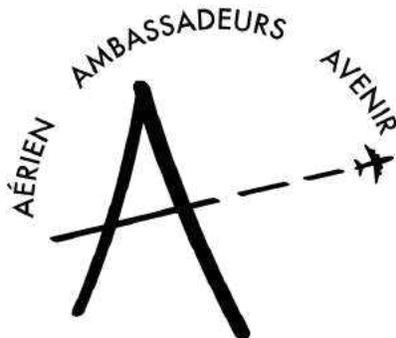

Cap sur l'Avenir

Aéroclub de France
6, rue Galilée
Paris

Contenu environnemental BIA NG (Nouvelle Génération)

Rédigé initialement par l'association Aérien Ambassadeurs Avenir (Triple A)
Mis à jour par Cap sur l'Avenir



AÉRO-CLUB DE FRANCE



Fédération Française Aéronautique

INTRODUCTION

Ce document contient une proposition de contenu environnemental à ajouter au programme du BIA. Il est organisé selon les 5 modules du BIA. A la fin de ce document, se trouvent des annexes pour développer certains points abordés qui méritent d'être étayés.

Nous vous rappelons qu'il vous est demandé de ne pas modifier ce contenu et de l'utiliser tel quel. En revanche, vous êtes libres de traiter des sujets qui vous intéressent uniquement.

Vous trouverez davantage de détails, d'explications et de conseils dans le manuel pour les enseignants qui vous a été transmis avec ce contenu.

Pour toute remarque, toute question ou tout commentaire, n'hésitez pas à nous contacter. En effet, ce que nous proposons est loin d'être parfait et nous chercherons à l'améliorer avec votre aide.

VERSIONS

1. Copié-collé du contenu initial de Triple A.
2. Mise à jour par Cap sur l'Avenir
3. Mise à jour avec quelques remarques de la FFA

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	2
VERSIONS	2
LES ENCARTS ENVIRONNEMENTAUX	7
I - Météorologie et aérologie	7
1 - Emissions dans l'atmosphère	7
2 - La couche d'ozone	7
3 - L'effet de serre	7
4 - Les contrails	8
5 - Le vent	8
6 - Brume et brouillard	9
7 - Givrage	9
8 - Jet-stream	9
9 - Les turbulences	10
II - Aérodynamique, aérostatique et principes du vol	11
1 - Traînée induite	11
2 - Traînée de frottement	11
3 - Finesse max	11
4 - Utilisation des volets	12
5 - Moyens de freinages	12
6 - Croisière climb	12
7 - Influence du centrage	13
8 - Constitution des ballons à air chaud	13
9 - Lanceurs réutilisables	13
10 - Débris spatiaux	13
11- Collisions spatiales	14
III - Etude des aéronefs et des engins spatiaux	15
1 – Déchets spatiaux	15
2 – Influence de l'architecture de l'avion sur sa consommation	15
3 – Matériaux composites	15
4 – Recyclage	16
5 – Alternatives au kérosène	16
6 – Instruments et optimisation	16
7 – Mixture	16

8 – Débit massique	17
9 – Influence d'un fort taux de dilution	17
IV - Navigation, réglementation, sécurité des vols	18
1 – ACNUSA	18
2 – Survol des réserves naturelles	18
3 – Evolution des trajectoires	18
4 – Eco-pilotage	19
5 – Free route	19
5 – Cartes VAC et nuisances sonores	20
6 – Aéroports	20
7 – Navigation par satellite	20
8 – Préparation d'un vol	21
V - Histoire et culture de l'aéronautique et du spatial	22
LES ANNEXES	25
I - Météorologie et aérologie	25
1 - La pollution atmosphérique	25
2 - L'effet de serre	27
2.1 - Explications détaillées	27
2.2 - Evolution des émissions de GES	27
2.3 - Effets des GES au quotidien	28
2.4 - Contribution de l'aérien aux émissions de GES	29
2.5 - Evolution de l'efficacité du transport aérien	29
2.6 - Evolution de l'aérien	31
3 - Les contrails	32
3.1 - Origine	32
3.2 - Conditions de formation	32
3.3 - Impact sur le réchauffement climatique	32
II - Aérodynamique, aérostatique et principes du vol	34
1 - Les ailes bio-inspirées	34
2 - Winglets	35
2.1 - Principe du winglet	35
2.2 - Intérêts du winglet (étude de cas avec les winglets du Boeing 737)	35
2.3 - La traînée des winglets	36

2.4 - Winglets de dernière génération	36
3 - Croisière climb	38
4 - Influence du centrage	40
III - Etude des aéronefs et des engins spatiaux	41
1 - Les problématiques environnementales en orbite	41
1.1 - Introduction	41
1.2 - Mais d'où proviennent ces débris?	41
1.3 - Les risques	41
1.4 - Des projets pour nettoyer l'espace	42
1.5 - De nouvelles technologies pour réutiliser les lanceurs	42
2 - Bilan des forces - comment réduire la consommation ?	42
3 - Trains d'atterrissage	43
3.1 - Choix des matériaux et revêtements – Exemple avec l'A350	43
3.2 - Réduction du Bruit – Exemple avec le B787	43
3.3 - Freins électriques - Exemple avec le B787	44
3.4 - Electric Taxiing	44
3.5 - Trappes de trains : Exemple avec l'A380	45
4 - La fin de vie : recyclage des aérodynes et de leurs composants	46
Source : Asmatulu, Eylem, Michael Overcash et Janet Twomey. 2013. « Recycling of Aircraft: State of the Art in 2011 ». Journal of Industrial Engineering, vol. 2013, p. 1-8.	46
5 - Electrification des aéronefs	47
5.1 - More Electric Aircraft (MEA)	47
5.2 - All Electric Aircraft (AEA) or Electric Powered Aircraft (EPA)	47
6 - Moteurs électriques : alimentation par batterie	48
7 - Etude du cycle de vie (thermique vs électrique)	50
8 - Moteurs électriques - alimentation solaire	51
9 - Moteurs à hydrogène - fonctionnement	52
10 - Les biocarburants	53
IV - Navigation, réglementation, sécurité des vols	55
1 - L'ACNUSA (Autorité de Contrôle des Nuisances Aéroportuaires)	55
1.1 - Présentation	55
1.2 - PEB et PGS	55
2 - Trajectoires VFR	56
2.1 - Cartes VAC : Trajectoires de tours de piste	56
2.2 - Cartes VAC : Trajectoires de départ adaptées	57
2.3 - AéroBiodiversité	58
3 - Evolution des procédures IFR	59
3.1 - Au départ	59

3.2 - En croisière	60
3.3 - A l'arrivée	62
3.4 - Projets pour demain	64
V - Histoire et culture de l'aéronautique et du spatial	66
1 - Acteur incontournable	66
1.1 - Chiffres clés	66
1.2 - L'aéronautique en France	66
2 - Impact environnemental	67
2.1 - Chiffres clés	67
2.2 - Evolutions des dernières décennies	67
3 - Les ambitions du secteur pour l'avenir	68

LES ENCARTS ENVIRONNEMENTAUX

I - Météorologie et aérologie

1 - Emissions dans l'atmosphère

Lors du vol, un avion émet du **CO₂**, des **oxydes d'azote**, des particules de **sulfate** et de **suie**, de la **vapeur d'eau** et génère aussi des **traînée de condensation**. Ces émissions sont à l'origine des impacts principaux de l'activité aéronautique sur les changements climatiques.

Vous trouverez davantage de détails en annexe ici. [I - Météorologie et aérologie](#)

2 - La couche d'ozone

Elle se situe entre **20 et 50 km** au sein de la **stratosphère**

- **Essentielle à la vie** : elle nous protège des **UV-C** qui détériorent l'ADN des organismes biologiques, en empêchant 50% des rayons du soleil de pénétrer dans la troposphère.
- Certains **gaz à effet de serre** issus de la combustion d'énergie fossile (comme le protoxyde d'azote) et composés chimiques, tels les chlorofluorocarbures (ou CFC, utilisés auparavant comme gaz de réfrigération, à **présent interdits**), **dégradent drastiquement la couche d'ozone** et sont une menace pour la vie sur Terre.
- Si le « **bon ozone** » de la **stratosphère** nous protège, le « **mauvais ozone** », généré par les **activités humaines** et présent **dans la troposphère**, est lui **toxique** pour les organismes lorsqu'il est inhalé...

3 - L'effet de serre

PRINCIPE DE L'EFFET DE SERRE



Un phénomène naturel: les gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère empêchent une partie du **rayonnement infrarouge terrestre** d'être renvoyée dans l'espace. L'équilibre naturel de cet échange d'énergie permet la vie sur Terre à une **température moyenne globale de 15°C** (contre **-18°C** s'il n'y avait pas d'effet de serre !).

Un équilibre fragile: les émissions humaines de GES perturbent cet équilibre en amplifiant significativement la rétention d'énergie: **c'est l'origine du dérèglement du climat causé par l'humanité et du réchauffement global de la planète.**

Vous trouverez davantage de détails en annexe ici. [3 - L'effet de serre](#)

4 - Les contrails

Les contrails (de Condensation trails) sont les longs nuages qui se forment parfois suite au passage d'un avion.

Elles se forment comme des nuages, c'est-à-dire dans des conditions bien précises de température et d'humidité de l'air.

Attention : Ne pas confondre les contrails (ces nuages-ci) avec les chemtrails qui n'existent pas !

Les **contrails** se forment dans des **conditions atmosphériques bien précises** grâce aux particules rejetées par les moteurs. De nombreux projets sont en cours visant à réduire leur impact malgré un **impact environnemental encore mal connu**.

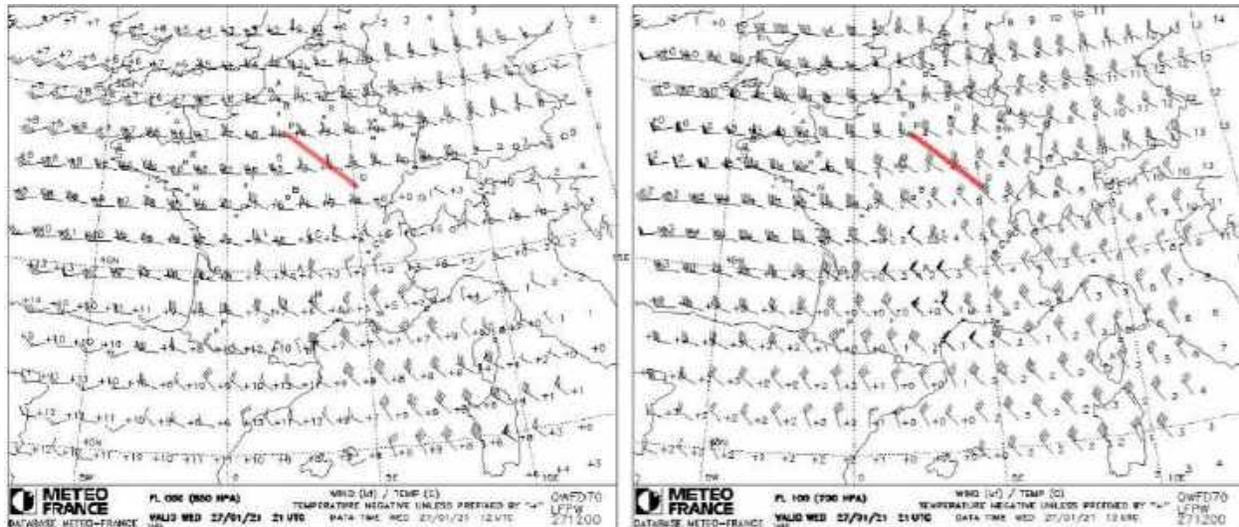
Vous trouverez davantage de détails en annexe ici. [3 - Les contrails](#)

5 - Le vent

Le vent fait partie des éléments que regarde un pilote lorsqu'il prépare son vol et en particulier lorsqu'il choisit l'altitude à laquelle il va voler pour sa navigation.

En effet, plus l'avion aura du vent arrière, plus il ira vite et moins il consommera de carburant sur le trajet.

Cartes WINTEM publiées par Météo France



Trajet prévu (en rouge) : Paris – Dijon

Route magnétique : 140°

Vents :

FL 50 : 320°/25kts

FL100 : 320°/35kts

Exemple : Dans les conditions ci-dessus, monter au FL100 au lieu du FL50 permet de gagner 10 kts de vent arrière. Pour un avion léger cela représente **une augmentation de vitesse sol de l'ordre de 10% et donc une économie de carburant en conséquence !**

6 - Brume et brouillard

Le « **smog** », fréquemment présent dans de nombreuses grandes métropoles (Londres, Pékin, Delhi, Los Angeles, Paris...) résulte de la condensation de l'humidité sur des poussières en suspension, telles que l'ozone, les particules fines ou les NOx, nocives pour la santé. Ces éléments sont rejetés lors de la combustion d'énergies fossiles telles que le charbon et les carburants. **Limiter les émissions ou développer des technologies de capture de pollution devient primordial pour limiter le smog.**

7 - Givrage

Les produits d'antigel ou de dégivrage ont un impact important sur la biodiversité lorsque ceux-ci se retrouvent dans les aquifères, du fait de leur toxicité: certains (comme le glycol éthylène) privent les organismes vivants d'oxygène, alors que d'autres nuisent aux fonctionnements des hormones du corps humain (**Perturbateurs endocriniens**) ou bien agissent comme éléments corrosifs. **La plupart de ces produits sont non-biodégradables et peuvent ainsi persister dans la nature.**

Certains aéroports possèdent des **circuits de récupération** et/ou de **retraitement spécifiques** des produits usés (comme à CDG), tandis que la recherche se focalise sur la mise en place d'**alternatives plus propres sans glycol**: celles-ci devront répondre aux mêmes standards de sécurité que les solutions actuelles, ce qui constitue un challenge important.

8 - Jet-stream

Les Jet-streams sont utilisés par les pilotes de lignes pour économiser du carburant quand ils sont orientés dans le bon sens pour le vol envisagé. Ainsi sur un vol transatlantique, dans le sens New York → Paris, **le temps de vol peut être réduit d'une heure** du fait de la puissance du Jet-stream.

Cela représente près de 6 tonnes de carburant consommées en moins.

Mais, s'il est bénéfique dans un sens du trajet, l'effet du jetstream **est désavantageux dans le sens opposé.**

Pour **minimiser cet impact négatif** (ou pour bénéficier au maximum des effets positifs du jetstream), **il existe des logiciels disponibles sur Electronic Flight Bag** (en complément des cartes **WINTEM/TEMPSI**) qui permettent aux pilotes de visualiser graphiquement l'orientation et l'intensité des Jet-stream pour **optimiser leur route**. Mais quelle que soit l'option retenue, il faut l'accord du contrôle aérien et c'est la sécurité qui doit primer !

Quelques rappels de météo :

Une carte **WINTEM**, est une carte de prévision indiquant des vents et des températures locales pour divers niveaux de vol.

Une carte **TEMPSI**, est une carte de **TEMps Significatif** prévu pour une heure fixe sur laquelle on trouve les phénomènes intéressant l'aéronautique et les masses nuageuses.

9 - Les turbulences

Les turbulences coûtent cher à l'industrie aérienne: plus de 100M\$US en 2000 selon l'IATA (blessures, déroutements, vols annulés, maintenances avions, indemnisations passagers, etc.).

Les **changements climatiques** causés par les activités humaines et les **augmentations de températures** qui en résultent rendent l'air plus instable. En Atlantique Nord par exemple, la variation du cisaillement de vent vertical observée est en augmentation constante chaque année, causant des occurrences de turbulences en air clair plus fréquentes et plus intenses.

II - Aérodynamique, aérostatique et principes du vol

1 - Traînée induite

La **traînée induite** peut être **réduite** grâce à l'ajout de winglets permettant de réduire l'intensité de ces tourbillons et d'**améliorer** à la fois les **performances de l'appareil** et son **impact environnemental** en réduisant sa traînée donc sa consommation.

Vous trouverez davantage de détails sur les winglets en annexe ici. [2 - Winglets](#)

2 - Traînée de frottement

Certains résidus présents sur la structure de l'avion peuvent engendrer une hausse de la traînée de frottement, d'où la nécessité de laver les avions fréquemment. Des dispositifs ont donc été mis en place afin d'éviter le gaspillage d'eau.

Auparavant, pour laver les appareils, beaucoup d'eau était utilisée (environ 10 000 L d'eau pour un Boeing 777).

Depuis 2011, Air France notamment, utilise la technologie EcoShine développée par Aero UUDS:

- ✓ **Réduction par x100** de la quantité d'eau nécessaire (8 millions de litres économisés/an pour AF)
- ✓ Réduction des mouvements tractés au sol et du temps d'immobilisation de l'appareil.
- ✓ Sans rejets au sol, produit utilisé biodégradable à 96%

150 litres, c'est le volume d'eau nécessaire pour nettoyer un Boeing 787 grâce au procédé EcoShine (contre 12.000 litres par la méthode traditionnelle au jet d'eau).

Source : <https://www.aero.uuds.com/fr/ecoshine>

3 - Finesse max

En opérations commerciales, lors d'approches sur les aéroports chargés (CDG, Londres...) certains avions doivent **attendre** soit dans des circuits d'attente, soit en linéaire en réduisant la vitesse. Dans ces cas, les pilotes adoptent la **vitesse de consommation horaire minimum**, correspondant à la **finesse max** de l'appareil compte tenu des conditions d'exploitation du jour.

La vitesse de consommation horaire s'exprime en kg, tonnes ou livre par heure (selon les documentations). Elle se calcule par la relation suivante :

$$C_h = C_{sp} \times Tu$$

où C_{sp} désigne la consommation spécifique du moteur, soit la masse de carburant nécessaire pour fournir la poussée pendant une période de temps. On l'exprime en Kg/Kg poussée/heure.

Tu , la poussée utile. Elle sera minimale à l'incidence de finesse max.

Il s'agit aussi de la vitesse minimale acceptable en croisière, vitesse qui sera indiquée par un point vert (Green Dot).

4 - Utilisation des volets

En fonction des **caractéristiques de la piste utilisée** et de **l'environnement aéroportuaire**, les pilotes cherchent à optimiser le braquage des volets pour qu'il soit le plus faible possible afin de générer moins de traînée.

Au décollage : Si la longueur de piste le permet, **une utilisation d'un cran de volet plus faible** voire une non-utilisation des volets permet à la fois de **réduire la consommation de carburant** et **d'améliorer les performances de montée**. L'avion est donc **plus haut plus vite**, conformément aux **procédures anti-bruit**, en place pour limiter les nuisances sonores pour les riverains des aéroports.

A l'arrivée : Tout comme pour le décollage, l'utilisation **d'un cran de volet inférieur** ou la non-utilisation des volets à l'atterrissage, possible en fonction de la piste d'arrivée et des conditions du jour, permet de garder une **voilure plus lisse, générant moins de traînée**. La consommation de carburant en phase finale est donc réduite.

*Lors de leurs arrivées à Roissy, les pistes étant longues, la plupart des pilotes utilisent un braquage plus faible de volets. Sur un B777, l'utilisation des volets 25 au lieu de 30 permet d'économiser jusqu'à **50 kg de carburant** par vol.*

Source : Green Operating Procedures (logiciel My Fuel, Pilot Mission)

5 - Moyens de freinages

Trois moyens permettent de freiner l'avion au sol : freins, aérofreins et reverses. Lorsque **la longueur de piste le permet**, il est possible de n'utiliser que les freins et aérofreins pour ralentir l'avion, les reverses sont alors utilisées sans ajout de puissance moteur.

*Sur un B777, cette opération permet d'économiser jusqu'à **80 kg de kérosène**, pour une manœuvre qui est pourtant très brève (de l'ordre de la minute).*

Il peut être intéressant d'expliquer le fonctionnement des reverse si ce n'est pas fait encore dans le cours afin de bien comprendre pourquoi cela permet d'économiser du carburant.

6 - Cruise climb

Lors de croisières longues, les pilotes ont recours à ce que l'on appelle le **cruise climb**.

Cette procédure consiste à augmenter graduellement son niveau de vol au cours du temps. Le vol est donc fait de paliers rectilignes successifs.

L'appareil évolue alors dans un air moins dense, nécessitant ainsi moins de traction pour équilibrer la traînée. La **consommation de carburant** est donc **diminuée**.

De la même façon, il est possible, en accord avec le contrôle aérien, de faire une **descente continue** du niveau de croisière jusqu'à l'atterrissage pour réduire la consommation de carburant en évitant de ré-augmenter la puissance pour faire des paliers durant la descente.

