



Résumé exécutif

En annonçant en 2021 un objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050 au niveau mondial, pour être en ligne avec les Accords de Paris, le secteur aérien a franchi une nouvelle étape dans sa trajectoire de décarbonation, en prenant un engagement formel. Cet objectif se décline en un plan d'actions concret, combinant un ensemble de mesures volontaristes et ambitieuses.

La filière aéronautique est stratégique pour la France et pour l'Europe : la réussite de sa transition est essentielle afin d'éviter son déclin, de la confirmer comme acteur de classe mondiale en termes de compétitivité et de technologie, et de permettre aux citoyens français et européens de continuer à bénéficier des contributions majeures de l'aviation à notre société.

C'est dans ce cadre que s'inscrit le présent rapport : il s'agit de détailler l'ensemble des leviers vont permettre d'atteindre l'objectif de neutralité carbone du transport aérien mondial en 2050, et de mesurer le niveau d'ambition que représente cet objectif, notamment à travers une estimation des besoins d'investissement qu'il nécessite. Ce rapport est le résultat de nombreux échanges avec des interlocuteurs de tous horizons (acteurs économiques, milieu académiques, pouvoirs publics, etc.). Il adopte une approche industrielle de la problématique, en examinant les conditions nécessaires à la décarbonation du transport aérien, dans l'hypothèse d'un maintien de la dynamique de croissance que la filière prévoit.

Le secteur aérien, actif essentiel de souveraineté, mis sous tension par la crise sanitaire

Le transport aérien revêt une dimension stratégique essentielle, tant sur le plan des déplacements que sur le plan économique. Il s'agit en effet d'une composante majeure du système de mobilité de nos sociétés modernes, que ce soit pour des motifs personnels (affinitaire – visite de proches, loisirs) ou professionnels, permettant de rejoindre n'importe quelle partie du monde en moins d'une journée et vecteur indispensable pour désenclaver des zones isolées. De plus, le transport aérien facilite les échanges de longue distance, qu'il s'agisse de passagers – avec 4,5 milliards de passagers transportés en 2019, le secteur du tourisme représentant aujourd'hui près de 10 % du PIB mondial – ou de marchandises – le fret aérien représentant 1 % des volumes mais 35 % de la valeur des biens transportés.

Le secteur aéronautique constitue par ailleurs l'une des plus importantes filières industrielles en Europe et en France : il représente près de 350 000 emplois industriels directs en France, et est le principal secteur exportateur du pays (13 % en 2019). En outre, les opérateurs de services (compagnies aériennes, assistance en escale, aéroports) comptent près de 100 000 emplois directs en France. En Europe, l'apport du transport aérien représentait 13,5 millions d'emplois (directs, indirects, liés au tourisme) en 2018 pour 991 Mds\$ de contribution au PIB. La trajectoire de décarbonation du transport aérien doit donc être également examinée à l'aune de cette place de tout premier plan de la filière en France et en Europe.

La crise sanitaire a particulièrement touché le secteur du transport aérien. Les aéroports et les compagnies aériennes ont été les premiers à souffrir de cette situation, avec près des deux tiers de la flotte mondiale clouée au sol en avril 2020. Les industriels n'ont pas été épargnés et ont dû réduire leurs cadences de production, avec des répercussions sur toute la chaîne de sous-traitance du secteur. Le fort soutien des pouvoirs publics a néanmoins permis de préserver les acteurs économiques, de limiter les faillites et de maintenir les compétences. Si le trafic domestique se redresse progressivement, le transport international reste le plus touché à l'heure de la publication de ce rapport.

Dans ce contexte d'incertitude, il émerge un consensus dans la filière selon lequel le trafic retrouvera son niveau d'avant-crise aux alentours de 2024. En raison de la pandémie et de son impact sur le trafic à long terme, la filière a révisé ses prévisions de trafic passagers à + 3,1 % par an sur la période 2019-2050¹. Malgré ces incertitudes, le transport aérien a maintenu sa démarche visant à prendre des engagements supplémentaires en termes de réduction de son empreinte environnementale.

