



# 3. Etude des aéronefs et des engins spatiaux

## 3.6 Aviation et environnement

Version Août 2025

- **Aviation et développement durable**
- **Pour un transport aérien durable**
- **L'aviation de demain ....**

Malgré les contraintes environnementales imposées par le changement climatique, la croissance du trafic aérien (et donc des avions et infrastructures nécessaires) est toujours très forte.

L'utilisation de l'avion est remise en cause, d'abord sur les courtes distances (courts-courriers). Néanmoins, **le développement aérien et spatial reste indispensable, surtout dans une économie ouverte** (aviation civile : transport des biens et des personnes) **et dans un contexte géopolitique instable** (aviation et spatial militaire)

C'est pourquoi **l'aéronautique reste un moteur économique et social de première importance** dans beaucoup de pays, Europe en particulier !

Mais son acceptabilité passe par une forte diminution de son impact climatique, impliquant un important effort en R&D (recherche et développement)

## L' Aéronautique : un moteur économique et social. Un gros employeur en France et en Europe

- La France est un des rares pays à disposer d'**une industrie complète** maîtrisant l'ensemble des compétences nécessaires à la définition et à la construction d'un aéronef ou d'un satellite.
- De haute technologie et performante, cette industrie est particulièrement importante **pour l'emploi hautement qualifié** sur le territoire national.

# La filière aéronautique et spatiale

La filière aéronautique et spatiale comprend l'ensemble des entreprises du territoire français concourant à la conception, la production et la maintenance de matériels aéronautiques : avions, hélicoptères, drones, dirigeables, fusées, satellites - civils et militaires -.

Avions

Hélicoptères

Drones

Dirigeables

Maintenance

Conception



Document Sébastien Roberto-Hartmann

# Les acteurs de la filière aéronautique en France

La filière aéronautique est structurée par des grandes entreprises assurant la conception globale des avions et hélicoptères ainsi que leur assemblage.

Ces **grands groupes** français s'appuient sur de nombreuses entreprises **sous-traitantes, PME/ETI** principalement, dont les compétences vont de la fabrication d'outillages, d'éléments mécaniques et électroniques simples jusqu'à la conception, la fabrication et l'assemblage d'éléments complexes comme des tronçons complets d'avion ou de fusées, ou des systèmes numériques complexes.



THALES



- 1 000 entreprises
- 65,4 Milliards d'euros de chiffre d'affaires
- 85% du CA est exporté
- 25 000 recrutements en 2024 dont 27 % de création d'emplois et 7 000 alternants
- 300 000 emplois directs et indirects
- 42% ingénieurs/cadres
- 29% techniciens
- 29% ouvriers

**Airbus : 2094 appareils commandés en 2023**  
**(Boeing : 1314 appareils commandés en 2023)**

# Les acteurs de la filière spatiale en Europe



**AIRBUS**



Vega



VEGA



SOYUZ



ARIANE 5 ES/ATV



ARIANE 5 ECA

Ariane 6



Ariane 6



Kourou (Guyane)



# La filière aéronautique mondiale

## EUROPE

L'aéronautique civile est l'un des secteurs de haute technologie les plus performants de l'UE.

L'industrie européenne est leader mondial dans la production d'avions civils, notamment d'hélicoptères, de moteurs, de pièces et de composants d'avion.

