



POUVOIR VOLER SANS PÉTROLE: QUEL APPROVISIONNEMENT ÉNERGÉTIQUE POUR LE SECTEUR AÉRIEN ?

Synthèse — Février 2026



CONTEXTE

L'aérien, un secteur particulièrement vulnérable à la double contrainte carbone



Portée par l'abondance d'un pétrole longtemps perçu comme inépuisable, l'aviation civile s'est imposée en un demi-siècle comme l'un des moteurs les plus puissants de l'internationalisation des échanges. Elle tient aujourd'hui une promesse vertigineuse : relier, en quelques heures, presque n'importe quel pôle d'attraction du globe, créant ainsi une continuité géographique et économique sans précédent.

L'opération et le développement des lignes aériennes reposent encore entièrement sur les énergies fossiles, ce qui place désormais le secteur face à une double contrainte carbone. d'une part, l'aggravation du changement climatique impose une réduction rapide de ses émissions, d'autre part, le verrouillage géopolitique actuel et le déclin à venir du pétrole fragilisent son approvisionnement.

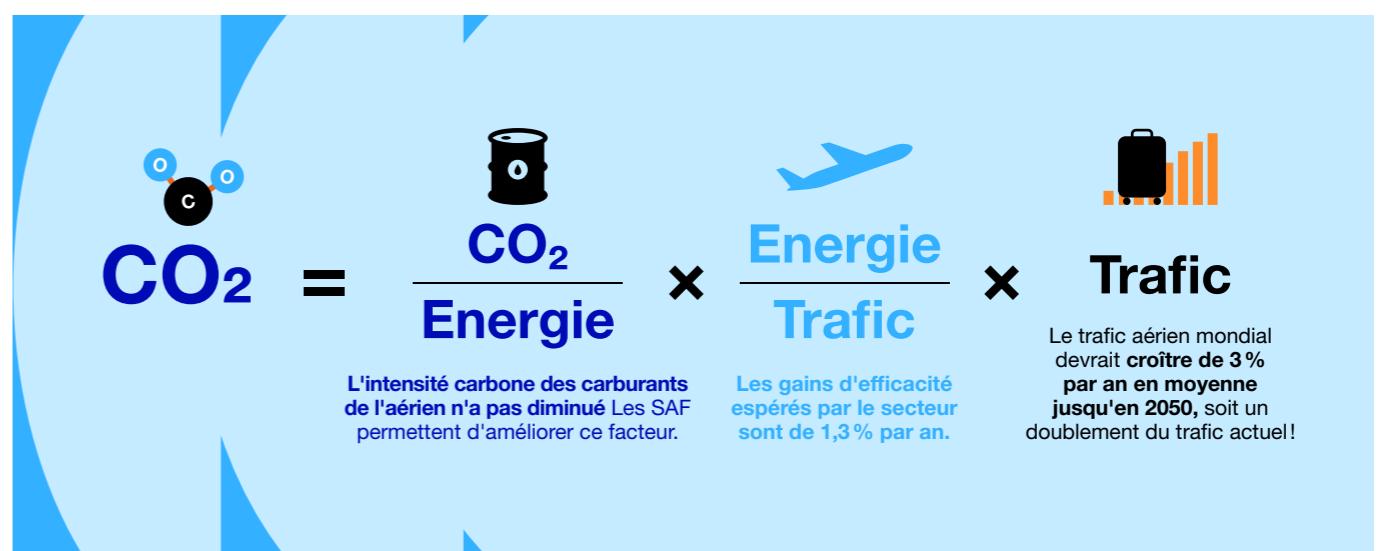
L'aviation commerciale est aujourd'hui responsable de 2 à 3 % des émissions mondiales de CO₂. Cette part s'élève à environ 5 % dans l'Union européenne et 6,8 % en France.

Son impact climatique dépasse cette seule contribution : avec les effets dits "hors-CO₂" des traînées de condensation persistantes et des oxydes d'azote en altitude, le secteur représente presque 5 % de l'augmentation du forçage radiatif mondial.

Si l'on focalise l'analyse sur l'empreinte carbone du secteur, la décomposition ci-dessous permet d'isoler trois ressorts structurants des émissions : l'intensité carbone de l'énergie, l'efficacité énergétique et le volume de trafic.

Dans un contexte où le secteur aérien prévoit de poursuivre la croissance de son trafic à un rythme soutenu, tandis que les gains d'efficacité (amélioration des aéronefs, des opérations aériennes et au sol) devraient rester limités, et que les programmes de rupture, tels que l'avion à hydrogène, ont été repoussés à un horizon indéterminé, il apparaît clairement que la réduction de l'intensité carbone de l'énergie devra constituer le principal levier technique de décarbonation.

L'objet de ce rapport est donc d'examiner la faisabilité de la transition du secteur vers des carburants liquides non fossiles, regroupés sous l'appellation générale de Sustainable Aviation Fuels (SAF).

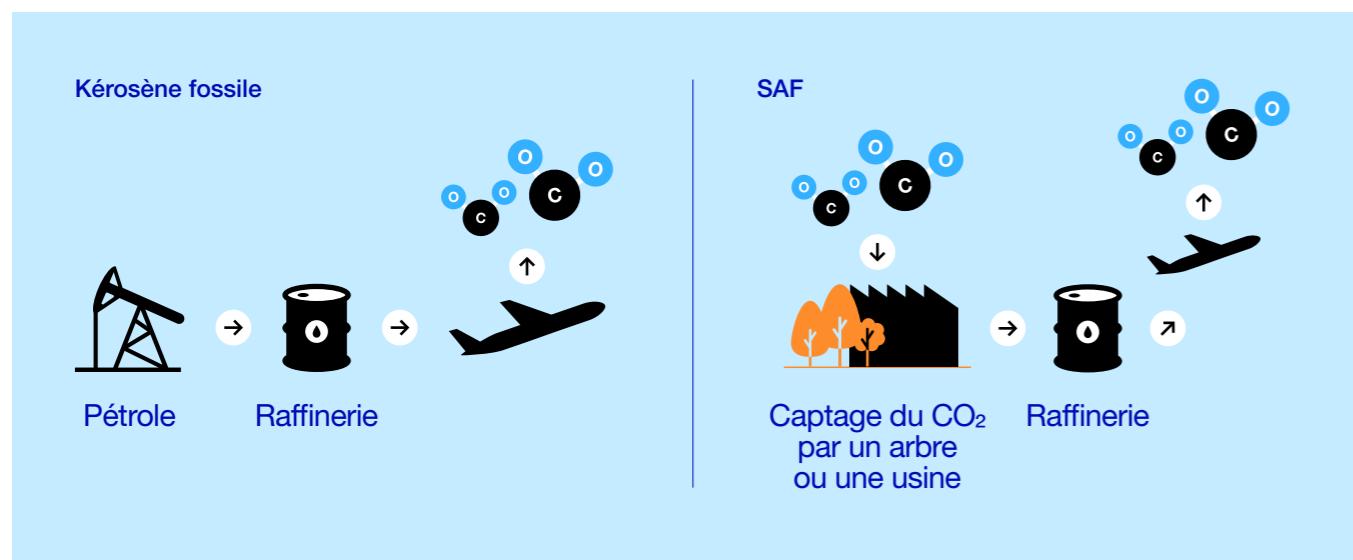
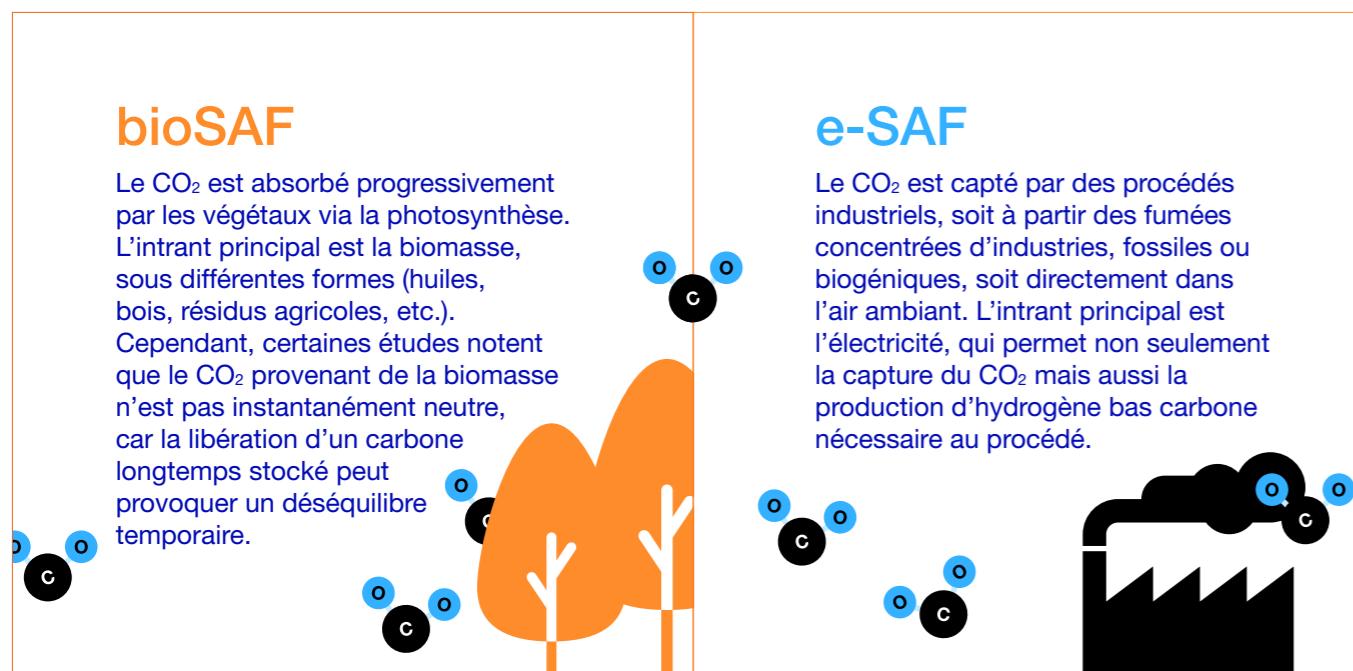


