

Analyse &
propositions
du CORAC

DÉCARBONATION

DU TRANSPORT AÉRIEN

Décembre 2021



SOMMAIRE

P. 3	Introduction
P. 4	Impact du transport aérien sur le climat
P. 5	Les leviers de réduction du bilan carbone de l'aérien
P. 5	Les progrès technologiques
P. 5	Les leviers opérationnels
P. 6	La transition vers des carburants d'origine non fossile
P. 8	Les mesures économiques
P. 9	La feuille de route du Corac
P. 10	La trajectoire carbone proposée par le Corac
P. 10	Définition et principes
P. 10	Hypothèses de modélisation
P. 14	Résultats selon deux scénarios
P. 16	Discussion
P. 19	Comparaison avec les principales études publiées
P. 22	Comparaison avec les projections globales du GIEC
P. 24	Conclusion
P. 26	Annexe : Calcul sur le périmètre France (vols intérieurs métropole et DOM-TOM)

INTRODUCTION

Le transport aérien connaît avec la pandémie de Covid-19 une crise profonde et durable, dont les conséquences se feront sentir pendant une grande partie de la décennie. Dans le même temps, l'urgence climatique se fait plus pressante, comme le souligne le dernier rapport du GIEC⁽¹⁾, paru en août 2021, et la réduction de l'impact climatique du secteur aérien est aujourd'hui la priorité absolue de l'industrie aéronautique qui jouera pleinement son rôle pour tenir les objectifs de l'Accord de Paris.

Les progrès technologiques et opérationnels ont permis au cours des trente dernières années une division par deux de la consommation de kérosène et donc des émissions de CO₂/passager/kilomètre. 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 a calculé une empreinte de 66,6 g de CO₂/passager/km. Ces chiffres montrent les efforts de R&D déjà accomplis. Mais face aux enjeux climatiques, il est nécessaire d'aller plus loin et de développer un transport aérien décarboné mettant en œuvre des ruptures technologiques majeures.

Les études prévisionnelles sur la décarbonation de l'aérien, souvent assez complexes à analyser et à comparer, font l'objet d'un retentissement médiatique croissant et s'inscrivent dans le contexte d'une multiplication d'annonces politiques autour de cibles carbone de plus en plus ambitieuses (Accord de Paris, Stratégie nationale bas-carbone (SNBC), Green Deal européen, etc.), avec en particulier les objectifs de « zéro émission nette » en 2050, annoncés par l'UE.

Il est donc apparu essentiel pour le Corac (Conseil pour la recherche aéronautique civile) d'apporter une analyse argumentée et didactique de l'évolution des émissions de CO₂ de l'aérien, sur la base de travaux indépendants et référencés. Cette analyse prospective s'appuie sur les simulations des différentes trajectoires de décarbonation, développées depuis un an par l'Onera dans le cadre du Corac. Il s'agit de démontrer à l'échelle géographique pertinente, c'est-à-dire mondiale, quelle pourra être l'évolution du CO₂ émis par l'aviation selon différents scénarios concernant

les niveaux de trafic, les technologies, les opérations, l'incorporation de carburants durables, etc., sur les prochaines décennies, en les comparant aux cibles CO₂ pertinentes en 2050. Cette approche est par essence évolutive, destinée à accompagner la stratégie de recherche du Corac en fournissant à ses acteurs privés et publics un outil d'évaluation de la pertinence et de l'efficacité des solutions technologiques, opérationnelles et énergétiques, et de leur calendrier de mise en œuvre.

Un complément d'analyse est proposé sur le périmètre France en Annexe de ce rapport.

(1) Rapport IPCC Assessment Report 6, WG1, août 2021 : Changements climatiques 2021 : les bases scientifiques.

IMPACT DU TRANSPORT AÉRIEN SUR LE CLIMAT

Les effets de l'aviation sur le climat peuvent être regroupés en trois grandes catégories, avec des niveaux de connaissance très différents.

- **LE DIOXYDE DE CARBONE (CO₂)**

Gaz à effet de serre, chimiquement inerte, dont la durée de vie dans l'atmosphère est de l'ordre de deux cents ans. C'est ce terme qui présente par nature le moins d'incertitude : pas de réaction chimique, proportionnalité directe au kérosène consommé. L'article de Lee et al. [2021]², qui fait référence sur le sujet dans la communauté scientifique, indique que les émissions de CO₂ dues à l'aviation civile représentaient **2,4 % du CO₂ anthropique mondial en 2018**.

- **LES AUTRES COMPOSANTS PRODUITS PAR LA COMBUSTION**

(principalement les oxydes d'azote NOx et des particules fines). Les NOx sont impliqués dans une série de réactions chimiques qui conduisent à une production d'ozone et à une destruction du méthane présent dans l'atmosphère. Ces deux effets agissent en sens opposé, et de fortes incertitudes perdurent sur le niveau net de l'impact sur le climat.

- **LES EFFETS SUR LA NÉBULOSITÉ**

Selon les conditions d'humidité locales et en présence d'aérosols également émis par la combustion, des traînées de condensation peuvent se former. Celles-ci peuvent évoluer en cirrus, de fins nuages d'altitude d'une durée de vie de quelques heures à quelques jours. Des incertitudes très importantes demeurent sur l'estimation de leur effet sur le climat, considéré pour l'ensemble traînées de condensation/ cirrus comme contributeur net positif au réchauffement. Enfin, les aérosols émis lors de la combustion ou formés dans le panache peuvent venir altérer les nuages hauts ou renforcer la formation des nuages bas plus épais, avec pour ces derniers un effet refroidissant. Aucune estimation fiable n'est disponible à ce jour concernant ces effets récemment identifiés.

La quantification de l'impact des effets hors CO₂ implique de recourir à des modèles de climat globaux ainsi qu'à des modélisations physiques complexes, éventuellement appuyées par des travaux expérimentaux. Les études les plus récentes concluent que les effets cumulés du CO₂ émis par l'aviation entre 1940 et 2018 représentent 1,6 % du forçage radiatif³ dû au CO₂ d'origine humaine. **Le total des effets CO₂ et non CO₂ représenterait⁴ 3,5 % de l'ensemble du forçage radiatif anthropique** (causé par le CO₂ et tous gaz à effet de serre, nébulosité, aérosols, etc.). Il y a consensus des scientifiques pour constater que, **à long terme**, du fait des constantes de temps des mécanismes physiques impliqués et des temps de mise à l'équilibre de ces processus dans le système global, **c'est bien l'effet du CO₂ qui reste prépondérant. Néanmoins, ces effets non CO₂, loin d'être négligeables à court terme, font l'objet de recherches approfondies depuis près de trente ans.** Même si de nombreuses incertitudes persistent, on peut supposer que les progrès accomplis dans la compréhension de ces mécanismes, joints à l'augmentation des capacités de simulation numérique, permettront de parvenir, au cours de la décennie, à mieux en déterminer l'importance.

(2) The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018, Atmospheric Environment - <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231020305689>

(3) Perturbation de l'équilibre du système climatique, conduisant, si ce forçage est positif, à une augmentation de température

(4) Si l'estimation de la part de l'aérien dans le forçage radiatif dû au CO₂ est bien connue, il demeure une incertitude très significative (près de 50 %) sur le total des effets CO₂ et non CO₂.

Un programme de recherche « Aviation et Climat » financé par la Direction générale de l'aviation civile (DGAC) a été créé en 2021 et rassemble une trentaine de chercheurs de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) à Sorbonne Université et de l'Onera, afin de progresser dans la connaissance de ces effets⁵.

Dans l'intervalle, l'industrie aéronautique doit mener en priorité les travaux de décarbonation de l'aviation, appuyés sur une connaissance précise des émissions de CO₂, tout en maintenant ouvertes des options technologiques orientées vers les termes non CO₂ : conception des

moteurs pour minimiser certaines émissions, stratégies opérationnelles (évitement des zones de formation préférentielle des traînées de condensation et cirrus induits), déploiement massif de carburants alternatifs dont l'usage réduirait certains effets non CO₂⁶.

(5) www.ipsl.fr/sciences-societe/climaviation

(6) Étude NASA-DLR intitulée « Cleaner burning aviation fuels can reduce contrail cloudiness », publiée dans la revue Nature, www.nature.com/articles/s43247-021-00174-y

LES LEVIERS DE RÉDUCTION DU BILAN CARBONE DE L'AÉRIEN

1. Les progrès technologiques

La consommation unitaire, c'est-à-dire par passager/km, a été divisée par cinq depuis 1960 (par deux sur les trois dernières décennies) principalement grâce aux technologies moteurs, à l'allègement des avions et à l'optimisation de l'aérodynamique et des systèmes embarqués. Une rupture technologique majeure a été apportée à la fin des années 1960 par le moteur double flux. Les décennies suivantes ont été marquées par une optimisation continue des performances, basée sur la réduction des émissions polluantes, réglementées dès 1976, et, comme cela a été clairement démontré, sur le souci essentiel de la sécurité des vols. Il est clair aujourd'hui que le transport aérien doit faire le choix des ruptures sur deux axes distincts et complémentaires :

- D'une part, **l'ultra-frugalité énergétique**, qui implique des innovations importantes par rapport à l'existant : nouvelles motorisations impliquant un taux de dilution plus élevé, modifications importantes de la voilure permettant d'accroître la portance et de diminuer la traînée, allègement des structures,

usage accru de l'énergie électrique pour les systèmes propulsifs (appareils hybrides-électriques) et non propulsifs, etc. Cet axe d'ultra-frugalité est également essentiel pour la viabilité des solutions dites « zéro carbone » qui impliqueront toutes l'usage de sources ou de vecteurs d'énergie de coût probablement plus élevé que le kérosène d'origine fossile : diminuer la consommation unitaire des futurs appareils est donc une donnée majeure du problème, quel que soit le combustible utilisé.

- D'autre part, **l'objectif de neutralité carbone**, qui implique de changer de source et/ou de vecteur d'énergie décarbonée pour supprimer les émissions de CO₂ d'origine fossile, en allant vers l'usage de carburants de substitution durables ou d'hydrogène, avec dans ce dernier cas des innovations de rupture pour l'avion (configuration, architecture du système propulsif, moteur, stockage du combustible) ainsi que sur les infrastructures de ravitaillement.

2. Les leviers opérationnels

L'amélioration des opérations au sol et en vol constitue un premier levier de réduction de la consommation. Un ensemble d'initiatives est en cours en ce qui concerne la gestion du trafic aérien dans le cadre du programme « Ciel unique européen » et son volet de R&T SESAR.

Un premier enjeu concerne l'optimisation globale du trafic avec, par exemple, l'évitement des trajectoires d'attente. Parmi les pistes d'optimisation plus spécifiques, on peut relever :

- les phases de montées continues, les descentes au ralenti ;
- le « Green Taxiing » qui consiste à déployer des solutions de roulage et de parking peu émettrices : moteurs électriques montés dans les trains d'atterrissage, utilisation d'un réacteur sur deux en phase de roulage ;
- l'usage de bornes électriques d'alimentation permettant de s'affranchir de l'APU⁷ au sol, l'utilisation de véhicules de tractage électriques, etc.

D'autres options de réduction de la consommation, comme l'optimisation du couple vitesse/altitude ou le vol en formation, peuvent également être envisagées. Un potentiel de réduction de la consommation unitaire de l'ordre de 10 à 15 % d'ici 2050 est évoqué selon

différentes sources, dont l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI).

Des améliorations du taux d'occupation sont également possibles. Un meilleur remplissage permet en effet de réaliser une mission globale de transport en passagers par kilomètre en utilisant moins d'avions. L'augmentation du taux de remplissage trouve ses limites dans la capacité de l'avion utilisé et les contraintes d'exploitation liée à la demande.

3. La transition vers des carburants d'origine non fossile

Une première catégorie de ces carburants d'aviation durables (CAD)⁹ recouvre l'ensemble des carburants dits « drop-in », dont la composition chimique de base est proche de celle du kérosène et donc sont miscibles avec ce dernier : il peut s'agir de carburants issus de la biomasse, ou synthétisés en utilisant du dioxyde de carbone et de l'hydrogène produit grâce à une électricité décarbonée (carburants synthétiques ou électrocarburants ou e-fuels ou Power-to-Liquid – PtL – selon les appellations). Dans la seconde catégorie « non drop-in » se trouve l'hydrogène, qui implique une refonte complète des appareils et des infrastructures au sol.

CARBURANTS PRODUITS À PARTIR DE BIOMASSE

Le principe est ici d'utiliser une matière première (végétaux, algues) dont le développement s'est fait par des processus biochimiques impliquant la captation du CO₂ présent dans l'atmosphère. Trois grandes catégories de matières premières peuvent être utilisées avec différents procédés de transformation chimique :

- la biomasse glucidique provenant de cultures riches en sucres et en amidon ;
- les oléagineux riches en lipides (colza, soja, etc.) ou la biomasse lipidique, produite par exemple à partir de microalgues ;
- la biomasse cellulosique présente dans les structures fibreuses des plantes (arbres, herbes, résidus agricoles ou forestiers) ainsi que les déchets solides issus de la collecte des ordures ménagères.

