

# 3 scénarios pour décarboner le transport aérien

## Le transport aérien exerce une pression croissante sur l'environnement.

En France, en 2019 :  
Il a émis directement

**24,2 millions**

de tonnes de CO<sub>2</sub> e.

Ce qui représente

**5,3 %**

des émissions globales de la France.

C'est

**2,2 fois**

plus qu'il y a 30 ans.

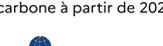
Une évolution qui contraste fortement avec l'objectif de la France d'atteindre la neutralité carbone en 2050.

### Conscients de la problématique, les acteurs du secteur ont pris différents engagements :

**AIA**  
L'Association des Industries Aérospatiales (AIA) :  
-50 % des émissions de CO<sub>2</sub> d'ici 2050 par rapport à 2005



L'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (L'OACI) : Une croissance neutre en carbone à partir de 2020



L'IATA (compagnies aériennes) et l'ATAG (coalition des branches du secteur) : Zéro émission nette en 2050

### Parallèlement, des acteurs indépendants ont proposé leurs analyses :



Arbitrage nécessaire sur le niveau de trafic



Ajuster le trafic pour respecter un budget carbone



Engager la décarbonation par la maîtrise de la demande



Dans ce contexte, l'ADEME a réalisé une étude prospective afin d'analyser de manière objective les chemins possibles de transition écologique pour cette filière.

Pour diminuer ses émissions de CO<sub>2</sub>, plusieurs voies peuvent être envisagées.

En ce sens, l'étude développe et explore **3 SCÉNARIOS CONTRASTÉS DE TRANSITION BAS-CARBONE.**

## Le point méthodologique

Un processus de travail en 5 phases a été mis en place...

**1**

**État des lieux** de la situation et des impacts environnementaux du secteur

**2**

**Identification** des leviers de décarbonation du secteur

**3**

**Élaboration** de 3 scénarios de transition contrastés

**4**

**Analyse** des impacts des scénarios

**5**

**Identification** de mesures publiques et privées pour mettre en œuvre la transition écologique

### ...ainsi qu'une approche collaborative

Pour enrichir les réflexions, les acteurs du secteur (compagnies aériennes, constructeurs, aéroports, associations, organismes de recherche...) ont été mobilisés dans le cadre d'entretiens, de 3 ateliers et d'un comité consultatif.

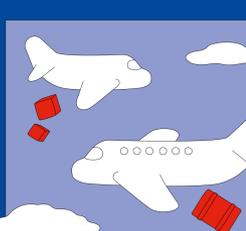
Le comité de pilotage a réuni l'ADEME, la Direction Générale de l'Aviation Civile et la Direction Générale de l'Énergie et du Climat.

Les arbitrages réalisés relèvent de la responsabilité de l'ADEME.

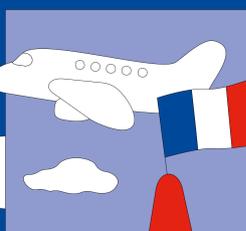
### L'étude se focalise sur le périmètre suivant :



**PÉRIMÈTRE TEMPOREL :**  
2020 à 2050



**NATURE DES VOLS :**  
vols commerciaux de passagers et de fret



**PÉRIMÈTRE GÉOGRAPHIQUE :**  
vols liés au territoire français

### 2 COMPTABILISATIONS DIFFÉRENTES DES ÉMISSIONS :

**1**

Une qui prend en compte tous les vols à destination et au départ de la France et dont nous rendons compte ici.

**2**

Aux vols au départ de la France dont les résultats sont consultables dans l'étude complète.

**La raison :**

Les vols internationaux entrants en France utilisent le carburant du pays de départ de vol. Or, selon le pays de départ, le mix de carburant embarqué sera probablement plus carboné que celui de la France.

**Bénéfices :**

**1**

La première méthode offre une vision plus globale des impacts liés au trafic aérien international.

**2**

La seconde se concentre sur les baisses d'émissions liées aux efforts de décarbonation sur le territoire français.

## Rentrons tout de suite dans le vif du sujet avec un bref état des lieux du secteur aérien

### Depuis les années 1970, le secteur aérien connaît une forte croissance à l'échelle mondiale et française

C'est l'aviation commerciale de passagers qui constitue l'immense majorité du trafic mondial.

En 2019, elle représente dans le monde :

**128 000**

vols de passagers par jour.

**12,5 millions**

de passagers par jour,

soit

**5 fois plus**

qu'en 1980, date du début de la libéralisation du secteur.