Les acteurs du secteur ont dessiné une trajectoire de décarbonation ambitieuse

Les émissions de CO₂ du transport aérien représentent 2 à 3 % du total des émissions mondiales, et 10 % des émissions du secteur des transports. L'avion est un moyen de transport très efficace atteignant aujourd'hui une consommation de 3L/100km/passager : l'avion consomme moins de carburant par passager-kilomètre qu'une voiture en considérant le remplissage moyen des deux modes. Par ailleurs, les émissions de CO₂ par passager-kilomètre du transport aérien ont été divisées par deux depuis 1990 sous l'effet combiné des progrès technologiques des avions et des améliorations des opérations et des infrastructures : ainsi, malgré

¹ Air Transport Action Group (ATAG), Waypoint 2050, 2^e édition (septembre 2021).

une croissance historique importante du trafic aérien (+ 5,3 % par an depuis 1990), le secteur a réussi à contenir son empreinte carbone (+ 2,5 % par an).

Le secteur aérien s'est résolument engagé à atteindre la neutralité carbone à horizon 2050, avec la volonté de dessiner un avenir du transport aérien qui réponde aux objectifs de l'accord de Paris, et aux attentes sociétales des consommateurs, pouvoirs publics, investisseurs, etc. Concrètement, cela nécessitera de prioritairement réduire, et en complément de compenser, les émissions de CO₂ du transport aérien mondial. Si ces dernières sont au cœur de ce rapport, il faut noter que le transport aérien est responsable d'autres émissions pouvant avoir un impact négatif sur le climat, en particulier les oxydes d'azote et les traînées de condensation. L'amélioration de l'efficacité des avions et l'optimisation des profils de vol sont identifiés comme autant de moyens de réduire ces émissions.

Des leviers de décarbonation existent, et doivent tous être activés pour permettre à la filière de l'aérien d'engager sa transition

Le scénario de référence retenu dans ce rapport est le plus ambitieux en termes de progrès technologique parmi les différents scénarios identifiés par l'industrie². Quatre principaux leviers sont nécessaires pour atteindre l'objectif de neutralité carbone du secteur aérien :

- I. Les développements technologiques (~34 % de l'effort de décarbonation à horizon 2050) ;
- II. L'optimisation des opérations en vol et au sol (~7 %) ;
- III. Les carburants alternatifs (~53 %) ;
- IV. Les mesures de compensation (~6 %).

I. Créer les conditions permettant de stimuler les innovations technologiques, et encourager le renouvellement des appareils pour bénéficier de leur impact sur les émissions de CO₂ (~34 % de l'effort de décarbonation en 2050)

Les **innovations incrémentales** sont basées sur des concepts maîtrisés et rapidement adoptables dans les futurs appareils, permettant de réduire l'empreinte environnementale des avions (amélioration de l'aérodynamisme, optimisation du rendement moteur, recours accru à la digitalisation) : elles devraient représenter un tiers des bénéfices attendus.

Si les **innovations de rupture** contribuent davantage à cet objectif, avec deux tiers des bénéfices attendus, leur faible niveau de maturité requiert la poursuite des investissements en R&D. Plusieurs concepts sont à l'étude, les plus emblématiques portant

sur la propulsion (hybride) électrique d'une part et sur la propulsion à l'hydrogène d'autre part. Cependant, en raison de la faible densité énergétique des batteries ou des piles à combustible, l'avion électrique restera réservé aux petits appareils (taxi volant, navette). En outre, les modifications technologiques à apporter à la conception actuelle des avions sont telles que les premiers avions commerciaux à hydrogène ne devraient pas entrer en service avant 2035, avec un rayon d'action qui demeurera inférieur 2 000 km.

Ces innovations concernent donc essentiellement les avions court et moyen-courriers, et auront un impact plus limité sur les long-courriers, responsables de près d'un tiers des émissions de CO₂ du transport aérien. Une très grande partie des avions commerciaux (> 80 %) continuera en 2050 à être propulsée par des moteurs classiques, utilisant des carburants conventionnels (kérosène) ou alternatifs (biocarburants, carburants de synthèse).

Le **renouvellement des avions** permet de capter les effets bénéfiques des évolutions technologiques en faveur de la réduction de la consommation et par extension des émissions de CO₂. À titre d'illustration, le remplacement théorique immédiat des 87 % d'appareils d'ancienne génération (en 2019) induirait une diminution des émissions supérieure à 10 %. Le renouvellement régulier des flottes, au fur et à mesure de la disponibilité des nouvelles technologies (tous les 15 à 20 ans), peut contribuer de manière significative à la maîtrise des émissions d'ici 2050. Ce renouvellement doit cependant être compatible avec le modèle économique des compagnies aériennes et de certains industriels, fortement dépendants des revenus de la maintenance des appareils, afin de préserver leur capacité à investir dans les innovations.