Vous trouverez davantage de détails en annexe [ici.3 - Cruise climb](#)

7 - Influence du centrage

D'autre part, en croisière, plus l'appareil est **centré « arrière »**, plus sa consommation est **faible**.

Vous trouverez davantage de détails en annexe ici. [4 - Influence du centrage](#)

8 - Constitution des ballons à air chaud

Les enveloppes des ballons à air chaud sont des "passoires thermiques" qui laissent s'échapper très rapidement la chaleur emmagasinée dans le ballon. Pour limiter ces pertes de chaleur, et donc la quantité de gaz utilisée, de nouvelles **enveloppes à double paroi** (sur le principe du double vitrage) ont vu le jour. La consommation de propane pourrait être réduite de près de **70%** !

Dans le même souci de limiter l'impact environnemental, les brûleurs utilisent de plus en plus des **biogaz** issus de déchets organiques (et non pas d'extractions fossiles).

9 - Lanceurs réutilisables

Les premiers étages des lanceurs développés par SpaceX retournent sur terre quelques minutes après le décollage et sont **réutilisés** pour de **nouveaux lancements, réduisant le coût des missions et les déchets liés aux lancements**. Thomas Pesquet a utilisé l'un de ces lanceurs sur Crew Dragon lors de sa 2^{ème} mission dans l'espace en 2021 !



10 - Débris spatiaux

Chaque année, **des centaines de satellites** sont lancés et par conséquent, depuis le début de la conquête de l'espace en 1957, de nombreux débris se sont accumulés autour de la Terre. Une partie de ces débris, ceux de plus de 5 cm peuvent être suivis depuis la Terre mais ce n'est pas le cas des plus petits qui peuvent pourtant causer d'importants dégâts!

L'ESA (European Space Agency) a répertorié environ 26 000 objets dans l'espace dont 7% seulement sont en activité! Et on estime à 500 000 le nombre de débris de moins de 5 cm.

Vous trouverez davantage de détails en annexe ici. [1.2 - Mais d'où proviennent ces débris?](#)

Récemment, des astrophysiciens ont mis en garde les conséquences des envois massifs de satellites dans l'espace . À l'aube, comme au crépuscule, l'éclairage des satellites par le soleil, les rendrait plus brillants que les astres, rendant ainsi leur observation plus laborieuse. De plus, le fonctionnement des radiotélescopes pourrait être perturbé en raison des ondes radio émises par les satellites.

(Ci-dessous, une image réalisée par le télescope de l'observatoire de Lowell en Arizona montrant les traînées lumineuses des satellites ©Victoria Girgis/Lowell Observatory)

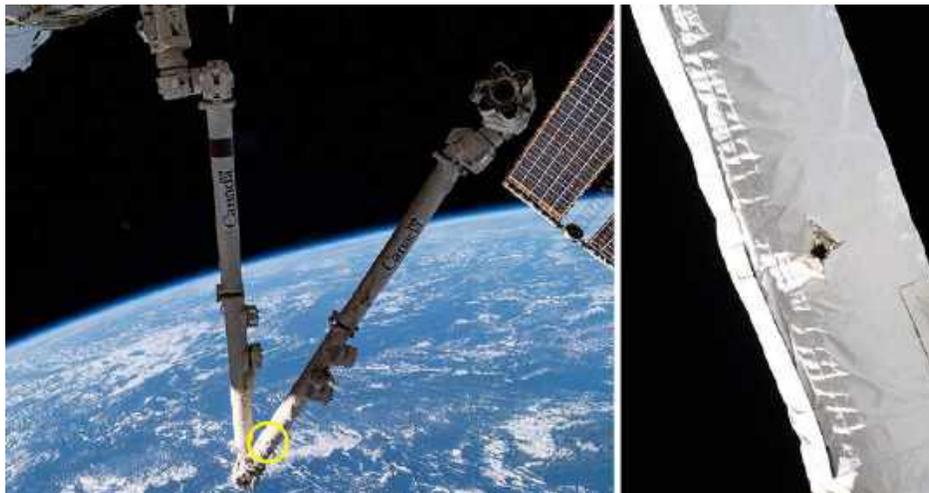


11- Collisions spatiales

La vitesse d'un satellite étant comprise entre 5 et 11 km/s, le moindre objet percuté engendre de gros dégâts. En août 2016, le satellite Sentinel-1A a été frappé par un minuscule débris : environ **0,2g et 1 cm** de diamètre. Ce petit débris a causé une déformation de près de **40 cm de diamètre** sur l'un des panneaux solaires du satellite.

En 2020, l'ISS a dû altérer 3 fois sa trajectoire pour éviter un accident!

En mai 2021, lors de la mission de Thomas Pesquet, un trou causé par un impact avec un micro débris a été découvert sur le bras robotisé de la Station. Heureusement cet incident est resté sans conséquences graves. Il illustre cependant la réalité du problème auquel les futures missions spatiales vont devoir faire face.



crédits : EASA (Thomas Pesquet)

III - Etude des aéronefs et des engins spatiaux

1 – Déchets spatiaux

L'espace aussi comprend ses propres problématiques environnementales, notamment la **gestion des déchets spatiaux, véritable problème pour les missions futures**. Ainsi, la prise en compte de la fin de vie des satellites est désormais obligatoire dès la conception.

Connaissez-vous les lanceurs Space X **réutilisables** ?

Vous trouverez davantage de détails en annexe.

2 – Influence de l'architecture de l'avion sur sa consommation

Réduire le poids et les composantes de la traînée sont des moyens de réduire la traction nécessaire pour faire évoluer l'avion. **La consommation et donc les émissions de l'appareil sont ainsi réduites.**

Cette réduction de masse peut être réalisée à travers l'intégration de siège ultra léger par exemple, comme le "TISEAT E2 S-line", pesant 5,8kg par passager, soit une masse 40% inférieure à celle de sièges classiques. Cette innovation permet une économie de 150 tonnes de fuel chaque année par avion.



(crédits photo : Expliseat)

Optimisation de l'emport d'eau à bord

4500 t de CO₂ en moins en 2019, grâce à l'optimisation de l'emport d'eau potable sur les vols Air France.

1kg/avion de la flotte Air France = -69 tonnes de CO₂ par an

Vous trouverez davantage de détails en annexe.

3 – Matériaux composites

Les matériaux composites entrent pour plus de **50%** dans la **construction des avions de dernière génération** comme l'A350 ou encore le B787.

Cela se traduit par une **baisse de poids de 20%** représentant au final un **gain de consommation en carburant** estimé à près **de 25%** par rapport à un avion équivalent de la génération précédente.

4 – Recyclage

Aujourd'hui, **au moins 85% de la masse d'un avion d'ancienne génération peut être recyclée** ! Cependant, ce pourcentage n'est pas aussi élevé pour les avions de nouvelles générations à cause des difficultés de recyclage des matériaux composites. De nombreuses recherches sont menées pour améliorer les technologies de recyclage de ces matériaux.

Les constructeurs utilisent le concept d'**éco-design** afin de rendre un avion plus modulaire dans sa conception, facilitant le remplacement et la réparation. La gestion de la fin de vie en est ainsi plus rentable.

Vous trouverez davantage de détails en annexe ici. [4 - La fin de vie : recyclage des aérodynes et de leurs composants](#)

5 – Alternatives au kérosène

Encore inenvisageable il y a quelques dizaines d'années, des alternatives au kérosène commencent à apparaître, comme par exemple :

- l'électricité ;
- l'hydrogène ;
- les bio-carburants ;
- et peut-être même d'autres solutions auxquelles nous n'avons pas encore pensé !

Ces alternatives permettraient de réduire considérablement l'impact environnemental de l'aéronautique car environ 80% des émissions de CO2 du secteur sont des émissions directes liées à la combustion du kérosène.

Cependant, ces alternatives sont encore en cours d'étude avant de pouvoir être applicables sur des avions de ligne même si de premiers essais se révèlent déjà très concluants ! Les alternatives au kérosène présentent aujourd'hui des défis qui ne demandent qu'à être relevés !

Vous trouverez davantage de détails en annexe ici. [5 - Electrification des aéronefs](#)

6 – Instruments et optimisation

Sur les avions de ligne, l'EFIS, le FMS et le FADEC ainsi que la notion de "Cost Index" (index intégrant le "coût" du carburant) permettent de **calculer au mieux les paramètres moteurs** et de déterminer la trajectoire pour **optimiser la consommation** de carburant sur un trajet donné.

7 – Mixture

Le réglage de la mixture permet à la fois **d'optimiser les consommations** dans les différentes phases de vols en permettant au pilote de sélectionner directement le bon ratio du mélange air/essence tout en limitant l'encrassage du moteur. En effet, **un encrassage** du moteur détériore les performances de ce dernier.

8 – Débit massique

L'augmentation du D_m , dans le domaine du civil, a donc permis au cours des dernières années de réduire à la fois **la consommation** (cf. *turboréacteur double flux*) **et l'empreinte sonore** des turboréacteurs.

9 – Influence d'un fort taux de dilution

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">• Flux froid plus lent et à une température d'éjection plus faible = moins de bruit• Consommation carburant plus faible	<ul style="list-style-type: none">• Diamètre de la soufflante plus important = traînée générée plus grande



Les motoristes mènent des recherches sur des moteurs ouverts (Open rotor) afin d'augmenter le taux de dilution tout en limitant la traînée induite. Des tests sur banc d'essai au sol ont déjà été réalisés.

(crédits photo : Safran)

✓ **Sonore** : Sous le FL60, ce type de pollution prédomine. Il s'agit donc d'orienter les trajectoires vers des zones peu peuplées lorsque l'appareil est amené à voler sous ce niveau.

✓ **Atmosphérique** : Au-dessus du FL60, on estime que la nuisance sonore n'est plus prédominante et l'amélioration des trajectoires consiste alors à proposer des trajets plus courts et des descentes « douces » pour une moindre consommation.

La nuit, la priorité est donnée à la pollution sonore : les trajectoires sont adaptées afin de réduire au maximum les nuisances sonores, même si cela implique de rallonger les trajectoires.

Vous trouverez davantage de détails en annexe ici. [2 - Trajectoires VFR](#)

4 – Eco-pilotage

Certaines entreprises se spécialisent dans l'analyse de données permettant d'offrir des solutions aux transporteurs aériens. Ces solutions prennent la forme de recommandations quant au pilotage de l'appareil pour qu'il soit le plus efficace possible en fonction des contraintes opérationnelles du jour.

L'entreprise **OpenAirlines**, par exemple, est spécialisée dans ce domaine.

*En 2019, le programme baptisé **SkyBreathe** de la société OpenAirlines aurait permis d'économiser près de 190 000 t de kérosène. L'entreprise avance, pour les transporteurs, une économie de carburant pouvant aller jusqu'à 5%.*

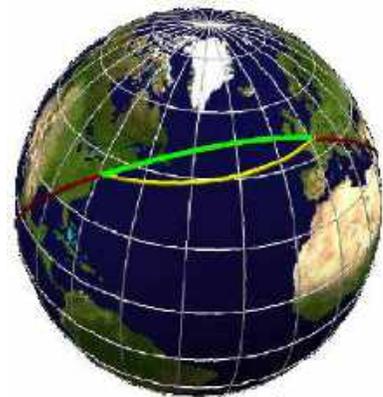
5 – Free route

Grâce aux nouveaux systèmes, il devient possible de s'affranchir des contraintes du contrôle pour voler d'un point A à B sur une orthodromie et même dans un espace aérien chargé. C'est le concept de « **Free route** » qui en cours d'expérimentation en Europe .

L'orthodromie est souvent représentée par une ligne courbe et correspond à la distance la plus courte entre 2 points de la surface de la Terre.

La loxodromie étant la trajectoire coupant chaque méridien sous un même angle, une route orthodromique imposerait un changement de cap régulier pour s'affranchir de la rotondité de la Terre.

(Ci-contre, les routes orthodromique et loxodromique sont représentées respectivement en vert et jaune)



5 – Cartes VAC et nuisances sonores

Sur certains aérodromes, **pour limiter les nuisances sonores** et survols de sites particuliers, les **circuits de piste** peuvent être **imposés** et des zones dont le survol est à éviter sont mentionnées.

Vous trouverez davantage de détails en annexe ici. Image en annexe.2.1 - Cartes VAC : [Trajectoires de tours de piste](#)

6 – Aéroports

Les aéroports cherchent également à réduire leur empreinte sur l'environnement. Pour cela, ils disposent de différents moyens : l'électrification des tarmacs, des procédures de réduction de bruit, la production d'énergie renouvelable, etc.

Voici quelques chiffres :

- **90%** des aéroports européens ont mis en place des **procédures de réduction du bruit** ;
- **60%** des aéroports européens **produisent de l'énergie renouvelable** sur site ;
- **52%** des aéroports européens utilisent des **véhicules électriques** pour leurs opérations ;
- **82%** des aéroports européens proposent des **GPU** (Ground Power Unit) afin d'éviter aux avions d'utiliser leur APU (Auxiliary Power Unit) au sol.

Un programme d'accréditation des aéroports a été mis en place en Europe. Il s'agit du programme **Airport Carbon Accreditation (ACA)**. Il concerne :

- ✓ **133 aéroports européens (65% des passagers en Europe).**
- ✓ Réduction de l'empreinte carbone des passagers.
- ✓ **1,5 kg de CO2/passager** au cours des 3 dernières années.

En France, les aéroports Nice Côte d'Azur et de Lyon Saint-Exupéry ont atteint la neutralité carbone respectivement en 2016 et 2017 !

7 – Navigation par satellite

En plus des moyens dits « conventionnels », **la navigation par satellite** est de plus en plus utilisée en aviation.

Avantages côté bord :

⇒ **Aviation légère** : de petits modules GPS et des applications mobiles permettent de suivre une route définie, de se positionner en l'air et dans certains cas, de réaliser des approches IFR. Ces nouvelles technologies permettent d'**optimiser les trajets de navigation en rendant les routes plus directes**, et contribuent ainsi à la maîtrise de la consommation de carburant.

⇒ **Aviation commerciale** :

Navigation à la fois plus précise et plus indépendante des moyens disposés au sol.

Les trajectoires **sont plus optimisées** (plus directes – et donc plus efficaces), **plus sûres** et **plus respectueuses** de l'environnement et des riverains.

A **Roissy CDG**, de nombreux travaux utilisant ces nouveaux modes de navigation sont en cours.

Avantages côté sol :

L'utilisation des satellites permet de s'affranchir de certains moyens de radionavigation conventionnels au sol. Ceci **réduit donc les coûts de maintenance, de certification** et aujourd'hui, de nombreuses balises sont, petit à petit, démontées.

Vous trouverez davantage de détails en annexe ici. [3.1 - Au départ](#)

8 – Préparation d'un vol

Intégration de facteurs environnementaux dans la planification d'un vol :

Lors de la planification d'un vol, plusieurs contraintes liées aux nuisances sont à considérer : **des procédures particulières** existent à certains aéroports ou pour certaines zones naturelles protégées (parcours spécifiques, altitudes minimales à respecter, etc.). Des **standards environnementaux** sont également à respecter aux aéroports et des sanctions peuvent être prononcées en cas de non-respect de celles-ci.

La planification de vols commerciaux inclut également la recherche de **la réduction de la consommation de carburant**.

Départ et arrivée : Procédures NADP: Limite des nuisances sonores pour le voisinage au décollage.

- **Départ/arrivée spécifique:** Trajectoires spécifiques après décollage et en approche (évitement des zones résidentielles, etc.), règles nocturnes, trajectoires VPE, procédures PBN to ILS, etc.

En-route : Continuous climb et step climb: altitude optimale pour l'optimisation de la consommation de carburant

- **Free routes:** trajectoires plus courtes pour limiter la consommation de carburant
- **Zones naturelles/résidentielles:** évitement des zones sensibles au bruit (altitudes spécifiques, zones de non-survol, etc.)
- **Électrification des véhicules aéroportuaires:** utilisation des push backs électriques voire même autonomes, des véhicules neutres en émissions...
- **Remplacement des APU par GPU:** Supprimer les APU dans les avions de façon à réduire leur poids. Les moteurs pourront démarrer avec un Ground Power Unit (GPU) situé sur les aéroports.
- **Vol en formation:** Imiter les oiseaux migrateurs en volant en formation rapprochée. L'idée est de réduire les traînées pour les avions suiveurs. Imiter le naturel c'est le biomimétisme.

Vous trouverez davantage de détails en annexe ici. [3 - Evolution des procédures IFR](#)

V - Histoire et culture de l'aéronautique et du spatial

21 octobre 1973 : Premier vol du premier avion intégralement électrique Militky MB-E1. (cf image)



1979 : Premières évaluations en vol des winglets inventées par Richard Whitcomb en 1976 (USA).

29 avril 1979 : Premier vol d'un avion solaire, le Mauro Solar Riser (USA).

1983 - création de la CAEP par l'OACI : (Committee on Aviation Environmental Protection) Constitué de nombreux experts, le comité s'occupe des aspects techniques et opérationnels liant aviation et environnement (en particulier la réduction d'émissions et de bruit). Il se réunit tous les trois ans, analyse les propositions et à l'issue sont inscrites dans la convention de Chicago.

2008 : Le transport aérien international s'est engagé, via ATAG (Air Transport Action Group) à réduire massivement son empreinte carbone. Cet engagement a conduit l'OACI, l'agence de l'ONU pour l'aviation civile, à définir à son tour des objectifs dans ce sens.

Avril 2008 : Boeing effectue en Espagne le premier vol d'un prototype d'avion à hydrogène couplant une batterie lithium-ion et une pile à combustible. L'appareil utilisé est un planeur biplace à moteur de type Diamond Dimona modifié par Boeing Research & Technology Europe.

14 juin 2011 : Dans le cadre du projet d'avion solaire, André Borschberg relie Bruxelles à Paris en 16 heures à bord du Solar Impulse.

10 juillet 2015 : Première traversée de la Manche par l'avion électrique Airbus E-Fan piloté par Didier Esteyne, son concepteur, lors d'un vol de 38 minutes.

2015 : Suite aux Accords de Paris, le Parlement européen alerte que la part des émissions de CO2 de l'aviation internationale pourrait atteindre 22% des émissions mondiales en 2050 si rien n'est fait.

26 juillet 2016 : Dans le cadre du projet d'avion solaire, Solar Impulse 2, piloté à tour de rôle par Bertrand Piccard et André Borschberg, achève son tour du monde à Abou Dabi, 483 jours après en avoir décollé.



Au total, 23 jours de vol ont été nécessaire pour parcourir les 43 041 km grâce à la seule énergie solaire.

(cf image)

6 octobre 2016 : 1er accord mondial visant à réduire l'impact climatique du transport aérien (mené par l'OACI). L'aviation civile internationale devient le premier secteur économique à se doter d'un dispositif mondial, universel de maîtrise de ses émissions de CO2.

6 octobre 2016 : création de CORSIA : (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation). (Effective à partir de 2021 d'abord de manière volontaire puis obligatoire dès 2027). Programme de **compensation carbone** par rapport aux vols excédant leur niveau de 2019 et 2020. Oblige les compagnies aériennes à acheter des crédits générés par des projets bas carbone éligibles. Le but étant de tendre vers une croissance neutre en carbone.

22 juin 2017 : La FFA et la DGAC, à l'occasion du 52e Salon International de l'Aéronautique et de l'Espace, concluent un protocole ouvrant la voie à l'évaluation d'un avion électrique en conditions réelles d'exploitation en aéroclub. L'avion Alpha Electro de Pipistrel sera sélectionné pour conduire cette étude.

2018 : Naissance d'un concept sociologique en Suède : le "Flygskam" (honte de prendre l'avion). Notion qui traduit un sentiment de culpabilité à prendre l'avion en ayant connaissance de ses répercussions environnementales et la dénonciation/accusation d'un mode de vie ou "l'avion est roi". Concept très utilisé par de nombreuses organisations écologiques. Il se répand aujourd'hui dans de nombreux pays du monde.

Septembre 2020 : Airbus présente son concept "ZEROe" qui vise l'entrée en service d'un avion neutre en carbone en 2035. (cf image)



24 septembre 2020 : La société ZeroAvia effectue le premier vol d'un avion commercial propulsé à l'hydrogène (un Piper M-class modifié pouvant accueillir 6 occupants).

Février 2021: Lancement du projet ALBATROSS une initiative à grande échelle des principaux groupes d'acteurs européens de l'aviation dirigée par Airbus. Il vise à démontrer, à travers une série de « vols de démonstration porte-à-porte » à travers l'Europe, la faisabilité de la mise en œuvre des vols « les plus économes en énergie à court terme, en combinant plusieurs innovations techniques et opérationnelles de R&D ».