Sept filières de biocarburant sont déjà certifiées¹⁰ et une vingtaine de filières supplémentaires sont en cours de certification. **Ces biocarburants peuvent d'ores et déjà être utilisés pour des vols commerciaux de façon totalement transparente à des taux d'incorporation pouvant aller actuellement jusqu'à 50 %. Des travaux sont en cours pour monter ce taux jusqu'à 100 %.**

Les performances environnementales de ces différentes filières, en particulier les émissions de GES sur le cycle de vie, dépendent des procédés de conversion, des biomasses utilisées et de leurs conditions de production. Il convient en particulier de veiller aux impacts liés aux changements d'usage des sols, directs ou indirects, induits par la production de la biomasse, ceux-ci pouvant engendrer des émissions de CO₂ très importantes du fait de la libération du carbone contenu dans la biomasse préexistante ou séquestrée dans les sols. Ceci conduit actuellement à promouvoir les biocarburants issus des déchets et résidus.

(7) APU : moteur auxiliaire.

(8) En contrepartie, la consommation augmente sensiblement puisque la masse emportée est plus importante mais la surconsommation n'obère pas le bénéfice de l'amélioration du remplissage.

(9) En anglais, sustainable aviation fuels (SAF).

(10) Approbation pour un usage aéronautique par l'ASTM, organisme de normalisation qui rédige et produit des normes techniques concernant les matériaux, les produits, les systèmes et les services.

Des processus de certification environnementale ont été mis en place au niveau international et mis en application au sein de l'OACI. L'enjeu est maintenant d'assurer la viabilité économique et la durabilité de ces filières (notamment leur impact sur l'usage des sols et la biodiversité) et de les déployer à grande échelle.

La loi de finances actuelle fixe un objectif d'incorporation de 1 % de biocarburants avancés en 2022. La feuille de route nationale¹¹ introduit une trajectoire cible pour la substitution à court terme du kérosène par des biocarburants durables : 2 % en 2025, 5 % en 2030, afin d'assurer la cohérence avec la Stratégie nationale bas-carbone¹² qui fixe un objectif de long terme de 50 % en 2050.

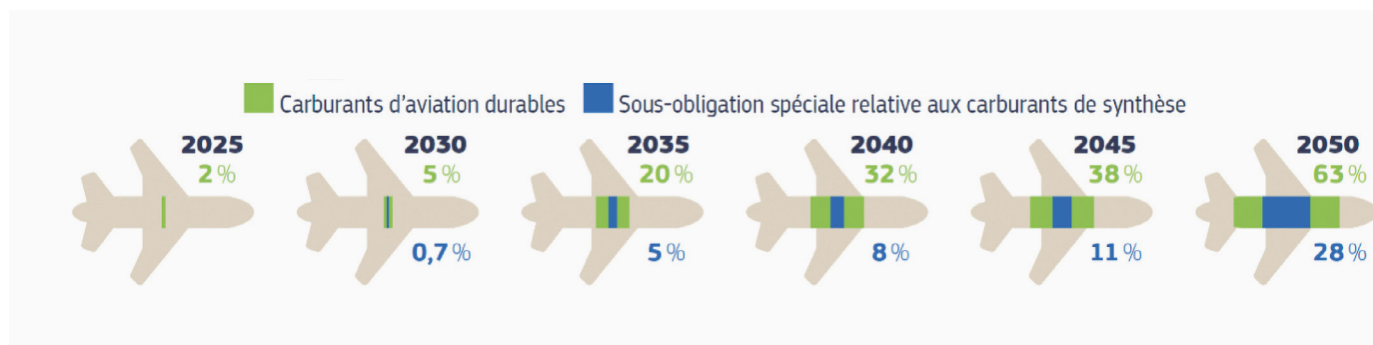
LES ÉLECTROCARBURANTS

Les filières de production d'électrocarburants (ou PtL) utilisent de l'électricité, du CO₂ et de l'eau pour produire des hydrocarbures de synthèse de composition semblable à celle des biocarburants. L'eau et le CO₂ (capté dans l'atmosphère ou dans les procédés industriels) sont dissociés en hydrogène et monoxyde de carbone puis des hydrocarbures sont synthétisés à partir de ce mélange (par le procédé Fischer-Tropsch, par exemple). Ces procédés présentent de multiples avantages en termes de durabilité et de disponibilité. Les émissions des carburants PtL sont nulles sur le cycle de

vie (aux émissions liées à la création des infrastructures près), si les procédés de fabrication de l'hydrogène et de traitement ultérieur utilisent des sources d'énergie 100 % décarbonées. Par ailleurs, les carburants PtL ne sont pas soumis aux contraintes de durabilité de la biomasse. Cependant, les e-fuels n'ont pas encore atteint le stade de la maturité industrielle. Les verrous technologiques principaux concernent la captation du CO₂ dans le cas de l'utilisation de CO₂ atmosphérique, et sa réduction. Par ailleurs, pour concrétiser leur potentiel, il est nécessaire de disposer d'une électricité décarbonée en quantité suffisante et à un coût attractif.

Dans le projet de règlement « ReFuelEU Aviation¹³ » de la Commission européenne, publié en juillet 2021, des obligations d'incorporation de biocarburants sont proposées avec des sous-mandats pour les électrocarburants (voir schéma ci-dessous).

Par ailleurs, les États-Unis ont annoncé en septembre 2021 un objectif de 3 milliards de gallons en 2030 de carburants d'aviation durables, puis une production permettant d'atteindre 100 % de la demande (aviation domestique et vols internationaux au départ des États-Unis) en 2050¹⁴.



L'HYDROGÈNE

L'intérêt de l'hydrogène (H₂) est qu'il s'agit d'un combustible particulièrement énergétique, dont la combustion n'émet pas de CO₂ et que l'on sait d'ores et déjà produire sans émission par le procédé d'électrolyse de l'eau à partir d'électricité décarbonée.

L'hydrogène permet donc potentiellement d'accéder au « zéro émission ». Cependant, si sa densité d'énergie par unité de masse est trois fois supérieure à celle des hydrocarbures, sa densité d'énergie par unité de volume est quatre fois plus faible que celle du kérosène, même sous forme liquide à -253 °C. L'utilisation de l'hydrogène liquide cryogénique présente plusieurs

verrous technologiques et opérationnels que les projets engagés à ce jour par les acteurs concernés du Corac se proposent d'explorer, notamment :

(11) www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2020.01.27_DP_EB_JBD_Biocarburants.pdf

(12) www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc

(13) ec.europa.eu/info/sites/default/files/refueleu_aviation_-_sustainable_aviation_fuels.pdf

(14) www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2021-11/Aviation_Climate_Action_Plan.pdf

- le développement et le déploiement de solutions de stockage, de transport et de distribution au sol ou à bord ;
- la nécessité d'opérer à des températures cryotechniques (développement de briques technologiques dédiées, développement de matériaux adaptés...);

- le développement d'ensembles propulsifs complets intégrant le conditionnement de l'hydrogène et sa conversion (pile à combustible, turbine dédiée) ;
- des problématiques de sécurité spécifiques compte tenu de son inflammabilité et de sa propension à fuir.

4. Les mesures économiques

SYSTÈME EUROPÉEN ETS (EMISSION TRADING SCHEME)

L'UE a intégré l'aviation en 2012 dans le **système ETS d'échange de quotas d'émissions de gaz à effet de serre**. Le mécanisme, basé sur le marché du carbone, s'applique aux vols intra-européens. Des quotas gratuits d'émissions sont alloués à chaque compagnie aérienne proportionnellement à son activité de 2010 tandis que le reste est mis aux enchères sur le marché carbone. Le projet de révision de l'ETS Aviation en cours de discussion vise à supprimer progressivement les quotas gratuits d'ici à 2027 afin de créer un signal de prix plus fort et de stimuler la réduction des émissions, dans le cadre des nouveaux objectifs climatiques contraignants de l'UE (-55 % d'émissions entre 1990 et 2030 et la neutralité carbone à horizon 2050).

SYSTÈME CORSIA MIS EN PLACE PAR L'OACI

Le **système de compensation CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation)** adopté en 2016 par l'Assemblée de l'OACI doit contribuer à l'atteinte de l'objectif de stabilisation des émissions que la communauté internationale s'est fixé. Il s'agit de compenser l'augmentation des émissions de CO₂ des vols internationaux au-delà du niveau atteint en 2019 (niveau d'avant-crise du covid) par des crédits carbone générés par le financement de projets conduisant à des réductions d'émissions (projets de construction d'une centrale hydraulique ou solaire, programmes de reforestation...).

Le mécanisme prévoit plusieurs phases de mise en œuvre : une première phase entre 2021 et 2026 sur la base du volontariat (ceci correspond actuellement à plus de 100 États associés, soit 70 % du trafic aérien international), puis une seconde phase à partir de 2027 où le dispositif s'appliquera de façon universelle à l'exception d'un certain nombre d'États exemptés en raison de leur niveau de développement, de leur

insularité et/ou de leur faible poids dans le trafic mondial. CORSIA a été adopté jusqu'en 2035, en attendant l'entrée en service de ruptures technologiques et l'utilisation massive de carburants alternatifs durables.

COMPENSATIONS VOLONTAIRES

Par ailleurs, **des compagnies aériennes choisissent de compenser volontairement certains de leurs vols**. Air France en avait ainsi décidé fin 2019 pour ses vols domestiques. La nouvelle loi « Climat et résilience » d'août 2021 exige une compensation carbone obligatoire des vols intérieurs par les compagnies (50 % en 2022 ; 70 % en 2023 ; 100 % en 2024) avec un encadrement des types de crédits carbone utilisés et en privilégiant les projets d'absorption du carbone situés en France ou dans l'UE.

LA FEUILLE DE ROUTE DU CORAC

En mai 2020, la filière française a proposé un programme conçu pour accélérer la recherche et la préparation de l'avion vert, connecté et digital, dès le début de la prochaine décennie, avec une vision nouvelle englobant les différents segments de marché et entraînant toute la filière dans cette démarche d'innovation.

Le plan de relance annoncé en juin 2020 par le gouvernement a validé cette volonté de ruptures technologiques majeures sur un horizon rapproché et l'accélération et l'amplification des travaux du Corac, avec les grandes options technologiques – sobriété et utilisation d'énergies décarbonées, mise en place d'opérations économes en carburant – qui étaient déjà en germe dans les programmes engagés.

Notre objectif implique des ruptures technologiques différentes selon les types d'avions :

- Le recours aux **batteries, éventuellement aux piles à combustible**, ne sera possible que pour les petits appareils, sur de courtes distances, et le Corac travaille ici sur des solutions hybrides-électriques, en y incluant **l'aviation générale et les hélicoptères**. L'application de ces technologies pour des voilures tournantes peut ouvrir vers les nouveaux marchés de mobilité urbaine et, par ailleurs, les démonstrations en vol rapides seront un catalyseur d'extension pour les puissances plus importantes. Le Corac travaille sur ce sujet en vue d'une application sur un hélicoptère disruptif léger.

- **Pour les courts-moyens courriers (SMR-Short Medium Range)** est étudiée une **configuration ultra-sobre** offrant une rupture sur la consommation et dont le développement devrait être lancé vers 2025. L'objectif est ici d'atteindre un gain de 30 % par rapport à la génération précédente, en combinant aux progrès de motorisation¹⁵ des améliorations de l'aérodynamique de l'appareil et une réduction de la masse. On cherchera en particulier l'amélioration des performances des moteurs thermiques (consommation, masse, émissions, bruit) en développant de nouvelles architectures de moteurs ; moteurs à très grands taux de dilution, fans lents de très grand diamètre, moteurs à

cycle optimisé, adaptation aux fonctions d'hybridation, intégration et nacelles optimisées. Sur cette base, deux scénarios sont examinés en parallèle avec un point de décision vers 2025 pour le choix du futur court-moyen courrier européen, avec l'objectif de « zéro émission » atteint ou approché (les compléments pouvant être apportés par les mesures de marché) :

- soit par **l'incorporation de 100 % de carburants alternatifs durables** (issus de la biomasse ou totalement synthétiques) ;

- soit en choisissant l'option hydrogène. Dans ce dernier cas, il est envisagé une **configuration d'avion « en rupture » (à hydrogène liquide cryogénique¹⁶)**, avec une entrée en service vers 2035, dont la démonstration de faisabilité technologique doit être disponible dans la seconde partie de la décennie, afin d'enclencher à temps les phases de montée en maturité et de cadrage réglementaire pour la certification.

(15) Safran a annoncé en juin 2021 le lancement du programme CFM RISE (Revolutionary Innovation for Sustainable Engines) de développement technologique, avec pour objectif une réduction de plus de 20 % de la consommation unitaire (et donc des émissions de CO₂) par rapport aux moteurs actuels.