RECOMMANDATION n° 1 (Monde)

Accélérer le développement des technologies de rupture en complément d'une accélération de la baisse de consommation incrémentale des appareils.

- a. Accélérer les évolutions incrémentales de réduction de la consommation ;
- b. Maintenir la dynamique d'investissement sur les technologies de rupture, en particulier sur : les nouvelles formes d'appareils, les nouvelles motorisations (y.c. électrification), l'avion fonctionnant à l'hydrogène ;
- c. Préparer le modèle de certification des innovations de rupture ;
- d. Mettre en place des mécanismes pour assurer la compétitivité coût des appareils moins émetteurs (financement de nouvelles infrastructures, compensation du surcoût associé aux nouveaux appareils...).

2 ATAG, Waypoint 2050, 2^e édition (septembre 2021), scénario 3.

RECOMMANDATION n° 2 (France/UE/Monde)

Faciliter le financement du renouvellement des appareils anciens par des appareils plus récents et moins émetteurs dans le cadre de la taxonomie et/ou via des mécanismes de suramortissement.

II. Activer les leviers d'optimisation des opérations au sol et en vol (~7 % de l'effort de décarbonation en 2050)

Plusieurs pratiques sont à l'étude ou en cours de déploiement, sous l'impulsion des régulateurs, des aéroports et des compagnies aériennes. Elles visent à **optimiser le trafic et les espaces aériens** (ex : mise en place d'un « ciel unique » européen), **les vols et les trajectoires** (ex : conduite de « vol parfait »), les opérations au sol (ex : utilisation réduite des réacteurs lors du roulage ou de l'APU lorsque l'avion stationne) et, enfin, **les pratiques d'exploitation** (ex : limitation des pratiques de « tanking » ; allègement du poids des équipements en cabine). Ce levier peut être mis en œuvre plus rapidement que les développements technologiques sur les avions, qui sont limités par le rythme auquel les nouveaux appareils entrent dans les flottes des compagnies aériennes.

De surcroît, le développement de l'**intermodalité train-avion** pourrait être amplifié, là où cela se justifie (ex : France ; Allemagne), en utilisant le train au début et à la fin du parcours, lorsque cela est pertinent.

RECOMMANDATION n° 3 (France/UE/Monde)

Mettre en place les leviers de réduction de la consommation liés à l'opération des appareils.

- En vol : accélérer la mise en place du ciel unique Européen et la digitalisation du contrôle aérien, l'utilisation de localisation satellite pour les vols transatlantique, développer les configurations de vol permettant de récupérer l'énergie de sillage...
- Au sol : limiter l'utilisation des APU lorsque les appareils sont connectés au terminal, optimiser le roulage au sol et le remorquage lorsque pertinent...

RECOMMANDATION n° 4 (France/UE/Monde)

Favoriser l'intermodalité pour les débuts/fin de parcours, en particulier en assurant des liaisons entre les principales gares ferroviaires et aéroports pour faciliter la transition et en mettant en place des parcours passagers intégrés.

III. Promouvoir le recours aux biocarburants au maximum de leur potentiel, et développer les carburants de synthèse, levier nécessaire pour atteindre la neutralité carbone (~53 % de l'effort de décarbonation en 2050)

Le principal levier de décarbonation du secteur aérien, et ce même si le scénario privilégié est le plus ambitieux en termes de progrès technologique, consiste à remplacer les carburants fossiles (kérosène) par des carburants durables d'aviation (SAF³). Concrètement, ces derniers sont soit des **biocarburants** produits à partir de matières premières issues de la biomasse qui sont des « puits » de carbone (cultures agricoles, résidus de l'activité humaine, algues, etc.), soit des **carburants de synthèse** obtenus par un procédé industriel combinant le CO₂ capté dans l'air et l'hydrogène. Quelle que soit la voie privilégiée, la combustion du SAF rejettera le CO₂ initialement présent dans l'atmosphère, mais offre un bien meilleur bilan environnemental que le kérosène, issu du pétrole piégé dans les couches géologiques. En revanche, la voie de synthèse est particulièrement énergivore et doit être utilisée là où elle est pertinente. Si les SAF sont un complément aux technologies de substitution déjà mentionnées (avion électrique, avion hydrogène) pour les vols régionaux (< 500 km), court (< 1 500 km) et moyen-courriers (< 4 000 km), ils représentent en revanche l'essentiel de la décarbonation pour les vols long-courriers (> 4 000 km).