28 octobre 2021 : Premier vol d'un avion commercial effectué avec 100% de carburant durable (SAF) par un Airbus A319neo équipé de moteurs CFM Leap-1A.

9 novembre 2021 : Premier vol d'essai transatlantique entre Toulouse et Montréal de deux A350 (respectivement -900 et -1000) concrétisant le projet *fello'fly* mené par Airbus dont l'objectif est de faire diminuer la consommation d'avions en vol grâce au vol en formation. Ce projet s'inspire du vol des oiseaux migrateurs (tels que les oies notamment). (cf. illustration)



22 février 2022 : annonce par Airbus et CFM International de la création d'un banc d'essai volant pour la propulsion à l'hydrogène sur un Airbus A380 modifié dont le premier vol est prévu pour fin 2026.

LES ANNEXES

I - Météorologie et aérologie

1 - La pollution atmosphérique

Lors du vol, de nombreux composants sont rejetés :

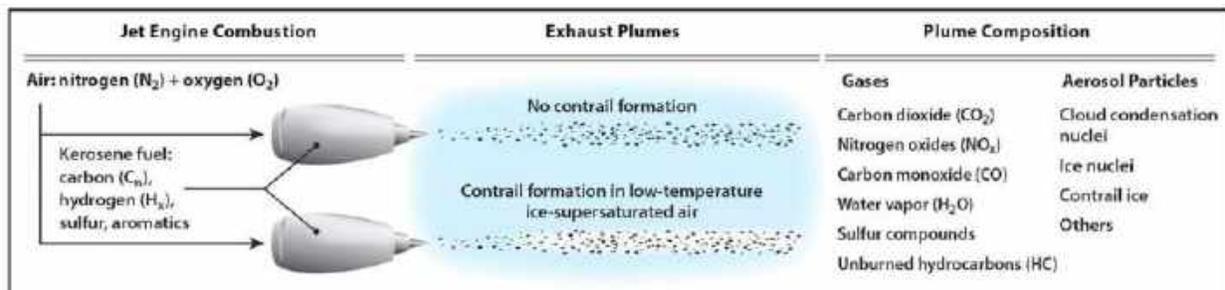
Nous allons lister les composants émis et aborderons la notion de **forçage radiatif**.



Les motoristes ne cessent de réduire la consommation des moteurs :

Entre 1968 et 2014, la consommation moyenne a chuté de 45%, soit une **réduction annuelle de 1.3%**

Moins de carburant = moins de GES (Gaz à effet de serre) et polluants rejetés pour autant de passagers transportés !



Méthane (CH₄) : GES très puissant (72 fois le pouvoir radiatif du CO₂ sur 20 ans, 25 fois 100 ans).

Oxydes d'azote (No_x) : Réagissent avec d'autres gaz: éliminent du méthane (CH₄), mais produisent de l'Ozone (O₃).

Ozone (O₃) : Contribue à l'effet de serre, malgré sa durée de vie courte. Toxique pour les organismes biologiques.

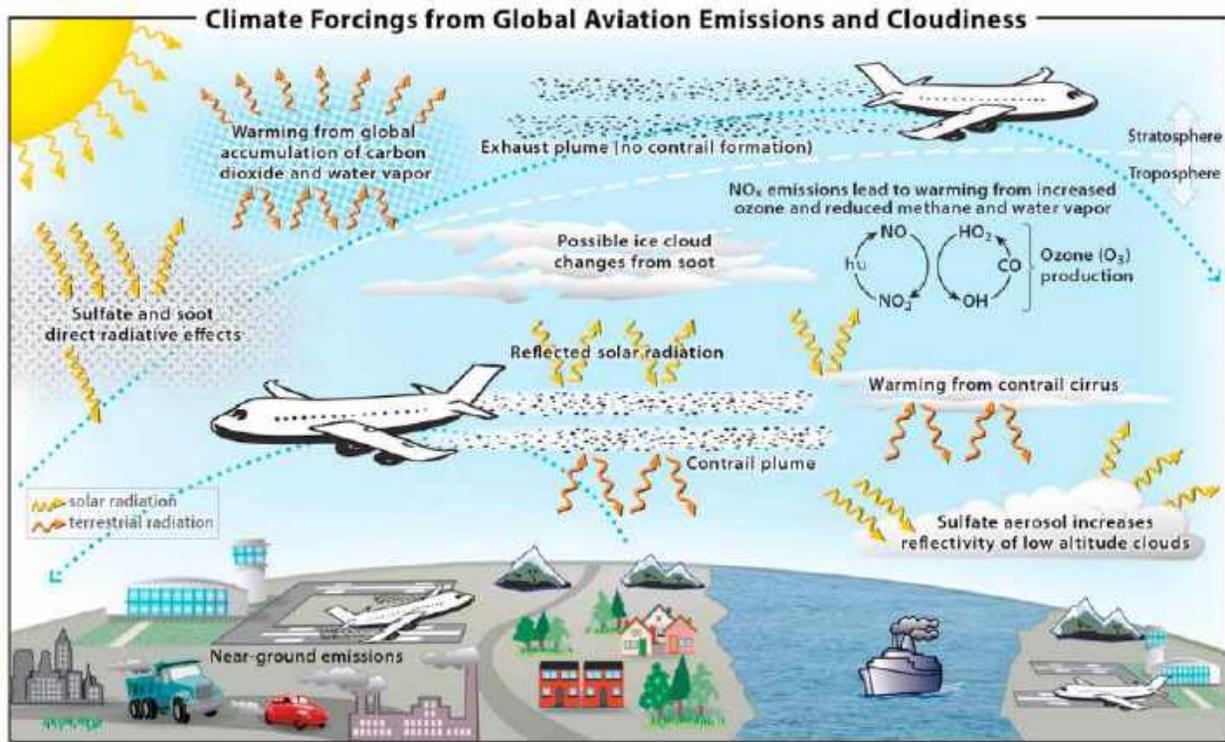
Dioxyde de carbone (CO₂) : GES qui se mélange facilement à l'atmosphère (durée de vie de 100 ans).

Trainées de condensation (cirrus homogenitus) : Vapeur d'eau condensée à haute altitude qui accroît l'effet de serre (persistante à -40°C)

Aérosols et suie : Émis en petites quantités lors de la combustion incomplète du kérosène. Amplifient l'effet de serre.

Particules fines : ex: PM2.5 (particules au diamètre inférieur à 2.5µm) issues de la combustion. A l'origine de cancers, problèmes pulmonaires et cardiaques, etc.

Vapeur d'eau : Malgré sa courte durée de vie avant son évacuation, elle contribue faiblement à l'effet de serre.



Pour caractériser l'impact de diverses émissions, on utilise la notion de **forçage radiatif**.

Les composés rejetés (par un avion dans notre cas) **ne contribuent pas tous à l'effet de serre**:

- Si le forçage radiatif **est positif (en rouge)**, l'émission en question a un pouvoir **réchauffant**
- Si le forçage radiatif **est négatif (en bleu)**, l'émission en question a un pouvoir **refroidissant**

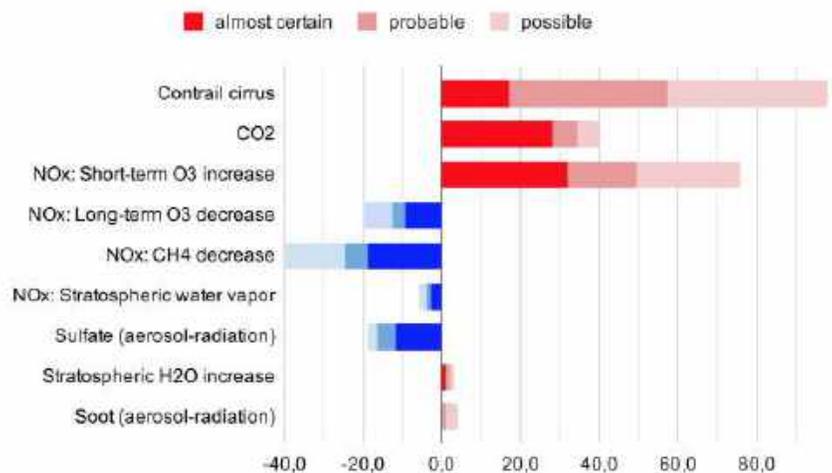
Afin de dresser un **bilan global** il faut donc inclure **tous les types d'émissions et leur impact respectif**.

Le bilan de l'exploitation aéronautique est **négatif**: elle contribue aux changements climatiques.

Son forçage radiatif a été estimé entre **3,4 et 4% du forçage radiatif global** pour 2011.

La proportion plus importante du forçage radiatif comparée à la part des **émissions de GES** (1,9% à 2,4%) s'explique par **leurs impacts plus importants en haute altitude** où les appareils opèrent.

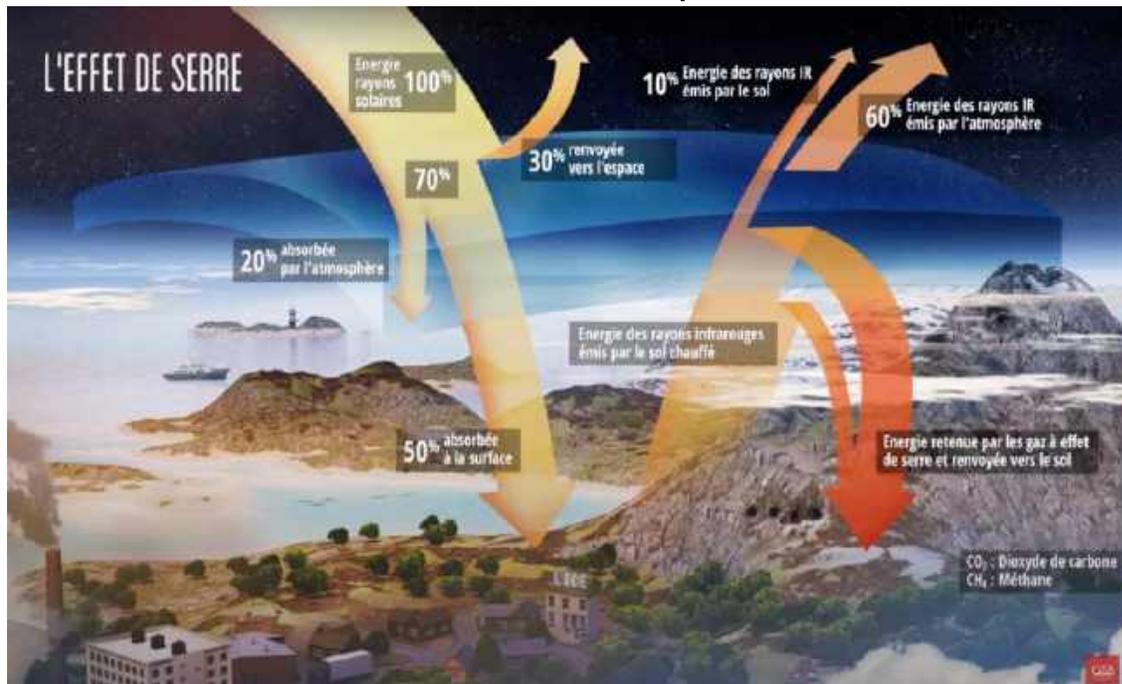
Effective Radiative Forcing components, 2018 (mW/m²)



2 - L'effet de serre

2.1 - Explications détaillées

Définition : Un phénomène **d'origine naturelle** qui permet une température habitable à la surface de la Terre, mais qui **amplifié par les émissions de gaz à effet de serre** provenant des activités humaines, entraîne le **réchauffement de la planète**.



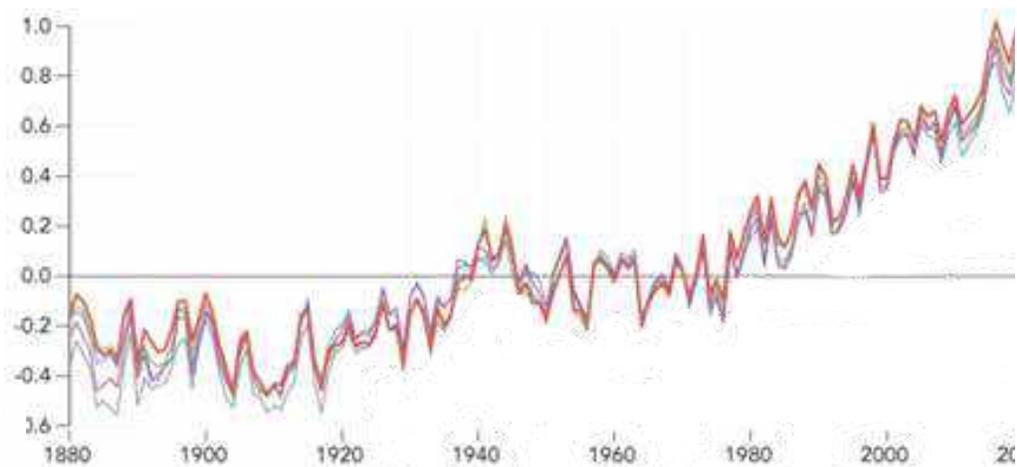
2.2 - Evolution des émissions de GES

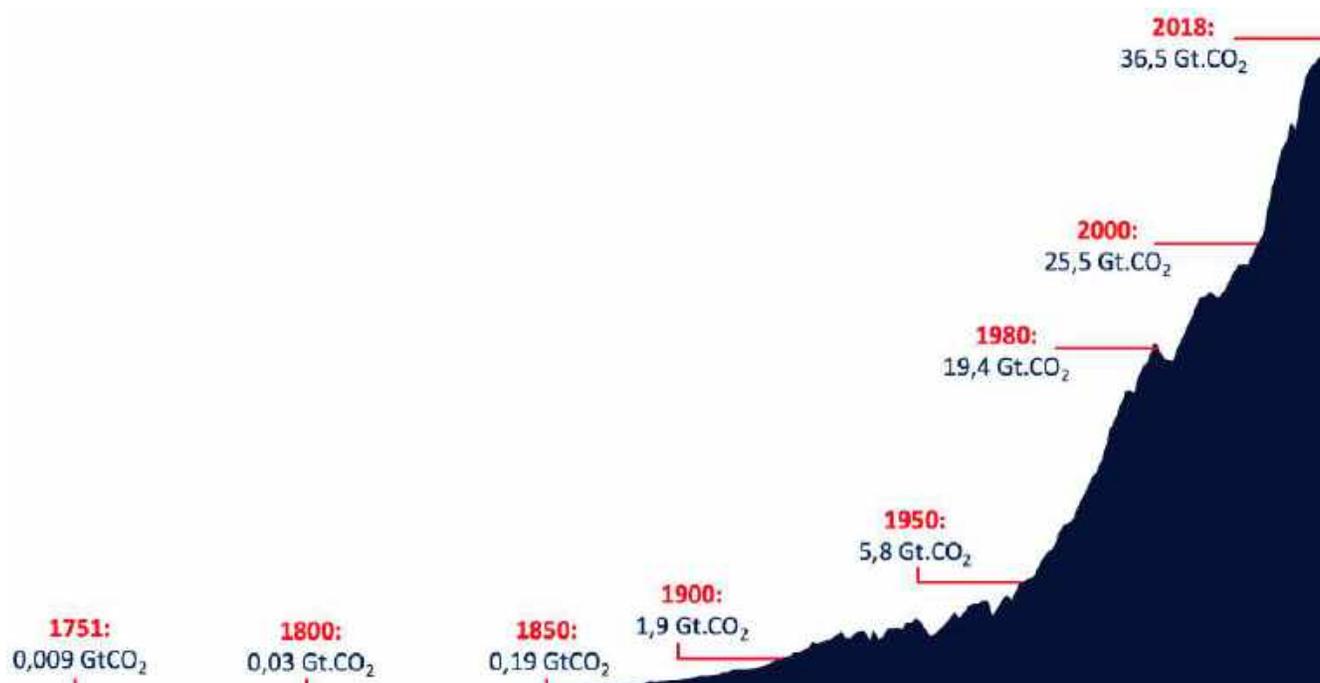
- **97% des scientifiques** du climat s'accordent aujourd'hui sur le fait que les émissions de gaz à effet de serre issues des activités humaines sont à **l'origine des changements climatiques actuels**.
- Depuis la révolution industrielle, les **émissions de gaz à effet de serre annuelles ne cessent d'augmenter drastiquement**.

Anomalie de température globale
(relative à 1951-1980, °C)

Source: NASA Earth Observatory

1880





2.3 - Effets des GES au quotidien

- **Hausse de la température globale** (climats arides, crues, canicules et sécheresses plus fréquentes)
- **Phénomènes météorologiques extrêmes plus fréquents** (tempêtes, cyclones, etc.),
- **Fonte des glaces et montée des eaux** des océans
- **Dégel du permafrost** et du CO₂ qu'il contient
- **Réchauffement et acidification des océans**
- **Destruction de la biodiversité** et disparition d'espèces
- **Problèmes sanitaires** liés à la pollution de l'air, de l'eau et des sols

Réduction des émissions de GES

=

Agir contre un dérèglement **permanent** du climat

2.4 - Contribution de l'aérien aux émissions de GES

Les **activités aériennes** génèrent des gaz à effet de serre, en grande majorité issues de la combustion du carburant par les appareils.

Selon l'IEA, la part du **transport aérien** dans les **émissions globales de gaz à effet de serre** était de :

- **1.9%** en **2016**
- **2.4%** en **2018**

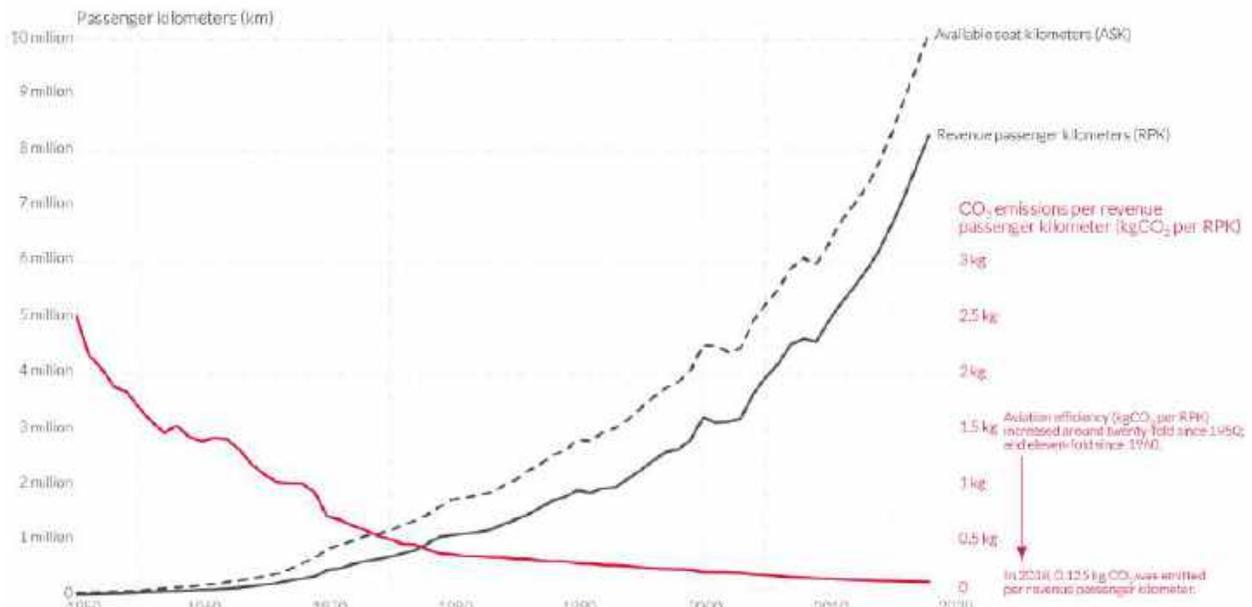


SOURCE: Inspiré de « IEA (2018), CO2 EMISSIONS FROM FUEL COMBUSTION » (www.iea.org/statistics)

Néanmoins, cette part est vouée à évoluer de part la croissance du transport aérien. C'est pourquoi il est absolument essentiel de réduire les émissions du secteur tout comme chaque secteur doit réduire ses émissions. Les acteurs du transport aérien ont débuté ces efforts depuis un certain temps déjà; il est essentiel que ces efforts se poursuivent.

