

Electrification des véhicules aériens  
Mastère Spécialisé Expert en Véhicules Electrifiés  
INSA Lyon

sylvain.pluchart@gmail.com

3 Février 2023

## Définitions et classification

Introduction à la mécanique du vol et aux surfaces portantes

Formulation de Breguet-Leduc de la distance franchissable

Détermination du besoin en puissance : cas du vol stationnaire

Cahier des charges de conception d'un aéronef

Le stockage de l'énergie

Les turbines à gaz

Les architectures hybrides

Thermique de la chaîne de propulsion

Voler dans le futur : éléments de contexte économique, social et environmental

References

# Le vol d'Armand Zipfel (1883-1954)



Figure – «La fresque d'Albigny-sur-Saône », 2009, fresque murale par ©CitéCréation

## Des nouveaux concepts peu conventionnels...



(a) Volocopter VoloCity  
([volocopter.com](http://volocopter.com))



(b) ZeroAvia  
([fuelcellsworks.com](http://fuelcellsworks.com))



(c) Electra's eSTOL  
([electra.aero](http://electra.aero))



(d) Lilium jet ([lilium.com](http://lilium.com))

Figure – Exemples de concepts en développement

## Propulsion distribuée : le Dornier Do-X ("the flying boat")



Figure – Dornier Do-X à propulsion mécanique distribuée, premier vol en Juin 1929 (Wikipedia)

ADAV (ou VTOL) le plus rapide du monde !



Figure – Le Dassault Balzac, dérivé du Mirage III, a fait sa transition d'un décollage vertical vers un vol conventionnel en 1963 ([dassault-aviation.com](http://dassault-aviation.com))

## Le Militky MB-E1, premier avion électrique avec pilote



Figure – Le Militky MB-E1 est une modification d'un planeur autrichien Brditschka HB-3 ([batterytechonline.com](http://batterytechonline.com))

Le premier vol a eu lieu le 23 Octobre 1973. Il n'a duré que 12 minutes, pour une altitude maximum de 380 mètres (limitation de la batterie). Il utilisait un moteur électrique Bosch KM77 et des batteries Nickel-Cadmium Varta.

Exemple de convertible, le *tiltrotor*



Figure – Atterrissage du CL-84-1 sur l'*USS Guam* en 1973 (Wikipedia)

# Principaux éléments structurels d'un avion commercial

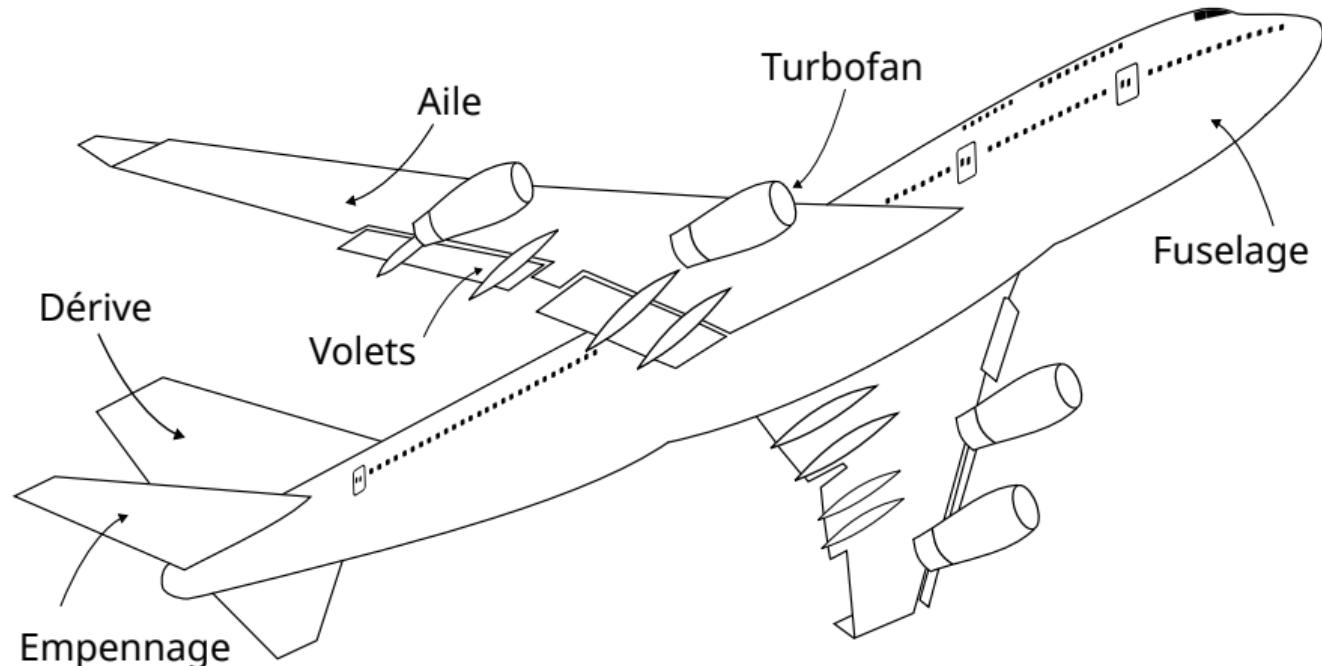


Figure – Boeing 747-400 (dessiné par Eluveitie)