Le développement des SAF nécessitera à la fois de générer de la visibilité sur la demande des compagnies aériennes, comme le prévoit la réglementation européenne (*ReFuelEU Aviation*) à travers l'obligation d'incorporation des SAF, et de soutenir la production afin de développer une filière européenne compétitive. L'introduction d'obligations d'incorporation de SAF, limitée dans un premier temps à l'Europe, ne doit pas générer de distorsion de concurrence, au risque de réduire l'attractivité des hubs européens et de fragiliser nos compagnies aériennes, ou des fuites de carbone à l'extérieur des frontières.

RECOMMANDATION n° 5

Clarifier la définition des SAF et veiller à leur utilisation pour atteindre l'objectif de réduction des émissions.

- (Monde)** Mettre en place des critères de durabilité des SAF partagés par tous les pays, définis par l'OACI, tant en ce qui concerne le type de matière première utilisée que le niveau de réduction des émissions sur le cycle de vie du carburant.
- (France/UE)** Intégrer l'hydrogène dans la définition des SAF afin de permettre le développement de toutes les filières contribuant à la décarbonation du transport aérien.
- (UE/Monde)** Développer l'obligation d'incorporation de SAF sur l'ensemble des géographies, sur le modèle de ce qui a été initié en Europe avec *ReFuelEU Aviation* ; en Europe, faire évoluer la cible à 2050 au-delà des 63 % prévus par *ReFuelEU Aviation* en fonction du rythme d'activation et de l'intensité des différents leviers de décarbonation.

3 Sustainable Aviation Fuel.

RECOMMANDATION n° 6

Soutenir l'offre pour créer un marché des SAF compétitif en Europe.

- a. (France/UE)** Financer des projets de démonstrateurs sur les biocarburants et les carburants de synthèse, en utilisant notamment les fonds de l'EU-ETS.
- b. (France/UE)** Pour initier le développement de la filière en Europe et sécuriser le lancement des premières unités de production, mettre en place des Appels à Projets (prix garanti) et assurer la compétitivité des SAF produits en Europe pendant les premières années (subvention).
- c. (UE)** Adapter dynamiquement la trajectoire d'incorporation des SAF définie dans le cadre de *ReFuelEU Aviation*, afin d'éviter les effets de pallier et d'être cohérent avec l'environnement industriel ; à cet égard, une augmentation de l'ambition à l'horizon 2030 pourrait être envisagée.
- d. (UE)** Pour maximiser les volumes de production, mettre en place des incitations (ex : crédits d'impôts) pour compenser le surcoût entre les SAF et le kérosène pour les injections au-delà des obligations d'incorporation.

RECOMMANDATION n° 7 (UE/Monde)

Limitier les distorsions de concurrence entre hubs / compagnies aériennes.

- a.** À court-terme, mettre en place un mécanisme européen de compensation s'appliquant à tous les trajets au départ de l'UE et proportionnel à la distance parcourue par chaque passager pour subventionner l'incorporation de SAF sans surcoût par rapport au kérosène, afin d'éviter des distorsions de concurrence et des risques de fuite de carbone au profit de parcours hors UE non soumis aux mêmes obligations d'incorporation de SAF.
- b.** À moyen-terme, permettre des vitesses différentes de mise en œuvre des obligations d'incorporation de SAF entre les géographies/pays sans distorsion de concurrence entre les hubs/compagnies aériennes ; adosser l'obligation d'incorporation de SAF au point d'origine de chaque passager et sur l'ensemble de son parcours.
- c.** À long terme, mettre en place des obligations d'incorporation de SAF uniformes au niveau de l'OACI.

Bien que le potentiel de la biomasse indispensable à la production de biocarburants soit très élevé (supérieur aux besoins énergétiques de l'ensemble des transports en 2050), la disponibilité réelle, compte-tenu des contraintes industrielles, logistiques et financières, sera très inférieure aux besoins réels des différents modes de transport souhaitant se décarboner (routier passagers, routier marchandises, aérien, maritime). Après prise en compte des technologies de substitution (batterie électrique pour le transport

routier, ammoniac pour le transport maritime, etc.), les biocarburants représenteront environ 20 % du besoin résiduel en carburant.