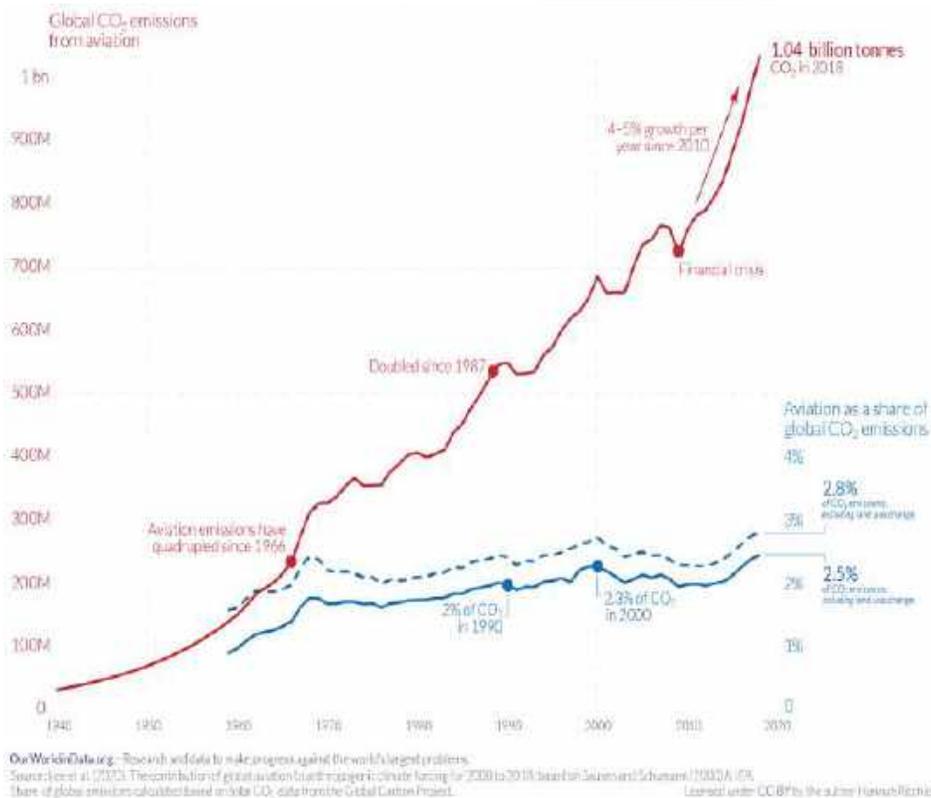
2.5 - Evolution de l'efficacité du transport aérien

Grâce aux nouvelles technologies et à l'optimisation des opérations, l'efficacité de l'aéronautique **augmente considérablement**, permettant de **transporter plus de passagers**, de **générer plus de revenus** et de **réduire les émissions de CO₂ par passager-km**.



OurWorldInData.org – Research and data to make progress against the world's biggest problems.
 Source: Lee et al. (2020). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018, based on Geiselin and Schumann (2000) & CA.
 Aviation efficiency calculated based on global aircraft traffic data from the International Civil Aviation Organization (ICAO) data on file.org.
 Licensed under CC-BY by the author Hannah Ritchie.

Le *Revenue Passenger Kilometers (RPK)* représente le nombre de clients multiplié par la distance parcourue, tandis que le *Available Seat Kilometers (ASK)* mesure le total de sièges disponibles. Le ratio entre RPK et ASK représente le taux de remplissage.



OurWorldInData.org – Research and data to make progress against the world's biggest problems.
 Source: Lee et al. (2023). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018, based on Geiselin and Schumann (2000) & CA.
 Share of global emissions calculated based on global CO2 data from the Global Carbon Project.
 Licensed under CC-BY by the author Hannah Ritchie.

Volume des émissions globales de CO₂ liées à l'aviation
 L'augmentation annuelle du nombre de passagers est **plus forte que les gains en efficacité**
 Malgré des progrès importants en matière de réduction d'émissions de CO₂, on constate :
une augmentation globale des émissions de CO₂ liées à l'aérien.

Part de l'aérien dans les émissions globales de CO₂

Faible évolution de la part de l'aérien qui a **augmenté de 0,2% en 20 ans.**

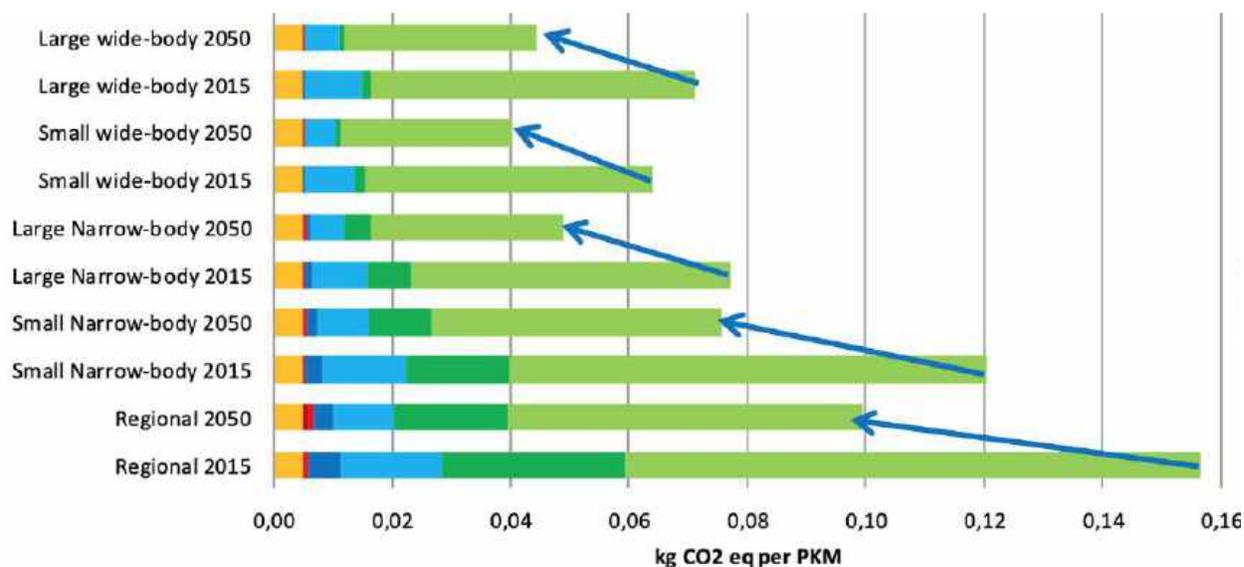
2.6 - Evolution de l'aérien

Impact de l'exploitation :

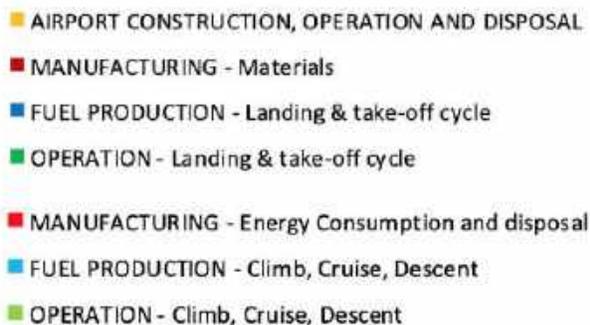
L'exploitation aérienne est une chaîne logistique complexe incluant de **multiples acteurs** (manufacture, vol, entretiens, exploitation aéroportuaire, soutien aux opérations, etc.) pour assurer le succès d'un vol.

En matière de GES, les émissions en vol **constituent 80 à 85% de l'impact total de l'industrie.**

Grâce aux **avancées technologiques**, l'impact du vol devrait diminuer fortement avec le temps :



Potentiel de réchauffement climatique par type d'avion (2015 et 2050)¹.



3 - Les contrails

3.1 - Origine

Les **contrails** sont ces longs nuages se formant au passage d'un avion. Les particules rejetées par les moteurs sont à l'origine de l'apparition de ces nuages.

Ces **traînés de condensation** se forment comme des nuages : **dans certaines conditions de température et d'humidité de l'air**, l'eau s'agglutine autour de ces particules et se transforme en cristaux de glace formant alors ces « nuages ».

Les particules rejetées par les moteurs d'avion constituent donc des particules "support".

3.2 - Conditions de formation

Vous avez dû le remarquer, certaines traînés perdurent des jours entiers et s'étalent sur de très longues distances, d'autres sont beaucoup plus courtes et ne restent que quelques heures. Pourquoi ?

Ces contrails ne se forment que dans des conditions très précises :

- un air sursaturé en humidité ;
- des températures très froides (inférieures à -30°C).

Les traînés de condensation apparaissent ainsi en haute altitude, de 23 000 à 40 000 ft (pieds), à une altitude précise en fonction des conditions décrites ci-dessus.

Lorsque les **températures sont en-dessous de -40°C**, les contrails peuvent **devenir persistantes** et peuvent même s'étendre et se transformer en voiles de cirrus qui peuvent perdurer pendant plusieurs heures voire même plusieurs jours.

3.3 - Impact sur le réchauffement climatique

On considère aujourd'hui que les contrails ont un **impact non négligeable** sur le réchauffement climatique : **ces nuages augmentent l'effet de serre en emprisonnant les rayonnements solaires dans l'atmosphère.**

Il est envisageable de limiter l'impact climatique de ces nuages puisqu'ils ne se forment que dans des conditions très particulières.

Ainsi, seul **2% des vols** seraient responsables **de 80% du réchauffement** dû aux contrails. Par conséquent, **de légers changements d'altitudes pourraient permettre d'éviter leur formation.**

Des chercheurs ont calculé en 2020 qu'en **modifiant la trajectoire de 1,7% des vols**, on pouvait **réduire l'effet réchauffant** des contrails de **59,3%**.

Le centre de contrôle aérien de Maastricht a ainsi lancé en avril 2020 un projet ayant pour objectif d'altérer les trajectoires afin de limiter la création de contrails.

L'effet des contrails sur le réchauffement est encore mal connu.

On connaît mal les interactions entre des aérosols comme les suies ou les sulfates (particules rejetées par les moteurs d'avion) et les nuages.

Ces particules rendraient les nuages plus réfléchissants ce qui empêcherait une partie des rayons solaires de venir réchauffer la Terre, ayant ainsi potentiellement un effet positif sur le réchauffement climatique.

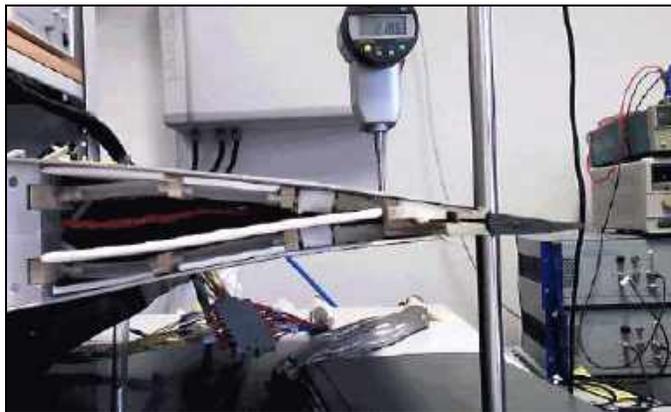
NOTE : Ces effets **ne sont pas** pris en compte lorsqu'il est question de l'impact de l'aviation sur le climat car les études sont encore trop faibles **mais les premières estimations sont extrêmement prometteuses !**

II - Aérodynamique, aérostatique et principes du vol

1 - Les ailes bio-inspirées

Les ailes « bio-inspirées » sont capables de se déformer et de vibrer à des fréquences optimales afin de **modifier les turbulences qu'elles génèrent** et d'accroître ainsi les performances aérodynamiques en temps réel en vol.

En fonction des turbulences du vent, il est attendu une économie de carburant de l'ordre de **1 à 2%** ainsi qu'une réduction du bruit de l'ordre de **6 à 8%**, notamment lors des phases du décollage et d'atterrissage.



Dans le cadre du projet **AlbatrossONE**, les ingénieurs d'Airbus se sont directement inspirés de la forme de l'aile de l'albatros, un oiseau marin capable de voler plusieurs centaines de kilomètres sans battre des ailes.

Ils ont en particulier étudié la façon dont cet oiseau était capable de **limiter au maximum les effets des turbulences et des rafales**. Ce nouveau type d'aile devrait permettre de diminuer les efforts

transmis au fuselage ainsi que de réduire la traînée induite qui se traduira par **une baisse de consommation**.

Un modèle réduit avec des extrémités d'ailes libres et battantes a volé en juillet 2020. A terme, s'il est validé, ce système pourrait être installé sur les avions de la gamme A320.

Source : airbus.com/newsroom/stories/freely-flapping-wing-tips-took-a-leap-forward.html

2 - Winglets

Les winglets, terme générique pour les dispositifs de bout d'aile, ont été mis au point dans le centre de recherche de la NASA à Langley (États-Unis) en 1974 par l'aérodynamicien américain Richard Whitcomb.

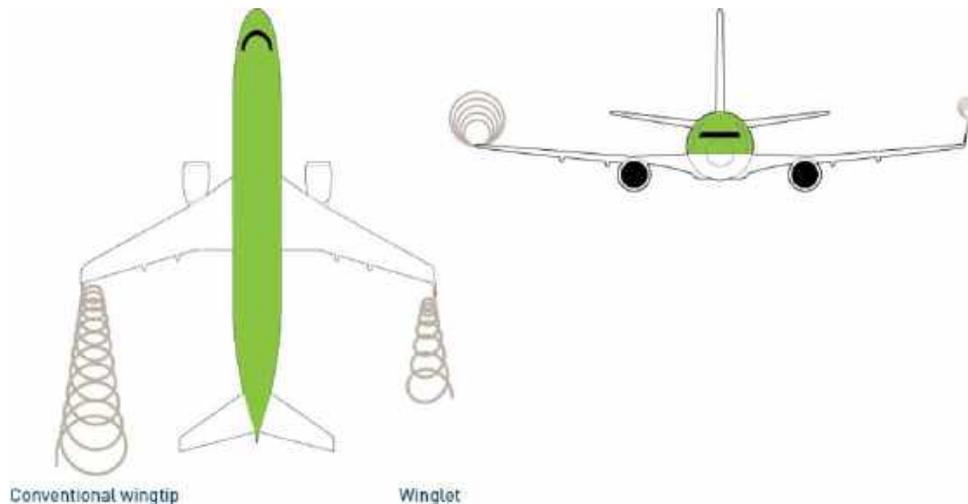
« **Sharklets** » est le mot déposé sous forme de brevet européen par **Airbus** pour caractériser ces dispositifs de bout d'aile équipant certains A320.

2.1 - Principe du winglet

L'ajout d'un winglet permet de réduire l'intensité du tourbillon de bout d'aile en réduisant le gradient de pression entre extrados et intrados .

En effet, il agit à la fois comme une **barrière physique** à ce flux d'air et permet, sans augmenter l'envergure, **d'augmenter l'allongement de l'aile**.

Pour rappel, la traînée induite diminue lorsque l'allongement (λ) augmente.



$$C_i \text{ (traînée induite)} = \frac{C_z^2}{\lambda * k}$$

2.2 - Intérêts du winglet (étude de cas avec les winglets du Boeing 737)

CARACTÉRISTIQUES :

- ✓ 2,4m de haut
- ✓ +100kg/winglet

EN CROISIÈRE :

- Réduction **de 4%** la puissance moteur nécessaire:
 - ✓ Jusqu'à **6%** de carburant en moins
 - ✓ Jusqu'à **5%** de NOx en moins

EN MONTÉE :

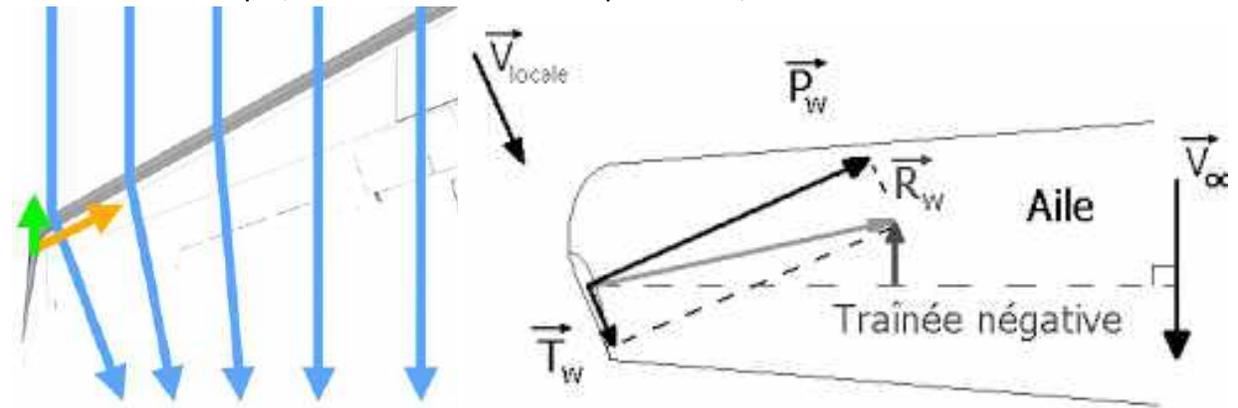
- ✓ routes plus directes (car au-dessus des autres appareils, trafic aérien fluidifié)
- ✓ réduction de consommation, inversement liée à l'altitude du vol.

AU DÉCOLLAGE :

- ✓ Augmentation de la pente de montée et réduction de l'empreinte sonore lors du décollage
- ✓ Réduction de la poussée nécessaire de l'ordre de **3%** :
 - Gain de carburant
 - Maintenance moins récurrente, durée de vie des moteurs plus longue
 - Réduction du bruit de l'ordre de **6,5%**

2.3 - La traînée des winglets

A première vue nous pouvons penser que l'ajout des winglets crée de la traînée supplémentaire et **c'est vrai !** Puisque, comme toute surface « portante », de la traînée est créée.



V_{locale}

Néanmoins, les constructeurs ont disposé ces winglets en leur donnant **une légère orientation**. La **résultante aérodynamique** des winglets est légèrement orientée vers l'avant, la **traînée** totale créée est donc **négative**.

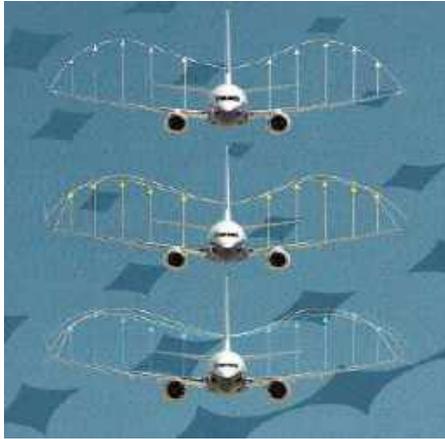
Conclusion : la traînée des winglets est « **autocompensée** » par ceux-ci et ils contribuent même à générer une force vers l'avant, dans le sens d'avancement de l'avion.

2.4 - Winglets de dernière génération

Boeing 737 :

Sur certains 737 de dernière génération et sur les 737Max, un nouveau winglet, appelé Winglet AT (Advanced Technology) a été installé avec comme particularité, l'ajout d'une surface vers le bas.

Boeing annonce **un gain de carburant** de l'ordre de **1,5%** expliqué par une meilleure distribution de la portance sur l'aile.



Airbus A350 :

L'Airbus A350 est équipé de sharklets. Cette forme, caractéristique de l'appareil, est permise grâce à l'utilisation des matériaux composites. Le sharklet d'environ **5m de haut** permet d'augmenter considérablement l'allongement de l'aile sans trop modifier pour autant l'envergure de l'appareil.



Boeing 787 :

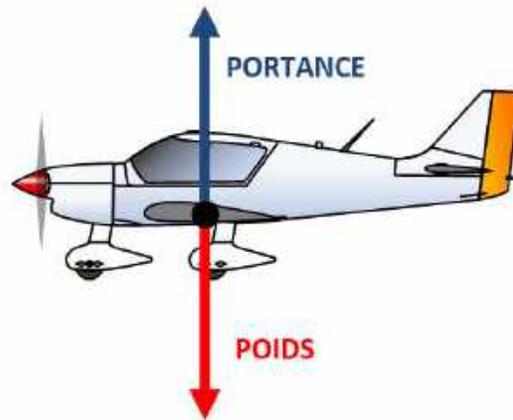
Contrairement à l'A350, le Boeing 787 n'est pas doté de winglets, en tous cas pas visuellement. Il s'agit en fait d'une extrémité d'aile qui s'en rapproche est qui est appelée « **ranked wing tip device** ». La flexibilité des ailes de cet appareil ajoutée à ces extrémités d'aile particulières, grâce aux matériaux composites, agissent de la même manière qu'un winglet « visible ».