### En Europe la filière Aéronautique c'est :

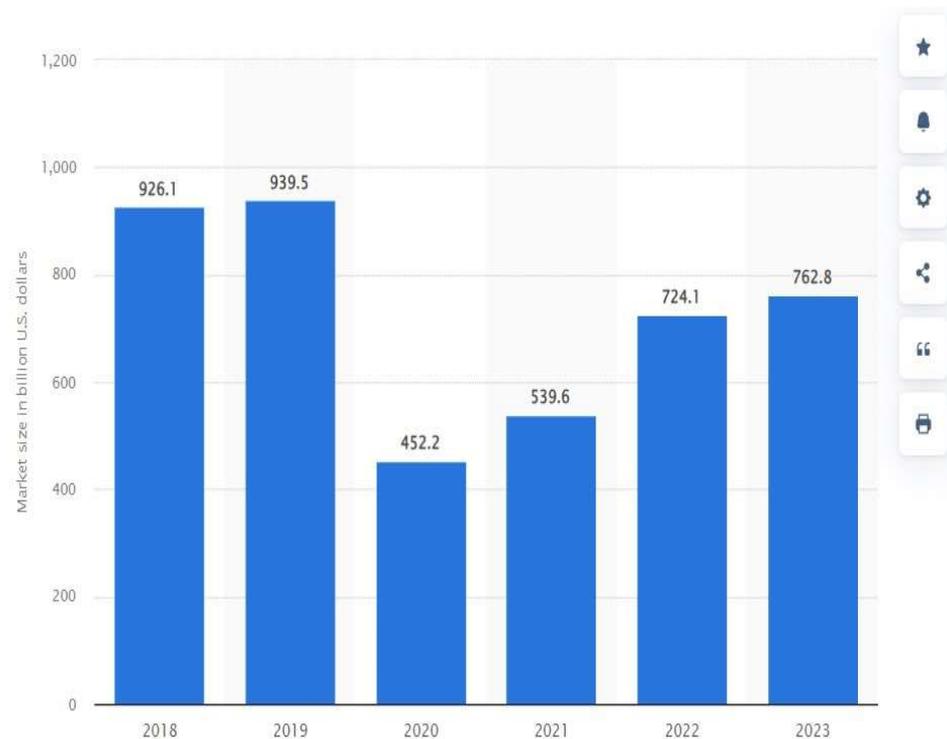
- 405 000 emplois
- Principalement en Espagne, Italie, Allemagne et France
- génère 130 milliards d'euros de revenus
- joue un rôle de premier plan dans les exportations qui s'élèvent à 109 milliards d'euros.

Document Sébastien Roberto-Hartmann

## MONDE

Taille du marché de l'industrie aérienne dans le monde de 2018 à 2023 (en Milliards de \$).

**Ordre de grandeur : presque 1000 milliards de \$ !**



© Statista 2024

# **COP 21 : Les engagements de l'Aviation Civile**

**Si l'aviation ne contribue qu'à hauteur de 2% des émissions de CO2 à l'échelle mondiale, cette proportion a vocation à s'accroître si rien n'est fait pour la limiter. Elle pourrait atteindre 3% à l'horizon 2050 selon les estimations du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). C'est dans ce contexte que le secteur aérien s'est engagé dès 2009 sur des objectifs chiffrés, à court, moyen et long terme pour réduire ses émissions.**

**L'aviation a ainsi été le premier secteur à formaliser un plan d'actions à long terme pour traiter les questions d'impact sur le changement climatique :**

- Quel est l'activité et l'impact de l'aviation civile sur l'environnement ?**
- Où en est la recherche aéronautique ?**
- Quels rôles peuvent jouer la navigation aérienne et la gestion des infrastructures aéroportuaires ?**
- Comment se dessinera l'aviation du futur ?**

# Aviation et développement durable

La Direction générale de l'Aviation Civile (DGAC) veille à réduire les nuisances, en particulier sonores et atmosphériques, générées par le transport aérien. Elle s'est engagée dans le cadre du Grenelle Environnement avec les différents acteurs du transport aérien.

Elle contribue à les limiter et entretient le dialogue avec les élus et les représentants des riverains d'aéroports.

Le transport aérien représente 2 % des émissions mondiales de CO2 et ambitionne de stabiliser ses émissions malgré une croissance du trafic de 5% par an.

