

# Un avion écologique, réalité ou fiction ?

« S'il te plaît, dessine-moi un avion ! »



21 mars 2024

Thierry Druot  
Professeur associé  
Ecole Nationale de l'Aviation Civile



Image créée par une  
IA générative

# Plan

- Introduction
- Les problèmes de conception
- Aviation et environnement
- Quelle aviation pour demain ?
- Imaginer un futur désirable
- Conclusion



Avion Blériot-SPAD S.33 (1920)  
[4-5pax, 1000km, 250km/h, 13000m]



De Havilland DH 84 "Dragon" (1932)  
[6pax, 880km, 183km/h, 4420m]



Handley Page HP42 of Imperial Airways (1928)  
[24pax, 800km, 160km/h, 2000m]

# Petit rappel historique

## **Convention relative à l'aviation civile internationale Signée à Chicago, le 7 décembre 1944**

### **Préambule**

CONSIDÉRANT que le développement futur de l'aviation civile internationale peut grandement aider à créer et à préserver entre les nations et les peuples du monde l'amitié et la compréhension, alors que tout abus qui en serait fait peut devenir une menace pour la sécurité générale,

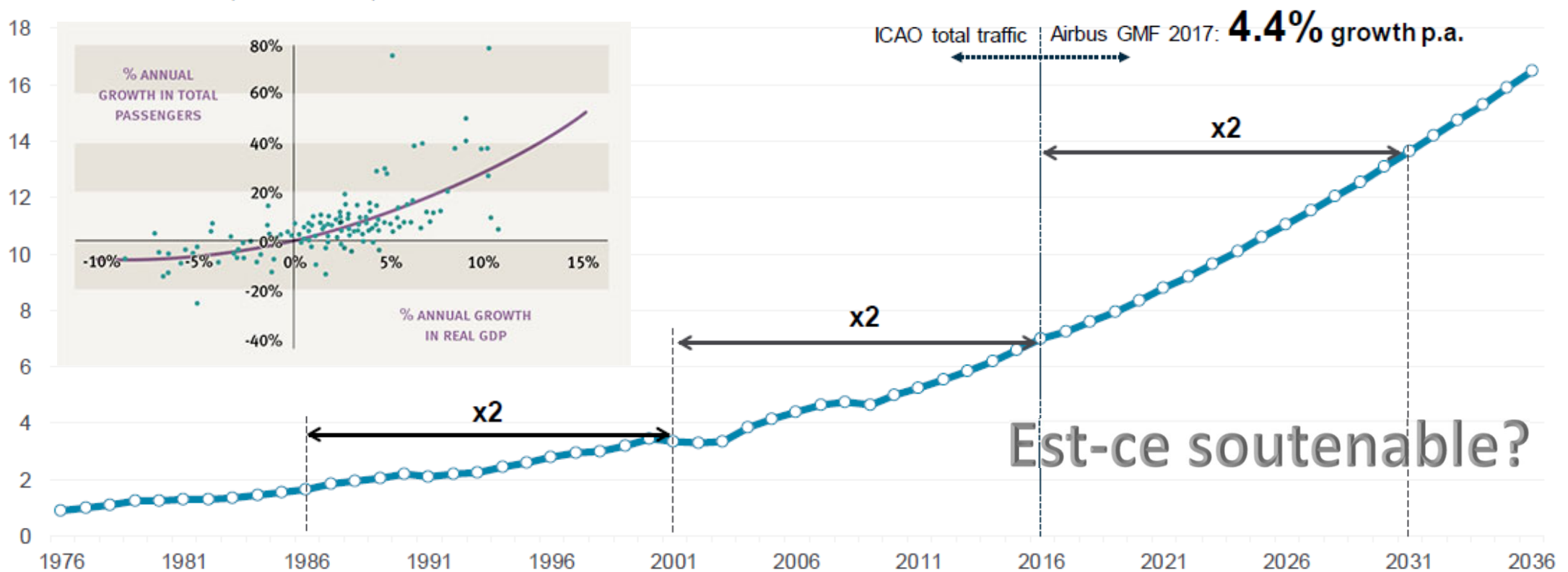
CONSIDÉRANT qu'il est désirable d'éviter toute mésentente entre les nations et les peuples et de promouvoir entre eux la coopération dont dépend la paix du monde,

EN CONSÉQUENCE, les Gouvernements soussignés étant convenus de certains principes et arrangements, afin que l'aviation civile internationale puisse se développer d'une manière sûre et ordonnée et que les services internationaux de transport aérien puissent être établis sur la base de l'égalité des chances et exploités d'une manière saine et économique,

Ont conclu la présente Convention à ces fins.

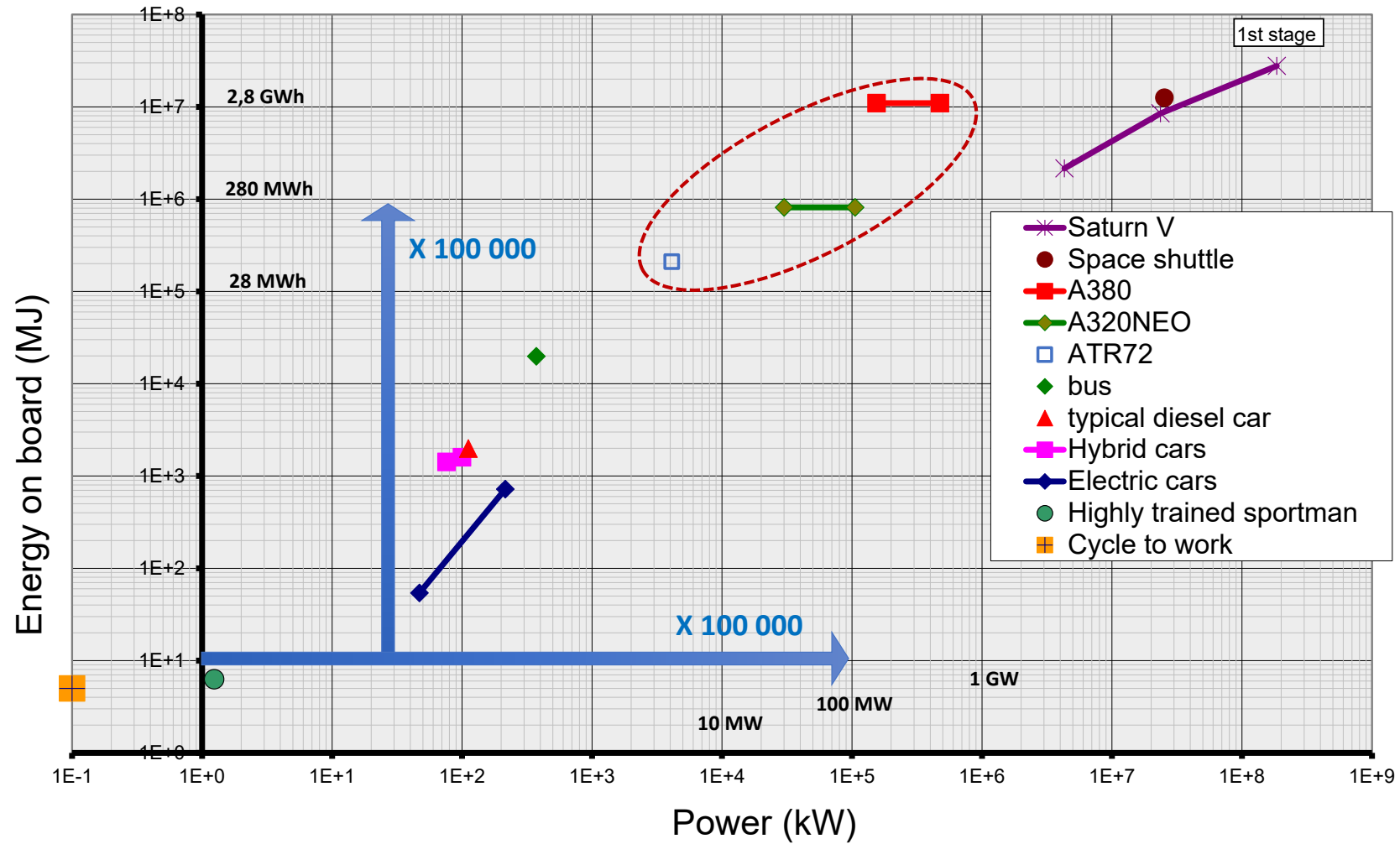
# Prévision de croissance du trafic aérien

World annual traffic (trillion RPKs)



RPK = Revenu Passager Kilometre  
Source: ICAO, Airbus GMF 2017

# Puissance et Energie embarquée



# Quelques chiffres

Consommation de l'aviation commerciale en 2023 : ~ 300 Mt  
( $300 \cdot 10^6$  t, soit un cube de 720 m de côté)



Emission corrélative de CO<sub>2</sub> : 942 Mt  
(Soit un cube de 8 km de côté à température et pression ambiante)

L'aviation commerciale représente ~6% de la consommation mondiale de pétrole  
(~ 4,3 Milliards de passagers en 2023, seulement ~ 10% de la population prend l'avion)

Consommation mondiale de pétrole en 2023 : ~ 5 000 Mt  
( $5 \cdot 10^9$  t, soit un cube d'environ 2km de côté)



Emission corrélative de CO<sub>2</sub> : 15,7 Gt  
(Soit un cube de 20 km de côté à température et pression ambiante)

Anecdote :

Google search results for "quelle est la consommation mondiale de pétrole". The search bar shows the query and navigation icons. Below the search bar are filters for Images, News, Videos, Books, and Finance. The results section shows "About 2,370,000 results (0.29 seconds)". The main result text reads: "La consommation mondiale de pétrole a poursuivi sa progression (3,1 %) et devrait retrouver peu à peu ses niveaux d'avant la pandémie de la Covid. La barre des 100 000 barils/jour est en vue. 3 days ago". The number "100 000" is circled in red.

1 baril = 0,159 m<sup>3</sup>

Il manque 3 zéros  
à cette valeur !!