(16) Airbus travaille sur le programme ZEROe avec trois configurations : un court-moyen courrier à turbo fan utilisant le moteur ultra-sobre, un régional à turbopropulseurs (100 passagers, range 1 800 km), une configuration « aile volante » court-moyen courrier (environ 200 passagers) plus révolutionnaire mais qui a potentiellement la capacité d'atteindre le rayon d'action le plus important.

Les deux options pourraient éventuellement se combiner avec des appareils de tailles différentes sur le segment SMR. On notera que les voies ici explorées le sont de façon collaborative entre les industriels du Corac, certaines technologies pouvant être adaptées à différents segments de marché, par exemple l'aviation d'affaires.

- **Pour l'aviation régionale**, la feuille de route porte simultanément sur l'ultra-sobriété (-20 % en consommation unitaire) et sur les étapes technologiques conduisant à une entrée en service d'un avion hydrogène vers 2035. Une démonstration en vol portant sur la faisabilité des technologies clés est prévue vers 2025.

- **Pour les longs courriers**, la stratégie actuelle consiste à développer un avion ultra-sobre (technologies similaires à celles développées pour le court-moyen) et à promouvoir l'incorporation de carburants alternatifs durables.

Une feuille de route détaillée sur dix ans a été élaborée et partagée avec les services de l'État, avec des étapes de faisabilité technique. Celles-ci permettront d'opérer les choix stratégiques, grâce à des étapes de démonstration en vol, en particulier sur le choix de la combinaison avion-source/vecteur d'énergie optimal pour tenir une date d'entrée en service d'un avion SMR ultra-sobre et neutre en carbone vers 2035.

LA TRAJECTOIRE CARBONE PROPOSÉE PAR LE CORAC

La stratégie de recherche du Corac doit être adossée à une analyse prévisionnelle du bilan carbone du transport aérien

afin d'estimer l'évolution des émissions de CO₂ de la flotte mondiale en y introduisant les progrès technologiques et opérationnels aux horizons prévus dans la feuille de route de l'industrie, la substitution progressive du kérosène par d'autres vecteurs/sources d'énergie, et tenant compte bien entendu de l'évolution du niveau de trafic aérien. **Des projections du bilan carbone de l'aérien, à l'échelle mondiale, jusqu'en 2050, ont ainsi été réalisées avec l'appui de nos partenaires scientifiques de l'Onera en utilisant un outil de calcul et d'évaluation indépendant, dont les résultats sont partagés par le collectif du Corac.** Ce modèle est un outil de suivi et d'évaluation des choix et options du plan d'innovation de l'industrie : il sera donc naturellement appelé à évoluer et des mises à jour régulières seront publiées par le Corac.

La position des grands acteurs français et européens sur le marché mondial leur permet d'entraîner tout ou partie des démarches d'innovation qui seront suivies par les différents compétiteurs : **une hypothèse forte a donc été adoptée, prévoyant la généralisation de ces**

innovations, à l'échelle mondiale, permettant ainsi d'analyser sur le périmètre « monde » les émissions de l'ensemble du secteur. L'hypothèse a également été faite que l'avion hydrogène capturerait l'ensemble des segments régional et court-moyen-courrier, une sensibilité étant présentée sur ce point en page 18 de ce rapport.

1. Définition et principes

Le modèle simule l'évolution d'une flotte mondiale (option par défaut mais une simulation à échelle régionale ou nationale peut également être choisie) et ses émissions de CO₂ à partir de l'année 2018, le code de calcul étant initialisé à partir des données de la base OAG¹⁷ qui regroupe tous les appareils en service et l'ensemble des vols pour l'année considérée.

Le calcul des émissions sur la période 2019-2050 est mené sur une flotte simplifiée, via la création de quatre à six catégories d'avions (régional, SMR, long courrier et très gros porteurs ; ou deux régionaux, deux SMR, deux avions long-courriers), 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 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 et la distance moyenne sont initialement déterminés pour l'année 2018 par analyse de la base OAG.

Le modèle utilise plusieurs leviers d'actions (évolutions des technologies, des opérations, incorporation de carburants alternatifs) et différents paramètres (taux d'évolution du trafic, de remplissage des appareils, de renouvellement des avions, etc.), chaque ensemble de paramètres

définissant un scénario. Il est à noter que, dans ce modèle, le gain d'efficacité de la flotte n'est pas une entrée mais la résultante de plusieurs paramètres indépendants que sont le taux de renouvellement des avions, la fréquence d'introduction d'une nouvelle génération d'aéronefs et le gain d'efficacité apporté par cette génération. Par ailleurs, le modèle étant conçu comme un outil d'évaluation de la pertinence comparée des solutions de réduction effective des émissions, **les différentes options de compensation ou offsets (systèmes CORSIA, ETS ou autres systèmes de compensation volontaires propres aux compagnies aériennes) n'ont pas été incorporées aux calculs présentés ici.** Les émissions « brutes » du secteur évaluées ici peuvent ensuite être corrigées des différents modes d'offsets qui relèvent davantage des politiques publiques ou d'initiatives des compagnies.

Enfin, on mentionnera que **ces calculs d'émissions de CO₂ sont effectués en tenant compte des émissions sur l'ensemble du cycle de vie, c'est-à-dire en ajoutant aux émissions liées à la combustion celles associées à l'extraction, au raffinage, au transport des carburants ou, dans le cas de carburants de synthèse, à leur fabrication.**

[17] Official Aviation Guide, www.oag.com

2. Hypothèses de modélisation

1. ÉVOLUTION DE LA DEMANDE

La crise sanitaire a remis en question les prévisions de croissance. La reprise du trafic, rendue incertaine par l'évolution de la pandémie mondiale, s'étale généralement sur trois à cinq ans selon les projections et les catégories d'avions, ce qui implique un **retour du trafic à son niveau de fin 2019 vers 2024-2025.**

Au-delà, l'hypothèse de travail de base actuellement retenue utilise une croissance du trafic identique au scénario médian de l'étude initiale ATAG Waypoint 2050¹⁸ correspondant à une **valeur lissée de 3 % par an entre 2018 et 2050, soit environ 3,5 % par an à partir de 2024** (voir Figure 1). Ces paramètres sont identiques sur les différents scénarios proposés.

[18] Référence de la première édition du rapport ATAG : aviationbenefits.org/media/167187/w2050_full.pdf

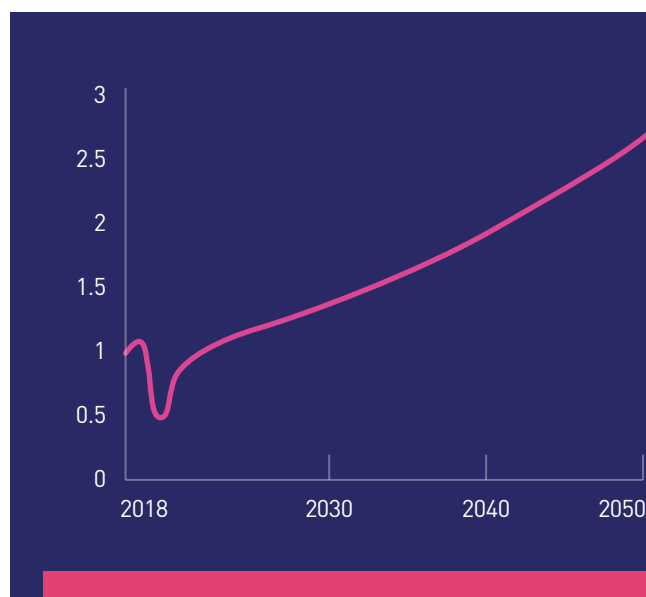


FIGURE 1 - Courbe d'évolution de la demande basée sur les prévisions IATA, utilisée dans le modèle (courbe normalisée à 1 en 2018).

2. RENOUVELLEMENT DES FLOTTES

La stratégie de calcul choisie consiste à simuler un renouvellement en fonction de l'âge ou d'appliquer un taux de renouvellement. Dans le premier cas, lorsqu'un avion atteint l'âge limite, il disparaît l'année suivante et réapparaît dans la catégorie des avions âgés de 0 à 1 an. L'âge de retrait, choisi par l'utilisateur, peut varier chaque année et dépend de la catégorie considérée. Il a été fixé ici à **20 ans**. Dans le second cas, les avions sont renouvelés du plus ancien au plus récent jusqu'à ce que le nombre d'appareils à retirer du service soit atteint. Il peut être choisi pour correspondre in fine à un âge de retrait souhaité.

3. ÉVOLUTION DES OPÉRATIONS

Les gains apportés par les opérations sont assez complexes à évaluer à l'échelle mondiale car ils résultent d'une combinaison de facteurs : nouvelles procédures adossées à des technologies bord et sol, mise en œuvre des politiques d'ATM¹⁹ différentes selon les régions concernées, ou gains sur le remplissage des appareils. Par défaut, les hypothèses d'amélioration des opérations retenues sont proches de celles du groupe d'experts de l'OACI (CAEP²⁰), de l'ordre de 0,5 % par an en moyenne.

4. ÉVOLUTION DES TECHNOLOGIES SELON LA FEUILLE DE ROUTE DU CORAC

La feuille de route du Corac fait apparaître deux scénarios qui diffèrent principalement par la date de mise en œuvre d'un SMR fonctionnant à l'hydrogène :

- **Le premier scénario (S1)** prévoit l'arrivée d'un nouvel avion régional en 2035, 20 % plus efficace que le représentant le plus performant de la génération précédente. Dans la catégorie des SMR, un nouvel avion ultra-sobre entre en service en 2033, avec un gain en consommation de 30 % vis-à-vis de la génération précédente équivalente. Cet appareil permet d'utiliser un mix kérosène/carburants alternatifs selon un taux d'incorporation discuté pages 17 et 18. Enfin, une nouvelle génération « long courrier » entre en service en 2037, présentant des performances 20 % supérieures à son prédécesseur, alimenté par le même mix kérosène/carburants alternatifs. Enfin, un SMR à hydrogène entre en service en 2045 dans ce scénario.

- **Le second scénario (S2)** prévoit l'arrivée d'un SMR ultra-sobre, fonctionnant à l'hydrogène, en 2035. Les évolutions des autres catégories demeurent les mêmes que dans le scénario S1.

Enfin, ces deux scénarios seront présentés en comparaison avec un scénario de base dénommé « **Technologie 2018** ». Ce scénario virtuel consiste à n'apporter aucune amélioration technologique ou opérationnelle après l'année 2018. Tous les nouveaux avions entrant en service, destinés à pourvoir à la demande et à remplacer les avions les plus anciens, sont au niveau de l'état de l'art technologique en 2018. Ainsi, quand les avions antérieurs à 2018 sont complètement remplacés, les performances de la flotte n'évoluent plus. Il s'agit d'un scénario purement contrefactuel, destiné à mesurer l'impact de la recherche technologique.

5. DÉPLOIEMENT DES CARBURANTS ALTERNATIFS « DROP-IN »

Une approche ambitieuse de déploiement massif, supposant la mise en œuvre de politiques publiques et la mobilisation des acteurs du monde de l'énergie, a été retenue ici. Il est par ailleurs admis que l'utilisation de ces carburants jusqu'à des taux d'incorporation de 100 % ne nécessitera pas de modification substantielle des aéronefs. Les travaux actuellement lancés au sein du Corac visent à permettre les conditions de leur utilisation, depuis un taux actuel de 50 %, déjà validé, jusqu'à un usage à 100 %.

Le choix a été fait ici d'un schéma de substitution très ambitieux, supposant l'abandon complet des carburants fossiles pour l'aviation en 2050.

Le bénéfice en carbone des carburants non fossiles est lié à leur vitesse de déploiement, donc le taux de mélange au kérosène amené à augmenter fortement à moyen terme, mais aussi à leur efficacité sur l'ensemble du cycle de vie, qui intègre donc non seulement la combustion mais aussi la production et le transport. Un paramètre important est ainsi le taux de réduction effectif des émissions carbone apporté par l'usage des carburants alternatifs. Pour les biocarburants, ce paramètre peut être actuellement estimé à 70 % (valeur pour 2018). Il est possible de tableur sur une amélioration progressive de ce taux de réduction jusqu'à 80 % en 2050, grâce à l'amélioration des rendements des procédés et l'utilisation d'énergies

[19] Air Traffic Management

[20] Committee on Aviation Environmental Protection

décarbonées dans les processus de traitement. Pour les électrocarburants, il est admis que leur déploiement s'accompagne du développement de la production d'électricité décarbonée correspondante. Dans ce cas, en prenant en compte les émissions liées au développement des infrastructures de production et de transport, un taux de réduction des émissions augmentant de 90 à 95 % sur la période d'utilisation a été adopté.

Une hypothèse de déploiement a été retenue sous forme d'une montée en puissance des biocarburants dans un premier temps, puis des électrocarburants ou PtL, dont la mise à disposition de volumes significatifs dépend encore de la maturation de certains processus et de la mise en place d'unités de production de taille importante.