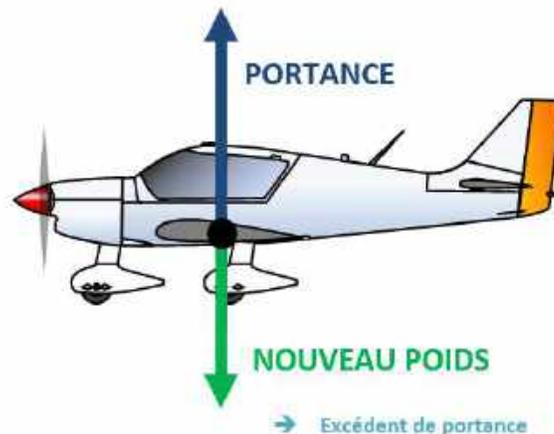
Source : <http://www.b737.org.uk/winglets.htm>

3 - Cruise climb

L'origine du cruise climb est purement physique. Comme vous avez pu le voir plus tôt dans ce cours, en croisière, la portance de l'avion est égale à son poids.



Mais à mesure que le vol progresse, du carburant est consommé, ce qui entraîne une diminution de la masse de l'avion, et donc de son poids. Afin de respecter les conditions de vol rectiligne, il faut donc que la portance diminue aussi.



Reprenons la formule de la portance, que vous connaissez désormais :

$$R_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot C_z$$

Quels choix s'offrent à nous afin de réduire cette portance ?

Diminuer C_z : cela impliquerait une modification de l'assiette, générant ainsi une trainée parasite supplémentaire qui viendrait augmenter la consommation de carburant : ce n'est pas désirable.

Diminuer V : Les vitesses de croisière sont calculées en fonction de nombreux paramètres : d'une part par rapport au domaine de vol de l'avion et à la plage réduite de vitesses utilisables et d'autre part par rapport au Cost Index. Défini par la compagnie aérienne, le Cost Index permet de trouver le bon équilibre entre temps de vol et consommation.

Diminuer S : c'est impossible, S correspond à la surface alaire, qui est une constante lors de la croisière.

Diminuer ρ : **c'est effectivement la meilleure solution**. Diminuer ρ revient à évoluer dans un air moins dense, c'est-à-dire plus haut.

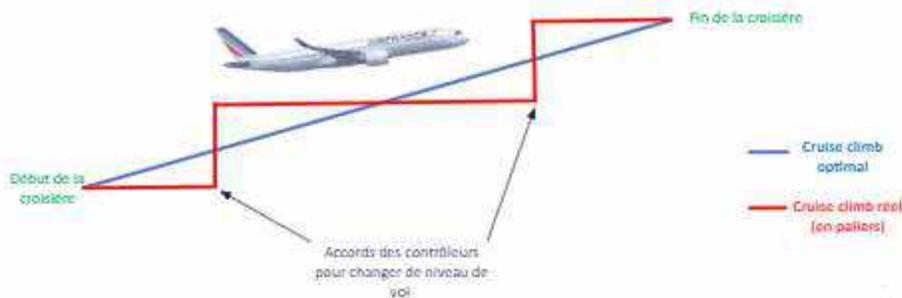
Ainsi, en augmentant progressivement son altitude à mesure que du carburant est consommé, le pilote maintient les conditions d'une croisière optimale, s'assurant ainsi une consommation de carburant optimisée.

C'est ce qu'on appelle la croise climb.

Concrètement, le croise climb dans un avion de ligne, comment ça marche ?

La solution optimale serait de **monter continuellement** pendant la croisière, mais ce n'est pas possible : les avions de ligne évoluent dans des espaces aériens bien définis, et les pilotes ne peuvent pas en permanence changer de niveau de vol à leur guise.

En pratique, c'est donc une **montée par paliers** qui s'effectue, en obtenant à chaque fois l'accord des centres de contrôle aérien :



Plus le nombre de paliers est important, plus la trajectoire de l'avion se rapprochera du croise climb "optimal" et **plus les économies de carburant seront importantes**. Il existe deux cas de figure :

- **Au-dessus des espaces continentaux**, la fréquence de changement de palier est assez faible, à cause du trafic aérien important. En général, l'avion monte de **1000 ft toutes les heures**.
- **Au-dessus des espaces océaniques** en revanche, là où le trafic est plus faible, cette fréquence est nettement plus élevée. L'avion peut alors monter de **100 ft toutes les 6 minutes** :



Sur un vol transocéanique, l'application du cruise climb permet d'économiser **plus de 200 kg de carburant !**

4 - Influence du centrage

En réalité, le **poids** et la **portance** ne s'exercent pas exactement au même endroit. L'application du poids se fait au centre de gravité (CG) et cela dépend du poids et de la répartition du chargement dans l'appareil : c'est ce qu'on appelle le **centrage**.

Le bras de levier existant génère alors une rotation de l'appareil autour de son axe de tangage, ici une rotation à piquer.

L'annulation de cette rotation est opérée grâce à la gouverne de profondeur. Cette surface agit comme une aile, et génère de la portance ET de la traînée selon les formules abordées. Néanmoins, pour équilibrer les forces sur l'axe longitudinal, celle-ci crée de la portance dirigée vers le bas : de la déportance.

Comment minimiser l'impact de cette déportance ?

Déplacement du CG vers l'avant :

Dans l'exemple suivant, nous avons **modifié la répartition des charges à bord** de l'appareil sans en changer le poids final. Par exemple, un conteneur a été déplacé de la soute arrière à la soute avant.

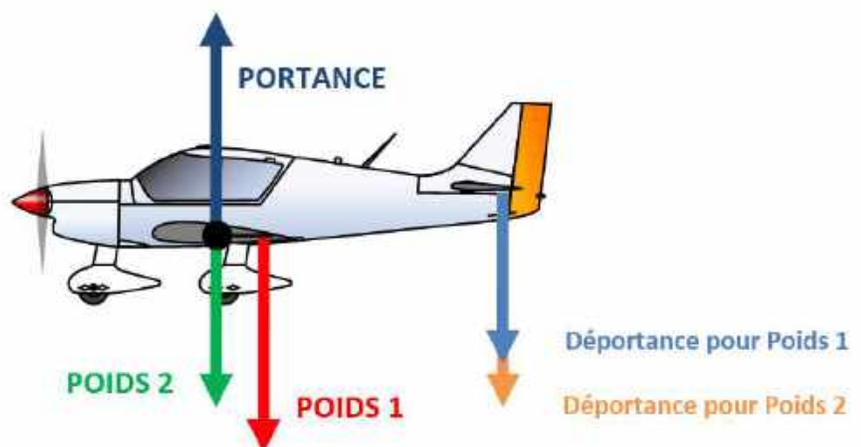
Le centre de gravité est avancé, on dit que le centrage est avant.

Déplacer le CG vers l'avant nécessite de produire une force de déportance plus grande entraînant alors une plus grande traînée.

Cette composante supplémentaire implique une **surconsommation** puisqu'une traction plus grande est nécessaire pour équilibrer la traînée totale.

En opération, le chargement est optimisé pour avoir un **centrage le plus arrière possible** et **réduire** ainsi la **consommation**.

Néanmoins, pour rester dans la plage de centrage de l'appareil et assurer la stabilité et la maniabilité de l'appareil, et donc la sécurité, il n'est pas possible d'annuler complètement cette déportance.

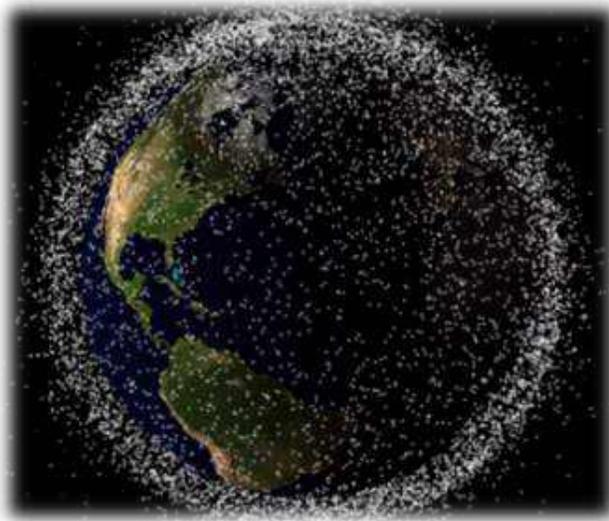


III - Etude des aéronefs et des engins spatiaux

1 - Les problématiques environnementales en orbite

1.1 - Introduction

L'exploration spatiale est extrêmement bénéfique pour la science et l'humanité ; elle génère par contre des quantités astronomiques de débris qui orbitent ainsi notre planète et entrent en collision entre eux, et constituent de réels risques **pour l'ISS, les lancements futurs et l'astronomie.**



Chaque année, **des centaines de satellites** sont lancés et par conséquent, depuis le début de la conquête de l'espace en 1957, de nombreux débris se sont accumulés autour de la Terre. Une partie de ces débris, ceux de plus de 5 cm peuvent être suivis depuis la Terre mais ce n'est pas le cas des plus petits qui peuvent causer pourtant d'importants dégâts!

[Note : ceci est une illustration, et non pas une photo réelle de la planète.]

L'ESA (European Space Agency) a répertorié environ **26 000 objets** dans l'espace dont **7%** seulement sont en activité! Et on estime à **500 000** le nombre de débris de moins de 5 cm.

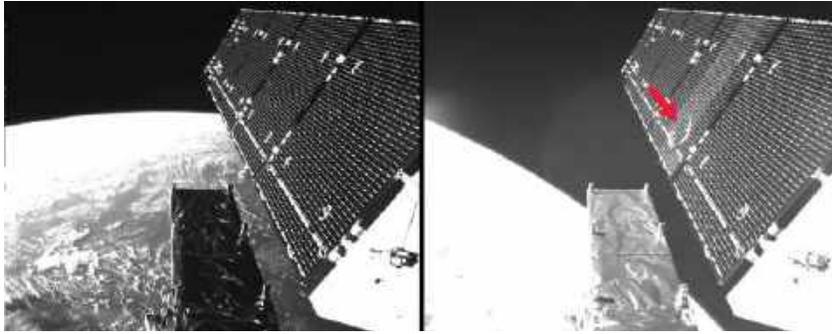
1.2 - Mais d'où proviennent ces débris?

Ces débris ont différentes origines : lors de leur lancement, les engins spatiaux sont protégés par différentes "couches" qu'ils vont perdre lors de différentes étapes ; d'autres débris, en revanche, sont des morceaux de satellites suite à des collisions.

Sur les 20 dernières années, en moyenne plus de **12** collisions de satellites ou explosions d'engins spatiaux ont eu lieu soit **un événement de fragmentation par mois** !

1.3 - Les risques

En août 2016, le satellite Sentinel-1A a été frappé par un minuscule débris: environ **0,2g et 1 cm** de diamètre voire même quelques millimètres seulement... Pourtant, ce petit débris a causé une déformation de près de **40 cm de diamètre** sur l'un des panneaux solaires du satellite.



Entre 1999 et 2018, la station ISS a dû procéder à près de 25 évitements de débris même si les alertes sont bien plus nombreuses et régulières. **En 2020, elle a dû altérer 3 fois sa trajectoire pour éviter un accident!**

1.4 - Des projets pour nettoyer l'espace

Des prototypes d'engins de « nettoyage » sont actuellement en développement, notamment avec **la mission ClearSpace-1** dont le lancement est prévu en 2025 par l'ESA et ClearSpace SA. Cet engin aura pour mission d'attraper Vespa, un des composants pesant près de **112kg** ayant été utilisé pour le lancement de la fusée européenne Vega en 2013. ClearSpace-1 attrapera à l'aide de ses bras tentaculaires Vespa et guidera ensuite les deux engins spatiaux pour se faire désintégrer dans l'atmosphère.

1.5 - De nouvelles technologies pour réutiliser les lanceurs

Les premiers étages des lanceurs développés par SpaceX retournent sur terre quelques minutes après le décollage et sont **réutilisés** pour de **nouveaux lancements, réduisant le coût des missions et les déchets liés aux lancements**. Thomas Pesquet a utilisé un de ces lanceurs sur Crew Dragon lors de sa 2^{ème} mission dans l'espace en printemps 2021 !

Sources :

<https://www.smithsonianmag.com/science-nature/spacex-environmentally-responsible-180968098/>

https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf

<https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv24i1.pdf>

<https://www.nationalgeographic.com/science/space/reference/space-junk/>

https://www.esa.int/Safety_Security/ESA_purchases_world-first_debris_removal_mission_from_start-up

http://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Copernicus_Sentinel-1A_s_atellite_hit_by_space_particle

2 - Bilan des forces - comment réduire la consommation ?

Réduction de la **TRACTION** nécessaire pour transporter un chargement donné (*la charge utile*)

→ Réduction de la consommation → Réduction des émissions de l'appareil

Comment réduire la traction :

1 - Réduction du **POIDS** de l'appareil

→ Réduction de la **PORTANCE** nécessaire pour contrer ce poids

→ Réduction de la **TRAÎNÉE** induite (cf. *Aérodynamique*)

→ Réduction de la **TRACTION** nécessaire

2 - Réduction d'une ou plusieurs composantes de la **TRAÎNÉE** (cf. *Aérodynamique*)

→ Réduction de la **TRACTION** nécessaire

NOTE :

Vous remarquerez que certaines améliorations génèrent un poids supplémentaire pour l'appareil. Dans ces cas, **un équilibre doit être trouvé** pour mesurer la pertinence de l'innovation (ex : Electric taxiing ci-après). Cet équilibre dépend du type d'appareil, de la compagnie, du réseau, de l'environnement aéroportuaire etc. Il faut trouver le bon compromis.

Un système pourra ainsi être vertueux dans un cas et néfaste dans un autre!

3 - Trains d'atterrissage

Les trains d'atterrissages font l'objet de **nombreuses recherches** en ce moment. Les avions de dernières générations (notamment le Boeing 787 et l'Airbus A350) sont équipés des trains d'atterrissage les plus performants.

3.1 - Choix des matériaux et revêtements – Exemple avec l'A350

L'équipementier Safran Landing System a conçu des « atterrisseurs » de nouvelle génération destinés aux A350 et B787.

- **L'utilisation de nouveaux alliages** à base d'acier Inox et de titane permet d'alléger la masse de l'atterrisseur et d'en augmenter la durabilité. Un **gain de masse d'au moins 10 à 15 %** par rapport aux atterrisseurs de la génération d'avions précédente, comme l'A330.
- D'autre part, ces équipements n'auront plus besoin de revêtement en cadmium et en chrome, traditionnellement utilisé pour faire barrage à la corrosion. Ils seront ainsi conformes aux futures normes environnementales de type REACH (règlement européen pour sécuriser la fabrication et l'utilisation des substances chimiques dans l'industrie européenne).

3.2 - Réduction du Bruit – Exemple avec le B787

En moyenne, **30% à 40% du bruit extérieur** des avions long-courriers modernes peut provenir des atterrisseurs qui, avec l'amélioration de l'empreinte acoustique des moteurs, deviennent **l'un des principaux contributeurs au bruit** ambiant dans les phases d'approche et d'atterrissage.

Le train d'atterrissage du Boeing 787 ecoDemonstrator 2020 de dispositif permettant de réduire le bruit. L'objectif est de **réduire l'empreinte acoustique** du train d'atterrissage de **plus de 20%**.



Cliquez ICI ou flashez le code pour accéder aux vidéos du 787 ecoDemonstrator.

Consultez en particulier celle nommée « Safran landing gear noise test »

3.3 - Freins électriques - Exemple avec le B787

Avantages du frein électrique

« Plug and play » (Brancher et utiliser) : l'électricité remplace l'hydraulique, ce qui rend l'installation et la maintenance du frein électrique plus facile.

Des fonctionnalités intelligentes pour faciliter les opérations des compagnies aériennes, l'évaluation de l'usure en temps réel du disque carbone ou encore les informations données au cockpit.

Une technologie plus éco-responsable

- Optimisations de poids qui vont jusqu'à **64 kg pour les Boeing 787-8 et 111 kg pour les Boeing 787-9**.
- Un système 100% sans cadmium, sans chromium, sans béryllium et sans amiante.

3.4 - Electric Taxiing

Concept : intégrer un moteur électrique dans le train d'atterrissage, alimenté par le groupe auxiliaire de puissance (APU), qui évite d'avoir recours au moteur principal pour le roulage sur le tarmac.

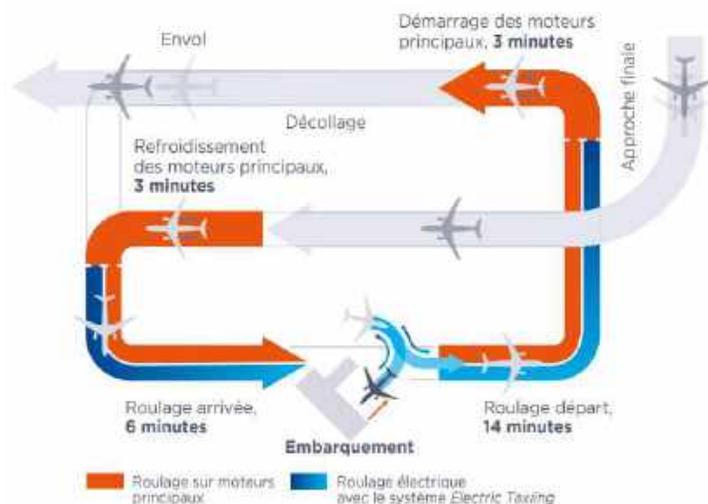
En phase de développement avec Airbus sur le programme A320neo/ceo pour une mise en service des premiers avions équipés à l'horizon 2022.

Chiffres clés : - Système lourd : **+400Kg**,

- Gains espérés : jusqu'à 4% de carburant économisé (*cf. dans le cas cité ci-après*)

Pertinence : Selon une étude menée auprès des compagnies aériennes, cet équipement a du sens dans les aéroports chargés où le temps de roulage peut être long, ainsi que pour les compagnies effectuant de nombreuses navettes quotidiennes.

En optant pour cette technologie innovante, elles pourront réduire leurs coûts opérationnels tout en réduisant leur impact environnemental au sol.



3.5 - Trappes de trains : Exemple avec l'A380

Sur les avions récents, de construction post années 2000, comme ici avec l'A380, les ingénieurs ont développé des trappes de trains qui se referment lorsque le train est sorti. Cela permet de réduire la traînée de l'appareil et de réduire le bruit généré.

En opérationnel et à titre indicatif :

Au décollage, le train est rentré dès que l'avion est établi en montée (et c'est la seule action entreprise par les pilotes sous 400ft sol).

A l'arrivée, le train d'atterrissage est déployé entre 2 et 3 minutes avant l'atterrissage. Sa sortie est retardée le plus possible mais ne peut plus l'être pour des raisons de sécurité.

Phase de rentrée ou sortie de train :



Evolution train sorti (trappes refermées) :



CLIQUEZ ICI ou flashez le QR Code

Vous trouverez une animation 3D de la cinématique du train



Source :

Nouveaux matériaux qui composent les trains d'atterrissage :

<https://www.usinenouvelle.com/article/des-alliages-plus-performants-pour-les-trains-d-atterrissage.N59575>

<https://www.safran-landing-systems.com/fr/roues-et-freins/produits/freins-boeing-787-dreamliner>

Roulage électrique :

<https://www.safran-landing-systems.com/fr/systemes/roulage-electrique>

[dp_safran_bourget_2019_lavenir_electrique_de_laeronautique_par_safran_fr.pdf](#)

4 - La fin de vie : recyclage des aérodynes et de leurs composants

Lorsqu'un avion **arrive en fin de vie** pour des raisons techniques (fatigue, âge, cycles de vol, etc.) ou des raisons économiques (coûts d'opération trop importants comparés à ceux d'un nouvel avion plus récent), il est envoyé dans des entreprises spécialisées qui s'occuperont de les traiter (comme Tarmac Aerosave et Aerocycle par exemple).

Les **composants à forte valeur** (moteurs, avioniques, trains d'atterrissage, etc.) sont **identifiés via leur numéro de série** et sont **recupérés** pour être revendus et ré-employés dans l'aéronautique, tandis que les **matériaux restants sont recyclés** pour d'autres usages ou **jetés lorsque leur récupération est impossible**. Airbus a été un précurseur sur la revalorisation de ces composants via le projet PAMELA, visant à étudier comment récupérer le maximum d'un avion en fin de vie.

« **L'éco-design** » permet de considérer la fin de vie dans la conception de l'appareil initial afin de faciliter le démontage, le recyclage, etc.

Les **hélicoptères légers non-pressurisés**, quant à eux, restent en fonction beaucoup plus longtemps que les avions de ligne pressurisés. Leur **design modulaire** permet de changer régulièrement les composants fautifs ou vétustes pour de nouveaux via le « **retrofit** », ce qui est plus difficile sur des jets.

