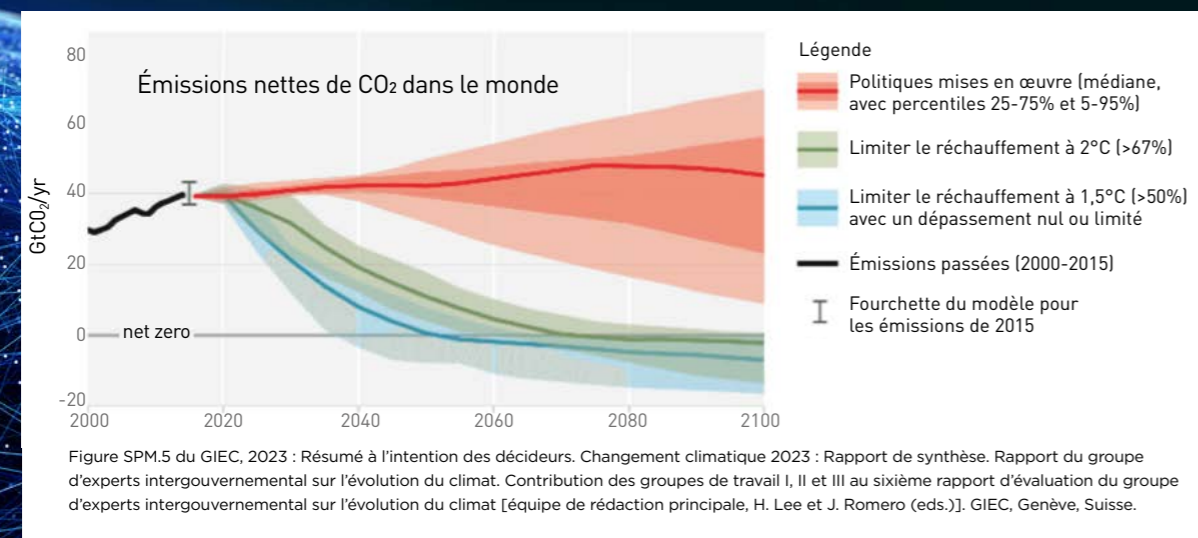


*VERS UN VOYAGE
AÉRIEN
DÉCARBONÉ*

Depuis 1990, les rapports successifs du GIEC* confirment que les activités humaines sont responsables du réchauffement du climat terrestre, en analysent les effets et consolident différents scénarios d'évolution des températures en fonction des émissions de gaz à effet de serre. Le 6^e rapport du GIEC publié en mars 2023 livre le constat alarmant d'une poursuite de l'augmentation de ces émissions, dont le rythme actuel conduit à une hausse moyenne des températures en 2100 compris entre 2,4 et 3,5°C. Ce document précise également les trajectoires de réduction des principaux gaz à effet de serre compatibles d'une limitation du réchauffement planétaire à 2°C et à 1,5°C, telles qu'envisagées aux termes de l'accord de Paris en 2015 (voir graphique). Tous les États, tous les secteurs économiques, doivent aujourd'hui collectivement relever ce défi majeur.



Un mouvement mondial pour une ambition à faire partager par tous

Le transport aérien est passé, en quelques décennies, du temps des pionniers et des voyages d'exception, à celui d'un monde ouvert, connectant les hommes et les territoires, permettant les échanges entre les peuples, les régions enclavées ou insulaires, soutenant le développement des économies. Les progrès considérables sur la sécurité, l'efficacité et le coût du transport aérien l'ont généralisé à l'échelle internationale et ouvert à un public de plus en plus large. Les acteurs du domaine, institutionnels, industriels, compagnies aériennes, aéroports, etc. font ensemble le pari de poursuivre l'aventure et d'offrir les mêmes chances de voyage aux générations futures tout en se situant à la pointe d'un mouvement mondial de réduction de l'empreinte environnementale de nos sociétés.

L'effort sera sans précédent, et s'incarne dans l'objectif d'une aviation neutre en carbone en 2050, compatible avec une limitation du réchauffement à 1,5°C en 2100.