## comparaison 2014-2024

3.3 milliards de passagers en 2014

4,3 milliards de passagers en 2023

5 milliards en 2024

Plus de 9 millions de voyageurs/jour

35% des échanges commerciaux en valeur

58 millions d'emplois

2023 : 86 millions d'emplois dans le monde

100 000 vols par jour - 1 400 compagnies aériennes  
près de 4 000 aéroports plus de 25 000 avions en service

En 2024, 28 400 avions en service dans le monde

près de 50 000 routes aériennes



# Pour un transport aérien durable

## Des initiatives et des objectifs en Europe à l'horizon 2020

La concertation entre industriels et le dialogue permanent avec les pouvoirs publics a permis de définir collectivement en Europe un agenda stratégique à l'horizon 2020 puis 2050, sur la base des travaux du groupe ACARE (Conseil consultatif pour la recherche aéronautique civile).

Les performances optimisées par appareil associant toutes les technologies disponibles à la date de l'engagement ont été ainsi quantifiées (année de référence 2000) dans trois domaines :

- **impact sur le climat** : -50% d'émissions de CO<sub>2</sub> en 2020 ; -75% en 2050
- **impact sur la qualité de l'air** : -80% d'émissions d'oxydes d'azote en 2020 ; -90% en 2050
- **bruit perçu** : -50% en 2020 ; -65% en 2050

## **Pour un transport aérien durable**

**Garantir la sécurité de tous, augmenter l'efficacité opérationnelle pour permettre l'accès du plus grand nombre au transport aérien, et réduire l'impact environnemental constituent des objectifs convergents qui fédèrent l'ensemble des acteurs, industriels et opérateurs.**

**Entre un appareil de 1960 et un de 2010, les efforts d'innovation technologique ont permis de diviser par 5 la consommation de kérosène !**

**Pour stabiliser les émissions mondiales liées à l'aviation à partir de 2020 (croissance "neutre en carbone") malgré une croissance du trafic de 5% par an, cinq leviers de progrès ont été identifiés :**

- 1) poursuivre les progrès technologiques,**
- 2) améliorer la gestion du trafic aérien,**
- 3) optimiser les infrastructures et les opérations aéroportuaires,**
- 4) développer les biocarburants aéronautiques durables,**
- 5) mettre en place des mesures économiques.**

***Note : objectifs 2020 non atteints ...***

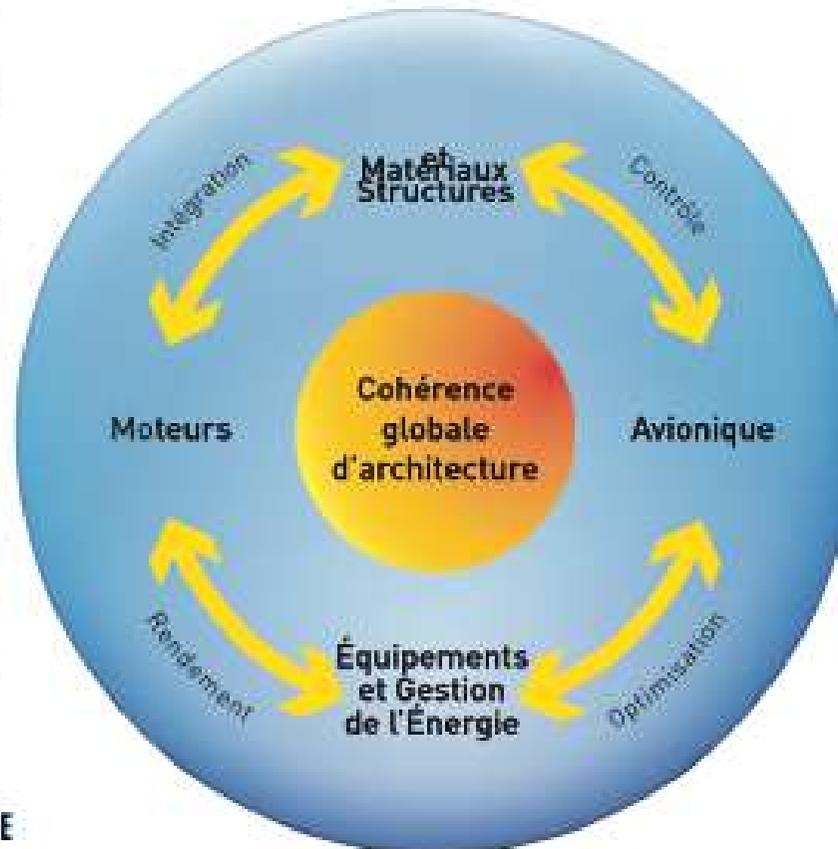
# (1) - Poursuivre les progrès technologiques