# Plan

- Introduction
- Les problèmes de conception
- Aviation et environnement
- Quelle aviation pour demain ?
- Imaginer un futur désirable
- Conclusion



# L'avion, un super système fortement couplé

## **Fuselage**

Fonction principale : **abriter les passagers**

Fonctions secondaires : - abriter le cockpit

- encapsuler les trains d'atterrissage
- abriter des systèmes (ex : conditionnement d'air, ...)
- donner du bras de levier aux empennages

## **Voilure**

Fonction principale : **assurer la portance**

Fonctions secondaires : - contenir le carburant

- encapsuler les hypersustentateurs (becs, volets)
- ancrer les trains principaux
- ancrer des moteurs
- donner du bras de levier aux ailerons



La configuration  
Tube & Wing

## **Moteurs**

Fonction principale : **propulsion**

Fonctions secondaires : - produire les énergies nécessaires à l'avion

## **Empennages**

Fonction principale : **stabiliser & contrôler le vol**

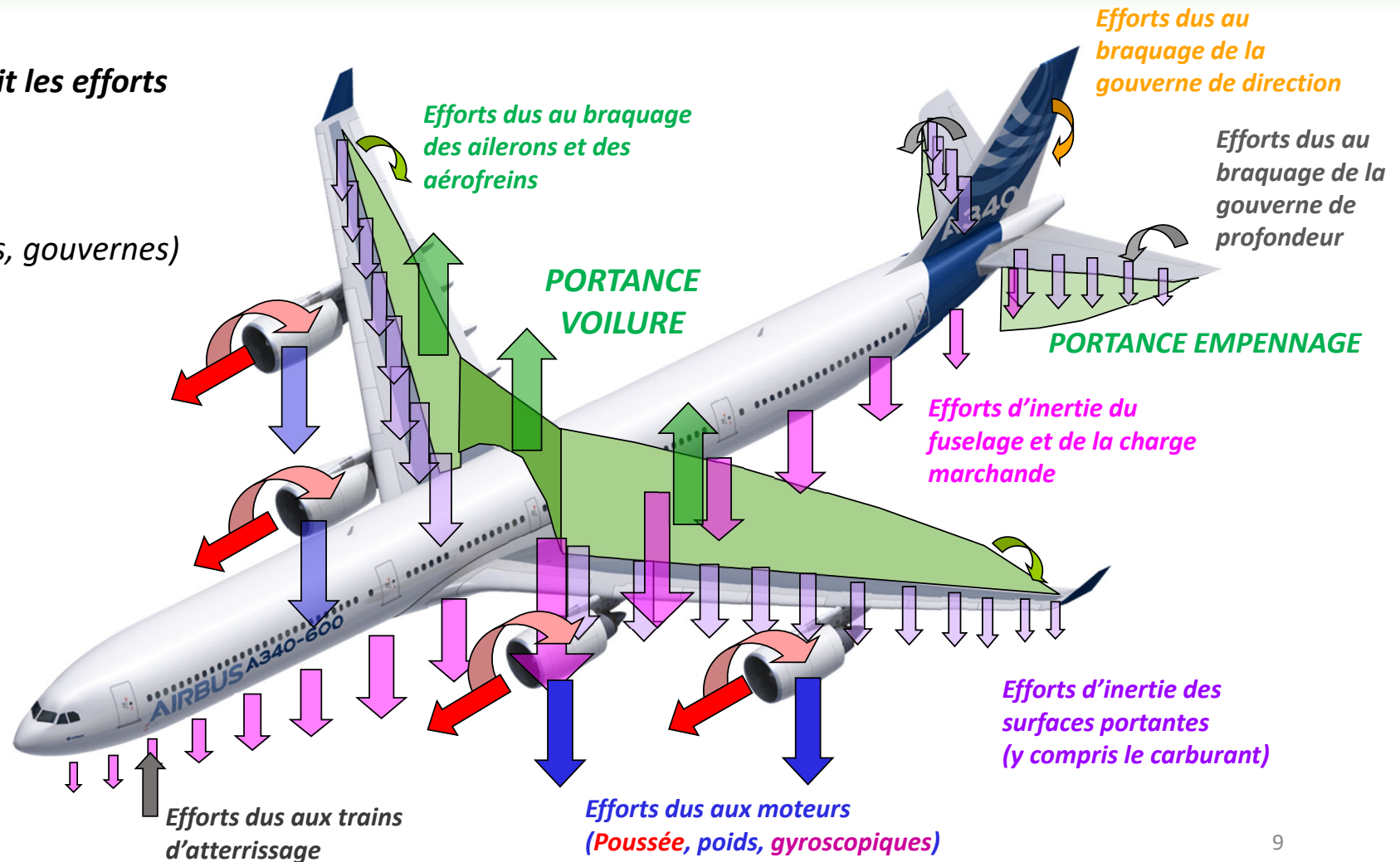
Fonction secondaire : - contenir du carburant (éventuellement)



# Sollicitations de la structure : les efforts (loads)

## La structure de l'avion subit les efforts

- Aérodynamiques
- du poids
- de l'inertie
- ponctuels (trains, moteurs, gouvernes)



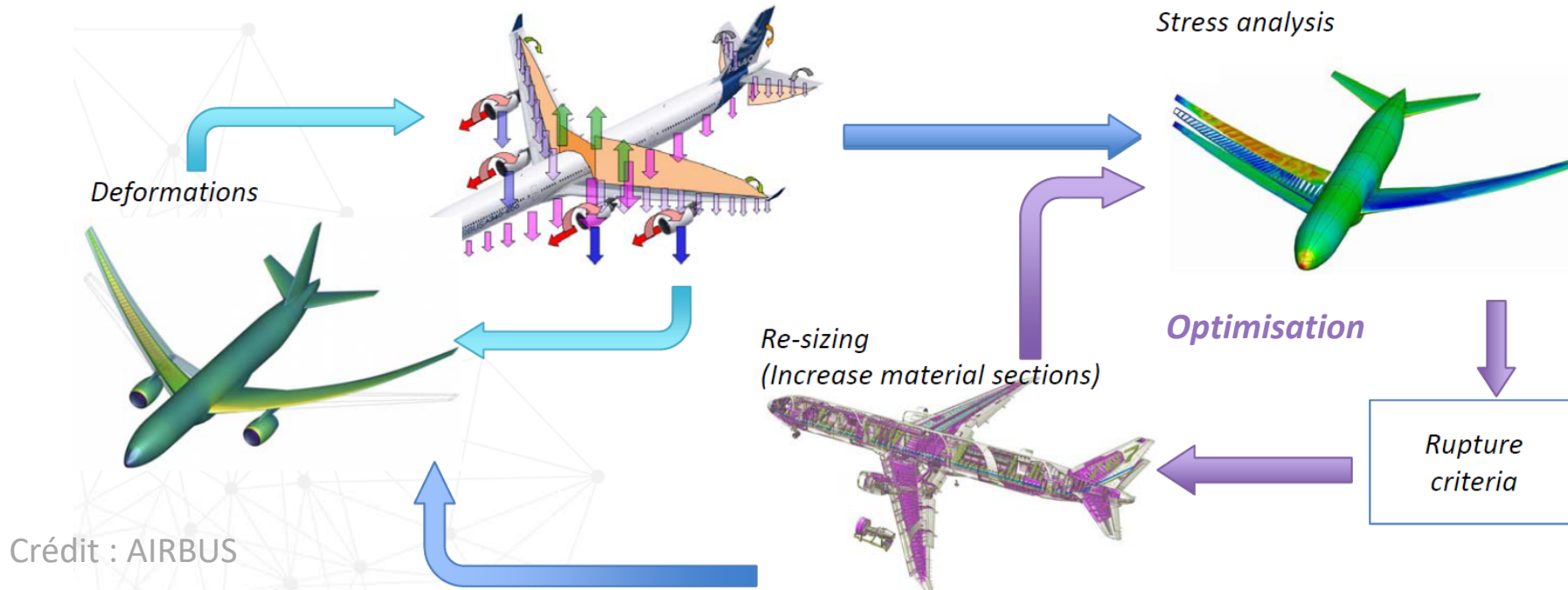
# Optimisation structurale

**L'optimisation structurale** vise à minimiser la masse de matière nécessaire pour assurer l'intégrité de la structure :

- Sur l'ensemble du domaine de vol
- Au cours de la vie de l'avion (ex : 150 000 heures de vol)
- En cas d'efforts répétés (fatigue, ex : 35 000 cycles)
- En cas de pics d'efforts (marges, ex : 2,5 g)

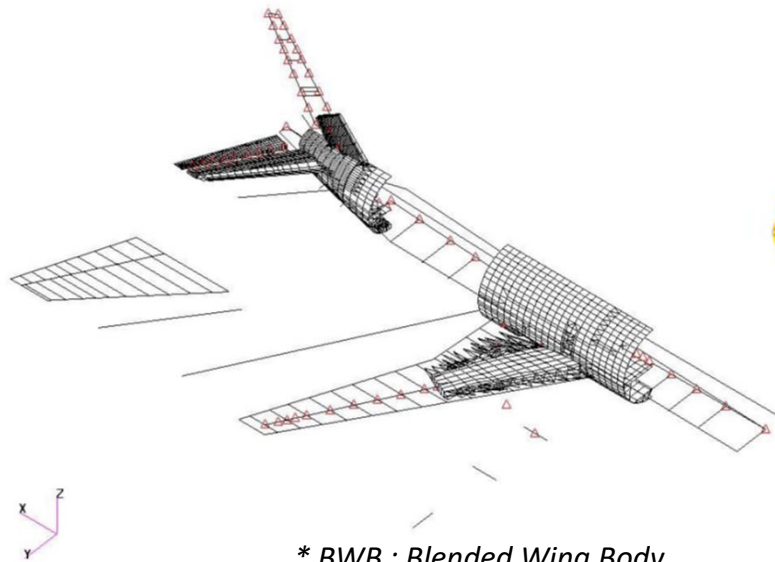
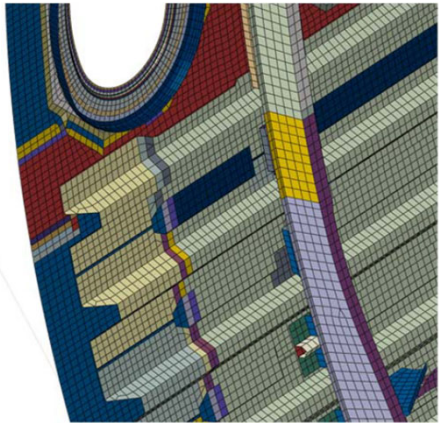
Simulations couplées  
CFD - CSM

Load cases  
(Defined by flying conditions, payload,  
maneuvers including margins, ex : 2,5g)

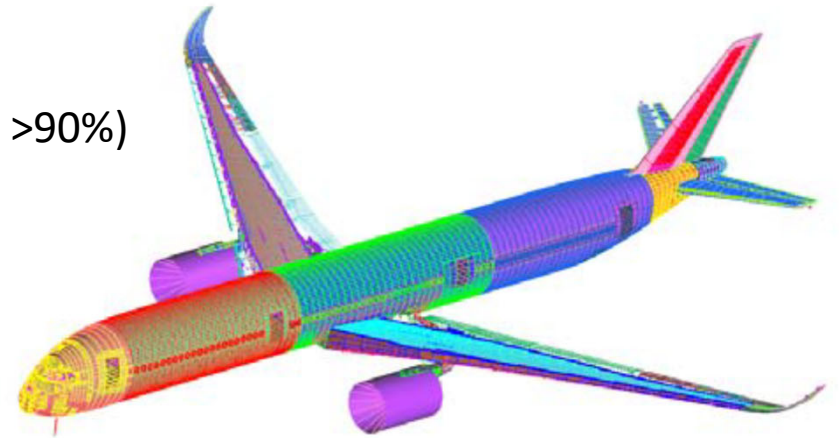


# Quelques axes de recherche

- Accélérer les modèles pour les gros calculs, ex : dérivation automatique, méthodes adjointes, GPU, ...
- Modéliser le vieillissement des structures en fonction des sollicitations
- Développer de nouveaux concepts, ex : ailes à grand allongement, ailes volantes (BWB\*), matériaux intelligents, structures intelligentes, ...
- Diminuer l'empreinte environnementale des matériaux
- Rendre le recyclage possible à 100% (ex : TARMAC AEROSAVE >90%)
- ...