Mobilisée depuis plus de 15 ans vers la décroissance des émissions carbone du transport aérien, l'OACI** a rassemblé, en octobre 2022, 185 pays sur cet objectif de neutralité carbone en 2050 : l'aérien est ainsi le premier secteur à se donner un objectif d'une telle ampleur à l'échelle mondiale. De nombreux pays, parmi lesquels ceux de l'UE ou les États-Unis, définissent aujourd'hui leur stratégie vers la réalisation de cet objectif, et des feuilles de route propres à toutes les régions du monde sont en cours d'élaboration, tenant compte des contextes historiques, économiques et géographiques qui leur sont propres.

* GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

**OACI : institution des Nations-Unies créée en 1944, qui définit les normes internationales pour la sécurité et le développement durable du transport aérien, met en place et actualise les normes d'émission de CO₂, de bruit, etc. L'OACI a défini et institué un dispositif transitoire de compensation des émissions carbone (CORSIA).

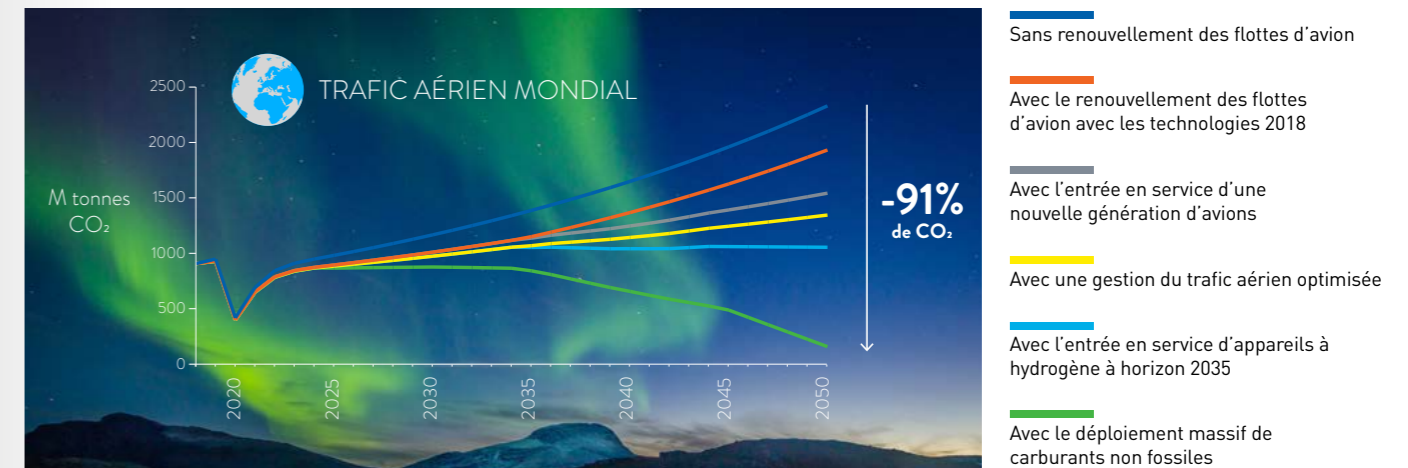
Vers un transport aérien neutre en carbone en 2050

Le transport aérien est responsable d'environ 2,5% des émissions anthropiques de CO₂, cette proportion étant demeurée stable depuis 2 décennies, malgré l'augmentation du trafic. Les émissions de dioxyde de carbone, principal gaz à effet de serre, étant proportionnelles à la quantité de carburant brûlé, réduire la consommation de carburant réduit d'autant les émissions de CO₂. Les progrès technologiques et opérationnels ont

permis une division par 2 des émissions unitaires (par passager.km) en 30 ans, et les appareils de dernière génération consomment moins de 2 litres aux 100km par passager. Cette progression continue de l'efficacité énergétique des avions ne sera pas suffisante pour compenser l'accroissement de la demande mondiale du transport aérien et un effort de grande ampleur devra être porté sur 3 leviers d'action :

- Le renouvellement des flottes, avec les technologies actuelles* puis avec les futures générations d'avions ultrasobres qui entreront en service au milieu de la prochaine décennie.
- Des opérations plus efficaces, au sol comme en vol peuvent être déployées dès la décennie en cours, réduisant encore la consommation, avec un gain supplémentaire jusqu'à 10% à l'horizon 2050.
- En parallèle de cette réduction de la consommation, le développement puis la généralisation de l'usage de carburants non fossiles doit permettre de réaliser la transition énergétique de l'aérien en 2050.