**71 %**

de la consommation de carburant du secteur (reste : 17 % transport de fret, 8 % aviation militaire et 4 % aviation privée).

### Malgré tout, l'aviation reste une activité pratiquée par une minorité de personnes dans le monde...

Alors qu'on considère que chaque individu volerait en moyenne tous les 22 mois...

**...moins de 40 %**

de la population mondiale a déjà pris l'avion.

En réalité, la plupart des voyages sont réalisés par les individus les plus aisés :

**20 %**

des Français n'ont jamais pris l'avion.

**50 %**

des voyageurs sont des CSP+.

D'ailleurs, la hausse de l'usage de l'avion en France n'est pas nécessairement liée à un phénomène de démocratisation, mais plutôt à l'intensification de l'usage de ce mode de transport par les classes les plus aisées.

**1 %**

de la population mondiale est responsable de plus de

**50 %**

des émissions de gaz à effet de serre liées aux vols commerciaux et privés.

Le secteur aérien peut cependant se prévaloir de bénéfices socio-économiques importants :



**UN RÔLE CLÉ POUR LA COHÉSION DU TERRITOIRE NATIONAL :**

contribution au développement économique des territoires desservis, en particulier pour les outre-mer.



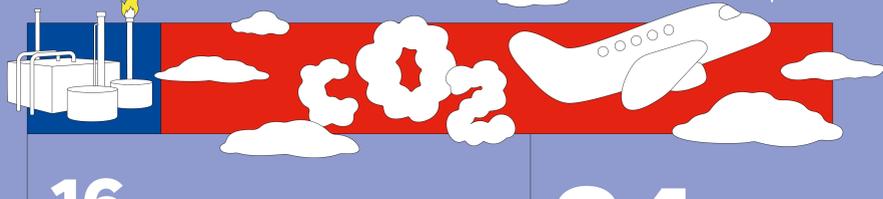
**UNE SOURCE IMPORTANTE D'EMPLOIS ET DE REVENUS :**

environ 1,1 millions d'emplois soutenus en 2019.

## Mais concrètement, comment le secteur aérien impacte-t-il l'environnement ?

Le secteur aérien contribue aux émissions de gaz à effet de serre via l'utilisation de son principal carburant, le kérosène.

Le kérosène émet 3,01 kg de CO<sub>2</sub> par litre.



**16%**

du CO<sub>2</sub> est émis lors de la production et de la distribution de kérosène

**84%**

lors de sa consommation

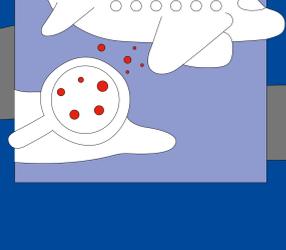
- Extraction
- Transport
- Raffinage
- Transport
- Distribution



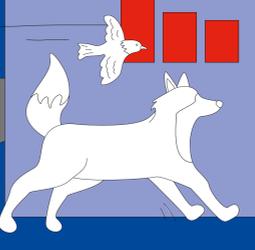
Combustion

→ D'autres gaz sont aussi émis en quantité moins importantes (protoxyde d'azote et méthane).

Outre le kérosène, les autres principaux impacts environnementaux associés au secteur aérien sont :



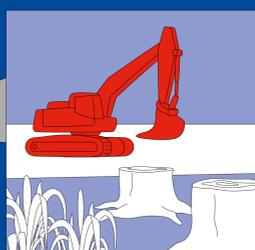
LA POLLUTION DE L'AIR



LA DIMINUTION DE LA BIODIVERSITÉ ET DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES NOTAMMENT AVEC LES PROJETS D'EXTENSION DES AÉROPORTS



LES NUISANCES SONORES



L'ARTIFICIALISATION DES SOLS (POUR FAIRE DES PISTES, DES TERMINAUX...)



L'étude propose également d'évaluer qualitativement ces impacts aux prismes des 3 scénarios prospectifs.

**À DÉCOUVRIR ICI !**

Et si on ne fait rien, ça ne va pas aller en s'arrangeant !

Entre 2022 et 2050, si le secteur aérien se développe selon les tendances actuelles, les émissions de CO<sub>2</sub> pourraient augmenter **D'ENVIRON 50 %**

(selon le scénario tendanciel S0 utilisé dans l'étude).

## Comment changer la donne ?

5 leviers de décarbonation ont été identifiés



**Augmenter l'efficacité énergétique des avions**

Via une amélioration technologique permettant la baisse de l'énergie nécessaire pour réaliser un trajet donné.