\* BWB : Blended Wing Body



Crédit : AIRBUS

# Optimisation aérodynamique

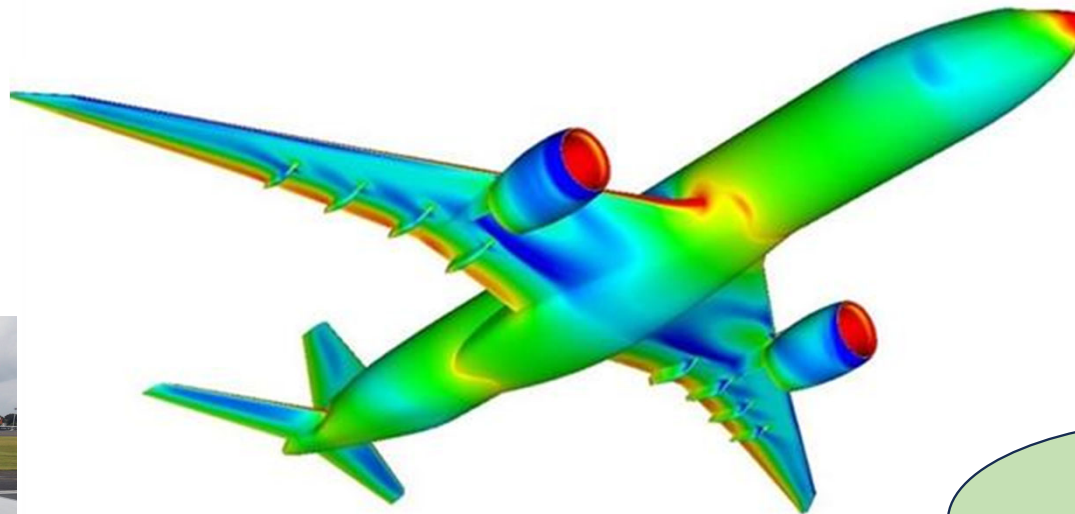
**L'optimisation aérodynamique** vise à minimiser la traînée tout en maximisant la portance

- Dans toutes les phases de vol (croisière, décollage, atterrissage, manœuvres)
- Dans toutes les situations de chargement prévisibles (cabine, soute)
- En conditions éventuellement dégradées (givrage, turbulences, ...)



*Hypersustentateurs escamotés  
(grandes vitesses : en route)*

*Deux voilures en une !*



*Hypersustentateurs & aérofreins déployés  
(basses vitesses : décollage, atterrissage)*

Maillages :

- Structurés
- Non structurés
- Cartésiens
- ...

CFD :

- RANS
- Navier Stokes
- Lattice Boltzman
- ...

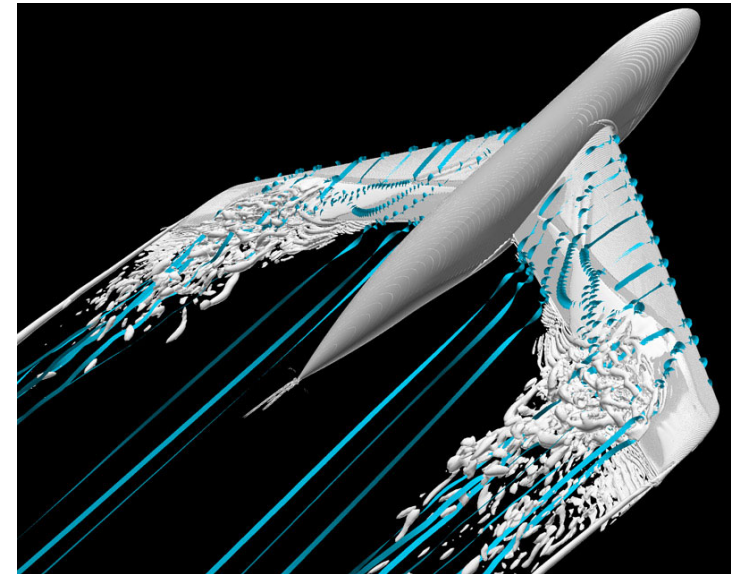
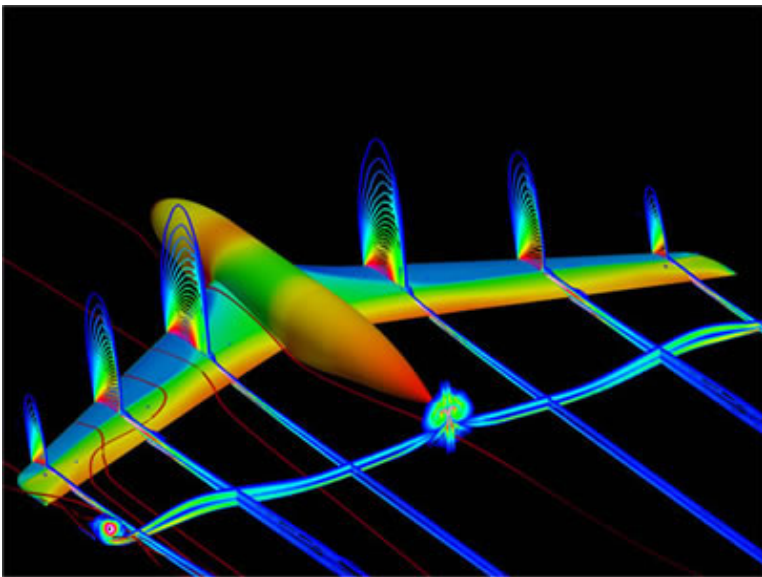
Simulations :

- Stationnaire
- Instationnaire



# Quelques axes de recherche

- *Améliorer la modélisation des phénomènes non linéaires, ex : décrochage, géométries complexes, ...*
- Couplages multiphysiques, ex : aéro-thermo-acoustique
- Accélération des gros calculs, ex : GPU, réseaux de neurones informés par la physique (PINN)
- Montée en maturité des méthodes Lattice Boltzman (gaz sur réseau)
- ...



Crédit : ONERA



# Optimisation de l'architecture de l'avion

**L'optimisation de l'architecture** de l'avion vise à choisir conjointement :

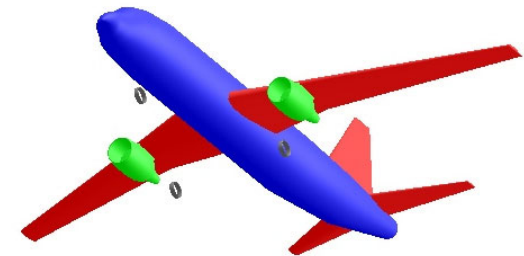
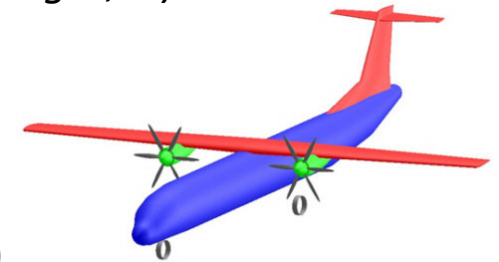
- les composants (motorisation, type de profil de voilure, agencement des empennages, ...)
- Les matériaux (aluminium, acier, titane, CFRP\*, fibre de verre, ...)
- les dimensions (surfaces voilure, envergure, diamètre fuselage, surfaces empennages, ...)
- ...

Afin d'**optimiser un ou plusieurs critères** :

- Coût opérationnel (COC, DOC, Consommation, Masse, ...)
- Empreinte environnementale (Bruit,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$ , CO, Traînée de condensation, ...)
- ...

Tout en **satisfaisant un ensemble de contraintes** opérationnelles

- Capacité d'emport (nombre de passagers, charge marchande, ...)
- Rayon d'action (mission de dimensionnement)
- Vitesse de vol
- Longueurs de pistes maximales à l'atterrissage et au décollage
- Altitude maximales de vol (plafonds opérationnels)
- Temps de montée à l'altitude de croisière
- ...

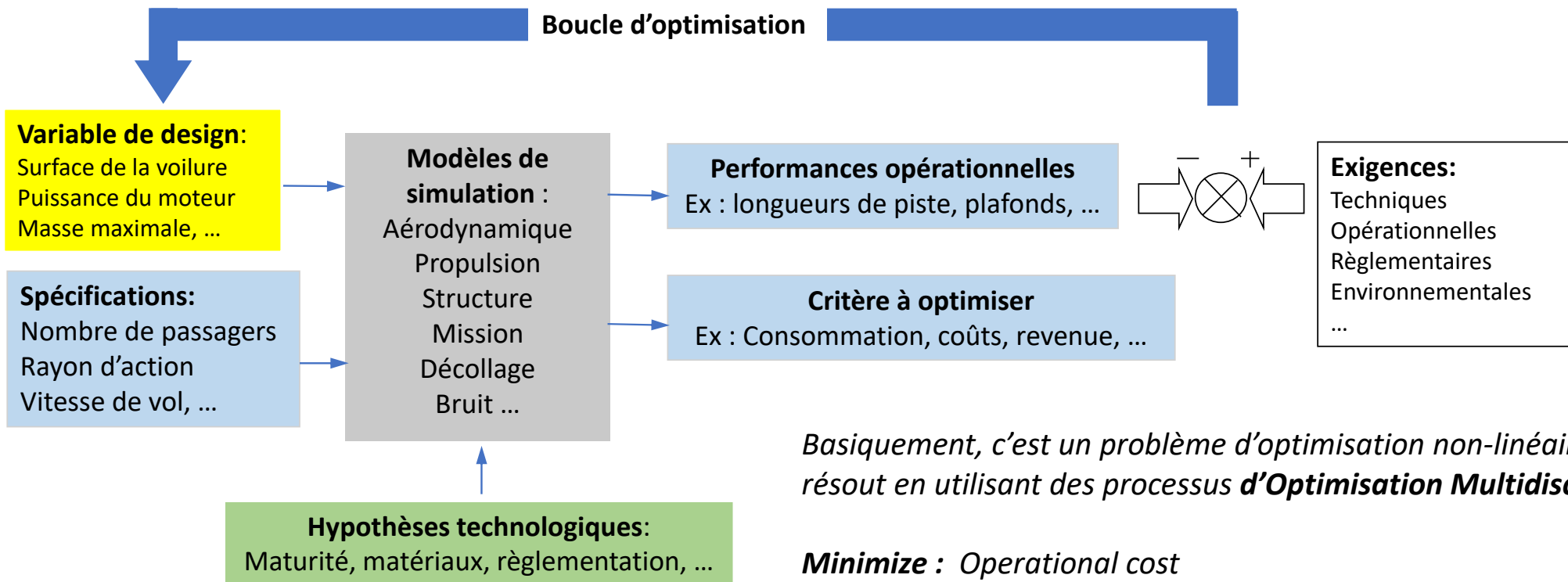


\* CFRP : Carbon Fiber Reinforced Plastic

# Optimisation de l'architecture de l'avion

*Problème Inverse, Multidisciplinaire et fortement couplé*

*Methodologies : MDO\*  
MDF, IDF, BLISS, ...*



*Basiquement, c'est un problème d'optimisation non-linéaire qui se résout en utilisant des processus **d'Optimisation Multidisciplinaires***

