement académique et scientifique des instituts et chercheurs français.

Le caractère international du marché de l'aérien doit être souligné et imprègne les réflexions sur les voies et moyens à emprunter en vue de la décarbonation du secteur. Schématiquement, un secteur aérien français (incluant le périmètre domestique plus les départs vers l'international) qui serait le seul à se décarboner ne contribuerait à baisser les émissions mondiales du secteur que de 2,6 %, laissant encore 890 Mt de CO₂ émis par le transport aérien dans le reste du monde. Si l'on restreint cette estimation au périmètre domestique à strictement parler, la proportion des émissions de CO₂ dues à ces vols ne représente que 0,6% de l'empreinte carbone de l'aérien mondial.

Par ailleurs, pour le cas des vols longs courriers avec une correspondance en Europe, un secteur aérien français ou européen seul à se décarboner conduirait à une situation doublement pénalisante car l'escale se déplacerait vers une destination non européenne où les normes environnementales sont moindres, par exemple en matière d'obligation de compensation ou d'utilisation de carburants alternatifs, et ce parfois avec un trajet plus long donc plus émissif. On assisterait donc à une fuite de carbone, c'est-à-dire à un volume d'émissions de CO₂ plus élevé que si l'escale avait eu lieu en Europe, et à un appauvrissement des acteurs français et européens délaissés pour des zones et acteurs assujettis à des normes environnementales moins disantes. Cette problématique a été documentée dans différentes études⁸.

Par ailleurs, le trafic mondial croît bien plus vite que le trafic aérien français en termes de nombre de **passagers-kilomètres (PKT)**, qui est la distance totale parcourue par les passagers. Cet indicateur permet de prendre en compte l'évolution du nombre de passagers mais aussi de la distance qu'ils parcourent.

² La Science Based Target (SBTi) est une initiative d'experts internationaux qui permet d'évaluer, sur des bases scientifiques, si les évolutions des émissions de gaz à effet de serre d'un acteur économique sont compatibles avec l'objectif de limitation à 2°C ou 1,5°C de la température moyenne de la planète.

³ Source : bulletin statistique décembre 2019

⁴ Les 2/3 de son chiffre d'affaires en 2021 ont été réalisés à l'export, ce qui en fait le premier secteur exportateur français.

⁵ Plus de 188 000 emplois directs en 2021 pour l'industrie manufacturière.

⁶ Chiffres Assises nationales du transport aérien https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Strategie_TA.pdf

⁷ Chiffres 2019 du Trésor. Attention ce sont les chiffres aéronautique et spatial, le spatial représentant environ 10% des chiffres de l'aéronautique civile <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/2c7eaae5-7a97-4cbf-9d85-7ae9b05b36fd/files/7cba2edc-fd9a-430c-a92f-12514424b6cb>

⁸ <https://www.seo.nl/en/publications/aviation-fit-for-55/>

PKT	Taux de croissance annuel moyen 2000-2019	Taux de croissance cumulée 2000-2019
Trafic domestique France (yc OM)	1,0 %	20,6 %
Trafic international France (dép.)	3,7 %	100 %
Trafic mondial (services réguliers)	5,7 %	186 %

Ce tableau⁹ montre que le trafic domestique a crû mais dans une proportion bien moindre que le trafic international pour la France qui a doublé en 20 ans. Cette dynamique est elle-même bien moindre que celle du trafic mondial qui a été multiplié par 2,9 dans cette période.

Il convient donc d'agir à l'échelle internationale par des actions diplomatiques ou industrielles, au sein de l'Organisation internationale de l'aviation civile (OACI), à l'échelle européenne mais aussi de manière bilatérale. Ces discussions et travaux coopératifs à l'international requièrent du temps mais constituent un instrument très efficace de décarbonation européenne et mondiale, ce qui est aussi recherché.

Il s'agit de conjuguer des actions effectives de décarbonation, correctement dimensionnées au niveau local français et générant un effet d'entraînement sur les partenaires étrangers, avec des actions de coopération industrielles et diplomatiques à l'international (y compris UE), en prêtant attention à leurs effets environnementaux et financiers.

5 Décarbonation du transport aérien : bilan et progrès accomplis

Il a été choisi d'étudier le secteur aérien tel qu'il était avant la crise du Covid donc les chiffres de 2019 servent de référence.

5.1 ÉMISSIONS GLOBALES

À l'échelle mondiale, en 2019, le transport aérien représente 2,5 % des émissions de CO₂ d'origine humaine, soit 915 M tonnes (chiffres limités à la combustion et non sur l'ensemble du cycle de vie). 1/3 de ces émissions proviennent des vols domestiques ; 2/3 des vols internationaux ; 80% des émissions proviennent de vols sur plus de 1 500 km.

Sur le périmètre français domestique, l'aérien a émis 5,4 Mt de CO₂ au global en 2019, dont 56 % pour les liaisons entre la métropole et l'outre-mer et 44 % pour les liaisons métropolitaines¹⁰.

Ces données propres à l'aérien domestique français sont à mettre au regard des émissions des autres secteurs d'activité. Pour 2019 :

- Les émissions de l'aérien domestique représentent **4 % des émissions du secteur des transports** ; la quasi-totalité des émissions de ce secteur provenant du secteur routier.
- Les émissions de l'aérien domestique représentent **1,2 % des émissions associées à l'intégralité de l'économie française**.

⁹ Source DGAC

¹⁰ Bulletin Tarmaac DGAC 2019 https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/bilan_emissions_gazeuses_2019.pdf

Selon les données d'inventaire (valeurs recalées par les ventes de carburant aviation en France), les émissions totales de CO₂ pour l'ensemble du trafic aérien, incluant l'aviation commerciale (avec APU) et l'aviation non commerciale (de l'ordre de 4%) se sont élevées à 5,4 Mt en 2019 pour les vols intérieurs y compris Outre-mer.

Les vols internationaux au départ de la France ont émis en 2019 19,2 Mt de CO₂. Parmi ces émissions, 25 % sont issues du trafic avec un pays de l'Espace économique européen.

En somme, le secteur aérien français a émis, en 2019 24,2 Mt de CO₂ (en ne comptabilisant que les vols au départ de la France, afin d'éviter les doubles comptes dans un bilan mondial), soit 5,6 % des émissions associées à l'intégralité de l'économie française.

5.2 ÉMISSIONS UNITAIRES

Les émissions mondiales du secteur aérien sont en croissance depuis 1990 en raison de la forte hausse du trafic. Les émissions domestiques sont passées de 4,2Mt CO₂ à 5,4Mt CO₂ en 2019 et les émissions des vols internationaux au départ de la France de 8,9Mt de CO₂ à 19,2Mt de CO₂. **Néanmoins, les émissions unitaires, c'est-à-dire par passager et kilomètre parcouru ont drastiquement baissé. Elles ont été divisées par 5 depuis 1960 et par 2 depuis 1992.**

Ces améliorations sont dues aux progrès technologiques opérés par les industriels, ayant trait notamment à la performance des moteurs qui consomment moins de kérosène, à l'allègement de la masse des avions, à l'optimisation de leur aérodynamisme et également à l'aide apportée par les systèmes électroniques embarqués. Ces améliorations ont été intégrées dans les différents modèles d'avions qui se sont succédés, entraînant entre chaque génération des gains d'efficacité énergétique de l'ordre de 10 % à 15 %. Certaines ruptures technologiques ont eu des effets spectaculaires, comme par exemple l'utilisation du moteur double flux qui a permis de réduire la consommation de 30 %. La dernière génération d'avions et de moteurs consomme entre 2 et 3 litres aux 100 km par passager, voire moins de 2 litres sur certains types de vol. Pour l'ensemble de ses avions livrés en 2019, Airbus évalue une empreinte de 66,6 g de CO₂/passager/km et qui diminue encore chaque année avec un chiffre de 62,6 g en 2021¹².

Les progrès récents depuis 1990 sont notamment documentés dans la Fact sheet ATAG (Air Transport Action Group) « Tracking Aviation Efficiency » de janvier 2020¹³, où est tracée la réduction significative en grammes de CO₂ par km passager entre 1990 (237 g) et 2019 (104 g), à partir des données des compagnies aériennes (IATA).

Ces améliorations significatives ont, par ailleurs, généré une diminution des coûts du transport aérien grâce à une moindre consommation de kérosène, ayant ainsi rendu le transport aérien largement plus accessible.

Les industriels mettent ainsi constamment en œuvre des programmes d'innovation technologique, en cela soutenus financièrement par les grandes nations aéronautiques dont la France.

Le souci de l'empreinte environnementale a aussi été stimulé par la réglementation qui n'a cessé d'être plus exigeante d'année en année vis-à-vis des performances exigées pour les aéronefs. Ces normes, de portée internationale, ont été conçues dans le cadre de l'OACI, assurant ainsi une amélioration uniforme des avions et donc des progrès environnementaux à l'échelle mondiale, comme évoqué plus haut.

En matière de navigation aérienne, les pratiques du contrôle aérien, couplées à l'usage d'outils d'aide à la gestion du trafic, à une meilleure coordination entre les usages civils et militaires, et à une coordination européenne efficace, ont déjà permis d'améliorer les trajectoires de vol et donc la qualité de service rendue aux usagers. L'indicateur de performance suivi par la Commission européenne, le « KEA¹⁴ » évalue pour chaque vol l'écart entre la route réellement suivie et la route la plus courte. Cet indicateur a été amélioré de 10 % environ entre 2011 et 2022, pour atteindre aujourd'hui 96,75% au-dessus du territoire métropolitain. Des améliorations sont encore possibles, sans dégrader le niveau de sécurité élevé de la circulation aérienne (voir chapitre 7.3).

¹¹ Inventaire national du CITEPA au format SECTEN, Édition 2022. La définition et le suivi des objectifs de la Stratégie nationale bas-carbone se basent sur l'inventaire national des émissions de gaz à effet de serre établi annuellement par le CITEPA, au format SECTEN.

¹² AIRBUS Universal Registration Document 2021

¹³ Fact Sheet ATAG (Jan 2020) : https://aviationbenefits.org/media/167475/fact-sheet_3_tracking-aviation-efficiency-v2.pdf

¹⁴ KEA =horizontal en-route flight efficiency (actual trajectory)

6 Articulation de la présente feuille de route avec la stratégie nationale bas carbone (SNBC)

Cette feuille de route de décarbonation du secteur de l'aérien s'insère dans une démarche plus large d'élaboration et de mise en œuvre d'une stratégie nationale bas carbone, française et intersectorielle, pilotée par le Gouvernement afin de respecter ses engagements climatiques, notamment l'Accord de Paris visant à limiter le réchauffement climatique.

La dimension intersectorielle de la SNBC est un enjeu dans la mesure où la décarbonation de tous les secteurs d'activité posera des questions d'accès aux sources d'énergie décarbonées. Une stratégie fine de séquençage de la décarbonation devra certainement être adoptée compte tenu de la disponibilité limitée, à ce stade, des énergies décarbonées. La présente feuille de route a également pris en compte ces contraintes dans l'élaboration de ses engagements et préconisations.

À la date de rédaction de cette feuille de route, la SNBC 2 en vigueur fixe à l'aérien les objectifs d'émissions maximales suivantes :

Projeté : scénario de référence de la SNBC 2 ¹⁵				
Mt CO ₂ eq	2015 (observé)	2025	2030	2050
Aviation FRANCE	4,6	4,7	4,6	1,9
Aviation INTERNATIONALE	17,5	19,1	21,4	11

En d'autres termes, la SNBC 2 fixe pour l'aérien français un objectif de stabilité du volume des émissions de CO₂ jusqu'en 2030 qui est une date charnière dans la trajectoire de décarbonation, date à laquelle s'enclenche une diminution des émissions jusqu'en 2050, grâce notamment au recours à des énergies décarbonées et à des ruptures technologiques espérées comme l'avion à hydrogène.

Une même logique a gouverné la définition des objectifs de l'aviation internationale de la SNBC 2, avec néanmoins une légère augmentation des émissions jusqu'en 2030 en raison de la hausse du trafic avant de baisser grâce à l'activation de ces leviers de décarbonation.

La SNBC 3 devra être adoptée en 2024 et portera une ambition rehaussée par rapport à la SNBC, en déclinaison du relèvement de l'ambition climatique européenne (Fit for 55). Elle fixera donc des objectifs de réduction d'émissions sectorielles plus exigeants. La présente feuille de route s'inscrit par conséquent dans une double logique d'application de la SNBC 2 et de préparation de la version suivante. Les participants à l'élaboration de cette feuille de route ont souhaité fournir un maximum d'informations et d'engagements de nature à éclairer la définition des nouveaux objectifs, en soulignant au travers de plusieurs scénarios, les conditions et implications des différents niveaux d'ambition de réduction des émissions de CO₂.

¹⁵ Source : « Guide national sur les principales méthodologies de construction par une entreprise d'une trajectoire de réduction de ses émissions de gaz à effet de serre cohérente avec les budgets carbone sectoriels » disponible en ligne à l'adresse : <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Guide%20art.%2066%20LFR3.pdf>

7 Analyse des leviers de décarbonation du secteur

7.1 LES PROGRÈS TECHNOLOGIQUES

Le progrès technologique est une composante essentielle de la stratégie de décarbonation du transport aérien. À l'horizon 2050, sa contribution à la réduction globale des émissions de CO₂ du secteur sera de l'ordre de 40 %, en intégrant le renouvellement des flottes avec les technologies actuelles et les gains des technologies futures. Même si le temps de la transformation technologique est généralement long pour le secteur aérien, en raison des défis techniques, normatifs, sécuritaires, organisationnels et financiers, les leviers technologiques proposés peuvent être activés de manière phasée, afin de permettre sans attendre une inflexion de la courbe d'émissions de CO₂, grâce au renouvellement des flottes, bénéficiant des avancées des appareils de dernière génération (qui ne représentent à l'échelle mondiale que 20% des flottes en service). Également, une politique volontariste des acteurs du secteur – compagnies aériennes, opérateurs des infrastructures, constructeurs d'aéronefs – associée à un soutien fort des pouvoirs publics doivent permettre de sécuriser et d'accélérer les actions dans ce domaine.

De fait les 3 leviers principaux identifiés et présentés ci-dessous produiront un premier effet sur la trajectoire de décarbonation à des horizons différents, mais tous sont à activer et à soutenir dès maintenant. Ces 3 leviers technologiques sont :

1. Le renouvellement des flottes, permettant de remplacer les appareils opérant en France et au départ de la France par des appareils de dernière génération à meilleure efficacité carbone => deux horizons : déploiement complet des aéronefs dits « technologie 2018 », en cours, avec objectif de l'achever avant 2035, puis déploiement de la « nouvelle génération d'aéronefs » au-delà.

2. La conception et l'industrialisation d'une nouvelle génération d'aéronefs, gamme complète d'appareils d'efficacité énergétique accrue, capables d'utiliser des énergies bas carbone (électricité, CAD, H₂), et à forte efficacité économique et environnementale. Deux horizons : (1) certification/industrialisation des différents programmes au cours de la prochaine décennie ; (2) déploiement à partir de 2033-2035 selon les programmes.

3. La compatibilité des aéronefs et moteurs existants et futurs avec une variété de carburants alternatifs au kérosène, d'origine biomasse ou synthétique, sans mélange « 100% Carburant d'aviation durable » => Horizon de certification 2025-2030.

Pour permettre le déploiement effectif des carburants d'aviation durables et des avions à recharge électrique ou à hydrogène, une adaptation des infrastructures au sol sera requise pour assurer d'une part l'approvisionnement des aéroports, et d'autre part des opérations de recharge et d'avitaillement efficaces en toute sécurité. L'impact sur les aéroports est présenté au chapitre 7.4.

7.1.1 RENOUVELLEMENT DES FLOTTES

7.1.1.1 Un levier important de décarbonation

L'arrivée récente ces dernières années de nouveaux appareils permet aux compagnies aériennes de réduire de manière importante les émissions par passager-kilomètre. L'ordre de grandeur associé à ces gains d'émissions sur des avions récents en service est d'environ 20 %.

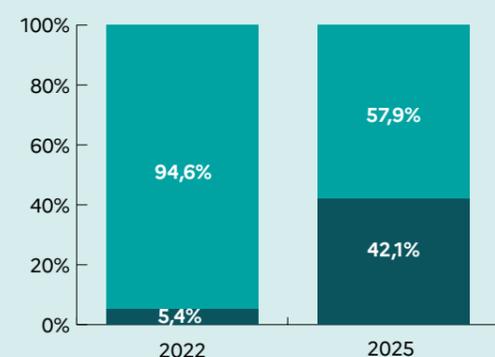
À des horizons proches (2035-2040), de nouvelles générations d'appareils entreront en service amenant de nouveaux gains en termes d'émissions. En supposant un renouvellement à 100 % du parc avion, le gain maximum théorique de consommation serait d'environ 36 % en termes de kg/passager-kilomètre (moyenne sur les différents programmes). En conséquence, la capacité des compagnies aériennes à renouveler leurs flottes vers des avions de générations plus récentes est et sera un des facteurs clés de succès de la décarbonation de l'aérien, encore plus spécifiquement à court terme aux horizons 2030.

7.1.1.2 Une transformation d'ores et déjà lancée

En plus de leurs améliorations environnementales (CO2 mais également bruit et émissions NOx/particules fines), ces nouvelles technologies permettent de réduire fortement les coûts de carburant, induisant à la fois la diminution des coûts au passager/km et la diminution des prix des billets. Le tout constitue une dynamique permettant aux compagnies aériennes de dégager des capacités d'investissements plus importantes et les autorisant à engager des politiques de renouvellement de flottes accélérées.

Ce processus est déjà à l'œuvre et à court terme, au vu des commandes d'avions effectuées par les compagnies desservant le sol français, cette accélération est amenée à s'amplifier fortement au moins jusqu'en 2025. À titre d'exemple, à l'horizon 2025, c'est respectivement 42 % et 54 % de la flotte opérant sur des vols domestiques et Outre-mer qui sera renouvelée par des appareils de dernière génération. Ce saut technologique revêt un caractère inédit dans l'histoire du transport aérien français, démontrant la prise de conscience et le fort engagement des compagnies aériennes en termes de politique environnementale.

Evolution de la Flotte de NG 2022 vs 2025 (Domestique)



Evolution de la Flotte de NG 2022 vs 2025 (DOM)



■ PG : première génération ■ NG : nouvelle génération

7.1.1.3 Une modification profonde des business model actuels

Si les avantages en termes de décarbonation et de diminution des coûts opérationnels sont importants, le renouvellement rapide des avions ainsi que le rajeunissement des âges de sortie des flottes induisent de nombreuses contraintes. Le coût de formation des équipages et personnels au sol, du matériel et de la maintenance pourrait ainsi croître de manière importante.

De plus, concernant le retrait d'avions en service, il est important de noter que le marché des avions d'occasion pourrait être soumis à de fortes instabilités durant ces prochaines années en fonction des décisions politiques internationales liées à l'environnement. Par exemple, la conduite d'une politique internationale globale de renouvellement aura pour effet de réduire fortement les valeurs financières résiduelles sur le marché de la revente d'avions encore exploitables.

7.1.1.4 Un levier fragile et dépendant d'une certaine stabilité économique

Si ce levier est un des éléments importants de la stratégie de décarbonation du secteur aérien, il est cependant soumis à plusieurs conditions nécessaires à son bon déploiement. En effet, les coûts d'acquisition et d'entretien des appareils constituent des sommes conséquentes en termes d'investissements et de coûts opérationnels pour les compagnies qui doivent être maîtrisées.

Cet important besoin de financement nécessitera une certaine stabilité économique et un environnement réglementaire préservant les capacités d'investissement des compagnies aériennes. Il est donc primordial d'essayer, autant que possible, de garantir un minimum de stabilité économique afin de sécuriser et diminuer le niveau de risque de ces futurs investissements.

Le secteur aérien doit et devra faire face à une multitude de surcoûts liés à la décarbonation. Surcoûts d'acquisitions, surcoûts des CAD, compensation ou bien taxes, tous ces changements pourraient affecter de manière drastique la capacité des compagnies aériennes à opérer des avions plus performants. Il est donc nécessaire de se placer dans un cercle vertueux en tentant d'impacter au minimum les ressources financières des acteurs.

7.1.1.5 Une potentielle nécessité d'accompagner cette transition

Enfin et comme explicité ci-dessus, si les compagnies sont pleinement engagées à déployer ce levier au maximum de leur capacité, elles restent cependant dépendantes du cadre économique, généralement influencé et imposé par des éléments extérieurs.

Dans le cas où le rythme de renouvellement souhaité ne serait pas ou plus en corrélation avec les valeurs de marché, des mécanismes d'incitation devront être mis en œuvre pour la bonne tenue des objectifs. Ces mécanismes pourraient être de plusieurs natures : financières, fiscales ou comptables, avec pour objectifs la sécurisation et la facilitation à engager des ressources, nécessaires à un renouvellement accéléré.

7.1.1.6 Modélisation du renouvellement des flottes

Compte tenu de la forte accélération du renouvellement des flottes jusqu'à 2025, les données d'entrée initiales du modèle sont issues de **projection des flottes à 2025**. Pour ce faire, un recensement des flottes actuelles et des carnets de commandes arrêtés à 2025 a été effectué en se basant sur un échantillon de compagnies aériennes représentatives sur chaque périmètre. Des projections prenant en compte les variations de trafic et les transformations éventuelles des compagnies concernées ont été effectuées.

Deux scénarios ont été initialement envisagés : un scénario raisonnablement optimiste considérant une faible augmentation par rapport aux taux moyens de renouvellement constatés dans le passé et un scénario beaucoup plus optimiste, au vu de l'effort très significatif en termes d'investissements pour les compagnies aériennes que ce dernier scénario nécessiterait.

- 1 - Scénario de renouvellement raisonnablement optimiste : 5%/an en moyenne (équivalent à un âge moyen de retrait de 20 ans) ;
- 2 - Scénario de renouvellement très optimiste : 6,6%/an en moyenne (équivalent à un âge moyen de retrait de 15 ans).

Le second scénario n'a pas été retenu finalement compte tenu de sa complexité de mise en œuvre. Tant d'un point de vue financier que du point de vue industriel et opérationnel, des âges de retrait trop accélérés et particulièrement à 15 ans seraient difficilement atteignables. En effet, ce niveau de renouvellement nécessiterait d'accroître les capacités d'investissement des compagnies aériennes et induirait une forte hausse des amortissements associés à ces nouveaux appareils. Il en résulterait une augmentation significative des coûts. De plus, cela induirait un effet « pic » sur les supply-chains constructeurs rendant plus complexe et économiquement moins efficient un renouvellement de cette ampleur. Un tel effort serait ainsi contre-productif pour la décarbonation du secteur qui serait contraint de diminuer ses investissements. Il est convenu que **le niveau le plus pertinent de renouvellement correspond au premier scénario à 20 ans**.

Les taux de renouvellement appliqués dans le modèle peuvent être légèrement différenciés entre les avions de type moyen-courriers et long-courriers en raison de la plus grande difficulté à renouveler certains avions de types long-courriers. Ces difficultés sont de deux ordres : premièrement les délais moyens de réception sont allongés, dans un second temps, les coûts d'investissement sont bien supérieurs aux avions de type moyen-courrier et nécessitent donc plus d'espacement.

À partir de 2035, le renouvellement des flottes, tous segments confondus, est conditionné à l'arrivée sur le marché d'avions de nouvelle génération, plus efficaces, tel que prévu dans la rubrique 7.1.3.

7.1.1.7 Conditions de succès et risques

Les risques sont les suivants :

- R1/ Le report des dates d'entrée en service des futurs programmes moyen-courriers et long-courriers ;
- R2/ La non-disponibilité d'avion de nouvelle génération due à une montée en cadence trop longue ;
- R3/ La capacité d'investissement des compagnies aériennes.

Recommandations

- C1/ Préserver la capacité d'investissement des compagnies aériennes au travers de l'instauration d'un cadre réglementaire équilibré ;
- C2/ Uniformisation des politiques environnementales au niveau international pour limiter les distorsions de concurrence ;
- C3/ Mise en place d'un éventail de mécanismes financiers incitatifs qui sécuriseraient et accéléreraient le renouvellement des flottes. À cet égard, il pourrait notamment être mis en place un dispositif de sur-amortissement fiscal pour le remplacement d'un avion d'ancienne génération par un avion de nouvelle génération plus vertueux sur le plan environnemental. Un tel dispositif a été voté par le Sénat à l'occasion du projet de Loi de Finances 2023¹⁶.

7.1.2 Nouvelle génération d'aéronefs

L'industrie aéronautique française et européenne s'est engagée dans une démarche pionnière sur les technologies qui ont un fort potentiel de décarbonation du transport aérien : systèmes de propulsion à consommation réduite, aérostructures allégées, nouvelles configurations aérodynamiquement plus efficaces, systèmes permettant d'optimiser les opérations du point de vue des émissions de gaz à effet de serre, utilisation de l'hydrogène, etc.

Ces technologies, dès que leur viabilité aura été confirmée, et que leur maturation aura permis de garantir leur efficacité industrielle et opérationnelle, ont vocation à être intégrées dans une offre d'aéronefs de nouvelle génération, dans une fenêtre d'entrée en service allant de 2030 à 2045, suivant les catégories d'appareils.

7.1.2.1 Un effort à impact mondial

L'objectif de cette nouvelle génération est bien de pénétrer le marché mondial, à un niveau au moins égal aux parts de marché obtenues aujourd'hui par les constructeurs européens, avec même l'ambition de l'augmenter grâce à son caractère pionnier. Il faut rappeler que la flotte actuelle des avions de plus de 100 places est composée environ pour moitié d'avions Airbus, ce qui montre que l'impact de la décarbonation est d'autant plus important. La concurrence sera bien sûr très forte de la part des constructeurs américains et chinois, qui par effet d'entraînement constitueront eux aussi des offres innovantes et compétitives.

L'effort technologique, initié par l'industrie française et européenne, et que cette industrie a besoin de mener au moins jusqu'à la fin de la décennie, vise donc deux objectifs indissociables :

- une réduction importante des émissions de CO2 mondiales - 25% à -35% en 2050, en plus du renouvellement en cours des flottes actuelles et de l'introduction des CAD;
- la pérennité de l'excellence technologique et industrielle française, garante d'emplois, de prospérité économique, et de souveraineté.

7.1.2.2 Caractéristiques de la nouvelle génération d'aéronefs

Cette nouvelle génération concerne l'ensemble des segments de l'aviation : l'aviation commerciale régionale, court/moyen courrier, long courrier, l'aviation d'affaires, l'aviation légère, les hélicoptères. Mais c'est bien l'aviation commerciale qui est de loin le contributeur essentiel, que ce soit pour le transport aérien français ou mondial.

Cette nouvelle génération devra bien sûr être compatible avec les sources d'énergies bas carbone (électricité, carburants d'aviation durables). Elle devra être extrêmement efficace énergétiquement. Les gains ambitieux en efficacité qui ont été posés comme objectifs par le CORAC (Conseil pour la Recherche

¹⁶ L'article 7 quater : suramortissement pour les achats d'avions propres : <http://www.senat.fr/rap/22-213/22-2135.html>

Aéronautique Civile) par rapport aux modèles de dernière génération sont de :

- 20 à 25 % pour le segment régional ;
- 25 à 30 % pour le segment court/moyen courrier ;
- 10 à 20 % pour le segment long courrier.

Cette nouvelle génération devra être encore plus sûre et efficace en opérations, être compétitive en coût d'achat et d'utilisation et être produite par une industrie souveraine et éco-efficace.

Il faut aussi souligner qu'un calendrier agressif est recherché : des entrées en service visées entre 2033 et 2045 suivant les modèles utilisant des CAD ou l'hydrogène, et des montées en cadence de production en quelques années à des niveaux historiquement hauts – 65 à 75 appareils par mois sur le segment court-moyen courrier.

7.1.2.3 Scénarios de référence pour les projections

En termes d'effet sur la trajectoire de décarbonation, le CORAC a établi¹⁷ en 2021 deux scénarios technologiques ambitieux, qui catalysent les actions d'accélération de la R&T de la filière. Ces scénarios, dits S1 et S2, sont positionnés sur la fourchette haute de la caractérisation donnée plus haut sur l'efficacité énergétique : gain de 20 % pour régional, 30 % pour court-moyen courrier, 20 % pour long courrier. Ils se différencient par la date de mise sur le marché de premières solutions d'aéronefs à hydrogène pour le segment court-moyen courrier : 2045 pour S1, 2035 pour S2.

Ce sont ces scénarios qui ont été retenus comme référence pour les projections de trajectoire intégrée de ce rapport. Toutefois il est clair que des incertitudes existent sur la capacité des technologies à atteindre l'ensemble des objectifs aux dates prévues par les scénarios S1 et S2 : efficacité énergétique et montée en puissance des solutions hydrogène. Ces incertitudes sont prises en compte dans l'analyse intégrée.

7.1.2.4 Conditions de succès et risques

Deux risques principaux ont été identifiés :

R1/ La non-disponibilité à temps de bases réglementaires agréées mondialement pour la certification de ces aéronefs fortement innovants, ainsi que pour leur opération, en particulier pour l'avitaillement des versions hydrogène. Pour maîtriser ce risque, il convient de maintenir le rythme des travaux menés par l'EASA avec les industriels, mais aussi de s'assurer de la bonne prise en compte des technologies potentiellement critiques comme l'hydrogène par les instances internationales comme l'OACI.

R2/ La non-disponibilité à temps des solutions d'avitaillement sur les aéroports, en particulier pour l'hydrogène, sur les réseaux opérés par les compagnies aériennes, en France et dans le monde. Ce point est traité au chapitre 7.4.

Recommandations

Afin d'atteindre ces ambitions élevées dans les délais fixés, trois conditions de succès clés ont été identifiées :

- C1/ Mettre en œuvre la feuille de route du CORAC, par un plan technologique et industriel 2020-2029 multi-segments, soutenu par la puissance publique dans le cadre d'une programmation pluriannuelle ;
- C2/ Garantir la compétitivité de l'offre et la réactivité de la chaîne de valeur « industrie aéronautique » par l'innovation industrielle et la continuité numérique entre acteurs ;
- C3/ Garantir que les compétences nécessaires au développement, industrialisation et exploitation des appareils innovants seront disponibles en nombre et qualité.

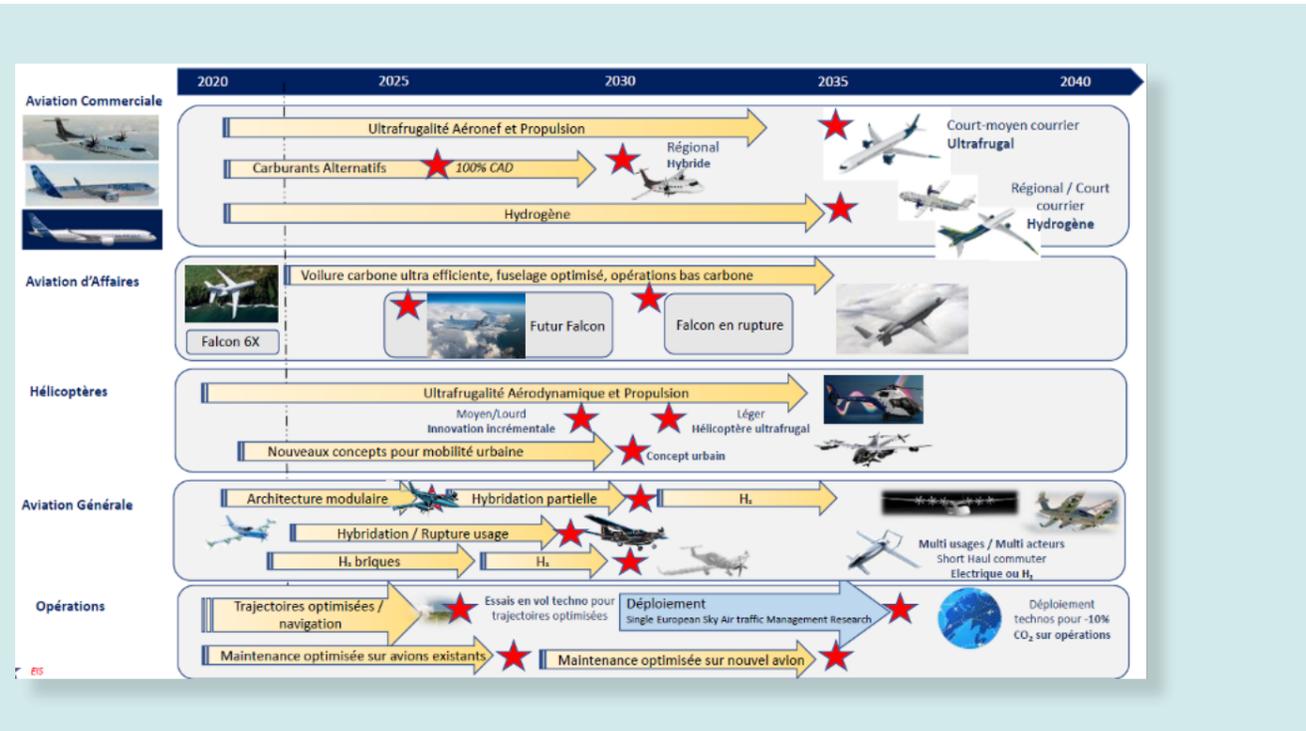
Les 2 premières conditions sont précisées ci-dessous. La troisième est abordée au chapitre Compétences de ce rapport (§11).

¹⁷ Document « Décarbonation du transport aérien-Analyse et propositions du CORAC » (dec 2021) <https://aerorecherche.corac.com/wp-content/uploads/2022/01/decarbonation-corac-rapport-complet-decembre2021.pdf>

7.1.2.5 Mettre en oeuvre la feuille de route du CORAC

Les ambitions sont les suivantes :

La feuille de route du CORAC décline les ambitions en termes qualitatifs et quantitatifs et établit la démarche de démonstration de faisabilité et de montée en maturité technologique, incluant des étapes de démonstration au sol et en vol. Elle s'articule sur les horizons calendaires d'un programme multi-segments « Master plan 2020-2029 », établi en 2020 et mis à jour en 2022 (voir schéma stratégique ci-après). Ce Master plan est aligné en objectifs technologiques et calendaires avec les grands programmes européens.



Le « Master plan » a été détaillé et chiffré sur 10 ans, pour un montant total d'activité de 10Md€, incluant une part d'autofinancement de 50 %. Pour les principaux segments de marché, le Master plan prévoit des étapes de choix d'architecture et de maturation technologique (2020-2024), de démonstrations en vol (2025-2027), de montée en maturité industrielle dans la Supply Chain et un début de développement vers 2029-2030. Pour les segments court-moyen-courrier et régional, cette feuille de route est étroitement articulée avec les programmes européens, Clean Aviation et Sesar. Notre stratégie de R&T doit constituer une base technologique permettant la réalisation, avec nos partenaires européens, d'étapes de démonstration déterminantes au milieu de cette décennie.

Grâce au soutien majeur des pouvoirs publics, ce plan décennal a pu être lancé, avec les volets aéronautiques du plan France Relance et de France 2030. Ces programmes ont d'ores et déjà permis d'accélérer le développement de technologies de rupture, comme le moteur non caréné RISE, l'hybridation, les nouvelles configurations, la mise en oeuvre de l'hydrogène.

L'ensemble de nos entreprises, des grands groupes aux PME ont mobilisé depuis 2 ans leurs équipes et défendu leurs investissements à parité dans la R&T malgré la crise. Des dizaines de projets aux conséquences majeures pour la transition énergétique du secteur à l'échelle mondiale ont été lancés. Pour poursuivre au rythme attendu, nous avons besoin d'une dynamique de financements pluriannuels à la hauteur des ambitions annoncées, à l'heure où nos concurrents américains affichent la volonté d'entrer de plain-pied dans la réalisation de l'objectif du « net zéro carbone », avec des programmes de soutien massif lancés par la NASA et une nouvelle feuille de route chez Boeing, incluant le développement de l'électrique et de l'hydrogène.

L'ensemble de ces programmes nous situe environ à mi-parcours de la trajectoire du Master plan, avec un total de financement engagé, à parité par l'Etat et l'industrie, à hauteur de 4,6Md€ d'activité. À partir de 2024, de nouveaux budgets devront être consacrés à la poursuite de l'effort de R&T de notre industrie, sur l'ensemble du portefeuille de technologies relatives au produit et à son système de production afin de garantir la compétitivité technologique et économique des nouvelles générations d'aéronefs. Entre 2024 et la fin de la décennie, l'activité prévue aux termes du Master plan requiert un financement État Industrie annuel de l'ordre de 900 M€, incluant un soutien des pouvoirs publics de 450M€ par an, pour préparer la transition énergétique de l'aérien, tout en développant le socle de technologies essentielles à la compétitivité et à l'indépendance industrielle.

7.1.2.6 Garantir la compétitivité et la réactivité de la filière « industrie aéronautique »

La prochaine génération d'aéronefs, à forte efficacité énergétique et capable d'utiliser de nouvelles sources d'énergie, n'aura un effet sur la décarbonation de l'aviation que si elle pénètre le marché fortement et rapidement.

Elle devra donc être produite dans des conditions de qualité et de prix conformes aux exigences du marché des années 2030, en conformité avec les exigences environnementales applicables à ces dates, et avec une montée en cadence très rapide.

En préparation du lancement des nouveaux programmes, les entreprises de la filière – groupes, ETI, PME, doivent réaliser un **effort majeur de modernisation de leur outil industriel**, d'adaptation de cet outil aux nouvelles technologies de l'avion bas carbone, et de mise en place de la continuité numérique en entreprise étendue.

Le plan de transformation élaboré sous l'égide du GIFAS s'organise suivant 5 axes : Excellence industrielle, Industrie 4.0, incluant continuité numérique filière, Transition environnementale des usines, Usines Cyber protégées, Robustesse des approvisionnements matières - souveraineté.

Les programmes d'accompagnement organisés par le GIFAS et démultipliés par les pôles de compétitivité et clusters sont chiffrés à 80 M€. Un soutien de l'État et des régions est attendu, d'au moins 50 %. Les investissements estimés sur la période 2023/2029 pour ces 5 axes se chiffrent en centaines de millions d'euros pour les entreprises. Des programmes de soutien de l'État sont à identifier et à déployer pour inciter les entreprises à investir. Ces cinq axes sont détaillés en Annexe 2.

7.1.3 Compatibilité des aéronefs avec les carburants d'aviation durables

Le recours massif aux carburants durables sera indispensable afin d'atteindre les objectifs environnementaux de l'aviation au niveau national et international. Ce déploiement devra se faire de manière rapide et immédiate dans les flottes existantes et de façon totalement compatible avec les plus hauts niveaux de sécurité des vols. Ainsi, un processus de certification a été mis en place au niveau international, coordonné par l'ASTM, et permettant d'assurer la totale compatibilité des filières de production de carburants avec l'ensemble des flottes existantes ainsi que des infrastructures aéroportuaires et procédures associées. Le processus de qualification de ces filières, long et complexe, est totalement nécessaire au maintien du plus haut niveau de sécurité des vols. À ce jour, 7 procédés ont été qualifiés par l'ASTM, permettant de produire des carburants à partir de ressources multiples dont les huiles usagées, les déchets agricoles ou forestiers ou encore les fractions organiques des ordures ménagères. L'un d'eux, la synthèse Fischer-Tropsch, permet également de produire du carburant directement à partir d'hydrogène et de CO₂, ouvrant la voie vers les électrocarburants¹⁸ et la production de carburant sans utilisation de biomasse.