Pour surmonter cette limite de disponibilité des matières premières et produire des SAF en quantité, l'utilisation de carburants de synthèse est donc incontournable. En outre, le développement de cette voie représente une opportunité à court-terme pour stimuler la filière hydrogène (en créant des débouchés et incitant des investissements notamment dans les infrastructures) et faire monter en maturité les technologies de captage du CO₂, ces 2 aspects étant majeurs pour la décarbonation non seulement des transports mais plus largement de notre société.

RECOMMANDATION n° 8 (France/UE)

Promouvoir le carburant de synthèse pour dynamiser la mise en place d'une filière de production d'hydrogène de grande échelle :

- Le carburant de synthèse ouvre un débouché de grand volume à court terme pour la production d'hydrogène et permet la mise en place de moyens de production à grande échelle indispensables pour en faire baisser les coûts ;
- Le carburant de synthèse permet de s'affranchir des problématiques de transport et de stockage de l'hydrogène en l'absence d'infrastructures dédiées ;
- Le procédé de fabrication du carburant de synthèse permet de s'affranchir de l'enjeu de disponibilité des matières premières car il n'utilise que de l'air, de l'eau et de l'électricité ;
- Les investissements réalisés pourront ensuite être utilisés pour la distribution d'hydrogène aux aéroports lors de la mise en service des avions à Hydrogène
- La production de carburant de synthèse permet également le développement des technologies de captage du CO₂.

IV. Étendre et amplifier les systèmes de compensation (~6 % de l'effort de décarbonation en 2050)

Deux principaux systèmes de quotas carbone co-existent dans le monde : **EU-ETS**⁴ à l'échelle européenne et **CORSIA**⁵ à l'échelle mondiale. S'ils diffèrent par leur couverture géographique, leur approche, leur applicabilité et leur niveau d'ambition, l'objectif de limiter le niveau des émissions CO₂ du secteur aérien est comparable. Il est essentiel, tout d'abord, que la coexistence de ces systèmes ne fausse pas la concurrence, ensuite, qu'ils convergent finalement vers un objectif de neutralité carbone, et enfin, qu'ils couvrent tous les vols commerciaux.

⁴ European Union Emission Trading Scheme.

⁵ Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation.

RECOMMANDATION n° 9 (UE)

À court-terme, mettre en place un mécanisme pour limiter la distorsion de concurrence liée au trafic de correspondance entre l'Europe et le reste du monde soumis à l'EU-ETS, par exemple en maintenant une fraction des quotas gratuits pour assurer une concurrence équilibrée avec les vols soumis au système CORSIA.

RECOMMANDATION n° 10 (Monde)

Renforcer les systèmes de quotas carbone existants et développer de nouveaux mécanismes pour étendre leur couverture aux émissions du trafic aérien non couvertes à ce jour :

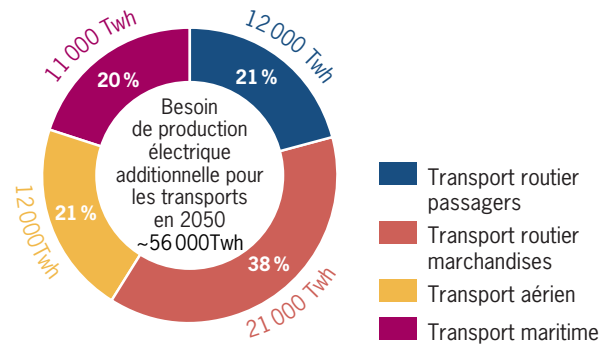
- Encourager la mise en place de mécanismes de marché type ETS pour les émissions domestiques dans les pays et régions autres que l'Europe ;
- À moyen-terme, assurer l'alignement des systèmes de quotas carbone entre eux et avec l'objectif « Net Zéro » de l'industrie.

La décarbonation du transport aérien s'inscrit dans une transition énergétique plus globale qui implique une massification de la production d'électricité décarbonée pour remplacer les énergies fossiles