**Minimize :** Operational cost

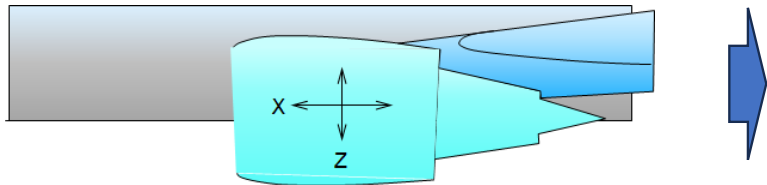
**With respect to :** Design variables

**Subject to :** Operational constraints

\*MDO : Multidisciplinary Design Optimization

# Optimisation Multidisciplinaire

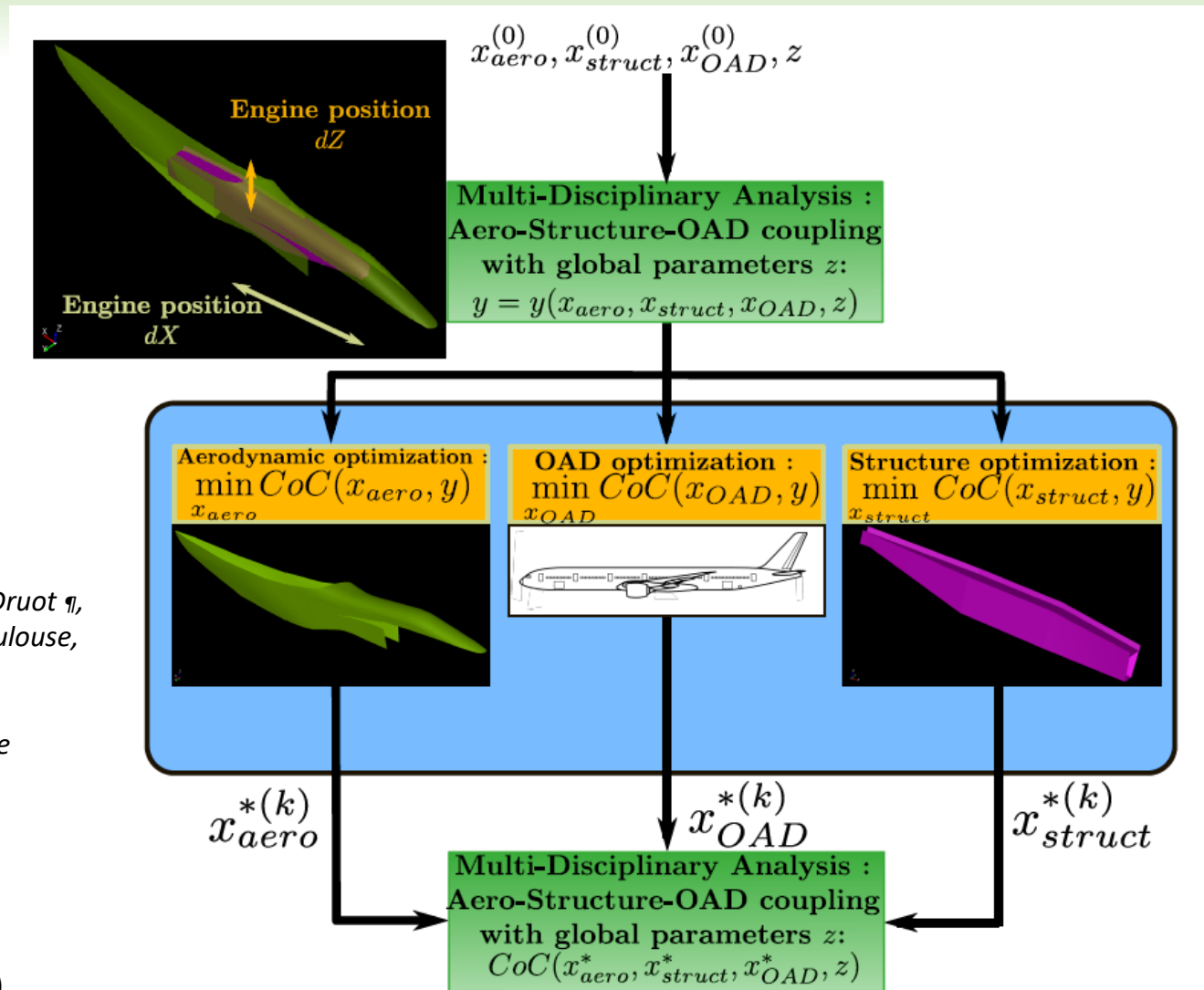
- *Ex : méthodologie bi-niveau (bien adaptée au monde industriel)*



B. Dabas\*, T. Lefebvre†, N. Bartoli, F. Gallard ‡, A. Gazaix §, T. Druot ¶, Damien Guénot. Institute of Technology IRT Saint-Exupéry, Toulouse, France

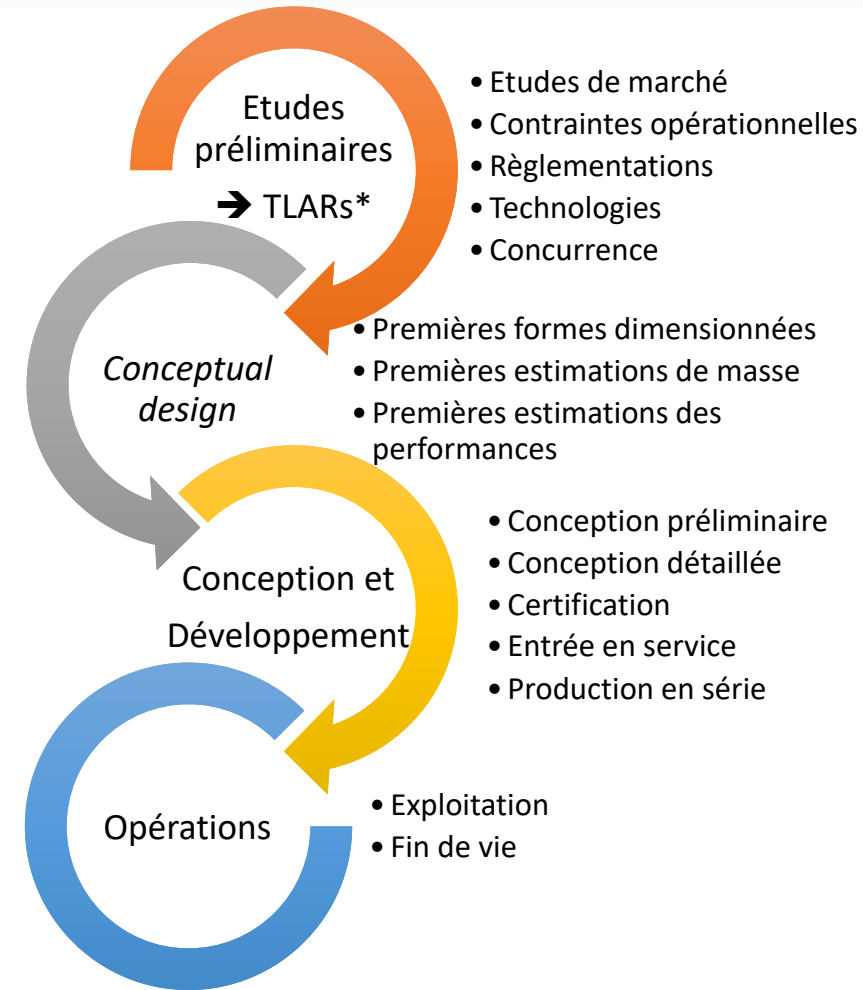
Error-based adaptive coupling process between multipoint high-fidelity aerodynamics and mission performance for shape optimization in the MDA-MDO Project, 10.2514/6.2019-3240.

OAD : Overall Aircraft Design  
CoC : Cash Operating Cost (un critère d'optimisation)



# De l'idée à la réalisation

- *Le processus global de conception d'un nouvel avion est itératif*
- *Il s'appuie fortement sur la simulation numérique*
- *Il est guidé par l'optimisation et la recherche de compromis à tous les stades de la conception*
- *Il est fortement contraint par :*
  - *la réglementation, qui a co-évolué avec les avions (EASA, FAA)*
  - *La maturité des technologies*

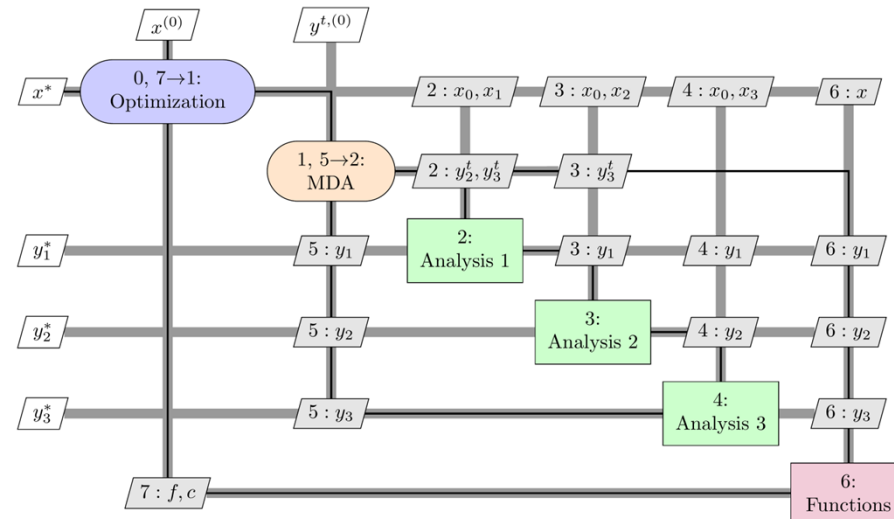


\*TLAR : Top Level Aircraft Requirements

# Quelques axes de recherche

- *Monté en puissance de l'Optimisation Multidisciplinaire afin d'agréger des modèles de plus en plus fins, ex : plateforme GEMSEO (développée à l'IRT Saint-Exupéry)*
- *Intégration de modèles de différents niveaux de granularité dans des processus mathématiques complexes*
- *Optimisation en variables mixtes (continues, discrètes, catégorielles)*
- *Accélération des algorithmes d'optimisation, ex : dérivation automatique, méthodes adjointes, surfaces de réponse, euristiques, ...*
- *Couplage de la MDO avec le Model Based System Engineering (MBSE)*
- *Meilleure prise en compte du cycle de vie*
- ...