Via l'amélioration des opérations réalisées en vol ou au sol.

Via le renouvellement des flottes.



**Baisser l'intensité carbone de l'énergie utilisée par les avions**

En remplaçant le kérosène par des énergies alternatives plus durables comme ce qu'on appelle les Carburants d'Aviation Durables (CAD), et/ou de l'hydrogène bas-carbone.



**Réduire le trafic aérien**



**Favoriser le report modal vers des modes de transports moins émetteurs (le train notamment)**



**Augmenter le remplissage des avions**

Sur la base de ces 5 leviers, 3 scénarios de transition du secteur aérien ont pu être élaborés. Les leviers de décarbonation y sont mobilisés à des degrés différents.

### Scénario A

« Rupture technologique »

Des investissements importants sont réalisés dans l'aéronautique, dans la production de Carburants d'Aviation Durables (CAD) et d'hydrogène afin de conserver un niveau de trafic élevé et de permettre au secteur de poursuivre sa croissance économique.

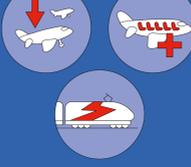


### Scénario B

« Modération du trafic »

Objectif : réduire les émissions à court terme et sur le cumul de la période.

Des mesures de modération du trafic sont mobilisées.



Elles précèdent puis accompagnent les progrès dans l'efficacité énergétique des avions et l'utilisation de Carburants d'Aviation Durables.



### Scénario C

« Tous leviers »

Un recours mesuré aux différents leviers disponibles permet de réduire la dépendance à des technologies de rupture potentiellement très coûteuses, et de faciliter l'acceptabilité des mesures de modération du trafic.



Ces scénarios de transition sont analysés par rapport à un scénario de référence, le scénario 0. Dans celui-ci, le secteur aérien se développe selon les tendances actuelles, sans changement spécifique.

## Que révèle l'analyse des scénarios ? Quels sont les leviers les plus efficaces pour décarboner le secteur aérien ?

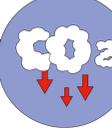
L'analyse a permis d'identifier 3 leviers particulièrement intéressants pour faire baisser les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur aérien.

1.



**AUGMENTER L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DES AVIONS**

2.



**BAISSER L'INTENSITÉ CARBONE DE L'ÉNERGIE UTILISÉE PAR LES AVIONS**

3.



**RÉDUIRE LE TRAFIC AÉRIEN**

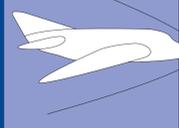
Mobilisés de manière différente dans les 3 scénarios, ces leviers présentent chacun des avantages et des inconvénients.

Mais avant d'analyser en détail ce que recouvrent le levier de l'augmentation de l'efficacité énergétique et celui de la baisse de l'intensité carbone.

## 1. L'amélioration de l'efficacité énergétique des avions

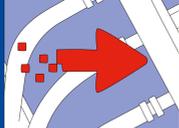
L'amélioration de l'efficacité énergétique des flottes dépendra de différentes variables, principalement :

Le rythme de développement de nouveaux modèles d'avions plus efficaces



Le rythme de renouvellement des flottes aériennes au profit d'appareils plus efficaces

L'importance des progrès technologiques effectués dans les nouveaux modèles d'avions



L'amélioration des opérations en vol et au sol via diverses stratégies (optimisation des trajectoires, limitation du temps de roulage...)

Selon les scénarios, les hypothèses ne sont pas les mêmes.

Scénario 0 « Référence »

Scénario A « Rupture technologique »

Scénario B « Modération du trafic »

Scénario C « Tous leviers »

Développement de nouveaux modèles d'avions plus efficaces



Pas de nouveaux modèles d'avions

Jusqu'à +30 % d'efficacité dès 2035 grâce à d'importants investissements en R&D

+20 % d'efficacité, dès 2040.

+25 % d'efficacité, dès 2035

Rythme de renouvellement des flottes



Tous les 25 ans

Tous les 20 ans

Tous les 25 ans

Tous les 22,5 ans

Amélioration des opérations en vol et au sol (par rapport à 2019)



Peu d'améliorations, ce qui permet un gain de 3 % d'émissions de CO<sub>2</sub>

Améliorations pleinement optimisées permettant un gain de 10 % d'émissions de CO<sub>2</sub>

Améliorations permettant un gain de 6 % d'émissions de CO<sub>2</sub>

## 2. La baisse de l'intensité carbone de l'énergie utilisée par les avions, via le recours aux Carburants d'Aviation Durables et à l'hydrogène

CO<sub>2</sub>

Nous l'avons vu, les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur sont quasi exclusivement dues au kérosène. Diminuer son utilisation constitue donc un des principaux leviers de décarbonation du secteur. D'autant plus qu'il existe aujourd'hui des énergies alternatives, qui avec le temps deviendront de plus en plus intéressantes. C'est ce qu'on appelle les **CARBURANTS D'AVIATION DURABLES (CAD)**.