Ces carburants peuvent être d'ores et déjà utilisés en mélange (jusqu'à 50% pour la plupart des filières) dans l'ensemble des aéronefs en service, quel que soit leur type. Un déploiement massif des carburants alternatifs durables implique de lever la limitation actuelle d'incorporation à 50% pour aller vers la possibilité d'une utilisation pure à 100%.

¹⁸ Utilisation d'électricité pour produire de l'hydrogène par électrolyse et captation de CO₂ dans des fumées ou dans l'atmosphère.

Cette possibilité offrira de la flexibilité dans l'approvisionnement des aéroports et permettra un déploiement rapide pour des usages particuliers (aviation d'affaires, hélicoptères). La limite d'incorporation pourra être levée en modifiant la composition des CAD pour la rendre plus proche encore de celle du kérosène et garantir leur caractère pleinement « drop-in ».

L'introduction de volumes importants appelle également une amélioration des procédés ou le développement de nouvelles technologies de conversion offrant des rendements et des performances économiques supérieurs.

Ces nouvelles filières devront être certifiées au niveau international avec une recherche d'efficacité accrue du processus. À ce titre, une structuration des acteurs français et européens est nécessaire afin de soutenir le projet de « Clearing House » porté par l'EASA, c'est-à-dire de guichet unique permettant aux candidats à la certification de trouver un soutien technique, administratif et financier. Un groupe de travail a été créé au sein du CORAC pour aborder ces problématiques d'évolution vers des CAD utilisables purs ou d'approbation de nouvelles filières. Des travaux ont d'ores et déjà débuté avec une position de leadership français, avec entre autres les premières démonstrations en vol d'hélicoptères et d'aéronefs commerciaux utilisant des CAD purs (projet DGAC Volcan).

Parallèlement, il sera intéressant d'explorer la voie d'un carburant non-drop-in, notamment si cela permet de faciliter les volumes de production et d'améliorer les impacts environnementaux des traînées de condensation¹⁹.

Également, une feuille de route ambitieuse est proposée pour le développement d'une nouvelle génération d'aéronefs utilisant l'hydrogène de manière optimale et la mise en place de l'ensemble des éléments nécessaires à ce développement (infrastructure, aspects réglementaires). Cette feuille de route est présentée dans la section « nouvelle génération d'aéronefs ». Elle a pour vocation d'explorer le potentiel d'utilisation directe de l'hydrogène dont la production présente aujourd'hui un avantage de rendement énergétique et de coût par rapport aux électrocarburants.

Conditions de succès et risques

Trois risques principaux ont été identifiés :

R1/ Le retard dans la définition, par l'ASTM, des spécifications de carburants 100% CAD ou la définition de grades non conformes à la vision portée par les acteurs français. Il convient de poursuivre la coordination entre acteurs français (travaux de R&T, présence à l'ASTM).

R2/ L'absence de déploiement massif des carburants durables sur le marché, mais aussi la non-disponibilité des produits nécessaires aux travaux de R&T et de démonstration. La participation des acteurs français de l'énergie à ces travaux dès leur origine est un moyen de réduire ce risque.

R3/ L'absence d'une politique de soutien claire et pérenne permettant la création d'un marché des carburants durables pérenne. Une telle politique de soutien passe par des combinaisons de soutien à l'offre (aide à l'investissement, soutien à la R&D) et à la demande (politique de réduction du surcoût pour les utilisateurs finaux (« contract for difference »), mécanismes du type « book & claim »...). Un retard de mise en place ou une absence de politique volontariste pourrait entraîner un retard irrattrapable au déploiement de ces filières en France.

Recommandations

Afin d'atteindre ces ambitions dans les délais fixés, deux conditions de succès clés ont été identifiées :

- C1/ Assurer la mise en place d'une politique forte et volontariste de déploiement des carburants durables, passant par la mise en place d'un paysage réglementaire clair et pérenne mais aussi par la mise en place de mécanismes propices à créer un marché des carburants durables (soutien à l'offre, soutien à la demande). Ces éléments sont développés en détail dans la section 7.2.
- C2/ Mettre en œuvre la feuille de route du CORAC, par un plan technologique et industriel 2020-2029, soutenu par la puissance publique dans le cadre d'une programmation pluriannuelle.

¹⁹ Un tel carburant ne sera donc pas compatible avec les flottes et infrastructures existantes. Des études d'impacts techniques, environnementaux et économiques devront donc être réalisées afin de valider la faisabilité, l'intérêt et la viabilité technique et économique d'une rupture.

7.1.4 Plan d'actions du levier « Progrès technologiques »

Actions à mener par la filière

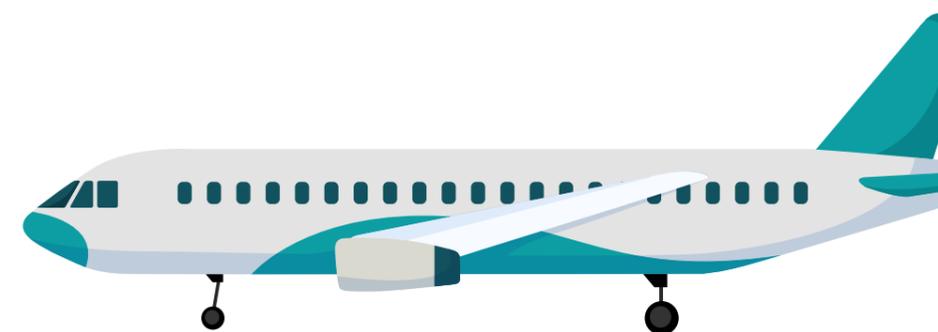
- Poursuivre la feuille de route CORAC 100% CAD ;
- Faire émerger une Clearing House européenne en soutien à la certification accélérée des nouvelles filières CAD ;
- Construction aéronautique : Organiser les hausses de cadence nécessaires au renouvellement accéléré des flottes ;
- Opérateurs aériens : confirmer les plans de renouvellement des flottes par des appareils de dernière génération ;
- Opérateurs sol : déployer les infrastructures d'approvisionnement en CAD et Hydrogène ;
- Exécuter le Master Plan technologique CORAC pour une nouvelle génération d'aéronefs 2030/2045 ; Investissements de 10 Mds Euros sur 2020/2029 ;
- En vue du déploiement rapide de la prochaine génération d'aéronefs, réaliser les transformations industrielles nécessaires pour garantir la compétitivité et la souveraineté de la filière aéronautique française.

Propositions d'évolution des politiques publiques

- Soutenir les actions de normalisation et de certification des nouvelles technologies, par exemple Hydrogène liquide et nouveaux procédés CAD ;
- Soutenir le renouvellement accéléré des flottes, par des mesures d'aides financières, fiscales, comptables ;
- Soutenir les investissements technologiques : poursuivre une politique de soutien annuel de 450 M€ jusqu'en 2029, ce qui représente un taux de soutien de 50% ;
- Soutenir les investissements de transformation industrielle, notamment des PME et ETI.

En conclusion, moyennant des conditions de succès clairement établies, à savoir **l'engagement des opérateurs aériens dans la modernisation accélérée de leur flotte, l'engagement de la filière industrielle dans le développement et l'industrialisation d'une nouvelle génération d'aéronefs et le soutien fort et pérenne de l'État sur ces actions**, les acteurs français seront en position de leadership sur les progrès technologiques indispensables à la décarbonation.

Ces progrès contribueront fortement à la décarbonation du transport aérien intérieur français – autour de 40% en projection 2050 hors CAD, selon les trajectoires ONERA, soit 3,6 MT CO₂/an ; et dans les mêmes proportions à la décarbonation du transport aérien mondial, soit 600 MT CO₂/an.



7.2 USAGE ET DÉPLOIEMENT DES ÉNERGIES DÉCARBONÉES

7.2.1 Un levier majeur

À ce jour, l'essentiel des vols sont propulsés grâce à la combustion de kérosène d'origine fossile. À titre d'illustration, les vols du périmètre France ont nécessité en 2019 la combustion de 1,54 Mt de kérosène. Le recours à des sources d'énergie « décarbonées », ou plus exactement neutre en carbone²⁰, pour propulser les avions est la clef de la décarbonation du secteur. L'étude ATAG Waypoint 2050 estime que le potentiel de décarbonation serait de l'ordre de 70 % à 100 % à l'échelle mondiale à horizon 2050²¹. L'ensemble des participants à l'élaboration de la présente feuille de route considère que le recours à ces énergies décarbonées doit être engagé et intensifié le plus rapidement possible. Il pose cependant de nombreuses questions abordées ci-après.

L'essentiel des émissions du secteur aérien provenant de l'aviation commerciale, et des vols opérés par les avions court-moyen courrier ou long courrier, l'électrification n'est pas encore une solution de décarbonation envisageable. L'aviation doit faire appel à des combustibles liquides à fort contenu énergétique d'origine non fossile. Les candidats sont aujourd'hui l'hydrogène et les carburants d'aviation durables (CAD) qui sont des carburants produits à partir de la biomasse (biocarburants) ou à partir d'eau et de CO₂ par la voie dite des électrocarburants.

Comme indiqué au chapitre 7.1.1, les carburants d'aviation durables peuvent d'ores et déjà être utilisés par les flottes d'appareils actuelles en mélange jusqu'à 50% avec le kérosène. On peut de plus espérer qu'ils soient utilisables jusqu'à 100% à l'horizon 2030.

7.2.2 Les carburants d'aviation durables

7.2.2.1 Les biocarburants

Il s'agit de carburants produits à partir d'une matière première biologique, d'origine végétale ou animale. Leur combustion émet du CO₂ mais ce CO₂ a été préalablement capté lors du développement de la matière organique et est appelé à être réabsorbé par la croissance de nouveaux organismes, constituant ainsi une boucle fermée. Dans la pratique, les émissions liées à la production des biocarburants ne sont pas nulles et dépendent des types de biomasse utilisés et de leurs conditions de production. Sur le cycle de vie complet du carburant, elles peuvent cependant être significativement plus faibles que celles du kérosène si des choix pertinents sont faits.

MODE DE PRODUCTION		MATURITÉ
1 ^{ère} génération	Matières premières agricoles Exemples : Canne à sucre, betterave, colza, maïs, tournesol, céréales, ect.	Stade industriel technologie arrivée à maturité
2 ^e génération	Matières végétales lignocellulosiques Exemples : Résidus agricoles, déchets forestiers, cultures non alimentaires, ect.	Démonstrateurs en cours d'industrialisation
3 ^e génération	Micro-organismes Exemples : Micro-algues	Travaux de R&D en cours

Source : DGRIS²²

Il existe essentiellement trois types de biomasse, auxquels correspondent des procédés de valorisation spécifiques pour la fabrication de biocarburants :

- **biomasse lignocellulosique**, riche en cellulose et lignine, elle est constituée par, entre autres, le bois et les résidus verts, les herbes comme le myscanthus, la paille ; la bagasse de canne à sucre, le fourrage ou certains types d'algues ;
- **biomasse glucidique**, riche en substance glucidique facilement hydrolysable, constituée entre autres par les céréales ; la betterave sucrière ou encore la canne à sucre ;
- **biomasse oléagineuse**, riche en lipides, provenant entre autres des cultures du type colza, tournesol, palme, soja, mais également de certaines microalgues ou de graisses animales.

Il existe aujourd'hui des procédés approuvés pour produire des carburateurs de synthèse à partir de chacun de ces types de biomasse. Tous ces procédés ne sont cependant pas au même stade de maturité. En particulier, les procédés permettant de traiter la biomasse lignocellulosiques sont encore au stade pré-industriel. Le seul procédé aujourd'hui réellement déployé à l'échelle industrielle est l'hydrotraitement des biomasses oléagineuses (filière HEFA dans la nomenclature ASTM).

Un point important est l'origine de la biomasse utilisée. Elle peut en effet provenir de cultures agricoles utilisant des terres, ce qui est en particulier le cas des cultures oléagineuses qui ont par ailleurs un usage alimentaire, ou de résidus ou déchets de l'exploitation de la biomasse pour d'autres finalités (alimentation, bois, etc.). L'utilisation des terres peut engendrer des problèmes de compétition avec les cultures alimentaires et de déplacements de cultures vers des sols précédemment non cultivés et à fort contenu potentiel en carbone. Ces changements induits d'usage des sols (induced land use change ou ILUC en anglais) peuvent générer des émissions très importantes de CO₂ obérant les réductions d'émissions apportées par les biocarburants. Pour contrôler les risques associés au développement des biocarburants, la directive européenne pour la promotion des énergies renouvelables (RED) a introduit des critères d'éligibilité pour les biomasses utilisées et promeut l'utilisation d'une liste de matières premières pour la production des biocarburants aéronautiques (essentiellement matières premières issues de déchets et résidus, mais également cultures de biomasse lignocellulosique).

Dans le cadre de la mise en place du CORSIA(carbon offset and reduction scheme for international aviation⁷ § 9.1.1), le CAEP (Committee on Aviation Environmental Protection de l'OACI) a estimé des valeurs de réduction d'émissions pour différents carburants d'aviation durables, en fonction de la biomasse utilisée, de son origine et des procédés de conversion. Les fourchettes de réduction d'émissions réalisables sont données dans le tableau ci-dessous pour différentes filières de carburants²³ :

Procédé utilisé x biomasse utilisée	Réduction d'émissions sur le cycle de vie du carburant par rapport au kérosène
Carburants Fischer-Tropsch issus de cultures et résidus lignocellulosiques	93 à 125%
Carburants issus des déchets municipaux organiques (émissions augmentent rapidement avec contenu en carbone fossile)	90%
ATJ issus des biomasses lignocellulosiques	67 à 112%
HEFA produits à partir d'huiles et graisses de récupération	75 à 84 %
ATJ canne à sucre	~70%

On notera enfin que la production de biocarburants ne conduit généralement pas à la production d'un seul type de carburants mais à une combinaison de produits (diesel, carburateur, fractions légères) en proportions variables suivant les paramètres des procédés.

²⁰ c'est à dire des sources d'énergie induisant un bilan nul entre le CO₂ émis et le CO₂ capté sur leur cycle de vie

²¹ Waypoint, page 75 https://aviationbenefits.org/media/167417/w2050_v2021_27sept_full.pdf

²² <https://www.iris-france.org/wp-content/uploads/2021/05/OSFME-R7-Perspectives-d%C3%A9volution-des-biocarburants.pdf>

²³ Source : étude ENERGIA

7.2.2.2 Les électro-carburants ou e-fuel ou PtL (power to liquid) ou carburants de synthèse

Il s'agit de carburants produits à partir du CO₂ capté soit dans l'atmosphère soit dans les effluents à l'occasion d'activités fortement émettrices (ex : fumées de cheminée de cimenterie), d'eau et d'électricité. Le principe est de dissocier l'eau du dioxyde de carbone (CO₂) en hydrogène (H₂) et en monoxyde de carbone (CO) pour, in fine les recombinaison et produire un ensemble d'hydrocarbures (carburacteur, diesel, essence et fractions légères). Leur composition est très similaire à celle des biocarburants avec lesquels ils partagent leur principale voie de synthèse actuelle, la synthèse Fischer-Tropsch. De fait, comme les biocarburants, ils peuvent être utilisés en mélange jusqu'à 50% avec le Jet A-1 conventionnel dans les avions et les infrastructures actuelles.

Les émissions associées à la production de ces carburants (hors création des infrastructures) sont a priori nulles si de l'électricité décarbonée est utilisée. **Leur combustion est par ailleurs neutre si du CO₂ atmosphérique est utilisé.** Un bilan neutre peut donc être obtenu sur l'ensemble du cycle de vie (hors création des infrastructures). A contrario, les émissions augmentent très vite avec le contenu fossile du mix énergétique utilisé pour la production de l'électricité. **Le déploiement des électrocarburants doit donc se faire de pair avec le développement de la production d'électricité décarbonée.**

L'utilisation de CO₂ capté dans des effluents industriels pose un problème particulier lorsque ces effluents sont d'origine fossile (produits de combustion ou émissions fatales comme dans le cas d'une cimenterie). Dans ce cas, la combustion d'un électrocarburant n'est pas neutre au sens strict (du CO₂ fossile est émis) mais seulement au sens où on l'on utilise un CO₂ « déchet » qui aurait été rejeté de toute manière dans l'atmosphère. Les émissions produites par la combustion dans un moteur d'avion dépendent dans ce cas de l'affectation du CO₂ au seul secteur initialement émetteur ou à leur répartition entre celui-ci et le consommateur de l'électrocarburant. L'utilisation de sources de CO₂ concentré existantes (et potentiellement non substituables) est cependant de nature à faciliter le déploiement des électrocarburants, la captation de CO₂ dans des fumées étant aujourd'hui mature et moins consommatrice d'énergie que la captation atmosphérique.

Bien entendu, cette utilisation ne doit en effet pas constituer un frein à l'action, prioritaire, de réduction des émissions de CO₂ des procédés industriels.

Le niveau de maturité des électrocarburants est plus faible que celui des biocarburants. La dissociation du CO₂ en CO et la captation de CO₂ atmosphériques sont les deux maillons les moins matures du procédé. Leur production est aujourd'hui plutôt au stade du pilote.

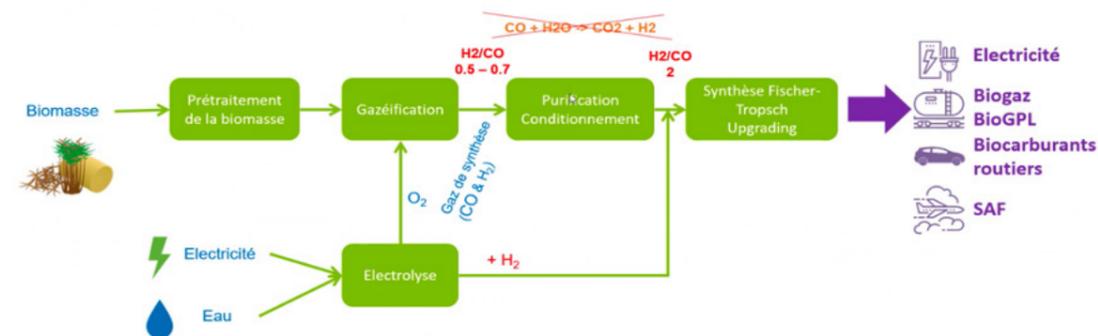
Comme dans le cas des biocarburants, le procédé ne produit pas un seul type de carburants mais une combinaison de produits : diesel, carburacteur et fractions légères (la proportion maximale de carburacteur que l'on peut obtenir est de l'ordre de 50 à 70%).

7.2.2.3 Les électro-biocarburants ou E-BTL (electro-biomass to liquid)

Comme leur nom l'indique, les électro-biocarburants combinent une production à partir de biomasse et d'électricité. Il s'appuie sur le procédé Fischer-Tropsch, utilisé pour la production des électrocarburants mais aussi la production de biocarburants (BTL ou biomass to liquid), en particulier à partir de biomasse lignocellulosique.

La synthèse Fischer-Tropsch est un procédé catalytique permettant de recombinaison du CO et de l'hydrogène en alcanes. Dans le cas des biocarburants, le CO et l'hydrogène sont obtenus par gazéification de la biomasse. La composition de la biomasse ne permet cependant pas d'obtenir un gaz de synthèse (mélange de CO et H₂) dans les proportions stoechiométriques de la synthèse Fischer-Tropsch. Une étape de traitement du gaz de synthèse (réaction dite du water gas shift²⁴) est donc introduite pour rétablir les proportions stoechiométriques, traitement au cours duquel une partie du carbone contenu dans la biomasse est perdue. Ce traitement peut être évité si l'on dispose d'une source d'hydrogène décarboné produit par électrolyse. Dans ce cas, la totalité du carbone de la biomasse pourra être utilisé et le rendement du procédé BTL pourra être doublé.

²⁴ CO + H₂O -> CO₂ + H₂



L'atout des E-BTL réside donc dans la capacité à produire des CAD, avec des rendements d'exploitation de la biomasse significativement plus élevés grâce à un apport externe d'hydrogène. L'apport est d'environ 0,4 kg d'H₂ pour 4 kg de biomasse sèche, conduisant à la production de 1,44 kg de carburant. L'e-BTL constitue par conséquent un moyen très prometteur pour tirer un parti accru de la biomasse disponible.

7.2.2.4 L'hydrogène

L'hydrogène est un candidat potentiel au remplacement du kérosène parce qu'il présente des caractéristiques énergétiques élevées (pouvoir calorifique massique trois fois supérieur à celui du kérosène) et qu'il est d'ores et déjà possible de le produire de manière industrielle sans émissions de CO₂ (hors création des infrastructures de production) par électrolyse de l'eau et utilisation d'électricité décarbonée. Son utilisation permet donc d'atteindre le « zéro émission ».

Elle présente cependant quelques défis, principalement du fait de la très faible densité de l'hydrogène qui nécessitera un **stockage sous forme liquide²⁵ LH2 à très basse température** (20 K = -253°C) pour son emploi sur l'essentiel des avions commerciaux. Cette faible densité, même sous forme liquide, limitera au moins dans un premier temps l'utilisation de l'hydrogène à des avions de types régionaux ou court-courrier (moins de 2000 nm). L'introduction de l'hydrogène requiert en outre, au-delà d'une nouvelle conception des aéronefs, le déploiement de nouvelles infrastructures pour l'approvisionnement des aéroports et l'avitaillement des avions.

Pour les courts-moyens courrier, l'utilisation de l'hydrogène est envisagée en combustion dans des turboréacteur (ou des moteurs open-fan) tandis que la voie pile à combustible est également envisagée pour les avions régionaux.

La nécessité de l'utiliser sous forme **liquide** introduit une étape de liquéfaction qui est elle aussi consommatrice d'énergie et pour laquelle des efforts d'amélioration doivent être conduits. Dans les installations classiques, de conception déjà ancienne, de l'ordre de 40 % du contenu énergétique est consommé pour la liquéfaction, mais une marge de progrès significative existe.

Comme pour les électrocarburants, les émissions associées à la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau peuvent être nulles (hors création des infrastructures) si de l'électricité décarbonée est utilisée. **Le déploiement de l'hydrogène doit par conséquent également se faire de pair avec le développement de la production d'électricité décarbonée.**



²⁵ Il existe également des projets d'avions de petite taille à propulsion avec hydrogène gazeux

7.2.3 Hypothèses de modélisation pour la feuille de route

Les valeurs présentées sont estimées en monnaie courante.

7.2.3.1 Types de carburant considérés

La feuille de route proposée s'appuie sur les quatre types de combustibles alternatifs évoqués précédemment : biocarburants, e-BTL, électrocarburants et hydrogène.

Aux fins de modélisation, deux types de biocarburants sont pris en compte :

- les **HEFA** (huiles et graisses hydrotraitées) produits à partir de matières premières de l'annexe IX de la directive européenne RED sur les énergies renouvelables (huiles et graisses recyclées) dans une limite de 250 kt/an correspondant aux quantités estimées de matières premières mobilisables en France ;
- le **BTL** (obtenu par le procédé Fischer-Tropsch à partir de biomasse solide, de type résidus agricoles, résidus forestiers, plantes lignocellulosique, ou de déchets municipaux) en tant que procédé représentatif des biocarburants avancés.

Le procédé Alcohol-to-Jet (**ATJ**) est également susceptible d'être utilisé pour la conversion de biomasse lignocellulosique. N'apportant pas d'avantage significatif par rapport au BTL, il n'est pas introduit dans la modélisation, ce qui n'exclut pas son déploiement futur sur le marché.

Différents scénarios de déploiement des CAD sont explorés par la feuille de route dans lesquels l'e-BTL n'est pas systématiquement déployé, ceci afin d'identifier l'impact en termes d'utilisation d'hydrogène et par conséquent de besoin en électricité. Pour les scénarios dans lesquels l'e-BTL est déployé, ce déploiement se fait avec une montée en régime progressive, avec un point de passage à 10 % des biocarburants avancés en 2030, afin de prendre en compte une maturité industrielle moindre.

Les hypothèses relatives aux rendements de conversion des différentes filières ainsi que leurs émissions sur le cycle de vie sont données en Annexe 6. De manière générale les CAD de type PTL ou E-BTL seront de nature à consommer de grandes quantités d'électricité pour la production d'un de leur composé primaire : l'hydrogène.

7.2.3.2 Coûts de production considérés

L'ensemble des études et des acteurs s'accordent sur un prix des combustibles de substitution aujourd'hui beaucoup plus élevé que celui du kérosène. Le poste de dépense lié à la consommation de carburant représente actuellement entre 25 et 30 % du coût d'un billet selon les types de compagnie. L'augmentation de ce poste dans les proportions du coût des CAD a donc un impact très important sur les coûts du transport aérien et par conséquent sur la demande potentielle, impact qu'il est nécessaire de prendre en compte pour estimer les conséquences sur la croissance du trafic aérien (cf. chapitre 8 et 10).

Il est très difficile d'estimer avec précision le coût de l'introduction des combustibles alternatifs dans l'aviation pour de multiples raisons : en dehors des HEFA, les procédés sont encore au stade pré-industriels, les prix des matières premières ou de l'énergie peuvent être fluctuants, les acteurs industriels ne communiquent pas sur les coûts dont l'évaluation repose par conséquent essentiellement sur des études technico-économiques et, enfin, le prix de marché peut être très différent du prix de revient. Il est encore plus difficile de se prononcer quant à leur évolution à l'horizon 2050.

Après concertation entre les différentes équipes du groupe de travail Energies décarbonées, il a été convenu de n'utiliser ici que des coûts de production. En effet, il est trop complexe et extrêmement imprévisible de tenter d'estimer des prix de marché tant nombre de variables peuvent les affecter.

Les projections de prix utilisées dans les scénarios de la feuille de route ont été établies en accord avec les membres du secteur de l'énergie participant au groupe de travail. Elles sont volontairement assez conservatrices et sont par conséquent élevées, notamment par rapport aux valeurs que l'on peut trouver dans la littérature. Il n'a pas non plus été fait de tentatives de projection des coûts à 2050. La valeur supérieure de la fourchette de prix a été retenue comme valeur actuelle, la valeur inférieure comme valeur en 2050. Les coûts ont été linéarisés entre ces valeurs extrêmes. Les coûts retenus sont donnés dans le tableau ci-dessous pour les différents types de combustible. Le prix de l'hydrogène prend en compte la liquéfaction nécessaire à l'utilisation sur les avions.

Estimation des prix des biocarburants pour les différentes filières en 2022 et 2050 :

Combustible Prix en €/t	2022	2050
HEFA	2 000	1 500
BTL	3 500	2 500
PTL	6 000	4 000 (2700)
e-BTL	4 000	2 500
LH2	9 600	4 900



Les prix des combustibles sont identiques pour tous les scénarios de la feuille de route, excepté pour le PTL. En effet, ce procédé de production est celui dont les coûts de production pourraient le plus varier en fonction des quantités produites. Une variante « optimiste » a donc été introduite dans l'un des scénarios pour refléter cette incertitude.

7.2.3.3 Hypothèse de coût du kérosène

Les hypothèses de coûts du kérosène retenues sont (hors crises) :

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Prix du kérosène hors coût CO ₂ (€/t)	719	719	719	759	825	915

7.2.3.4 Potentiel de réduction des émissions

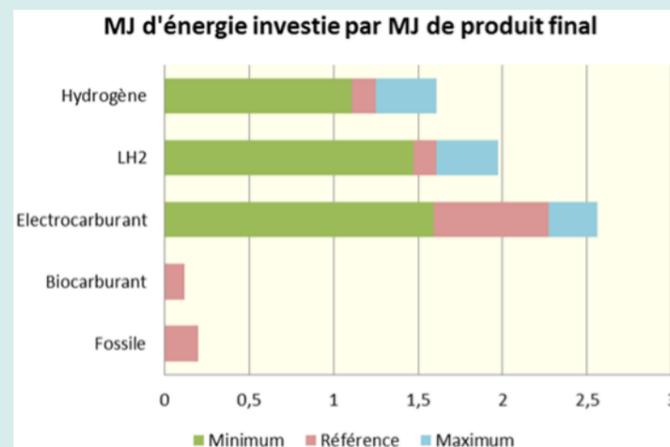
Les réductions d'émissions apportées par l'emploi des combustibles alternatifs sur leur cycle de vie varient en fonction des filières considérées (matière première et procédé de conversion). Les valeurs types pour les différentes filières sont données en Annexe 6.

Dans tous les cas, par convention, les émissions associées à la combustion sont considérées comme nulles s'agissant d'émissions de carbone biogénique pour les biocarburants et de carbone prélevé dans l'atmosphère pour les électrocarburants (la production d'électrocarburants à partir d'effluents industriels d'origine non biogénique n'est pas considérée dans les scénarios).

Les règles de comptabilisation des émissions au niveau national ne ciblent que les émissions liées à l'utilisation des combustibles, c'est-à-dire celles générées par la combustion. Les émissions liées à la mise à disposition du combustible (fabrication, transport) sont affectées aux secteurs d'activités qui les produisent. Ainsi pour répondre à la demande du Ministère de la Transition énergétique dans le cadre de l'Article 301 de la loi « Climat et Résilience », les trajectoires de décarbonation sont donc calculées pour le périmètre de l'aérien seul et, par convention, les émissions amont associées à la production et à la distribution des combustibles durables ne sont pas prises en compte.

7.2.3.5 Hypothèse de déploiement des différents carburants

Un déploiement massif des carburants d'aviation durables induit une pression sur les ressources à utiliser différente en fonction de la voie privilégiée. La production d'électrocarburants aux niveaux requis entraînera un besoin élevé en électricité décarbonée tandis que la production de biocarburants nécessite peu d'énergie, en particulier du point de vue de l'électricité décarbonée, comme le montre la figure ci-dessous, mais induit une pression forte sur la ressource en biomasse. Le scénario de déploiement doit donc réaliser un compromis entre ces deux options.



Énergie nécessaire à la production d'1 MJ de combustible²⁶

Il est complexe d'évaluer précisément les quantités de biomasse potentiellement disponibles pour la production des biocarburants. Le choix de recourir à des importations ou de favoriser une ressource nationale influence également le résultat.

Des études de disponibilité ont été réalisées au niveau européen²⁷. Sur la base de ces études, reprises dans une publication récente de l'Imperial College²⁸, CONCAWE conclut que, pour trois scénarios de demande envisagés, la biomasse est potentiellement disponible en quantité suffisante pour répondre au besoin des transports en 2050. Ces résultats peuvent cependant faire l'objet de débats quant aux hypothèses volontaristes qu'ils peuvent impliquer et à l'effort de développement de la production correspondante.

Pour construire la feuille de route du transport aérien, les acteurs du secteur ont préféré **s'appuyer sur les hypothèses de disponibilité sous-jacentes aux réglementations européennes en cours de mise en place.** L'orientation générale du Conseil européen sur le règlement Refuel EU Aviation en cours d'adoption, prévoit ainsi des obligations d'incorporation, selon le calendrier du tableau suivant : (Nota : cela correspond au projet initial de la Commission Européenne, mais avec un chiffre de 6% au lieu de 5% en 2030).

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
CAD	2%	6%	20%	32%	38%	63%
Dont part minimale d'électrocarburants		0,70%	5%	8%	11%	28%

Ainsi, le potentiel de biomasse de référence utilisé pour construire la feuille de route est celui correspondant à l'introduction de 35% de biocarburants dans l'aviation en 2050, obtenue par le déploiement des procédés HEFA et BTL.

Selon l'étude de l'Académie des technologies²⁹, l'emploi de carburant HEFA au-delà d'un certain plafond forcerait l'importation, principalement de graisse animale, depuis des pays fortement éloignés. En prenant en compte le facteur transport logistique, le groupe s'est accordé pour considérer qu'au-delà d'un plafond de 250 ktonnes (production française), l'emploi de carburant HEFA n'était plus assez bénéfique en termes de décarbonation pour l'emploi dans le secteur aérien. Dans les trajectoires de la feuille de route, la contribution des HEFA est donc limitée à ce plafond, qui est atteint selon les scénarios autour des années 2030. Les carburants HEFA permettront donc d'atteindre les taux d'incorporation exigés pour l'aérien à cette échéance, tout en laissant le temps à la filière de production d'investir et de monter en puissance sur les premiers projets de BTL/E-BTL/PTL qui apparaîtront à partir de 2028.

Sur cette base, **trois scénarios d'introduction des carburants d'aviation durables** ont été définis :

- Le premier suit la progression imposée par Refuel EU Aviation (projet de la Commission européenne légèrement amendé pour 2030, correspondant à l'orientation générale du Conseil avec 6% au lieu de 5% en 2030). Pour les biocarburants, il ne recourt qu'aux HEFA et au BTL.
- Le deuxième est plus ambitieux et correspond à l'objectif proposé par le Parlement européen d'atteindre un pourcentage de 85 % de carburants durables en 2050 grâce à l'introduction accrue d'électrocarburants. Il a été, par ailleurs, légèrement amendé en 2030 en retenant également un objectif rehaussé de 10 % de CAD en 2030³⁰ mais une part PTL moindre. Pour les biocarburants, il recourt à la fois aux HEFA, au BTL et à l'eBTL, la proportion d'eBTL par rapport au BTL progressant de 10 % en 2030 à 50 % en 2050. Ce scénario correspond au recours minimal à la biomasse et maximal à l'électricité.
- Le troisième est une variante du précédent dans laquelle l'objectif de 85 % de CAD en 2050 est cette fois atteint par une utilisation accrue de biocarburants. Grâce à un recours accru à l'eBTL, cette variante se fonde sur la même quantité de biomasse qu'un scénario sans eBTL atteignant le niveau de 35 % de biocarburant fixé par Refuel EU Aviation.

²⁷ DG RTD 2017, JRC 2019 (ENSPRESSO), projet S2BIOM (FP7)

²⁸ Sustainable biomass availability in teh EU, to 2050, 2021

²⁹ Rapport sur la décarbonation du secteur aérien par la production de carburants durables-nov 2022

³⁰ Refuel EU Aviation. La proposition du Parlement européen d'incorporation de CAD en 2030 est de 6%, comme l'orientation générale du Conseil européen.

²⁶ Source : étude ENERGIA

Nota : Sur chaque périmètre géographique (France et départ de la France vers l'international), la filière présente au § 8.1 trois scénarios de décarbonation, « Action » et « Accélération » avec une variante « Accélération bis »; ceux-ci sont associés respectivement aux scénarios d'incorporation de CAD précédents.

La production des électrocarburants et de l'hydrogène n'est pas astreinte à des limitations physiques du même type que celle des biocarburants. Elle n'a donc pas été limitée à priori dans ces trois scénarios. Les implications en termes de production d'électricité décarbonée seront analysées au chapitre 8.

Ces trois scénarios supposent un développement très important de la production de CAD par rapport à la situation actuelle. La production n'est en effet qu'embryonnaire. En France, la capacité de production actuelle de type HEFA est de l'ordre de 900 kt par an avec les bioraffineries de La Mède (Bouches du Rhône, 500 kt/an) et de Grandpuits (Seine-et-Marne, 400 Kt). Les premières unités BTL devraient entrer en activité d'ici 2028, tandis que la production d'électrocarburants démarrera plus probablement vers 2030.

Synthèse des taux d'incorporation de CAD considérés dans les scénarios de décarbonation :

% CAD (dont PTL%)	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Scénario « Action »	2% (0%)	6% (0,7%)	20% (5%)	32% (8%)	38% (11%)	63% (28%)
Scénario « Accélération »	2% (0%)	10% (0,7%)	20% (5%)	37% (13%)	54% (27%)	85% (50%)
Scénario « Accélération bis »	2% (0%)	10% (0%)	20% (5%)	37% (8%)	54% (11%)	85% (28%)

À titre complémentaire, le tableau ci-dessous donne un panorama des capacités de production actuellement annoncées à l'échelle européenne. Il ressort de ce tableau que les capacités actuelles de production de biocarburants en Europe utilisent presque exclusivement la filière HEFA et s'élèvent à fin 2022 à 3,6 Mt. Cette filière représente également la majeure partie des capacités qui entreront en production d'ici 2027, avec une capacité totale à cet horizon de 6,3 Mt/an. Un effort important est donc à engager pour le déploiement des filières utilisant les ressources lignocellulosiques, filières qui représentent l'essentiel du potentiel futur de production de biocarburants.



Supplier	Country	Site	Tech.	Start/Expansion	Total fuel capacity (Mt./yr.)
Existing facilities / Expansions					
Neste	Finland	Porvoo	HEFA	-	0.4
Neste	Netherlands	Rotterdam	HEFA	-	1.3
UPM	Finland	Lappeenranta	HEFA	-	0.1
Total Energies	France	La Mède	HEFA	-	0.5
Cepsa	Spain	San Roque	HEFA	-	0.1
Repsol**	Spain	Cartagena	HEFA	2023	0.2
ENI**	Italy	Venice	HEFA	2024	0.4
Preem**	Sweden	Gothenburg	HEFA	2025	1.0
New projects					
Enerkem*	Netherlands	Rotterdam	G+FT	2021	<0.1
Colabitoil	Sweden	Norssundet	HEFA	2021	0.5
ENI	Italy	Gela	HEFA	2021	0.5
ST1	Sweden	Gothenburg	HEFA	2022	0.2
Kaidi*	Finland	Kemi	G+FT	2022	<0.1
SkyNRG	Netherlands	DSL01	HEFA	2023	0.1
Sunfire*	Norway	Nordic Blue	PTL	2023	<0.1
Caphenia*	Germany	Dresden	PTL	2023	<0.1
TotalEnergies	France	Grandpuits	HEFA	2024	0.2
SkyNRG / LanzaTech	TBD**	FLITE	ATJ	2024	0.0
Preem	Sweden	Lysekil	HEFA	2024	0.7
Neste	Netherlands	Rotterdam	HEFA	2025	1.0
Velocys	UK	Altair	G+FT	2025	0.1
LanzaTech	UK	Wales	ATJ	2025	0.4
UPM	Finland	Kotka	G+FT	2025	0.5
Fulcrum	UK	Stanlow	G+FT	2025	0.1
Synkero	Netherlands	Synkero†	PTL	2027	0.1
Engie*	France	Normandy†	PTL	TBD	TBD

Bioraffineries disposant d'une capacité de production de carburants (capacité de production toutes coupes de carburants incluses – source Total Energies)

7.2.4 Conditions de succès et risques

Il existe des mécanismes d'aide au développement de la production et de l'utilisation de CAD d'ores et déjà mis en œuvre.

Les Etats-Unis ont adopté plusieurs règles qui ont de fait stimulé la production et l'utilisation de CAD par le secteur aérien américain. À titre d'exemple, l'Inflation Reduction Act (IRA), adopté en août 2022, prévoit un **crédit d'impôt** de 1,5 \$ à 1,75 \$ par gallon de carburant comprenant du CAD respectant les critères de durabilité de l'OACI.

Aussi, le gouvernement a fixé un objectif clair de production nationale de CAD – 3 milliards de gallons d'ici 2030 soit 8 millions de tonnes de CAD et a, au-delà du crédit d'impôt, mis en place de nouvelles dotations pour augmenter la production et un programme de travail avec les partenaires internationaux pour produire davantage³¹.

À noter toutefois que les Etats-Unis ont une réglementation en matière de CAD plus souple qui inclut notamment des CAD permettant une réduction d'émissions d'au moins 50 %.