Les mix énergétiques retenus, entre biofuels et PtL, diffèrent selon les deux scénarios technologiques

utilisés ici du fait de l'utilisation plus précoce d'hydrogène dans le scénario S2 : en effet, il est possible d'estimer que la mise en place d'installations de production d'hydrogène facilitera le déploiement de sites de production de PtL, qui font également appel à une production d'hydrogène décarboné. Les schémas de substitution en pourcentage associés aux deux scénarios technologiques S1 et S2 sont donnés en Figure 2 et Figure 3.

À titre de comparaison, sur le plan européen, les simulations de l'étude « Destination 2050²¹ » tablent sur un mélange en 2050 moins ambitieux avec 17 % pour les carburants fossiles et 83 % pour les carburants d'aviation durables (dont 34 % pour les biofuels et 49 % pour les e-fuels).

Aucune limite de disponibilité n'a été retenue dans les scénarios utilisés.

PART RELATIVE DES COMBUSTIBLES

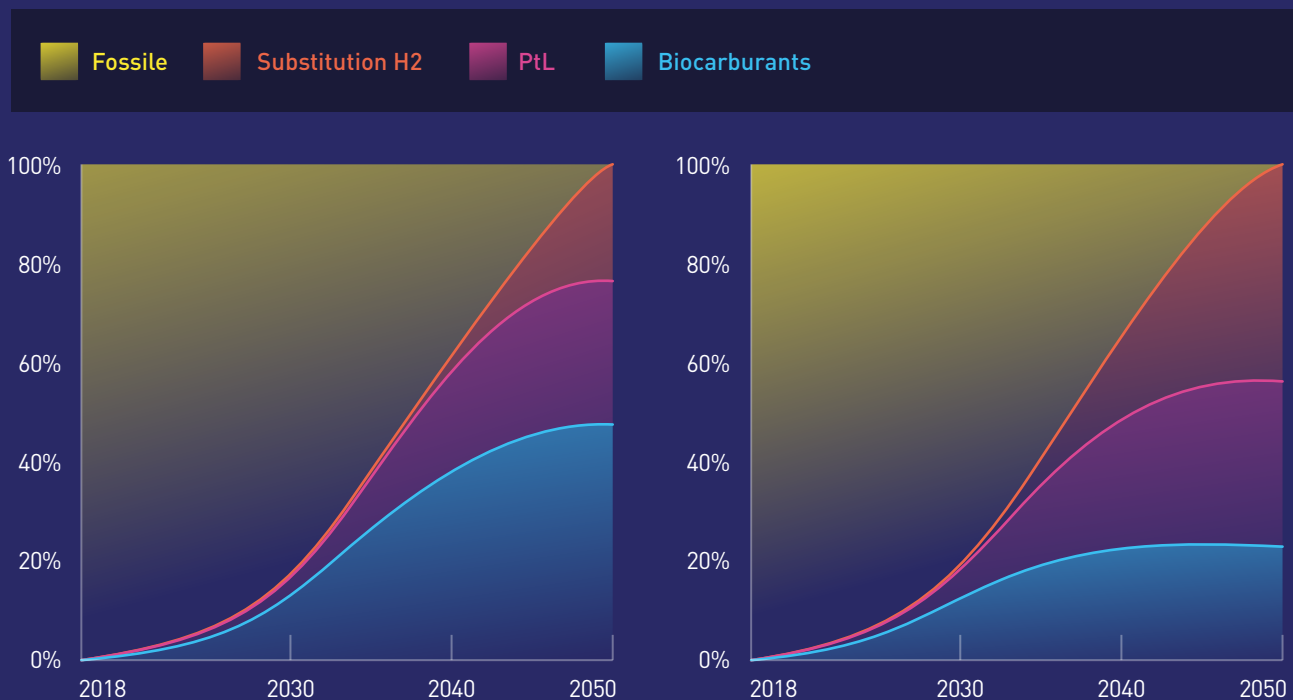


FIGURE 2 - Schéma de substitution de carburants alternatifs et d'hydrogène associé au scénario S1.

FIGURE 3 - Schéma de substitution de carburants alternatifs et d'hydrogène associé au scénario S2.

(21) Étude européenne ASD-A4E-CANSO-ACI-ERA, www.destination2050.eu/wp-content/uploads/2021/02/Destination2050_Report.pdf

6. SYNTHÈSE DES PARAMÈTRES UTILISÉS

En résumé, les paramètres utilisés sont rassemblés dans le tableau ci-dessous.

	Technologie 2018 (référence)	Scénario S1	Scénario S2
Fréquence de renouvellement des avions		20 ans	
Croissance du trafic		+3,5% par an à partir de 2024	
Hydrogène	S.O.	Régional 2035 SMR 2045 avec H ₂ (réduction CO ₂ de 95%)	Régional 2035 SMR 2035 avec H ₂ (réduction CO ₂ de 95%)
Carburants non fossiles autres que l'hydrogène (SAF)	Pas d'incorporation	Schéma de substitution Figure 2	Schéma de substitution Figure 3
		Biofuels : Réduction CO ₂ progressive de 70 à 80% PtL : réduction CO ₂ progressive de 90 à 95%	
Technologies : gain vs génération précédente et date d'entrée en service sur différents segments		Régional -20% en 2035 SMR -30% en 2033 et H ₂ en 2045 Long courrier -20% en 2037	Régional -20% en 2035 SMR -30% en 2035 avec H ₂ Long courrier -20% en 2037
Opérations	Pas d'amélioration	Gain CO ₂ en progression constante de 0,5% par an jusqu'en 2050	

3. Résultats selon deux scénarios

Les résultats sont présentés sous forme d'évolution temporelle des émissions annuelles de CO₂.

Scénario S1 : nouvelles générations ultra-sobres (tous segments), mise en œuvre de l'hydrogène en 2035 pour l'avion régional et en 2045 pour le SMR.

La Figure 4 présente ainsi les évaluations obtenues par application du scénario S1, par comparaison avec le scénario de base « Technologie 2018 ». L'introduction de nouvelles technologies d'ultra-sobriété permet de réduire les émissions de 23 %, et l'amélioration des opérations conduit ensuite à une réduction de l'ordre de 10 %. L'introduction de l'hydrogène, et des technologies associées sur l'ensemble des segments régional et SMR permet une réduction supplémentaire de 16 %. Ces réductions peuvent varier transitoirement selon la vitesse de renouvellement des flottes, mais convergent, lorsque ces trois leviers sont actionnés, vers des valeurs identiques en 2050. L'introduction des carburants alternatifs dès 2020 permet à terme

d'opérer une réduction supplémentaire des émissions de 45 %. L'utilisation de carburants alternatifs est particulièrement efficace car elle s'applique indifféremment à toutes les catégories d'avions – court, moyens ou longs courriers –, leur usage ne présentant aucune restriction. Les émissions de CO₂ rémanentes sont liées aux niveaux de réduction de CO₂ sur l'ensemble du cycle de vie utilisés dans les simulations, aucun des carburants utilisés n'ayant été affecté d'un coefficient de 100 % du fait des émissions liées aux processus de collecte de la biomasse, de synthèse, de transport, etc. Il reste dans ce scénario un niveau d'émissions CO₂ de 190 Mtonnes en 2050,

[22] A l'heure actuelle il existe une limite technique à 50% d'incorporation mais il est raisonnable de penser que ce seuil pourra être largement dépassé au moment où la disponibilité effective des carburants alternatifs aura fortement augmenté au-delà de 50% du carburant utilisé.

ÉMISSIONS DE CO₂ (Mt/an)

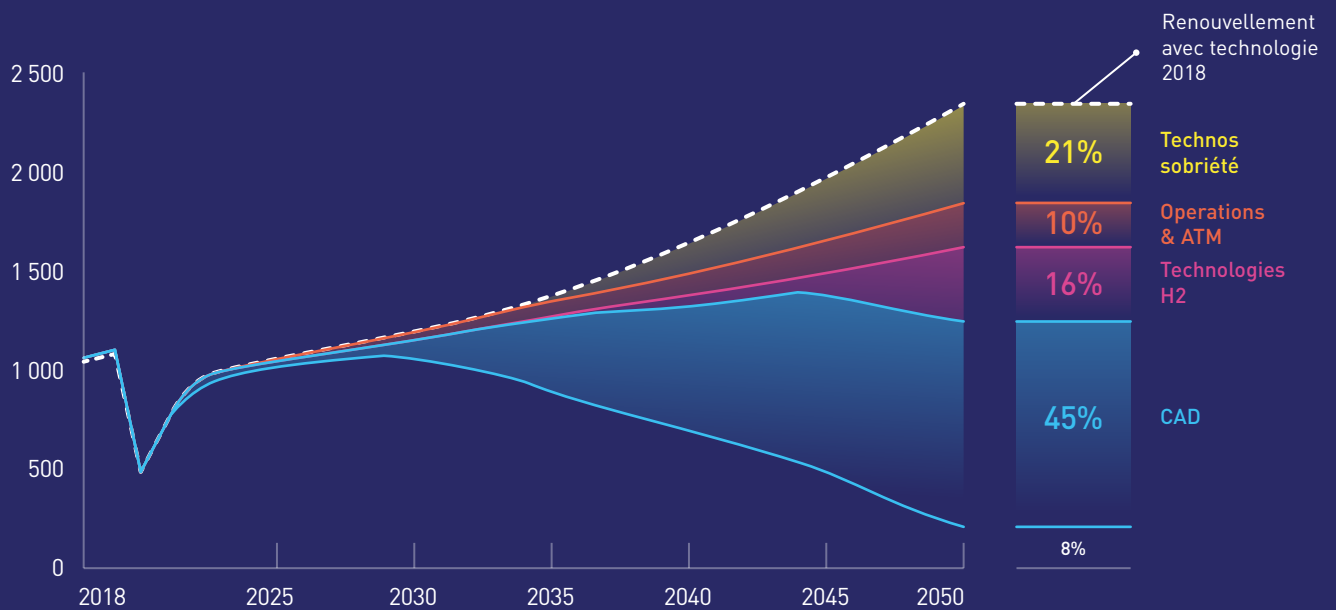


FIGURE 4 - Scénario S1 - SMR H₂ en 2045, diffusé sur l'intégralité du segment SMR. Simulation des émissions CO₂ jusqu'en 2050 avec contribution des différents leviers technologiques, opérationnels, et utilisation de carburants d'aviation durables (CAD). Le schéma d'incorporation des carburants non fossiles associé est donné en Figure 2. Il reste dans ce scénario 190 Mtonnes de CO₂ émis compte tenu du niveau effectif de réduction de CO₂ des CAD et de l'hydrogène.

l'objectif de zéro émission imposant ici de recourir à une compensation par différents mécanismes d'offsets (voir page 8).

Les quantités de carburants utilisés dans le scénario S1 sont données dans le tableau ci-après : elles feront l'objet, comme pour le scénario S2, d'une discussion en page 17, en particulier en ce qui concerne la disponibilité des carburants envisagés.

BESOINS JETFUEL 2050 (Mt)

Fossile	0
Biofuel	198
PtL	121
Hydrogène	35

Scénario S2 : nouvelles générations ultra-sobres (tous segments), mise en œuvre de l'hydrogène dès 2035 pour le SMR et l'avion régional.

Le scénario S2 diffère du précédent par l'ambition d'une mise en service du SMR à hydrogène dès 2035, les autres paramètres de la simulation restant inchangés, à l'exception du taux de pénétration du PtL par rapport aux biofuels, estimé supérieur dans ce scénario (voir plus haut). Il reste dans ce scénario un niveau d'émissions CO₂ de 135 Mtonnes en 2050, l'objectif de zéro émission nette imposant ici également de recourir

à une compensation. L'évolution des émissions est donnée dans ce cas en Figure 5.