Ils comprennent : les **BIOCARBURANTS DURABLES** et les **ÉLECTROCARBURANTS**.

D'ici 2030

À partir de 2030

À partir de 2040

Nous pourrons utiliser des **biocarburants** produits à partir d'esters et d'acides gras hydrotraités (huiles de cuissons usagées ou résidus de graisses animales).

Ils émettent environ **-65 % de CO<sub>2</sub>** par rapport au kérosène.

Grâce au procédé « Fischer-Tropsch », nous pourrons transformer certains résidus de culture, d'agroforesterie et les déchets municipaux en **biocarburants**.

On commencera aussi à produire des **électrocarburants** à partir d'électricité décarbonée et de CO<sub>2</sub> capturé à la sortie d'installations industrielles.

### Le problème ?

Le processus de fabrication des électrocarburants implique également une consommation d'électricité. Celle-ci doit donc être suffisamment bas-carbone pour que les électrocarburants constituent une réelle solution de décarbonation.

2,8 kWh d'électricité =

1 kWh d'électrocarburants.

(produits à partir de CO<sub>2</sub> capté à la sortie d'installations)



De fait, la pertinence des électrocarburants comme levier de décarbonation est relative. Elle dépend de l'intensité carbone du mix électrique du pays qui le produit. En l'occurrence, le pays de départ des vols.



Aujourd'hui, différentes études nous permettent d'anticiper l'évolution du mix électrique des pays du monde. Elles révèlent que les **électrocarburants constitueront un vrai levier de décarbonation uniquement pour les vols à départ de :**

De l'Union Européenne

Du reste de l'Europe (dès 2040)

De l'Amérique centrale et du sud

Dans ces conditions, pourront embarquer des électrocarburants en 2050 :

**100 %**

des vols au départ de la France métropolitaine

**67 %**

des vols internationaux au départ et à l'arrivée de la France

En 2050, pour les vols au départ de l'Union Européenne, la part de CAD dans le volume de carburants sera de :

**81 %**

(dont 53 % électrocarburants), dans le **scénario A**.

**100 %**

(dont 50 % électrocarburants), dans le **scénario B**.

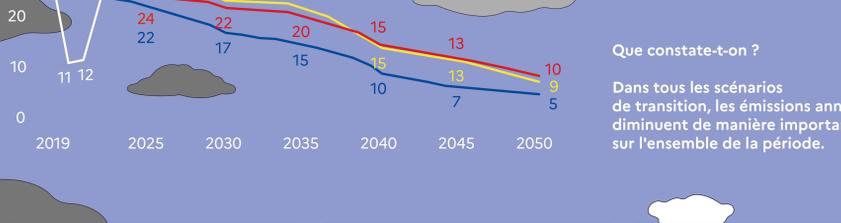
**63 %**

(dont 35 % électrocarburants), dans le **scénario C**.

## Venons-en maintenant à l'analyse des scénarios ! Quels effets auront-ils sur les émissions de CO<sub>2</sub> ?

Voici comment évolueraient les quantités de CO<sub>2</sub> émises par le secteur aérien d'ici 2050 dans les différents scénarios.

Evolution des émissions annuelles de CO<sub>2</sub> du secteur aérien entre 2019 et 2050 (en millions de tonnes).



■ Scénario 0 ■ Scénario B  
■ Scénario A ■ Scénario C

Que constate-t-on ?

Dans tous les scénarios de transition, les émissions annuelles diminuent de manière importante sur l'ensemble de la période.

### Scénario A

Les émissions annuelles du secteur aérien stagnent jusqu'en 2035. Durant cette période, la modernisation des flottes et le recours aux premiers volumes de CAD compensent les hausses d'émissions liées à l'augmentation tendancielle du trafic.

Puis, à partir de 2035, la commercialisation de nouvelles générations d'avions plus efficaces ainsi que la forte hausse de la production de CAD, permet de faire baisser rapidement les émissions annuelles de CO<sub>2</sub>.