**AÉRONEF COMPOSITE**  
Réduction de la masse



**AÉRONEF PLUS PROPRE  
ET PLUS SILENCIEUX**



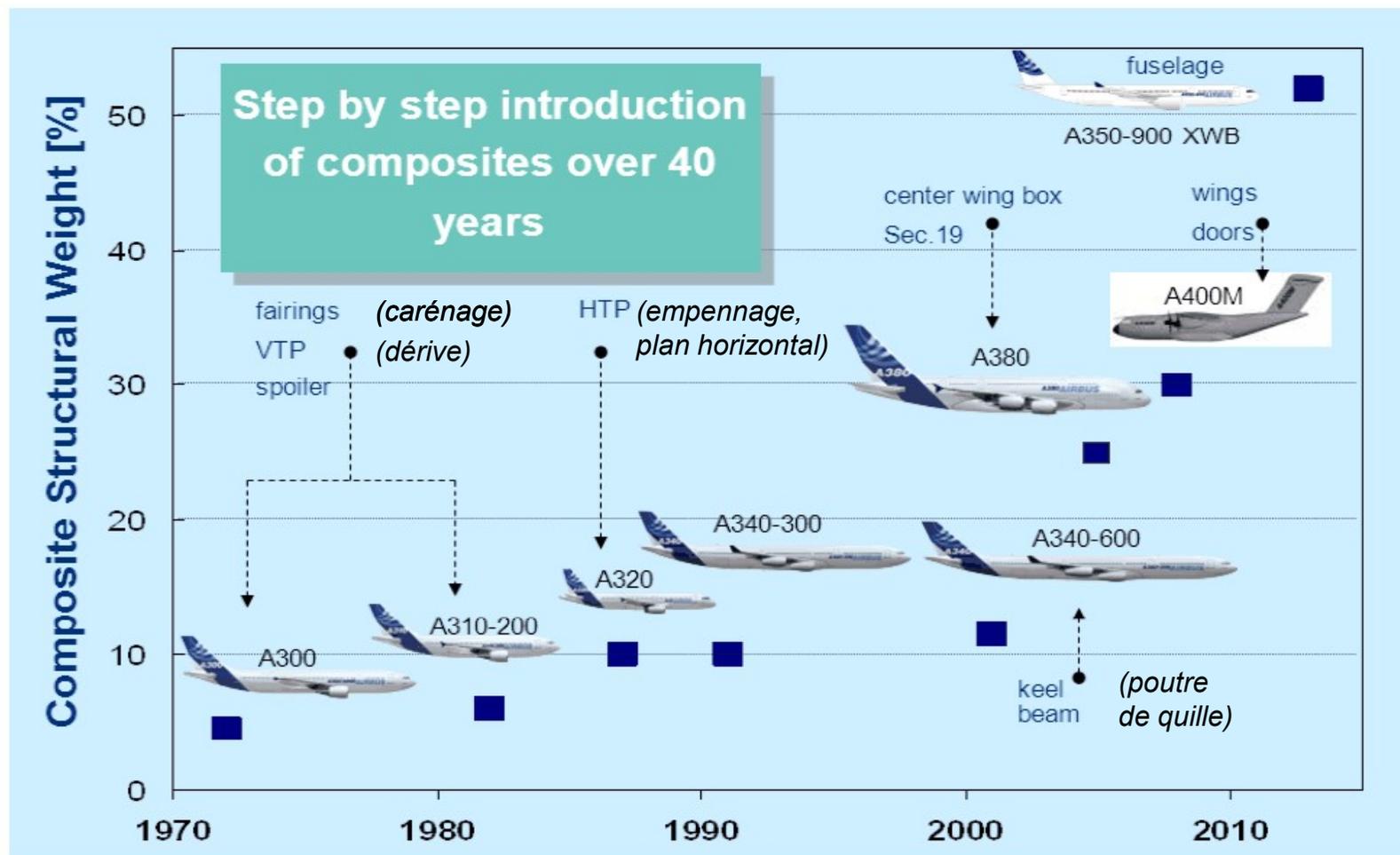
**AÉRONEF NUMÉRIQUE**  
Optimisation aérodynamique  
Gestion de mission intelligente  
Connectivité bord-sol