Les SAF: des carburants non fossiles



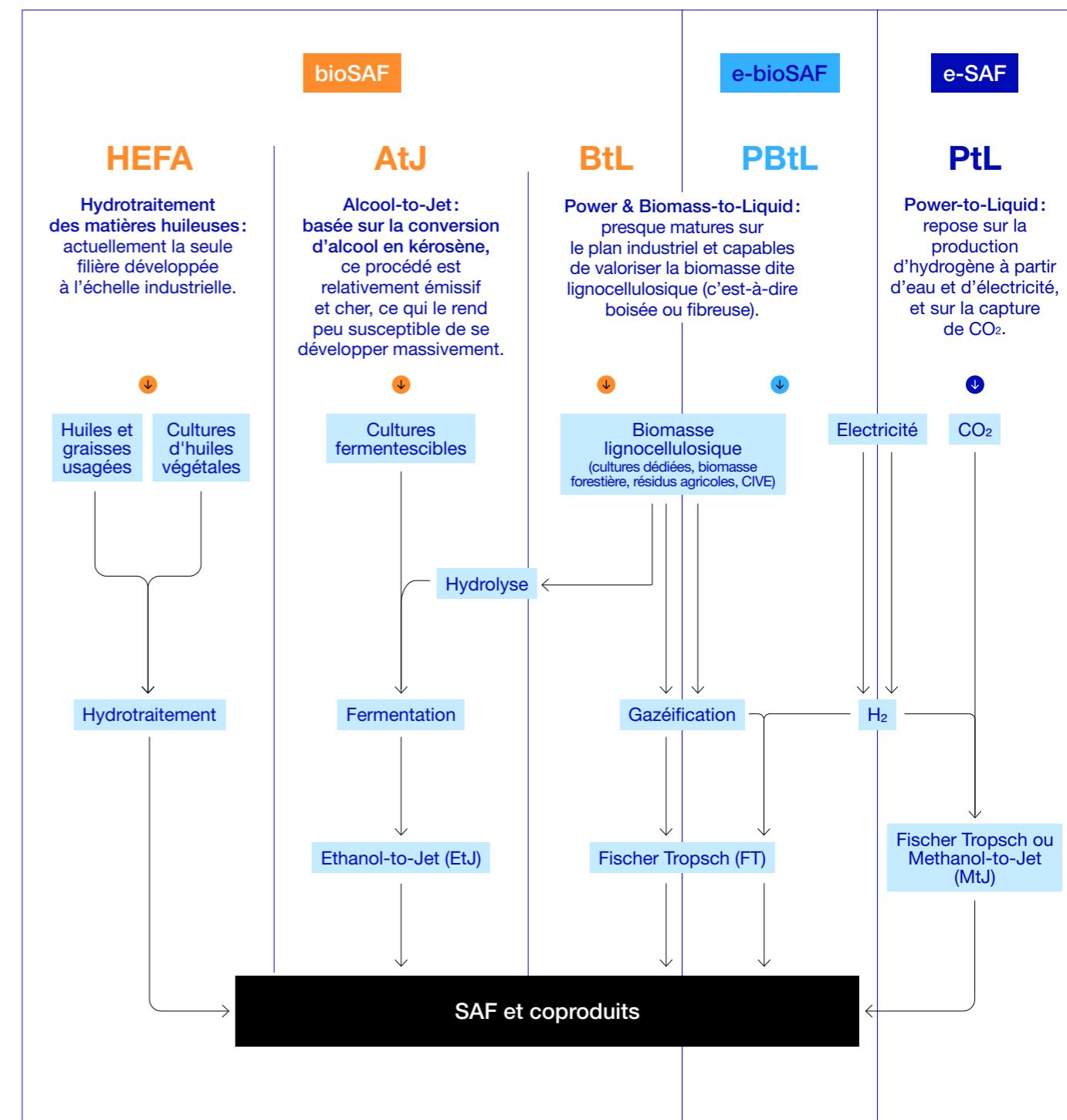
Principes du cycle de vie des SAF

Sur le plan chimique, les SAF présentent une composition proche de celle du kérósène fossile, mais ils offrent un avantage majeur: le CO₂ émis lors de leur combustion a été préalablement prélevé dans l'atmosphère, et peut donc être considéré comme climatiquement neutre, comme le font les réglementations actuelles. On distingue deux types principaux de SAF, en fonction de l'origine du carbone:



Des filières diverses qui emploient des ressources variées

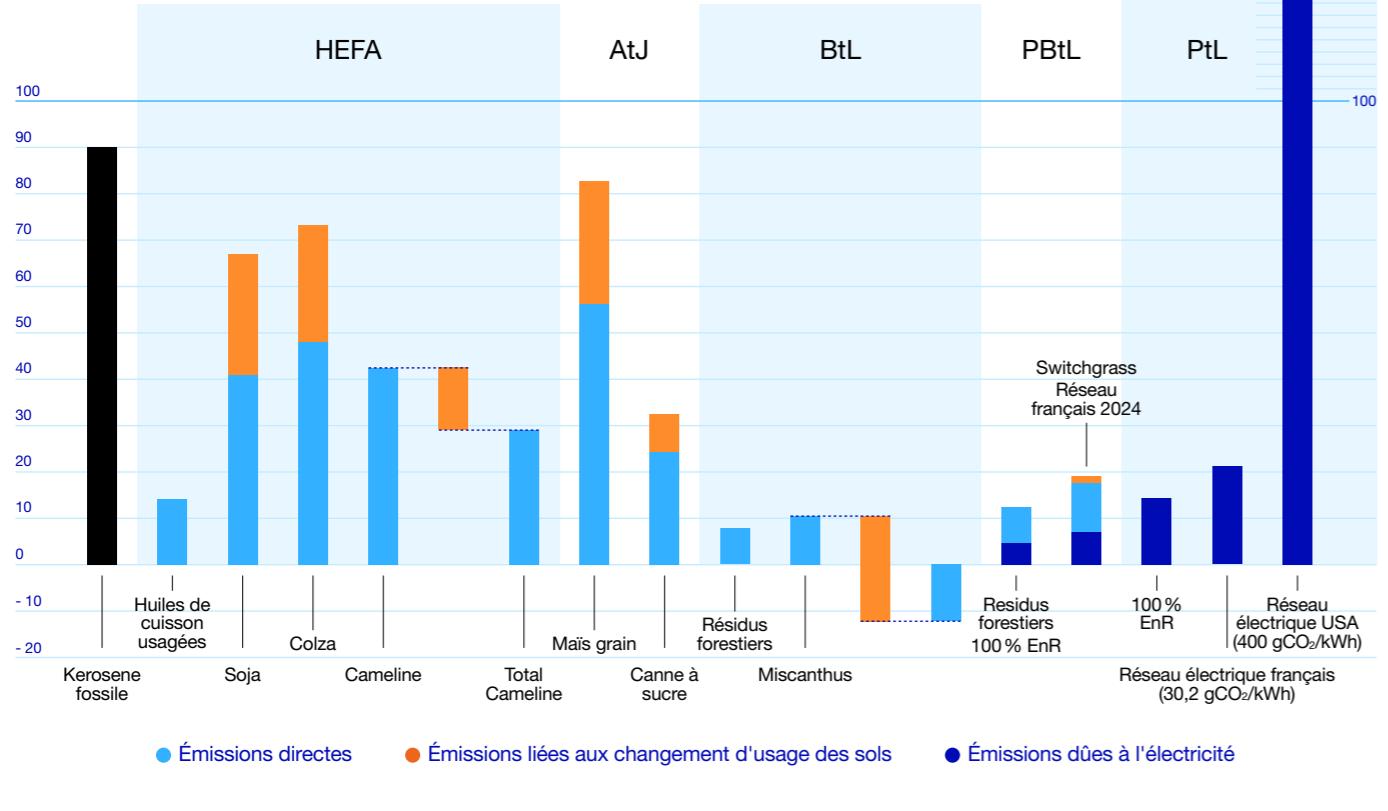
Le schéma ci-dessous présente les principales filières de production de SAF:



Toutes les options ne se valent pas

Les SAF ne peuvent pas être considérés comme totalement neutres sur le plan climatique en raison des émissions générées lors de la production de leurs matières premières, de leur transport et de leur transformation. Contrairement au pétrole, dont le bilan carbone par unité d'énergie est bien établi, l'empreinte des SAF varie considérablement selon la filière, la matière première et les conditions de production :

Empreinte carbone d'une unité énergétique de SAF (référentiel CORSIA-OACI).
En gCO₂/MJ de SAF



L'usage du terme SAF recouvre des réalités bien différentes en termes de performance environnementale et ne suffit pas à garantir une durabilité forte. Il s'agit ici d'un acronyme générique, largement utilisé dans le monde de l'aérien.

Pour les bioSAF, il ne suffit pas de prendre en compte les émissions directes liées à la production : il faut également considérer les émissions indirectes associées aux changements d'usage des sols, un facteur fortement dépendant du contexte propre à chaque parcelle de culture.

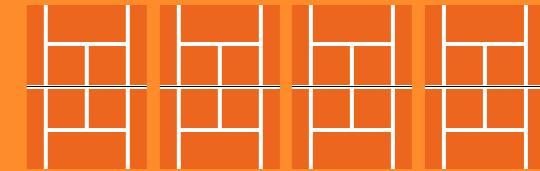
Voyager sans kérosène : ce que cela représente par personne

Pour un aller retour Paris-Montréal (12000 km) sans carburant fossile, il faudrait, **par passager**, remplacer environ **360 litres de kérosène fossile** par l'une des alternatives suivantes :

370 litres
d'huile usagée,
soit ce qu'un restaurant
de fast-food collecte
en deux mois



1000 m²
de culture annuelle
lignocellulosique,
soit l'équivalent de
4 terrains de tennis



1 800 kg
de bois de chauffage, soit
le chauffage d'une maison
bien isolée pendant un hiver



8 000 kWh
d'électricité, soit le double
de la consommation
électrique annuelle moyenne
d'un foyer français



Ces ordres de grandeur sont donnés à titre illustratif et calculés par Aéro Décarbo

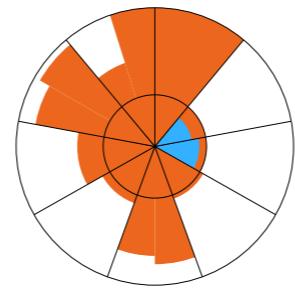
bioSAF: une limite forte sur le potentiel en biocarburants



Des pressions sur les limites planétaires

Si les carburants fossiles affectent principalement le climat, l'**usage énergétique de la matière végétale engendre de multiples transferts d'impacts**. L'agriculture et la sylviculture, directement liées à l'exploitation de la biomasse, sont aujourd'hui les principales responsables du dépassement de quatre limites planétaires: l'érosion

de la biodiversité, le changement d'usage des sols, la perturbation des cycles de l'eau douce et des éléments biogéochimiques (azote et phosphore). De plus, la pression et la dégradation des forêts peuvent transformer cet habituel puits de carbone en une source d'émissions nettes, contribuant donc au dérèglement climatique.



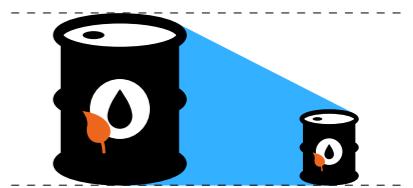
De fortes concurrences sur la biomasse

L'usage de la biomasse entre en concurrence sur trois niveaux distincts et successifs :