**Trafic en 2050 : +61 % (par rapport à 2019)**

### Scénario B

Les émissions annuelles baissent de manière très importante entre 2023 et 2030 sous l'effet des mesures de réduction du trafic.

À partir de 2031, l'intégration progressive des CAD ainsi que, dans une moindre mesure, l'amélioration de l'efficacité des flottes permet de continuer à faire baisser les émissions annuelles dans un contexte où le trafic reste stable jusqu'en 2045 puis remonte légèrement.

**Trafic en 2050 : -15 % (par rapport à 2019)**

### Scénario C

Les mesures de modération du trafic aérien permettent de compenser la baisse moins importante des émissions unitaires que dans le scénario A, et donc d'atteindre un résultat quasi similaire.

**Trafic en 2050 : +26 % (par rapport à 2019)**

Que nous révèlent les émissions cumulées ?

Les émissions cumulées sont la somme des émissions annuelles sur plusieurs années. Elles permettent donc d'évaluer l'impact des scénarios dans le temps.

Evolution des émissions cumulées du secteur aérien sur la période 2019-2050 (millions de tonnes de CO<sub>2</sub>).



■ Scénario 0 ■ Scénario B  
■ Scénario A ■ Scénario C

Lorsqu'on s'y intéresse, on constate que les écarts entre les scénarios se creusent sur la période 2019-2050.

Dans le **Scénario B** « Modération du trafic », les émissions cumulées sont divisées par 2 par rapport au scénario tendanciel S0. Elles sont également bien inférieures à celles du **scénario A** et **C**.

### LA RÉDUCTION DU TRAFIC, UN LEVIER MAJEUR DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE CO<sub>2</sub> DU SECTEUR AÉRIEN

C'est le seul levier disponible à court terme, c'est-à-dire qui, à grande échelle et produire des résultats immédiats.

### UNE NÉCESSAIRE COMPLÉMENTARITÉ DES LEVIERS

Sur le long terme, l'amélioration de l'efficacité énergétique des avions et la diminution de l'intensité carbone de l'énergie utilisée par les avions constituent des leviers de décarbonation majeurs.

Chaque scénario présente ses limites et ses inconvénients.

Même si les résultats en termes d'émissions de CO<sub>2</sub> montrent que le scénario B est le plus efficace, le choix de l'un des trois scénarios ou d'une variante relève d'un arbitrage stratégique et politique en fonction bien sûr de ses résultats en matière d'émissions de CO<sub>2</sub>, mais aussi des contraintes, avantages, inconvénients et limites de chacun des scénarios.

## 1. Les prix du billet vont augmenter, entraînant une diminution du trafic

Les biocarburants, les électrocarburants et l'hydrogène étant bien plus chers que le kérosène, le prix moyen du mix énergétique des avions vont augmenter au fur et à mesure que ces alternatives vont remplacer le kérosène.

Les nouvelles générations d'avions seront également plus chères du fait du recours à des technologies de rupture pour atteindre des gains significatifs en termes d'efficacité énergétique.

Conséquences : les coûts liés de la modernisation des flottes et la décarbonation du mix de carburants vont se répercuter sur le prix du billet. Et ce, de manière encore très incertaine.

En 2019, 1 tonne de biocarburants coûtait 4 x plus cher qu'1 tonne de kérosène.

Elle pourrait être

**2,6 x**

plus cher en 2050

Une chose est sûre : le prix du billet aura un impact significatif sur le trafic. Il va entraîner :

- Un report modal vers d'autres moyens de transports sur les courtes ou moyennes distances.
- Une réduction du trafic sur les longues distances.

En 2050, il faut s'attendre à une diminution de

**15 à 19 %**

du niveau de trafic selon les scénarios de transition (par rapport au scénario de référence S0).

## 2. Les quantités de carburants alternatifs durables étant limitées, leur exploitation est conditionnée par le fait que l'État priorise le secteur aérien

Nous l'avons vu, la production de biocarburants et d'électrocarburants nécessite la mobilisation de certains résidus de culture et d'agroforesterie.

Or, le volume de résidus disponible sera limité en 2050 car ces derniers sont d'abord mobilisés pour des usages prioritaires, en agronomie par exemple.

Le secteur aérien se retrouvera donc en compétition avec d'autres filières pour accéder à cette ressource (la production de biocarburants routiers, de bois-énergie ou de matériaux biosourcés...).