Réutilisation en aéronautique	Récupération régulée et spécialisée	Récupération des matériaux pour recyclage	Enfouissement
<ul style="list-style-type: none">• Moteurs• Trains d'atterrissage• Avioniques• Équipements des systèmes de bord	<ul style="list-style-type: none">• Fluides• Équipements de sécurité• Pneumatiques• Avioniques	<ul style="list-style-type: none">• Alliages d'aluminium et de titane, métaux et composites• Câbles et harnais• Textiles et tissus	<ul style="list-style-type: none">• Revêtements et garniture• Déchets divers contaminés• Autres

85% de la masse est récupérée ou recyclée

15% est jetée

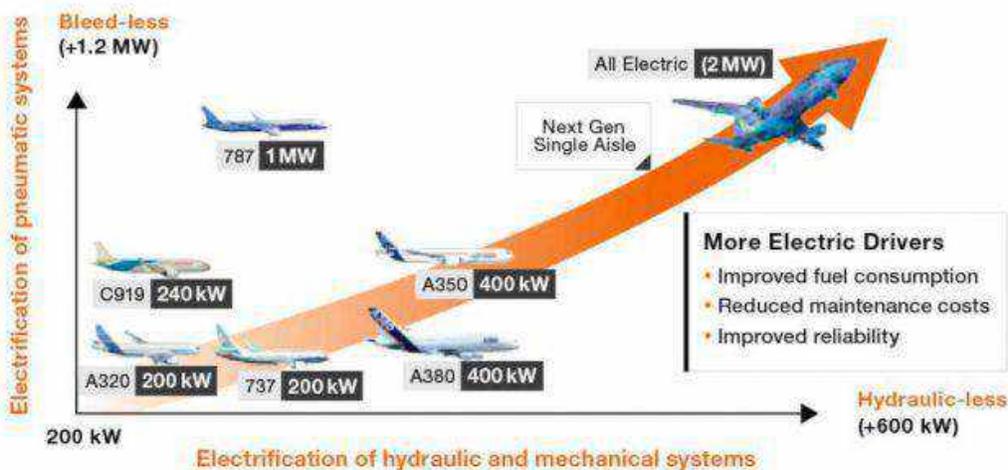
Source : Asmatulu, Eylem, Michael Overcash et Janet Twomey. 2013. « *Recycling of Aircraft: State of the Art in 2011* ». *Journal of Industrial Engineering*, vol. 2013, p. 1-8.

5 - Electrification des aéronefs

5.1 - More Electric Aircraft (MEA)

Le MEA (More Electric Aircraft) est une évolution des avions où les systèmes pneumatiques et hydrauliques sont remplacés par des systèmes électriques plus efficaces et plus légers. Ce gain de masse permet de réduire la consommation.

Le MEA présente des challenges liés aux forts courants et fortes tensions (bruit électromagnétique, gestion thermique...).



5.2 - All Electric Aircraft (AEA) or Electric Powered Aircraft (EPA)

L'AEA (All Electric Aircraft) est un avion entièrement électrique (systèmes et propulsion).

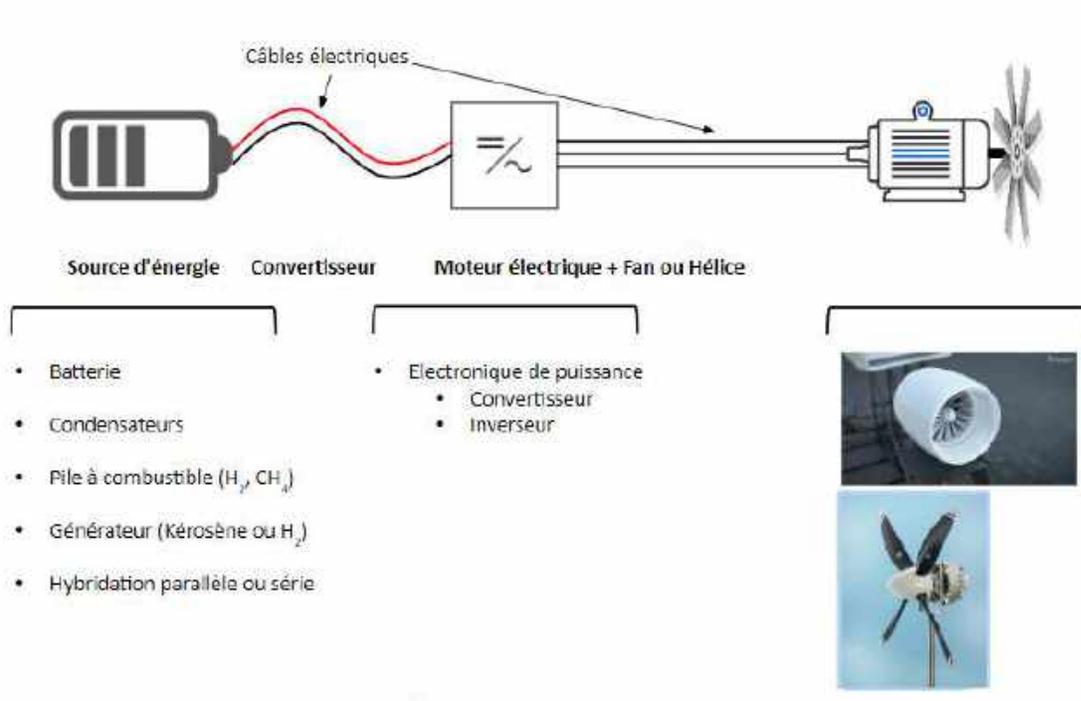
L'AEA reprend les mêmes problématiques que le MEA mais à un autre niveau avec une puissance culminant à plusieurs MW.

CLIQUEZ ICI ou flashez le code.

Vous découvrirez une vidéo montrant les évolutions More Electric Aircraft de l'équipementier SAFRAN



Moteurs électriques - fonctionnement



6 - Moteurs électriques : alimentation par batterie

Les +

- Aucune émission de GES depuis le véhicule ;
- Cycle de vie global souvent bien moins polluant qu'un véhicule thermique lorsque la production électrique est propre (cf détails dans la partie suivante) ;
- Pollution sonore énormément réduite ;
- Pas de transport de carburant dangereux.

Les -

- Batteries lourdes et autonomie réduite, surtout par climat froid : moins d'énergie disponible pour la même masse de carburant (la densité énergétique du kérosène est 60 fois supérieure) ;
- Gain environnemental réduit lorsque l'électricité est produite à partir de sources fossiles ;
- Technologie non-viable pour l'aviation commerciale ;
- Les batteries requièrent des matériaux rares (cobalt, nickel, lithium) dont l'extraction est polluante pour les sols et l'eau ;
- Le recyclage des batteries reste encore mal maîtrisé.

L'avion électrique à batterie est une alternative **écologique** et **silencieuse**. Si la technologie est encore jeune, elle ne cesse de s'améliorer. La preuve : longtemps un rêve inaccessible, c'est à présent **une réalité dans l'aviation légère et même certains vols commerciaux** !

Au début des années 2010, Airbus a développé l'**E-FAN**, un concept **d'avion école entièrement électrique**, propulsé par **2 soufflantes électriques de 1,5 kN** de poussée, et équipé d'une **batterie au lithium polymère (Li-Po)**. L'avion est resté au stade de prototype, n'ayant jamais été commercialisé.



Le **10 Décembre 2019**, le **premier vol électrique commercial de l'histoire** à bord d'un **DHC-2 Beaver ePlane** de la compagnie Harbour Air décollant de l'aéroport de Vancouver au Canada. est équipé d'un **moteur électrique magni 500** de la compagnie **magniX** capable de développer **750 chevaux**, contre 450 chevaux avec le moteur ordinaire du Beaver (turbine PT6 de Pratt & Whitney).

Le **28 Mai 2020**, le **Cessna Caravan 208B** modifié de **AeroTEC** et **magniX** a effectué un vol complètement électrique de 30 min, **l'avion électrique le plus lourd à s'être envolé à ce jour**. Le coût du vol a été estimé à **6\$ US**, alors que le même vol dans sa version thermique aurait coûté **environ 300 ou 400\$** !



Après l'Alpha Electro qui était la première version d'un avion électrique "ULM", le **Vélis Electro de Pipistrel** est depuis 2020 le **premier aéronef totalement électrique certifié** en Europe par l'EASA. Il est désormais produit en série. C'est un biplace disposant d'un moteur de 60 kW maximum lui permettant d'avoir 1h d'autonomie et 30' de réserve. Son moteur pèse 11 kg et ses batteries 126 kg. Le prix de l'électricité pour 1 heure de vol n'est que de 1€ ! La batterie est conçue pour être soit rapidement remplacée en quelques minutes ou chargée en moins d'une heure sur un chargeur de 20 MW. La FFA (Fédération Française Aéronautique) a, dès 2017, présenté cet avion électrique dans les aéroclubs. Désormais, plus d'une dizaine sont en exploitation au sein des aéro-clubs fédéraux.



VOLTA est le premier hélicoptère conventionnel 100% électrique.

Il fut développé par l'entreprise Aquinea en collaboration avec de nombreux autres acteurs, parmi lesquels l'ENAC. Volta a effectué son premier vol en février 2016. Grâce à son énergie électrique, l'hélicoptère peut réaliser jusqu'à 15 min de vol stationnaire et possède une **endurance moyenne en vol de 25 min.**

Un hélicoptère biplace VOLTA2 est dorénavant en développement et a vocation à être un hélicoptère **école et loisir.**

Source : <https://www.enac.fr/fr/volta-lhelicoptere-100-electrique>
<https://aquinea.fr/helicoptere-electrique-volta/#1516093283059-50578e6b-3492>

Les moteurs électriques **alimentés par batterie sont très prometteurs** pour réduire les impacts sur l'environnement de certains aéronefs. Cependant, s'il paraît déployable pour des applications de faible puissance, pour l'école, le loisir, les appareils de tailles modérées, **il reste encore de nombreux défis** à relever pour que cette technologie soit utilisée sur des avions de ligne !

*D'autre part, pour aller plus loin, nous vous proposons **une étude du cycle de vie d'une voiture thermique versus une voiture électrique.** Pourquoi un véhicule? Car c'est les cas les plus documentés et sourcés. Il s'agit ici uniquement de vous donner un autre d'idée, de grandeur, au travers des chiffres qui vous sont donnés.*

7 - Etude du cycle de vie (thermique vs électrique)

Décryptage: Pourquoi un véhicule électrique permet de rejeter moins de CO2 qu'un véhicule thermique ?

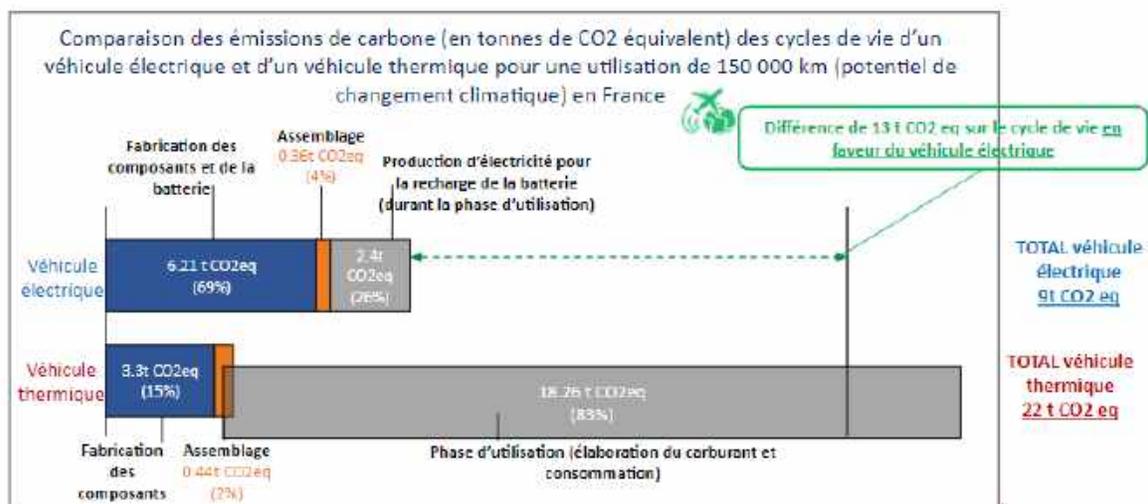
Pour comparer la performance environnementale d'un produit ou d'un véhicule, il est important de regarder **l'ensemble de son cycle de vie**, c'est-à-dire **tous les impacts environnementaux** de toutes les phases de sa vie.



Selon l'ADEME, une voiture électrique produit **13 t de CO2 équivalent de moins** qu'une voiture thermique de taille équivalente lorsque l'on compare leurs deux cycles de vie. C'est **la réduction des émissions lors de la phase d'utilisation** qui lui donne largement son avantage environnemental.

Il faut cependant faire attention à comment l'électricité est produite : si l'on utilise des énergies fossiles pour la produire, la réduction de l'impact écologique sera moins importante.

Si l'on regarde **le cycle de vie** de deux voitures électriques et thermiques, on se rend compte du bénéfice environnemental de l'électrique sur la **phase d'utilisation**. C'est la raison pour laquelle il est intéressant de développer les véhicules électriques (et l'aviation électrique) pour **réduire leur impact sur le climat**.



8 - Moteurs électriques - alimentation solaire

Le 26 Juillet 2016, l'appareil **Solar Impulse S12** réussit l'exploit de compléter **un tour du monde**, en 12 escales et 43041 km parcourus grâce à des **moteurs électriques** uniquement alimentés par de **l'énergie solaire**.



CLIQUEZ ICI ou flashez le code

Vous découvrirez ce tour du monde en vidéo !



L'avion était propulsé par **4 moteurs électriques de 17,5 ch** alimentés par l'énergie emmagasinée par **270m² de panneaux solaires**. Sa vitesse de croisière avoisinait les **90 km/h de jour** et **60 km/h de nuit** (afin d'économiser la charge de la batterie en raison de l'absence d'ensoleillement).

L'appareil pesait **2300 kg** pour une envergure comparable à celle d'un Airbus A340 (72 mètres !).

9 - Moteurs à hydrogène - fonctionnement

Les **moteurs à hydrogène** peuvent également constituer une autre perspective pour le futur, à la place de batteries électriques ou du kérosène. De nombreuses entreprises se penchent sur cette nouvelle technologie. *Airbus* par exemple a pour objectif de devenir dès 2035 le premier constructeur à faire voler un avion commercial zéro émission à hydrogène. En octobre 2020, le constructeur a conclu un partenariat avec EtringKlinger, un petit équipementier automobile allemand connu pour ses composants automobiles, afin de développer et tester des piles à combustible dédiées à l'aviation.

Néanmoins il faut distinguer les deux principales utilisations possibles de l'hydrogène. En effet, il peut être utilisé de deux manières différentes pour la propulsion des avions :

- Premièrement, l'hydrogène, sous forme liquide ou gazeuse, peut être utilisé comme combustible pour alimenter directement des réacteurs adaptés. Il remplacerait ainsi les carburants comme le kérosène, source principale des émissions de GES. C'est la solution privilégiée par Airbus pour son premier avion à l'hydrogène.
- Deuxièmement, l'hydrogène peut aussi être une source d'énergie en alimentant une pile à combustible au sein d'un avion. La réaction électrochimique produite au niveau de cette pile permet de générer de l'électricité pouvant faire fonctionner des moteurs électriques.

CLIQUEZ ICI ou flashez le code

Vous découvrirez plus d'information sur ce projet



La start-up *ZeroAvia* basée à Londres et en Californie a également développé un Piper M, un avion de tourisme de 6 places, qui est équipé d'une pile à combustible. Le premier vol de cet avion a eu lieu en septembre 2020 et fut un succès puisque l'avion réalisa sans encombre le roulage, un décollage, un tour de piste puis un atterrissage.



Les + :

- Ne rejette pas de CO₂ ;
- Contrairement aux énergies fossiles, l'hydrogène est une ressource naturelle et présente de façon naturelle sur la planète ;
- Réduction considérable du bruit ;
- Batterie à hydrogène plus petite que batterie électrique et nécessite beaucoup moins de métaux rares.

Les - :

- Problème de l'extraction : cf focus sur la slide précédente ;
- Rejette 2 fois plus de vapeur d'eau que le kérosène, la vapeur d'eau facilitant la création des traînées de condensation ;
- Rejet de NO_x qui contribuent peu au réchauffement climatique mais dégradent la qualité de l'air ;
- Problème du stockage (stocké à -250°C) + besoin de place (4 fois plus que pour le kérosène) + doit résister aux variations de pression dans un avion ;
- Hautement inflammable et explosif.

Les moteurs à hydrogène sont également **prometteurs** mais présentent **encore de nombreux défis à relever!** Pour le moyen terme, l'hybride peut ainsi être une solution à exploiter.

10 - Les biocarburants

Face à la raréfaction des ressources pétrolières et à la volonté de réduire leur empreinte carbone, les acteurs du secteur aérien ont cherché des **alternatives au kérosène**, que l'on nomme communément **les Bio-carburants**.

On distingue **3 grands types de Biocarburants** en fonction de leur **mode de production** :

- **BioDiesel** : **Réaction chimique d'estérification de graisse animale ou d'huile végétale** (Algues, Jatropha Cursa,...) ;
- **BioEthanol** : **Fermentation de sucres produisant de l'éthanol** (résidus de canne à sucre, Betteraves, Maïs,...) ou distillation d'éthanol ;
- **BioMéthane** : **Gazéification de la biomasse** (déchet agricole,...).

Lors de son cycle de vie, un Biocarburant peut émettre jusqu'à **80% de CO2 de moins** qu'un kérosène classique. N'étant cependant qu'une composante réduite (de 5 à 10%) du mélange, les biocarburants ont à ce jour un impact limité sur la baisse des émissions de CO2.

Ainsi, le 30 décembre 2008, un 747-800 d'air New Zealand, dont un des réacteurs était alimenté avec 50% de JetA-1 et 50% de biocarburant à base de *Jatropha curcusa*, a effectué un vol d'essai. En 2014, Air France a assuré des vols ORLY-TOULOUSE avec des **avions utilisant 10% de Biocarburants**.

Plus récemment, le 18 mai 2021, Air France effectue le premier vol long courrier propulsé avec 16% de Biocarburant (SAF issu d'huiles de cuisson recyclées en France par Total Energies) permettant d'éviter l'émission de 20 tonnes de CO2. Dans la poursuite de cette démarche Air France a opéré, le 3 mai 2022 deux vols (Paris - Montréal et Paris - Lisbonne en Airbus A350 et A220 respectivement) dont les émissions globales ont été réduites de 50% grâce à l'utilisation de SAF et d'autres mesures (éco pilotage, anti gaspillage...)

L'utilisation des biocarburants en aviation est en effet freinée par l'absence d'une **filière de production structurée et vertueuse** ainsi que par le manque d'équipement des aéroports, seuls 5 aéroports étant aujourd'hui en mesure d'assurer un avitaillement en Biocarburant (Oslo, Stockholm, Bergen, Los Angeles et San Francisco bientôt Amsterdam Schiphol et Heathrow).

Le coût élevé de cette alternative freine aussi son utilisation qui représente **aujourd'hui 0,01 % des 250 millions de tonnes de kérosène utilisés chaque année** ⁽¹⁾.(1) en 2017

Des initiatives lancées à différents niveaux comme **Biofuel Flightpath** initié par la communauté européenne, **Ini FCA** (Initiative Futur Carburant Aéronautique) en France ou encore l'implication des compagnies aériennes visent à étendre l'utilisation de ces carburants alternatifs.

Les compagnies aériennes restent cependant vigilantes à ce que la production de ces biocarburants **ne se fassent pas au détriment des cultures alimentaires, de l'environnement ou des populations** vivant à proximité des zones de production. Depuis 2022, **la réglementation française impose aux fournisseurs de carburant d'intégrer un minimum de 1% de SAF dans leurs ventes de kérosène en France**.

La filière est en pleine expansion et Boeing a même annoncé vouloir rendre les **vols commerciaux 100% bio-carburants** possibles d'ici 2030.

Concernant **l'aviation légère**, elle utilise encore majoritairement de l'essence avec du plomb, **l'AVGAS100LL** qui tend à disparaître, notamment pour des raisons environnementales. Les **moteurs nouvelles générations** comme le ROTAX fonctionnent désormais avec de **l'essence sans plomb** (le SP98 comme pour les voitures en l'occurrence) permettant ainsi de réduire la pollution générée par l'aviation légère.