ÉMISSIONS DE CO₂ (Mt/an)

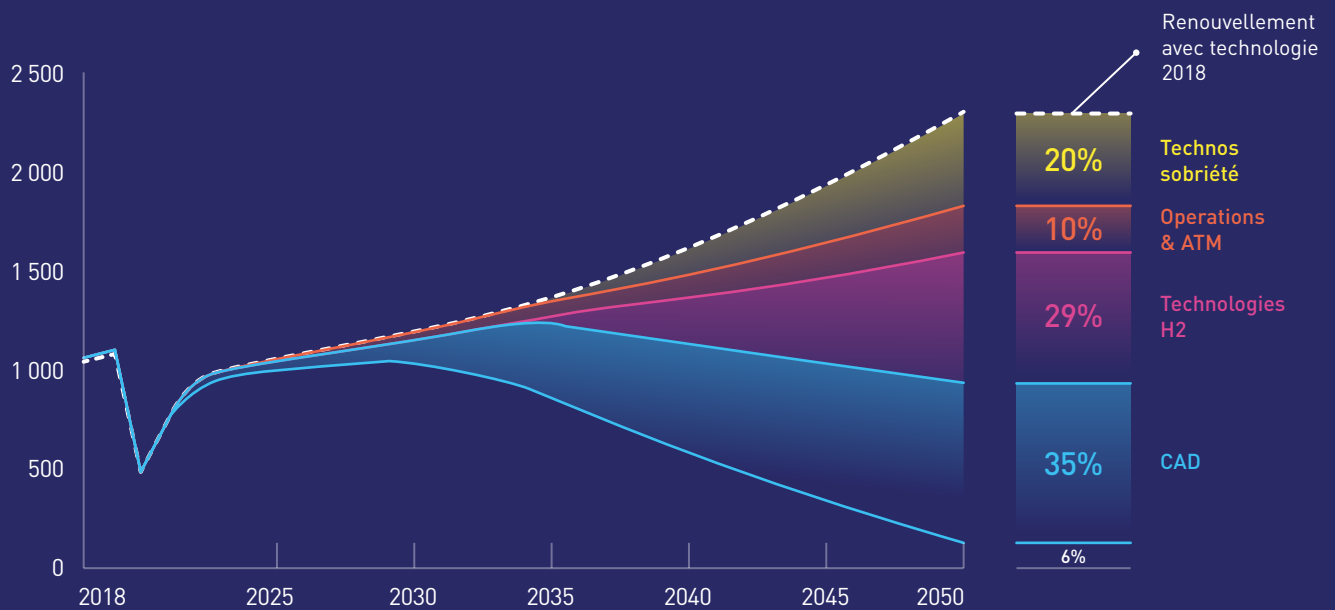


FIGURE 5 -Scénario S2 - SMR H₂ en 2035 diffusé sur l'intégralité du segment SMR. Simulation des émissions CO₂ jusqu'en 2050 avec contribution des différents leviers technologiques, opérationnels, et utilisation de carburants d'aviation durables (CAD). Le schéma d'incorporation des carburants non fossiles associé est donné en Figure 3. Il reste dans ce scénario 135 Mtonnes de CO₂ émis compte tenu du niveau effectif de réduction de CO₂ des CAD et de l'hydrogène.

Les quantités de carburants utilisés dans le scénario S2 sont données dans le tableau ci-contre.

Le niveau d'émissions restant en 2050 pour le scénario S2 est inférieur d'un peu moins de 30 % par rapport à celui associé au scénario S1. L'arrivée de l'hydrogène dès 2035 pour les avions de type SMR permet d'accélérer significativement la décroissance des émissions.

BESOINS JETFUEL 2050 (Mt)

Fossile	0
Biofuel	100
PtL	141
Hydrogène	66

4. Discussion

1. ÉTUDE DE SENSIBILITÉ SUR LA CROISSANCE

Une étude de sensibilité sur la croissance de la demande a été menée pour les deux scénarios, avec six niveaux de croissance après un retour au trafic de 2019 en 2024. Ces niveaux de croissance, de 0,5 % à 5 % annuels, ont été utilisés pour projeter l'évolution des émissions mondiales, dans le cadre des deux scénarios précédemment présentés. Les simulations correspondantes sont représentées en Figure 6.

Il est à noter que l'effet d'une baisse de la croissance ne

conduit pas à une baisse arithmétique des émissions, car l'introduction dans la flotte de nouveaux modèles, moins consommateurs, se fait alors plus lentement.

ÉMISSIONS ANNUELLES DE CO₂ (Mt/an)



FIGURE 6 - Étude de l'influence du taux de croissance du trafic (scénario S1-à gauche et scénario S2-à droite). Le taux de croissance moyen sur la période 2019-2050 (dit « ATAG ») est celui utilisé dans les simulations présentées ici. Les niveaux de compensation carbone à appliquer pour respecter le « zéro émission nette » sont indiqués en bas à droite des figures.

2. QUANTITÉS DE CARBURANTS UTILISÉS

Les quantités de kérosène non fossile (biofuels et électrocarburants) sont déterminées dans le modèle de la façon suivante : la demande est calculée à partir du modèle de flotte (nombre d'avions, consommation dans chaque catégorie et âge d'appareil), en tenant compte bien entendu de l'arrivée d'avions alimentés à l'hydrogène, qui réduisent d'autant cette demande. L'objectif fixé de l'abandon du kérosène fossile en 2050 permet de compléter les hypothèses, mais les quantités relatives des biofuels et du PtL peuvent être ajustées avec une certaine marge de manœuvre.

Néanmoins, les niveaux d'incorporation relatifs PtL vs biofuels, adoptés dans notre étude résultent d'une analyse des avantages spécifiques envisagés pour les carburants PtL vis-à-vis de ceux issus de la biomasse : disponibilité de la matière première moins contrainte, sans effets indirects sur le bilan carbone, capacité d'atteindre 95% de décarbonation²³ (contre 70 à 80% pour les carburants issus de la biomasse). Les efforts de R&T actuels (particulièrement dans le domaine de la catalyse de la réaction d'hydrogénation), la multiplication des annonces d'objectifs d'incorporation (Commission Européenne,

Allemagne, Etats-Unis) permettent par ailleurs de penser qu'une dynamique de déploiement pourra s'instaurer conduisant à des niveaux supérieurs à ceux prévus par Refuel EU. Le scénario 2 donne une part prépondérante au PtL, cette hypothèse s'inscrivant dans le cadre d'une stratégie énergétique globale d'appel à une production importante d'hydrogène, utilisé pour la synthèse des PtL.

Le scénario S1 conduit à une quantité de carburant issu de la biomasse de l'ordre de 200 Mtonnes en 2050. Cette valeur est supérieure aux estimations du rapport de l'Agence Internationale de l'Energie (IEA) de 2020²⁴ qui propose une consommation de biofuels de l'ordre de 150 à 160 Mtonnes en 2050²⁵. Ces estimations IEA sont en revanche plus élevées dans les scénarios NZE (net zero emission) récemment publiés : dans ce cas les quantités

(23) En utilisant de l'hydrogène produit par électrolyse utilisant de l'énergie décarbonée.

(24) https://iea.blob.core.windows.net/assets/7f8aed40-89af-4348-be19-c8a67df0b9ea/Energy_Technology_Perspectives_2020_PDF.pdf

(25) Notons que la dernière étude publiée par ATAG affiche une quantité de biofuels de 191 Mtonnes en 2050.

utilisées ici restent compatibles. On notera cependant que les estimations IEA sont basées sur des critères économiques (prix, capacités industrielles) considérés comme plus limitants que la disponibilité de la biomasse. Nous avons cependant conservé cette valeur, même s'il est possible de la ramener à 160 Mtonnes en augmentant la quantité de PtL pour rester dans l'hypothèse d'un zéro fossile en 2050. Par ailleurs, le scénario S2 conduit à une valeur de 100 Mtonnes de biofuels en 2050, largement compatible avec les estimations IEA.

L'hypothèse d'un transport aérien zéro fossile en 2050 implique bien évidemment des quantités de CAD (biofuels et PtL) très supérieures en 2050 à celles actuellement proposées par la Commission européenne dans le cadre de ReFuelEU (63 %), même si le recours à l'hydrogène réduit l'écart entre nos hypothèses et les propositions de la Commission. En revanche, nous avons opté pour des niveaux effectifs de réduction d'émissions plus conservatifs qui conduisent arithmétiquement à un écart avec la parfaite neutralité carbone et appellent à maintenir des mécanismes de compensation.

3. DIFFUSION DES INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES DANS LA FLOTTE

Les trajectoires de réduction des émissions carbone présentées jusqu'ici ont été calculées afin de déterminer

les conséquences sur le bilan carbone du transport aérien mondial d'une démarche volontariste vers l'innovation technologique, qu'il s'agisse d'ultra-sobriété ou de neutralité carbone. Les ruptures technologiques, comme les innovations opérationnelles ou la transition vers des carburants non fossiles, ont été ainsi généralisées à l'ensemble de la flotte mondiale, cette étude visant à déterminer l'impact maximal d'une feuille de route technologique ambitieuse. Chacun des leviers de réduction analysés ici pourrait dans la réalité être actionné de façon différenciée selon les politiques des constructeurs et des Etats, les règlements et normes internationales, etc. Par ailleurs, l'hypothèse forte a été faite que les avions hydrogène représenteraient, à partir de leur entrée en service, l'intégralité des segments régional et court-moyen-courrier.

Pour l'arrivée d'un régional ou court-moyen-courrier alimenté à l'hydrogène, il est donc opportun de tenir compte d'une diffusion dans la flotte mondiale plus restreinte, en supposant qu'aux dates d'entrée en service de tels appareils, pourront coexister deux types d'avions ultrasobres, l'un alimenté à l'hydrogène, l'autre utilisant la part de carburants durables disponibles à cette date. Les trajectoires d'émissions de CO₂ des scénarios 1 et 2, différant toujours par la date d'entrée en service d'un avion à hydrogène, ont été recalculées dans l'hypothèse d'une pénétration de seulement 50% dans la flotte des nouveaux

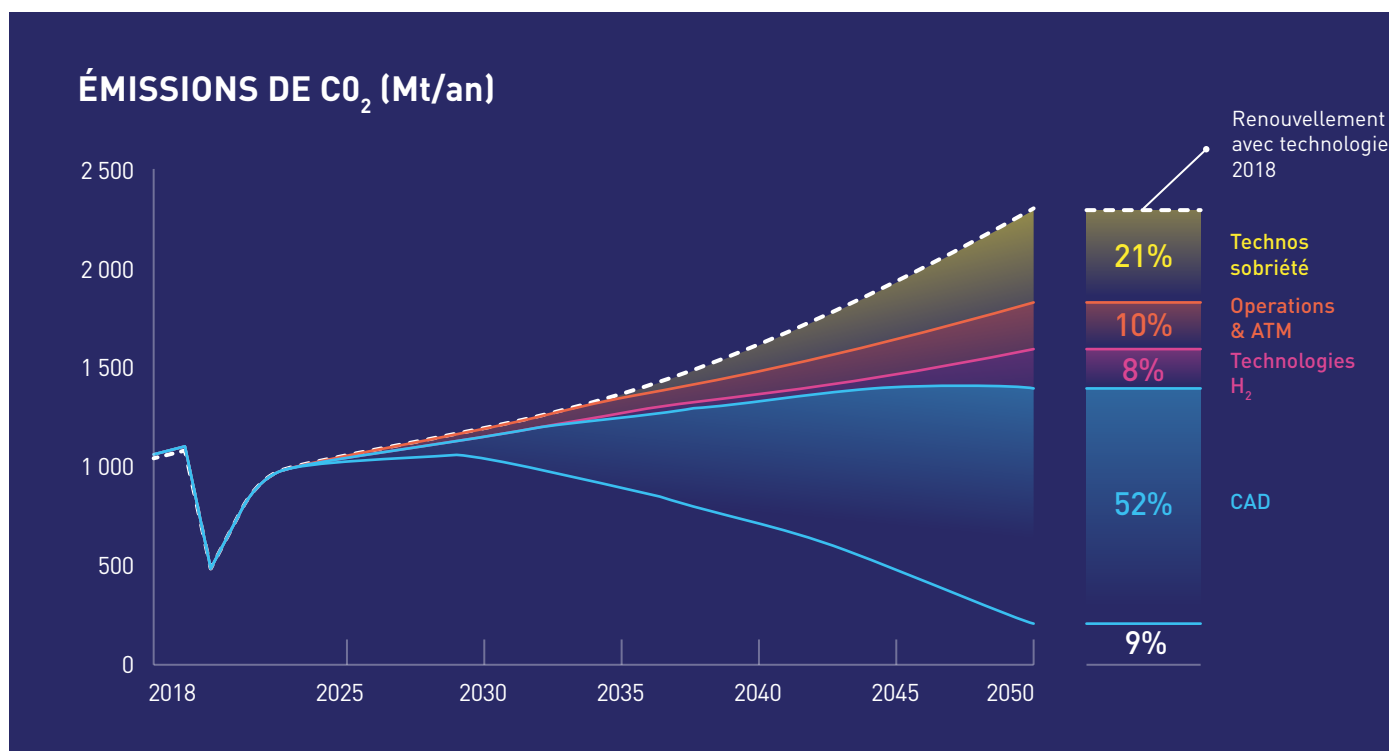


FIGURE 7 -Trajectoire carbone du transport aérien mondial selon les hypothèses du scénario 1 mais avec une pénétration de 50% de l'avion à hydrogène dans la flotte. Les quantités de carburant utilisées en 2050 sont dans ce cas : 229 Mtonnes de biofuel, 150 Mtonnes de PtL et 17 Mtonnes d'hydrogène.

appareils alimentés à l'hydrogène. Ces trajectoires sont représentées Figure 7 et Figure 8, en précisant les quantités de carburant nécessaires dans ces conditions. Dans le premier cas, l'objectif de net zéro carbone en 2050

implique de recourir à la compensation de 207 Mtonnes de CO₂, dans le second cas cette compensation sera de 157 Mtonnes de CO₂.