³¹ source IATA <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/fact-sheet--us-and-eu-saf-policies.pdf>

Afin d'aider les opérateurs aériens à supporter le coût additionnel des CAD, les Pays-Bas et la Californie ont mis en place des mécanismes d'adhésion dits « d'opt-in ». Ces mécanismes consistent notamment à adosser le marché des CAD à celui beaucoup plus vaste du secteur routier. Un opérateur routier soumis à une obligation d'incorporation de biocarburant sur son marché pourra la satisfaire au travers de l'acquisition de certificats CAD acquis auprès d'un opérateur aérien. Le montant du certificat permettra de limiter pour l'opérateur aérien la différence de prix entre le CAD et le kérosène d'origine fossile. Un tel dispositif apparaît particulièrement adapté dans une période initiale de développement d'un nouveau marché.

Dans le cadre du paquet législatif européen « Fit for 55 », la Commission européenne a fait part de sa volonté d'accélérer fortement la décarbonation de l'économie européenne pour mettre le continent sur la voie de la neutralité climatique à horizon 2050. Elle nécessite des investissements massifs dans des technologies bas-carbone, ce que n'a jamais permis la seule action de l'EU ETS. De nouveaux outils ont été développés à l'image de la mise en place de « Contrats Carbone pour Différence » (CCfD). Les CCfD sont un moyen de minimiser l'incertitude des prix du carbone. Un contrat carbone est un contrat par lequel un gouvernement ou une institution convient avec un agent d'un prix fixe du carbone sur une période donnée. Les CCfD consistent ainsi en la compensation, par la puissance publique, de l'écart entre le coût de la tonne de carbone évitée dans un secteur donné et le prix du carbone sur l'EU ETS, au bénéfice de l'industriel lauréat du CCfD. À noter cependant que les CCfD n'ont pas été spécifiquement mentionnés dans la proposition de révision de l'ETS pour l'aviation. Le dispositif des CCfD a uniquement été inscrit dans la proposition de révision générale de l'EU ETS de juillet 2021 (article 10 bis, paragraphe 8).

La différenciation des flux d'achats et des flux physiques de CAD, connue sous le nom de « book and claim » est aussi essentielle pour permettre la reconnaissance de l'utilisation de CAD par les compagnies aériennes. L'introduction d'un tel mécanisme de flexibilité permettant l'utilisation des CAD de la manière la plus efficace et la plus économique sans avoir à fournir physiquement des CAD dans tous les aéroports est également favorable au déploiement des CAD. Ce type de mécanisme s'est avéré efficace pour le développement d'autres énergies renouvelables en France comme à l'étranger.

Les risques sont les suivants :

- R1/ Manque d'investissement public et privé dans le développement d'une filière de production de CAD en France, en Europe et dans le monde dans les volumes nécessaires ;
- R2/ Incertitudes réglementaires et non-uniformités à l'échelle mondiale des politiques d'incorporation de CAD qui seraient de nature à créer des distorsions de concurrence préjudiciables au secteur aérien ainsi que des « fuites de carbone » contraires aux objectifs poursuivis ;
- R3/ L'absence de mécanismes de type « Book and Claim » engendrerait des contraintes de nature organisationnelle, de logistique et d'infrastructures qui seraient susceptibles d'augmenter fortement le coût final des CAD ;
- R4/ Dans le cas d'un non-accompagnement du secteur par les organismes étatiques, les augmentations de coût générées par l'incorporation de CAD seraient de nature à remettre en cause l'accessibilité du transport aérien au plus grand nombre ainsi que la continuité territoriale de et vers certains territoires.

Actions à mener par la filière

- les CAD constituant un élément central et incontournable de la transition écologique du transport aérien, le développement d'une filière de production nationale de CAD est indispensable à court terme ;
- poursuivre l'engagement des opérateurs aériens à acheter et utiliser des CAD ;
- certifier l'utilisation des CAD pour rendre possible l'utilisation des taux d'incorporation de 100%.

Propositions d'évolution des politiques publiques

- L'État devrait coordonner la création d'un comité de « filière » réunissant l'ensemble des acteurs des secteurs aéronautique et énergétique afin de développer une production française et donner une visibilité sur les capacités disponibles à court, moyen et long terme
- S'assurer du bon niveau d'investissement de la filière énergétique dans le cadre de la délivrance de nouveaux projets de production, pour assurer l'offre disponible en CAD vis à vis des opérateurs (Cf Capex en Annexe 6) ;
- Le cadre réglementaire communautaire et international stable et finalisé définissant l'usage de la biomasse, les objectifs d'incorporation ou les méthodes harmonisées de comptabilisation et de contrôle doit être précisé au plus vite et stabilisé afin d'encourager les investissements dans les filières de production de CAD ;
- Veiller à l'affectation des ressources disponibles (biomasse et énergies) prioritairement aux secteurs pour lesquels la capacité à se décarboner à court terme est la plus difficile.
- Le cadre réglementaire doit être complété par une politique d'incitation à la production (et non simplement à l'incorporation) ;
- L'Etat doit soutenir les travaux de l'Alliance européenne des carburants durables (Renewable Low Carbon Fuels Alliance) afin d'accompagner le déploiement industriel des filières CAD au niveau européen en lien avec les objectifs de Refuel EU Aviation et d'y valoriser les initiatives françaises ;
- Dans un double objectif d'encourager à la production en crédibilisant la demande de CAD et d'éviter les distorsions de concurrence, l'État doit mettre en place un mécanisme de soutien à l'achat de CAD (voir par exemple l'amendement voté par le Sénat dans le cadre du Projet de Loi de Finances 2023³² et crédit d'impôt US « IRA-inflation reduction act » ;
- D'autres mécanismes pourront être proposés comme ceux « d'opt-in » ou de « Contract for Difference » ;
- Veiller à une stabilité financière des compagnies aériennes pour qu'elles aient des capacités à acheter des CAD malgré leurs surcoûts.
- Créer un guichet de certification des CAD européen ou « projet de clearing house » (au sein de l'EASA) ;
- Adoption d'un mécanisme de book and claim indispensable dans la réglementation Refuel EU Aviation ;
- Encourager la R&T dans le domaine des CAD pour améliorer le rendement à la production, diminuer les coûts et diversifier les filières.

7.3 OPÉRATIONS EN VOL ET AU SOL

La maîtrise des opérations en vol et au sol des avions peut conduire à diminuer les émissions de CO₂ de l'aérien. On entend par opérations l'exploitation quotidienne des avions dans leur écosystème. Il y a une particularité dans les opérations : les leviers d'action sont, pour la majorité, déjà connus et partiellement déployés en raison des économies de carburant qu'ils permettent. Ils sont regroupés en 6 macro-leviers :

- politiques et procédures d'exploitation (macro levier 1)
- réaménagement de l'espace aérien et procédures ATM (macro levier 2)
- optimisations en temps réel en vol et approche optimisée (macro levier 3)
- optimisation des avions (macro levier 4)
- nouvelles procédures de type vol en formation (macro levier 5)
- optimisation des opérations au sol (macro levier 6)

La mesure des gains d'émissions permis par le levier opérations est complexe. Une revue de littérature présentée en Annexe 3 a mis en lumière une fourchette de gains possibles selon les leviers activés. Cela a permis de conforter les hypothèses de modélisation retenues pour le présent exercice qui figurent également en Annexe 3.

³² https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/16/amendements/0273A/CIION_FIN/CF238

7.3.1 Politiques et procédures d'exploitation

Ce macro-levier est constitué des leviers suivants : Cost index réduit et Application des procédures opérationnelles vertes (ou green operating procedures).

7.3.1.1 Cost index réduit

Le cost index d'un vol est un paramètre établi par chaque compagnie et pouvant être ajusté par les pilotes en vol, qui permet d'ajuster et d'optimiser les coûts opérationnels des compagnies en prenant en compte le rapport entre le coût du carburant en fonction de la vitesse de croisière d'une part et les coûts variables d'une heure de vol (coûts de maintenance, coût des personnels navigants...) d'autre part. Après avoir établi le cost index « optimal », un vol réalisé avec un cost index plus faible impliquera un profil avec une vitesse plus faible et potentiellement une consommation de carburant réduite, alors qu'un vol réalisé avec un cost index élevé privilégie un temps de vol réduit au détriment de la consommation de carburant.

Au cas par cas et en cas de retards, d'autres paramètres peuvent être pris en compte par les compagnies pour déterminer la vitesse de croisière tels que la réussite des correspondances ou la prise en compte de la fermeture du terrain.

Il s'agit d'un paramètre clé pour assurer pour chaque vol des opérations économiquement efficaces.

L'augmentation des coûts du kérosène induit déjà une orientation à la baisse des cost index « optimaux » au sein des compagnies. L'intégration dans les modèles de calcul du cost index des coûts du CO₂ émis (coûts de compensation ou coûts ETS) va inéluctablement induire une réduction supplémentaire du cost index. En tout état de cause et notamment si la sécurité du vol l'exige, le commandant de bord peut à tout moment adapter la vitesse et s'éloigner du cost index préétabli.

Il n'y a pas de coûts d'investissements spécifiques pour ce levier qui peut présenter dans certaines situations un gain économique important pour les compagnies aériennes. Ne pas utiliser ce levier d'ajustement en opérations pourrait induire un impact environnemental négatif dans le cas, par exemple, où les aéronefs ne seraient plus en mesure de rejoindre leur destination avant une éventuelle fermeture de l'aéroport du fait d'une vitesse trop réduite et seraient contraints de se dérouter vers une autre destination.

Recommandation

Afin de donner plus de poids à la réduction des émissions de CO₂ dans la détermination du cost index, les compagnies aériennes devraient intégrer le coût du CO₂ dans le calcul. La France et l'UE pourraient proposer que les normes internationales OACI et EASA effectuent aussi cette recommandation.

7.3.1.2 Application des procédures opérationnelles vertes

Les constructeurs et les compagnies aériennes ont défini des procédures opérationnelles vertes (ou green operating procedures) telles que la limitation de l'utilisation des inverseurs de poussée (ou reverses) à l'atterrissage ou la réduction de la traînée dans les phases de décollage et d'atterrissage grâce à la réduction des braquages des volets des avions dans chacune de ces phases. Ces procédures sont pour la plupart déjà très largement appliquées mais elles restent contextuelles et à la main des commandants de bord pour des raisons de sécurité des vols ou pour des contraintes opérationnelles. Les pilotes des compagnies sont d'ores et déjà formés à l'application de ces procédures.

Le roulage avec un moteur éteint (appelé roulage N-1) peut aussi réduire les émissions de GES. Cette pratique plus usuelle à l'arrivée qu'au départ, est limitée pour des raisons de sécurité³³ et de coordination plus complexe entre les pilotes, l'aéroport et les contrôleurs aériens. De plus, certains constructeurs ne décrivent pas de procédure spécifique au roulage N-1.

³³ Pour les aéroports, il existe une contrainte liée au souffle moteur en situation de roulage N-1. En effet, le souffle du moteur en fonctionnement est amplifié pour compenser le moteur qui a été coupé et est susceptible d'endommager l'infrastructure aéroportuaire ou les aéronefs à proximité.

Enfin, les contraintes opérationnelles décrites dans les procédures des motoristes ne sont parfois pas assez explicitées ou prévues pour activer le roulage N-1.

De plus, un temps de roulage trop court peut s'avérer insuffisant pour permettre la mise en température ou le refroidissement nécessaire aux moteurs et ne permet ainsi pas d'appliquer cette procédure.

Recommandations

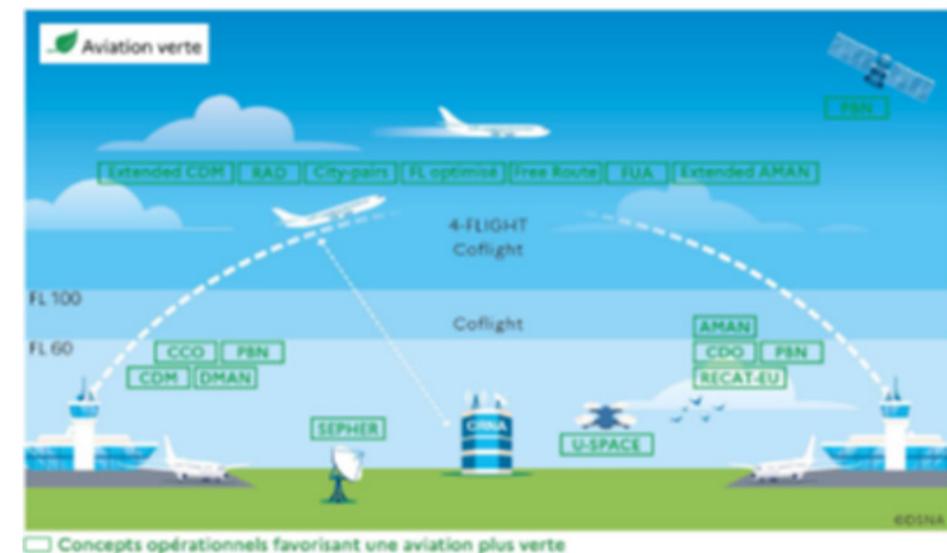
- Garantir une meilleure communication aux pilotes de la disponibilité des parkings aux aéroports : mettre en place des CDM (collaborative decision making) ;
- Développer un logiciel d'accompagnement des pilotes pour faciliter le recours au roulage moteur éteint (par exemple pour l'extinction/allumage moteur).

7.3.2 Réaménagement de l'espace aérien et procédures ATM (air traffic management)

Les leviers Politiques et procédures d'exploitation, Réaménagement de l'espace aérien et procédures ATM permettent d'obtenir des gains d'émissions mais nécessitent de disposer d'un système de gestion du trafic aérien modernisé et évolutif.

L'objectif est de donc disposer d'une capacité d'espace aérien maximale afin de gérer un trafic en augmentation mais aussi de bénéficier de marges utiles à l'optimisation environnementale des trajectoires de vol. En effet, la mise en œuvre de trajectoires optimisées pour l'environnement génère une complexité accrue qui consomme de la capacité de contrôle. La modernisation technique est de nature à réduire cette complexité et à limiter le lien entre capacité et environnement. Cette capacité de contrôle se décompose en une composante structurelle (capacité de l'espace aérien et des procédures) et en une composante ressources humaines (nombre et flexibilité de planification des contrôleurs aériens notamment).

Les actions proposées ci-dessous permettent d'avoir plus de capacité de l'espace aérien et de réduire les émissions de CO₂ mais l'augmentation du trafic sera un enjeu.



Recommandations

- Respecter le calendrier des travaux de modernisation technique ;
- Donner les moyens à la DSNA pour garantir la flexibilité nécessaire dans l'organisation du travail des centres de contrôle

Nota : Les systèmes et dispositifs décrits dans cette feuille de route ne représentent pas la totalité des efforts qui seront réalisés par les partenaires afin d'améliorer la performance environnementale du trafic aérien.

7.3.2.1 Déploiement du Free Route (espace en cheminement libre)

L'espace en cheminement libre (ou Free Routing Airspace, FRA) est l'espace aérien défini latéralement et verticalement permettant aux avions de choisir librement leur trajectoire en respectant toutefois un ensemble de modalités d'entrée et de sortie de cet espace. Les vols restent soumis au contrôle du trafic aérien à l'intérieur de cet espace³⁴.

Le concept de free-route laisse donc plus de liberté pour optimiser les trajectoires d'un point de vue environnemental. Ce concept est mature et déployé dans la grande majorité des pays de l'UE ainsi que, dans de nombreux cas, dans des espaces autorisant des planifications transfrontalières. Il est important de parachever le déploiement du concept de free-route. Les actions qu'il reste à mener sont :

- Déploiement par la DSNA du concept Free Route sur des portions de l'espace national en 4 vagues entre le 2 décembre 2021 et le 20 février 2025 puis amélioration incrémentale visant à augmenter les connections et l'opportunité de trajectoires optimisées.
- Le déploiement par la DSNA de 4-Flight dans les 5 CRNA comme facilitateur : sécuriser et réaliser le calendrier de déploiement initial à horizon 2025 puis l'introduction de nouveaux outils d'aide au contrôle (outils de détection et de résolution, échanges de données sol-bord complexes, automatisation,...).

7.3.2.2 RAD (Route Availability Document) dynamique

Pour optimiser la capacité du réseau, le trafic aérien a besoin d'être organisé en fonction du trafic, des flux, des espaces disponibles, etc. Les contraintes sont différentes en hiver et en été, le jour et la nuit. Ce levier va plus loin en ajustant au plus près les contraintes de vol pour optimiser les trajectoires de façon dynamique en exploitant au mieux la capacité disponible de l'espace aérien.

Il s'agit de disposer des outils nécessaires pour définir au plus près les espace-temps au sein desquels les contraintes peuvent être levées en assurant l'optimisation de l'équilibre entre la performance environnementale et la régularité. D'un autre côté, un frein à la mise en œuvre du RAD dynamique est la publication et la prise en compte par les systèmes des prestataires de planification des vols (CFSP) de l'utilisateur aérien. Le système de création de plan de vol doit être en capacité de traiter cette information de manière automatique.

Le protocole SWIM (System-Wide Information Management) déployé dans SESAR sera un outil important pour la diffusion dynamique des informations auprès des parties prenantes. Le basculement des protocoles d'échanges historiques sur SWIM représentera un effort d'investissement (cf. point 7.3.2).

7.3.2.3 Utilisation flexible de l'espace (flexible use of airspace - FUA)

L'espace aérien est partagé entre usagers civils et militaires pour garantir la prise en compte des besoins spécifiques de la Défense nationale. Une coordination rapprochée a permis de limiter les contraintes des usages militaires sur les opérations civiles. Cette coordination rapprochée permettant un usage flexible de l'espace aérien permet de disposer d'un espace aérien plus large ou moins contraint et donc de limiter au maximum les inefficacités environnementales créées par l'activité militaire. Le FUA doit donc être renforcé.

Cependant les freins au développement du FUA sont :

- la capacité des prestataires de planification des vols (CFSP) à absorber les mises à jour pluriquotidiennes des zones militaires actives ou non. Il conviendrait d'augmenter la capacité des prestataires pour permettre aux compagnies aériennes de planifier l'emport carburant de façon plus précise et donc d'éviter un emport excessif. Les contraintes sont les mêmes que pour la prise en compte du RAD dynamique.

7.3.3 OPTIMISATION TEMPS RÉEL EN VOL ET APPROCHE OPTIMISÉE

7.3.3.1 Montées et descentes, optimisées ou descentes et montées continues

Les montées et descentes optimisées depuis ou vers les aéroports sont des procédures particulières qui permettent de minimiser la consommation de carburant. Elles suivent le schéma suivant : montée continue avec un taux de montée décroissant et des régimes moteurs adaptés jusqu'à l'altitude de traînée minimale puis descente en régime moteur minimal sans palier.

Les montées continues sont assez largement réalisées en France. Les gains de réductions d'émissions futures viendraient principalement de l'amélioration des descentes continues, possibles grâce à des améliorations dans la gestion des espaces et de la coordination air-sol, et la conception de nouvelles procédures. Cependant, laisser les vols libres de gérer leur descente est de plus en plus difficile avec la densification du trafic qui induit généralement un cadencement forcé.

En fonction de la tranche d'altitude considérée, les bénéfices environnementaux sont différents. Proche de l'aéroport (jusqu'à une altitude de 2500 m environ), il s'agit en priorité de diminuer le nombre de personnes survolées, tout en cherchant des gains en consommation d'énergie, conformément à la loi dite « Grenelle I » du 3 août 2009. Dans la tranche d'altitude supérieure, il est question de réduire la consommation de carburant.

Les freins à l'adoption des descentes continues proches de l'aéroport sont la concentration des vols qui a par ailleurs un impact sur la riveraineté, le fait que cela engendre une modification de la méthode de travail du contrôleur et la problématique du maintien de compétence des contrôleurs en guidage radar qui nécessite des simulateurs. Le dispositif « PBN to ILS » (guidage satellitaire jusqu'au segment d'approche final) est un moyen efficace pour mettre en place ces descentes continues.

Les freins à l'adoption des descentes continues à des altitudes élevées sont parfois la difficile séparation des flux d'avions et le besoin de prendre en compte le profil de descente optimisé pour chaque vol. Le dispositif 4D trajectory sharing (cf. 7.3.3.3) facilitera la réalisation des descentes continues en transmettant pendant le vol le point de descente idéal.

7.3.3.2 Procédures satellitaires innovantes

Le déploiement des procédures de navigation par satellites améliore la performance environnementale (bruit et CO2). Il s'agit principalement des procédures RNP AR (procédure satellitaire courbe avec autorisation) et VPT RNP (procédures satellitaires courbe en visuel) qui peuvent compléter, dans certains cas, les procédures satellitaires déjà largement déployées.

7.3.3.3 Collaboration entre les usagers aériens et les prestataires de services de la navigation aérienne

La collaboration entre les parties prenantes (usagers aériens et prestataires de services de la navigation aériennes) peut être améliorée dans les phases stratégiques de conception des espaces et procédures, dans les phases tactiques impliquant les pilotes et contrôleurs et dans les phases pré-tactiques cruciales. Cette collaboration accrue permettrait de publier effectivement l'offre de trajectoires possibles et de leur planification.

En s'appuyant sur l'intelligence artificielle et sur l'algorithmie d'optimisation ainsi que sur des moyens de communication et des outils collaboratifs intégrés dans le flux de travail, on peut espérer une meilleure conscience commune des situations. Ceci aura pour conséquence des négociations gagnantes pour tous les acteurs et une trajectoire de vol au final plus éco-responsable en recherchant un optimum global.

L'initial 4D trajectory sharing (la capacité de l'avion à partager avec le contrôleur sa trajectoire prévue en 3D + le temps) est une étape nécessaire et indispensable à la digitalisation de l'ATC et de l'ATM, ce qui est un en soit un moyen indispensable pour la réduction des émissions.

³⁴ d'après le règlement d'exécution (UE) N° 716/2014 de la commission du 27 juin 2014 modifié le 1er février 2021

Recommandations

À court terme : avoir un engagement et un soutien politique, institutionnel et industriel au succès de la maturity gate de fin 2023 de l'implementing rules CP1-AF6 de l'Union européenne qui conditionne la mise en application effective de cette fonction.

À moyen terme : prévoir un soutien financier à la DANA et ses fournisseurs pour la mise en œuvre de ces moyens et prévoir des moyens et supports pour inciter les compagnies aériennes à équiper leurs avions des équipements embarqués nécessaires.

Recommandations

- Soutien financier à la recherche (technologie et concept opérationnel), au développement d'une solution industrialisable et au déploiement (financement pour équipement des compagnies aériennes, des centres ATC)
- Réglementation : soutien pour mise à jour réglementation locale et internationale (EASA, ICAO)
- Étude des moyens d'incitation pour faciliter l'adhésion des compagnies aériennes au concept

7.3.4 OPTIMISATION DES AVIONS

7.3.4.1 Avions avec un domaine de vol plus large

Il s'agit de mieux prendre en compte les contraintes opérationnelles dans la conception des avions afin d'optimiser leur efficacité écologique future, notamment via la possibilité d'intégrer des objectifs de flexibilité dans les critères de conception avion (vitesse, altitude). L'avion qui a un domaine de vol optimal plus étendu et est donc capable de maintenir un niveau d'émissions plus faible malgré les aléas opérationnels. Par exemple, cela peut se traduire par une polaire (caractéristique portance/trainée de l'avion) « aplatie » pour prendre en compte une meilleure flexibilité en vitesse.

Le concept doit gagner en maturité. À ce stade, les nouveaux outils sont en cours d'exploration et les méthodes de conception sont en R&T. Le gain potentiel en réduction d'émission est indirect car lié à la flexibilité offerte pour l'optimisation des process ATM.

7.3.4.2 Optimisation individualisée des avions

Chaque avion a ses performances propres, liées au vieillissement de sa structure et de ses moteurs, à sa configuration et aux tolérances en production. Il est possible de diminuer ses émissions au moyen de modèles numériques plus représentatifs de l'avion, de ses moteurs, de sa dynamique de vol et des processus permettant i) d'adapter les trajectoires à la performance réelle (calcul de vitesse/altitude optimale plus précis) et ii) d'en améliorer la performance au travers d'actions ciblées (par ex : maintenance moteur déclenchée au moment adéquat).

Le concept doit gagner en maturité. À ce stade, il est exploré en R&T avec collaboration à venir entre constructeur et motoriste. La mise à jour des systèmes avioniques (FMS) pour l'ensemble de la flotte volante est un frein au déploiement de ce levier.

Pour les deux sujets évoqués dans ce 7.3.4 « Optimisation des avions » :

Recommandation

Soutenir la R&T pour le développement de nouvelles méthodes de conception d'avions ayant un domaine de vol plus large via le financement de la feuille de route technologique du CORAC.

7.3.5 NOUVELLES PROCÉDURES : LE « VOL EN FORMATION »

Le principe physique de vol en formation est d'utiliser la composante verticale des tourbillons de sillage générés par un avion « leader » pour offrir un surcroît de portance à un avion suiveur, comme le font les oiseaux migrateurs. Le concept nécessite notamment une phase de rendez-vous et une certaine compatibilité en performance des avions appairés. Pour ces raisons, il n'est applicable qu'à une partie du trafic long courrier.

En termes de maturité, un vol de démonstration réalisé en novembre 2021 a confirmé la faisabilité technique et opérationnelle ainsi que les gains potentiels. Ceux-ci s'élèvent globalement à 5% d'émissions en moins pour l'avion suiveur sur les vols éligibles (+ de 2 000 Nm.). Ce chiffre prend en compte la phase de rendez-vous. Un coefficient doit être appliqué pour prendre en compte seulement les paires éligibles.

Les freins à la mise en œuvre sont les suivants : technologie d'asservissement au vortex, réglementation ATM, équipement des avions, des compagnies aériennes et des centres ATC.

7.3.6 OPÉRATIONS AU SOL

7.3.6.1 Décarbonation des servitudes fixes

Il s'agit là de fournir sur les aéroports des servitudes fixes qui permettent à l'avion de ne pas utiliser l'APU (moteur auxiliaire situé à l'arrière de l'avion utilisant du kérosène et donc émissif) lorsque celui-ci est en stationnement ou en escale au parking. Les solutions techniques pour alimenter les avions en électricité et en air sans que ceux-ci aient à utiliser l'APU sont disponibles et matures. Le potentiel de réduction à l'horizon 2050 est 100 %. À 2030, il dépend essentiellement de la capacité d'investissement et de la disponibilité des infrastructures et des équipements de substitution.

Le coût d'équipement d'un point est très variable en fonction des solutions techniques et de l'équipement initial du point. La réglementation actuelle impose aux compagnies d'arrêter l'APU lors des opérations d'escale sur certains aéroports français mais n'impose pas aux gestionnaires aéroportuaires la fourniture de ces moyens de substitution qui est alors la responsabilité de chaque compagnie. Cette situation induit de la complexité lorsque les équipements ne sont pas gérés en commun : déplacements de matériel, investissements supplémentaires.

Deux réglementations européennes sont en projet pour réglementer la fourniture en 400 Hz (AFIR) et la fourniture en air pré-conditionné (RTE-T). À date, la réglementation AFIR (adoption attendue début 2023) prévoit l'obligation pour les aéroports d'équiper 100 % des points d'ici 2030. Le projet de réglementation RTE-T concernant le pré-conditionnement de l'air est encore en évaluation.

Recommandations

- Que l'État facilite l'investissement des aéroports ou des prestataires retenus pour assurer la prestation via des dispositifs incitatifs tels que le sur-amortissement fiscal des engins de piste et/ou la prime à la casse pour les équipements thermiques ;
- S'assurer que les réglementations européennes AFIR et RTE-T traitent le service de fourniture 400 Hz et air pré-conditionné aux gestionnaires d'aéroport et/ou aux assistants en escale, selon la configuration de la plateforme aéroportuaire.

7.3.6.2 Décarbonation des servitudes mobiles

Les servitudes « mobiles » sont les engins évoluant en piste autour des avions pour assurer le traitement de l'escale (chargement et déchargement des passagers, des bagages, du fret, nettoyage, catering, eaux et vidanges, pleins carburant, dégivrage...). Les technologies pour décarboner ces matériels sont connues mais les optimisations permettant de les rendre économiquement viables restent encore à trouver. La nature de l'énergie utilisée (électricité, hydrogène, gaz, eFuel) et la maturité des équipements proposés est variable suivant l'intensité de l'utilisation et le besoin de puissance instantanée.

Les compagnies aériennes et les assistants aéroportuaires sont déjà engagés dans des programmes de « verdissement » : à fin 2021 en France, 40,5 % des matériels de piste sont propres.

Le potentiel de réduction des émissions de GES de ce type de matériel sur le territoire français est certainement proche de 100 % à l'horizon 2050, il est ajustable en fonction des capacités d'investissements et de l'adaptation des infrastructures de fourniture d'énergies à ces engins.

Les freins à la mise en œuvre sont de nature économique (capacité d'investissement) et opérationnels (capacité à fournir l'énergie – électricité, hydrogène...).

Recommandations

- Que l'Etat accompagne et facilite les investissements nécessaires via des dispositifs tels que le sur-amortissement ou autre incitation fiscale, la prime à la conversion, etc.
- S'assurer de la capacité globale de fourniture de la puissance électrique et de l'adéquation entre le plan d'adaptation des infrastructures avec le plan de renouvellement des engins de piste.

7.3.7 Plan d'actions

Actions à mener par la filière

- Mettre en place des CDM (collaborative decision making) au sein des aéroports pour garantir le meilleur partage d'information entre aéroports, compagnies aériennes et contrôleurs pour permettre l'usage des opérations vertes ;
- Développer un logiciel d'accompagnement des pilotes pour faciliter le recours au roulage moteur éteint (par exemple pour l'extinction/allumage moteur) ;
- Développer un outil de suivi de l'utilisation des zones militaires et civiles pour ajuster au plus près les contournements d'espace dus à une zone d'entraînement militaire ;
- Financer les investissements des installations au sol et d'achat d'engins de piste verts pour permettre la décarbonation des opérations au sol, avec des dispositifs de soutien financiers de l'Etat.

Proposition d'évolution des politiques publiques

- Soutenir la recherche et les investissements industriels et prévoir la réglementation internationale permettant le déploiement du concept de vol en formation ;
- Soutenir la R&T pour le développement de nouvelles méthodes de conception avion ayant un domaine de vol plus large via le financement de la feuille de route technologique du CORAC ;
- Respecter le calendrier des travaux de modernisation technique de la navigation aérienne (coûts du déploiement de la modernisation 4Flight : 1,2 Md € pour les 5 CRNA et 50 M€/an ensuite ; coûts SWIM : 3 M€ pour basculer un système sur SWIM) ;
- Donner les moyens à la DSNA pour garantir la flexibilité nécessaire dans l'organisation du travail des centres de contrôle ;
- Finaliser le déploiement de 4flight et du concept de free-route à la DNSA pour permettre l'optimisation des trajectoires ;
- Soutenir au niveau européen le succès de la « maturity gate » liée à l'implémentation de l'i4D (fin 2023) ;
- Mettre en place un soutien financier à la DSNA et ses fournisseurs pour le déploiement de l'i4D dans les centres ATM et aux compagnies aériennes pour équiper leurs avions ;
- Mettre en place un dispositif de soutien financier ou fiscal à destination des propriétaires ou exploitants d'engins de piste pour inciter à l'achat d'engins de piste décarbonés : suramortissement fiscal, prime à la casse ou autres ;
- Mettre en place un dispositif de soutien financier ou fiscal à destination des aéroports pour inciter à l'investissement dans des équipements au sol décarbonés ou permettant la décarbonation des opérations au sol : suramortissement fiscal, prime à la casse ou autres.

7.4 ADAPTATION DES INFRASTRUCTURES AUX NOUVELLES TECHNOLOGIES

7.4.1 ENJEUX

La stratégie de réduction des émissions de gaz à effet de serre du transport aérien passe par la capacité des aéroports à distribuer massivement une diversité d'énergies ou vecteurs énergétiques décarbonés ou bas carbone : électricité, carburants aéronautiques durables et hydrogène.

Les aéroports, avec leurs propres enjeux de transition énergétique, combinés à ceux de leurs territoires d'emprise et de l'ensemble des parties prenantes de l'écosystème aéroportuaire et du transport aérien, disposent de nombreux atouts pour être des catalyseurs du développement de ces « nouvelles énergies » en France et sur les territoires qui les hébergent.

Les aéroports doivent initier leur transformation en « hubs énergétiques », capables de distribuer ces « nouvelles énergies » en très grande quantité et à un coût compétitif.

Cette transformation en « hubs énergétiques » passe par une adaptation des chaînes logistiques énergie, garantissant la sécurité d'approvisionnement de ces nouvelles énergies, de la production jusqu'à la distribution sur les plateformes aéroportuaires, par l'intégration de nouvelles infrastructures aéroportuaires, par une prise en compte de nouveaux enjeux opérationnels, par une évolution du cadre réglementaire et normatif ainsi que par la gestion prévisionnelle de l'emploi et des compétences.

L'Annexe 4 détaille les enjeux et solutions.

7.4.2 FACTEURS DE SUCCÈS ET PLAN D' ACTIONS

En synthèse les facteurs de succès de l'intégration aéroportuaire de ces nouvelles énergies avions sont décrits ci-dessous.

Pour l'ensemble des « nouvelles énergies » :

- la nécessaire compétitivité des énergies renouvelables ou bas carbone qui peuvent être un levier de compétitivité et de développement économiques pour les aéroports ;
- la planification de la production, de l'approvisionnement (considérant l'importation), et du stockage des intrants – électricité, eau, biomasse – et l'organisation de leur fléchage vers les aéroports pour servir les besoins du transport aérien ;
- la bonne gestion de la coexistence de ces énergies sur les aéroports, notamment en termes de process opérationnels et enjeux de sécurité.

Pour les CAD de type carburant synthétique et/ou biologique :

- l'adoption d'un mécanisme de flexibilité type « book and claim », différenciation des flux d'achats et des flux physiques, pour limiter la nécessité de recourir à des adaptations d'infrastructures, et donc à des investissements qui seraient répercutés sur le prix des carburants durables ;
- la mise en place d'un système de traçabilité – volumes consommés par aéroport selon les filières de production-, indispensable pour une maîtrise fine de l'atteinte des objectifs réglementaires de décarbonation du transport aérien et des aéroports ;
- une évaluation des besoins par type de biomasse agrégée au niveau national, de façon à intégrer ces besoins dans les programmes de planification énergétique ;
- une évaluation au niveau national des besoins en hydrogène - et donc en électricité - pour la production d'électrocarburants ou e-fuel ou PtL (cf §7.2.2.2) voire d' E-BTL (cf §7.2.2.3)³⁵ ;
- l'exploration du développement de partenariats territoriaux et alliances pour atteindre des tailles critiques et contribuer à l'essor de filières de production et de distribution de SAF.

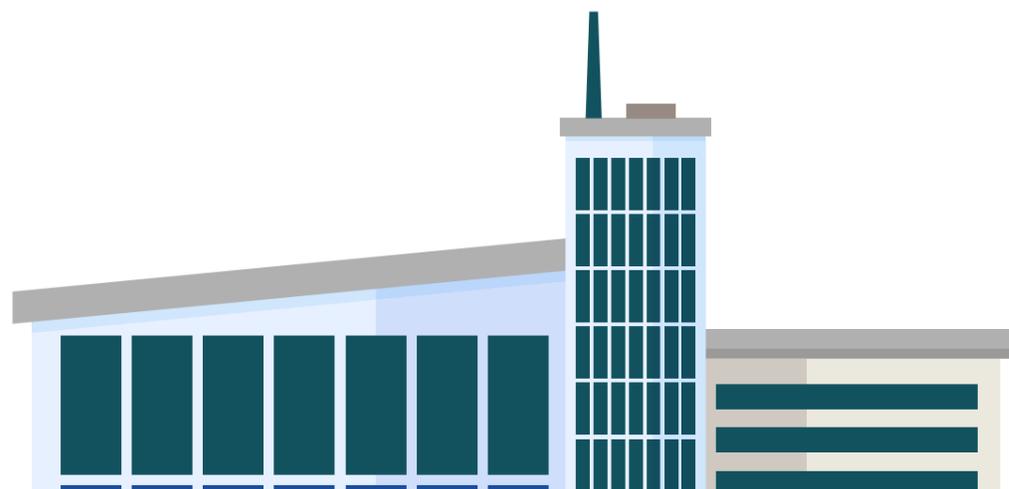
Pour l'électricité nécessaire à l'aviation hybride et électrique :

- l'accès à une électricité renouvelable ou bas carbone compétitive, via des mécanismes de soutien le cas échéant ;
- une évaluation des besoins agrégée au niveau national, de façon à intégrer ces besoins dans les programmes de planification énergétique.

³⁵ Intrants d'origine biologique et électrique (hydrogène électrolytique)

Pour l'hydrogène :

- l'accès à l'hydrogène à un coût compétitif, grâce au développement d'une économie à grande échelle et à l'introduction de mécanismes de soutien au développement des infrastructures afin de préserver une équité concurrentielle entre les aéroports et les compagnies aériennes aux niveaux européen et international, et ainsi prévenir les fuites de carbone aux frontières ;
- l'harmonisation au niveau national et européen d'un modèle économique d'affectation des investissements sur les aéroports afin de préserver une équité concurrentielle entre les aéroports et les compagnies aériennes ;
- la synchronisation du calendrier des différents acteurs de la chaîne de valeur – autorités (OACI, EASA, DGAC, DGPR...), constructeurs avions, aéroports, compagnies aériennes, énergéticiens (de l'upstream, midstream, downstream) – pour planifier le développement des infrastructures nécessaires sur les territoires français voire européen et sur les aéroports en cohérence avec le calendrier des usagers. Une vigilance particulière est à porter sur la disponibilité des énergies primaires (volumes, critères de définition) ;
- une feuille de route partagée et coordonnée entre les aéroports européens (en première approche, ceux du réseau central défini par le règlement RTE-T) pour assurer une préparation synchronisée d'un réseau d'aéroports équipés et capables d'opérer des avions à hydrogène ;
- la connaissance par chaque aéroport de ses enjeux (propres et combinés à ceux de son territoire) de développement de l'hydrogène, de développement d'une chaîne logistique et d'intégration d'infrastructures sur son site, afin de réserver dès à présent les emprises foncières nécessaires ;
- la réalisation de projets recherche et développement et d'études de sécurité sur les interfaces avions / aéroports spécifiques à l'hydrogène (opérations avions et avarillage au poste avion en co-activité, systèmes de distribution d'hydrogène liquide), à porter par le CORAC et l'ensemble de la filière ;
- le pilotage à une échelle nationale des enjeux réglementaires et normatifs, en vue d'une standardisation au niveau européen et international, avec l'identification d'une entité chargée de piloter l'évolution du cadre réglementaire et normatif ;
- l'harmonisation (guichet unique) et l'optimisation (ressources pour instruire les nombreuses demandes simultanées, capitalisation) au niveau national des process d'instruction des autorisations environnementales et aéronautiques requis pour le développement des infrastructures hydrogène afin d'en garantir un traitement fluide et rapide ;
- la gestion prévisionnelle de l'emploi et des compétences, et la préparation de la formation à large échelle (standardisation de programmes de formation au niveau national) des personnels amenés à opérer sur les aéroports (Services Compétents de l'Etat, services de secours, opérateurs aéroportuaires, assistants en escale, compagnies aériennes) ;
- le pilotage à une échelle nationale des enjeux d'acceptabilité sociale d'introduction de l'hydrogène à grande échelle, en milieu urbanisé ;
- l'intégration de l'impact potentiel sur les infrastructures aéroportuaires dans la conception des solutions avion H2 afin de minimiser les impacts opérationnels et les coûts d'investissements et d'exploitation pour la mise en service des énergies de rupture.