Sources :

<https://www.transportshaker-wavestone.com/les-principaux-freins-au-developpement-des-biocarburants-aeronautiques/>

<https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/energie-renouvelable-vol-toulouse-orly-air-france-10-biocarburant-55790/>

IV - Navigation, réglementation, sécurité des vols

1 - L'ACNUSA (Autorité de Contrôle des Nuisances Aéroportuaires)

1.1 - Présentation

Créée en Juillet 1999, elle est la première autorité administrative en matière d'environnement.

Son but est d'œuvrer à la limitation des pollutions atmosphériques et sonores liées à l'exploitation aérienne et aéroportuaire, en effectuant notamment des mesures autour des aéroports français. Elle a notamment un pouvoir de **recommandations**, **d'alerte** et **d'investigation** et prévoit des sanctions en cas de non-respect des normes en prononçant des amendes aux opérateurs aériens et aéroportuaires.

L'ACNUSA a également publié en 2015 un premier **diagnostic environnemental sur les eaux et les sols** des grands aéroports et de leurs voisinages immédiats. Elle vient d'actualiser le diagnostic en l'élargissant aux problématiques relatives à la **préservation de la biodiversité** et à la **pollution lumineuse**.

Pour plus d'informations : <https://www.acnusa.fr/fr/edito/1>

1.2 - PEB et PGS

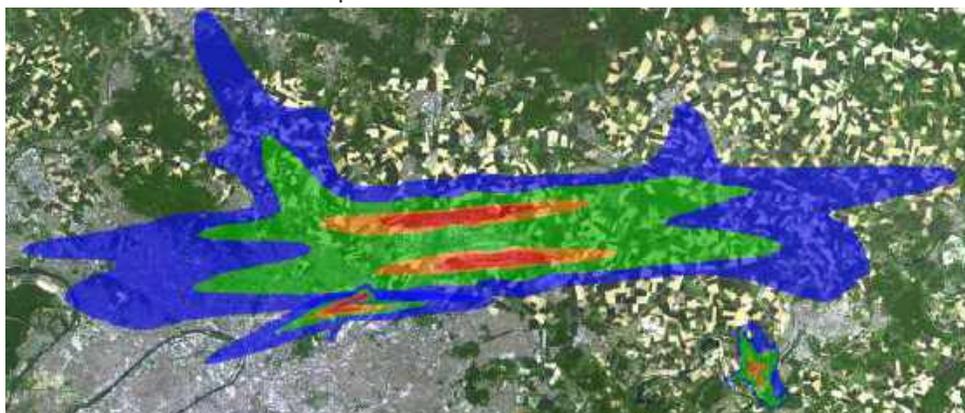
Face au trafic des gros aéroports, de nombreux aménagements ont été et sont faits pour limiter l'impact sonore des appareils.

Il a été défini 2 types de plans en France :

PEB : Plan d'Exposition au Bruit :

C'est un document d'urbanisme fixant les conditions d'utilisation des sols exposés aux nuisances dues au bruit des aéronefs. Le PEB vise à interdire ou limiter les constructions pour ne pas augmenter les populations soumises aux nuisances.

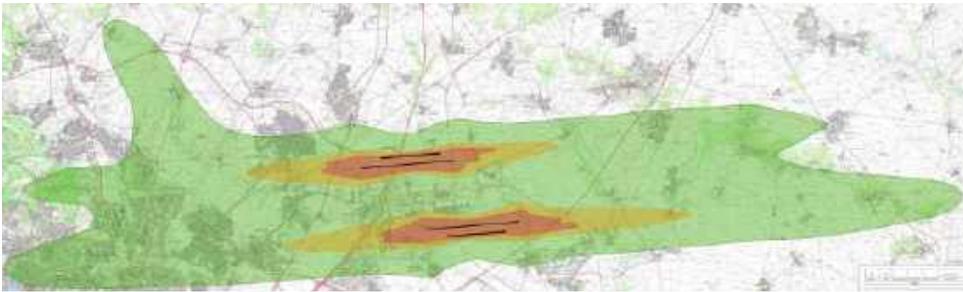
Il anticipe à l'horizon de 15/20 ans le développement de l'activité aérienne, l'extension des infrastructures et les évolutions des procédures de circulation aérienne.



PEB – Roissy CDG

PGS : Plan de Gêne Sonore :

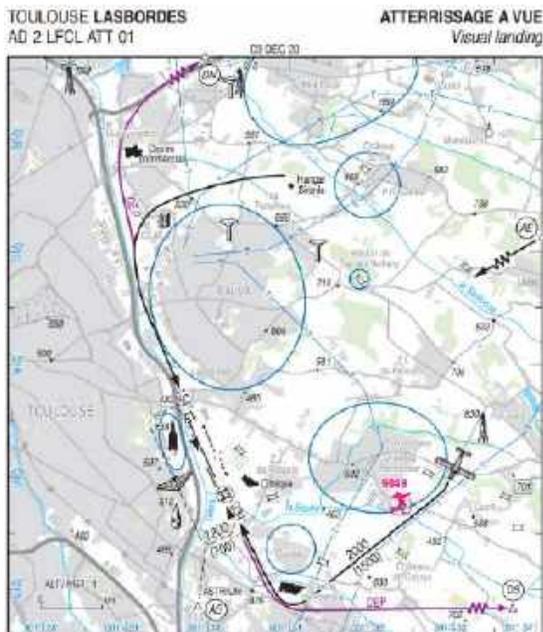
C'est un plan qui délimite des zones dans lesquelles les riverains peuvent bénéficier d'une aide à l'insonorisation de leur logement. Cette aide ne peut être allouée que sous certaines conditions. **Seuls les 12 principaux aéroports français sont dotés d'un PGS.**



2 - Trajectoires VFR

2.1 - Cartes VAC : Trajectoires de tours de piste

Pour **limiter les nuisances sonores** à proximité des aérodromes (notamment aux environs des zones densément peuplées), des **trajectoires imposées de tour de piste** sont mises en place:



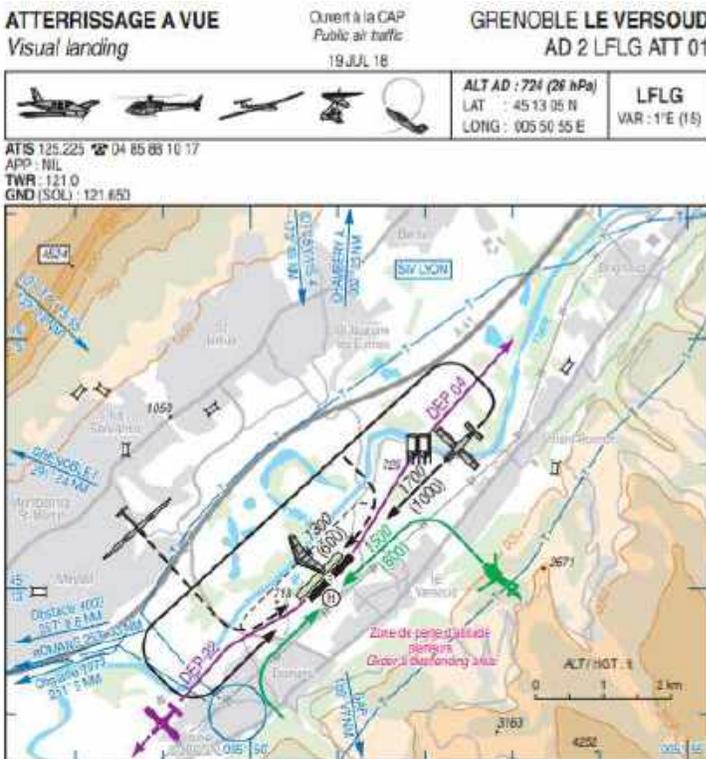
Vue satellite (Maps) avec zones densément peuplées

Ces zones (dont le survol est à éviter) sont détaillées sur les **cartes VAC** et visibles via des **cercles bleus**. Les procédures spécifiques à ces zones sont conçues pour limiter au maximum les nuisances (notamment sonores) : les pilotes adaptent ainsi leurs trajectoires (caps, altitudes, etc.), tant que la bonne conduite d'un vol n'est pas compromise (**possibilité de s'en affranchir pour des raisons de sécurité**).

Certains aérodromes imposent même des plages de silence (ex : Toussus-le-Noble entre 1100 et 1400 du 1er Avril au 30 Septembre les dimanches et jours fériés).

2.2 - Cartes VAC : Trajectoires de départ adaptées

De la même manière, certains aérodromes imposent **des procédures particulières au départ**. L'objectif étant toujours **de limiter les survols de zones habitées** pour réduire les nuisances et assurer la sécurité des personnes au sol si un problème venait à survenir.



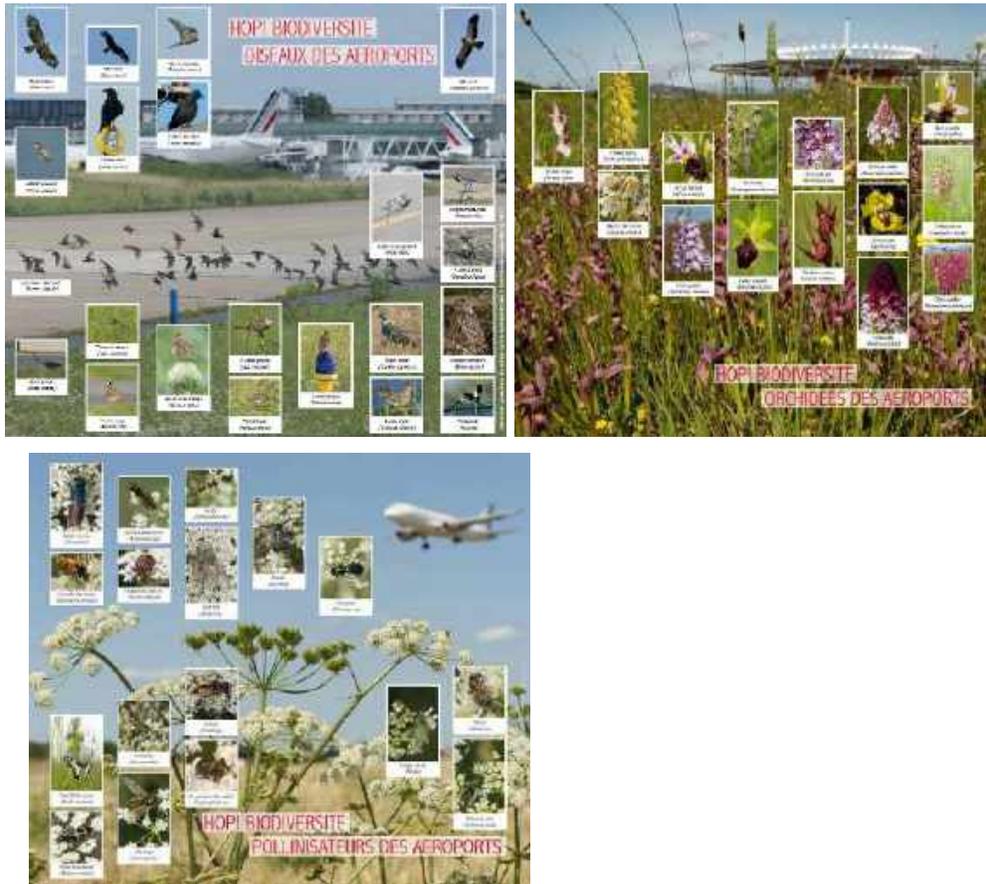
Extrait de consignes particulières de la carte VAC de Grenoble Le Versoud :

Procédures moindre bruit :

Les DEC doivent être effectués à partir des extrémités de piste.

- 1) Décollage piste 04 : en extrémité de piste monter RM 036° , report verticale des silos jaunes au passage de l'isère (1 NM) puis revenir au 042°.
- 2) Décollage piste 22 : monter RM 242° jusqu'au passage de la route (0.5 NM) et poursuivre RM 222°.
- 3) Eviter le survol des villes situées sur la rive droite de l'isère, la branche vent arrière ne doit pas dépasser l'autoroute.
- 4) Attention : pour ne pas converger avec les trajectoires de la piste revêtue, il est impératif que tous les départs de la piste en herbe appliquent l'altération de cap après DEC.

2.3 - AéroBiodiversité



Les terrains d'aviation sont des "plaines" de plusieurs hectares qui **n'ont pas été traitées** par des herbicides depuis plusieurs dizaines d'années et à l'abri de l'urbanisation et de la pollution. **Ils contribuent ainsi à préserver la biodiversité.**

Sur certains terrains, des espèces végétales et/ou animales ont pu trouver refuge et des apiculteurs peuvent même y installer des ruches !

L'association **AéroBiodiversité** mène des actions de recensement pour évaluer la richesse de la biodiversité sur les terrains d'aviation et les aéroports et relaye les bonnes pratiques (hauteur de tonte, réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires, ...).

La FFA (Fédération Française Aéronautique) est partenaire de l'association depuis fin 2019 et est membre de son Conseil d'Administration. Déjà plus d'une **vingtaine d'aérodromes** ont été étudiés pour **recenser la faune et la flore présentes**, et également pour conseiller les gestionnaires sur des méthodes de gestion raisonnée des espaces vierges afin de préserver au mieux la biodiversité.

Plus d'information sur leur site internet : <https://aerobiodiversite.org/>

3 - Evolution des procédures IFR

3.1 - Au départ

Procédures NADP

[NADP : Noise Abatement Departure Procedure]

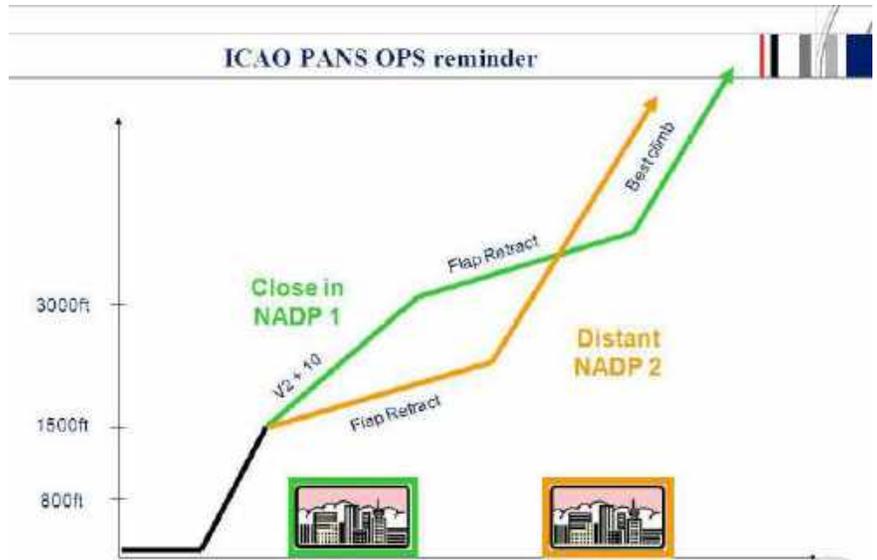
NADP 1 :

Avantage : Réduction de l'empreinte sonore pour les **populations proches de l'aéroport**. L'avion monte à basse vitesse sans changement de configuration : l'avion est alors plus haut en une plus petite distance.

NADP 2 :

Avantage : Réduction de l'empreinte sonore pour les **populations éloignées de l'aéroport**.

L'avion accélère en basse couche, rentre les « traînées » obtenant un meilleur taux de montée à l'issue.



VPE (Volumes de Protection Environnementale)

Un **VPE** est un volume de l'espace aérien associé à une **procédure de départ** ou d'arrivée dans lequel le vol **doit être contenu pour des raisons environnementales**. Ces volumes sont obligatoires pour les aéronefs équipés de turboréacteurs.

Ils peuvent rallonger les trajectoires mais on estime que sous le FL60 la pollution sonore est prépondérante sur la pollution atmosphérique.

Le commandant de bord ne peut déroger à ces règles que s'il le juge absolument nécessaire pour des motifs de sécurité ou s'il a reçu une instruction de contrôle pour des motifs de sécurité des vols.

Exemple à Roissy CDG :

Définition du VPE :

- la limite verticale inférieure des VPE est définie par une pente de 5,5% à partir de l'extrémité de fin de piste
- La limite verticale supérieure est fixée au niveau de vol 60.

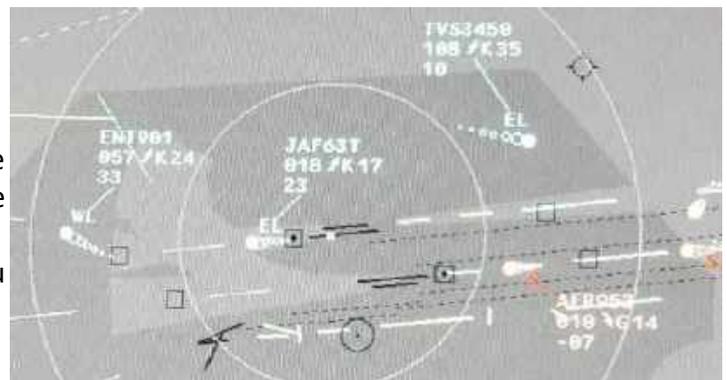


Image du radar départ de CDG

VPE = volume gris clair

3.2 - En croisière

Free route Airspace (FRA)

INTÉRÊT DU FREE ROUTE :

Proposer des **trajectoires orthodromiques** en espace aérien chargé \Rightarrow **vols plus efficaces et économies de carburant.**

C'est, pour les vols en Europe, la **différence de distance entre : la route orthodromique et la route effectivement volée.**

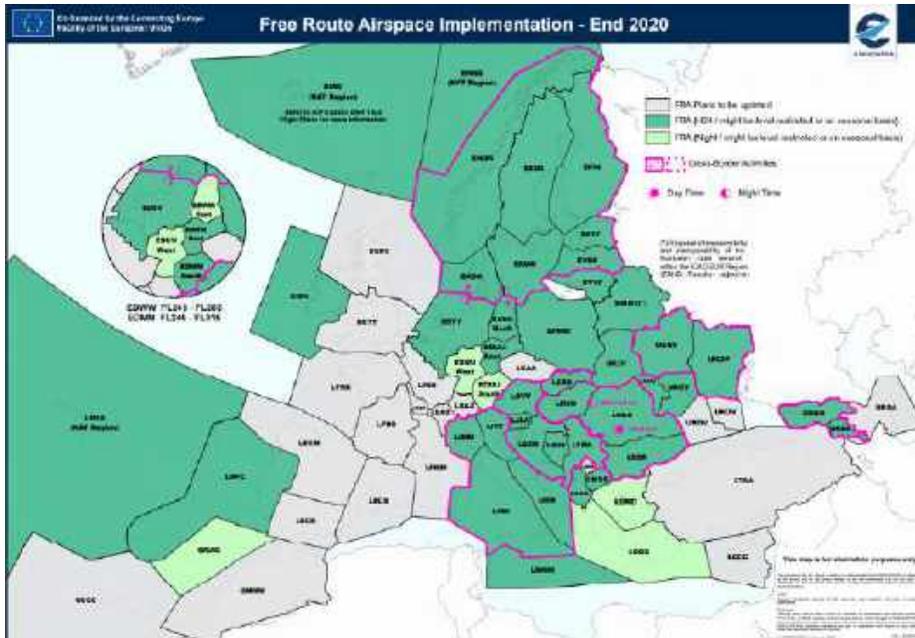
Le développement du Free route permet une nette amélioration, notamment lorsque appliqué sur les 10 000 à 15 000 vols/jour en Europe (*hors COVID*).