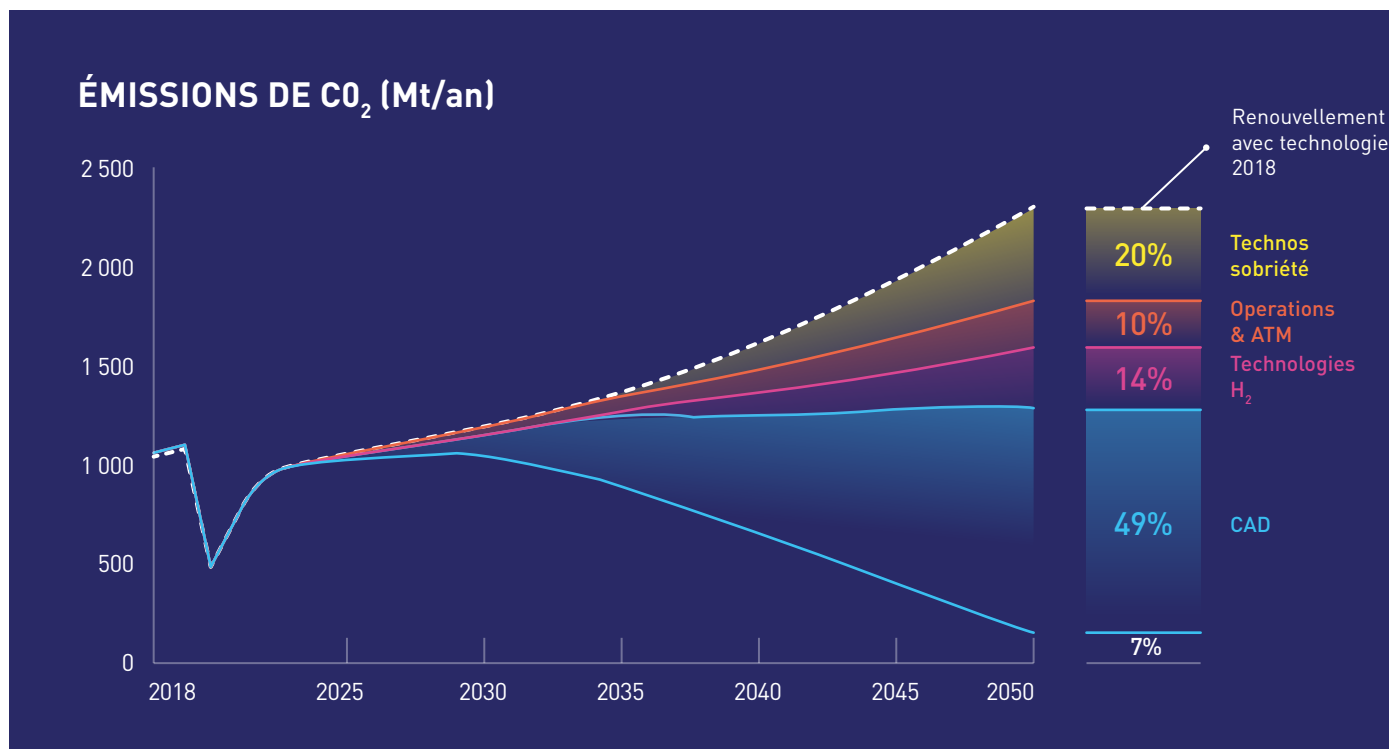


FIGURE 8 - Trajectoire carbone du transport aérien mondial selon les hypothèses du scénario 2 mais avec une pénétration de 50% de l'avion à hydrogène dans la flotte. Les quantités de carburant utilisées en 2050 sont dans ce cas : 138 Mtonnes de biofuel, 195 Mtonnes de PtL et 33 Mtonnes d'hydrogène.

5. Comparaison avec les principales études publiées

Différentes études ayant produit des trajectoires de décarbonation de l'aérien jusqu'en 2050 ont été publiées depuis l'été 2020 :

- **Waypoint 2050²⁶** : une première étude, de périmètre mondial, a été publiée en septembre 2020 sous l'égide du collectif ATAG²⁷ afin de comparer différents scénarios de décarbonation de l'aérien visant à limiter les émissions 2050 à 50 % de leur niveau de 2005. Une seconde étude, nettement plus ambitieuse, a été publiée en septembre 2021²⁸ et vise à atteindre un objectif de « zéro émission nette » en 2050. Les trois nouveaux scénarios publiés en septembre 2021 diffèrent essentiellement selon les poids respectifs des progrès technologiques et opérationnels ; tous prévoient une cible d'incorporation de 90 % de carburants non fossiles en 2050. Dans cette étude comme dans la précédente, les mesures de marché permettent :

1. de plafonner les émissions au niveau de 2019 conformément au mécanisme CORSIA de l'OACI,
2. de conserver après 2035 un mécanisme d'ajustement des émissions permettant de parvenir à la cible finale de « zéro émission nette » en 2050.

Le scénario S3, le plus ambitieux sur le plan technologique, est reproduit ci-après en Figure 9.

[26] Étude Waypoint 2050 (sept 2020) https://aviationbenefits.org/media/167187/w2050_full.pdf

[27] Air Transport Action Group (rassemble à l'échelle internationale des compagnies aériennes, des aéroports, des organismes de gestion du trafic aérien et des industriels).

[28] Deuxième édition ATAG Waypoint 2050 https://aviationbenefits.org/media/167417/w2050_v2021_27sept_full.pdf

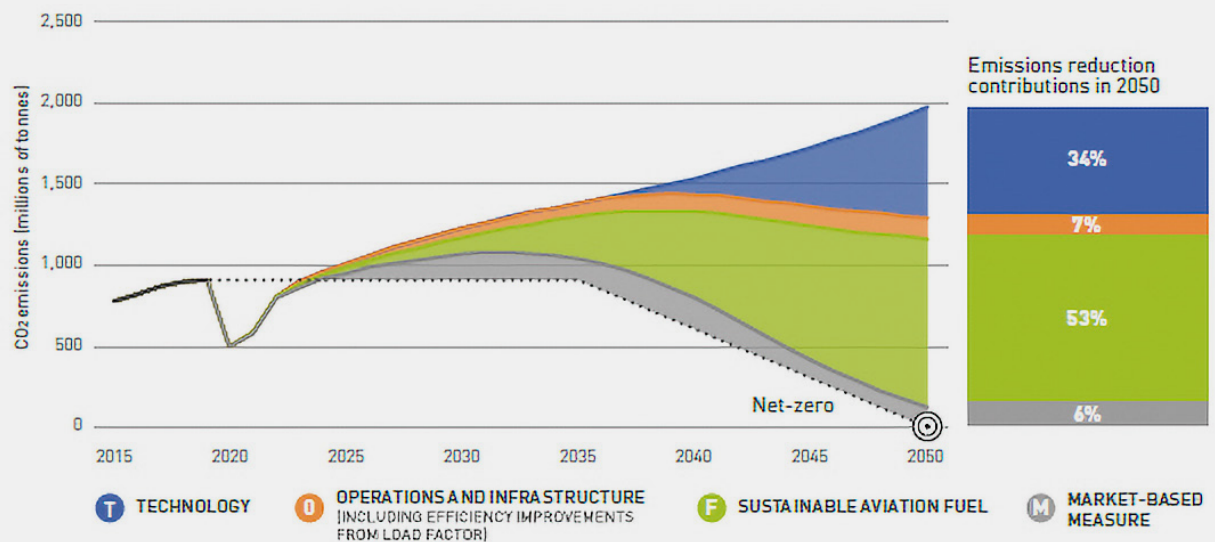


FIGURE 9 - Étude Waypoint 2050 proposée par le collectif ATAG en septembre 2021, scénario S3 « Aspirational and aggressive technology perspective ». NB : les niveaux de CO₂ donnés ici ne tiennent pas compte des émissions en amont qui ont été estimées ici à 15 % des émissions liées à la combustion.

- **Destination 2050**²⁹ : les travaux ont ici été menés par un collectif européen et confiés pour la partie technique au NLR³⁰, et ont pour objectif d'analyser les conditions d'une trajectoire de décarbonation menant à un objectif cible de « zéro émission nette » en 2050, sur le périmètre européen. Le corps de l'étude est ici la recherche de la combinaison à la fois réaliste et optimale de leviers d'action (technologies, opérations, carburants non fossiles, mesures de marché) permettant de parvenir à cette cible. Une seule trajectoire de décarbonation est finalement retenue, avec une réduction des émissions

selon les différents leviers obéissant au schéma ci-après, extrait du rapport Destination 2050.

On notera que cette étude fait l'hypothèse d'un ralentissement de la croissance du trafic lié à l'effet sur le prix du billet des mesures économiques et de l'incorporation de carburants non fossiles.

(29) voir note (21).

(30) NLR : Netherlands Aerospace Center, organisme public de recherche aérospatiale des Pays-Bas.

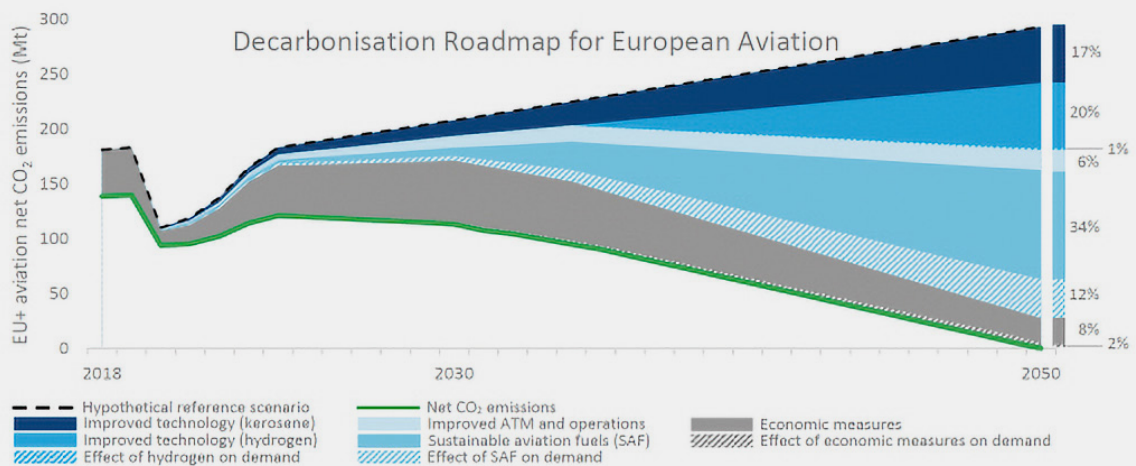
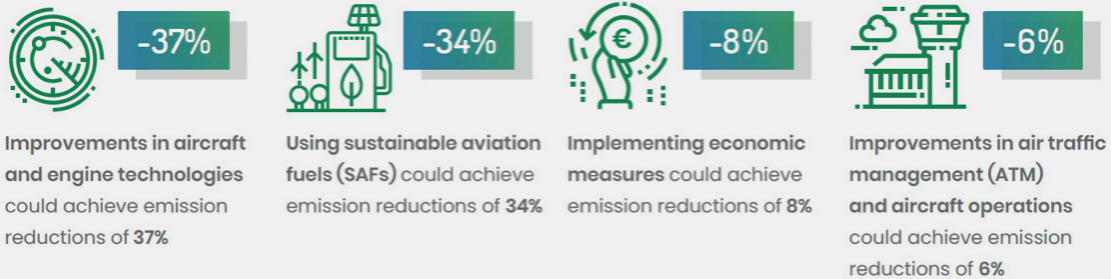


FIGURE 10 - Etude Destination 2050 « Decarbonisation roadmap for European Aviation », tous vols intérieurs et au départ de l'UE.

- **Shift Project³¹** : cette étude menée par les ONG Shift Project et Aéro Décarbo propose une approche selon deux scénarios. Ceux-ci sont identiques sur les options technologiques (niveau d'amélioration des performances) et opérationnelles. En revanche, ils se différencient par les dates de mise en service des nouveaux appareils, le rythme de renouvellement de la flotte (âge de retrait : quinze ou vingt-cinq ans) et le déploiement des carburants non fossiles : le scénario "Maverick" est optimiste tandis que le scénario "Iceman" est très conservatif. Dans les deux cas, la croissance moyenne du trafic aérien sur la période 2018-2050 a été fixée à 4 %.

COMPARAISON DES TRAJECTOIRES CARBONE 2020-2050 PROPOSÉES PAR SHIFT PROJECT (2020) ET PAR LE CORAC

Seules les études sur le périmètre mondial pouvant être comparées, l'étude Destination 2050, restreinte à l'Europe, n'a donc été analysée que qualitativement. Pour plus de clarté, seul le scénario S3 de l'étude Waypoint 2050 d'octobre 2021 a été retenu, ce scénario étant le plus ambitieux en termes de progrès technologiques.

Les différentes études ont été normalisées, en utilisant dans tous les cas les émissions totales, c'est-à-dire incluant les émissions en amont de la combustion (extraction, raffinage, transport) : ceci permet d'initier la simulation sur un point de référence 2018 commun à tous les calculs.