8. Décarbonation de l'aviation : trajectoires à horizon 2050

8.1 LA MODÉLISATION EN DEUX SCÉNARIOS VOLONTARISTES ET CRÉDIBLES DE DÉCARBONATION

Il a été décidé d'utiliser le modèle de projection des trajectoires de décarbonation de l'aérien développé par l'Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA) en 2019. L'ONERA comprend plus de 1000 ingénieurs et chercheurs intervenant notamment dans le domaine de l'aviation civile. Ce modèle a été utilisé par le CORAC (Conseil pour la Recherche Aéronautique Civile) pour l'élaboration de sa trajectoire de décarbonation³⁶. Le modèle a été adapté et amélioré pour fournir et intégrer davantage de calculs annexes, notamment relatifs aux besoins en énergie (biomasse, énergie électrique décarbonée) qu'impliqueraient les trajectoires de décarbonation produites.

Les 3 groupes de travail ont stabilisé des hypothèses sur les technologies, les opérations et l'incorporation d'énergies non fossiles, dont la cohérence a été vérifiée et qui, une fois intégrées dans le modèle, permettent d'aboutir aux trajectoires de décarbonation présentées ici. L'impact du surcoût des combustibles alternatifs et des coûts du carbone (compensation du CO2, ETS et taxation) sur la demande de transport aérien a également été pris en compte dans les trajectoires au travers d'un modèle d'élasticité-prix de la DGAC.

L'Annexe 5 détaille le fonctionnement des modèles et le chapitre 9 détaille la compensation et les coûts carbone.

Sur chaque périmètre géographique (France et départ de la France vers l'international), la filière présente deux scénarios « Action » et « Accélération », représentant des niveaux d'investissement et d'ambition croissants.

Accélération, ainsi qu'une variante (bis), présente un rythme de décarbonation plus rapide et atteint un niveau d'émissions plus faibles en 2050, nécessitant un recours moindre à la compensation pour atteindre la neutralité carbone.

Ces deux scénarios traduisent une ambition forte du secteur. Ils sont jugés crédibles mais représentent un défi important.

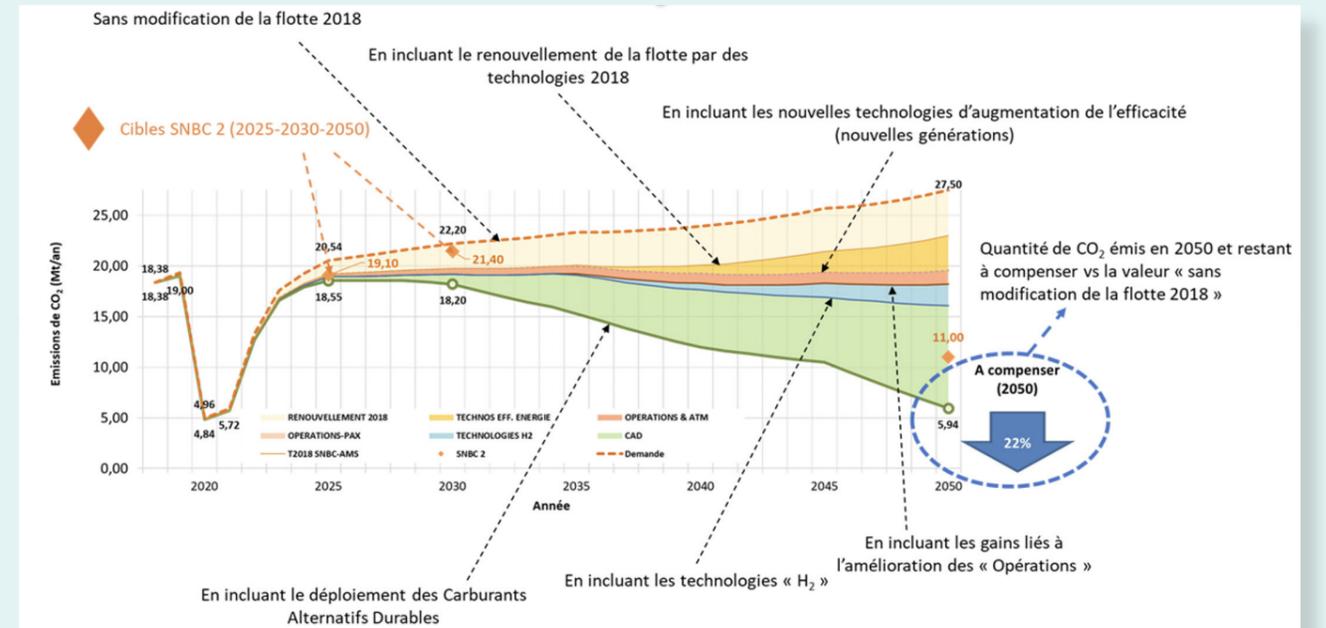
Ils ne pourront se matérialiser que si la filière et les pouvoirs publics mettent chacun en œuvre les recommandations de la présente feuille de route.

³⁶ voir le document publié sur le site du corac <https://aerorecherchecorac.com/>

Le tableau ci-dessous détaille les hypothèses retenues dans chaque scénario :

	Scénario « Action »	Scénario « Accélération »	Scénario « Accélération (bis) »
Fréquence de renouvellement des avions		20 ans	
Croissance de la demande	Modélisation avec prise en compte de l'élasticité-prix (croissances économique et population, prix des CAD et mesures environnementales)		
Hydrogène	Prix PtL 2050 haut	Prix PtL 2050 bas	
Carburants Aéronautiques Durables	Régional 2035 SMR 2045 Pénétration 50%	Régional 2035 SMR 2035 Pénétration 50%	
Technologies : gain d'efficacité vs générations précédentes et dates d'entrée en service	Régional -20% en 2035 SMR -30% en 2033 et H2 en 2045 Long courrier -20% en 2037	Régional -20% en 2035 SMR -30% en 2035 et H2 en 2035 Long courrier -20% en 2037	
Opérations	Gains d'efficacité obtenus en fonction de la vitesse de déploiement des différents leviers entre 2018 et 2050 ; différenciés par périmètre (France ou International au départ de la France). (FR : 9,6% / INT : 71%)		

Par la suite, les trajectoires d'émissions de CO₂ sont toutes représentées sous la même forme suivante :



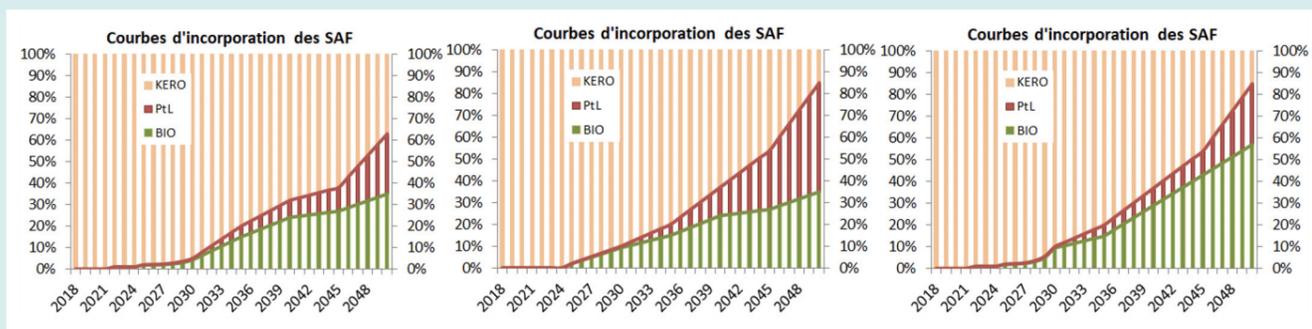
Sur cette figure apparaissent de haut en bas :

- l'évolution des émissions calculées à partir de la demande brute (courbe en pointillés en haut du graphe), i.e. avec la flotte actuelle, sans renouvellement des appareils. Cette courbe est purement théorique et se déduit directement de la courbe de croissance de la demande intégrant l'impact du surcoût des combustibles alternatifs mais permet de faire apparaître immédiatement en dessous l'effet du renouvellement des flottes avec les technologies 2018 (zone en jaune pâle) ;
- l'impact en termes de réductions d'émissions des nouvelles technologies et de l'optimisation des opérations (aires en jaune foncé, orange, et bleu pour la capacité hydrogène) ;
- l'impact de l'incorporation de CAD (zone en vert), associés à des émissions de CO₂ nulles puisque ne sont retenues ici que les émissions liées à la combustion (en cohérence avec les objectifs spécifiques du secteur au sens de la SNBC).

L'ensemble des hypothèses de calcul et la synthèse de la méthodologie de calcul sont rappelées en Annexe 6.

Par ailleurs, conformément à la demande du Ministère de la Transition énergétique dans le cadre de l'Article 301 de la loi « Climat et Résilience », les trajectoires de décarbonation sont calculées pour le périmètre de l'aérien seul et, par convention, les émissions amont associées à la production et à la distribution des combustibles durables ne sont pas prises en compte. Par souci de complétude, un exemple de trajectoire intégrant le cycle de vie est donné en Annexe 7.

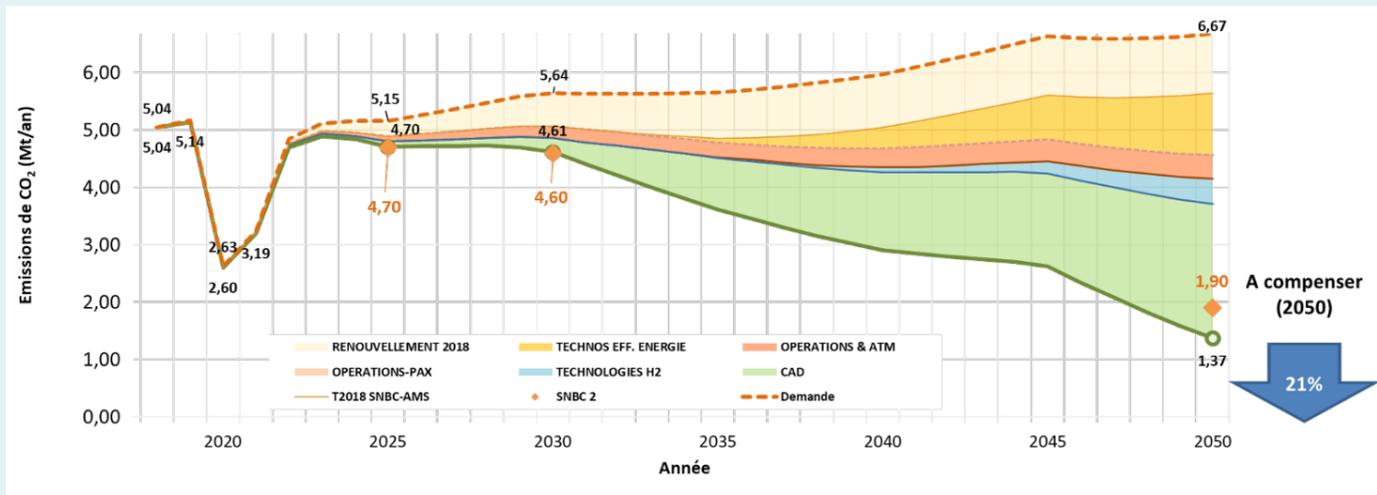
Les trajectoires d'incorporation des CAD pour les périmètres « France » et « International » sont les suivantes :



De gauche à droite : « Action », « Accélération », « Accélération (bis) »

8.2 PÉRIMÈTRE DOMESTIQUE FRANCE : SCÉNARIO « ACTION »

Pour ce scénario, la projection de l'évolution des émissions de CO₂ sur le périmètre France domestique (métropole + DOM-TOM) est donnée par la figure ci-après :

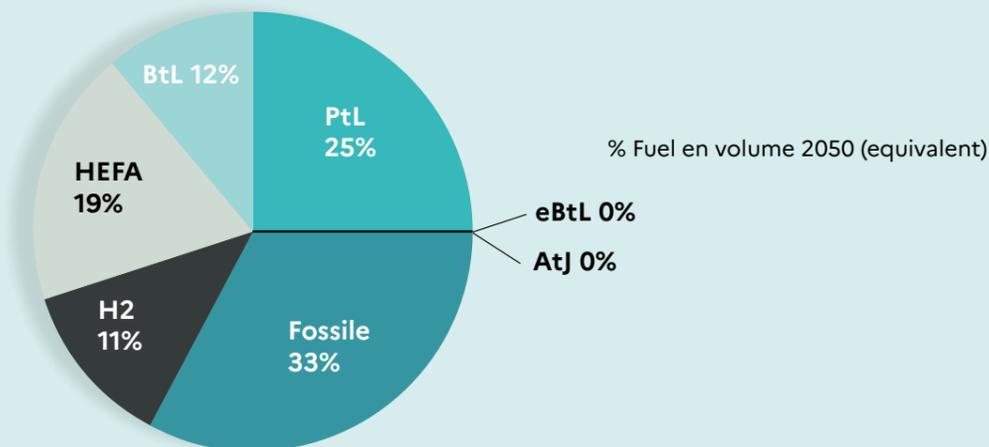


Ce scénario permet une décarbonation à hauteur de près de 80% à horizon 2050. Sur le périmètre France, les émissions de CO₂ résiduelles sont compensées ; le net zéro carbone est atteint.

- L'évolution des émissions calculées à partir de la demande brute (courbe en pointillé en haut du graphe), i.e. avec la flotte actuelle, sans renouvellement des appareils. Cette courbe est purement théorique (et se déduit directement de la courbe de croissance du trafic intégrant l'impact du surcoût des combustibles alternatifs) mais permet de faire apparaître immédiatement en dessous l'effet du renouvellement des flottes avec les technologies 2018 (zone en jaune pâle) ;
- L'impact de l'incorporation de CAD (zone en vert), associés à des émissions de CO₂ nulles puisque ne sont retenues ici que les émissions liées à la combustion (en cohérence avec les objectifs spécifiques du secteur au sens de la SNBC).

En 2050, la limite inférieure de la zone en vert donne le « reste à compenser », soit ici 1,37 Mtonne de CO₂.

Les proportions des différents combustibles utilisés en 2050 sont données par la figure ci-dessous :



L'incorporation de CAD au seuil réglementaire (principalement de type HEFA et BTL-Fischer-Tropsch), ainsi que le déploiement modéré des technologies hydrogène impliquent un apport de carburant d'origine fossile de l'ordre de 33% du volume total (en équivalent kérosène). Ce scénario permet néanmoins d'atteindre les objectifs de la SNBC 2, sans marge de sécurité 2030, mais va au-delà en 2050. Un objectif SNBC 3 nettement plus bas en 2030 serait dans ce scénario difficile à tenir sans appel important à des mécanismes de compensation.

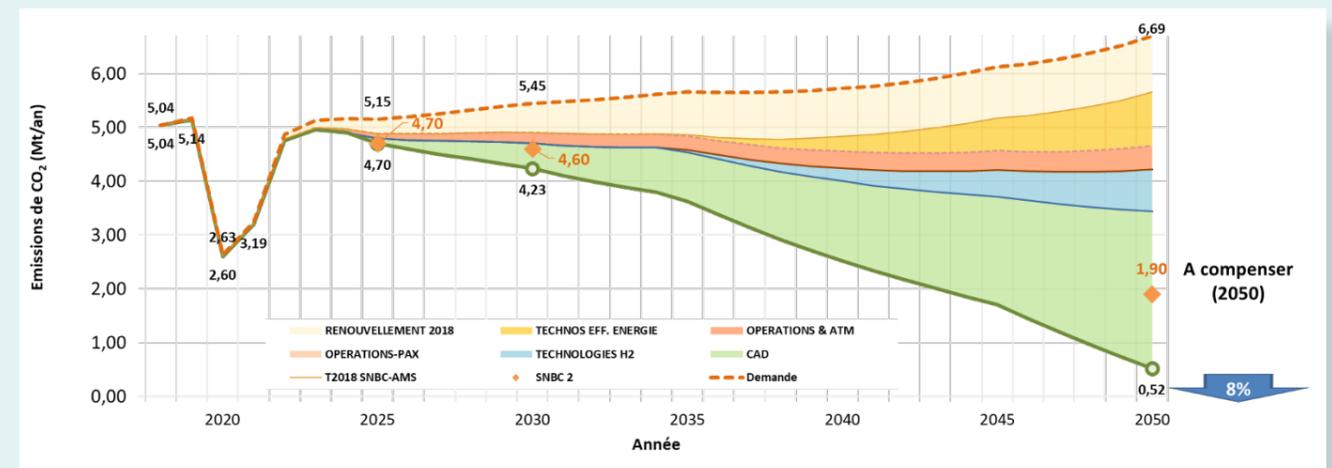
Besoins en biomasse et énergie décarbonée

La demande en carburant à l'horizon 2050 est dans ce scénario de 1,2 Mtonne, dont 0,74 Mtonne de CAD. En utilisant les données disponibles dans la littérature, et celles du rapport ENERGIA, et selon le schéma d'incorporation des différents types de carburants donné ci-dessus, la quantité de biomasse à mobiliser serait ici de l'ordre de 1,6 Mtonne incluant l'ensemble des coupes de carburants produites, dont 1,2 Mtonne directement utilisées pour la production de CAD³⁷. Avec les mêmes séries d'hypothèses, la quantité d'énergie décarbonée à mobiliser pour la production d'hydrogène et de CAD (PtL et e-BTL pour l'essentiel) serait de 11,4 TWh (9,2 TWh correspondant à l'électrolyse pour la fabrication de l'hydrogène pour les différents procédés ainsi qu'à sa liquéfaction lorsqu'il est utilisé directement comme combustible), soit 1,8% de la production nationale d'énergie décarbonée à l'horizon 2050 (scénario RTE N3); en tenant compte des co-produits destinés à d'autres usages dans les différents procédés de production, cette quantité totale d'énergie à mobiliser serait de 15,1 TWh.

8.3 PÉRIMÈTRE DOMESTIQUE FRANCE : SCÉNARIO « ACCÉLÉRATION »

Ce scénario est plus ambitieux notamment en termes de niveaux d'incorporation de CAD et de date d'entrée en service d'une capacité régionale et court-courriers d'avions à hydrogène.

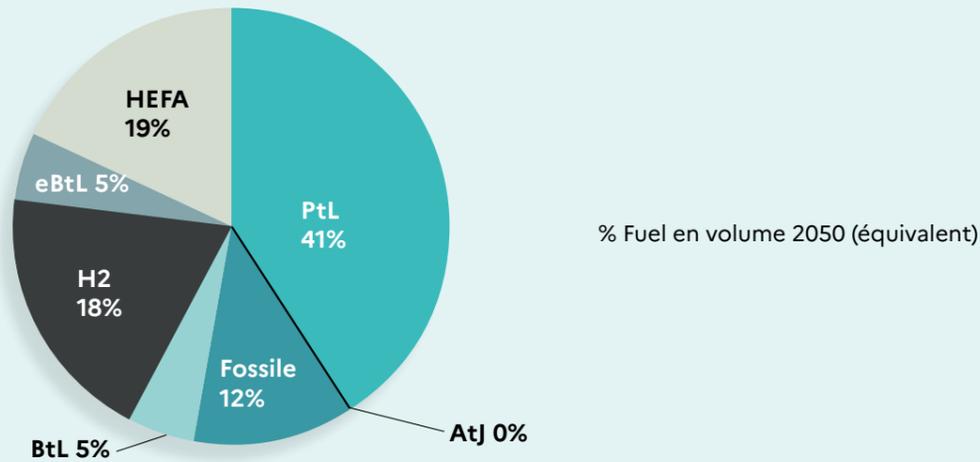
Pour ce scénario, la projection de l'évolution des émissions de carbone sur le périmètre France domestique (métropole + DOM-TOM) est donnée par la figure ci-après :



³⁷ On rappelle que les procédés de fabrication des CAD ne produisent jamais que du carburant seulement mais un ensemble de carburants

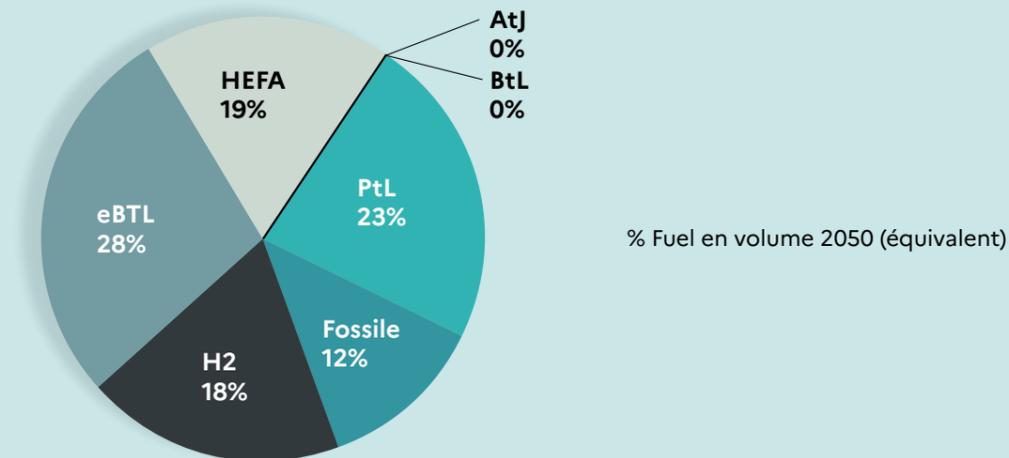
Ce scénario permet une décarbonation à hauteur de plus de 90% à horizon 2050. Il permet d'atteindre et de dépasser les objectifs de la SNBC 2 : ils seraient améliorés de 43 % (-1,22 Mt contre -0,85 Mt) en 2030. 0,54 Mtonne de CO₂ sera compensée en 2050 ; le net zéro carbone est atteint.

Dans ce scénario, la répartition des différents types de carburants en 2050 est la suivante :



Besoins en biomasse et énergie décarbonée

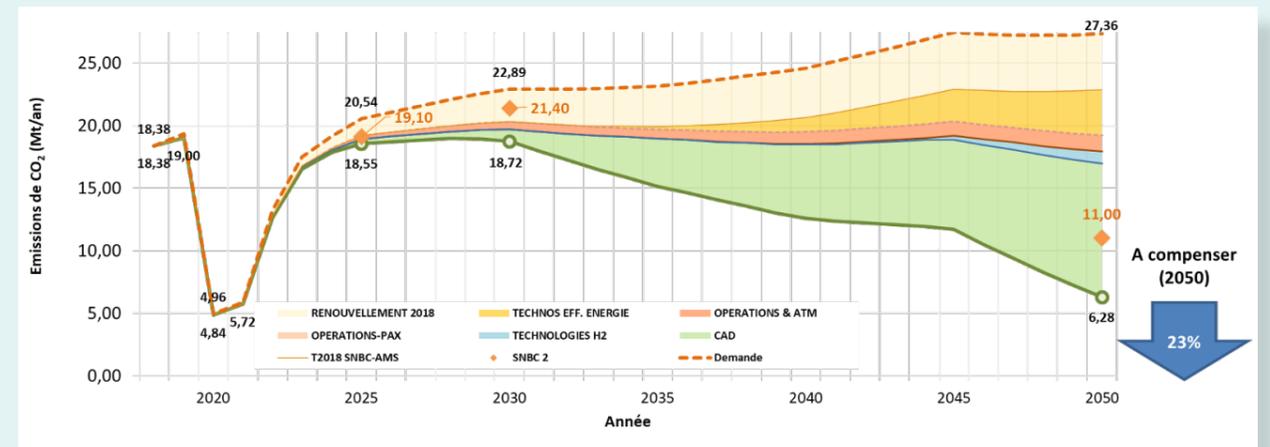
La demande d'hydrocarbures à l'horizon 2050 est dans ce scénario de 1,1 Mtonne, un peu inférieure à celle caractérisant le scénario « Action » du fait d'une utilisation accrue de l'hydrogène. En utilisant les données disponibles dans la littérature, et celles du rapport ENERGIA, et selon le schéma d'incorporation des différents types de carburants donné ci-dessous, la **quantité de biomasse à mobiliser serait ici de 1,1 Mtonne incluant l'ensemble des coupes de carburants produites, dont 0,8 Mtonne directement utilisées pour la production de biocarburants**. Dans ce scénario, l'accélération de la décarbonation est en grande partie imputable à l'usage accru de PtL. On a donc sans surprise une demande assez modérée en biomasse mais, en revanche, une demande plus importante en énergie électrique décarbonée. Avec les mêmes séries d'hypothèses sur les processus de production et les rendements, la quantité d'énergie décarbonée à mobiliser pour la demande d'hydrogène et de CAD (PtL et e-BTL pour l'essentiel) **serait de 20,5 TWh (16,9 TWh correspondant à l'électrolyse pour la fabrication de l'hydrogène pour les différents procédés ainsi qu'à sa liquéfaction lorsqu'il est utilisé directement comme combustible), soit 3,2% de la production nationale d'énergie décarbonée à l'horizon 2050 (scénario RTE N3) ; en tenant compte des co-produits destinés à d'autres usages dans les différents procédés de production, cette quantité totale d'énergie à mobiliser serait de 27,1 TWh.**



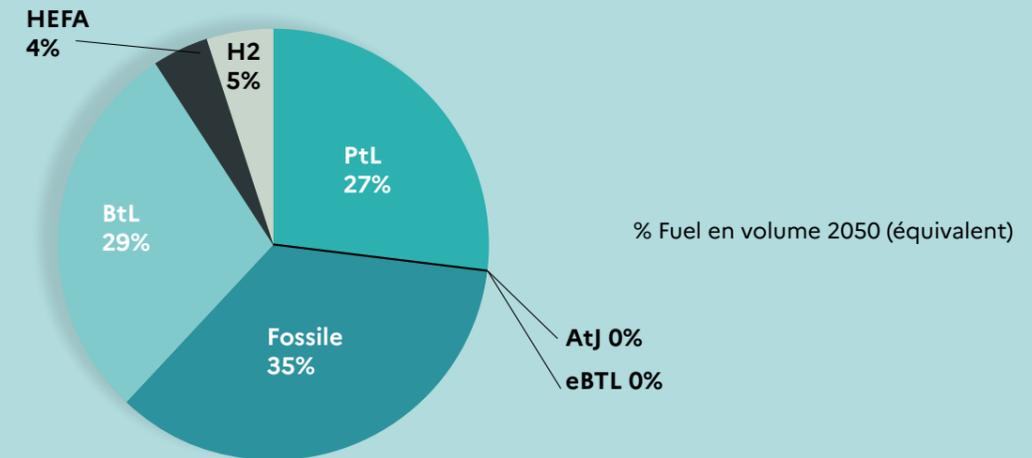
Sur la base des mêmes hypothèses, il est possible d'opter pour un schéma d'incorporation légèrement différent, en privilégiant plutôt l'usage de biocarburants pour atteindre l'objectif de 2050 (voir schémas d'incorporation et répartition en 2050 ci-dessous). La quantité totale de CAD utilisée est la même, ainsi que les émissions de CO₂ résiduelles mais l'équilibre entre demande en biomasse et demande en énergie décarbonée est un peu différent. En adaptant la proportion entre carburants issus des processus BtL et e-BtL pour maintenir l'usage de la biomasse au plus proche du scénario « Action » réglementaire, il faut cette fois 1,3 Mtonne de biomasse (1,8 Mtonnes à mobiliser) et une énergie électrique décarbonée dédiée de 19,1 TWh (17,1 TWh correspondant à l'électrolyse pour la fabrication de l'hydrogène pour les différents procédés ainsi qu'à sa liquéfaction lorsqu'il est utilisé directement comme combustible), soit 3% de la demande nationale selon le scénario RTE N3, avec une énergie à mobiliser compte tenu des co-produits pour d'autres usages de 25,1 TWh.

8.4 PÉRIMÈTRE DÉPART INTERNATIONAL FRANCE : SCÉNARIO « ACTION »

Ce périmètre recouvre l'ensemble des vols internationaux au départ du territoire français.



Ce scénario projette une décarbonation à hauteur de 77% et permet d'être très au-delà des objectifs de la SNBC 2. Dans ce scénario, la répartition des différents types de carburants en 2050 est donnée par les figures ci-après :

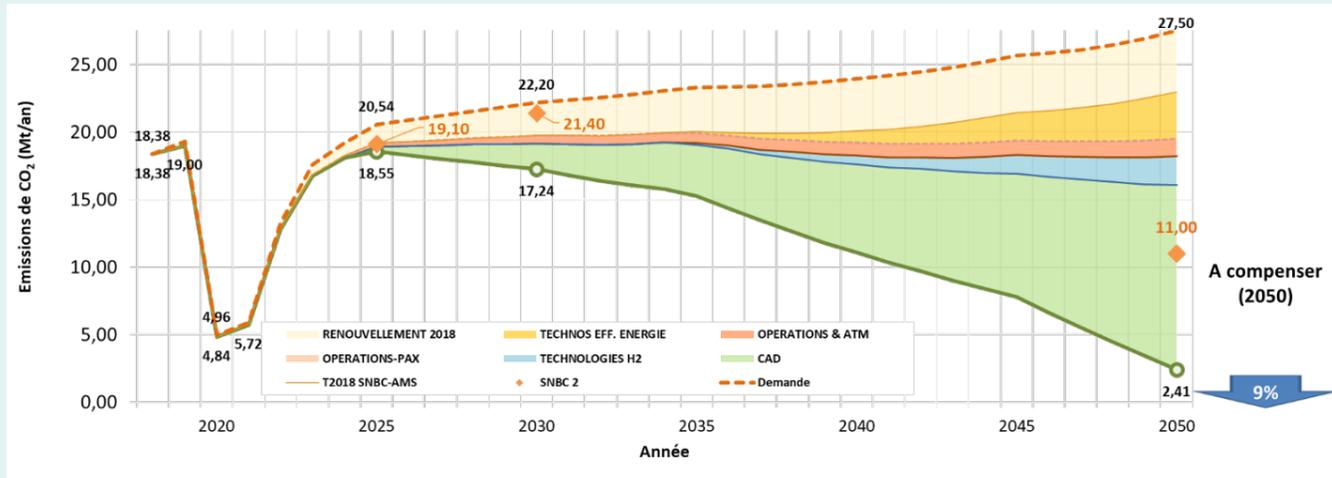


Besoins en biomasse et énergie décarbonée

Pour le périmètre « Départ International », le scénario « Action » conduit à l'horizon 2050 à une demande d'hydrocarbures de 5,4Mtonnes. Avec le schéma d'incorporation « Fit for 55 » utilisé ici, la quantité de biomasse à mobiliser est de 13,4Mtonnes incluant les autres coupes de carburants, dont 9,4Mtonnes directement utilisées pour le transport aérien. Ici la quantité d'énergie électrique décarbonée utilisée pour l'aérien est de 45,5 TWh (35,6 TWh correspondant à l'électrolyse pour la fabrication de l'hydrogène pour les différents procédés ainsi qu'à sa liquéfaction lorsqu'il est utilisé directement comme combustible), soit 7,1% de la consommation nationale prévue dans le scénario RTE N3). En tenant compte des co-produits, cette quantité d'énergie mobilisée pour la production de PtL et d'hydrogène s'élève à 62,4 TWh.

8.5 PÉRIMÈTRE DÉPART INTERNATIONAL FRANCE : SCÉNARIO « ACCÉLÉRATION »

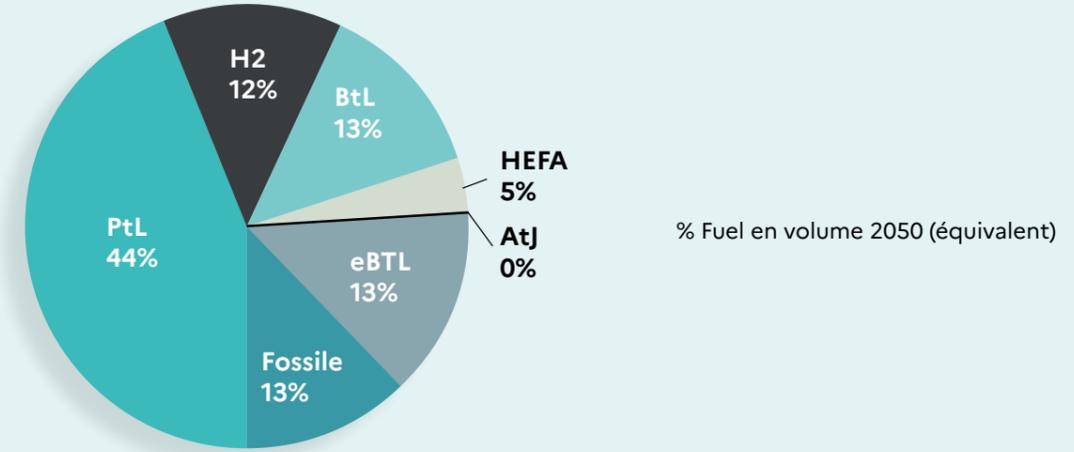
Sur le périmètre international, le scénario « Accélération » a également été utilisé, avec les mêmes hypothèses technologiques et le schéma d'incorporation utilisé précédemment. L'évolution des émissions de CO₂ sur la période est alors donnée par le schéma ci-après.



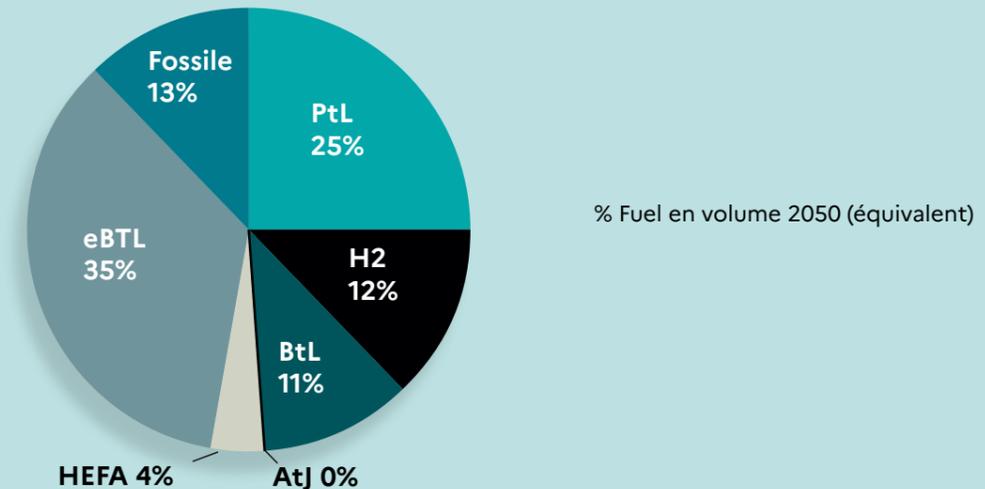
Comme sur le périmètre France, le scénario « Accélération » permet une marge encore plus importante vis-à-vis des cibles SNBC 2 en 2030 et 2050.

Besoins en biomasse et énergies décarbonées

La demande d'hydrocarbures à l'horizon 2050 est dans ce scénario de 5,1Mtonnes (un peu inférieure à celle caractérisant le scénario action du fait de l'arrivée plus précoce d'appareils utilisant l'hydrogène). La quantité de biomasse à mobiliser est ici de 9,5Mtonnes incluant les autres coupes, dont 6,7Mtonnes directement utilisées pour l'aérien. Comme cela a été constaté sur le périmètre domestique, la demande en électricité décarbonée est nettement plus importante que pour le scénario « Action », avec une consommation de 92,36 TWh (dont 75,73 TWh correspondant à l'électrolyse pour la fabrication de l'hydrogène pour les différents procédés ainsi qu'à sa liquéfaction lorsqu'il est utilisé directement comme combustible) pour la production d'H₂, d'e-BtL et de PTL, soit 14,3% de la consommation prévue par le scénario RTE N3). Si l'on tient compte des co-produits destinés à d'autres usages dans les différents procédés de production, il est alors nécessaire de mobiliser une quantité totale d'énergie de 126,2 TWh.



Comme cela a été discuté sur le périmètre Domestique, et sur la base des mêmes hypothèses, il est possible d'opter pour un schéma d'incorporation légèrement différent, en privilégiant plutôt l'usage de CAD de type e-BTL pour atteindre l'objectif de 2050 (voir schéma temporel d'incorporation et répartition 2050 pour l'international ci-dessous) :



La quantité totale de CAD utilisée est la même, ainsi que les émissions de CO₂ résiduelles mais l'équilibre entre demande en biomasse et demande en énergie décarbonée est un peu différente.

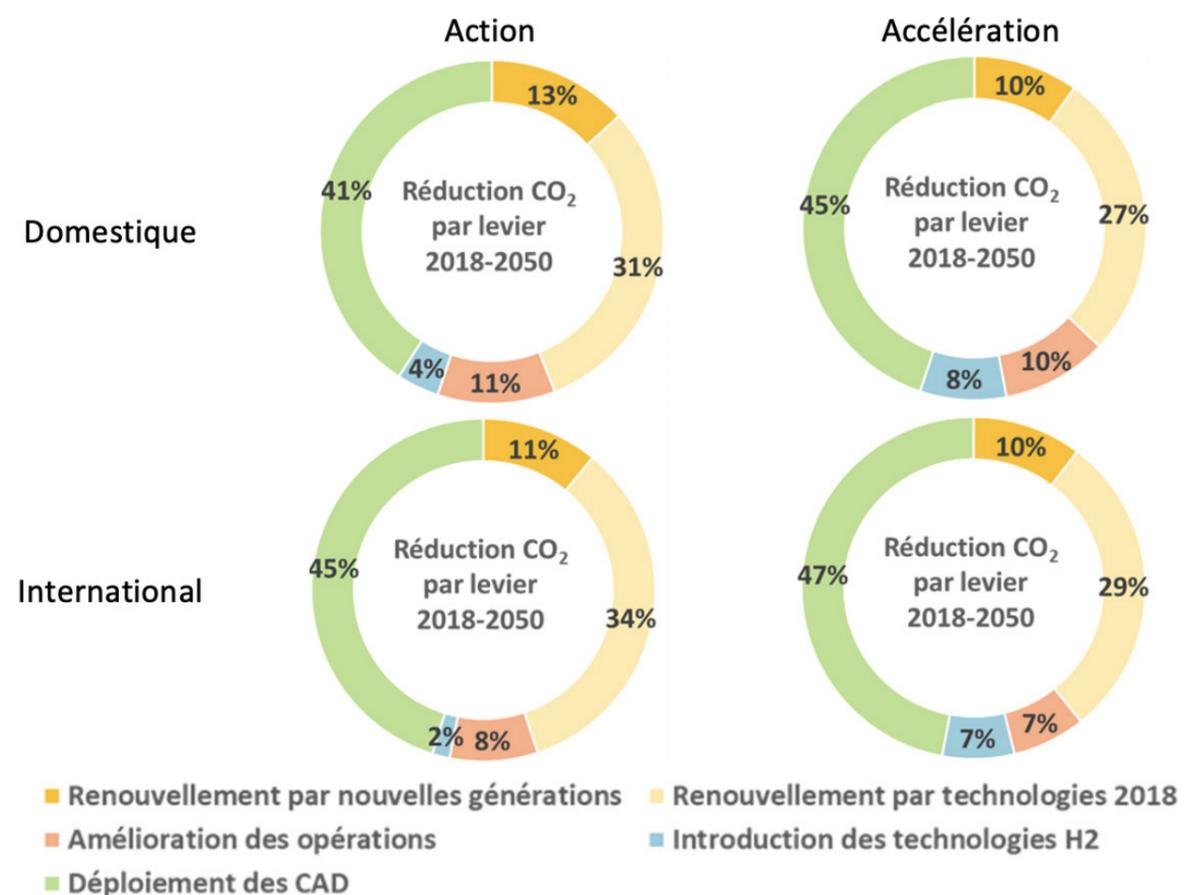
En adaptant la proportion entre carburants issus des processus BtL et e-BtL pour maintenir l'usage de la biomasse au plus proche du scénario « Action » réglementaire, il faut cette fois 9,4 Mtonnes de biomasse (13,3Mtonnes à mobiliser) et une énergie électrique décarbonée dédiée de 83,9 TWh (72,9 TWh correspondant à l'électrolyse pour la fabrication de l'hydrogène pour les différents procédés ainsi qu'à sa liquéfaction lorsqu'il est utilisé directement comme combustible), avec une énergie à mobiliser compte tenu des co-produits pour d'autres usages de 114,2 TWh.