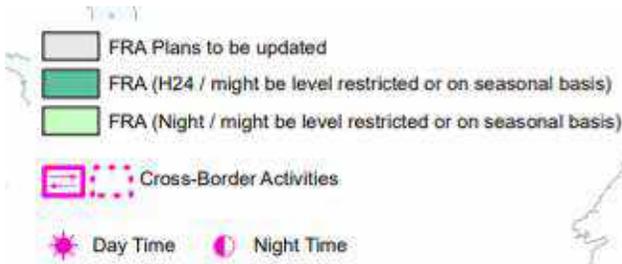
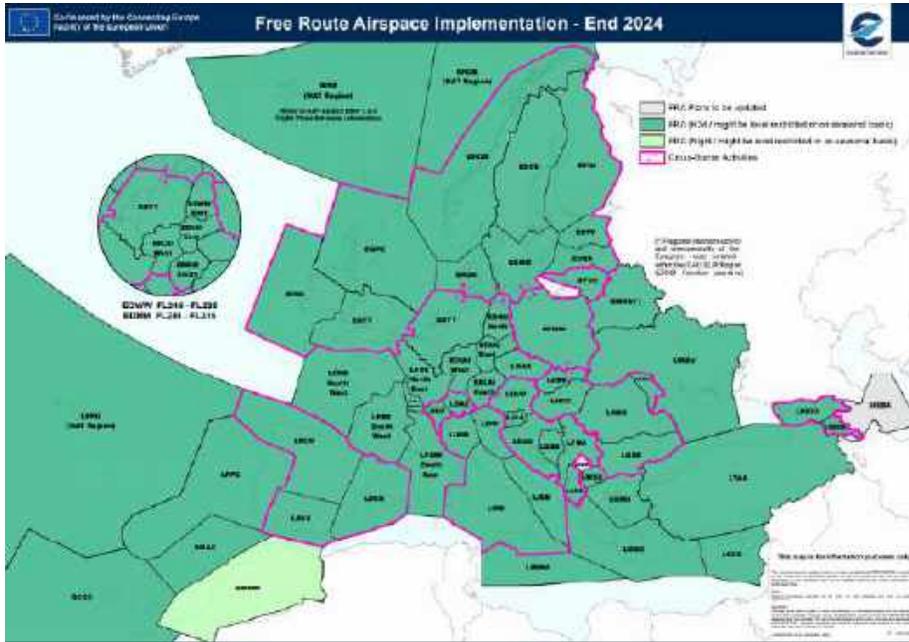
Selon Eurocontrol, lorsque le **Free Route sera complètement déployé**, les économies par rapport à aujourd'hui devraient être de l'ordre de :

- 500 000 Nm / jour
soit 2,4X la distance Terre-Lune
- 3000 tonnes fuel / jour
- 10 000 tonnes de CO2 / jour

Etat des lieux fin 2020 et projections pour 2024 du concept Free Route

Développement permis **grâce aux nouvelles techniques de navigation** à bord et aux **nouveaux outils du contrôle aérien**



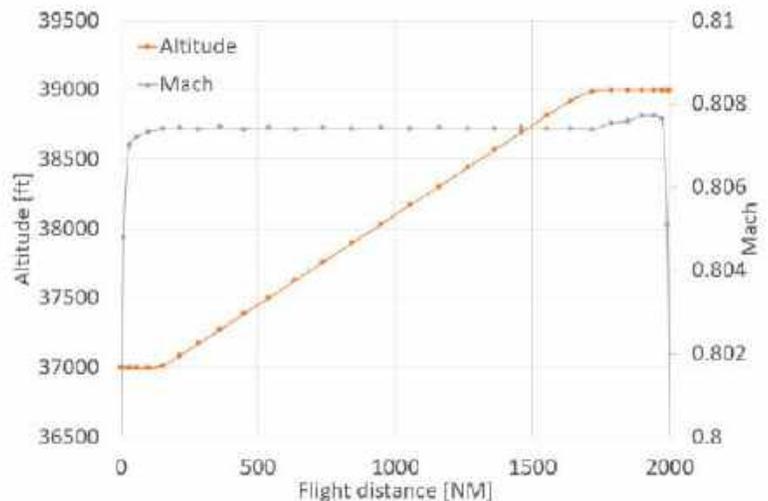


Les zones représentées sont les espaces UIR des Centres de Contrôle en route, Il y en a 5 en France notés LFRR(Brest) / LFMM (Marseille) / LFBB (Bordeaux) / LFFF (Paris) / LFEE (Reims).

Cruise Climb

Le concept de *Continuous Cruise Climb*

Pour une vitesse de croisière donnée, l'altitude qui offre la plus grande efficacité au début d'un vol (lorsque l'avion est rempli de carburant) n'est pas la même qu'à la fin du vol lorsque la plupart du carburant a été consommée: plus l'avion est léger, plus cette altitude est élevée.



Par conséquent, il est possible d'effectuer une **montée continue** afin de positionner l'avion à l'altitude à laquelle la consommation est la plus faible pour la vitesse de croisière choisie. Cela permet notamment d'augmenter l'autonomie et le rayon d'action de l'appareil, tout en limitant le coût du vol lié à la consommation de carburant et les émissions de gaz à effet de serre associées.

Le concept de *Step Climb*

Pour des raisons opérationnelles régulièrement liées au contrôle aérien (niveaux de vols spécifiques, densité de trafic, etc.), **une montée continue, bien qu'optimale, est rarement possible**: en pratique, les avions effectueront donc une succession de montées après un certain intervalle de temps, appelée **montée en palier (*step climb*)**.



3.3 - A l'arrivée

PBN to ILS à CDG

Préambule pour la compréhension :

Dans tout espace aérien, il existe une **norme de séparation entre 2 appareils** permettant d'assurer un espacement nécessaire à la **sécurité**. *Celui-ci dépend des radars disponibles et d'un certain nombre de facteurs.*

A CDG, cet espacement est de **3 Nm latéralement OU 1000 ft**. Ainsi, s'il y a moins de 3 Nm entre 2 avions, il faut 1000 ft entre eux. De la même manière, s'il y a au moins 1000 ft, il peut y avoir moins de 3 Nm.

Conséquence directe : le **doublet nord** et le **doublet sud** sont espacés de seulement **2 Nm**. Avec les éléments précisés ci-dessus, il faut donc 1000 ft entre 2 appareils qui se rapprochent pour intercepter les approches finales.

Cela implique que de **nombreux paliers sont générés** : un avion sera descendu en anticipation pour garantir ces 1000 ft de séparation. Il devra maintenir cette altitude ajoutera donc une puissance conséquente impliquant **une surconsommation considérable**.



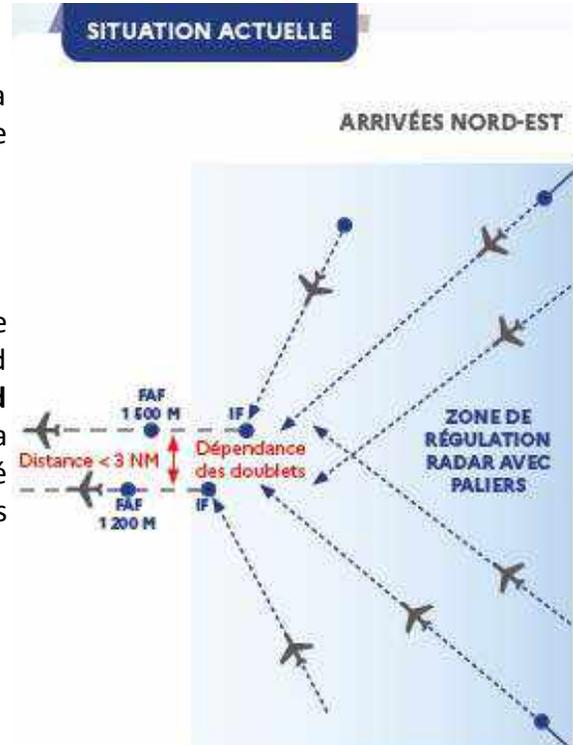
Introduction : Pourquoi un PBN to ILS à CDG ?

Particularité de CDG :

Approches parallèles dépendantes (à cause de la proximité des axes – moins de 3 Nm qui est le minimum de séparation radar)

Idées :

La grande précision du positionnement satellite couplée aux nouveaux équipements de bord permet de **s'affranchir des séparations standard lorsque les appareils sont sur ces segments**. La précision leur permet de se rapprocher en sécurité tout en étant guidés en automatique vers l'approche finale ILS.



Idées :

Création d'un **point « décalé » de régulation** permettant de séparer assez les appareils avant la rejoincte de ce segment final. **Les descentes indépendantes peuvent alors être faites et les nombreux paliers sont supprimés!**

Les atouts :

Réduction de l'empreinte sonore
Réduction des émissions

Gain à chiffrer avec des expérimentations réelles :

Du 4 janvier au 24 mars 2021, 24 contrôleurs aériens spécialement formés ont mené une évaluation opérationnelle sur du trafic réel, pendant cinq heures par jour pour valider les études menées.

Procédures Night et Cœur de Nuit à CDG

Les **approches NIGHT** de CDG, utilisées à CDG depuis 2016, sont des approches volables de 00h30 à 5h, et basées sur de la navigation satellitaire permettent d'optimiser les trajectoires et de limiter le survol des zones peuplées.

De plus, le trafic étant faible, les appareils sont autorisés à l'approche finale dès le passage de l'IAF (souvent au-delà du niveau 120) et les pilotes sont invités à effectuer **une descente « douce »** (lissée) ayant le **double avantage** d'être **plus économe** en carburant et de générer **moins de nuisances sonores**.



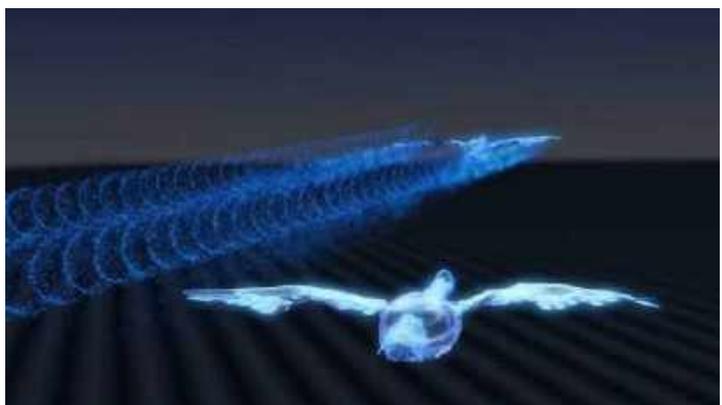
3.4 - Projets pour demain

Des concepts à l'étude pour le futur

En s'inspirant du **bio-mimétisme** et de l'efficacité du **vol en formation des oiseaux migrateurs**, Airbus a concrétisé entre Toulouse et Montréal avec deux A350 (respectivement -900 et -1000) le projet **Fello'Fly** visant à étudier la faisabilité technique, opérationnelle et commerciale du vol en formation de deux avions pour les vols long-courriers.

A l'instar des oiseaux, un « avion suiveur » récupère l'énergie perdue par le sillage de l'avion de tête, en volant dans le courant ascendant d'air créé par son sillage.

Airbus estime que ce type de vol en formation pourrait permettre une **économie de carburant de l'ordre de 5% à 10%** sur les vols long-courriers.



fello'fly

Wake energy retrieval demonstrator



Inspired by the flight technique of migrating birds



Using air upwash to lift a follower aircraft



fello'fly project to prove safe technical and operational principles



Industry collaboration with airlines, Air Traffic Control providers & regulators



5% to 10% fuel savings on long-haul trips



Significant emissions reduction

AIRBUS

V - Histoire et culture de l'aéronautique et du spatial

1 - Acteur incontournable

1.1 - Chiffres clés

4,5 milliards, c'est le nombre de passagers transportés dans le monde en 2019. Un passager prend l'avion une fois tous les 22 mois (vs tous les 44 mois en 2000).
Note : 11% des personnes dans le monde ont déjà pris l'avion. En France, en 2016, près de 80% de nos concitoyens auraient déjà voyagé au moins une fois en avion.

30%, c'est le pourcentage du fret mondial en valeur transporté par avion.
Ces 30% représentent 1% du volume total

Sur la période 1990 – 2010

- ✓ Le volume de fret transporté par les airs a été **multiplié par 40**.
- ✓ Le nombre de passagers a été **multiplié par 2**.
- ✓ Le nombre de mouvements d'avions n'a **augmenté que de 20%**.

1.2 - L'aéronautique en France

80 000, c'est le nombre d'emplois directs (pilotes, PNC, personnel sol,...) en France.

350 000, c'est le nombre d'emplois directs, indirects et induits par Air France en 2017.

300 000, c'est le nombre d'emplois directs et indirects dans l'industrie aéronautique (développement et fabrication hors exploitation) en France en 2018 dont 35.000 ingénieurs .

1300, c'est le nombre d'entreprises industrielles spécialisées en aéronautique en France.

4,3 %, c'est la part du PIB Français de l'aviation civile, y compris la construction aéronautique. Elle représente 90 milliards d'€ de chiffre d'affaires dont 49 milliards pour la construction aéronautique en 2018.

450, c'est le nombre d'aérodromes en France dont en outre-mer.

600, c'est le nombre d'aéro clubs affiliés à la FFA (Fédération Française Aéronautique).

45 000, c'est le nombre de pilotes privés licenciés en France.

La France est ainsi la première nation de pilotes privés en Europe et la seconde au monde derrière les Etats-Unis.

2 - Impact environnemental

2.1 - Chiffres clés

2,5%, c'est la part de l'aérien dans les émissions globales de GES (Gaz à Effet de Serre) au niveau mondial.

4 %, c'est la part de l'aérien dans le forçage radiatif global.

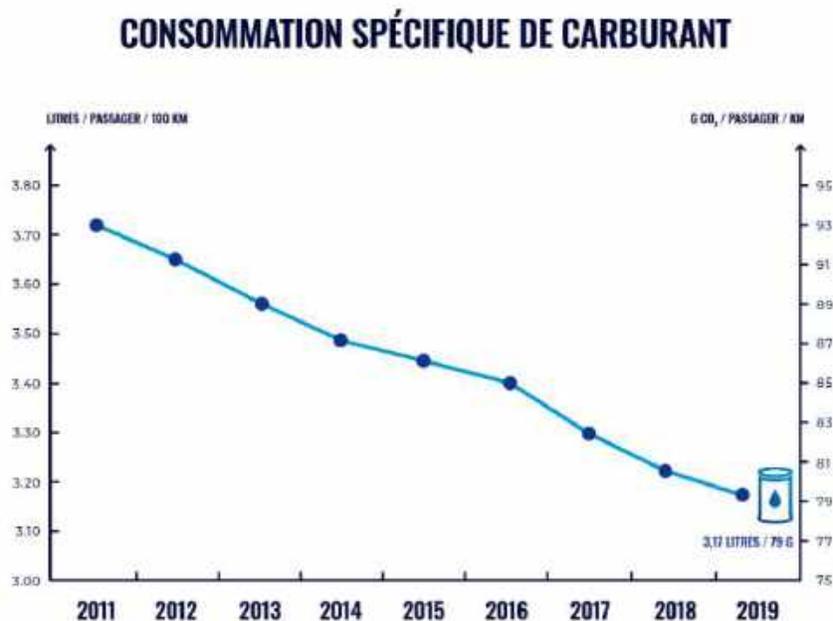
7%, c'est le pourcentage des NOx émis en Région Parisienne du fait des plateformes aéroportuaires.

Un sondage réalisé en France début 2020 montre que 90% des répondants surestiment la part du transport aérien dans les émissions mondiales de CO₂, et **50% d'entre eux pensent qu'il en représente plus de 10%**.

Amélioration du taux de remplissage moyen : de 55% à 75% entre 1970 et 2010

Utilisation de modèles informatiques de plus en plus efficaces pour gérer les réservations.

2.2 - Evolutions des dernières décennies

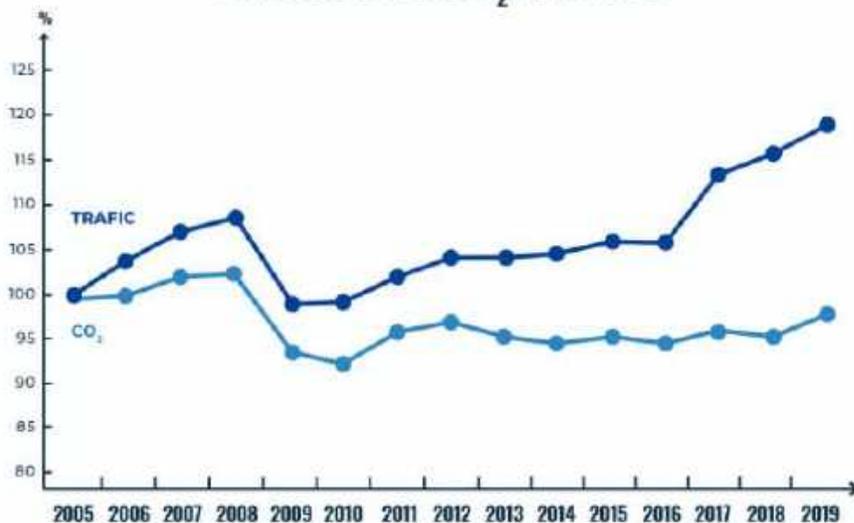


En 2019, en moyenne, le transport d'un passager sur 100km consomme 3,17L. **Soit une baisse d'environ 15% en 8 ans.**

Ce même passager émet 79g* de CO₂ par kilomètre parcouru.

*Il s'agit bien là uniquement du CO₂, à ne pas confondre avec d'autres notions de CO₂ équivalent ou autres unités.

ÉMISSIONS DE CO₂ ET TRAFIC

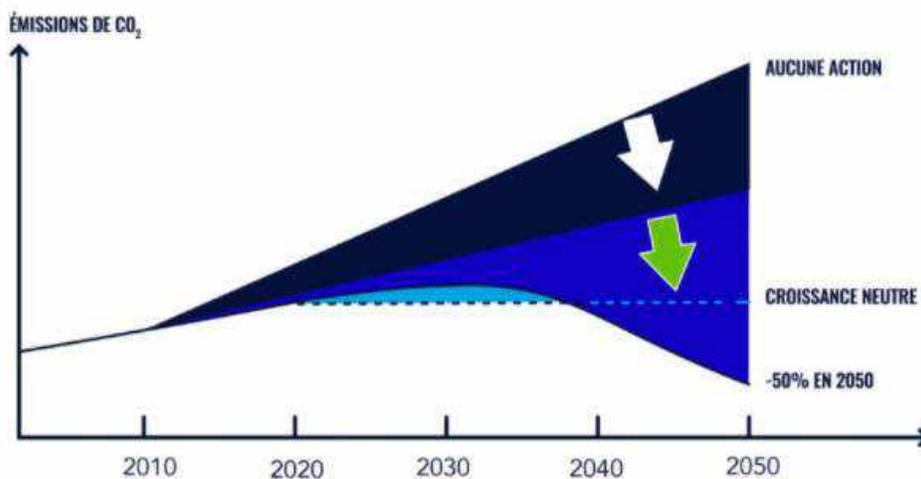


Sur près de 15 ans, le trafic aérien a connu une forte croissance. **Pour autant, plus d'avions n'équivaut pas à plus d'émissions de CO₂.**

Les évolutions citées ci-après expliquent en partie ce phénomène!

3 - Les ambitions du secteur pour l'avenir

LES ENGAGEMENTS DE L'INDUSTRIE



- Progrès technologiques, opérations, infrastructures sol
- Biocarburants et ruptures technologiques
- Mesures de marché (CORSIA)

Les ambitions de l'industrie aéronautique sont fortes pour l'avenir !

En 2019, les émissions mondiales de gaz à effet de serre s'élevaient à environ 60 milliards de tonnes équivalent de CO₂. Pour atteindre l'objectif planétaire de neutralité carbone, celles-ci doivent passer à 10 milliards de tonnes en 2050.

D'ici 2050, l'objectif de l'industrie aéronautique est de diviser par 2 les émissions de CO₂ par rapport à 2005.

Pour y arriver, la mise au point et la production d'un avion « décarboné » à horizon 15 ans permettrait de tenir cet objectif.

Le programme CORSIA est un programme de compensation carbone mis en place par l'EASA qui devrait permettre de compenser **2,5 mds de tonnes de CO₂** sur la période 2021-2035. Si la compensation carbone n'est pas une solution sur le long terme, cela peut constituer une solution temporaire, le temps d'atteindre une réelle neutralité carbone.

Sources

<https://www.iata.org/contentassets/c81222d96c9a4e0bb4ff6ced0126f0bb/iata-annual-review-2019.pdf>

<https://www.fnam.fr/faits-et-chiffres>

https://www.francetvinfo.fr/replay-radio/le-vrai-du-faux/les-personnes-les-plus-aisees-prennent-elles-vraiment-plus-l-avion-que-les-autres_3598771.html

<https://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/aeronautique-defense/un-plan-aeronautique-pour-sauver-100-000-emplois-et-creer-un-avion-a-hydrogene-849787.html#:~:text=L'a%C3%A9ronautique%20en%20France%2C%20c, chiffre%20d'affaires%20en%202018.>

https://www.challenges.fr/economie/chiffres-acteurs-et-faiblesses-du-transport-aerien-francais_575148

https://www.tourmag.com/Avion-pollution-et-CO2-l-opinion-biaisee-du-grand-public_a102258.html

https://251b84c7-b4ea-4c1d-81d7-6c1460292d00.filesusr.com/ugd/3e4751_f64a17122b82438388dd50303130cbe6.pdf

https://www.senat.fr/rap/r12-658/r12-658_mono.html

<https://www.lefigaro.fr/societes/comment-les-compagnies-aeriennes-reduisent-leur-consommation-de-kerosene-et-leurs-emissions-de-co2-20191023>

<https://www.openairlines.com/>

FIN