Les trois scénarios modélisés mobilisent tous au moins

**1/3**

des résidus disponibles en 2050

Même chose pour la production d'électrocarburants et d'hydrogène. La France devra revoir à la hausse ses capacités de production ou d'approvisionnement en électricité bas-carbone à l'horizon 2050.

Elle sera alors une ressource rare, car nécessaire à la décarbonation de tous les secteurs de l'économie.

Le scénario A mobilisera

**17 %**

de la production électrique nationale en 2050 pour produire les électrocarburants et l'hydrogène bas-carbone pour les vols au départ de la France

Par conséquent, choisir d'approvisionner massivement le secteur aérien en biocarburants, en électrocarburants et en hydrogène est le résultat d'un choix de politique publique, qui implique d'arbitrer un ordre de priorité entre les différents secteurs (transport aérien, transport routier, bâtiment, industrie, bioéconomie...).

D'ailleurs, en cas de disponibilité moins importante que prévue des gisements en biomasse et en électricité renouvelable nécessaires à la production de CAD et d'hydrogène bas-carbone, il faudrait alors mobiliser de manière plus importante le levier de la réduction du trafic pour respecter la trajectoire d'émissions de CO<sub>2</sub> qui aura été retenue.

# In fine, ces nuances nous permettent de porter un regard plus contrasté sur nos 3 scénarios

## Scénario A « Rupture technologique »

→ Le scénario A est le scénario le plus optimiste du point de vue technologique.

→ Il implique un choix politique privilégiant les investissements publics et privés (recherche et développement de nouvelles générations d'avions plus efficaces, installation de nombreuses unités de production de CAD, d'hydrogène et d'électricité) pour des résultats à moyen et long termes, et écartant le levier de la sobriété.

→ Néanmoins, à court-terme, c'est un scénario dans lequel les émissions ne baissent que légèrement : seulement -15% entre 2019 et 2030.



## Scénario B « Modération du trafic »

→ Dans le scénario B, le secteur aérien n'est pas prioritaire par rapport à d'autres secteurs. Les investissements y sont inférieurs à ceux du scénario A.

→ Son adoption attesterait d'une volonté politique forte d'obtenir des résultats significatifs pour le climat puisqu'il permet une baisse importante des émissions à court terme.

→ Cependant, la stabilisation du trafic affecterait les différents acteurs concernés : compagnies aériennes, aéroports, partenaires, constructeurs, acteurs du tourisme, voyageurs et utilisateurs de fret aérien...

2 mesures pour accompagner ce scénario :

1. Pour éviter le report du trafic vers des aéroports étrangers, la France doit promouvoir une hausse de l'ambition des objectifs climatiques internationaux relatifs au secteur aérien.
2. Pour compenser les pertes d'activités liées à la diminution du tourisme international longue distance, il faut engager une concertation avec les acteurs économiques et soutenir un changement des comportements individuels vers un tourisme local et bas carbone.



## Scénario C « Tous leviers »

→ Le scénario C est sans doute le moins risqué en termes de technologies et d'acceptabilité sociale.

→ Effectivement, il mobilise tous les leviers de décarbonation, et ce de manière plus modérée que dans les autres scénarios de transition.

→ Ce scénario est donc associé à des investissements encore très importants, mais moins élevés que dans le scénario A.

→ Cependant, à court terme, il ne permet pas une baisse importante des émissions de CO<sub>2</sub> : seulement -20 % entre 2019 et 2030.

L'enjeu est donc d'arbitrer entre des objectifs et des contraintes parfois opposés :

### OBJECTIFS CLIMATIQUES SECTORIELS

(niveau et rythme de diminution des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur)

### OBJECTIFS ENVIRONNEMENTAUX HORS CLIMAT

(zéro-artificialisation nette, préservation de la biodiversité, pollution sonore, pollution de l'air)

### CONTRAINTES D'ACCEPTABILITÉ SOCIALE

(maintien des prix des billets à un prix abordable, maintien ou développement de l'offre de trafic aérien en France)

### OBJECTIFS SOCIO-ÉCONOMIQUES AVEC LE DÉVELOPPEMENT DU SECTEUR ET DU TOURISME BAS-CARBONE

(emploi, développement du transport aérien, développement du tourisme, soutien à l'industrie aéronautique)

### CONTRAINTES DE FAISABILITÉ TECHNIQUE

(augmentation de la production d'électricité bas carbone, mobilisation d'une partie des usages biomasses pour le secteur aérien)

Un tel arbitrage nécessiterait au préalable un approfondissement des connaissances sur la mise en œuvre du levier de la maîtrise du niveau de trafic et ses conséquences.