8.6 IMPORTANCE RELATIVE DES DIFFÉRENTS LEVIERS

Les simulations réalisées sur les périmètres géographiques « Domestique » et « International » affichent des performances différentes selon le scénario de décarbonation sélectionné, qu'il s'agisse d'émissions de CO₂ ou de mobilisation de ressources.

Les différents leviers disponibles peuvent être actionnés avec une amplitude qui varie selon :

- les dates d'entrée en service des avions de nouvelle génération, notamment ceux porteurs des technologies à hydrogène,
- le renouvellement des flottes qui conditionne la pénétration des technologies les plus efficaces
- les taux d'incorporation et les types de CAD considérés qui agissent rétroactivement sur la demande,
- les projections de déploiement de nouvelles technologies et les gains attendus sur les opérations, qui varient selon le périmètre.



Le tableau ci-dessus indique l'importance relative des différents leviers, en pourcentage de réduction des émissions de CO₂, intégrées sur la période 2018-2050. Les valeurs sont indépendantes du niveau de décarbonation. Tous périmètres et scénarios considérés, la contribution des CAD varie assez peu, entre 41% et 47%. Celle des technologies d'efficacité varie entre 37 % et 45 %, dont environ 30 % environ proviennent de la seule capacité des compagnies à renouveler leur flotte en service aujourd'hui par des avions de technologie actuelle (2018). Le rôle de l'hydrogène varie fortement selon la date d'entrée en service des court-moyen courriers mais demeure inférieur à 10% en raison de sa date de mise en service par rapport à la période considérée et à la vitesse d'introduction des avions (un avion sur deux). Globalement, les technologies « avion » constituent 45% à 48% de la contribution relative à la décarbonation sur la période 2018-2050. Les opérations contribuent en fonction du périmètre à hauteur de 8 à 11%.

8.7 ENJEUX EN TERMES DE RESSOURCES : TABLEAU RÉCAPITULATIF

Pour le périmètre France et pour le périmètre départ International, le tableau ci-dessous reprend les besoins en biomasse et en électricité décarbonée en 2050 pour les différents scénarios retenus.

	Biomasse 2050 (Mt) dédiée CAD	Biomasse 2050 (Mt) à mobiliser	Énergie électrique décarbonée dédiée 2050 (TWh)	Énergie électrique décarbonée mobilisée 2050 (TWh)
Périmètre France				
Scénario « Action »	1,2	1,6	11,4 (1,8% de la production selon scénario RTE)	15,1
Scénario « Accélération »	0,8	1,1	20,5 (3,2% de la production selon scénario RTE)	27,1
Scénario « Accélération-bis »	1,3	1,8	19,10 (3% de la production selon scénario RTE)	25,1
Périmètre départ international				
Scénario « Action »	9,4	13,3	45,5 (7,1% de la production selon scénario RTE)	62,4
Scénario « Accélération »	6,7	9,5	92,4 (14,3% de la production selon scénario RTE)	126,2
Scénario « Accélération bis »	9,4	13,3	83,9 (13% de la production selon scénario RTE)	114,2

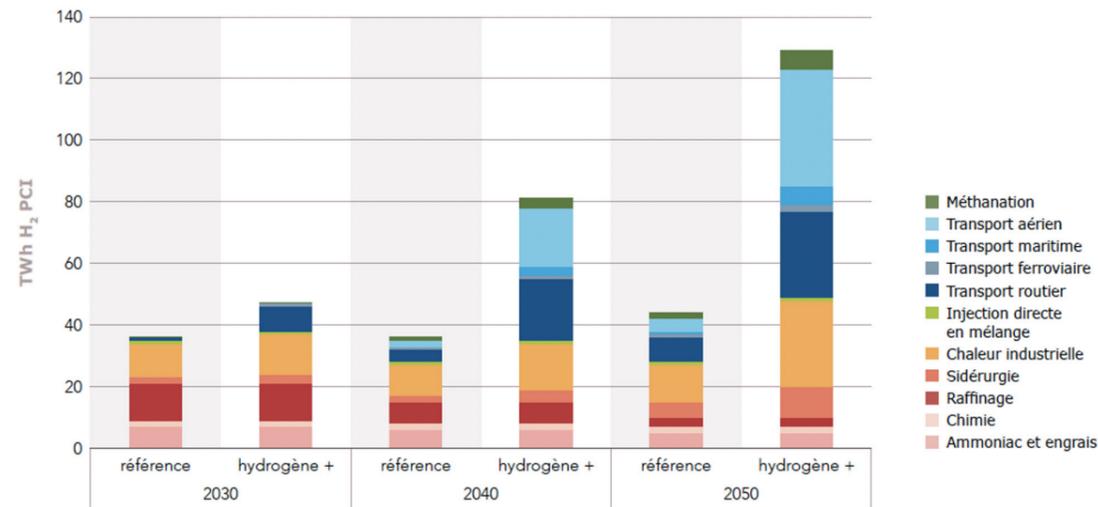
Les scénarios actions, accélération et accélération bis font état respectivement d'un besoin en énergie électrique à hauteur de 62,4, 126,2 et 114,2 TWh.

Notons toutefois que ces chiffres ont été établis avec l'hypothèse que la totalité du carbone nécessaire au PTL serait capturé dans l'air - technologie DAC -, procédé plus énergivore que l'utilisation de carbone fatal issu de procédés industriels (cimenteries...). Cette dernière option doit permettre au moins dans une phase transitoire de contenir les besoins en électricité. Il n'en reste pas moins que le rapport RTE «Futurs énergétiques» de Février 2022 n'avait pas identifié un besoin de l'aérien à de tels niveaux.

Dans ce rapport, RTE prévoyait un cas « hydrogène plus » allouant une part importante de production d'hydrogène à l'aviation, environ 40 TWh H2 PCI, soit environ compte tenu des rendements de transformation considérés par RTE de 57 TWh électrique.

³⁸ Futurs énergétiques 2050, version de février 2022, p. 450

Figure 9.6 Consommation d'hydrogène (hors utilisation pour la production électrique) dans les trajectoires de référence et « hydrogène + »



Note : une partie de l'hydrogène consommé est couverte par de la coproduction fatale

Si ce rapport démontre déjà une forte capacité de production d'hydrogène dédiée à l'aérien, il s'agit d'une composante minimum qui pourrait-être dans des horizons proches augmentée de manière importante en raison du report de certains secteurs vers d'autres sources d'énergies (exemple du transport routier, chaleur industrielle).

De plus, si la production d'hydrogène dans ces scénarios devait démarrer aux alentours de 2040, cette information a déjà été modifiée récemment dans les études de France Hydrogène³⁹ qui font état des projets en cours de montage et qui réalise des estimations de capacités de production, à date, à horizon 2030 pour le secteur aérien.

	Volumes d'hydrogène renouvelable et bas carbone alloués à l'industrie à horizon 2030 (en tH ₂ /an)		
	Etude « Trajectoire pour une grande ambition hydrogène à 2030 » - septembre 2021		Déploiements projetés à 2030 - décembre 2022
	Scénario prospectif « Ambition »	Scénario prospectif « Ambition + »	
Raffinage	121 000	145 000	50 000
Ammoniac « conventionnel »	124 000	170 000	20 000
Molécules de synthèse	56 000	92 000	425 000 dont 205 000 pour du e-méthanol 165 000 pour des e-carburants type SAF* ou e-kérosène 55 000 pour d'autres besoins (e-methane, etc.)
Sidérurgie	162 000	205 000	250 000
Industrie diffuse	12 000	23 000	12 000
Chaleur industrielle	x	x	6 500
Autres (usages non précisés)	x	x	51 500
Total industrie	475 000	635 000	815 000

*SAF : Sustainable Aviation Fuel ou CAD : carburant d'aviation durable

³⁹ trajectoire pour une grande ambition hydrogène à 2030

Le rapport démontre une très forte accélération des besoins futurs en hydrogène - pour production d'électrocarburants et en utilisation directe via des piles à combustible ou en combustion, au plus haut du scénario le plus ambitieux proposé jusqu'alors par la filière et ceci quel que soit le mix énergétique envisagé (biocarburants, e-fuels, hydrogène). Les approvisionnements seraient donc également suffisants pour tenir les trajectoires de décarbonation du secteur durant les premières phases d'incorporations entre 2030 et 2040, toutes choses égales par ailleurs.

Si les besoins recensés dans les trajectoires et les scénarios RTE démontrent un certain écart, il faut avoir à l'esprit que les scénarios RTE sont produits à partir d'un calcul de la demande, selon différentes hypothèses, mais qu'un dépassement des limites de consommations ne serait pas rédhibitoire pour la bonne tenue d'une trajectoire de décarbonation, par augmentation de la production d'électricité bas carbone. Le choix de développer des moyens de production supérieurs aux attendus actuels de RTE relèverait de décisions politiques et non d'impossibilités techniques ou technico-économiques. De plus, les scénarios RTE sont en cours d'ajustement, ils devraient être en mesure de prendre en compte les besoins actualisés exprimés par la feuille de route du transport aérien et d'autres secteurs.

Dans le cas où les choix politiques ne pourraient mener à délivrer la totalité de l'énergie électrique dont le secteur aérien aurait besoin via le réseau, il existe d'autres alternatives dont le potentiel reste à explorer. Il existe une possibilité de développer des projets privés « hors réseaux ou off-grid » capables de délivrer, dans des proportions modestes, de l'énergie utile à l'électrolyse de l'hydrogène, qui n'est pas à ce stade prise en compte dans les scénarios RTE. Ces projets pourraient être de plusieurs natures : photovoltaïques, éoliens, etc et pourront être exclusivement ou non dédiés aux centres de production d'hydrogène.

Ces projets bien qu'utiles et susceptibles de combler une partie du besoin électrique global ne doivent pas pour autant occulter qu'il ne s'agirait que d'un complément et que la part prépondérante de l'électricité devra être délivrée par le réseau.

Dans tous les cas de figure et compte tenu des lourds investissements de départ, les centres de production d'hydrogène devraient utiliser quasi-exclusivement le réseau électrique pour assurer la bonne production d'H₂, que ce soit pour la production d'électrocarburants ou pour une utilisation directe de l'H₂.

De cette manière, en plus de diminuer les coûts de production, l'efficacité des capacités de production électrique serait potentiellement optimisée en termes de temps d'opérabilité.

8.8 COHÉRENCE AVEC LES SCÉNARIOS OACI LTAG

La 41^{ème} Assemblée de l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) a adopté en octobre 2022 un objectif ambitieux mondial collectif à long terme (LTAG) de réduction à zéro des émissions nettes de carbone d'ici 2050. La France a été très active pour préparer et obtenir ce succès diplomatique, point de départ d'un plan d'action mondial coordonné de décarbonation du transport aérien. La feuille de route présentée dans ce rapport s'inscrit complètement dans le cadre du LTAG, et constitue une proposition de contribution de la France au plan mondial.

Ci-après, quelques éléments de lecture croisée entre les scénarios du rapport OACI LTAG⁴⁰, et ceux proposés pour la France.

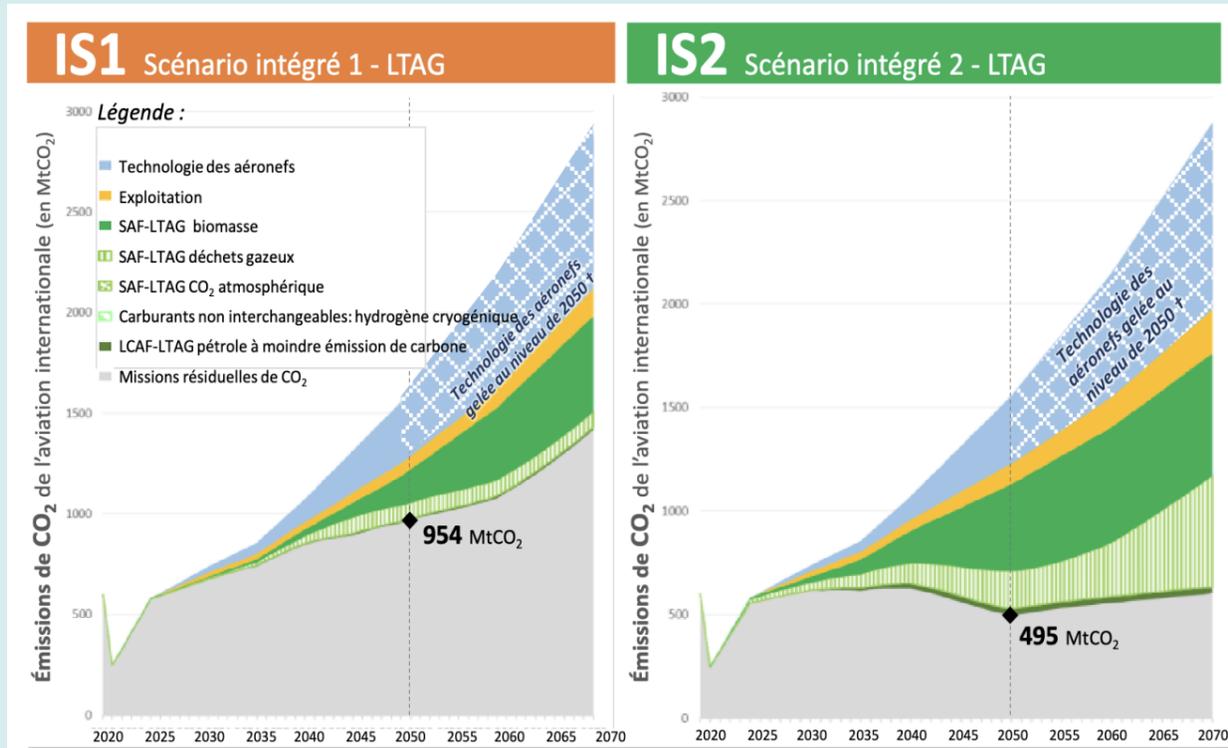
8.8.1 Les scénarios intégrés LTAG

Le LTAG établit 3 scénarios intégrés IS1, IS2, IS3, qui correspondent à une politique graduellement plus ambitieuse sur les différents leviers : renouvellement des flottes, gains opérationnels, introduction de nouvelles technologies, introduction de carburants alternatifs. Voir figure ci-dessous.

Ces scénarios n'existent qu'au niveau mondial, sans projection régionale. Ils fournissent des projections à l'horizon 2070.

Des études de sensibilité ont été menées pour évaluer l'impact de paramètres comme le niveau de croissance du trafic aérien, ou le succès plus ou moins complet de l'effort technologique.

⁴⁰ Rapport OACI LTAG : https://www.icao.int/environmental-protection/LTAG/Documents/REPORT%20ON%20THE%20FEASIBILITY%20OF%20A%20LONG-TERM%20ASPIRATIONAL%20GOAL_fr.pdf



8.8.2 Comparaison avec les scénarios France

Les périmètres adressés sont différents : mondial d'un côté, domestique et «départ France» de l'autre. De ce fait, les trajectoires ne sont pas directement comparables.

La trajectoire pour la France a bien sûr été élaborée en fonction des meilleurs éléments de prévisions applicables localement : niveau de croissance du trafic, politique et capacités des opérateurs, politiques publiques nationale et européenne.

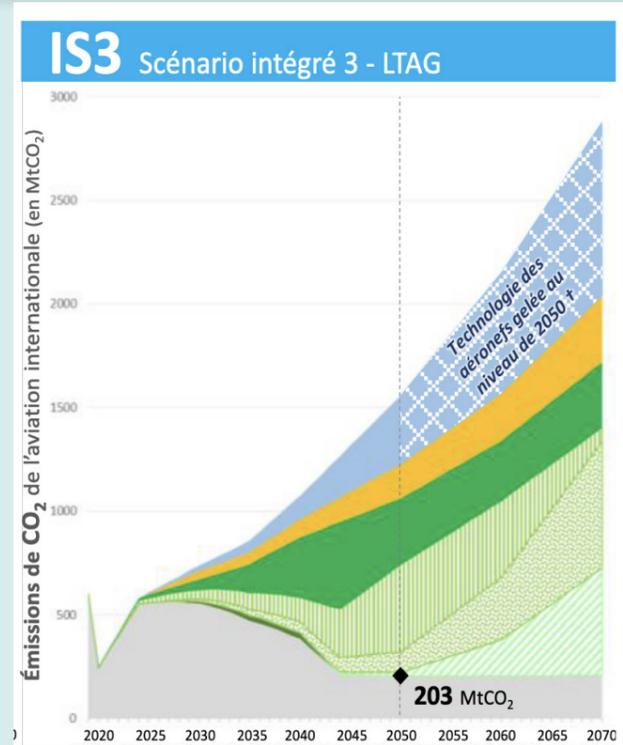
Deux différences de méthode sont à noter :

- Le scénario de base pris par le LTAG est une courbe intégrant le renouvellement des flottes à technologie 2018. Pour l'étude France, il a été jugé important de mettre en évidence l'effet d'une politique plus ou moins rapide de renouvellement des flottes «technologie 2018». Le scénario de base adopté est donc celui sans renouvellement.
- L'horizon présenté dans ce rapport est 2050, conformément à la demande de l'Etat. Le rapport LTAG présente 2 horizons 2050 et 2070.

Ces points étant précisés, les approches méthodologiques utilisées ont par ailleurs été identiques, avec le même ordonnancement des leviers de décarbonation.

Les scénarios de référence France «Action» et «Accélération» exposés dans ce rapport traduisent ce que les acteurs du transport aérien considèrent comme atteignable pour le périmètre Français considéré. Ils se positionnent globalement aux niveaux d'ambition respectifs des scénarios LTAG IS2 et IS3.

La prudence est de mise dans l'interprétation des niveaux absolus d'émissions de CO₂ après 2050 en raison des hypothèses de modélisation, p. ex., arête de la technologie des aéronefs au niveau de 2050. En vertu de ces hypothèses, les émissions de CO₂ sont plus élevées que dans un scénario de rechange (et selon une approche de modélisation) où la technologie des aéronefs continuerait de s'améliorer après 2050.



9 Cas particulier de la compensation des émissions et du prix du CO₂

L'objectif principal du secteur de l'aérien est de parvenir à une décarbonation à la source, c'est-à-dire de ne pas émettre de CO₂, grâce à l'activation des leviers préalablement présentés. Néanmoins, en parallèle de ces efforts technologiques, financiers et organisationnels visant à se décarboner, les acteurs français du secteur de l'aérien ont, de longue date, investi dans la compensation de leurs émissions pour viser une neutralité carbone de leurs activités (« net zéro carbone »).

La compensation des émissions consiste pour un acteur économique à investir dans des projets technologiques ou naturels qui permettent d'absorber du CO₂ ou de réduire les émissions d'un autre secteur économique. Ces projets peuvent être mis en œuvre sur toute la planète et sont soumis à des cahiers des charges stricts, selon différents standards, pour assurer la réalité de la diminution de CO₂.

Le recours à la compensation est un complément aux efforts de décarbonation, en attendant que l'activation des différents leviers précités porte ses effets. Elle n'a pas vocation à s'y substituer.

La compensation des émissions représente un coût non négligeable pour les compagnies, correspondant au coût de l'externalité négative de l'activité aérienne, auquel s'ajoutent d'autres dispositifs de marchés donnant aussi un prix à cette externalité. La somme de ces coûts permet de mesurer le prix d'une tonne de CO₂ émise par l'aviation, variable dans le temps et selon les périmètres géographiques concernés.

Il convient de vérifier que le cumul des dispositifs ne revient pas à faire payer plusieurs fois l'externalité au secteur, dans un contexte où il doit investir pour réduire à la source ses émissions. Enfin, ce coût de la tonne de CO₂ qui s'ajoute au prix du kérosène peut être comparé au prix des carburants d'aviation durables.

9.1 DEUX DISPOSITIFS DE COMPENSATION VISANT LES ÉMISSIONS DOMESTIQUES ET LES ÉMISSIONS INTERNATIONALES

9.1.1 Au niveau international : le dispositif mondial corsia

Ce dispositif CORSIA (Carbon offset and reduction scheme for international aviation ou Régime de compensation et de réduction de carbone pour l'aviation internationale) est le fruit des travaux de la communauté internationale réunie au sein de l'OACI.

Les compagnies effectuant des vols internationaux entre deux pays ayant souscrit au CORSIA, dont la France, sont tenues, à compter de 2021, de compenser les émissions de leurs vols internationaux dépassant la référence (« baseline ») déterminée par l'OACI : la moyenne des émissions de l'année 2019 pour la phase pilote du dispositif allant de 2021 à 2023, puis 85 % de la moyenne des émissions de 2019 pour les phases ultérieures du dispositif démarrant en 2024. Un facteur de croissance sectoriel et un facteur de croissance individuel, propre à chaque exploitant, interviennent également dans le calcul des émissions à compenser. Le CORSIA n'agit donc que sur le périmètre international. Les vols domestiques ne sont pas assujettis au CORSIA.

À titre d'illustration, cela signifie que les compagnies devront investir dans des projets tels que la création de capacité d'énergies renouvelables (éoliennes, solaires, hydraulique, etc.) de reforestation ou d'efficacité énergétique. L'OACI a fixé des exigences élevées de qualité environnementale des projets pouvant être sélectionnés. Les programmes et les unités de compensation éligibles font l'objet d'un examen et d'une validation préalable par l'OACI précisant les critères environnementaux, sociaux, de pérennité et de transparence justifiant cette éligibilité. Le prix de la tonne de CO₂ compensée via le dispositif Corsia a été estimé à 5€ en 2025 augmentant progressivement jusqu'à 40€ en 2050.

9.1.2 Au niveau français : le dispositif français de compensation des émissions des vols domestiques

Prévu par la loi « Climat et Résilience » d'août 2021 (Article 147) et entré en vigueur par un décret d'avril 2022, ce dispositif impose aux compagnies aériennes opérant des liaisons françaises domestiques de compenser leurs émissions à compter de 2022, avec une montée en puissance progressive sur 3 ans du dispositif.

Ce dispositif coûtera environ 45M€ aux compagnies aériennes assujetties (cette estimation part de l'hypothèse que les vols outre-mer ne sont pas assujettis).

Le Gouvernement a fixé des règles strictes aux projets de compensation et prévoit un recours à des projets situés sur le territoire européen, afin de garantir l'excellence environnementale de ces projets. En particulier, le recours à des standards de qualité garantissant le caractère additionnel de la compensation. Les projets du label "Bas Carbone", créé par l'État pour contribuer aux engagements climat de la France en participant au financement de projets de réductions d'émissions de gaz à effet de serre, répondent à ces règles et sont réputés éligibles. Ce dispositif contribue ainsi à faire émerger un marché français et européen de la compensation avec exigences environnementales élevées et au niveau des meilleurs standards internationaux. Ces règles pourront s'appliquer aux compensations d'acteurs d'autres secteurs d'activité, non assujettis de manière obligatoire à la compensation de leurs émissions.

Ces deux dispositifs réglementaires de compensation illustrent comment le secteur de l'aérien prend pleinement en considération ses effets sur le climat sur les actions concrètes mises en œuvre, en complément des actions de réduction à la source des émissions. Les compagnies Air France et Easyjet compensaient d'ailleurs déjà l'intégralité de leurs émissions domestiques France avant l'adoption de cette réglementation. Comme rappelé précédemment, il est notable que ces réflexions aient lieu aussi dans des instances internationales, participant donc à la diffusion de cette culture environnementale à l'échelle de la planète.

Ces efforts de compensation consentis pour viser la neutralité carbone doivent également être pris en compte dans la mesure de la somme de coûts et investissements requis pour décarboner le secteur.



9.2 D'AUTRES MÉCANISMES S'AJOUTENT ET DONNENT UN PRIX AUX ÉMISSIONS DE CO₂

D'une part, le système européen d'échange de quotas d'émissions carbone (EU ETS) n'est pas un régime de compensation mais un marché carbone où les compagnies aériennes ont l'obligation d'acheter des « permis à polluer » ou quotas d'émissions carbone correspondant aux émissions de CO₂ générées par leur activité. Ce système donne un prix à l'externalité négative de l'activité aérienne du fait de ses émissions de CO₂, payé par toutes les compagnies assurant des liaisons intra-européennes, qu'elles soient domestiques ou internationales.

Le paiement de ce prix est obligatoire. Néanmoins, à ce jour, les compagnies bénéficient de « quotas gratuits », soit autant de tonnes d'émissions pour lesquelles elles n'ont pas à payer le prix du carbone correspondant. Les recettes récoltées par les enchères de quotas carbone sont réparties entre les États européens, et l'État français décide de leur affectation interne nationale.

Ce système de quotas gratuits avait été mis en place à titre provisoire. La récente révision de la directive européenne ETS, qui a fait l'objet d'un accord interinstitutionnel européen en décembre 2022, prévoit la disparition progressive des quotas gratuits à partir de 2024 pour une suppression complète en 2026. A l'heure actuelle, les compagnies « gérées par la France » ayant opéré des vols internationaux depuis la France vers un autre pays de l'EEE ont payé en 2019, au titre de ce marché européen du carbone, un total estimé à 51 M€⁴¹, auquel s'ajoutent 20 % de TVA et les frais bancaires. Cela représente 50 % du coût qui aurait dû être payé au total sans les quotas gratuits. Ainsi, une fois les quotas gratuits supprimés, le coût du dispositif EU ETS pour les vols internationaux intra-UE sera le double de celui d'aujourd'hui, à coût du quota stable.

D'autre part, un projet de directive relative à la taxation de l'énergie prévoit que le niveau de taxation du kérosène destiné aux vols intra-UE augmenterait graduellement sur une période de 10 ans pour rejoindre le niveau de taxation de l'essence du transport routier. Ce projet en cours de négociation doit recueillir l'unanimité des États-membres.

Avec la présentation de ces dispositifs de compensation et de marché qui donnent un prix à l'externalité, il apparaît que les vols domestiques français sont soumis à la fois au dispositif de compensation français des émissions et à l'EU-ETS.

Recommandation

Prendre en compte l'effet cumulé des dispositifs et éviter que certains vols paient plusieurs fois l'externalité, dans un contexte où le secteur aérien doit conserver des marges de manœuvre financières pour activer les leviers de réduction des émissions à la source.

10 Nécessaire soutenabilité financière de la décarbonation du secteur aérien

La filière projette des scénarios de décarbonation progressive atteignant 80 % à 90 % à horizon 2050 avec des émissions résiduelles susceptibles d'être totalement compensées à cette date sur les périmètres France et international, permettant d'atteindre le net zéro carbone.

Cependant, comme explicité dans les chapitres ci-dessus, cette décarbonation du secteur aérien nécessite des investissements massifs de la part des acteurs industriels afin de permettre le développement des technologies nécessaires tout comme la disponibilité des carburants aéronautiques durables (CAD) qui se traduiront en coûts supplémentaires pour les compagnies aériennes et leurs passagers. Les coûts réglementaires relatifs à la taxation ou à la compensation du CO₂ viendront s'y ajouter. Ces coûts seront répercutés sur le prix des billets d'avion avec un effet à la hausse d'autant plus fort que les efforts de décarbonation sont élevés.

Les graphiques ci-dessous illustrent partiellement l'impact des coûts de la décarbonation sur les prix des billets d'avion (prix des CAD et coût du CO₂). Il s'agit donc d'une vision minorant l'impact financier dès lors qu'il n'inclut pas l'acquisition des nouvelles générations d'avion, la mise en place des dispositifs d'amélioration des opérations en vol et au sol, et l'adaptation des aéroports aux nouvelles énergies.

La question de la soutenabilité financière de la décarbonation par les acteurs économiques du secteur se pose donc. Les pouvoirs publics doivent assurer une juste répartition de l'effort financier au sein de la chaîne de valeur de l'aérien et que l'ensemble du secteur peut au global consentir ces efforts. Le transport aérien est en effet indispensable au fonctionnement de l'économie française afin de satisfaire la continuité territoriale ainsi que les besoins de mobilité des citoyens.

Il importe en conséquence de calibrer soigneusement le degré d'intervention et de soutien public permettant de préserver des possibilités de voyager à bon escient. De la même manière, l'État se devra de veiller à préserver une équité des conditions de concurrence avec les transporteurs de pays tiers. Cette équité pourra se réaliser soit au travers de l'imposition de mesures concomitantes à l'échelle mondiale, soit au travers de la prise en charge par l'État d'une part adaptée du coût de la décarbonation afin de préserver l'équilibre concurrentiel.

À défaut de soutien adéquat par les pouvoirs publics et de la préservation d'un volume d'activité suffisant, un risque d'atrophie de l'industrie aérienne et aéronautique française existe. Celui-ci entraînera soit une substitution de l'activité par des acteurs étrangers sans bénéfice pour l'environnement (« fuites de carbone »), soit l'inadéquation des services de transport de personnes et de marchandises proposés par rapport aux attentes des citoyens et au bon fonctionnement de l'économie française.

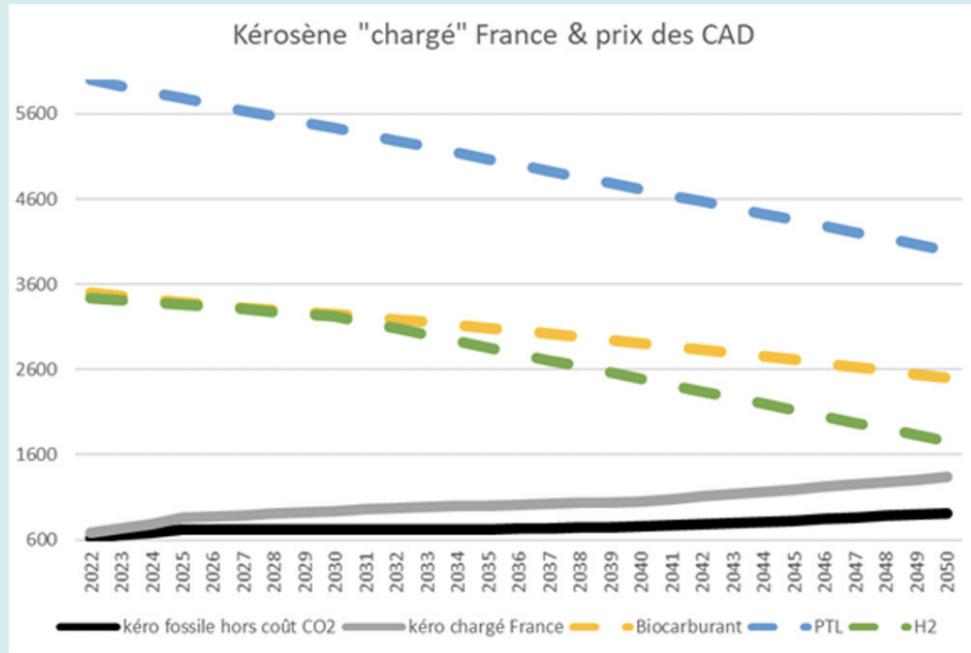
Ce scénario du pire doit être évité. Un soutien financier franc, prévisible et stable de l'État conformément aux recommandations de la présente feuille de route est donc une condition indispensable non seulement à la décarbonation de la filière aérienne française mais aussi sa permanence. Il est aussi la condition requise pour permettre à la filière française d'opérer un effet d'entraînement de la décarbonation du secteur aérien mondial, ce qui est aussi l'ambition de la filière française.

Impact minimum des trajectoires de décarbonation sur le prix des billets sur le périmètre France :

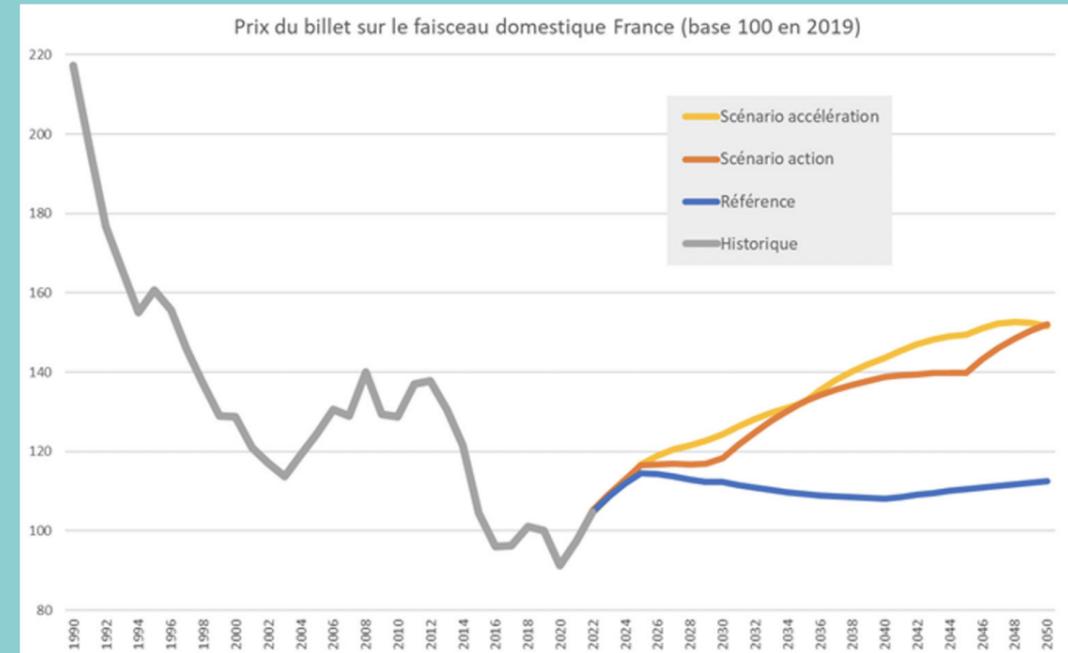
Sur la base d'un tarif moyen qui aura atteint son point bas dans les années 2015-2019, les prix devraient augmenter d'environ 10 % en monnaie constante en sortie de crise du Covid et se stabiliser sur ce niveau. Les 2 scénarios de décarbonation provoquent une hausse des prix relativement régulière et significative sur la période, pour atteindre + 50 % en 2050, soit des niveaux connus dans les années 1990 avec un impact sur le trafic conséquent de l'ordre de 25% du trafic prévu initialement. La croissance annuelle moyenne 2019-2050 serait ainsi ramenée à un maximum de 0,8% ce qui peut apparaître comme difficilement compatible avec les attentes exprimées habituellement en termes de mobilité, de continuité territoriale et de tarifs de la part des citoyens français et du tissu économique national (ambitions françaises en matière de tourisme notamment).

⁴¹ Sur la base du prix moyen constaté des quotas d'émissions en 2020 sur le marché EU ETS, pour les émissions 2018 (car les missions de l'année N font l'objet d'achat de quotas en année N+1)
https://www.eex.com/fileadmin/EEX/Downloads/EUA_Emission_Spot_Primary_Market_Auction_Report/Archive_Reports/emission-spot-primary-market-auction-report-2020-data.xlsx

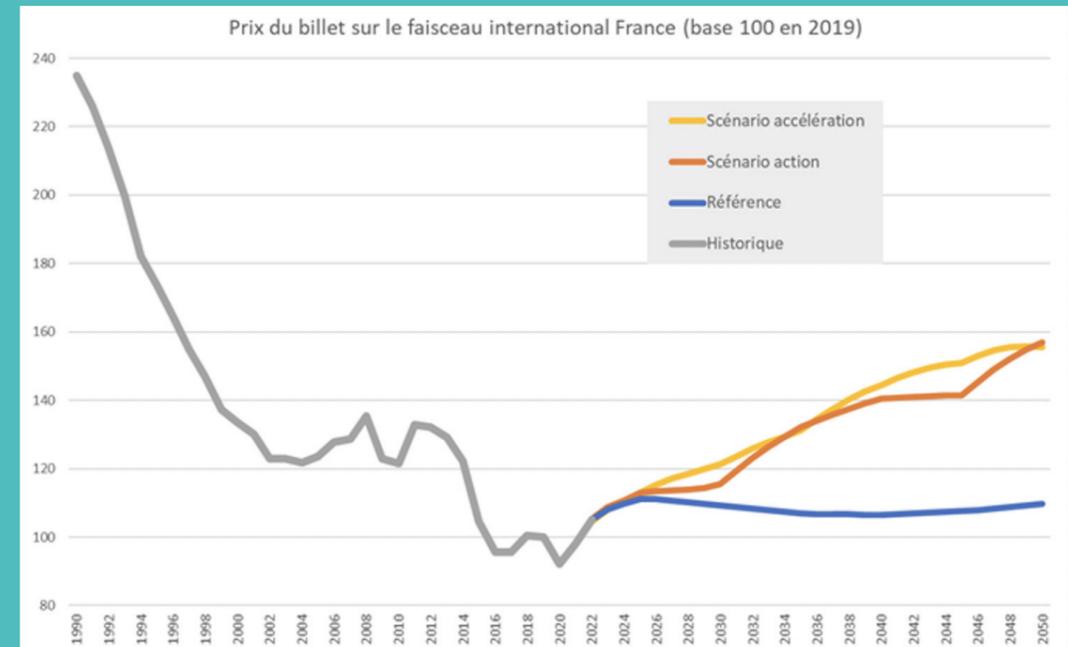
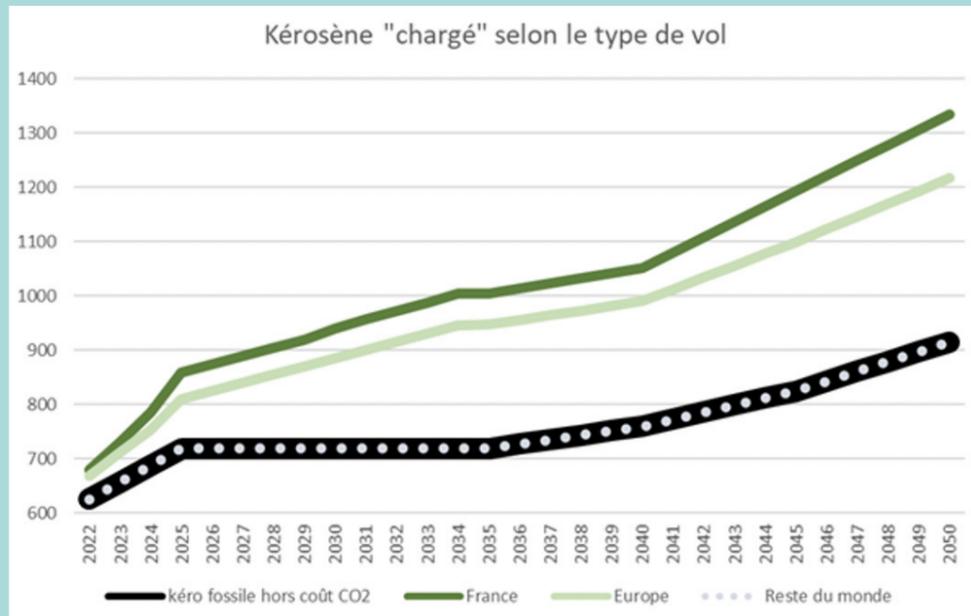
Le tableau ci-dessous présente l'évolution des coûts du kérosène (auquel sont ajoutés les coûts de la compensation et du prix du CO2) et des coûts des CAD, entre 2020 et 2050 :



Il en résulte l'effet sur le prix des billets d'avion suivant :



L'impact minimum de la décarbonation sur les prix des billets d'avion sur le périmètre international est similaire :



11 Besoins en emplois et en compétences

Le déploiement des différents leviers de décarbonation du secteur aérien nécessitera de fortes évolutions des emplois et des compétences sur toute la chaîne de valeur, qu'il s'agisse de l'industrie aéronautique, des aéroports, des compagnies aériennes ou encore des énergéticiens.