Sur cette base, plusieurs scénarios de décarbonation ont été élaborés et publiés : ils sont conçus pour éclairer les politiques publiques et évaluer et accompagner les stratégies collectives des acteurs du secteur.



© Onera - Scénario de décarbonation de l'aérien (périmètre du transport aérien mondial) sur la base des scénarios CORAC



PAS SI SIMPLE...

- Les lois de la physique ne permettent pas le recours rapide et généralisé à certaines solutions
- Il faut aller vite, mais concevoir et faire entrer en service une nouvelle génération d'avions demande en moyenne 15 ans
- Le coût élevé des carburants non fossiles freine leur usage et donc le déploiement de la production



MAIS DE VRAIS ATOUTS...

- Une longue tradition d'innovation qui a permis de relever des défis majeurs
- Une coordination mondiale sur des objectifs ambitieux
- Des filières industrielles organisées, des centres de recherches performants
- Pas de solution unique mais un très large éventail de voies de décarbonation

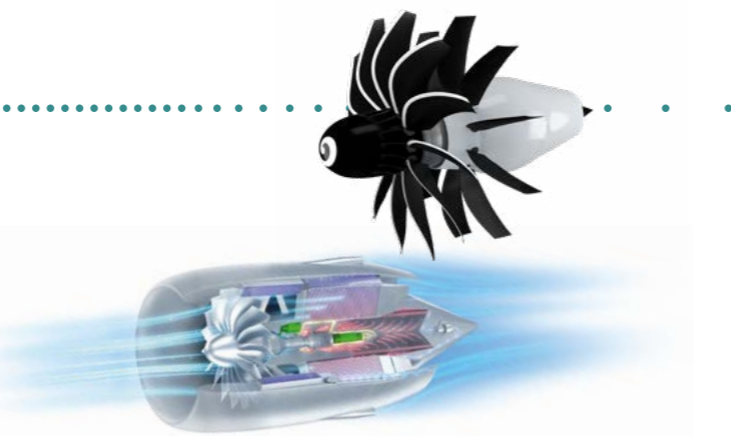
* Les avions de dernière génération ne représentent que 20% de la flotte mondiale actuelle.

Concevoir et opérer l'avion de demain.....

Les progrès technologiques ont permis de renouveler les flottes avec des appareils toujours plus performants en rendement énergétique comme en sécurité. **Si le gain en consommation entre deux générations d'appareils était jusqu'ici de 15%, il s'agit cette fois de franchir un nouveau cap en concevant des appareils de 20 à 30% moins consommateurs que ceux de la génération actuellement en service, capables de voler avec 100% de carburants durables, et adaptés à des opérations optimisant la consommation.** Les programmes actuels portent essentiellement sur la future génération d'avions régionaux et de court et moyen-courriers. Certaines pistes de progrès sont connues au moins dans leur principe - réduire la traînée, augmenter la portance, alléger les structures, intégrer davantage les systèmes électriques et avioniques tout en réduisant leur masse, augmenter le rendement propulsif des moteurs. D'autres sont plus novatrices, avec le développement de l'hybridation électrique ou le recours à l'hydrogène. **De nombreuses options technologiques sont à l'étude et des étapes de démonstration à l'échelle 1 et en situation sont programmées pour choisir et associer les options les plus favorables.**

Architecture et configurations

Les architectures classiques devront évoluer pour adapter les futurs aéronefs aux contraintes d'intégration de moteurs de plus grand diamètre, et, dans le cas d'avions propulsés à l'hydrogène, pour permettre une refonte complète des réservoirs et des systèmes de distribution de carburants. **Des concepts en rupture radicale, comme celui de l'aile volante sont également à l'étude.** Par ailleurs, l'amélioration de la portance et la réduction de la traînée conduisent à concevoir des **voilures ultra-performantes**, par exemple à grand allongement, en prévoyant des systèmes de contrôle actif permettant d'optimiser la forme de la voilure dans toutes les conditions de vol.