La comparaison des trajectoires carbone calculées (voir Figure 11) donne lieu aux constats suivants :

- Entre 2020 et 2025, les différentes études donnent des profils superposés, leur évolution étant dominée par le renouvellement des flottes avec les avions les plus récents (pas de programme en rupture, ni d'incorporation massive de carburants durables pour l'aviation).
- Entre 2025 et 2035, toutes les études conduisent à une **stabilisation des émissions sur un « plateau »**. Cette phase de stabilisation correspond aux effets combinés du renouvellement des flottes, des gains opérationnels

(31) Étude Shift Project Aéro Decarbo https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2021/03/Pouvoir-voler-en-2050_Shift-Project_Synthese.pdf

et de l'incorporation de carburants non fossiles. L'application des mesures de compensation (non prise en compte dans le modèle Corac) intervient également dans cet effet plateau pour les autres modèles.

- Au-delà de 2035, les innovations technologiques et la poursuite de l'incorporation de carburants non fossiles prennent le pas et induisent une décroissance des émissions mondiales, à un rythme différent selon les ruptures envisagées. **Les deux scénarios du Corac et les études Waypoint 2050 et Shift Project (scénario volontariste « Maverick ») conduisent à un niveau d'émissions inférieur à 200 Mtonnes de CO₂ en 2050.**

Les deux scénarios proposés dans l'étude Shift Project, très extrêmes dans les jeux d'hypothèses utilisées, encadrent l'ensemble des autres trajectoires (avec prise en compte des mesures de marché pour l'étude Waypoint 2050) ; ces dernières sont assez proches et diffèrent à terminaison d'environ $\pm 20\%$. Le niveau d'incorporation des SAF demeure un point critique dans toutes les études. On notera que le recours aux mesures de marché peut permettre d'accélérer la réduction, en particulier dans le plateau 2025-2035, mais les principes du CORSIA limitent sa portée, puisqu'il ne fonctionne qu'au-dessus du niveau d'émissions de 2019.

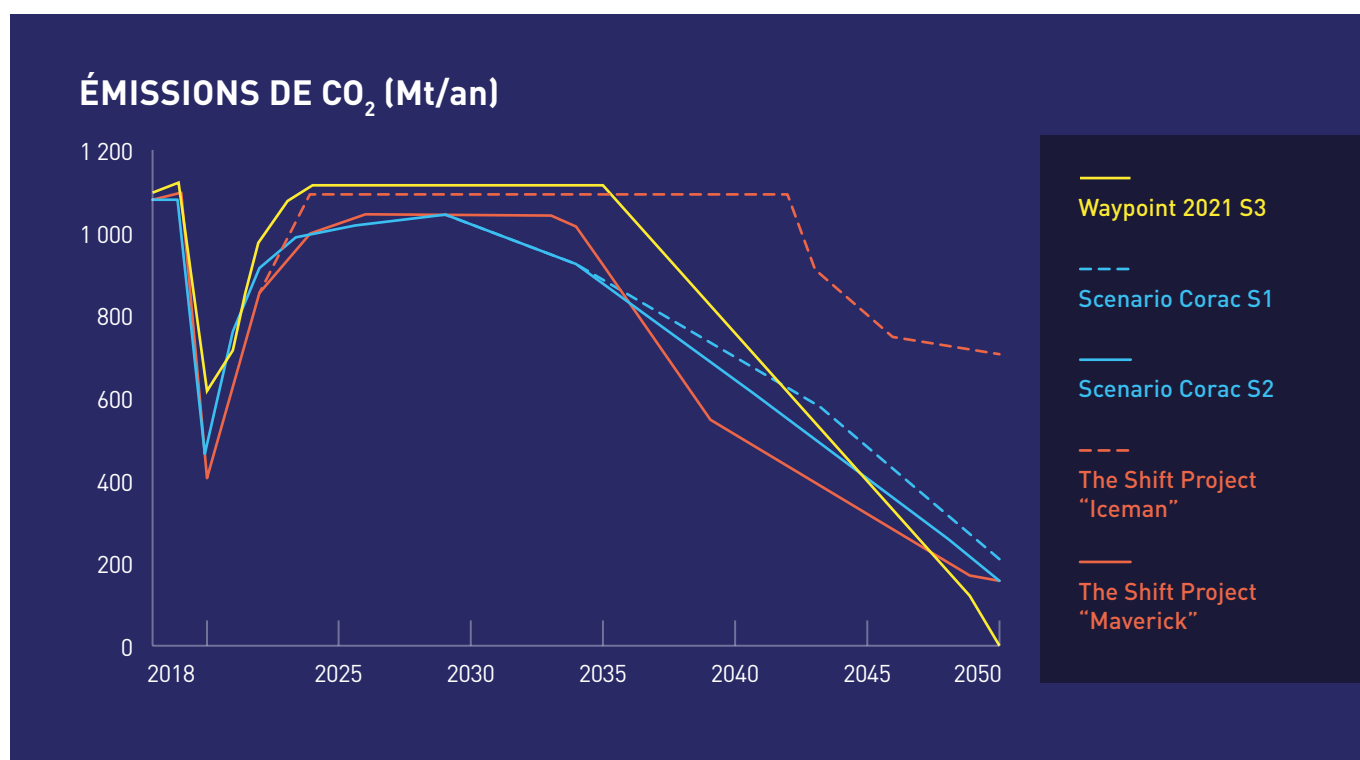


FIGURE 11 - Comparaison (après normalisation en émissions totales incluant l'amont) des différentes trajectoires de décarbonation établies sur le périmètre « monde ». NB : contrairement aux scénarios Corac, les scénarios Shift Project et Waypoint 2050 incluent des mesures de marché/compensation.

5. Comparaison avec les projections globales du GIEC

Le dernier rapport publié par les experts du GIEC³² donne cinq nouveaux scénarios d'émissions mondiales de gaz à effet de serre d'origine anthropique (nommés SSP pour Shared Socioeconomic Pathways) et analyse la réponse du climat à ces différents scénarios en termes de variations de la température moyenne de la surface du globe en 2100. Ces scénarios diffèrent selon les hypothèses socioéconomiques retenues et le niveau

d'intervention des États et des parties prenantes pour limiter et/ou faire décroître leurs émissions. On retrouve des jeux d'hypothèses extrêmes, entre des scénarios fortement émissifs, maintenant une croissance du CO₂ émis jusqu'en 2100, et des scénarios plus sobres, dont

(32) <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

certaines prévoient un passage par un « zéro émission » puis une phase à émissions négatives.

Les trajectoires de décarbonation proposées par le Corac peuvent être comparées à un ou plusieurs de ces scénarios, avec l'hypothèse – conservative – d'un maintien de la part de l'aérien dans les émissions de CO₂ anthropiques à 2,5 % entre aujourd'hui et 2050. Le scénario SSP1-2.6, qui donne l'évolution des émissions mondiales de tous secteurs compatibles avec une élévation de température inférieure à 2 °C, peut être utilisé pour définir une trajectoire « 2 °C » pour l'aérien, par simple application du ratio de 2,5 %. Cette trajectoire « aviation-2 °C », peut ainsi être comparée aux deux scénarios proposés par le Corac (voir figure 12).

Cette comparaison appelle les remarques suivantes :

- Le cumul des émissions sur l'ensemble de la période selon les scénarios Corac (27 Gt de CO₂ pour le scénario S1 ou 25,6 Gtonnes pour le scénario S2) est très proche de celui de la trajectoire « aviation-2°C » (26,7 Gtonnes), indiquant que la **stratégie d'évolution proposée ici est compatible avec le scénario SSP1-2.6** (maintien sous les 2 °C d'accroissement de température).
- Le maintien d'une part stable de l'aérien dans le total des émissions anthropiques est une hypothèse qui

peut être discutée : pour tenir compte des longueurs de cycles propres à l'aérien, il pourrait être envisagé d'accroître transitoirement cette part, puis de la réduire quand les innovations technologiques seront pleinement mises en œuvre.

- L'introduction de mesures de compensation, non prise en compte ici, est susceptible sur la période 2025-2040 de ramener la courbe d'émissions nettes sur la trajectoire de référence SSP1-2.6.

En résumé, on notera que cette comparaison permet de piloter au cours du temps les écarts à une courbe cible déduite des modèles de climat. Les conséquences en termes de politique énergétique, de mise en place de mesures de compensation, etc., sont à analyser dans une vision pluriannuelle par les pouvoirs publics et les acteurs du domaine.

ÉMISSIONS DE CO₂ (Mt/an)

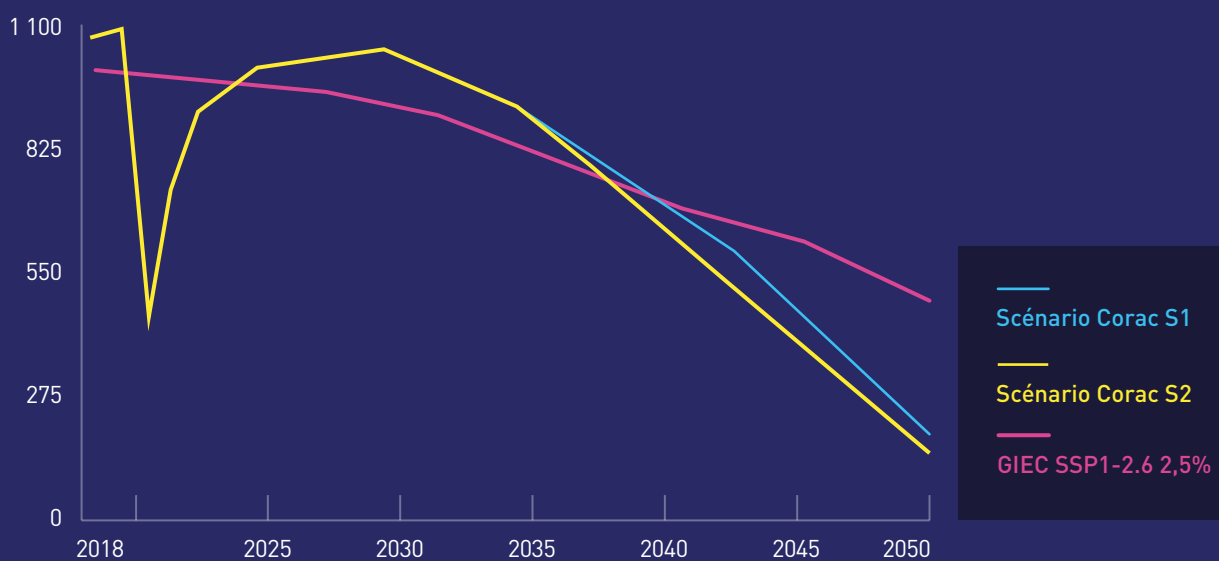


FIGURE 12 - Comparaison des scénarios Corac au scénario GIEC SSP1-2.6 ramené à une part de 2,5 % pour l'aérien, sur toute la période considérée.

CONCLUSION

Les grands objectifs de la feuille de route du Corac ont été traduits ici en une modélisation des émissions carbone du trafic aérien mondial jusqu'en 2050.

Cette étude, fondée sur un modèle de simulation des flottes détaillé, recalé sur les bases de données internationales, permet d'apporter quelques éléments essentiels :

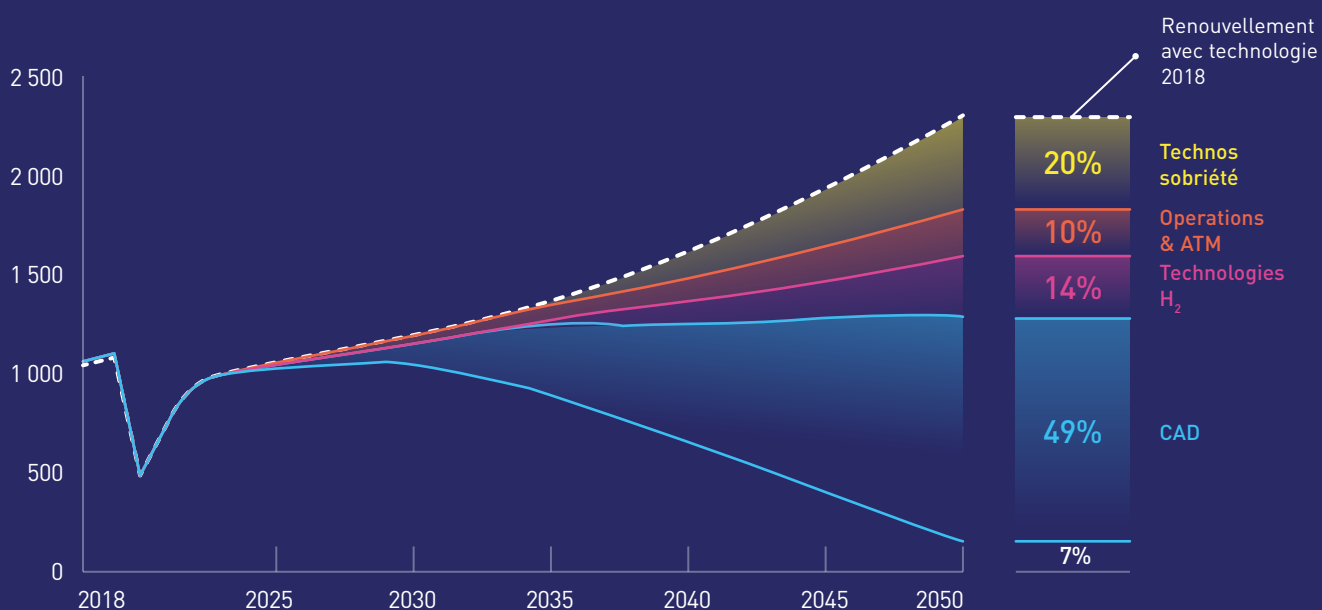
- Les différents scénarios technologiques envisagés permettent d'atteindre en 2050, sans application de mesures de marché, **une division par un facteur compris entre 5 et 8, selon les cas, du niveau d'émissions enregistré en 2019.**
- **Pour y parvenir, les carburants d'aviation durables doivent jouer un rôle majeur, compte tenu des temps caractéristiques de l'innovation dans le secteur aéronautique.** Leur utilisation avec un taux d'incorporation maximale appelle en premier lieu à des **actions de R&T spécifiques** pour assurer la pleine compatibilité des moteurs et des aéronefs. La clé

du succès tient également à un déploiement rapide, accompagné d'une montée en régime dynamique de la production afin d'assurer la livraison de plusieurs centaines de millions de tonnes par an pour l'aviation à l'échelle mondiale. **Il convient néanmoins de rappeler que ce déploiement doit s'effectuer dans des conditions de réglementation internationale permettant de préserver la compétitivité de tous les opérateurs.**