Il n'existe pas aujourd'hui de vision consolidée à l'échelle de ces différents maillons de la chaîne de valeur du nombre d'emplois supplémentaires qui devront être pourvus et des nouvelles compétences qui devront être développées à horizon 2030. Une telle vision est indispensable pour mettre en place les formations correspondant à ces compétences.

Au niveau de l'industrie aéronautique et spatiale, une étude réalisée en 2022 dans le cadre d'un engagement de développement de l'emploi et des compétence (EDEC) estime que la filière va nécessiter 60 000 emplois supplémentaires d'ici 2025, soit près de 30% de ses effectifs. La décarbonation constitue l'une des principales causes de ces besoins, comme l'illustre le graphique ci-dessous.

Le déploiement des nouveaux avions, des CAD ou encore des opérations en vol et au sol nécessitera pour l'industrie aéronautique des compétences technologiques, d'IT et de digitalisation ou encore des compétences industrielles.

Il n'existe pas encore à l'heure actuelle d'étude comparable qualifiant et quantifiant, pour les aéroports et les compagnies aériennes, les besoins en nouvelles compétences. Certains enjeux ont cependant été bien identifiés. Ainsi, le déploiement de l'avion hydrogène nécessitera une formation au risque hydrogène et à la co-activité des activités en pistes pour l'ensemble des personnels impliqués dans la gestion des opérations avions en piste, tant au niveau de l'encadrement que du personnel technique.

Il est proposé de lancer un EDEC commun à ces trois filières pour estimer l'impact du déploiement des différents leviers de décarbonation de la présente feuille de route sur les types de compétences à déployer ans chacun des secteurs, leur nombre ainsi que leur répartition par région. Une fois ce diagnostic réalisé, il sera proposé de mettre en adéquation l'offre de formations régionales avec les besoins identifiés.

Source ARTHUR HUNT <i>HR for Humans</i>	COMPÉTENCES	compétences technologiques							compétences IT et digitalisation				compétences industrielles				compétences transverses				
		résistance des matériaux/corrosion/foudrage/matériaux composites	combustion/propulsion effluents/propulsion aéroé	aérodynamique	aéroélasticité	acoustique	stockage et distribution de l'énergie à bord	électronique de puissance	systèmes et logiciels embarqués	développement logiciel	cybersécurité	technologies digitales / IA	robotique / cobotique	gestion et traitement des données (data scientists et data analysts)	méthodes / industrialisation	maintenance	qualité	Supply Chain (logistique, achats)	efficacité énergétique, bilan carbone...	plateforme programmes (MISC) / leviers / contribution de valeur/maturation	navabilité / certification
	volumétrie prévisionnelle 2025 (3 ans)	436	287	55	28	72	600	1500	6270	2300	750	510	1000	2335	4182	1500	4200	225	400	150	300
	Tension sur l'emploi	forte	mojeune	faible	faible	mojeune	forte	forte	forte	mojeune	mojeune	mojeune	forte	faible	forte	mojeune	forte	mojeune	mojeune	mojeune	forte
technologies participant à la décarbonation																					
amélioration des opérations (compagnies aériennes et aéroports) => hors scope																					
SAF																					
e carburants (intégration de CO2)																					
hydrogène et autres carburants alternatifs (ammoniac, ammonium...)																					
avion électrique																					
déplacement sans carburant au sol																					
avion hybride/ pile à combustible																					
Évolution incrémentale des moteurs (UHBR) ou nouvelles architectures (CRJ)																					
propulsion distribuée, hybridation, III																					
allègement des structures et aérodynamisme																					
optimisation ATM (descente optimisée, plan de vol optimisé...)																					
usine propre																					
usine 4.0 et digitalisation																					
recyclage																					
décarbonation de la supply chain																					
adaptation de la maintenance avion																					

Actions à mener par la filière

- Lancer un EDEC commun à toutes les filières de la chaîne de valeur (industries aéronautiques, aéroports, compagnies aériennes voire énergéticiens) pour cartographier les besoins en emplois et compétences induits par les différents leviers de décarbonation.

Proposition d'évolution des politiques publiques

- Adapter les politiques de formation en fonction des besoins en emplois et compétences identifiés



12 Annexes

12.1 ANNEXE 1 : LES EFFETS NON-CO₂ DE L'AVIATION SUR LE CLIMAT

Projet Climaviation : Nicolas Bellouin, Olivier Boucher (Institut Pierre-Simon Laplace, Sorbonne Université / CNRS), Philippe Novelli (ONERA)

1. Les effets non-CO₂

La contribution de l'aviation au réchauffement climatique est largement dominée par les émissions en vol des avions. Les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) représentaient 2,5% des émissions mondiales de CO₂ dues aux énergies fossiles en 2018. Mais les avions émettent d'autres composés qui exercent des effets dits « non-CO₂ ».

L'effet du CO₂ et les effets non-CO₂ sont en premier lieu quantifiés par leur forçage radiatif effectif. Ce forçage mesure le déséquilibre du bilan d'énergie de la Terre exercé par une contrainte extérieure et prend en compte les réponses en température et humidité atmosphériques. Le système Terre répond ensuite à un forçage radiatif effectif en ajustant sa température à la surface de façon proportionnelle à ce forçage. Un forçage radiatif positif, comme celui exercé par le CO₂, provoque un réchauffement et un forçage négatif un refroidissement.

L'effet des émissions de l'aviation sur le climat s'exerce à une échelle globale. Le fait que l'aviation émette l'essentiel de son CO₂ et des autres composés dans les zones les plus survolées ne conduit pas à un réchauffement plus important de ces zones. D'une part, parce que le CO₂ se répartit dans toute l'atmosphère, et d'autre part, pour les composés à plus courte durée de vie, il n'y a pas de lien fort entre forçage local et changement climatique locaux.

Les effets non-CO₂ incluent différentes composantes :

1) Les traînées de condensation persistantes et cirrus induits

La vapeur d'eau et les suies émises par les moteurs d'avion forment des traînées de condensation. Si l'atmosphère est suffisamment humide (sursaturée par rapport à la glace), les traînées évoluent en nuages de glace appelés cirrus induits, qui exercent un effet de serre (réchauffement) et, de jour, réfléchissent le rayonnement solaire (refroidissement). L'effet total d'un cirrus induit donné dépend des conditions atmosphériques, de la latitude, de la saison et de l'heure du vol, mais en moyenne, l'effet de réchauffement l'emporte. Les traînées persistantes et cirrus induits ne durent que quelques heures, mais ont une capacité d'absorption du rayonnement infrarouge émis par la Terre beaucoup plus importante que le CO₂, ce qui conduit à un forçage important.

2) Les perturbations de la chimie atmosphérique.

Les moteurs d'avion émettent des oxydes d'azote (NOx). Ces NOx n'ont pas d'effet direct sur le climat, mais une fois dans l'atmosphère, ils contribuent à augmenter la concentration de l'ozone à court terme et à diminuer la concentration de méthane sur le moyen terme. Ces modifications exercent un forçage car l'ozone et le méthane sont tous deux des gaz à effet de serre. L'effet réchauffant de l'augmentation de l'ozone est donc contrebalancé par l'effet refroidissant de la diminution du méthane. L'effet total résultant est aujourd'hui réchauffant, mais pourrait évoluer dans le futur jusqu'à devenir potentiellement refroidissant, en fonction des concentrations d'ozone et de méthane atmosphériques globales au moment de l'émission. De plus, l'effet dépend non seulement de la quantité de NOx émise, qui dépend des modèles d'avion, mais aussi de l'altitude, de la latitude et de la saison du vol.

3) Les interactions particules-nuages

Les particules de combustion du carburant (suies, sulfates, et nitrates) peuvent modifier les propriétés et l'évolution des nuages dans l'atmosphère. Ces modifications exercent un forçage car les nuages jouent un rôle très important dans le bilan d'énergie de la Terre. L'effet global reste inconnu sans qu'il soit possible de déterminer aujourd'hui s'il conduit à un réchauffement ou un refroidissement.

4) Les interactions particules-rayonnement

Les particules de combustion du carburant reflètent et absorbent le rayonnement solaire. Le forçage est dominé par l'effet des sulfates, qui est refroidissant.

5) Les émissions de vapeur d'eau dans la stratosphère

La vapeur d'eau émise par les avions volant dans la stratosphère, qui est normalement très sèche, peut y demeurer plusieurs mois. La fraction du trafic aérien mondial volant dans la stratosphère est mal connue, mais entre 30 et 60% des émissions de l'aviation se font dans la partie basse de la stratosphère. Cela exerce un forçage qui conduit à un réchauffement car la vapeur d'eau est un gaz à effet de serre.

2. Quantification du forçage radiatif des effets non-CO₂ et incertitudes

L'estimation la plus récente du forçage du CO₂ et des effets non-CO₂ et de leurs incertitudes, a été faite dans l'article de Lee et al. (2021). Ce travail est une compilation et une analyse statistique de nombreuses estimations par des modèles de climat publiés dans la littérature scientifique, dans une démarche similaire à celle utilisée pour les rapports du GIEC. Les résultats sont normalisés sur une année de référence : 2018. Les différents forçages radiatifs effectifs liés à l'aviation prennent en compte le cumul de toutes les émissions de l'aviation commerciale, avec leur durée de vie propre, entre 1940 (début de l'aviation) et 2018.

Les résultats de l'analyse de Lee pour l'année 2018 sont présentés dans la Figure 1. Le forçage radiatif effectif total de l'aviation est positif à environ 100 mW m⁻² [intervalle de confiance 5 à 95% : 55 à 145 mW m⁻²]. Il conduit donc à un réchauffement. Les effets non-CO₂ représentent les deux tiers du forçage total. Le CO₂ émis par l'aviation exerce environ 2% du forçage radiatif dû à l'ensemble du CO₂ anthropique. Mais la somme des forçages CO₂ et non CO₂ représente 3,5% du forçage anthropique total (incluant tous les gaz à effet de serre, l'impact des particules sur le rayonnement et les nuages, le changement d'utilisation des sols, etc.).

Les forçages de l'aviation les plus forts sont exercés, en ordre d'importance, par les cirrus induits (57.4 [17 à 98] mW m⁻²), le CO₂ (34.3 [28 à 40] mW m⁻²), et les émissions de NOx (17.5 [0.6 à 29] mW m⁻²). Les forçages dus aux interactions particules-rayonnement et à la vapeur d'eau émise dans la stratosphère sont probablement faibles. Comme indiqué plus haut, il n'est pas encore possible de quantifier le forçage dû aux interactions particules-nuages. Il est cependant plausible que ce forçage soit d'un ordre de grandeur similaire aux forçages par les cirrus ou le CO₂. Il est peut-être négatif, ce qui conduirait à un effet refroidissant qui compenserait une partie du réchauffement par les forçages cités plus hauts.

Les incertitudes sur les effets non-CO₂, et en conséquence sur le forçage total, demeurent très importantes. Le forçage par le CO₂ est le moins incertain car il n'implique pas de réactions chimiques et est directement proportionnel au kérosène consommé. Les effets non-CO₂ ont un forçage très incertain car les différents termes impliquent des mécanismes physiques et chimiques complexes et parfois mal connus, avec des compensations subtiles entre mécanismes aux forçages souvent antagonistes (réchauffants et refroidissants). Certains effets non-CO₂ sont observables, mais la quantification de leur forçage radiatif global n'est faisable que dans des modèles climatiques. Ces modèles sont limités dans leur capacité à représenter fidèlement les mécanismes non-CO₂, ce qui introduit des incertitudes supplémentaires. Des recherches scientifiques en cours visent à réduire les incertitudes liées aux effets non-CO₂.

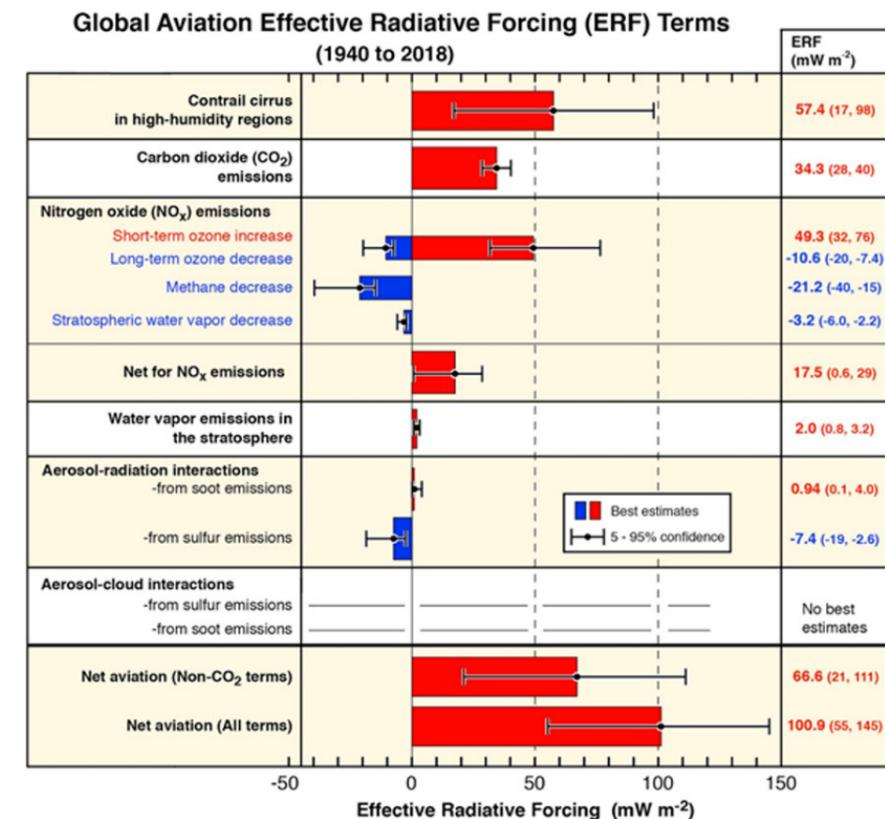


Figure 1

Estimation des termes du forçage radiatif effectif (ERF) de l'aviation, en $mW m^{-2}$, entre 1940 et 2018. Le forçage associé aux émissions d'oxydes d'azote (NOx) est décomposé en ses différentes composantes, qui sont ensuite regroupées pour donner un forçage net. Les barres colorées donnent l'estimation centrale. Les termes réchauffants sont colorés en rouge, et les termes refroidissants en bleu. Les barres d'erreur indiquent l'intervalle de confiance 5 à 95%. La colonne de droite donne les valeurs numériques correspondant aux estimations centrales et intervalles de confiance. Les connaissances scientifiques actuelles ne permettent pas de quantifier l'ERF associé aux interactions particules-nuages (aerosol-cloud interactions). Figure adaptée de la Figure 3 de Lee et al. (2021).

3. Comparaison de l'impact climatique des effets CO₂ et non-CO₂

La quantification et la comparaison des impacts climatiques respectifs du CO₂ et des effets non-CO₂ ne se limitent pas à l'évaluation de leurs forçage radiatifs respectifs et de leurs incertitudes. Il faut aussi prendre en compte les échelles de temps très différentes associées aux différents effets.

Le CO₂ a les échelles de temps les plus longues. L'émission d'une tonne de CO₂ fossile provoque une augmentation initiale de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère, et environ 30% de cette augmentation persiste après 100 ans. La réduction du méthane due aux NOx émis par l'aviation a une échelle de temps intermédiaire car la durée de vie d'une perturbation du méthane atmosphérique est de 12 ans. Enfin, les effets induits sur l'ozone et les nuages sont associés à des échelles de temps courtes car les NOx, les particules et la vapeur d'eau disparaissent de l'atmosphère après quelques semaines lorsqu'ils sont émis à l'altitude de croisière des avions. Il faut cependant noter que même une courte perturbation de l'énergie introduite dans le système climatique a un impact durable sur le climat, car l'océan absorbe cette perturbation avant de la restituer à l'atmosphère sur plusieurs décennies. Mais une réduction des émissions de NOx et de particules entraînerait une réduction quasi-immédiate de la plupart de leurs forçages radiatifs associés.

Des métriques climatiques ont été créées pour estimer l'impact climatique futur d'un vol contemporain tout en prenant ces différentes échelles de temps en compte. Le pouvoir de réchauffement global (PRG ; Global Warming Potential, GWP, en anglais), mesure le forçage radiatif exercé par une émission ponctuelle initiale sur une période future d'une durée donnée. Le PRG d'un kg de NOx ou des cirrus induits rapporté à un 1 kg de CO₂ peut être alors comparé à celui d'un kg de CO₂. Une métrique similaire est le pouvoir de changement global de température (PGT ; Global Temperature change Potential, GTP, en anglais), qui mesure la variation de la température moyenne à la surface à une certaine échéance après une émission ponctuelle initiale. D'autres types de métriques, moins utilisées pour l'instant, tentent de réunir les coûts des impacts de l'aviation sur le climat et la qualité de l'air dans une quantité intégrée (par exemple Grobler et al. 2019). Il a été souvent proposé par le passé d'utiliser le rapport entre le forçage radiatif total de l'aviation et le forçage radiatif dû uniquement au CO₂ de l'aviation. Ce rapport est appelé Radiative Forcing Index (ou RFI). Les estimations de forçage par Lee et al. (2021) discutées précédemment entraînent un RFI de 2,9. Mais le RFI cumule les effets des émissions passées, et n'est donc pas adapté pour comparer les effets climatiques des émissions actuelles ou évaluer des options technologiques ou opérationnelles futures.

Le choix d'une métrique climatique donnée, et le choix de l'échéance sur laquelle cette métrique est calculée, sont des choix qui relèvent à la fois du scientifique et du politique. L'UNFCCC utilise le PRG avec une échéance de 100 ans pour comparer les émissions de gaz à effet de serre par les activités à la surface. Le PRG100 est proche des mesures de rentabilité⁴³ pour certains gaz (par exemple, le méthane), bien que cela varie dans le temps (Tanaka et al. 2021). Plus l'échéance choisie est courte (20 ou 50 ans par exemple), plus la fraction de l'impact climatique du CO₂ qui est négligée est importante. Il faudrait donc que l'aviation soit à un stade avancé de décarbonation, au moins dans certaines régions, pour justifier l'utilisation d'une échéance plus courte que les 100 ans utilisés par l'UNFCCC pour les émissions de surface d'autres secteurs économiques.

La Figure 2

compare les facteurs multiplicatifs du CO₂ associés au RFI et à différents choix de métriques climatiques. Les métriques conduisent à des facteurs beaucoup plus faibles que le RFI sauf si des échéances beaucoup plus courtes que 50 ans sont choisies. Le PRG et PGT à un horizon temporel de 100 ans entraînent un facteur multiplicatif de 1,7 et 1,1, respectivement, pour calculer les émissions équivalentes des différentes perturbations de l'aviation.

Il est à noter que le rapport entre l'effet du CO₂ et les effets non-CO₂ va varier fortement selon les types d'avion et les vols qu'ils effectuent. Ainsi un avion régional à hélice qui vole à une altitude plus faible aura une probabilité très faible de former des traînées de condensation. A l'inverse, un avion à turboréacteur volant à une altitude où l'atmosphère est suffisamment froide et humide formera des traînées. Pour les NOx, l'efficacité des émissions à produire de l'ozone dépend fortement de l'altitude d'injection de ces émissions. Le facteur multiplicatif à prendre en compte n'est donc pas le même suivant que l'on s'intéresse à l'impact global de la flotte ou à la caractérisation de l'impact d'un vol.

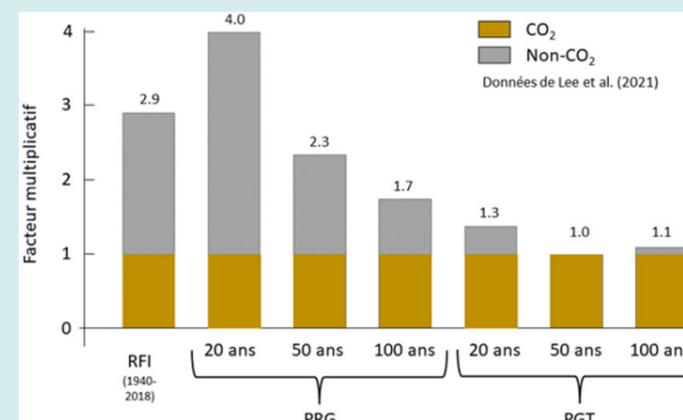


Figure 2

Comparaison des facteurs multiplicatifs à appliquer aux émissions de CO₂ de l'aviation pour prendre en compte les effets non-CO₂, calculés à partir des estimations de Lee et al. (2021). Les facteurs présentés sont associés au Radiative Forcing Index (RFI) et à deux métriques climatiques, le Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) et le Pouvoir de changement Global de Température (PGT). Le PRG et le PGT sont calculés sur des échéances de 20, 50, et 100 ans.

4. Interactions entre solutions de réduction des émissions de CO₂ et des effets non-CO₂

Jusqu'à présent, les solutions technologiques et opérationnelles pour réduire l'impact climatique de l'aviation ont eu pour objectif de réduire la consommation de carburants des avions et donc leurs émissions de CO₂. L'importance potentielle des effets non-CO₂ conduit aujourd'hui à rechercher également des solutions pour diminuer leur impact. Il existe cependant des interactions entre émissions de CO₂ et effets non-CO₂ et les solutions de minimisation des uns peuvent augmenter les autres.

L'amélioration de l'efficacité énergétique des avions peut réduire certains effets non-CO₂ pour un vol donné. Pour les technologies futures qui maintiennent l'indice d'émission constant⁴⁴, la réduction de la consommation de carburant peut conduire à une réduction des émissions de NOx. D'autres technologies pourraient être potentiellement plus émettrices de NOx. L'impact sur la formation des traînées pourrait être limité.

L'utilisation de nouveaux combustibles à empreinte carbone réduite sur leur cycle de vie aura des effets variés sur les effets non-CO₂. Les carburants d'aviation durables (CAD ou Sustainable Aviation Fuels-SAF en anglais)⁴⁵ ont l'avantage de ne contenir que peu ou pas de composés aromatiques et de soufre. Ils produisent donc moins de particules de suie et pas de sulfates. Cela réduira probablement les forçages associés aux interactions entre particules et rayonnement et entre particules et nuages. Mais la réduction des émissions de suies n'entraînera pas l'absence de traînées de condensation, qui peuvent se former aussi sur des particules déjà présentes dans l'atmosphère ou sur des particules secondaires formées par la chimie dans le panache du moteur. Si ces particules sont plus petites et/ou moins nombreuses que les suies formées par la combustion du kérosène, les traînées générées pourraient avoir des propriétés climatiques plus favorables que dans le cas du kérosène. Cependant l'influence potentielle des émissions secondaires est encore mal connue et fait actuellement l'objet de recherches. Les CAD ne devraient en revanche pas entraîner un changement notable des émissions de NOx. L'impact de l'hydrogène dépendra de la technologie utilisée : combustion directe ou pile à combustible. Dans un premier temps, l'émergence de la pile à combustible, encore incertaine pour les avions commerciaux, ne concernera que des avions de taille réduite (commuters et éventuellement régionaux). La combustion de l'hydrogène a l'avantage de n'émettre ni CO₂, ni suies. Mais elle émet 2,5 fois plus de vapeur d'eau que celle du kérosène pour un même dégagement de chaleur. L'impact sur les émissions de NOx est encore incertain mais ces émissions pourraient être plus faibles que dans le cas du kérosène. L'absence de suies ne garantit pas l'absence de formation de traînées de condensation par un avion à hydrogène, pour les mêmes raisons que celles discutées précédemment pour les CAD.

⁴³ Où rentabilité est définie dans le sens de l'article 3 de l'UNFCCC

⁴⁴ C'est-à-dire rapporté au débit de combustible. Il est à noter que l'augmentation de l'efficacité thermodynamique des turbomachines tend à créer des conditions plus favorables à la production de NOx, nécessitant un travail particulier sur la conception des chambres de combustion pour contrôler ces émissions

⁴⁵ Biocarburants ou électro-carburants

faire des choix technologiques dont le résultat est un compromis entre consommation, opérabilité, particules, NOx, bruit... Réduire l'ensemble de ces paramètres simultanément reste extrêmement difficile. La connaissance fine de l'impact de chacune de ces émissions est donc critique afin de faire les choix judicieux de technologies pour le futur.

Finalement, des solutions basées sur la compensation des émissions de CO₂ n'auront pas d'impact sur les effets non-CO₂.

5. Références

- Boucher, O., A. Borella, T. Gasser and D. Hauglustaine, On the contribution of aviation to the CO₂ radiative forcing of climate, *Atmospheric Environment*, 267, 118762, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118762>, 2021.
- Lee, D.S., D.W. Fahey, A. Skowron, M.R. Allen, U. Burkhardt, Q. Chen, S.J. Doherty, S. Freeman, P.M. Forster, J. Fuglestvedt, A. Gettelman, R.R. De León, L.L. Lim, M.T. Lund, R.J. Millar, B. Owen, J.E. Penner, G. Pitari, M.J. Prather, R. Sausen, L.J. Wilcox, The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018, *Atmospheric Environment*, 244, 117834, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>, 2021.
- Grobler, C., P. Wolfe, K. Dasadhikari, I. Dedoussi, F. Allroggen, R.L. Speth, S.D. Eastham, A. Agarwal, M.D. Staples, J. Sabnis, & S.R.H. Barrett, Marginal Climate and Air Quality Costs of Aviation Emissions, *Environmental Research Letters*, 14, 114031, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4942>, 2019.
- Tanaka, K., O. Boucher, P. Ciais, D. Johansson, J. Morfeldt, Cost-effective implementation of the Paris Agreement using flexible greenhouse gas metrics, *Science Advances*, 7, eabf9020, <https://doi.org/10.1126/sciadv.abf9020>, 2021.

12.2 ANNEXE 2 : PRÉCISIONS CONCERNANT L'AXE « GARANTIR LA COMPÉTITIVITÉ ET LA RÉACTIVITÉ DE LA FILIÈRE « INDUSTRIE AÉRONAUTIQUE »

Excellence Industrielle

La maturité globale de la supply chain Aéronautique en matière d'excellence opérationnelle reste très hétérogène. Cette filière reste à améliorer en terme de standards industriels afin d'atteindre les meilleures industries au niveau international (OTD > 95% , OQD < 5 00ppm) bien que l'industrie ait investi au travers des programmes de soutien aux PME « Performances Industrielles » pendant 8 ans.

Une initiative est en cours de préparation sous l'impulsion du GIFAS avec les grands groupes de la filière (Airbus, Safran, Dassault Aviation, Thales) pour harmoniser les processus d'excellence opérationnelle pour la filière aéronautique française visant à :

1. définir des standards communs d'excellence opérationnelle,
2. évaluer les fournisseurs de la supply chain selon un référentiel unique et identifier les écarts de processus d'excellence opérationnelle,
3. simplifier les audits fournisseurs selon ce référentiel filière (avec pour effet, la limitation des audits clients pour la supply chain),
4. accompagner les fournisseurs qui sont à des niveaux de maturité insuffisants pour les conduire à un niveau minimum d'excellence opérationnelle pour être un fournisseur durable dans la supply chain aéronautique.

Le GIFAS structure, coordonne et prépare le programme AERO EXCELLENCE avec un Directeur de projet dédié et en s'appuyant sur les organisations des maîtres d'œuvre ainsi que sur l'organisme SPACE pour la partie déploiement opérationnel.

Les trois premières étapes sont financées par le GIFAS. L'étape 4 de montée en maturité des PME de la filière doit faire l'objet d'un soutien financier pour sa mise en œuvre au niveau de l'Etat, des régions ou par prise en charge directe de l'entreprise.

Durée estimée du programme : 5 ans.

Le montant estimé des phases 1, 2, 3 pris en charge par le GIFAS et les donneurs d'ordre est de : 2M€.

Montant estimé du volet 4 du programme nécessitant un support en financement : 10M€ (400 entreprises x 25K€).

Industrie 4.0

Le programme Industrie du futur (IDF) ainsi que le Fonds de Modernisation ont permis d'impulser une dynamique de modernisation des équipements industriels des PME et ETIs de la filière principalement sur deux axes :

- Modernisation, automatisation, robotisation des moyens industriels permettant d'accroître la productivité et raccourcir les cycles de production,
- Digitalisation des process industriels par l'introduction de nouveaux outils (Modernisation d'ERP-Entreprise Ressources Planning, implantation de MES (Manufacturing Execution System), numérisation des suivis documentaires de la production à la livraison...)

Ces dispositifs ont permis d'amorcer une feuille de route vers une industrie 4.0 mais nécessitent des soutiens complémentaires à prendre en compte pour les fournisseurs de la supply chain des futurs avions :

- Actions complémentaires Industrie du Futur
- Mise en œuvre de la continuité numérique (programme Airbus DDMS)

265 entreprises TPE/PME/ETI sont accompagnées par le programme IDF qui est à considérer comme un programme d'amorçage pour les TPE et PME.

Le coût du programme en cours est de 23M€ porté pour 50% par état/régions, 37% par le GIFAS et les PME.

Nous estimons en 1ère approche qu'un complément de programme du même ordre est à considérer pour dépasser cette phase d'amorçage avec une incitation à l'investissement (type AAP Fonds de modernisation).

Transition environnementale des usines

Les usines de la filière aéronautique doivent se transformer afin d'améliorer leur efficacité énergétique, leur efficacité matière, et de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. Une évaluation de la maturité environnementale des PME et équipementiers du GIFAS a été faite début 2022, sur l'ensemble des thématiques environnementales notamment sur la partie décarbonation. La démarche est établie, mais l'essentiel du chantier reste à réaliser au sein de la supply chain.

La crise de l'énergie est venue rappeler la nécessité d'une démarche de sobriété, les entreprises positionnées sur les opérations de fonderie, forge, traitement de surface et peinture étant les plus exposées. L'ensemble de la chaîne de valeur doit se transformer. Le plan de modernisation de la filière lancé en 2020-2021 avait un volet environnemental (réduction émissions CO₂, économie circulaire, substitution des substances visées par le règlement REACH) et près d'un tiers des entreprises lauréates avait notamment fléchi cette thématique.

Le plan AERO-EXCELLENCE du GIFAS, en cours de lancement, a un volet Environnement qui doit permettre d'évaluer l'évolution de la maturité des entreprises sur le sujet et de réaliser les actions de sensibilisation et de diagnostic, conduisant à des plans d'actions avec d'éventuelles décisions d'investissement par les entreprises.

Usines cyber protégées

La transformation digitale au sein des entreprises et inter-entreprises de la filière accroît le risque cyber global de la supply chain aéronautique.

Les fournisseurs devront renforcer la cybersécurité de tout leur écosystème et mettre en œuvre des programmes spécifiques « cyber Industrielle » reposant sur les piliers suivants :

- Diagnostic global de la chaîne des fournisseurs et des entreprises pour établir une vision globale du niveau de maturité cyber,
- Identification des fournisseurs critiques pour améliorer leur niveau de cybersécurité,
- Amélioration incrémentale de la cybersécurité en mettant en œuvre les solutions de protection,
- Formation des dirigeants et des équipes ciblées sur les domaines à risque.

Le déploiement du programme AirCyber impulsé par le GIFAS a permis d'effectuer une 1ère évaluation de la supply chain recouvrant 224 fournisseurs de profil PME. Il ressort que :

- Seulement 10% des PME ont un niveau de protection cyber considéré comme un minimum requis (bronze),
- Le temps et le coût moyen pour soutenir les investissements requis et atteindre le niveau bronze est estimé à 30k€ sur 3 ans.

Durée estimée d'un plan de soutien pour que la supply chain atteigne un niveau minimum requis

« bronze » : 3 ans.

Montant d'un programme d'accompagnement de soutien à l'investissement cyber hors investissements hardware et conseil : 8M€.

Robustesse des approvisionnements matière - Souveraineté

La filière aéronautique a identifié deux priorités fortes d'approvisionnement pour lesquelles un enjeu de souveraineté est à considérer :

- Le Titane compte tenu des volumes utilisés dans l'aéronautique sur des composants critiques ainsi que ses enjeux de bonne tenue mécanique, de densité faible le rendant très compétitif et/ou difficilement remplaçable sans impact,
- Les superalliages pour leurs caractéristiques mécaniques et les applications dans les futurs aéronefs.
- Pour autant, il ne faut pas négliger d'autres enjeux tels que :
- Les matériaux indispensables à la transition écologique du transport aérien avec notamment les matériaux chauds à base Nickel et les matériaux magnétiques, isolants et les substituts aux terres rares.
- Les composants électroniques dont les cycles de vie sont très inférieurs à ceux des produits aéronautiques ce qui induit des problèmes d'obsolescence. La mise en œuvre d'une nouvelle approche par le développement et l'intégration de composants Open Hardware dans le cadre de travaux R&T permettrait de jeter les bases d'une reprise en main de la souveraineté sur des nouveaux programmes aéronautiques.

Sur les sujets Titane et Superalliages, 4 leviers principaux sont à activer : soutien aux acteurs industriels français, intégration des briques technologiques manquantes, sécurisation de nouvelles sources, valorisation d'une filière de recyclage. Ceci en protégeant la compétitivité technico économique du produit final.

Pour le volet technologique, l'investissement RetD est estimé à plus de 100M€ sur 3 ans.

Pour les volets stocks et investissements industriels, le projet nécessite des analyses complémentaires afin de disposer d'un chiffrage des besoins.

12.3 ANNEXE 3 : REVUE DE LITTÉRATURE DES GAINS D'ÉMISSIONS DU LEVIER OPÉRATIONS EN VOL ET AU SOL

1. Revue de littérature des gains d'émissions

La mesure des gains d'émissions permis par le levier opérations est complexe. La revue de littérature ci-dessous met en lumière une fourchette de gains possibles selon les leviers activés et conforte les hypothèses de modélisation retenues pour le présent exercice de feuille de route de décarbonation.

Les leviers ont été classés par famille selon les lignes du tableau suivant :

#		Court/moyen-courrier	Long courrier
1	Vol parfait	14% [1]	5% [2]
2	Inefficacité trafic aérien	6% [3]	
3	Complément avion	6% [1]	
4	Roulage N-1 moteur	2% [4]	
5	Emport carburant optimisé	1% [6]	
6	Tankering	4,7% [7]	
7	Vent		6% [5]

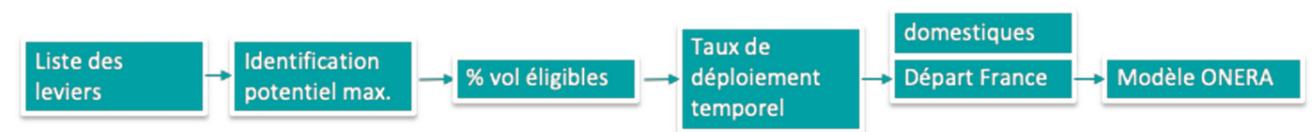
Attention toutefois, les gains exposés à chaque ligne ci-dessus ne sont pas toujours cumulables. De plus, certains leviers sont déjà partiellement activés à ce jour si bien que les gains d'émission futurs constituent seulement une partie de ces gains maximum théoriques.

Pour les courts et moyens courriers, on peut calculer le potentiel de 2 manières, soit avec la ligne 1, soit en sommant les lignes 2 et 3. En effet, l'estimation de 6 % d'Eurocontrol ne prend pas en compte les optimisations des avions (régime moteur, montée continue jusqu'au TOD, descente en Idle). Puis on ajoute les lignes 4, 5, 6. Pour le long courrier, les vents ont une part importante.

- [1] Prats Xavier, Dalmau Ramon et Barrado Cristina Identifying the Sources of Flight Inefficiency from Historical Aircraft Trajectories
 [2] Dalmau Ramon et Prats Xavier How Much Fuel and Time can be Saved in a Perfect Flight Trajectory?
 [3] Eurocontrol Performance Review Commission, 2019
 [4] Deonandan Indira et Balakrishnan Hamsa Evaluation of Strategies for Reducing Taxi-out Emission at Airports
 [5] Currie Charlotte, Marcos Andres et Turnbull Oliver Wind Optimal Flight Trajectories to Minimise Fuel Consumption within a 3 Dimensional Flight Network
 [6] Ryerson Megan S. [et al.] Landing on Empty: Estimating the Benefits from Reducing Fuel Uplift in US Civil Aviation
 [7] Eurocontrol Aviation Intelligence Unit Fuel Tankering: Economic Benefit and Environmental Impact

2. Gains potentiels d'émissions retenus

Après avoir dressé la liste exhaustive des leviers d'actions à mener, le taux d'implémentation a été détaillé selon le schéma ci-dessous :



Ainsi, pour chaque levier, un potentiel théorique maximal est identifié, par rapport à un niveau sans aucune implémentation.

Puis une portion 3 de vols éligibles au levier est déterminée, tenant en compte des interactions avec le système aéroportuaire (par exemple le nombre limité de pistes, le nombre de contrôleurs, etc).

Une séquence de déploiement est ensuite projetée par année, partant du taux d'adoption en 2018 et allant jusqu'à 100 % en 2050. Pour les leviers dépendant de la distance parcourue, un ajustement est effectué selon que les vols sont domestiques ou bien départ France. On obtient alors une quantification des gains d'émission, en prenant pour référence l'année 2018, qui est intégrée dans le modèle ONERA.

Sur le périmètre France :

	Domestique base 2018 - gains d'émissions en %									
	max	%vols	2018	2022	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Politiques et procédures d'exploitation	4,4	86	0,0	0,4	1,0	1,8	2,3	2,8	2,9	2,9
Réaménagement Air Space et procédures ATM	4	90	0,0	0,4	1,1	1,8	1,8	2,7	2,7	3,6
Optimisations temps réel en vol et approches optimisée	4,4	84	0,0	0,0	0,2	0,8	1,0	1,2	1,4	2,0
Optimisations avions	1	100	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Nouvelles procédures	5	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Opération sol	0,2	100	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Totaux			0,0	0,8	2,4	4,6	5,6	7,4	7,9	9,6

Ainsi, si uniquement les mesures d'amélioration des opérations vol et sol étaient mises en œuvre, en 2050, les vols émettraient 9,6% de CO2 en moins que les mêmes vols en 2018.