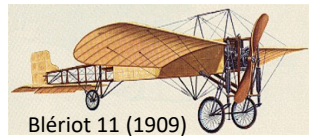
*Illustration :  
eXtended Design Structura Matrix (XDSM)  
Multidisciplinary Analysis (MDA)*





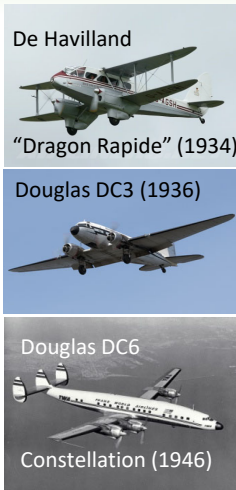
# Prenons de l'altitude

Otto Lilienthal(1889)



Blériot 11 (1909)

**Comprendre**



**Explorer**



**Converger**



**Optimiser**



**Structure & Aérodynamique**

**Propulsion**

**Systèmes**

**Révolution des données**

*Maintenance prédictive*

...

*Conduite autonome du vol, ...*

*Matériaux & structures intelligent.e.s, ...*

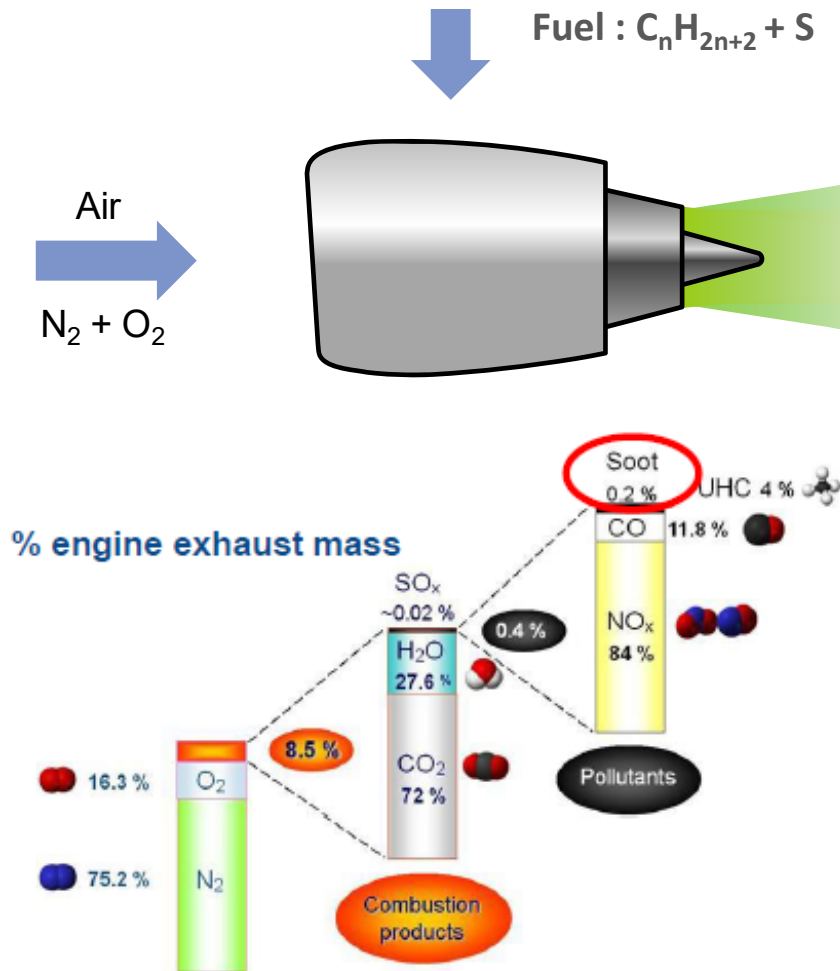
**Transition énergétique ...**

# Plan

- Introduction
- Les problèmes de conception
- Aviation et environnement
- Quelle aviation pour demain ?
- Imaginer un futur désirable
- Conclusion



# Les émissions des avions



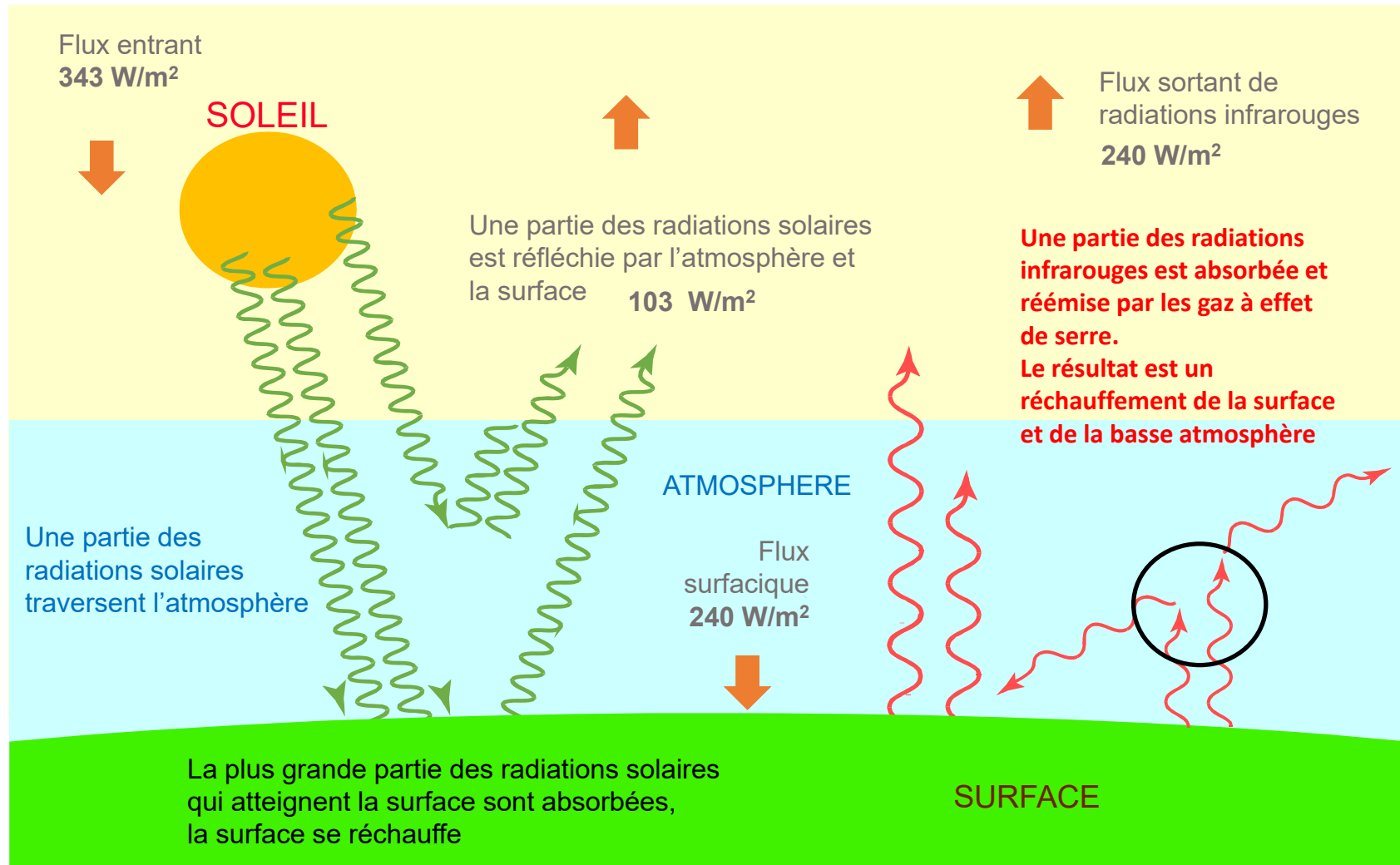
## Actual combustion products:

Complete combustion products:  
 $CO_2 + H_2O + Energy + N_2 + O_2 + SO_2$   
 + Hydrocarbons (HC, unburned fuel) +  
 Ox (NO, NO2) + nitric acid +  
 Sulphuric acid (SO3, sulphuric acid) +

Actual combustion products:  
 $CO_2 + H_2O + N_2 + O_2 + NO_x$   
 + HC; Ethylene + Soot + SO<sub>2</sub>  
 + Formaldehyde + .....  
 'Hazardous Air pollutants'

|                  | EI (g/kg)                   |
|------------------|-----------------------------|
| CO <sub>2</sub>  | 3140                        |
| H <sub>2</sub> O | 1290                        |
| SO <sub>2</sub>  | ~0.8                        |
| NO <sub>x</sub>  | ~14                         |
| CO               | ~3                          |
| HC               | ~0.4                        |
| Soot             | ~0.025 (10E14 particles/kg) |
| Sulphuric acid   | ~0.04                       |
| Nitrous acid     | ~0.4                        |
| Nitric acid      | ~0.2                        |

# Bilan radiatif et effet de serre



# Forçage radiatif

- Warming potential is quantified in term of Watt / m<sup>2</sup>
- Present human contribution to radiative forcing :

$$\sim 1,6 \text{ W/m}^2$$

- Aviation contribution to radiative forcing :

$$0,055 \sim 0,078 \text{ W/m}^2$$

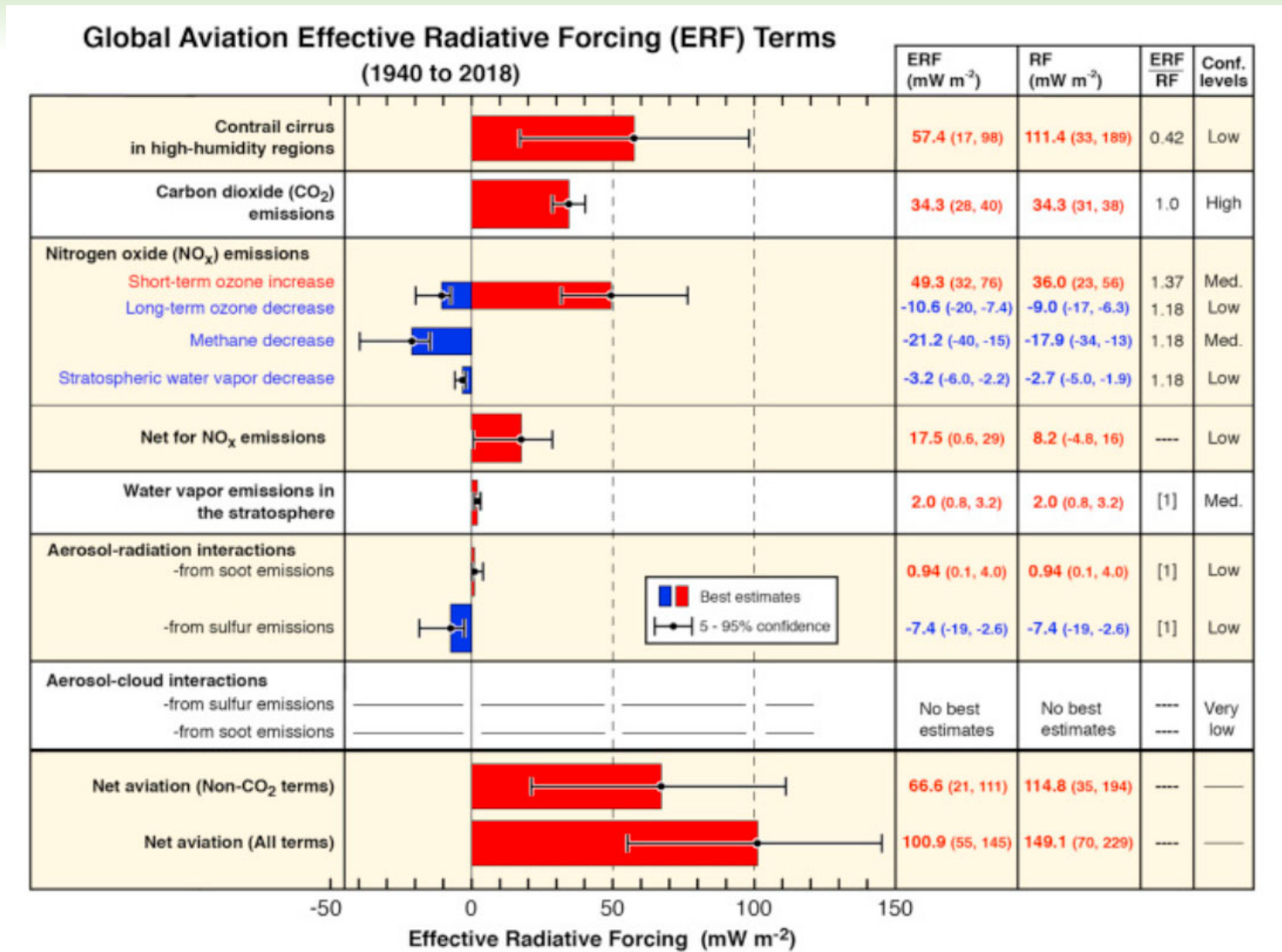
*All aircraft emissions,  
not just CO2*