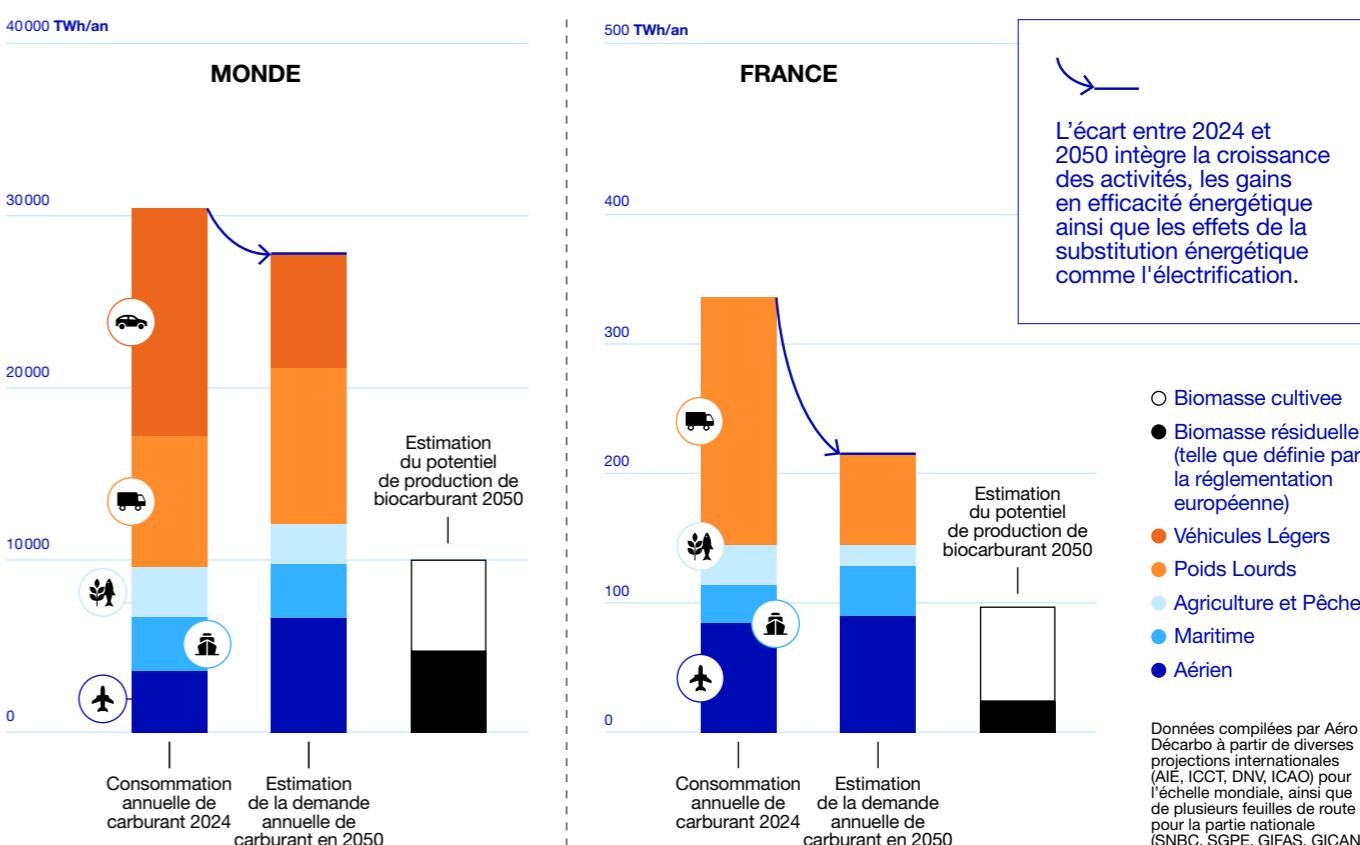


Une demande bien supérieure à l'offre

À l'horizon 2050, la production de biocarburants liquides devrait être **deux à trois fois inférieure** aux demandes des secteurs difficiles à électrifier, en considérant à la fois la croissance des activités, les gains en efficacité ainsi que les effets de la substitution énergétique.



Mise en perspective du potentiel de production de biocarburants et des besoins des principaux secteurs difficiles à électrifier complètement (aviation, maritime, routier et agriculture).



Ces estimations ne tiennent pas compte des effets du changement climatique sur les cultures végétales et privilégient la production de biocarburants dans l'arbitrage des ressources en biomasse énergétique.



Les véhicules légers sont exclus à l'échelle nationale, puisque le parc automobile français vise à être entièrement électrique à l'horizon 2050 et ne nécessiterait donc plus de carburants liquides.



e-SAF: un enjeu de consommation électrique



Du CO₂ non-fossile et de l'électricité

Aujourd'hui, la quasi-totalité des projets de production d'e-SAF captent le CO₂ émis dans les fumées des grandes installations industrielles, où sa concentration est environ cent fois plus élevée que dans l'atmosphère. Pour la production de SAF, **il est préférable, et bientôt obligatoire en Europe, que ce CO₂ provienne de sources non fossiles.**

À mesure que les gisements de fumées se raréfieront avec la décarbonation de ces secteurs, la capture directe dans l'air ambiant deviendra nécessaire, ce qui **augmentera la consommation électrique d'environ 20 %.** Les gains liés à l'amélioration des procédés pourront toutefois compenser cette dépense supplémentaire: la demande en électricité par tonne de carburant produite devrait ainsi rester stable d'ici à 2050, **autour de 30 MWh.**



Un usage de l'électricité peu efficace, mais indispensable pour l'aviation

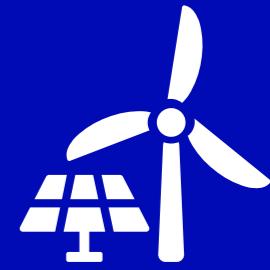
L'e-SAF constitue l'un des usages les moins efficaces de l'électricité bas-carbone, ce qui le rend actuellement plus coûteux que d'autres filières. Cependant, son développement sera nécessaire à la décarbonation de l'aviation.

En effet, le déploiement des e-SAF est moins limité par la disponibilité d'une ressource biologique et n'affecte donc pas les limites planétaires de manière aussi critique que les bioSAF. Augmenter leur production revient essentiellement à développer davantage de capacités d'électricité bas-carbone, la principale contrainte étant alors le rythme industriel de leur déploiement.



10000 TWh

C'est la quantité d'électricité bas-carbone nécessaire pour remplacer la consommation actuelle mondiale de kérèsne fossile **par des e-SAF, soit environ la production mondiale actuelle d'énergie renouvelable, un tiers de toute l'électricité actuellement produite dans le monde¹.**



Une filière qui optimise les ressources: e-bioSAF

Le procédé de production des e-bioSAF consiste à apporter suffisamment d'hydrogène pour que l'essentiel du carbone constitutif de la biomasse puisse être converti en biocarburant. L'énergie contenue dans le carburant final provient à la fois des intrants en biomasse et en hydrogène. Ainsi:

Les e-bioSAF sont **2 à 3 fois** moins gourmands en biomasse que les bioSAF.

Les e-bioSAF sont **2 à 3 fois** moins gourmands en électricité que les e-SAF.

Pour être réellement soutenable, cette filière doit toutefois concilier **les exigences de durabilité et de disponibilité à la fois de la biomasse et de l'électricité bas-carbone.**



1. Chiffres 2024 (315 Mt de kérèsne pour 9800 TWh d'électricité renouvelable).

Scénarios Monde



Les hypothèses du scénarios

- 1 Les consommations futures de carburant sont basées sur les prévisions de trafic et les gains de performance des aéronefs avancés par l'Air Transport Action Group (ATAG) dans son scénario S2 qui est globalement optimiste, prévoyant par exemple l'arrivée des moteurs open rotor dès 2030, alors que les calendriers industriels la situent après 2035.
- 2 L'offre de SAF (bioSAF + e-SAF) correspond aux volumes projetés par l'Agence Internationale de l'Énergie dans son scénario de décarbonation le plus ambitieux (Net Zero by 2050).
- 3 Le scénario NZE de l'AIE retient une hypothèse particulièrement ambitieuse de 80 000 TWh d'électricité bas-carbone disponible en 2050 à l'échelle mondiale, soit près de trois fois les capacités actuelles totales de production électrique (fossiles et bas-carbone).
- 4 Les facteurs d'émission sont issus du cadre réglementaire CORSIA, dispositif international mis en place par l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI).

Ces choix d'hypothèses volontairement optimistes garantissent que les enseignements des scénarios qui les utilisent sont particulièrement robustes: tout résultat établi dans un cadre aussi favorable restera valable a fortiori dans un contexte plus contraint, et sans doute plus probable.