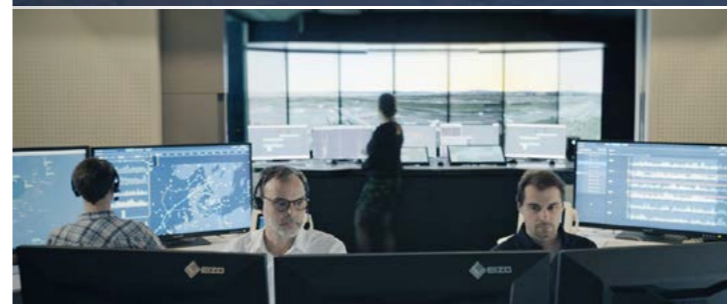
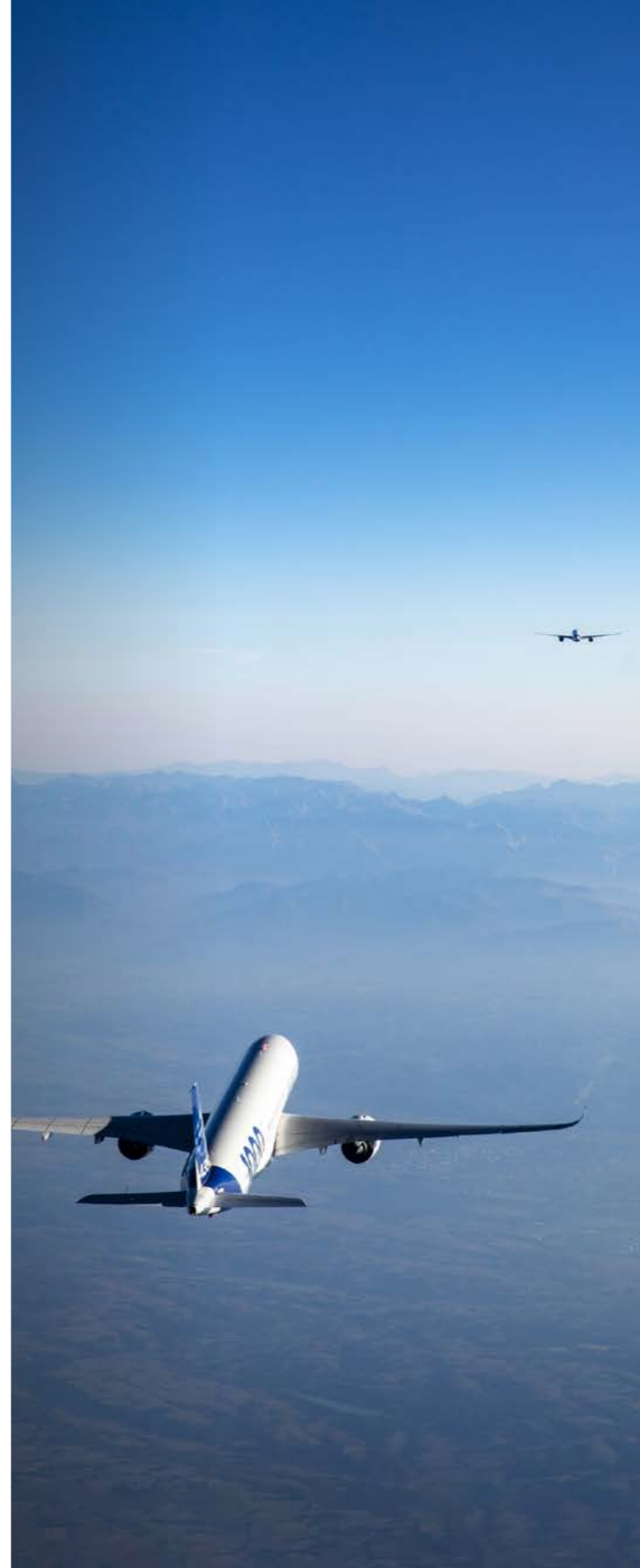
Propulsion : vers l'ultra sobriété

Pour les futurs court et moyen-courriers, **la mise en oeuvre d'une architecture non carénée** doit permettre de franchir une nouvelle étape dans l'efficacité propulsive des turboréacteurs en augmentant considérablement leur taux de dilution. Cette configuration en rupture permet à elle seule un gain de 20% en consommation, et doit être optimisée dans une architecture avion spécifique. **D'autres options passent par le fonctionnement de réacteurs à plus haute pression ou l'optimisation du rendement moteur.** Enfin l'utilisation d'énergie électrique hybridant le fonctionnement du moteur sur certaines phases de vol fait l'objet d'études actives chez les différents motoristes et les avionneurs.