Sur le périmètre France vers international :

	Départ France base 2018 - gains d'émissions en %									
	max	%vols	2018	2022	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Politiques et procédures d'exploitation	2,1	86	0,0	0,2	0,5	0,9	1,1	1,4	1,4	1,4
Réaménagement Air Space et procédures ATM	4,0	90	0,0	0,4	1,1	1,8	1,8	2,7	2,7	3,6
Optimisations temps réel en vol et approches optimisée	2,6	60	0,0	0,0	0,1	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9
Optimisations avions	1,0	100	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Nouvelles procédures	5,0	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
Opération sol	0,2	100	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Totaux			0,0	0,6	1,8	3,3	3,9	5,3	5,7	7,1

3. Améliorations attendues par macro-leviers en 2030 et en 2050

Politiques et procédures d'exploitation (macro-levier 1)

	Amélioration en 2030	Amélioration en 2050
France vers International	1,1%	1,4%
Domestique	0,9%	2,9%

Réaménagement de l'espace aérien et procédures ATM (macro-levier 2)

	Amélioration en 2030	Amélioration en 2050
France vers International	1,8%	3,6%
Domestique	1,8%	3,6%

Optimisations temps réel en vol et approche optimisée (macro-levier 3)

	Amélioration en 2030	Amélioration en 2050
France vers International	0,3%	0,9%
Domestique	0,8%	2%

Optimisation des avions (macro-levier 4)

	Amélioration en 2030	Amélioration en 2050
France vers International	0,2%	1%
Domestique	0,2%	1%

Nouvelles procédures de type vol en formation (macro-levier 5)

	Amélioration en 2030	Amélioration en 2050
France vers International	0%	0,1%
Domestique	0%	0%

Opérations au sol (macro-levier 6)

	Amélioration en 2030	Amélioration en 2050
France vers International	0,1%	0,1%
Domestique	0,1%	0,1%

12.4 ANNEXE 4 : L'ADAPTATION DES INFRASTRUCTURES AÉROPORTUAIRES

1 LES ENJEUX D'ADAPTATION DES INFRASTRUCTURES AÉROPORTUAIRES

1.1 Pour les carburants aéronautiques durables (CAD ou Sustainable Aviation Fuel – SAF)

En préambule, il convient de préciser que seule l'utilisation d'un carburant aéronautique durable répondant aux exigences législatives en vigueur en termes de durabilité sont à considérer.

Le carburant aéronautique durable – conforme à la norme internationale ASTM D7566 – est une solution « drop-in » : le SAF peut être utilisé en mélange et remplacement du carburant Jet A et Jet A-1 (dans des taux d'incorporation actuellement limités à ce jour à 10% ou 50% selon les filières certifiées). L'un des principaux avantages de cette solution « drop-in » est qu'elle ne nécessite aucune modification des moteurs ou des avions et contribue donc immédiatement à l'effort de décarbonation du secteur.

En termes de process d'approvisionnement vers les aéroports et d'avitaillement des avions, la chaîne logistique du SAF est confondue avec celle du carburéacteur classique : aucune modification d'infrastructures ou de process aéroportuaire n'est requise - hormis l'ajout de cuves de stockage de SAF et d'une distribution sur certains aéroports selon que les compagnies qui se fournissent en SAF exigent un avitaillement physique à due concurrence de leurs achats.

Un mécanisme de flexibilité consistant à garantir l'utilisation des SAF de la manière la plus efficace et la plus économique sans avoir à fournir physiquement des SAF dans tous les aéroports serait le bienvenu. La production et la vente de SAF est assortie de certificats donnant les garanties d'origine, d'unicité, de traçabilité et d'utilisation/restitution. Les flux physiques sont ainsi dissociables des flux de certificats avec les mêmes résultats, la revendication de la consommation de SAF est attestée par la restitution des certificats correspondants. Un tel système de « book and claim » s'est avéré efficace pour le développement d'autres énergies renouvelables en France comme à l'étranger.

Le CORAC ainsi que la communauté aéronautique mondiale, à travers le comité ASTM, explorent également deux voies de recherche et développement pour lever les verrous à l'utilisation de SAF pur (100%) tout en optimisant les bénéfices en termes d'impact climatique et de qualité de l'air :

- Le SAF 100% «drop-in» dont les conditions d'utilisation seraient identiques aux SAF actuels du fait de propriétés physico-chimiques identiques à celles du Jet A1, et qui n'induirait donc pas de modifications des infrastructures aéroportuaires existantes ;
- Le SAF 100% «non drop-in», avec des caractéristiques physico-chimiques différentes du SAF actuel et du jet A1, en vue d'optimiser la performance environnementale de ce carburant, et qui nécessiterait d'avoir à la fois des moteurs avions et une logistique aéroportuaire de distribution/stockage/avitaillement dédiés.

Recommandation

Favoriser l'adoption d'un mécanisme de flexibilité tel que le book and claim pour limiter la nécessité de recourir à des adaptations d'infrastructures, et donc à des investissements qui seraient répercutés sur le prix des carburants durables.

1.2 Pour les avions hybrides et électriques

Le futur de l'aviation générale et régionale – ne représentant qu'une part mineure du trafic aérien en France - reposera sur les technologies de propulsion électrique (soit grâce à des batteries électro-chimiques, soit grâce à des piles à combustibles fonctionnant à l'hydrogène) et les technologies hybrides (kérosène-électrique, en série ou parallèle).

L'hybride semble être la technologie la plus avancée si on considère la date de commercialisation, la capacité d'emport et le rayon maximum d'action, et les horizons de certification (<2025 pour les principaux programmes) ; cependant les avions à batterie totalisent la majorité des 70% des intentions d'achat suivis par l'hybride (~20%) et les avions à pile à combustible (~10%).

Concernant les batteries électro-chimiques, plusieurs solutions de recharge sur les aéroports sont possibles :

- Les chargeurs fixes, de puissance variables (quelques dizaines à quelques centaines de kW) installés sur les aires de stationnement avions permettant aux avions de se recharger durant le temps de rotation ou sur des aires dédiées au stationnement de longue durée pour le rechargement. Ces chargeurs seront alimentés à partir du réseau d'électricité de l'aéroport ;
- Les chargeurs mobiles distribuant de l'électricité stockée dans des batteries ou produite par une pile à combustibles à partir d'hydrogène stocké (solution intéressante pour des aéroports difficilement connectés / connectables au réseau électrique) ;
- La méthode dite de «battery swapping» : remplacement des batteries vides par des batteries rechargées. Cette méthode reste à approuver car il est possible que les autorités certifiant les avions considèrent cette opération de «battery swapping» comme non mineure.

Concernant les avions fonctionnant avec des piles à combustibles et nécessitant donc de l'hydrogène, une chaîne logistique de l'hydrogène est à mettre en place (voir § suivant).

Le recours à l'électricité comme énergie pour les avions nécessite d'intégrer ces besoins dans les schémas directeurs électriques généraux des aéroports pour assurer une adéquation entre les puissances souscrites, l'énergie disponible et l'énergie requise. Cette problématique est d'autant plus prégnante que de nombreux usages aéroportuaires transitionnent également vers l'électricité (véhicules, engins d'assistance en escale, systèmes de substitution des APU avions...) accroissant ainsi encore les besoins.

Les aéroports pourraient également être amenés à considérer le smart grid (système de gestion intelligente de stockage et distribution d'électricité du réseau) et/ou l'installation de batteries de grande capacité ou d'autres solutions de stockage comme l'hydrogène pour faire face aux pics de besoin en électricité.

La question du dimensionnement des aires aéronautiques est également un enjeu pour les aéroports : zones de stationnement de longue durée, zones pour le stockage des batteries, pour les chargeurs fixes ou mobiles.

Recommandation

L'horizon de commercialisation de l'aviation électrique et hybride est de court terme (à partir de 2023-2024 pour l'aviation générale et entre 2025-2030 pour l'aviation régionale). Les aéroports doivent dès à présent intégrer ces nouveaux besoins dans la planification de leurs infrastructures (électrification, surfaces) et leurs investissements. Une évaluation des besoins agrégée au niveau national permettrait également d'évaluer la part de l'aviation électrique par rapport au besoin électrique global entre 2025 et 2040.

1.3 Pour les avions à hydrogène

En préambule, il convient de préciser que seul un hydrogène renouvelable ou bas-carbone fait sens à des fins de décarbonation des activités aéroportuaires et du transport aérien. Aussi, toutes les considérations ci-après relatives à l'hydrogène portent-elles sur un hydrogène bas carbone.

Les aéroports offrent de nombreuses perspectives de déploiement progressif de l'hydrogène : d'abord autour d'usages en mobilité terrestre – mobilité lourde, flottes de taxis, engins d'assistance en escale des avions – puis autour de son application aéronautique pour l'aviation générale et régionale dans un premier temps et pour l'aviation court et moyen-courrier ensuite.

En ce sens, les aéroports disposent de nombreux atouts pour devenir des hubs hydrogène et être des catalyseurs du développement de l'hydrogène en France et sur les territoires qui les hébergent.

L'articulation et les synergies des usages de l'hydrogène sur les aéroports et leurs territoires doivent faire partie des réflexions et de la planification des parties prenantes. En effet, le développement des usages de l'hydrogène pour l'industrie et la mobilité terrestre, qui arriveront à maturité avant le déploiement massif des avions à hydrogène, bénéficieront à l'utilisation de l'hydrogène à grande échelle sur les aéroports : développement des premières infrastructures, optimisation des coûts liée à la mutualisation des infrastructures (production, transport), compréhension renforcée des enjeux de sécurité, acceptabilité sociétale.

Réciproquement, le développement des usages de l'hydrogène pour les infrastructures aéroportuaires et plus largement, le secteur aérien, pourra à long terme bénéficier à l'essor des mobilités terrestres et par extension fluviales et maritimes.

Le déploiement de l'hydrogène dans les aéroports, sous ses formes gazeuses et liquides, va ainsi entraîner une toute nouvelle organisation de la chaîne de valeur et des adaptations organisationnelles et d'infrastructures sur les aéroports.

1.3.1 Les grandes temporalités de l'intégration de l'hydrogène sur les aéroports

Trois grandes temporalités d'intégration de l'hydrogène sur les aéroports se dessinent :

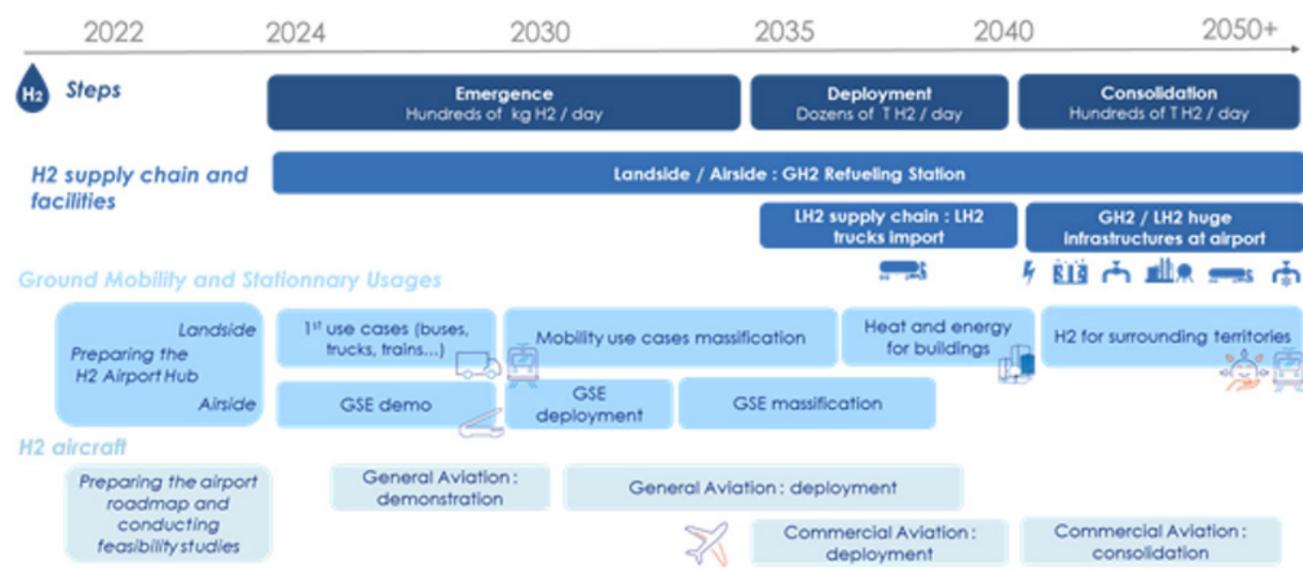
1 La phase d'émergence (à partir de 2024) :

- pour répondre aux besoins des premiers usages en mobilité et des opérations avions au sol (poids-lourds, utilitaires légers, bus, véhicules d'assistance en escale, GPU, plateformes de chargement avions, tracteurs avions gros porteurs, chariots bagages...);
- et pour servir les premiers avions à hydrogène pour l'aviation générale et régionale.

2 La phase de déploiement (à partir de 2035) :

- pour accompagner la massification des usages au sol et de l'aviation générale et régionale ;
- et répondre aux premiers besoins des avions courts / moyens courriers propulsés à l'hydrogène liquide (cryogénique, maintenu à une température de -253°C environ) ;

3 La phase de consolidation (entre 2050 et 2060) qui correspond à la phase de maturité de l'aviation court / moyen-courrier à hydrogène.



Hydrogène : feuille de route des grands aéroports

Source : Etude Groupe ADP – Hydrogène : feuille de route des aéroports parisiens - 2021

1.3.2 L'organisation de la chaîne logistique de l'hydrogène

Pour les usages en mobilités terrestres

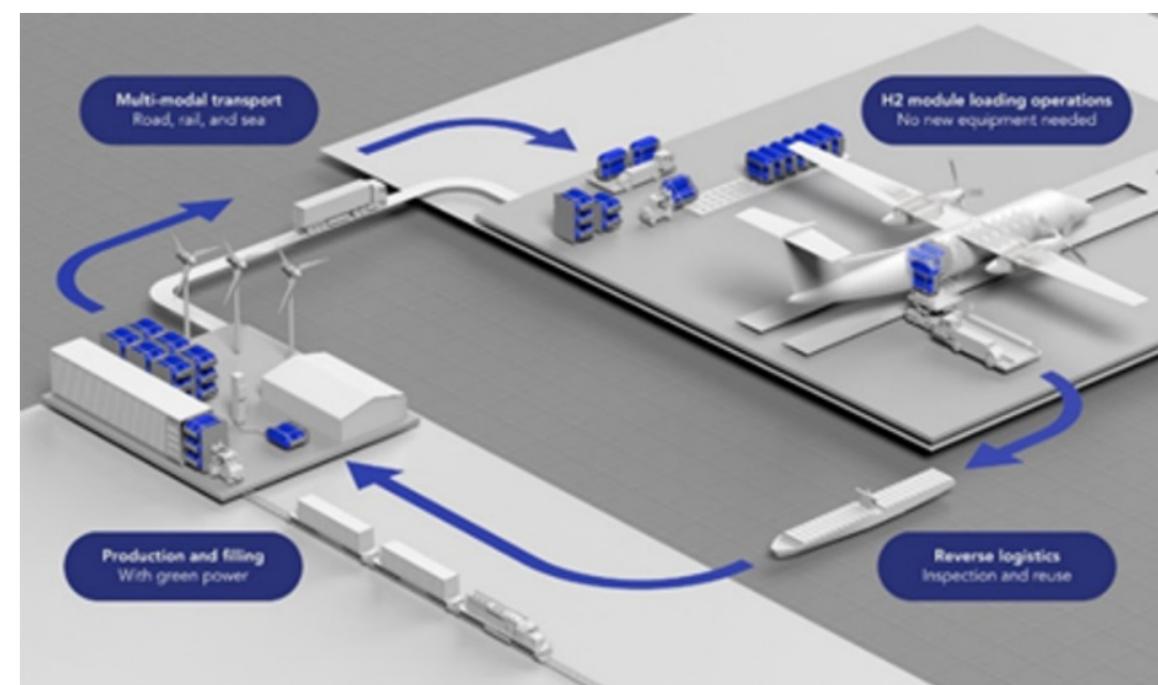
La transition vers l'hydrogène de ces usages sera rendue possible par l'implantation de stations / systèmes de stockage et distribution d'hydrogène gazeux sur les aéroports en zone publique et zone réservée. La question de la localisation de la production de ce GH2⁴⁶ sur ou hors de l'aéroport dépend du volume de GH2 nécessaire ainsi que des stratégies territoriales des énergéticiens. L'approvisionnement de ces stations à partir des infrastructures déployées pour l'aviation à hydrogène sera également à considérer, une fois ces dernières en place.

Pour l'aviation générale et régionale recourant à l'hydrogène gazeux

L'essor de l'avion à hydrogène gazeux comprimé pourra s'appuyer sur des chaînes logistiques nécessitant des infrastructures aéroportuaires modestes.

Plusieurs schémas sur l'aéroport sont possibles :

- chaîne logistique par camion de «bout-en-bout» : avitaillement des avions par des camions citernes approvisionnés depuis des usines situées à distance des aéroports ;
- des stations fixes de distribution d'hydrogène gazeux -rechargées par tube-trailers ou adossées à une production in-situ- sur des aires avions destinées à la recharge. Ce modèle semble adapté pour l'aviation générale, mais moins pour l'aviation commerciale régionale lorsque l'optimisation du temps de rotation est un critère important de rentabilité ;
- chaîne logistique dite de «container swapping» : transport de capsules d'hydrogène pré-remplies dans des usines, puis stockées sur l'aéroport et prêtes à être chargées directement à bord des avions.



Hydrogène : chaîne logistique dite «container-swapping»

Source : Universal Hydrogen

Le déploiement plus important de ces avions pourra bénéficier des chaînes logistiques plus complexes requises par les quantités d'hydrogène pour l'avion court / moyen-courrier.

Pour l'aviation régionale et court / moyen-courrier propulsée à l'hydrogène liquide (LH2) :

Pour les aéroports français, quatre schémas de chaîne logistique LH2 sont adaptés pour acheminer et stocker l'hydrogène sur les aéroports :

- 1^{er} schéma : Importation de LH2 par camions, en provenance d'usines externes

Le LH2, produit depuis des usines situées à distance, est acheminé vers l'aéroport par des camions de transport (tracteurs + citernes/ capsules). Ces citernes / capsules LH2 sont ensuite stockées en un ou plusieurs points sur l'aéroport. Des tracteurs d'aéroport adaptés aux contraintes de circulation en zone aéroportuaire et aux spécificités d'avitaillement, chargent ensuite une citerne / capsule et assurent l'avitaillement avion.

Ce schéma :

- évite les stockages fixes intermédiaires de LH2 et les transferts intermédiaires, qui sont des sources d'inefficacité importantes dans la manipulation du LH2 ;
- est flexible et ne nécessite pas d'espace important ni d'investissement sur l'aéroport ;
- est adapté pour les aéroports de petite/moyenne taille ou durant la phase de déploiement des vols LH2. Le facteur limitant étant ensuite la grande quantité de camions nécessaires entraînant ainsi un coût élevé de transport / logistique et une potentielle congestion au niveau de la circulation à proximité et sur les aéroports.

⁴⁶ H2 : dihydrogène, par abus de langage hydrogène - GH2 : dihydrogène comprimé gazeux - LH2 : dihydrogène comprimé liquéfié



Hydrogène : chaîne logistique – importation de LH2 par camions

Source : étude Airbus, Groupe ADP, Air Liquide – How to make your airport hydrogen ready ? – Juin 2022

Par conséquent, lorsque les besoins en LH2 augmentent, deux autres chaînes peuvent être considérées :

- 2^{ème} schéma : Importation d'hydrogène gazeux (GH2) par pipeline vers l'aéroport ; l'hydrogène gazeux est produit en dehors de l'emprise aéroportuaire et transporté par gazoduc vers l'aéroport avant d'être liquéfié puis stocké sur l'aéroport, et ensuite distribué jusqu'aux avions ;
- 3^{ème} schéma : Importation par bateau d'hydrogène liquide (LH2) vers l'aéroport ; l'hydrogène est produit hors de l'emprise de l'aéroport, puis acheminé à l'aéroport par bateau, sous forme liquide. Ce schéma ne s'applique qu'aux aéroports côtiers, voire fluviaux ;
- 4^{ème} schéma : Importation d'électricité à faible teneur en carbone et d'eau vers l'aéroport et production d'hydrogène sur l'aéroport.

L'hydrogène est produit par électrolyse de l'eau sur l'aéroport avant d'être liquéfié puis stocké sur l'aéroport, et ensuite distribué jusqu'aux avions.

Les schémas 2 et 4 semblent complémentaires :

- le 4^{ème} schéma requiert certes d'acheminer une importante puissance électrique sur les aéroports, mais il permet en contrepartie de sécuriser une partie de la production sur site et de s'affranchir de la mise place d'un réseau de transport de GH2 ;
- le 2^{ème} schéma pourrait être activé ensuite, pour limiter l'impact foncier et les besoins de puissance électrique sur site. Ce schéma est soumis au déploiement d'un réseau de transport de GH2 sur le territoire.

Dans les 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} schémas, deux modes de distribution de l'hydrogène liquide aux avions sont possibles :

- lorsque le volume de LH2 reste limité, un avitaillement par camions (tracteur + citerne) ;
- lorsque le volume augmente (plusieurs centaines de tonnes par jour), une distribution par un système de canalisation LH2. La mise à bord du carburant (jonction entre le pipeline d'hydrogène et le réservoir de l'avion) serait réalisée par des camions «hydrogéno-serveurs».

La définition du mode de distribution est propre à chaque aéroport. En effet, le mode d'avitaillement par camions est opérationnellement possible jusqu'à un certain volume de camions nécessaires. Et le système de canalisation LH2 peut être commercialement viable, en dessous d'une certaine longueur de tuyau et au-delà d'un certain volume de LH2 à distribuer.

D'autres schémas logistiques restent possibles :

- d'autres modes de production d'hydrogène que l'électrolyse sur l'aéroport peuvent également être explorés, mais vraisemblablement plus en appoint qu'en production nominale ;
- le transport d'hydrogène sous forme d'ammoniac ou méthanol est également une voie possible.

1.3.3 L'intégration des infrastructures hydrogène sur les aéroports

Les infrastructures à déployer sur les aéroports et les investissements associés seront très dépendants du volume de trafic des aéroports induisant des variations sur les quantités d'hydrogène nécessaires et des choix différents en termes de chaînes logistiques. Des études spécifiques à chaque aéroport permettant de caractériser les volumes d'hydrogène nécessaire, les enjeux d'intégration d'une chaîne logistique hydrogène et d'infrastructures hydrogène devront être réalisées.

Remarque : l'objectif des acteurs du transport aérien est d'opérer un avion à hydrogène dans des conditions ne dégradant pas les performances actuelles. Par conséquent, les éléments de ce paragraphe présupposent que les caractéristiques géométriques des futurs avions à hydrogène restent similaires à celles des avions actuels et n'impactent la conception géométrique des infrastructures terminales et aéronautiques des aéroports (zones de stationnement et équipements, voies de circulation, pistes...).

Organisation et dimensionnement des installations

En phase d'émergence :

- pour répondre aux usages en mobilité terrestre, des stations de distribution d'hydrogène (de type stations-services) seront à installer sur les aéroports. Afin d'optimiser les ressources foncières, ces stations pourront distribuer également d'autres énergies (électricité, gaz naturel véhicule) et être implantées de façon à servir les usages côté ville et côté piste ;
- sur les aérodromes / aéroports accueillant du trafic d'aviation générale ou régionale, des surfaces seront à réserver pour permettre une logistique d'avitaillement des avions par camions / capsules.

Pour des volumes d'hydrogène inférieurs à 30 - 50 T/jour :

- une chaîne logistique de transport de l'hydrogène par camions est envisagée. Sur l'aéroport, une ou plusieurs parcelles sont à réserver – si possible côté piste - pour assurer le stockage de capsules ou citernes d'hydrogène liquide et le stationnement de porteurs. La localisation de ces parcelles devra faire l'objet d'une étude de sécurité du fait du stockage d'hydrogène.

Sur les plus grands aéroports où les volumes d'hydrogène seront amenés à croître au-delà de ce seuil et qui disposeront a minima d'infrastructures de liquéfaction et stockage sur site, les réservations foncières à envisager pour ces camions ne sont pas frustratoires. En effet, ces surfaces pourraient ensuite être exploitées :

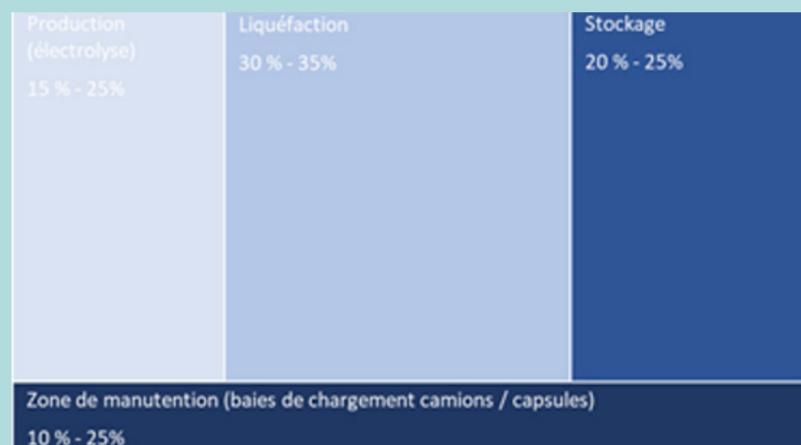
- pour les camions de distribution d'hydrogène entre le centre de stockage de l'aéroport et les avions, pour les aéroports qui ne seront pas équipés d'un réseau hydranté ;
- pour assurer un mode dit «mixte», sur les aéroports équipés in fine d'un réseau hydranté, c'est à dire pour assurer l'avitaillement par camions des postes avions qui ne seraient pas encore équipés d'un réseau de distribution hydrogène ;
- pour assurer la robustesse en cas de dysfonctionnement et/ou de maintenance du réseau de distribution d'hydrogène, sur les aéroports équipés in fine d'un réseau hydranté.

Pour des volumes d'hydrogène supérieurs à 30 - 50 T/jour :

Les fonctionnalités installées sur l'aéroport seront :

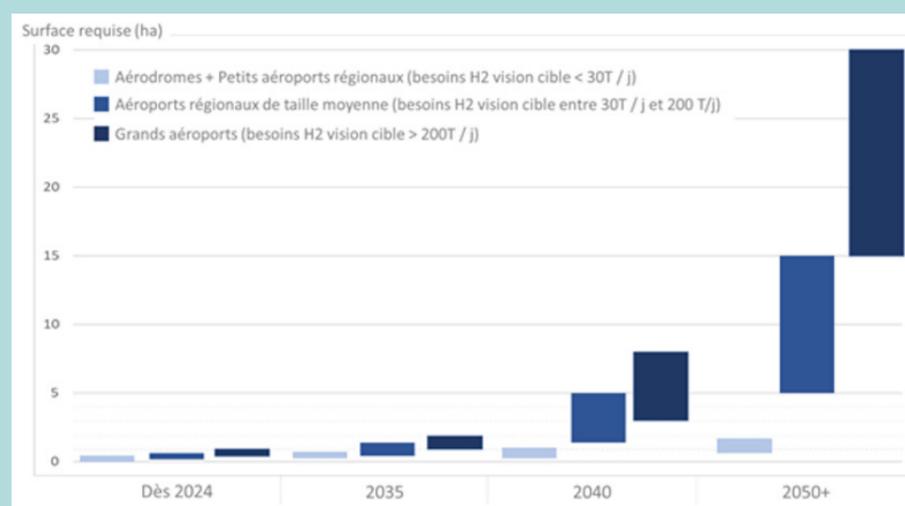
- la production d'hydrogène (transformateurs électriques, systèmes de production d'H2) – optionnellement, en fonction de la stratégie définie par l'aéroport – pour couvrir tout ou partie des besoins ;
- la liquéfaction de l'hydrogène – pour couvrir les besoins quotidiens, y compris en pointe ;
- le stockage de l'hydrogène liquéfié – pour couvrir les besoins en pointe et sur une durée dépendant de la stratégie de chaque aéroport ;
- des baies de chargement pour capsules ou camions citernes destinés à avitailler les avions (en mode nominal pour les aéroports dont le système de distribution est assuré par camion, en mode mixte ou dégradé pour les aéroports équipés d'un réseau de distribution).

De premières études tendent à démontrer que, pour des raisons d'optimisation du foncier et des investissements, le scénario préférentiel consiste en l'installation d'une infrastructure (usine) centrale pour ces fonctions, et non à l'implantation d'unités de liquéfaction / stockage à proximité de chaque zone de stationnement avions.



Usines hydrogène sur aéroports :
Surfaces des différentes
fonctionnalités.

Source : étude Airbus, Groupe ADP,
Air Liquide – How to make your
airport hydrogen ready ? – Juin 2022



Infrastructures
hydrogène sur
aéroports : estimation
des surfaces nécessaires

Note : ces estimations de surfaces couvrent les besoins liés à l'activité aéroportuaire et ne prennent pas en compte d'éventuelles extensions de capacités pour couvrir les besoins des territoires qui hébergent les plateformes. Elles n'intègrent pas non plus les réservations de surfaces associées à la production locale d'électricité pour les aéroports qui en feraient le choix (ex : ferme photovoltaïque...).

Évaluation des investissements

L'utilisation d'hydrogène liquide à l'échelle requise pour l'aviation n'est pas éprouvée aussi les estimations de coût de l'hydrogène et des investissements appellent à la prudence.

Le final coût de l'hydrogène dépendra des principaux facteurs suivants :

- pour l'essentiel du coût d'accès à l'électricité, qui est le principal moteur du coût de production d'hydrogène. Ainsi, à travers l'Europe, les pays et aéroports qui auront accès à une électricité et donc un hydrogène à faible coût disposeront d'un avantage concurrentiel majeur par rapport à leurs concurrents pour attirer les compagnies aériennes. Les politiques européenne et nationale de développement de l'électricité bas carbone et d'hydrogène bas carbone influent ainsi très fortement sur l'attractivité des aéroports français. Cette attractivité constitue un moyen fort de se prémunir contre les fuites de carbone ;
- dans une moindre mesure, au montant des investissements à réaliser sur les aéroports. Toutefois, le développement des infrastructures et donc le volume des investissements devra suivre au plus près la demande de façon à éviter des infrastructures insuffisamment chargées dont les coûts seraient à amortir sur un faible volume d'hydrogène.

Les choix stratégiques en termes d'investissements devront être guidés par la capacité des acteurs à investir et également par l'objectif de sécuriser les volumes d'hydrogène requis au meilleur coût.

Dans l'état actuel du cadre réglementaire, les investissements nécessaires au développement de ces infrastructures hydrogène sur les aéroports pour servir les besoins du transport aérien relèveraient du périmètre régulé et influeraient donc sur les redevances aéroportuaires appliquées aux compagnies aériennes.

Par ailleurs, pour optimiser les investissements, il pourrait être nécessaire de considérer une économie de l'hydrogène à l'échelle territoriale, permettant ainsi de générer des revenus complémentaires pour les infrastructures installées sur les aéroports et des économies d'échelle plus largement.

Ces réflexions amèneraient sans doute les aéroports à adapter leur modèle économique.

Recommandation

Le coût de l'hydrogène distribué sera majoritairement dépendant du coût de production de l'énergie amont (électricité). Le développement d'une économie hydrogène nationale et des mécanismes de soutien au développement de la filière seront requis afin de distribuer en France un hydrogène à coût compétitif et préserver une équité concurrentielle entre les aéroports et les compagnies aériennes, tout en se prémunissant contre des fuites de carbone aux frontières qui compliqueraient encore la tenue de trajectoires climatiques alignées sur les accords de Paris.

Recommandation

Le modèle économique d'affectation des investissements sur les aéroports, compte tenu de leur possible impact sur le coût des opérations avions et donc sur le prix des billets, devra faire l'objet d'une harmonisation au niveau national voire européen afin de préserver une équité concurrentielle entre les aéroports et les compagnies aériennes.

1.3.4 La feuille de route de développement des infrastructures sur les aéroports

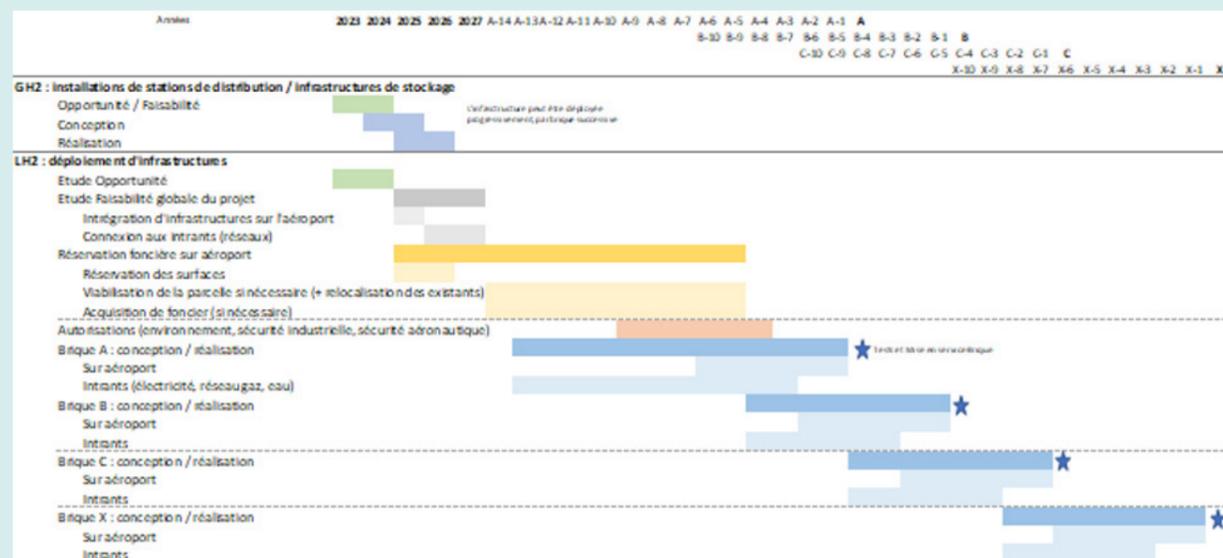
Le déploiement des infrastructures sur les aéroports devra être progressif de façon à être ajusté au plus près aux volumes d'hydrogène distribués. Par conséquent, ce déploiement pourra comprendre de nombreuses phases et s'étaler sur une longue période.

Les grandes phases de déploiement de ces infrastructures sont :

- une phase d'étude d'opportunité technico / économique : évaluation des volumes d'hydrogène nécessaires à travers le temps et des usages à servir et définition des schémas logistiques adaptés (notamment en fonction des volumes d'H2 et des volumes d'intrants nécessaires) ;
- une phase de faisabilité : enjeux et faisabilité de l'intégration des infrastructures sur les aéroports, réservation des surfaces au plan de masse (et si nécessaire identification de foncier à acquérir), sécurisation des intrants (connexion au réseau d'électricité et d'eau pour les volumes requis, évaluation du stress hydrique le cas échéant, connexion au réseau de transport d'hydrogène gazeux) ;
- une phase d'étude de conception détaillée, comprenant l'obtention des autorisations et permis nécessaires ;
- une phase de réalisation.

Pour les aéroports qui disposeront d'infrastructures hydrogène (de type production et/ou liquéfaction / stockage de gros volumes) – besoins d'H2 > 30 à 50 T/jour, la phase de déploiement d'une première brique d'usine (conception + réalisation) est estimée à au moins 10 ans. La prise en compte des processus de réservation de foncier, d'obtention des autorisations (environnementales, sécurité aéronautique) et de connexion aux réseaux d'intrants (électricité, transport H2 gazeux, eau) est également clé.

Le diagramme ci-dessous illustre les grandes phases de déploiement d'infrastructures hydrogène sur les aéroports, avec un déploiement progressif par brique (où A, B, C, ..., X représentent les années de mise en service des briques A, B, C, ...X).



Feuille de route du déploiement d'infrastructures hydrogène sur les aéroports

Recommandation

Le développement d'infrastructures hydrogène sur les aéroports va nécessiter la planification d'infrastructures à une maille territoriale plus importante (production d'électricité, réseaux d'électricité, de transport d'hydrogène, d'eau). Ceci, combiné à la longueur des cycles de déploiement des infrastructures, requiert que les principaux aéroports français conduisent au plus tôt une évaluation de leurs futurs besoins en hydrogène et des enjeux d'intégration de ce vecteur énergétique sur leur plateforme, et que ces besoins soient intégrés dans les feuilles de route nationales, en coordination avec les énergéticiens, les opérateurs de réseaux gaz et électricité (production d'électricité bas-carbone, réseau électrique, réseau gaz) et les compagnies aériennes et constructeurs d'avions.

2 LES ENJEUX OPÉRATIONNELS SUR LES AÉROPORTS

2.1 Problématique générale

Le niveau de performance opérationnelle global actuel (opérations au poste avions, temps de rotation avion, coût des opérations aéroportuaires sur l'exploitation des flottes, qualité de service à l'utilisateur) doit être maintenu autant que possible. À cet égard, la cohabitation et la complexification de la gestion de flux d'utilités et de vecteurs énergétiques plus nombreux et aux contraintes de manipulation nouvelles et spécifiques à chaque vecteur doit être traitée. Au premier chef l'augmentation du trafic aéroportuaire, ainsi que l'approvisionnement des nouvelles énergies, peut nécessiter des adaptations opérationnelles et infrastructurelles sensibles.

Plus spécifiquement, l'utilisation de l'hydrogène induit de nouvelles contraintes dont traitent les deux paragraphes ci-dessous.

2.2 POUR L'HYDROGÈNE SOUS FORME DE DIHYDROGÈNE H2

2.2.1 Hypothèses et familles de solutions considérées

Ce document ne tient pas compte des géométries d'aéronefs en rupture avec l'existant ; le modèle « tube and wings » est le seul considéré, et donc aucun impact n'est attendu sur l'infrastructure aéroportuaire à cet égard.

Les effets sur les opérations aéroportuaires à traiter diffèrent suivant la nature du stockage de l'hydrogène sur avion, selon qu'il soit :

- sous forme gazeuse haute pression (GH2) ou liquide cryogénique (LH2) ;
- à demeure sur l'avion ou déposé après le vol.

Les effets induits portent notamment sur :

- le poste avion à l'occasion du rechargement ;
- le parking pour la gestion de la sécurité hydrogène ;
- les opérations de maintenance.

2.2.2 Surveillance des fuites H2 sur avion (commun GH2 et LH2)

Lors des phases de parking notamment la nuit les réservoirs d'hydrogène GH2 et LH2 installés à demeure sur avion peuvent contenir de l'hydrogène. Dans ce cas diverses mesures peuvent requérir une surveillance permanente, notamment pour activer des alarmes et des dispositifs de ventilation active sous condition ou autre mesure de sécurité. Les hangars et les parkings de l'aéroport doivent donc permettre le fonctionnement des dispositifs actifs avions, pouvant requérir une alimentation électrique sécurisée voire redondée.