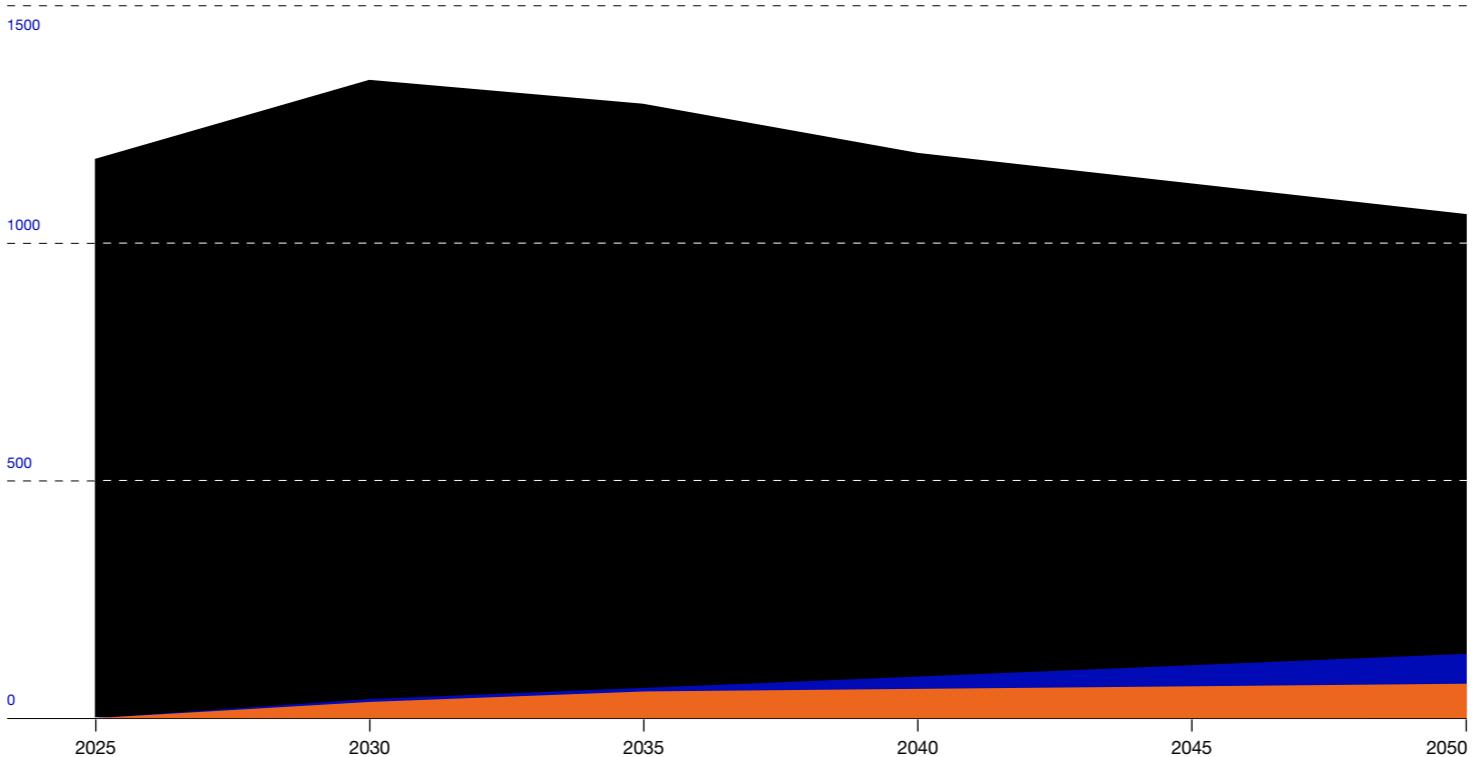
Pour comprendre si le déploiement des **capacités de production de SAF** sera suffisant pour permettre à l'aviation d'atteindre ses objectifs climatiques, notre premier scénario utilise les hypothèses des acteurs du secteur de l'aviation et de l'énergie:

Les émissions de l'aviation ne baissent pas

Scénario de base - annonces du secteur et disponibilités de ressources selon l'IEA

Emissions de l'aviation (Mt CO₂/an)

- Kérosène
- e-SAF
- bioSAF



Analyse du scénario:

Dans le scénario de référence, basé sur les hypothèses des acteurs du secteur de l'aviation et de l'énergie, **les émissions annuelles moyennes sur la période 2025-2050 sont supérieures de 3% au niveau de 2025.**

2. Budget global 1.7°C: 390 Gt.
Émissions cumulées de l'aérien 2025-2050: 32,4 Gt
3. Séquestration totale 2050 (IAE 2023- Scénario NZE): 1710 Mt.
Emissions aérien 2050 : 1094 Mt

22 %
(116 Mt)
de bioSAF
en 2050

8 %
Part des émissions cumulées de l'aérien d'ici 2050 dans le budget carbone d'une trajectoire +1.7°C²

26 %
(131 Mt)
de e-SAF
en 2050

64 %
Part de l'aérien dans les émissions résiduelles en 2050³

De bonnes et de mauvaises options pour augmenter les volumes de carburants alternatifs

Les acteurs du secteur aérien proposent diverses pistes pour augmenter les volumes de SAF, dont certaines auraient plutôt tendance à aggraver les impacts environnementaux :

- ➊ **L'affaiblissement des critères de durabilité des SAF** engendre des tensions sur les sols, l'eau ou la biodiversité, sans permettre aux émissions CO₂ du secteur aérien de significativement diminuer.

- ➋ La priorisation au détriment des autres secteurs dans l'accès aux ressources bas-carbone, peut conduire à une **augmentation des émissions globales, à cause des écarts de rendements énergétiques** entre les solutions de décarbonation de l'aérien et, par exemple, l'électrification du routier.

- ➌ L'investissement massif dans des capacités électriques additionnelles peut permettre la production de suffisamment d'e-SAF et d'e-bioSAF pour couvrir à terme les besoins en carburant du secteur aérien, à condition de mobiliser des moyens considérables.



Plans de vol en France

■■■■■

Une répartition des ressources à arbitrer

Le potentiel de production de SAF en France dépend des quantités de biomasse durable et d'électricité bas-carbone qui pourraient être allouées au secteur aérien:

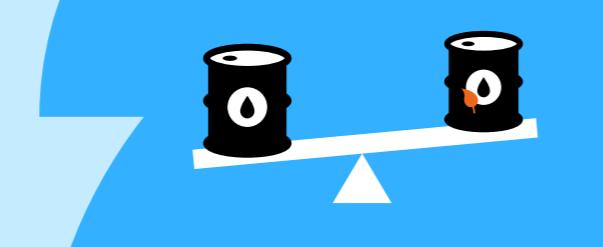
En termes de biomasse lignocellulosique, compatible avec la réglementation européenne, **10 millions de tonnes de matière sèche** sont valorisables en biocarburants liquides. L'énergie qu'ils contiennent est à répartir entre les différents usages qui en demandent (aérien, maritime, machines agricoles et transport routier). L'aérien peut en capter au maximum 60 %, car les co-produits des bioSAF représentent à minima 40 % de la bioénergie dans les procédés de production.



Volumes de biomasse alloués	Volumes d'électricité dédiés à l'aérien					
	10 TWh	30 TWh	50 TWh	70 TWh	90 TWh	110 TWh
0 %	0,3 Mt	1,0 Mt	1,7 Mt	2,3 Mt	3,0 Mt	3,7 Mt
15 %	0,8 Mt	1,5 Mt	2,1 Mt	2,8 Mt	3,5 Mt	4,1 Mt
30 %	1,3 Mt	2,0 Mt	2,6 Mt	3,3 Mt	4,0 Mt	4,6 Mt
45 %	1,8 Mt	2,4 Mt	3,1 Mt	3,8 Mt	4,4 Mt	5,1 Mt
60 %	2,2 Mt	2,9 Mt	3,6 Mt	4,2 Mt	4,9 Mt	5,6 Mt

Lecture: chaque case indique la production annuelle totale de SAF en 2050 résultant de la combinaison des deux hypothèses.