Avion plus électrique, hybridation

L'électrification des systèmes embarqués (freinage, conditionnement d'air, trains d'atterrissage équipés de moteurs électriques, ...) est déjà largement engagée et se poursuivra en réduisant les prélèvements sur l'énergie fournie par les moteurs. **Le recours à l'énergie électrique en soutien à la fonction propulsive** est une option explorée avec des **solutions d'hybridation** combinant un turboréacteur avec une chaîne de propulsion électrique utilisant des batteries : ces techniques d'hybridation, déjà testées sur de petits appareils sont appelées à jouer un rôle important pour le développement de futurs avions, notamment régionaux.



L'hydrogène

L'hydrogène possède de nombreux atouts : accessible en très grande quantité par électrolyse de l'eau, ne produisant pas de CO₂, sa combustion produisant 3 fois plus d'énergie que le kérosène à masse égale, ... mais occupant un volume 4 fois plus important même sous forme liquide à -253°C. **Son utilisation comme carburant dans un turboréacteur dans le cas d'un appareil régional ou court courrier fait l'objet de recherches actives car les défis sont nombreux** : il est nécessaire de repenser l'architecture de l'avion pour y loger des réservoirs de grand volume, de maîtriser les techniques de stockage cryogénique, etc.

L'hydrogène peut aussi être utilisé dans une pile à combustible pour alimenter un moteur électrique, pour l'énergie embarquée, ou pour la propulsion électrique, sur le segment des petits avions au regard des ordres de grandeur d'énergie et de puissance en jeu. Dans tous les cas, pour assurer la neutralité carbone, l'hydrogène devra être produit à partir d'électricité décarbonée.



Opérations

L'optimisation des opérations en vol et au sol constitue un levier significatif de réduction de consommation qui peut être mis en œuvre rapidement. Il s'agit d'optimiser la gestion globale du trafic aérien, et de réaliser des trajectoires de vol plus économes en carburant (descentes continues, optimisation des vols grâce à des données satellites). De façon générale, optimiser les flux de trafic et la trajectoire d'un avion individuel fera appel à des solutions logicielles innovantes maximisant la collaboration bord-sol. Des procédures en rupture sont également envisagées, comme le vol en formation, inspiré des oiseaux migrateurs, permettant à l'avion suiveur de bénéficier de l'effet aérodynamique de son prédécesseur et donc de réduire sa consommation.

La réduction des émissions liées aux opérations au sol passe par la conversion des flottes d'engins aéroportuaires à l'électricité ou à l'hydrogène, le recours à des systèmes d'alimentation électrique au sol lors du stationnement, le roulage à moteur réduit ou le développement d'actionnement électrique pour les équipements (freins, inverseurs de poussée, etc.).

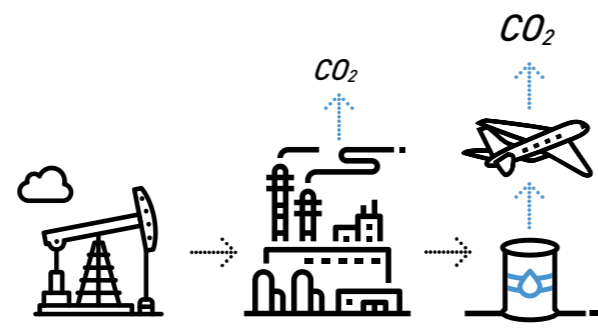
De nouvelles énergies

Les carburants aéronautiques durables sont chimiquement similaires au kérosène mais leur combustion est, contrairement aux combustibles fossiles, neutre dans le cycle du carbone ; ils se classent en 2 grandes catégories :