**AÉRONEF PLUS ÉLECTRIQUE**  
Gestion dynamique  
Réduction de la consommation

# L'évolution de la structure des avions

## Compétition métal/composite



A350 : 53 % composite, 6 % acier, 19 % alliage d'aluminium, 14 % titane



# L' Aéronautique : un moteur économique et social. Un gros employeur en France et en Europe

- La France est un des rares pays à disposer d'**une industrie complète** maîtrisant l'ensemble des compétences nécessaires à la définition et à la construction d'un aéronef ou d'un satellite.
- De haute technologie et performante, cette industrie est particulièrement importante **pour l'emploi hautement qualifié** sur le territoire national.

## **(1b) – Rendre l'avion plus électrique**

- Utiliser l'électricité pour de nombreuses fonctions de l'avion (commandes de vols, freinage, inverseurs de poussée..) amène à réduire le coût global de revient avec en perspective de réduction de la consommation de carburant et des émissions de CO2.**
- Par ailleurs, le système de roulage électrique permettra une économie de carburant pouvant aller jusqu'à 4%, une réduction de la pollution locale et du bruit et rendra plus fluide le trafic sur les aéroports**

# Motorisation électrique 100%

- **Production vs Stockage de l'électricité**
  - **Stockage:**
    - Batteries: lithium-ion-polymère
      - Poids, rendement, mémoire, temps de recharge
  - **Production:**
    - **Panneaux photo voltaïques: Solar Impulse**
      - Grande surface
      - Rendement encore faible
    - **Pile à combustible.**
      - Stocker plusieurs kilogrammes d'hydrogène à une pression élevée ou sous forme liquide, donc très basse température



Pipistrel Velis (600 kg, 2 passagers, 50 mn d'autonomie opérationnelle, 1h30 de recharge)



Solar Impulse (envergure 72 m, 2300 kg, 1 passager, 17248 cellules photovoltaïques, 62 km/h)

# L'avion électrique e-Fan (Airbus)

Cet avion prototype tout électrique préfigure une aviation silencieuse et exempte de toute émission polluante. Les essais vont se poursuivre pour vérifier le comportement de l'appareil. L'objectif pour Airbus Group est de mettre sur le marché un avion d'entraînement électrique en 2018.



Cet avion électrique biplace E-Fan est une réalisation concrète de la transition écologique et énergétique pour la formation initiale des pilotes de demain. Il ne consomme que 2 € d'électricité contre 36 à 40 € de carburant pour un avion à moteur pour une mission identique d'une heure. Cet avion électrique offre un juste équilibre pour concilier un besoin de formation croissant, la réduction des nuisances pour les riverains d'aérodromes et la croissance verte.

# L'avion électrique e-Fan X (Airbus)

Un projet commun Airbus et Rolls-Royce de démonstrateur d'avion hybride électrique. Le prototype est basé sur un British Aerospace 146, dont l'un des quatre réacteurs est remplacé par un moteur électrique. Le système de production d'énergie électrique est composé d'une turbine à gaz entraînant un générateur électrique de 2,5 MW.