Les quantités de SAF produites en France s'établissent alors **entre 0 et 5,6 millions de tonnes en 2050**, à comparer aux **7,3 millions de tonnes de kérósène fossile** consommées aujourd'hui.



La contribution de l'aérien aux émissions nationales risque de décoller

Si le trafic aérien venait à croître selon la feuille de route de décarbonation du secteur, soit +1,1 % par an⁴, les émissions de l'aérien représenteraient alors entre **17 % et 46 % des émissions françaises en 2050** avec, respectivement, **5,6 Mt et 0 Mt de SAF**.

À titre d'exemple, une hypothèse de **30 TWh d'électricité et de 30 % de la biomasse résiduelle valorisable en biocarburant allouée à l'aérien** conduirait à:

37 %
Part de l'aérien dans les émissions en 2050

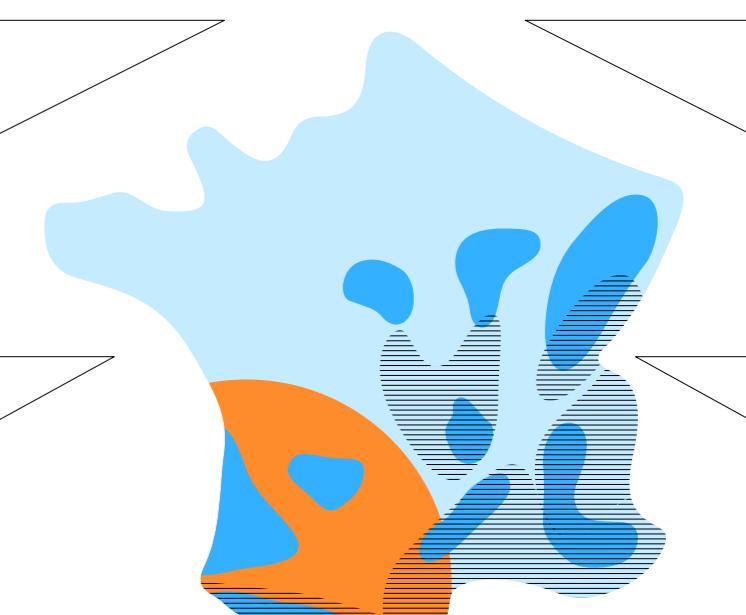
14 %
Part des émissions cumulées de l'aérien d'ici 2050 dans le budget carbone de la SNBC

Un approvisionnement en biomasse sous contrainte géographique

Au-delà des estimations théoriques, le développement de la filière e-bioSAF pose d'importants défis industriels et logistiques.

La valorisation de **10 millions de tonnes de biomasse lignocellulosique** nécessiterait la mise en place d'environ **30 unités industrielles**, alors qu'un seul projet mobilise déjà un périmètre d'approvisionnement légal couvrant l'ensemble du quart Sud-Ouest de la France (zone orange), une région pourtant riche en activités forestières et agricoles.

Carte illustrant les limites de développement des unités e-bioSAF



- Rayon d'approvisionnement de l'unique projet e-bioSAF annoncé
- Principales zones forestières françaises
- ◻ Territoires peu propices à la culture de biomasse énergie (climats secs ou reliefs montagneux avec biomasse précieuse et vulnérable)

4. Sachant que cette feuille de route de décarbonation considère une croissance plus faible que les tendances observées (2,8 % par an, selon le gouvernement français)

Modération : veiller à un accès durable



Un trafic français sous triple contrainte

En France, les objectifs liés aux SAF sont à la fois :

- **Réglementaires**, via le respect des taux d'incorporation mandatés par la réglementation européenne ReFuel EU : au regard du potentiel national de production de SAF, atteindre le taux cible de 70 % de SAF en 2050 impliquerait une baisse du trafic aérien, sauf à mobiliser plus de 70 TWh d'électricité et au moins 30 % des biocarburants liquides compatibles avec la réglementation.
- **Climatiques**, visant la neutralité carbone à l'horizon 2050 tout en respectant un budget carbone

soutenable : pour maintenir la contribution du secteur aérien à un niveau proportionnel à sa part actuelle (environ 7 % des émissions nationales), en 2050 comme sur l'ensemble de la période, le trafic aérien français devra être inférieur à son niveau actuel, à moins de consommer la totalité de la biomasse éligible à la production de biocarburants liquides, ainsi que 110 TWh d'électricité (soit plus de 20 % de la production électrique actuelle)

• **De souveraineté énergétique**, impliquant de limiter la dépendance au pétrole (aujourd'hui importé à 99 %) grâce au recours à des SAF.

Matrices illustrant l'évolution du trafic nécessaire pour respecter les taux d'incorporation de SAF mandatés par la réglementation européenne ReFuel EU en 2050 (à gauche) et que le secteur aérien ne contribue qu'à 6,8 % des émissions nationales en 2050 (à droite).

		Volumes d'électricité			Volumes d'électricité			
		30 TWh	70 TWh	110 TWh	30 TWh	70 TWh	110 TWh	
Biomasse résiduelle	0 %	-76 %	-43 %	-10 %	0 %	-65 %	-47 %	-28 %
	30 %	-52 %	-19 %	13 %	30 %	-48 %	-29 %	-11 %
	60 %	-29 %	4 %	37 %	60 %	-31 %	-12 %	7 %

À titre d'illustration, avec une allocation de 30 TWh d'électricité et de 30 % des biocarburants liquides, **le trafic aérien devrait diminuer de moitié** pour respecter ReFuel EU et atteindre une cible d'émissions compatible avec la neutralité carbone en 2050.

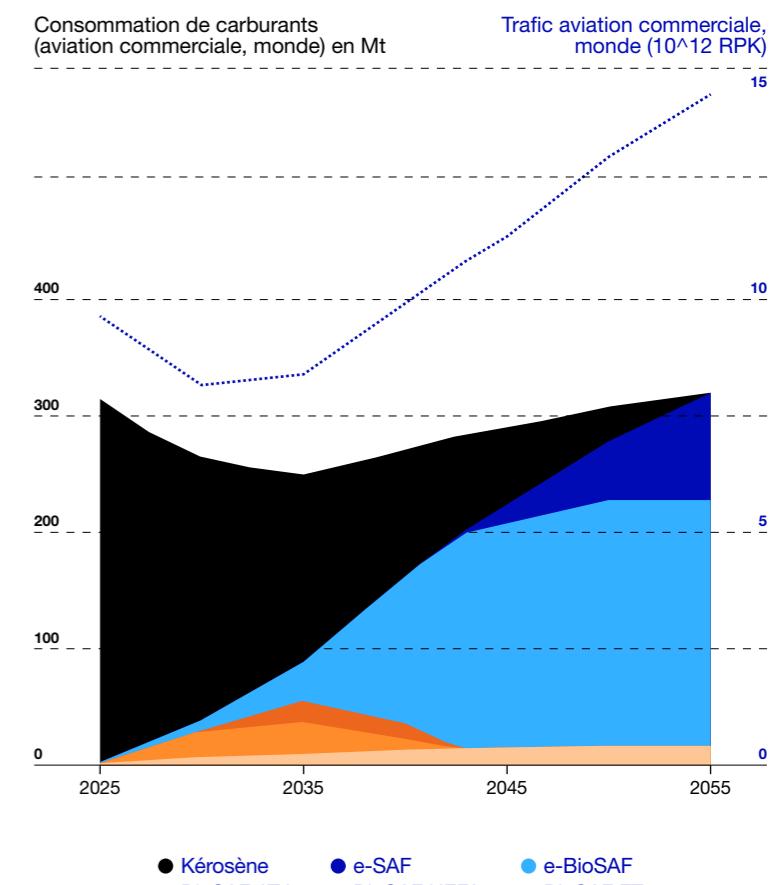


À l'échelle mondiale, baisser le trafic pour le réaugmenter plus tard

Grâce aux gains d'efficacité et à l'incorporation progressive des SAF, **les vols en 2040 ou 2050 devraient être bien moins émissifs que ne le sont ceux d'aujourd'hui**. Par conséquent, c'est bel et bien maintenant qu'il faut modérer le **trafic**, pour diminuer le plus possible les émissions tant que le kérósène fossile constitue l'essentiel du carburant de l'aviation mondiale. Afin de rester compatible avec un budget carbone limitant l'augmentation de la température moyenne à 1,7 °C, même avec une allocation favorable au secteur aérien, le trafic aérien mondial devrait diminuer d'au moins 15 % d'ici cinq ans, ce qui correspondrait à un retour transitoire aux niveaux observés dans les années 2010. Après cette phase de sobriété, le trafic pourrait reprendre progressivement, au fur et à mesure du déploiement des SAF et si les conflits d'usages (biomasse, électricité) sont arbitrés.