- In term of relative contribution of Aviation :

$$0.055 (0.078) / 1.6 \qquad 3.5\% \text{ to } 4.9\%$$



# Les effets de l'aviation sur le forçage radiatif

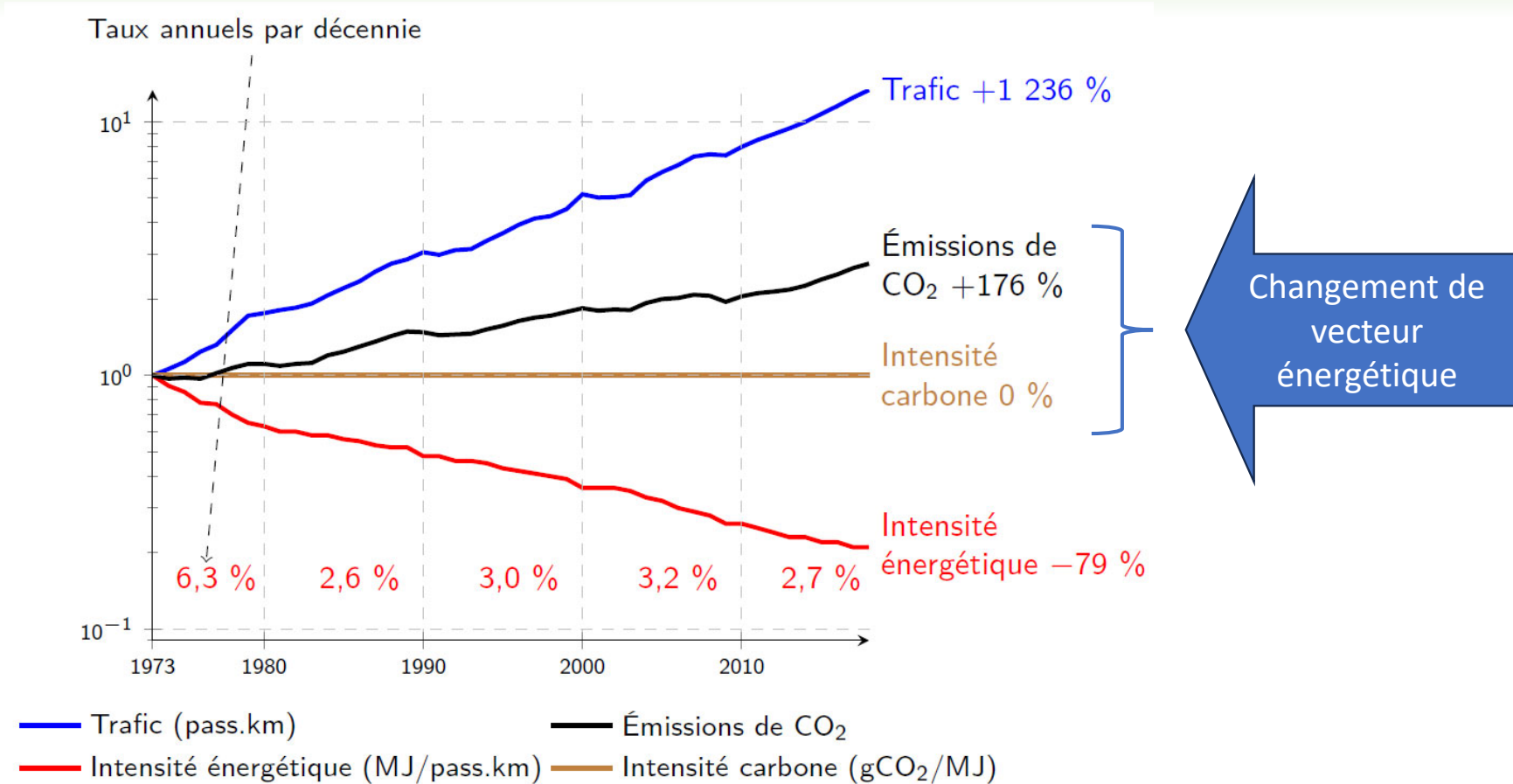


# Décomposition de KAYA

$$\underbrace{\text{CO}_2}_{\substack{\text{Émissions} \\ \text{de CO}_2 \\ \text{MtCO}_2}} = \underbrace{\frac{\text{CO}_2}{E}}_{\substack{\text{Intensité} \\ \text{carbone} \\ \text{MtCO}_2/\text{EJ}}} \times \underbrace{\frac{E}{\text{Trafic}}}_{\substack{\text{Intensité} \\ \text{énergétique} \\ \text{EJ/pass.km}}} \times \underbrace{\text{Trafic}}_{\substack{\text{Trafic} \\ \text{pass.km}}}$$

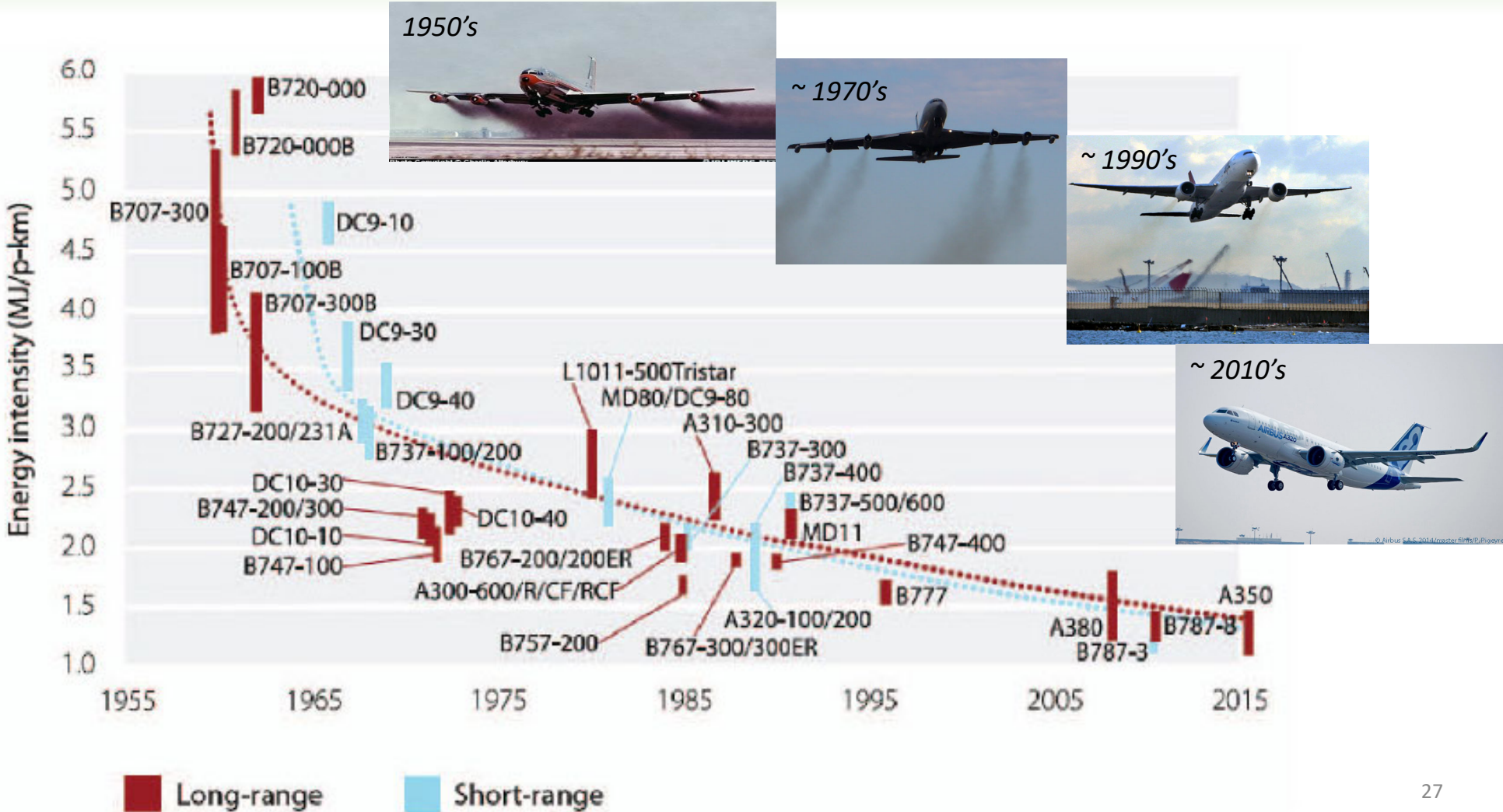
- **Intensité carbone** : quantité de CO<sub>2</sub> libérée pour chaque unité d'énergie utilisée  
→ **levier de décarbonation**
- **Intensité énergétique** : quantité d'énergie utilisée pour qu'un passager fasse un kilomètre  
→ **levier d'efficacité**
- **Trafic** : distance parcourue par l'ensemble des passagers, mesuré en passager-kilomètre (*Revenue Passenger Kilometer* ou RPK)  
→ **levier de sobriété**

# Décomposition de KAYA



Delbecq Scott, Fontane Jérôme, Gourdain Nicolas, Planès Thomas, Simatos Florian. (2023). Sustainable aviation in the context of the Paris Agreement: A review of prospective scenarios and their technological mitigation levers. Progress in Aerospace Sciences. 141. 100920. 10.1016/j.paerosci.2023.100920.