**Le prototype devait voler en 2020. Vol abandonné pour raisons d'économies, nécessités par la crise du Covid 19 ! Seuls les essais au sol continueront.**

© L'UsineNouvelle

# Motorisation hybride

Avion régional hybride Aura aéro (Toulouse)

Pay load : 19 pax/1950 kg  
Rayon d'action : 200 NM  
Piste nécessaire : 800 m  
Vitesse de croisière : 250 KTAS

Cabine 100 % biosourcée et recyclable  
Décollage/atterrissage tout électrique

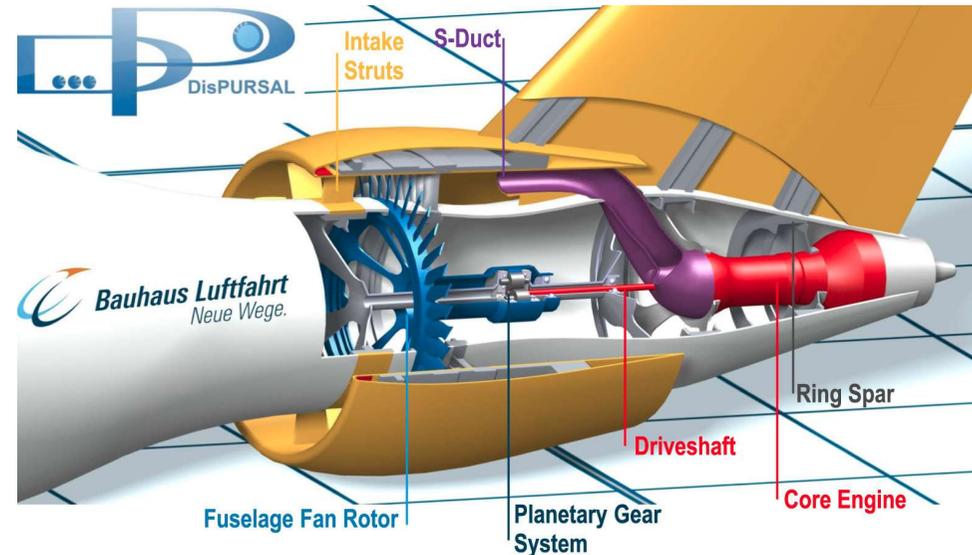
1<sup>er</sup> vol en 2026  
Entrée en service 2028



## Des moteurs du futur ?

### Moteur avec ingestion de la couche limite (propulsion BLI)

Réduction de puissance propulsive nécessaire : env. 10 %



In : Moirou et al, Progress in Aerospace Sciences, 2023

### Moteur à soufflante non carénée (open fan, projet RISE de Safran/GE, en test en soufflerie)

Réduction de puissance propulsive nécessaire : jusqu'à 30% ?

## (1b) – Rendre l'avion plus électrique

- **Avionique : des aéronefs plus intelligents**
- L'avionique et les systèmes de bord se dotent de capacités à réaliser des fonctions de plus en plus complexes afin d'optimiser les performances (avions « instables », winglets,...), réduire le bruit perçu, réduire les émissions polluantes.
-

## (2) – Optimisation de la gestion du trafic aérien

- Evolution vers une approche globale collaborative fondée sur la notion de **“gestion de trajectoire”** plutôt que sur celle de “gestion de l’espace aérien”.

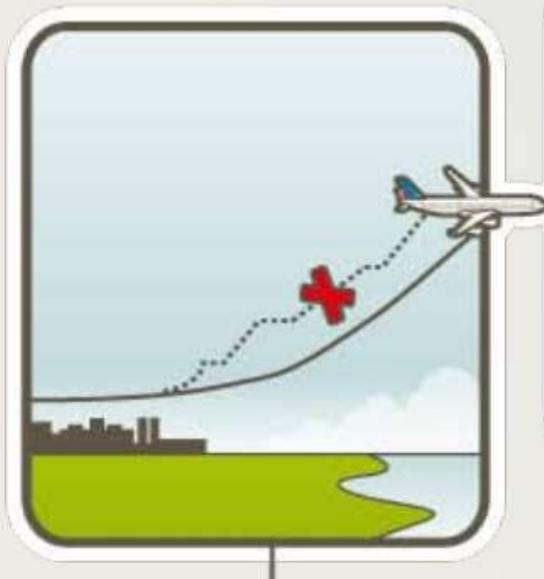
Cette évolution s’appuie sur le partage étendu des informations (état du trafic et son évolution) pour une meilleure planification, tout en permettant à chaque avion de suivre une trajectoire proche de son optimum.