C'est une perspective de croissance plus forte que celle estimée à l'échelle française, qui s'explique par le fait qu'à l'échelle mondiale, le niveau moyen de trafic par habitant est plus faible.

Évolution du trafic et de la consommation de carburants (aviation commerciale, monde)



Une modération possible et nécessaire

Compte-tenu des limitations en ressources décarbonées, la maîtrise des émissions du secteur aérien nécessite, comme on l'a vu, une régulation du trafic tant au niveau global qu'à l'échelle française.

La décarbonation du secteur aérien est finalement autant un problème technologique et industriel qu'une question de maîtrise du trafic.

Pour rendre cette sobriété acceptable pour tous, il est nécessaire d'engager sans délai un débat démocratique et d'expérimenter des mesures permettant d'agir simultanément sur :

- **la limitation de la demande** : quotas ou taxe sur le CO₂, sur le kérósène ou sur les kilomètres parcourus à l'échelle individuelle ou/et des entreprises ;

• **l'encadrement de l'offre** : limitation des capacités aéroportuaires, suppression des liaisons disposant d'alternatives efficaces ;

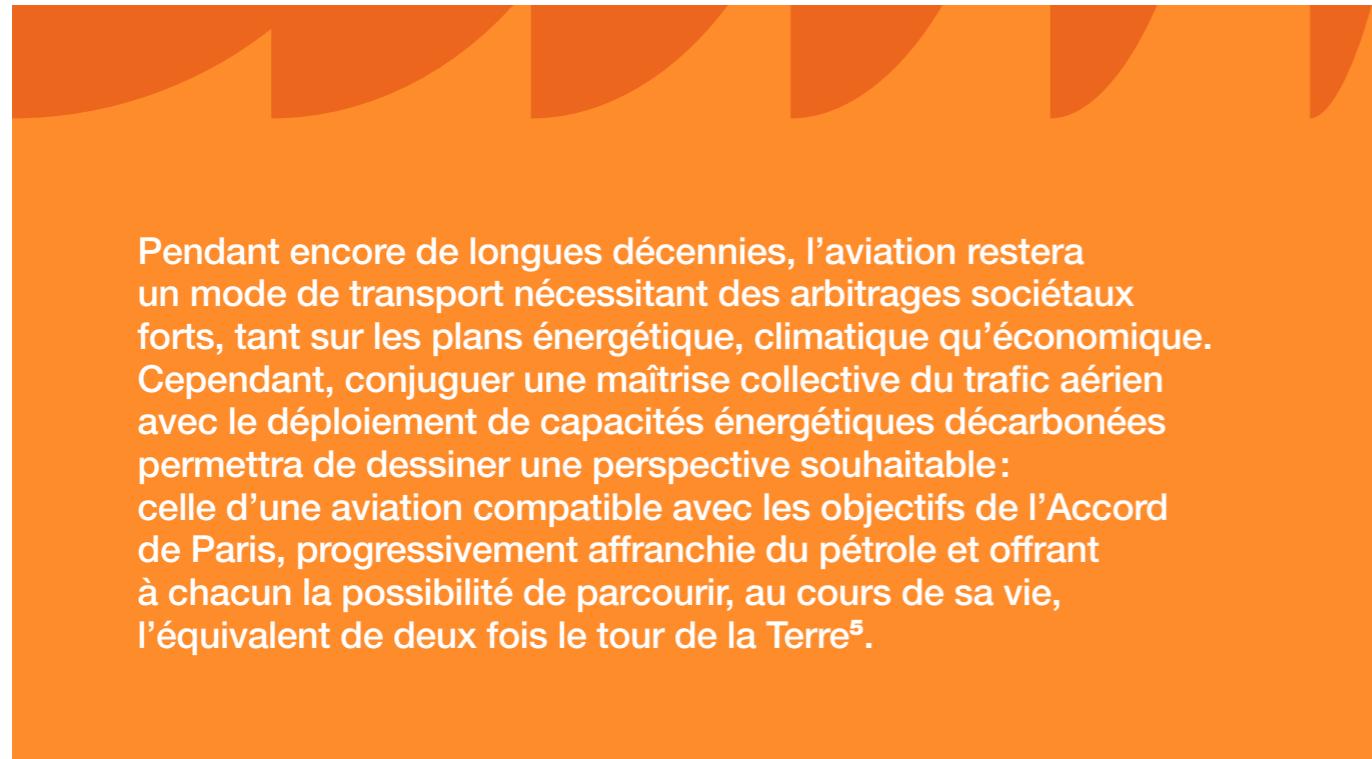
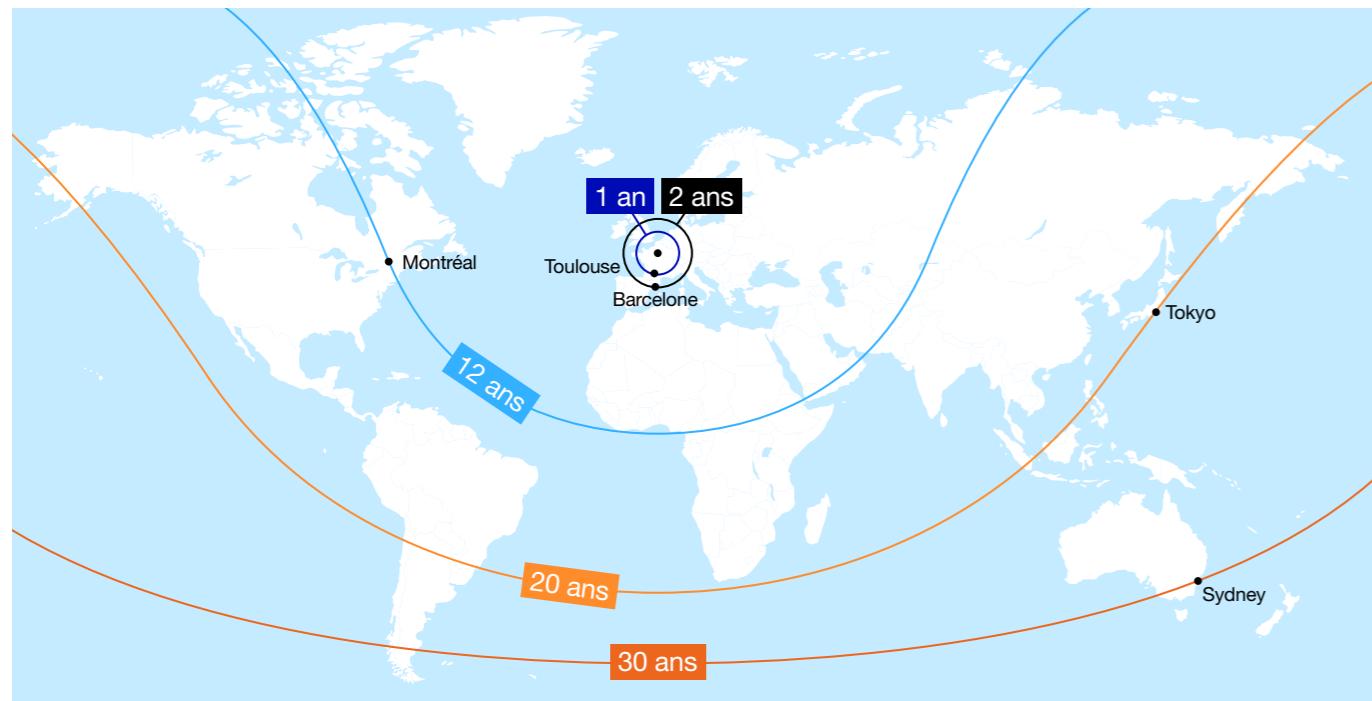
• **l'encouragement aux alternatives** : TGV, trains de nuit, bus, liaisons maritimes et connexions ferroviaires internationales).