- **Les actions technologiques et opérationnelles visant à l'ultra-sobriété sont inséparables de cette transition vers des énergies non fossiles, dont le coût de production sera supérieur à celui du kérosène supérieur à celui du kérosène et appellera à réduire au maximum la consommation unitaire des appareils.**

SCÉNARIO S2, RÉFÉRENCE DU PLAN TECHNOLOGIQUE 2020-2030 DU CORAC

Émissions de CO₂ (Mt/an)



Deux scénarios ont été analysés selon la date de mise sur le marché de l'hydrogène sur le segment des courts-moyens courriers. Une production presque entièrement décarbonée le rendant plus efficace que les biofuels, une entrée en service dès 2035 d'un SMR alimenté à l'hydrogène, puis sa diffusion dans les flottes conduit à une réduction plus rapide de l'empreinte carbone globale. La référence retenue pour le plan technologique du CORAC est ce scénario S2 d'entrée en service au plus tôt, associé à une diffusion de l'hydrogène à hauteur de 50% de la flotte mondiale de courts-moyens courriers . **Ce scénario sera confirmé par des développements et démonstrations prévues en milieu de la décennie en cours.**

En conclusion, le modèle de trajectoire carbone décrit ici est destiné à être un outil de suivi quantitatif, proposant une traduction en bilan carbone des grandes options du Corac, partagé par ses acteurs publics et privés. Il sera régulièrement remis à jour sur l'ensemble des hypothèses utilisées afin d'intégrer les évolutions de la feuille de route technologique comme celles relatives au déploiement de carburants non fossiles.

ANNEXE

CALCUL SUR LE PÉRIMÈTRE FRANCE (VOLS INTÉRIEURS MÉTROPOLÉ ET DOM-TOM)

1. Principales hypothèses

Le modèle a été utilisé ici sur le périmètre des vols intérieurs métropole + DOM-TOM et inclut le fret sur les lignes régulières. Seuls les appareils de plus de 20 passagers ont été comptabilisés. Le calcul a été recalé sur les données complètes de flottes de la base OAG sur ce périmètre pour l'année 2018.

Le total des émissions de CO₂ pour les vols intérieurs métropole + DOM-TOM en 2018 est de 5,16 Mtonnes si l'on se limite à la combustion, soit 6,12 Mtonnes sur l'ensemble du cycle de vie.

ÉVOLUTION DE LA DEMANDE

La référence utilisée ici repose sur les prévisions Airbus intra-Western Europe sur la période 2018-2038, soit en moyenne 2,3 %, ce qui compte tenu de la période covid conduit à un niveau de 3 % sur 2024-2038 et de 2,3 % par an sur 2039-2050.

2. Résultats sur le périmètre France

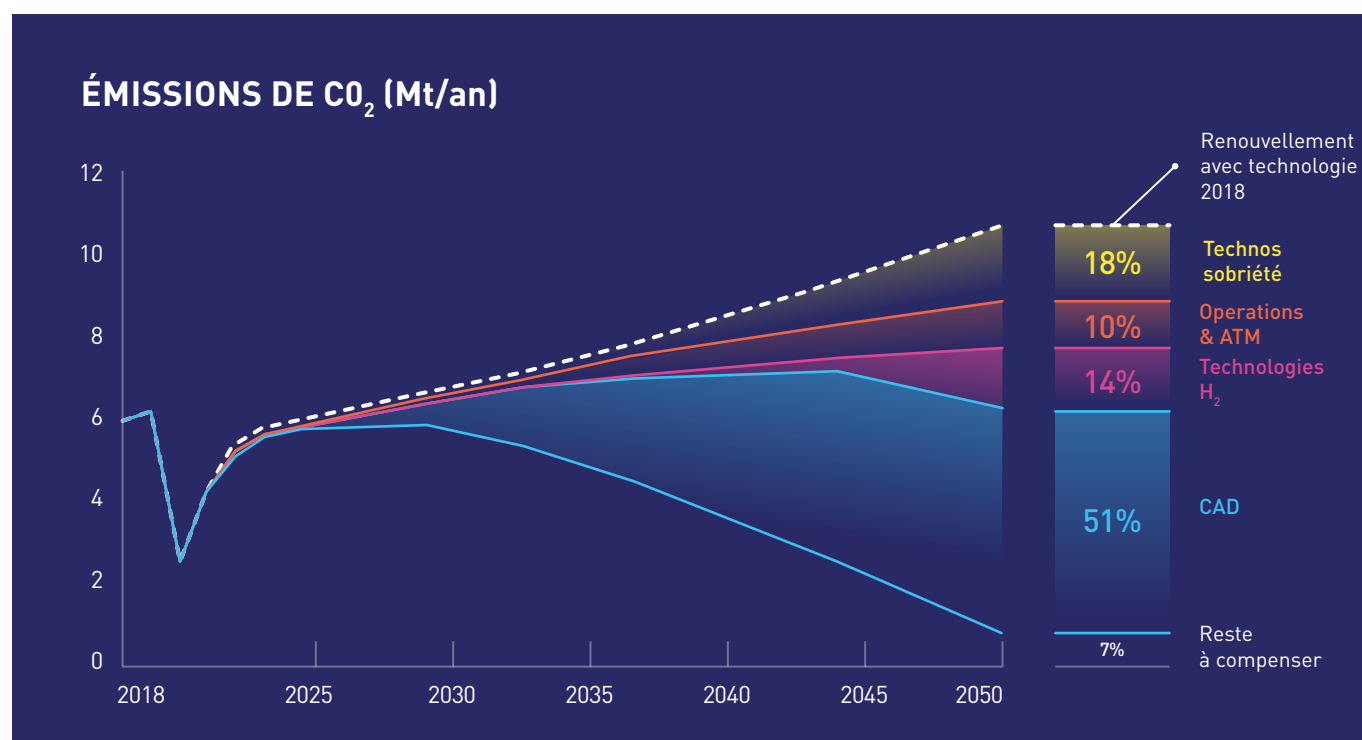


FIGURE 13 - Évolution des émissions de CO₂ pour le trafic aérien sur le périmètre France, pour une croissance issue des prévisions Airbus intra-Western Europe. Calcul pour le scénario S1.

ÉMISSIONS DE CO₂ (Mt/an)

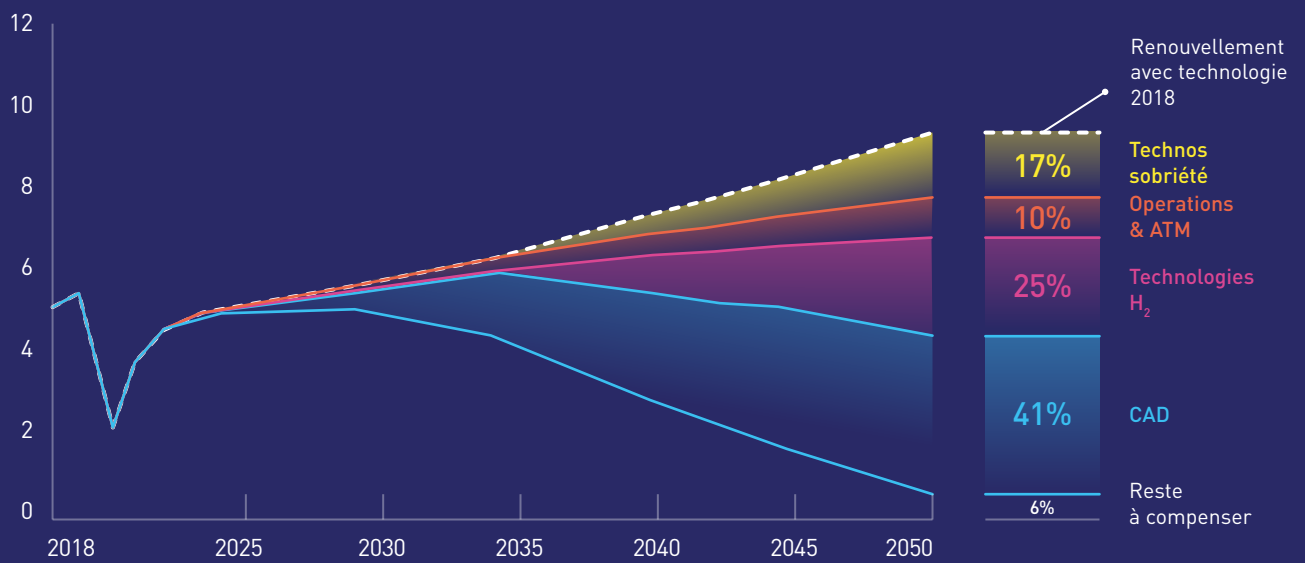


FIGURE 14 - Évolution des émissions de CO₂ pour le trafic aérien sur le périmètre France pour une croissance issue des prévisions Airbus intra-Western Europe. Calcul pour le scénario S2.

3. Approvisionnement en combustibles

Les volumes des différents combustibles nécessaires pour alimenter le trafic aérien intérieur France en 2050

(métropole + DOM-TOM) sont représentés ci-dessous, avec différentes hypothèses de croissance.

MASSE DE COMBUSTIBLE (Mt) EN 2050

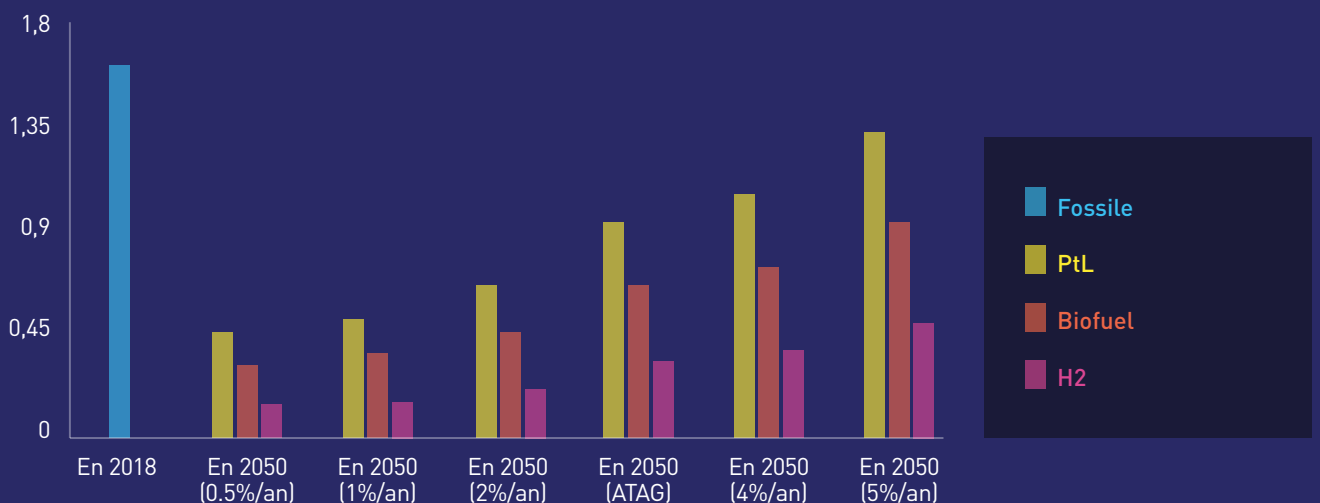


FIGURE 15 - Quantités de combustible utilisées dans les simulations en fonction de la croissance (France).