# Levier d'efficacité



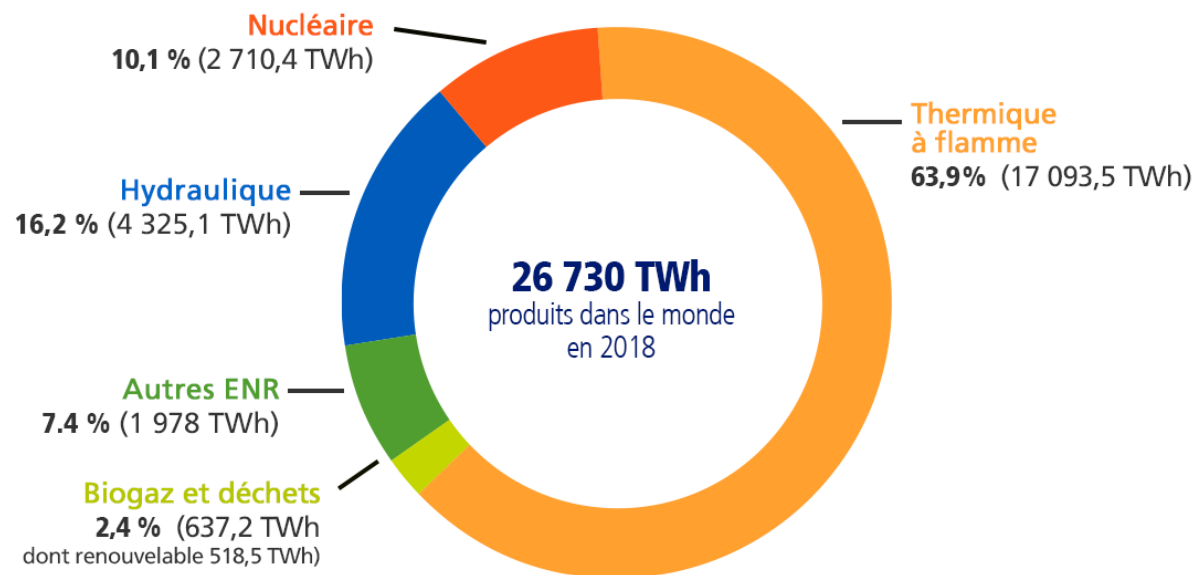
# Leviers de décarbonation

## Energies embarquées

| Vecteur énergétique embarqué | Energie primaire             |
|------------------------------|------------------------------|
| Electricité                  | Electricité                  |
| Hydrogène                    | Electricité (principalement) |
| Electro-carburant            | Electricité                  |
| Bio-carburant                | Biomasse                     |

| Vecteur   | Densité énergétique massique |
|-----------|------------------------------|
| Batterie  | 250 à 500 Wh/kg              |
| Carburant | 12 000 Wh/kg                 |
| Hydrogène | 33 000 Wh/kg                 |

## Energies primaires



### La production mondiale d'électricité en 2018

Source : International Energy Agency (IEA)

© EDF



# Plan

- Introduction
- Les problèmes de conception
- Aviation et environnement
- Quelle aviation pour demain ?
- Imaginer un futur désirable
- Conclusion



# Quelques projets en cours

*Non : Alice*  
*Energie : électricité*  
*Constructeur : EVIATION*  
*Capacité : 9 pax*  
*Rayon d'action : 450 km*  
*Maturité : essai en vol*



*Non : Casio*  
*Energie : Hybride électricité - kérosène*  
*Constructeur : VOLTAERO*  
*Capacité : 5 à 12 pax (gamme de produits)*  
*Rayon d'action : 1200 km*  
*Maturité : projet*



*Non : Era*  
*Energie : Hybride électricité – kérosène (hydrogène ?)*  
*Constructeur : AURA-AERO*  
*Capacité : 19 pax*  
*Rayon d'action : 150 – 1000 km*  
*Maturité : premier vol ~2025*

# Quelques axes de recherche

- *Moteurs électriques*
  - *Faire sauter le verrou des 1000 Volts des moteurs électriques aéronautiques (actuellement : 1 MW max)*
- *Batteries*
  - *Augmenter la densité d'énergie des batteries (actuellement : 250 ~ 500 Wh/kg)*
  - *Trouver de nouvelles technologies de batterie (nombreux candidats mais problèmes de durée de vie, ...)*
- *Electro-carburants*
  - *Industrialiser la capture de CO<sub>2</sub> (améliorer les rendements énergétiques, baisser les coûts)*
  - *Industrialiser la production à grande échelle*
- *Stockage de l'hydrogène à bord de l'avion*
  - *Diminuer la masse des réservoirs (actuellement : ~ 1kg de réservoir pour 1 kg d'hydrogène liquide stocké)*
  - *Diminuer l'évaporation (actuellement ~ 1 %/jour sur les très grands réservoirs, >10% sur les réservoirs mobiles)*
- *Utilisation de l'hydrogène*
  - *Gérer les écarts de température (de 20 K au niveau du réservoir à 300 ~ 500 K au niveau de l'utilisation)*
  - *Industrialiser la production, l'acheminement et l'utilisation de l'hydrogène comprimé et liquide*
  - *Eviter les fuites (l'hydrogène n'est pas neutre vis-à-vis de l'effet de serre !)*

# Ce que l'on observe

- *Les systèmes informatiques pénètrent de plus en plus profondément au cœur de l'avion*  
*Fly-by-wire → Aide au pilotage → Pilotage autonome → Collecte de données → structures intelligentes → ...*
- *Les technologies issues du domaine de l'Intelligence Artificielles se cherchent des applications dans tous les domaines*  
*Gestion documentaire, surveillance, aide à la décision, processus techniques, outils scientifiques, ...*
- *Le nécessaire abandon des énergies fossiles demande que l'on engage de lourds investissements :*  
*Industrialisation de nouveaux vecteurs énergétiques, nouveaux systèmes propulsifs, réduction des pollutions, ...*

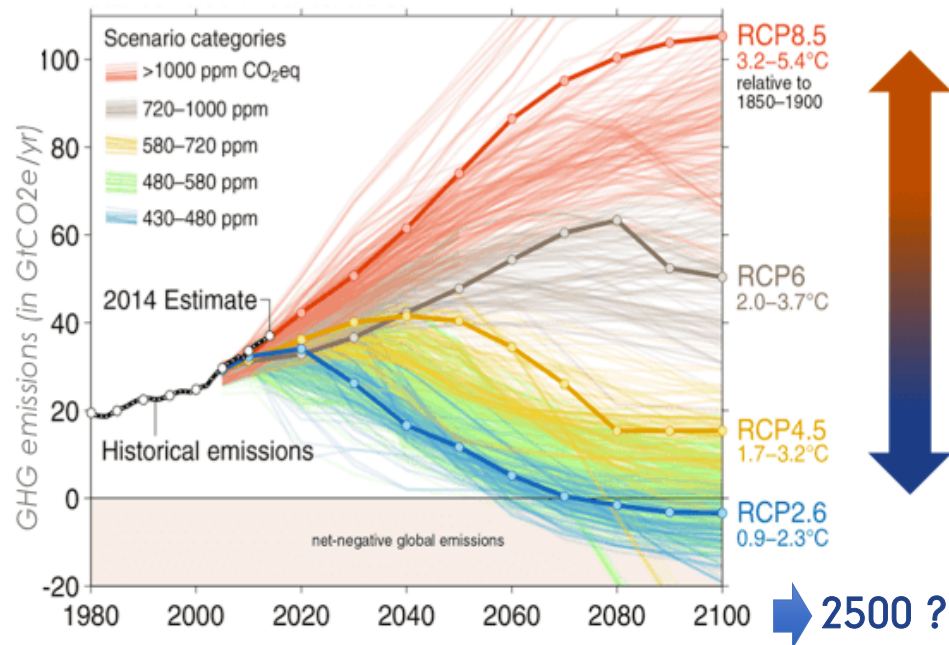
*Dans tous les domaines,  
les mathématiques et la physique jouent un rôle clé*

*Ce qui ne veut pas dire que les solutions à nos problèmes sont toutes de nature strictement technique*

# Et au-delà ?

Dans son discours du 29 septembre 2015, **Mark Carney**, Président du Conseil de Stabilité Financière et gouverneur de la Banque d'Angleterre, a décrit **trois principaux types de risques climatiques** :

## Scénarios climatiques du GIEC



«Un monde à 4 degrés n'est pas assurable»  
**Henri de Castries** (CEO AXA, 2015)

Source: Global Carbon Project

### Risques physiques

Conséquences actuelles d'événements climatiques sur les passifs d'assurance et sur la valeur des actifs financiers (ex. : les inondations et les tempêtes qui provoquent des dégâts matériels ou perturbent le commerce)

### Risques de transition

Risques financiers engendrés par un processus d'ajustement vers une économie moins carbonée

### Risques de responsabilité

Potentielles conséquences à venir si des parties ayant souffert de pertes dues aux effets du changement climatique cherchaient une compensation par ceux qu'ils tiendraient pour responsables



# Plan

- Introduction
- Les problèmes de conception
- Aviation et environnement
- Quelle aviation pour demain ?
- Imaginer un futur désirable
- Conclusion



# Utilisation de l'énergie primaire

- *Malgré les problèmes actuels liés aux batteries Li-ion, la filière « tout électrique » offre une opportunité majeure d'efficacité*
- *Pour tirer le meilleur parti de l'énergie disponible, il faut aussi utiliser toutes les opportunités au niveau de l'architecture de l'avion*
- *Quels sont les aéronefs qui présentent la plus grande efficacité énergétique de par leur architecture ?*



*Le concept de motoplaneur de transport de passagers a-t-il un sens ?*

# Les efficacités du transport

Dans le contexte de l'aviation commerciale, le produit **nombre de passagers X distance parcourue** caractérise la « quantité de service »  
On le note **PK** (Passager.Kilomètre)

Pour un avion donné, on définit :

$\frac{P \cdot K}{En}$  : L'efficacité énergétique de l'avion

$\frac{P \cdot K}{Mv}$  : L'efficacité structurale de l'avion

Avec :