Voyager de manière juste et durable

Enfin, au-delà des considérations climatiques et énergétiques, la question de l'accès à l'aviation renvoie à des enjeux de justice et d'équité qui méritent d'être posés.

Aujourd'hui, 1 % de la population mondiale est responsable de plus de 50 % des émissions de CO₂ du secteur aérien.

Dans l'hypothèse d'un accès équivalent à l'aviation pour l'ensemble de la population mondiale, le niveau de trafic actuel – susceptible d'être retrouvé à l'horizon 2040 – correspondrait à un budget de l'ordre de 1 000 km parcourus par personne et par an, soit, à titre illustratif, la possibilité d'effectuer un aller-retour Paris-Montréal tous les douze ans.



Pendant encore de longues décennies, l'aviation restera un mode de transport nécessitant des arbitrages sociétaux forts, tant sur les plans énergétique, climatique qu'économique. Cependant, conjuguer une maîtrise collective du trafic aérien avec le déploiement de capacités énergétiques décarbonées permettra de dessiner une perspective souhaitable : celle d'une aviation compatible avec les objectifs de l'Accord de Paris, progressivement affranchie du pétrole et offrant à chacun la possibilité de parcourir, au cours de sa vie, l'équivalent de deux fois le tour de la Terre⁵.

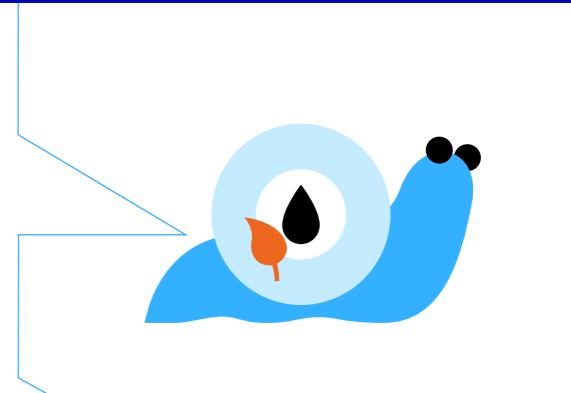
5. Dans la perspective d'un trafic mondial retrouvant puis potentiellement dépassant son niveau actuel après une phase de sobriété, la possibilité pour chacun de faire de l'ordre de 1000 km par an en avion représenterait un total d'environ 80 000 km sur une vie entière, soit 2 fois la circonférence terrestre

Résumé des enseignements clés du rapport



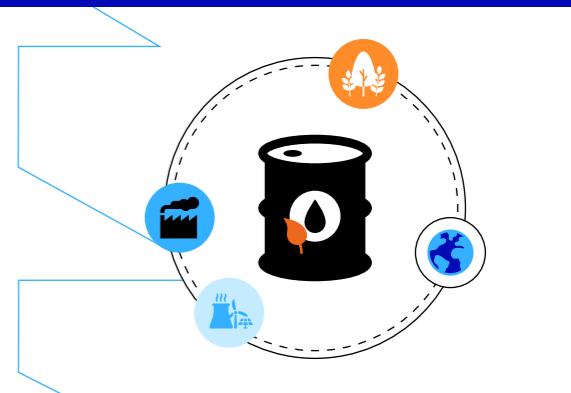
1

Les SAF, et plus particulièrement les e-SAF, sont incontournables pour la décarbonation du secteur aérien, mais ne pourront pas être déployés assez rapidement pour en faire baisser les émissions de CO₂ à court et moyen terme.



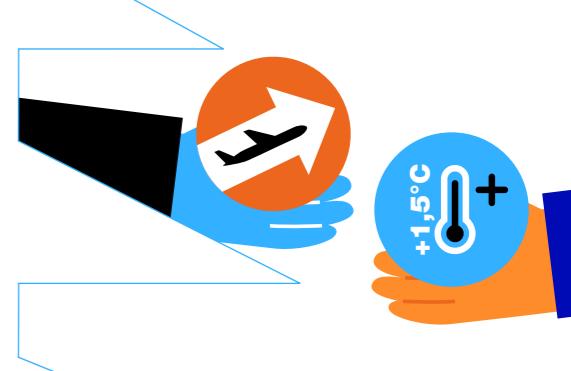
2

En particulier, la production de SAF sera, en France et dans le monde, restreinte par des limites physiques et industrielles, ainsi que par les conflits d'usage sur la biomasse durable et l'électricité bas-carbone.



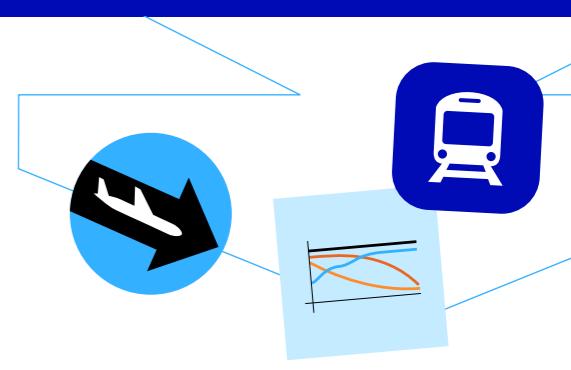
3

Le choix devient explicite : maintenir les perspectives de croissance annoncées par le secteur ou respecter les objectifs climatiques. Les résultats du rapport montrent que la baisse du trafic, dans un premier temps, devient un levier nécessaire.



4

Pour accompagner cet effort, il est nécessaire d'expérimenter des mesures concrètes afin de réduire les incitations au voyage, de maîtriser la demande, d'encadrer l'offre et de soutenir le développement d'alternatives durables.



Aéro Décarbo rassemble des femmes et des hommes salariés, entrepreneurs, retraités, étudiants et passionnés de l'aéronautique et de l'aérospatial autour d'une mission commune : accompagner ces secteurs vers un avenir respectueux des limites planétaires. Avec rigueur scientifique et honnêteté intellectuelle, l'association analyse et encourage la transformation de l'utilisation des airs afin d'assurer la pérennité des industries qui en dépendent.

www.decarbo.org



Nos partenaires

Aéro Décarbo et le Shift Project remercient les partenaires du projet pour leur soutien technique et financier.



The Shift Project est un groupe de réflexion qui vise à éclairer et influencer le débat sur les défis climat-énergie. Nous sommes une association d'intérêt général. Nos membres financeurs sont pour la plupart des entreprises. Guidé par l'exigence de rigueur scientifique et technique, notre regard sur l'économie est avant tout physique et systémique. www.theshiftproject.org

Contacts

Timon Vicat-Blanc
Président Aéro Décarbo
contact@decarbo.org

Ilana Toledano
Responsable communication
ilana.toledano@theshiftproject.org

Graphisme

Jérémy Garcia-Zubialde