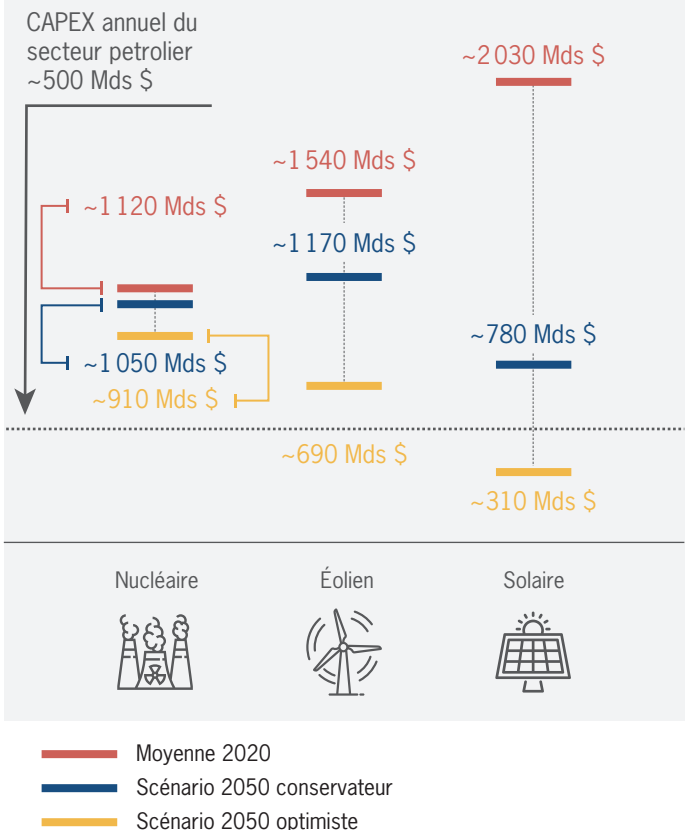
La production de carburants de synthèse présente de nombreux avantages : des intrants (quasi) illimités (eau, air) et un impact CO₂ proche de zéro dans le cas d'utilisation d'énergie décarbonée. Cependant, ce procédé nécessite une quantité importante d'énergie électrique pour produire l'hydrogène et capter le CO₂. Les **besoins en électricité décarbonée** nécessaires pour produire les carburants de synthèse viennent s'ajouter à ceux nécessaires pour la production des autres vecteurs énergétiques de substitution (hydrogène, ammoniac, alimentation des batteries électriques). Au total, si les hypothèses de croissance des différents modes se vérifient, ce sont près de 56 000 TWh qui seraient nécessaires en 2050 pour produire les carburants de substitution aux carburants fossiles pour l'ensemble des moyens de transport (à titre de comparaison, la production électrique mondiale représente 27 000 TWh aujourd'hui). Cela permettrait de réduire les émissions de CO₂ à hauteur de 90 % par rapport à 2018.

Notre système de production d'électricité doit donc être réexaminé dès à présent à la lumière de ce défi énergétique et faire l'objet d'investissements en conséquence, avec une anticipation suffisante des besoins futurs. Le niveau d'investissements requis est considérable, de l'ordre de 1 000 milliards de dollars par an. Comparé au niveau historique d'investissement dans le secteur pétrolier (près de 500 milliards de dollars par an), ce montant semble toutefois accessible si des politiques très volontaristes sont mises en place.

Niveau d'investissement requis en 2050 pour des capacités supplémentaires de production d'électricité destinées à la décarbonation des transports, par rapport au secteur pétrolier



Investissements CAPEX annuels sur 2020-2050



Source: Archery Strategy Consulting analysis.

RECOMMANDATION n° 11 (Monde)

Mettre en place une politique d'investissement massive dans les énergies décarbonées, au-delà du remplacement des modes de production actuellement utilisés, pour répondre aux nouveaux besoins des acteurs du transport à l'horizon 2050.

Un niveau d'ambition élevé, qui nécessite une mobilisation rapide et forte des acteurs industriels et des États

La mise en œuvre combinée des leviers présentés dans ce rapport doit permettre l'atteinte de l'objectif de neutralité carbone du transport aérien en 2050. La trajectoire présentée est ambitieuse et représente un défi majeur pour les secteurs des transports, de l'aéronautique en particulier et de l'énergie (producteurs d'électricité et de carburants alternatifs) : il est essentiel de mettre en œuvre une action coordonnée entre ces secteurs, dans laquelle les États ont un rôle central à jouer afin de permettre et soutenir une mise en œuvre rapide des investissements nécessaires, en particulier dans des moyens de production électrique décarbonée.

Ne pas s'engager dans la dynamique présentée dans cette étude constituerait un triple risque pour le transport aérien de voir (i) une remise en question de la dynamique de croissance du trafic aérien, (ii) un déclassement de la filière aéronautique et (iii) l'émergence d'une nouvelle dépendance aux pays exportateurs de carburants d'aviation durable.