- L’optimisation des routes des avions (programme [SESAR](#) en Europe) permettra des modes de départ et d’arrivée de type **“montée continue”** **“croisière ascendantes”** et **“descente continue”**, sans palier, qui diminuent le coût énergétique, les temps d’attente avant l’atterrissage et les nuisances sonores.

## (2) – La gestion du trafic aérien

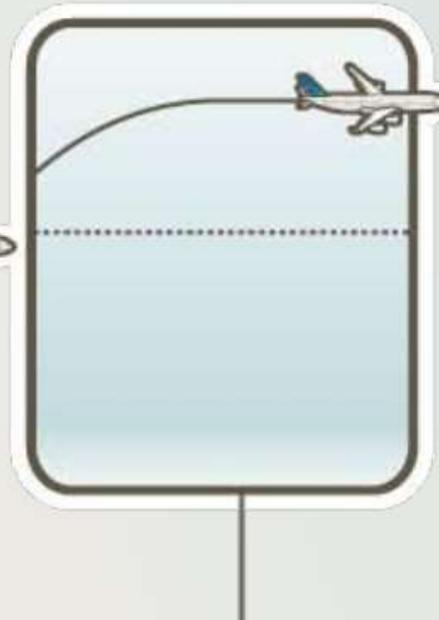
### 3/ Montée continue

Les services du contrôle aérien autorisent une montée continue jusqu'au niveau de croisière, sans paliers intermédiaires, ce qui diminue significativement la consommation de carburant et les émissions gazeuses.



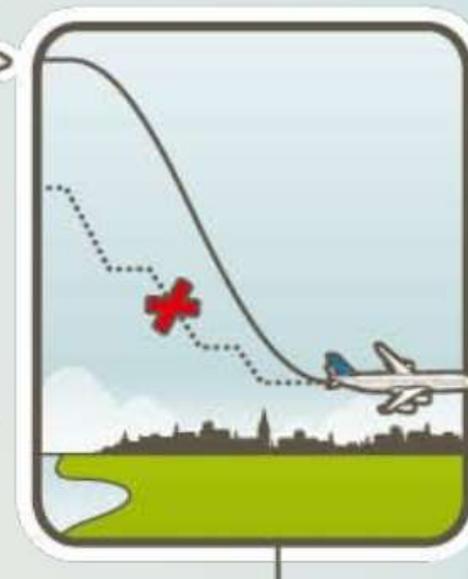
### 4/ Croisière ascendante

L'avion s'allège de son carburant au cours du vol. Sur de longues distances, il peut effectuer une croisière ascendante en volant toujours à son niveau optimal, en liaison avec les centres de contrôle aérien océanique.



### 5/ Descente continue

Les services du contrôle aérien autorisent une descente continue, sans paliers intermédiaires. Coordinée entre pilotes et contrôleurs, elle réduit émissions gazeuses et nuisances sonores à basse altitude.



### **(3) Optimiser les opérations aéroportuaires**

Une démarche collaborative de **réduction des émissions aéroportuaires des avions**

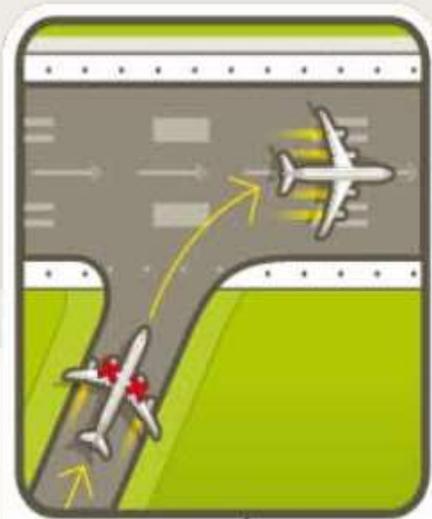
Cela passe par:

- une gestion locale optimisée des départs,
- des procédures d'aide à la circulation et au guidage,
- la mise en œuvre de **l'éco-roulage** : tractage de l'avion par des véhicules hybrides ou électriques, roulage au sol des avions avec un moteur éteint sur deux, etc.
- la mise en place de moyens de substitution à l'utilisation des APU (groupes auxiliaires de puissance embarqués à bord des aéronefs) ou GPU (groupes électriques au sol),
- le déploiement de l'air conditionné au sol sur les postes avion

### (3) Optimiser les opérations aéroportuaires

#### 1/ Roulage départ

Au sol, l'avion peut n'utiliser qu'un seul réacteur, sur avions bimoteur, ou deux réacteurs sur quadrimoteur. Cette procédure réduit la consommation de carburant et les émissions gazeuses et sonores.



#### 2/ Temps d'attente avant décollage

En coordination avec le gestionnaire de l'aéroport, la compagnie aérienne et le service du contrôle de la circulation aérienne, l'autorisation permettant la mise en route de l'avion et son roulage est accordée de manière à limiter à 10 minutes maximum son temps d'attente au seuil de piste.



## **(4) Biocarburants aéronautiques durables**

Aujourd'hui, pour pouvoir être utilisé par les appareils existants, les **carburants alternatifs** doivent avoir les mêmes propriétés physiques que le kérosène et être compatible et miscible avec celui-ci.

Sur cette base, trois filières ont à ce jour été qualifiées permettant de produire du biocarburant aéronautique à partir de sucres/amidons, d'huiles/grasses ou de lignocellulose. Il y a eu à ce jour 1 700 vols commerciaux utilisant des **biocarburants. SAF.** Sustainable Alternative fuel

## **(5) Système d'échange et de quota d'émissions**

**Parmi les différentes options à l'étude, un système de compensation consisterait à ce que les opérateurs du transport aérien compensent les émissions de CO2 supérieures au seuil fixé grâce à l'achat de crédits de réductions d'émissions de CO2.**

**Ces crédits pourraient provenir d'autres secteurs d'activité (ex : projet de construction d'une centrale hydraulique, ou solaire, projets de reforestation, etc.)**

## **(1a) Des progrès sur la consommation**

**L'amélioration de l'aérodynamique et la réduction de la traînée entraîneront des économies de carburant : utilisation d'ailettes placées aux extrémités des ailes, plus grande intégration de l'aile au fuselage ou encore du moteur à la structure de l'avion.**

**Construire des avions de plus en plus légers reste un grand défi pour l'aéronautique : utilisation de composites et de nouveaux alliages métalliques. Dans l'avenir, de nouveaux matériaux minimisant les frottements aérodynamiques pourraient aussi accroître les performances de l'avion.**

## (1b) Des progrès sur les moteurs



Les avions modernes sont devenus **plus sobres** que leurs aînés notamment grâce à des réacteurs de grand diamètre dits “à double flux”.

Pour accroître encore le rendement les ingénieurs évaluent actuellement une architecture innovante, “l’open rotor”.

Des progrès technologiques au niveau de la chambre de combustion ont également permis une diminution significative de la pollution locale (oxydes d’azote, particules)

# Le ciel de demain ....

**Des ruptures technologiques sont recherchées dès à présent pour viser les objectifs de réduction des émissions et du bruit des aéronefs attendus à l'horizon 2050 :**

**architectures innovantes :**

- **aile volante,**
- **nouvelles géométries de voilure : ailes haubanées ou à grand allongement,**
- **mode de propulsion permettant de réduire la consommation d'hydrocarbures**
- **propulsion hybride ou électrique, répartie ou distribuée, moteurs à très haut taux de dilution**
- **nouveaux matériaux.**



- Fuselage sustentateur
- Aile à grand allongement
- Propulsion électrique distribuée
- Moteur à grand taux de dilution
- Moteurs enfouis / Ingestion de couche limite