2.2.3 Gestion des cas de fuites H2 sur avion (commun GH2 et LH2)

De plus en cas d'activation des dispositifs de ventilation, le flux d'air et d'hydrogène doit pouvoir être évacué dans un environnement évitant l'accumulation d'hydrogène. Il pourrait également requérir une distance minimale entre avions et, entre avions et autres sources potentielles d'énergie pour éviter les risques d'ignition de mélange inflammable. En cas de parking dans un hangar avions, celui-ci doit permettre la non-accumulation d'hydrogène, la détection et la mesure de l'émission d'hydrogène dans le hangar, ainsi que toute autre mesure de mise en sécurité du hangar.

En cas de parking extérieur, le risque d'accumulation n'existe pas. Néanmoins, il conviendra de s'assurer de la maîtrise du flux d'air enrichi en hydrogène pour éviter tout risque d'inflammation, et bien évidemment de limiter au minimum l'occurrence et la durée de ces événements.

2.2.4 Gestion des événements (commun GH2 et LH2 pour cas anormal, LH2 pour cas normal)

Dans le cas de réservoirs LH2 froids sur avion en parking externe et en hangar avions, les réservoirs peuvent être amenés à devoir évacuer de l'hydrogène gazeux pour maintenir leur pression en deçà d'un seuil. Suivant les cas un événement de collecte de ce « boil off » doit permettre de diriger ce débit d'hydrogène pour être sécurisé et éventuellement reconditionné.

Dans les cas de stockage GH2 et LH2 différents événements peuvent également être nécessaires pour collecter les purges d'organes de sécurité tels que des soupapes ou des fusibles thermiques.

Dans ces 2 cas, et plus particulièrement le premier (fonctionnement normal) l'enjeu est de collecter l'hydrogène purgé en sécurité (en hangar et en extérieur), de limiter son impact environnemental (pouvoir réchauffant indirect⁴⁷), et si possible de le valoriser (reconditionnement).

2.2.5 Opérations de remplissage (GH2 et LH2)

Lorsque le remplissage des réservoirs s'effectue sur avion, la gestion de la sécurité peut avoir des impacts sur les opérations, notamment pour le respect de distances de sécurité et de zonage. La gestion des flux de passagers peut être à adapter et mener à des adaptations d'organisation des flux.

Spécifiquement dans le cas de remplissage LH2, de possibles adaptations des postes avions sont nécessaires pour rendre le revêtement sol compatible d'un contact hydrogène liquide cryogénique.

⁴⁷ L'hydrogène n'est pas un gaz à effet de serre (GES), mais il atténue la dégradation naturelle des GES atmosphériques et peut donc avoir un pouvoir réchauffant indirect qu'il convient d'éviter autant que possible.

2.2.6 Opérations de maintenance d'un réservoir LH2 installé à demeure

L'hypothèse est faite que les réservoirs cryogéniques, en opération nominale, restent à température cryogénique. Certaines opérations de maintenance peuvent nécessiter la vidange voire l'inertage des réservoirs LH2. En remise en service de l'avion, une phase de mise en froid est alors nécessaire. L'impact sur les opérations aéroportuaires associées est à évaluer.

2.2.7 Cas des réservoirs amovibles (containers swapping)

Le choix pourrait être fait de gérer les réservoirs d'hydrogène GH2 et LH2 en vide contre plein. Dans ce cas les problématiques de gestion des aéronefs dans les hangars ci-dessus sont caduques. Néanmoins les protocoles d'installation et de désinstallation et les impacts opérationnels associés doivent être établis. De plus, la gestion d'une logistique de réservoirs hydrogène pleins doit être définie, et les impacts sur les opérations aéroportuaires doivent être établis (gestion de la sécurité lors de l'acheminement notamment avec les cas d'activation potentielle des organes de sécurité).

2.2.8 Dispositifs de sécurité de gestion des incidents avions

Les caractéristiques des incidents avions impliquant des stockages d'énergie sous forme d'hydrogène GH2 ou LH2 induisent une organisation des secours différentes, et des moyens sol différents. Ceux-ci restent à évaluer.

Recommandation

L'impact de l'introduction des nouvelles énergies sur les opérations aéroportuaires, et notamment celle de l'hydrogène, est étroitement lié à la conception des solutions associées développées sur les aéronefs. Les effets les plus impactants sur les opérations, et a fortiori sur les infrastructures aéroportuaires, nécessitent une prise en compte dès la phase de conception des systèmes avions. En parallèle, une évaluation et un traitement des contraintes résiduelles doivent être planifiés et suivis afin d'anticiper les adaptations requises.

3 LES ENJEUX NORMATIFS, RÉGLEMENTAIRES ET LÉGISLATIFS

3.1 SAF

La traçabilité des SAF est un enjeu important, notamment pour :

- permettre la mise en place d'un système de flexibilité de type « book and claim » ;
- calculer l'impact sur la réduction des émissions de CO2 sur le scope 3 des aéroports (émissions indirectes) ;
- distinguer le caractère renouvelable ou non des fuels bas carbone (cf. ReFuel EU aviation regulation) ;
- potentiellement mettre en place des mécanismes d'incitation à l'usage des SAF sur les aéroports sur la base du taux d'incorporation de SAF des compagnies aériennes (au-delà du mandat réglementaire) – si la pertinence était avérée.

Ainsi, il est nécessaire de mettre en place un système de traçabilité (certificat sur les garanties d'origine et teneur en carbone sur le cycle de vie, outil de reporting des volumes produits, achetés et consommés), au niveau européen a minima en vue d'une compatibilité au niveau international, afin de connaître :

- les volumes de SAF par filière de production (car elles n'ont pas toutes le même taux de réduction de CO2) distribués sur les plateformes ;
- les volumes achetés d'une part et consommés physiquement sur les plateformes d'autre part, par chaque compagnie aérienne.

Ce système pourrait s'inspirer de celui mis en place dans le cadre des garanties d'origine sur les énergies renouvelables.

3.2 HYDROGÈNE

3.2.1 Situation réglementaire

L'utilisation d'hydrogène, sous forme liquide comme gazeuse, est très peu répandue aujourd'hui sur aéroport, et le cadre réglementaire actuel n'est pas adapté à son déploiement généralisé.

Plusieurs niveaux de textes réglementaires s'appliquent à l'installation et à l'opération d'équipements hydrogène sur un aéroport : les règlements nationaux, les règlements aéronautiques, et les normes et standards industriels.

Règlements nationaux : ces textes donnent généralement des prescriptions visant à réduire les risques industriels. En France, plusieurs rubriques ICPE (Installation Classée pour la Protection de l'Environnement) concernent les installations hydrogène.

Règlements aéronautiques : généralement issus des textes de l'OACI et déclinés par les autorités de l'aviation civile de chaque pays, ces règlements couvrent un large spectre de sujets aéroportuaires : l'organisation de l'aéroport, certains éléments de sa conception, la signalétique, les moyens de secours et de lutte contre l'incendie, etc.

Normes et standards industriels : ils sont très nombreux et d'origines diverses (comités SAE, ISO ou EUROCAE, organismes spécialisés comme le JIG ou l'EIGA, entités publiques comme la NFPA, etc...). Ils couvrent aussi bien la conduite et l'organisation de la manutention au sol des avions que la conception et l'opération de véhicules de piste et d'équipements fixes.

La figure suivante illustre, de manière non-exhaustive, la complexité de l'application de ces différents niveaux de textes au cas d'un aéroport accueillant des véhicules et des aéronefs à hydrogène. Elle recense, pour le cas d'un aéroport français, les champs d'application de quelques règlements représentatifs des trois catégories décrites ci-dessus et qui seront impactés par l'introduction de l'hydrogène :

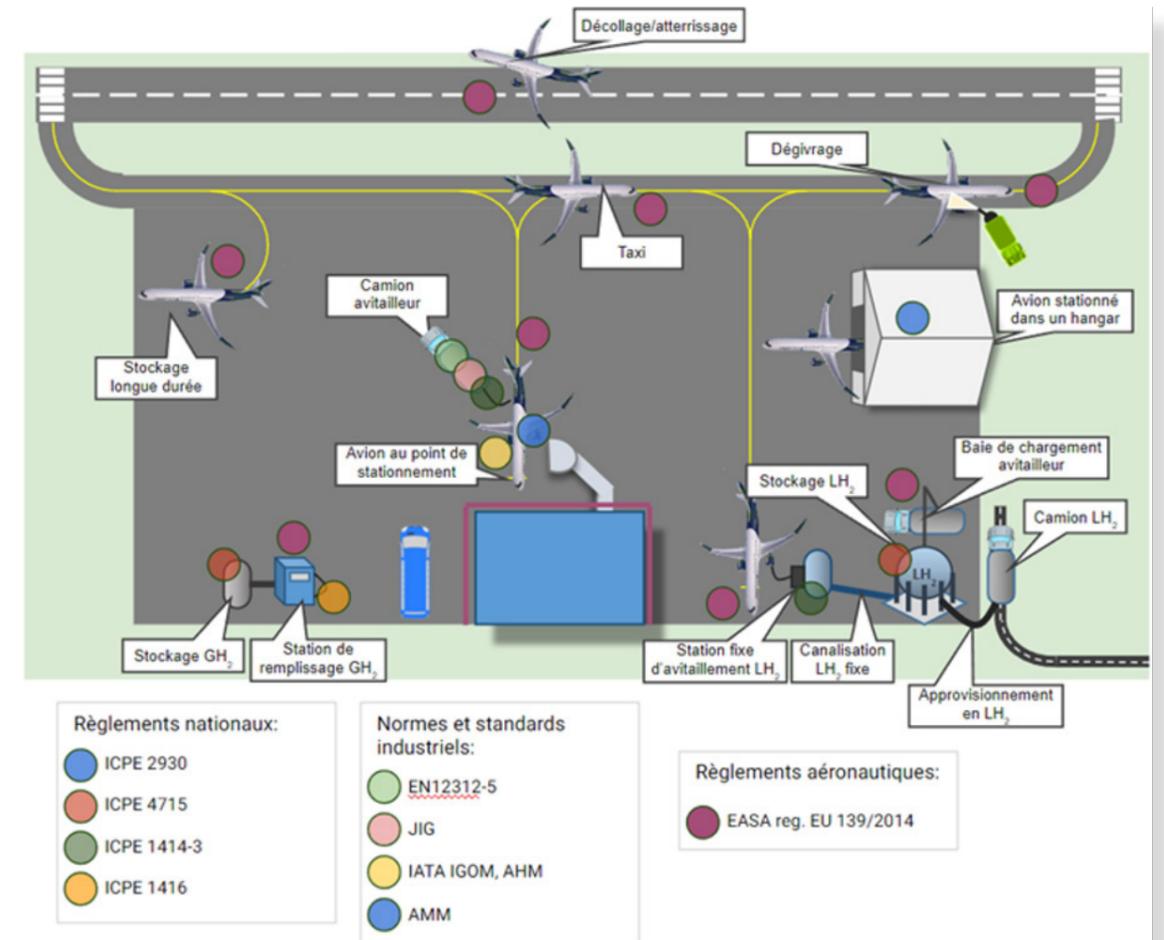


Illustration des champs d'application de textes réglementaires

3.2.2 Identification et levée des verrous réglementaires

Au niveau français

Les textes décrits précédemment n'ont jamais pris en compte la possibilité d'avions fonctionnant à l'hydrogène, qu'il soit gazeux ou liquide. Il est donc important de comprendre quelles parties de ces textes doivent évoluer, et de définir une feuille de route pour ces évolutions.

À ces fins, un groupe de travail a été créé par Airbus fin 2020. Ce groupe de travail réunit les acteurs nécessaires à la compréhension du paysage réglementaire et de ses évolutions : des acteurs aéroportuaires (Groupe ADP, Vinci Airports, Aéroport Toulouse-Blagnac), des spécialistes de l'hydrogène (Air Liquide, INERIS), des spécialistes des opérations d'avitaillement avion (Titan Aviation) et des représentants des autorités aéronautiques (DGAC/STAC, Service Technique de l'Aviation Civile).

En parallèle, un autre groupe de travail dédié aux activités de sauvetage et de lutte contre l'incendie a également été lancé. La présence d'hydrogène induira une phénoménologie d'incidents et accidents d'aéronefs très différente de celle du kérosène, les procédures et moyens d'intervention devront donc être nécessairement adaptés. Ce groupe de travail implique les services SLIA (Sauvetage et Lutte contre l'Incendie des Aéronefs) des grands aéroports français, des organismes de formation et des Services Départementaux d'Incendie et de Secours.

France Hydrogène anime également un groupe de travail réglementaire au périmètre plus large, complémentaire de ces groupes de travail aéroportuaires. Une coordination de ces initiatives est en cours.

Dans tous les cas, les grands objectifs sont :

- de comprendre l'état de l'art réglementaire et opérationnel ;
- d'identifier les lacunes et inadéquations pour l'introduction de l'hydrogène pour l'aviation ;
- de proposer des voies d'évolution réglementaire.

Les conclusions de ces groupes de travail seront partagées avec les autorités et organismes réglementaires (DGPR, DGAC en particulier).

Au niveau européen

Il n'existe actuellement aucune harmonisation des règles industrielles pour la construction et l'opération d'équipements hydrogène au niveau européen. Ce manque d'harmonisation est très préjudiciable au futur déploiement d'une aviation hydrogène. En effet il empêche la définition de briques standardisées utilisables sur tout aéroport européen, il augmente les coûts en obligeant les industriels à suivre des règles et procédures différents suivant les pays et les régions, et il obère les capacités de planification à long terme par manque de clarté et de visibilité sur l'évolution du cadre réglementaire. Une harmonisation des règles et procédures sera un fort levier de compétitivité pour la France et pour l'Europe dans le déploiement d'écosystèmes hydrogène aéroportuaires.

Des associations comme Hydrogen Europe ou l'Hydrogen Council relaient cette problématique en poussant pour une harmonisation plus large au niveau européen.

Plus récemment, la Commission Européenne, et plus précisément la Direction Générale Défense, Industrie et Spatial (DG-DEFIS), a formé une alliance nommée AZEA (Alliance pour l'Aviation Zéro Emission), avec pour objectif principal de lever les obstacles liés à l'émergence de l'aviation électrique et à hydrogène. Un des groupes de travail de cette alliance, sous la direction de l'EASA, sera dédié à l'analyse de l'état de l'art réglementaire et à l'établissement d'une feuille de route permettant de mettre en place les standards et règlements nécessaires pour encadrer les opérations aéroportuaires intégrant les nouvelles énergies.

Recommandation

agir pour une harmonisation la plus poussée possible des réglementations industrielles relatives aux installations hydrogène à l'échelle européenne.

Au niveau international

Les textes définissant les opérations d'avions commerciaux au sol et en vol sont largement harmonisés au niveau international et prennent comme référence les travaux de l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale). Au sein de l'OACI une Task Force a été lancée en novembre 2022 pour étudier les répercussions de l'opération d'avions utilisant des sources d'énergie alternatives (batteries, hydrogène). Cette Task Force est le premier jalon du processus d'évolution des textes de référence de l'OACI pour prendre en compte ces nouvelles énergies pour l'aviation.

De même, des travaux sont en cours au niveau des organismes de standardisation (SAE, ISO) pour définir les futurs standards applicables aux équipements hydrogène sur aéroport.

4 EMPLOIS, COMPÉTENCES ET FORMATIONS

Ce paragraphe renvoie au chapitre Besoins en emplois, compétences et qualifications.

Au périmètre des aéroports, l'introduction de l'hydrogène nécessite de mettre en place une Gestion Prévisionnelle de l'Emploi et des Compétences et également d'envisager la formation à large échelle des personnels.

Une formation au risque hydrogène et à la co-activité des activités en pistes sera à adresser à l'ensemble des personnels impliqués dans la gestion des opérations avions en piste, tant au niveau de l'encadrement que du personnel technique :

- services compétents de l'Etat (GTA, Douanes, DGAC) ;
- compagnies aériennes, et assistants et prestataires en escale ;
- opérateurs aéroportuaires ;
- services de secours.

Au regard du nombre de personnes qui seront à former, la dispense de ces formations nécessitera d'être anticipée par rapport à la date de mise en service des avions à hydrogène.

Les services de secours (BSSP / SSLIA) devront être formés spécifiquement au sujet de l'intervention sur des avions électriques ou à hydrogène. Un groupe de travail piloté par le Service Technique de l'Aviation Civile a initié une réflexion sur ce sujet.

Recommandation

Organiser au niveau national la préparation de programmes de formation standards adaptés aux différentes professions exerçant dans le domaine des opérations aéroportuaires, en piste, à fortiori pour les services de secours (SSLIA / BSPP).

La question de l'intégration des nouvelles énergies avions sera également à aborder dans les formations initiales des personnes impliquées dans la conception, la sécurité et la certification aéroportuaires.

12.5 ANNEXE 5 : PRÉCISIONS SUR LE FONCTIONNEMENT DES MODÈLES ONERA ET DGAC (EFFET DES SURCÔÛTS DE LA DÉCARBONATION SUR LE TRAFIC)

Le modèle développé par les chercheurs de l'Onera simule l'évolution d'une flotte sur le périmètre géographique choisi et calcule ses émissions de CO₂ à partir de l'année de référence (2018), le code de calcul étant initialisé à partir des données de la base OAG⁴⁸ qui regroupe tous les appareils en service et l'ensemble des vols pour l'année considérée.

Le calcul des émissions sur la période 2022-2050 est mené sur une flotte simplifiée, via la création de six catégories d'avions (deux régionaux, deux SMR, un long courrier et un très gros porteur), celles-ci étant elles-mêmes subdivisées en différentes générations d'appareils selon leur date d'entrée en service. Le recalage avec les données réelles est effectué sur l'année de référence (ici 2018) afin de vérifier la validité de la méthode de discrétisation. Cette flotte évolue ensuite en fonction du renouvellement et de la croissance du trafic. Pour chaque catégorie, le nombre de vols annuels, la distance moyenne parcourue ainsi que le nombre moyen de passagers transportés par vol sont initialement déterminés pour l'année 2018 par analyse de la base OAG.

Le modèle utilise plusieurs leviers d'actions (évolutions des technologies et renouvellement des avions, évolutions des opérations, incorporation de carburants alternatifs), avec des valeurs quantifiant ces leviers (dates d'entrée en service des nouveaux appareils, gains en efficacité énergétique, gains en opérations avec dates de mise en œuvre, mix d'incorporation des CAD au cours du temps). Le modèle utilise également des paramètres comme le taux d'évolution du trafic, de remplissage des appareils, qui ont été définis en incorporant des éléments économiques (e.g. effets prix sur la croissance). Chaque combinaison de paramètres définit potentiellement un scénario.

Il est à noter que, dans ce modèle, le gain d'efficacité moyen annuel de la flotte sur le périmètre géographique considéré n'est pas une donnée d'entrée mais la résultante de plusieurs paramètres indépendants que sont le taux de renouvellement des avions, le timing d'introduction d'une nouvelle génération d'aéronefs et le gain d'efficacité apporté par cette génération. Les émissions du secteur évaluées ici peuvent ensuite être corrigées des différents modes d'offsets qui relèvent des politiques publiques ou d'initiatives des compagnies qui sont analysés au chapitre 9.

Enfin, on mentionnera que **ces calculs d'émissions de CO₂ sont effectués en ne tenant compte que des émissions liées à la combustion, par souci de cohérence avec les objectifs spécifiques affectés au transport aérien dans la SNBC. Les émissions supplémentaires associées à l'extraction, au raffinage, au transport des carburants ou, dans le cas de carburants de synthèse, à leur fabrication n'ont pas été considérées ici** (contrairement aux calculs publiés par le CORAC en décembre 2021⁴⁹). Ces émissions supplémentaires sont pour autant bien comptabilisées dans d'autres secteurs par la SNBC.

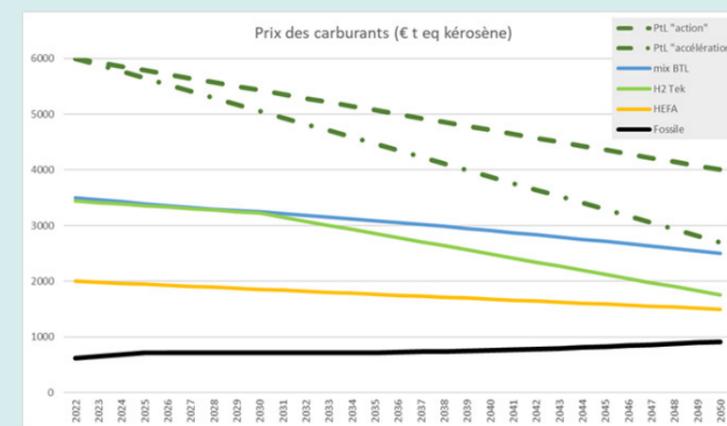
Estimation du trafic selon le prix du transport aérien résultant des ambitions de décarbonation :

Le modèle développé de la DGAC pour mesurer l'effet prix tient compte du prix du billet d'avion et de son influence sur la demande en termes de trafic aérien. Il est basé sur des valeurs d'élasticité au prix issues de travaux historiques de la DGAC et qui vont de -0,9 pour le trafic métropolitain (c'est-à-dire qu'une baisse de 10% du prix induit une hausse de 9% de la demande) à -0,6 pour le trafic international (y compris UE) ou Outre-Mer. Le prix des CAD est un élément déterminant du prix.

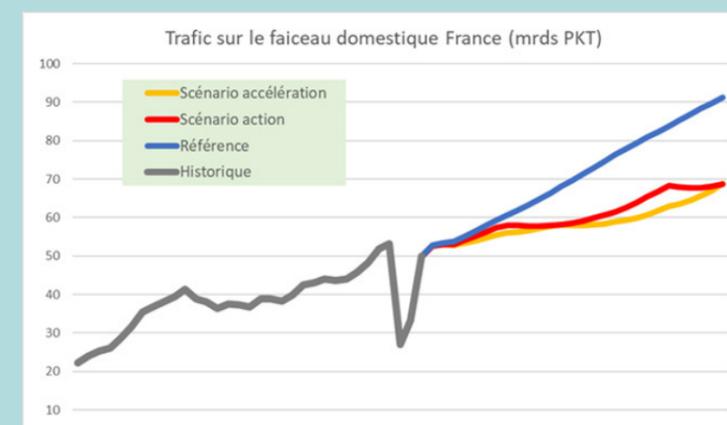
Sur un périmètre donné, pour réaliser une simulation tenant compte d'une évolution du trafic avec effet prix, il est nécessaire de faire converger les modèles ONERA et DGAC selon la méthode suivante :

- les travaux des GT fournissent les hypothèses quant aux renouvellements de flottes, incorporation de CAD, prix des carburants, prix des quotas ETS et compensations.
- le modèle Onera évalue la consommation au cours du temps en injectant les hypothèses sur les technologies avions (renouvellement, nouveaux programmes), les opérations le schéma d'incorporation de CAD ainsi qu'une hypothèse de croissance du trafic.
- le modèle DGAC évalue la consommation, les prix et le trafic au cours du temps en injectant les hypothèses sur le schéma d'incorporation de CAD, les tarifs des carburants et compensations, ainsi qu'une hypothèse d'évolution de l'efficacité énergétique des flottes.
- les résultats d'efficacité de la flotte obtenus par ONERA sont injectés dans le modèle DGAC tandis que les résultats d'évolution du trafic obtenus par DGAC sont injectés dans le modèle ONERA. Une courte itération permet ensuite de faire converger les 2 modèles.

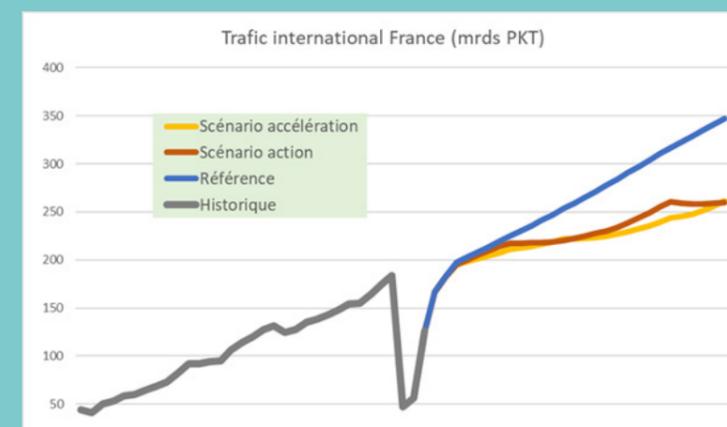
Les hypothèses de prix des carburants retenues sont :



Sur le périmètre France, avec l'effet prix, la croissance du trafic passe de 1,8 % par an à 0,8 % par an :



Sur le périmètre International, avec l'effet prix, la croissance du trafic passe de 2,1 % par an à 1,1 % par an :



⁴⁸ Official Aviation Guide, www.oag.com

⁴⁹ <https://aerorecherche.corac.com/wp-content/uploads/2022/01/decarbonation-corac-rapport-complet-decembre2021.pdf>

12.6 ANNEXE 6 : HYPOTHÈSES PRINCIPALES ET MÉTHODOLOGIE DE CALCUL

Ces travaux « Article 301 » ont rassemblé une vingtaine d'entreprises, associations professionnelles, instituts de recherche ou administrations durant l'année 2022, représentant l'ensemble des acteurs de la chaîne de valeur. Dans le cadre des différents groupes de travail qui se sont réunis, pour chaque levier, des scénarios « Technologies », « Energies » et « Opérations », cités ci-après, ont été construits collectivement qui, une fois assemblés ont permis de constituer les scénarios « Action » et « Accélération » décrits dans le document.

Modélisation de la flotte

La flotte est initialement distribuée par âge pour l'année 2018, pour 5 classes d'avions : régional (turbopropulseur), régional (jet), court-moyen courrier (SMR), long-courrier (LR), très gros porteur (VLA) en fonction des informations fournies par les compagnies aériennes représentatives.

Chaque avion effectue annuellement un nombre de vols sur une distance et pour un nombre de passagers transportés moyens, établis par analyse de la base de données OAG⁵⁰. Ces caractéristiques sont différenciées selon le périmètre considéré.

Consommation unitaire

Un modèle d'avion de référence (par exemple l'Airbus A320 neo pour la catégorie des SMR) représentant l'état de l'art 2018 est associé à chaque classe. Sa consommation de carburant est calculée d'après les tables de de l'OACI⁵¹ pour la mission moyenne qu'il effectue à chaque vol. La consommation des générations antérieures (+ x %) ou postérieures (-y %) qui coexistent au sein de la flotte est définie respectivement selon les progrès technologiques enregistrés par le passé ou selon les hypothèses de gain futurs qui font l'objet du scénario « Technologies »⁵².

Consommation de la flotte

La flotte se compose initialement d'un mélange d'avions de différentes générations. La consommation totale de carburant est évaluée catégorie par catégorie d'avion, génération par génération puis sommée. Elle est ensuite modulée par la mise en œuvre du scénario « Opérations », qui traduit les gains attendus par l'amélioration des opérations au niveau du système de transport aérien.

Évolution de la flotte

La flotte évolue en fonction de la demande et du renouvellement. Une croissance de la demande se traduit mécaniquement par la mise en service d'avions de la dernière génération disponible en date. Le renouvellement peut être assuré soit en définissant un âge de retrait du service, soit en prescrivant un taux de renouvellement, qui varient annuellement, soit en définissant un programme de renouvellement spécifique fourni par les compagnies aériennes.

Hydrogène

La date d'entrée en service d'un avion à hydrogène est définie par le scénario « Technologies ». La proportion d'avions à hydrogène par rapport à l'ensemble des nouveaux avions entrant en service est définie annuellement. La valeur a été fixée à 50%. Une surconsommation énergétique de 15% est prise en compte pour l'avion à hydrogène compte tenu des contraintes induites par l'emport de l'hydrogène, fluide peu dense stocké à température cryotechnique. La consommation totale d'hydrogène liquide est pilotée par les performances technologiques (efficacité) et la pénétration de la technologie hydrogène. S'agissant de l'évaluation des besoins en hydrogène pour le transport aérien, à l'hydrogène utilisé pour la propulsion directe ou les piles à combustible, s'ajoute l'hydrogène entrant dans le procédé de production des e-fuels (PtL et e-BtL).

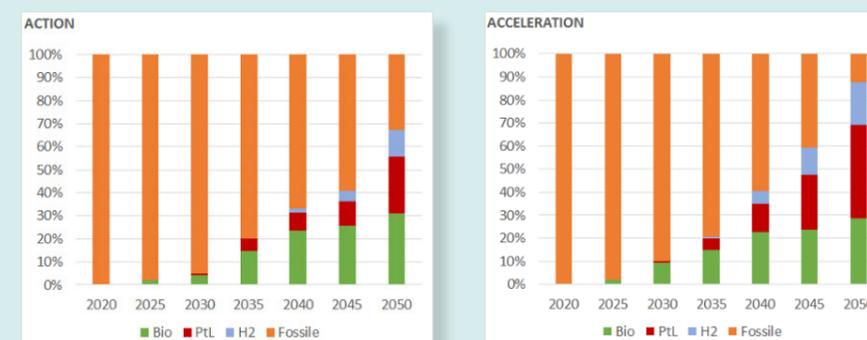
Incorporation des CAD

Les carburants alternatifs sont introduits via un pourcentage d'incorporation défini par le scénario « Energies » qui s'applique aux avions conventionnels. Ce taux qui varie annuellement et qui peut être différencié par classe d'avion s'applique aux besoins globaux de combustible ôtés de la quantité d'hydrogène consommée.

Les CAD sont décomposés en deux sous-catégories, les biocarburants et les électrocarburants. Les biocarburants sont encore décomposés proportions relatives d'HEFA, de BtL, et d'e-BtL. L'HEFA contrairement aux autres types de CAD est introduit en masse (kt par an).

Synthèse des taux d'incorporation de CAD considérés dans les scénarios de décarbonation:

% CAD (dont PTL%)	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Scénario « Action »	2% (0%)	6% (0,7%)	20% (5%)	32% (8%)	38% (11%)	63% (28%)
Scénario « Accélération »	2% (0%)	10% (0,7%)	20% (5%)	37% (13%)	54% (27%)	85% (50%)
Scénario « Accélération bis »	2% (0%)	10% (0%)	20% (5%)	37% (8%)	54% (11%)	85% (28%)



Calcul des émissions

La notion d'« émissions » fait référence aux émissions de CO₂ et n'inclut pas les émissions d'autres gaz à effet de serre (N₂O, CH₄ par exemple) généralement présentées sous la forme de CO₂ équivalent (CO₂e), dont la contribution est de l'ordre de 1%⁵³.

Les émissions, sauf mention contraire, s'entendent sur la phase d'utilisation des aéronefs uniquement (combustion). L'indice d'émission de référence est 3,16 kgCO₂/kg_{carburant}⁵⁴ (73 gCO₂/MJ ou 263 gCO₂/kWh).

En cohérence avec les conventions utilisées dans le cadre de la Stratégie Nationale Bas Carbone, les émissions associées à l'usage de carburants alternatifs sont considérées comme nulles (NB : elles apparaîtront dans l'inventaire des secteurs les produisant).

Évolution de la demande

La croissance de la demande constitue un paramètre d'entrée qui diffère selon le périmètre géographique considéré. Elle est exprimée en pourcentage d'évolution par rapport à l'année précédente du nombre de passager.kilomètre réalisé dans l'année (PKT ou RPK). Elle inclut l'effet des prix des différents combustibles.

Estimation des besoins en ressources primaires et énergie

Les estimations sont réalisées à partir des volumes de combustible qui appellent différentes ressources (électricité décarbonée et biomasse). Les besoins sont calculés à partir des hypothèses de rendement de chaque filière considérée. À titre indicatif, des correspondances entre les besoins calculés et les installations de production d'électricité bas carbone peuvent être fournies, en utilisant les données du RTE⁵⁵.

⁵⁰ Official Airline Guide

⁵¹ https://www.icao.int/environmental-protection/CarbonOffset/Documents/Methodology%20ICAO%20Carbon%20Calculator_v11-2018.pdf

⁵² Voir par exemple <https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/Technology-roadmap-2050.pdf>

⁵³ par exemple <https://www.citepa.org/fr/secten/>

⁵⁴ facteur d'émission du CO₂ égal à 3,16 (selon l'annexe 16 de la convention OACI et la base Carbone 2020 de l'ADEME)

⁵⁵ <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques>

Grandeurs de référence et valeurs utilisées

Type de donnée	Valeur	Note
Puissance des installations		
Puissance réacteur nucléaire (MW)	1650	EPR
Puissance éolienne marine (MW)	10	
Puissance éolienne terrestre (MW)	3	
Puissance centrale solaire (2020)	1200	Noor Abu Dhabi https://www.ewec.ae/en/power-plants/noor-abu-dhabi
Rendements ⁵⁶		
Rendement électrolyseur (2050)	0,8	Par exemple IEA The Future of Hydrogen - Seizing Today's opportunities, 2019
Rendement liquéfaction H2 (2050)	0,84	Projet Européen IdealHY
Rendement massique Biomasse FT	0,18	GT « Energies » (communication IFPEN)
Rendement massique AtJ	0,12	WEF, World Economic Forum, Clean Skies for Tomorrow: Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation, 2020.
Rendement massique HEFA	0,9	
Rendement énergétique PtL	0,46	ENERGIA d'après littérature, par ex. Schmidt et al., Power-to-Liquids as Renewable Fuel Option for Aviation: A Review - Chem. Ing. Tech. 2018, 90, No. 1-2, 127-140 Solers A. - Role of e-fuels in the European transport system. Literature review – Concawe Report n°. 14/19, 2019.
Rendement massique e-BtL	0,36	GT « Energies » (communication IFPEN)
H2 supplémentaire/kg kéro eBio	0,393	
Facteurs de charge, taux d'occupation		
Taux occupation réacteur nuc.	0,7	Recalculé d'après la moyenne observée en 2019 https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-nucleaire-en-chiffres
Facteur de charge éolienne marine	0,4	Différentes sources, dont IRENA, Renewable Power Generation Costs in 2020, 2021.
IRENA, Renewable Power Generation Costs in 2020, 2021.	0,25	
Occupation centrale solaire	0,15	

Proportion SAF/Co-produits		
SAF AtJ/(SAF AtJ+co-produits)	0,77	WEF, World Economic Forum, Clean Skies for Tomorrow: Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation, 2020.
SAF FT/(SAF FT+co-produits)	0,7	GT « Energies »
SAF HEFA/(SAF HEFA+co-produits)	0,8	
SAF eBio/(SAF eBio+co-produits)	0,7	
PtL/(SAF + co-produits)	0,7	
Grandeurs de référence		
PCI Jet-A1	43,2 MJ/kg	Diffère de celui utilisé par le CITEPA de 44 MJ/kg (Recommandation France) et 44,1 MJ/kg (recommandation Europe Decision 2009/339/CE)
PCI H2	120 MJ/kg	
PCI biomasse (résidus oléagineux)	37 MJ/kg	
PCI Lignocellulose	19 MJ/kg	
PCI Déchets ménagers	17 MJ/kg	
Masse volumique Jet-A1	0,8 g/cm3	ADEME, base carbone circulaire n°9501 du 28 déc 2004
Indices d'émission		
EICO ₂ (combustion Jet fuel)	3,16 kg/kg	Aviation and the Global Atmosphere, 1999 ADEME, base Carbone, OACI
EICO ₂ (SAF)	0	Par convention
EICO ₂ (H ₂)	0	Par combustion et convention
EIN ₂ O	0	Non considérés (de l'ordre de 1% du CO ₂)
EICH ₄	0	
Indices d'émissions (pour calcul « Amont »)		
EICO2 (cycle de vie Jet-Fuel)	3,84 kg/kg ou 89 g/MJ	Annex 16, Environmental Protection, Vol. IV, — Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, 2018
EICO2 biofuels (pour le calcul sur le cycle de vie) -Fischer-Tropsch, résidus agricoles	7,7 g/kg soit 91% de décarbonation	CORSIA, valeurs Core LCA
EICO2 biofuels HEFA UCO	13,9 g/kg (84%)	https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_Eligible_Fuels/ICAO%20document%2006%20-%20Default%20Life%20Cycle%20Emissions%20-%20June%202022.pdf
EICO2 PtL, e-BtL, LH2	Variables	Calculés d'après les hypothèses de rendement, le scénario électrique sélectionné (RTE) et les données d'émissions des différentes sources de production d'électricité décarbonée.

⁵⁶ Les rendements s'entendent par rapport à l'ensemble des carburants produits, donc SAF + co-produits

Caractéristiques des missions moyennes (OAG)

Périmètre Domestique : trafic intra-métropole, métropole-outremer, intra-outremer

Classe	Vols	PAX par vol	km/vol	% Vols
Total	326 939	104	871	100,0%
R1	81 957	44	334	25,1%
R2	72 193	68	648	22,1%
SMR	158 690	132	700	48,5%
LR	14 080	326	7060	4,3%
VLA	19	369	9488	0,0%

Périmètre international : vols au départ de la métropole et des outremer vers un autre pays.

Classe	Vols	PAX par vol	km/vol	% Vols
Total	479 329	141	1935	100,0%
R1	15 200	49	505	3,0%
R2	60 588	77	850	12,1%
SMR	339 075	138	1302	68,0%
LR	58 888	226	6576	11,8%
VLA	5 578	396	7076	1,1%

Investissements

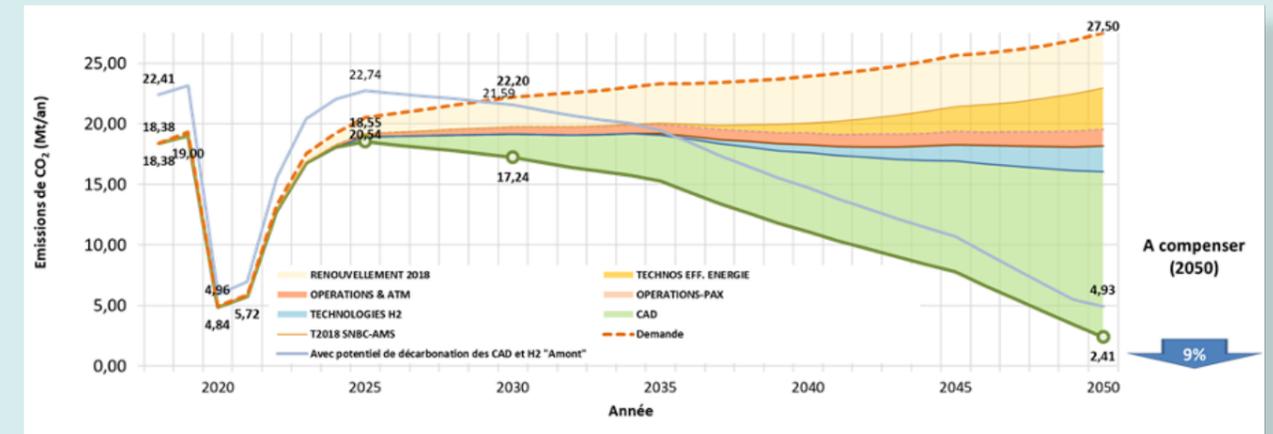
	CAPEX (M€/kt/an)
HEFA	1
BTL	10
E-BTL	11
PTL	18
LH2	Fonction du mix énergétique électrique

*Période d'amortissement 20 ans

12.7 ANNEXE 7 : TRAJECTOIRES DE DÉCARBONATION INTÉGRANT LES ÉMISSIONS CO2 SUR LE CYCLE DE VIE

Les trajectoires ci-dessous intègrent les émissions de CO2 calculées sur le cycle de vie (courbe bleu) pour le Scénario « Accélération » :

Périmètre international :



Périmètre domestique :