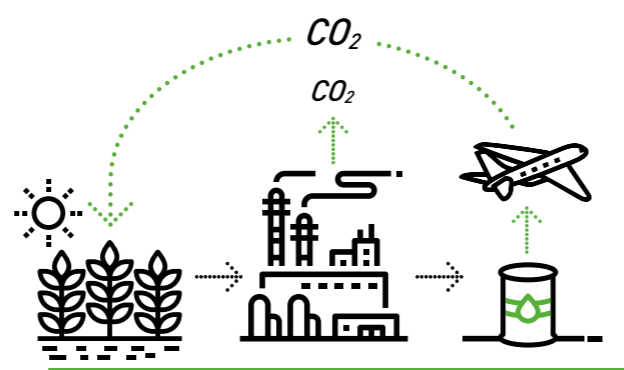
- Les **biocarburants avancés**, issus de biomasse lignocellulosique, c'est-à-dire de matières premières (végétales) dont le développement s'est fait en captant du gaz carbonique (CO_2) par photosynthèse, et d'huiles de cuisson usagées ou de graisses animales.
- Les **électro-carburants** (également appelés e-fuels) produits grâce un procédé de synthèse utilisant du CO_2 capté dans l'atmosphère (captation directe ou dans des effluents industriels) et de l'hydrogène décarboné.

9 filières de production de carburants aéronautiques durables sont actuellement certifiées pour un mélange pouvant aller jusqu'à 50% avec du kérosène, et ont été utilisées pour de très nombreux vols commerciaux. Les études actuelles visent **un taux d'incorporation de 100% d'ici la fin de la décennie**.

Pour être durables sur l'ensemble de leur cycle de vie, et atteindre un taux de réduction des émissions de CO_2 supérieur à 70%, les biocarburants aéronautiques devront être **à terme issus de ressources lignocellulosiques (résidus forestiers ou agricoles), ou lipidiques (huiles usagées, graisses animales), sans compétition avec les filières alimentaires et sans effet sur l'usage des terres. Pour maximiser l'utilisation de la biomasse, le rendement de certains procédés pourra être très significativement augmenté grâce à l'ajout d'hydrogène décarboné** (électro-biocarburants). Les technologies de production de biocarburants avancés sont matures et nécessitent aujourd'hui un déploiement massif de la filière pour atteindre les niveaux d'incorporation cible.



Kérosène fossile



Bio Kérosène

La production d'électro-carburants est encore en phase pilote, mais de nombreux projets sont en développement dans le monde entier, car cette filière **présente de nombreux avantages en termes de durabilité et de disponibilité des matières premières** (pas de recours à la biomasse). Néanmoins, son coût demeure pour l'instant très supérieur à celui des différentes filières de biocarburants et exige de disposer d'une énergie électrique décarbonée.

La production de carburants durables a été multipliée en 2022 par 10 par rapport à 2021 mais ne représente que 0,1 % du carburant aérien consommé dans le monde. **Il est donc nécessaire d'accélérer dès aujourd'hui la production de ces différents carburants non fossiles. Pour entrer dans un cycle vertueux de croissance de l'offre et de la demande, des politiques volontaristes devront être mises en œuvre.** Un équilibre devra être trouvé entre différentes filières, selon les contextes industriels propres à chaque région du monde, afin d'optimiser les ressources, biomasse et électricité décarbonée. Au sein de l'Union européenne, un taux d'incorporation de carburants durables de 70% est visé en 2050, dont 35% d'e-fuels.