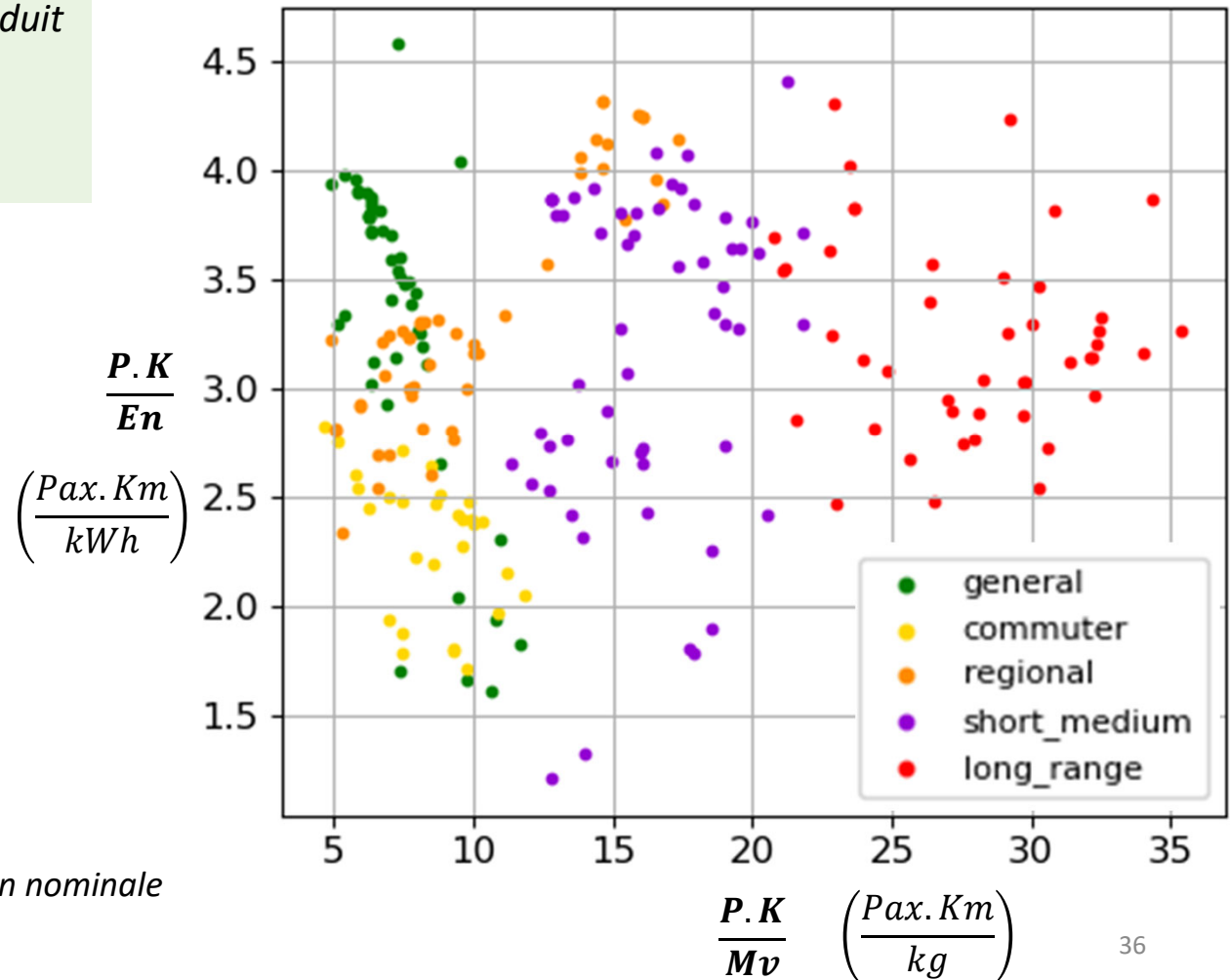
$P$  : nombre de sièges dans la cabine

$K$  : Rayon d'action de la mission nominale

$En$  : énergie interne du carburant nécessaire à la mission nominale

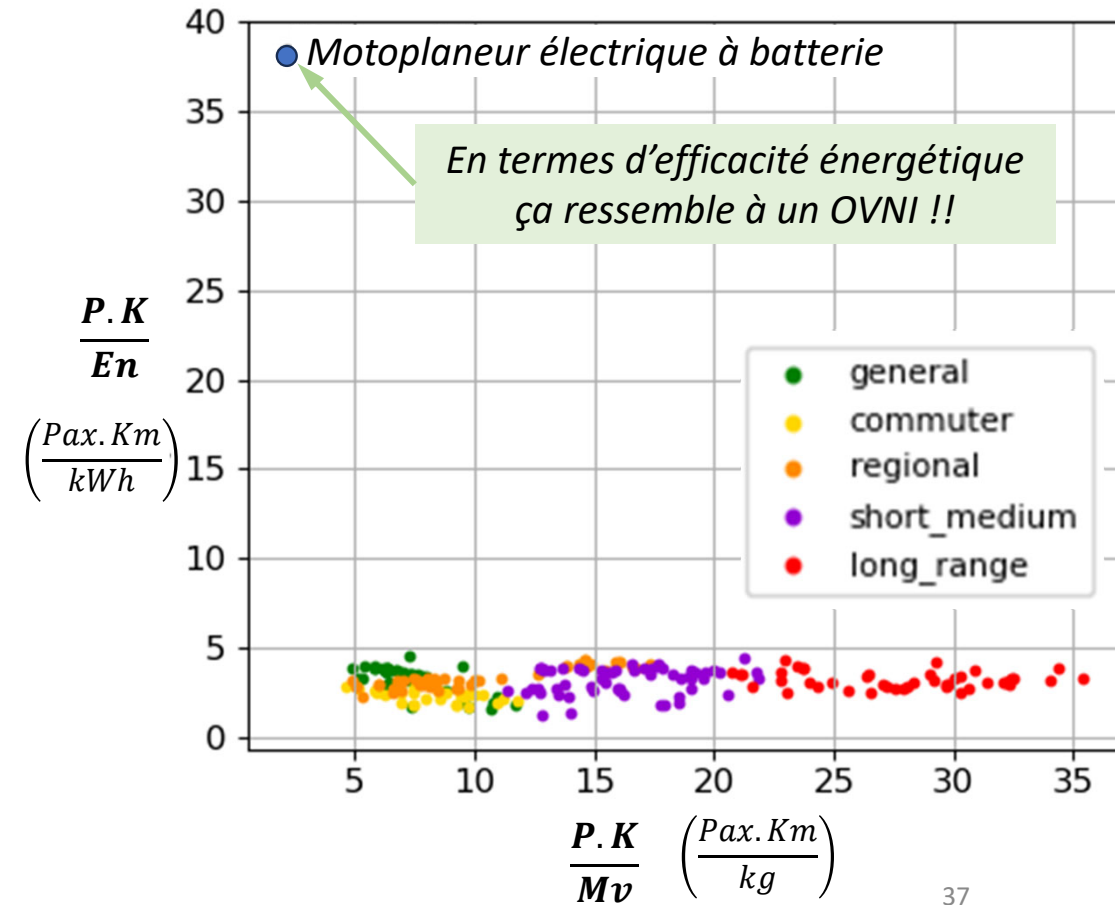
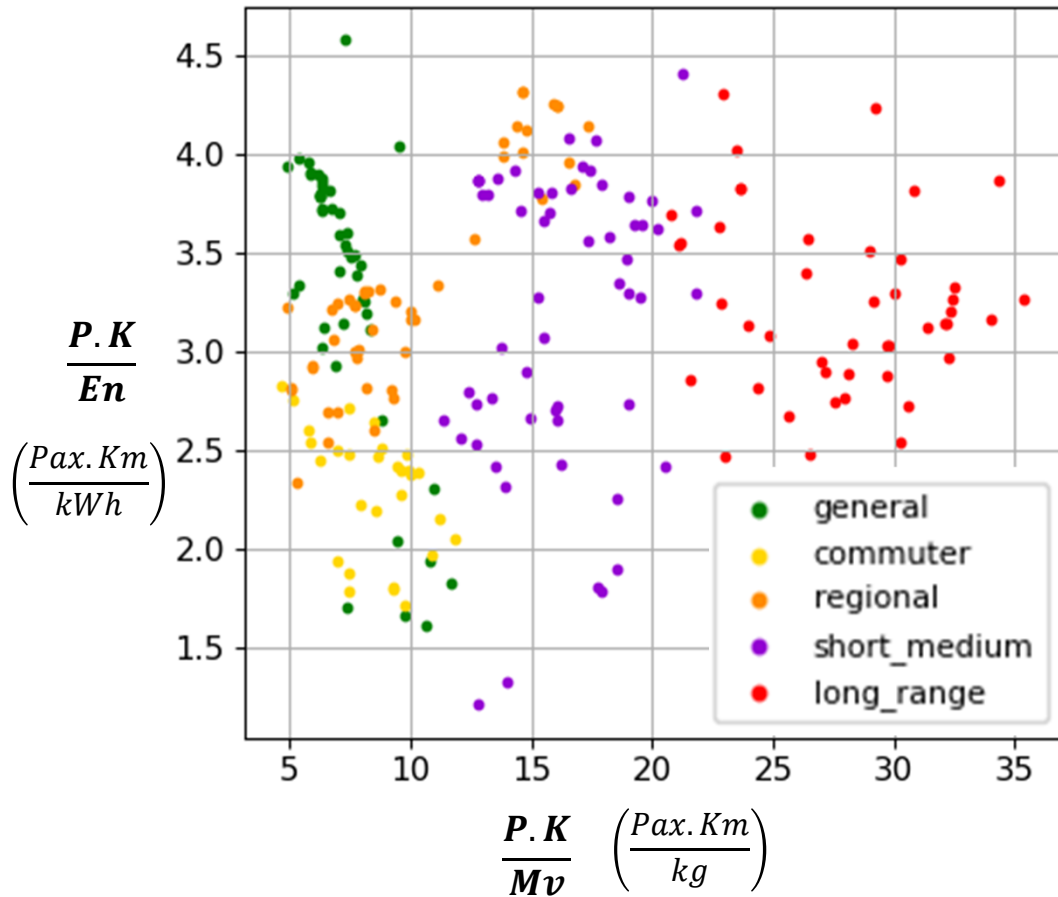
$Mv$  : masse à vide de l'avion

Efficacités de transport des avions  
actuels brûlant du kérosène



# Utilisation de l'énergie primaire

Efficacités de transport des avions  
actuels brûlant du kérosène





# Imaginer un futur possible

*Un motoplaneur de voyage pourrait ressembler à ces machines mais avec de 4 à 8 places au lieu de 2.*

*Et si c'était le seul moyen populaire de transport aérien !*



*Pipistrel : Taurus*

- *Vitesse de vol réduit ( $\leq 250$  km/h)*
- *Vol dans les basses couches de l'atmosphère (turbulences)*
- *Contraint par la météo*
- *Pas de toilette à bord*
- *Autorise un maillage dense d'aérodromes*
- *Matériaux courants et faciles à recycler*
- *Rapprochement avec la Nature*
- ...



*Stemme S10*

*Quel type de société s'accorderait à cela ?*

*Pipistrel & DLR : Taurus G4 (démonstrateur électrique)*





# Plan

- Introduction
- Les problèmes de conception
- Aviation et environnement
- Quelle aviation pour demain ?
- Imaginer un futur désirable
- Conclusion



*« Pour ce qui est de l'avenir, il ne s'agit pas  
de le prévoir mais de le rendre possible »  
Antoine de Saint-Exupéry*

*“ Les mathématiques sont le langage de l’Univers.”*



*Galileo Galilei*

*“ La perfection des moyens et la confusion des buts semblent caractériser notre époque.”*

*“ On ne résout pas un problème avec les modes de pensée qui l’ont engendré.”*



*Albert Einstein*

*Les seules limites sont notre imagination et notre volonté*