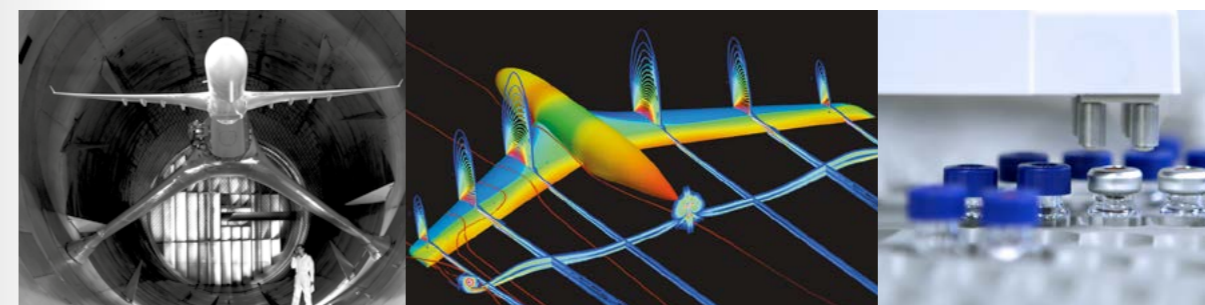
Mobiliser tout un écosystème

Les différentes réponses au défi majeur d'un transport aérien neutre en carbone en 2050 devront être apportées dans un écosystème élargi, les filières industrielles du secteur s'associant à la communauté scientifique et au monde de l'énergie, sur la base de leurs dynamiques propres qui définiront les grandes étapes de la décarbonation.

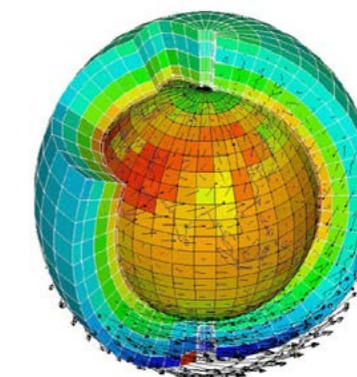
D'ici au milieu de la prochaine décennie, la réduction des émissions de carbone sera le résultat du **renouvellement des flottes** par les appareils de dernière génération, de la mise en place d'un **large éventail de procédures en vol et au sol plus économes en carburants**, et de l'entrée des **carburants durables dans une phase d'industrialisation de leur production**, en ciblant une part d'au moins 20% de la consommation totale en 2035. Dans le même temps, bureaux d'études et centres de recherche mèneront un **effort massif et coordonné de recherche et développement, visant à préparer et valider l'ensemble des technologies pour l'entrée en service de nouvelles générations d'avions sur les segments régionaux et court et moyen-courriers**. Ces efforts seront adossés à la mutation de l'ensemble des filières industrielles vers de nouveaux modes de développement et de production plus sobres et plus efficaces.



Au-delà de l'horizon 2035, le gain de 30% en efficacité énergétique apporté par ces nouveaux programmes, joint à la généralisation des opérations optimisées, au déploiement massif des carburants durables, y compris les options hydrogène, permettra d'accélérer la réduction des émissions, avec un niveau d'émissions résiduelles en 2050 compris entre 10 et 20% de la quantité d'émissions de 2019, selon les simulations prospectives intégrant l'ensemble de ces hypothèses. L'atteinte d'une neutralité carbone effective passera alors par l'application de mécanismes de compensation dont la validité devra être contrôlée selon des normes internationales, à l'instar de CORSIA, le système de compensations des vols internationaux établi par l'OACI.



En parallèle, les travaux de recherche, menés par une communauté scientifique internationale, doivent permettre de préciser et de modéliser l'ensemble des mécanismes complexes de l'impact du transport aérien sur le climat des effets dits « non- CO_2 » (oxydes d'azote produits par la combustion, effets sur la nébulosité), et d'en consolider la représentation dans des modèles d'évolution du climat. Ces recherches sont également essentielles pour orienter les choix technologiques, opérationnels et énergétiques du secteur.



Retrouvez-nous sur



“Pour ce qui est de l’avenir,
il ne s’agit pas de le prévoir,
mais de le rendre possible”

Antoine de Saint-Exupéry



GIFAS, GROUPEMENT DES INDUSTRIES
FRANÇAISES AÉRONAUTIQUES
ET SPATIALES

8, RUE GALILÉE, 75116 PARIS
+33 (0)1 44 43 17 00
WWW.GIFAS.FR

Réalisation : Hopscotch - juin 2023

Crédits photos : Chuttersnap, Getty images, Safran, Collins Aerospace, Airbus 2021 / S. Ramadier, Airbus SAS 2021, 2022, 2023, EcoPulse™ / Daher, Thales, Onera, NESTE / Nina Pulkkis, IPSL