## La formulation de Breguet-Leduc dans le cas d'une propulsion hybride-électrique

$$R = \eta_3 \frac{e_f}{g} \left( \frac{L}{D} \right) \left( \eta_1 + \eta_2 \frac{\Phi}{1 - \Phi} \right) \ln \left[ \frac{W_{OE} + W_{PL} + \frac{g}{e_{bat}} E_{0,bat} + \frac{g}{e_f} E_f(t_{start})}{W_{OE} + W_{PL} + \frac{g}{e_{bat}} E_{0,bat} + \frac{g}{e_f} E_f(t_{end})} \right]$$

Figure – Distance franchissable dans le cas d'une propulsion hybride-électrique avec ratio de puissance constant. De Vries, Hoogreef, Vos, "Range Equation for Hybrid-Electric Aircraft with Constant Power Split", 2020.

# Propulsion distribuée : de nouvelles interactions propulsion/structure

## Thrust, lift and drag decomposition

Propulsive efficiency:

$$\eta_{dp} = \eta_{dp, isolated} + \Delta\eta_{dp}(T_{dp}, L_{airframe}, S, \dots)$$

Thrust:

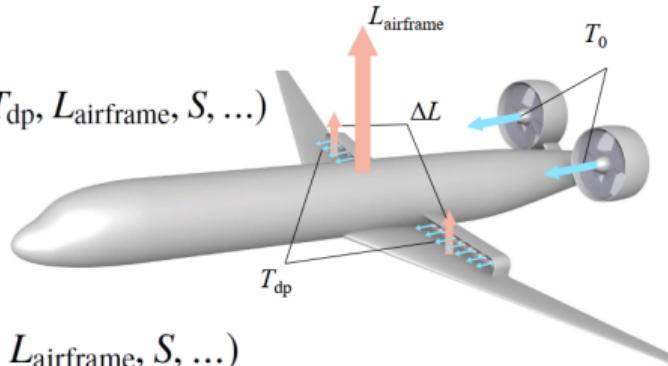
$$T = T_0 + T_{dp}$$

Lift:

$$L = L_{airframe} + \Delta L(T_{dp}, L_{airframe}, S, \dots)$$

Drag:

$$D = \underbrace{D_0 + \Delta D_0(T_{dp}, S, \dots)}_{\text{Zero-lift drag}} + \underbrace{D_i(L_{airframe}) + \Delta D_i(T_{dp}, L_{airframe}, S, \dots)}_{\text{Lift-induced drag}}$$



→ Changes in moments and propeller normal forces neglected in preliminary sizing

39

# Le seul avion électrique avec un certificat de type (2020)



Figure – Le Pipistrel Velis Electro en vol  
([pipistrel-aircraft.com](http://pipistrel-aircraft.com))

TDSI No.: EASA.A.573  
Issue: 11  
Virus SW 121  
Date: 01 March 2022



**TYPE-CERTIFICATE  
DATA SHEET**

NO. EASA.A.573

For Type  
Virus SW 121

Type Certificate Holder  
Pipistrel Vertical Solutions d.o.o.  
Vipavská cesta 2,  
5270 Ajdovčina  
Slovenia, Europe

Figure – Sur le site de l'EASA on trouve le certificat de type ainsi que les considérations spécifiques aux chaînes de propulsion électrifiée, développée grâce à l'expérience accumulée sur le Velis Electro ([easa.europa.eu](http://easa.europa.eu))

# De gros consommateurs de puissance et d'énergie !

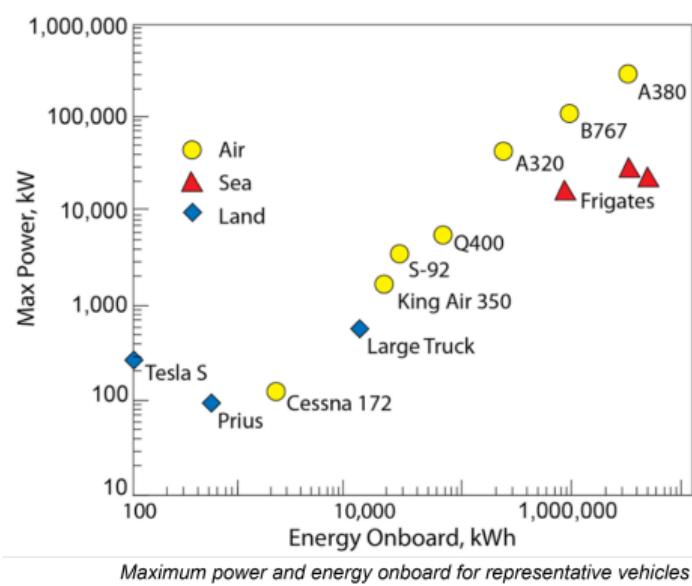
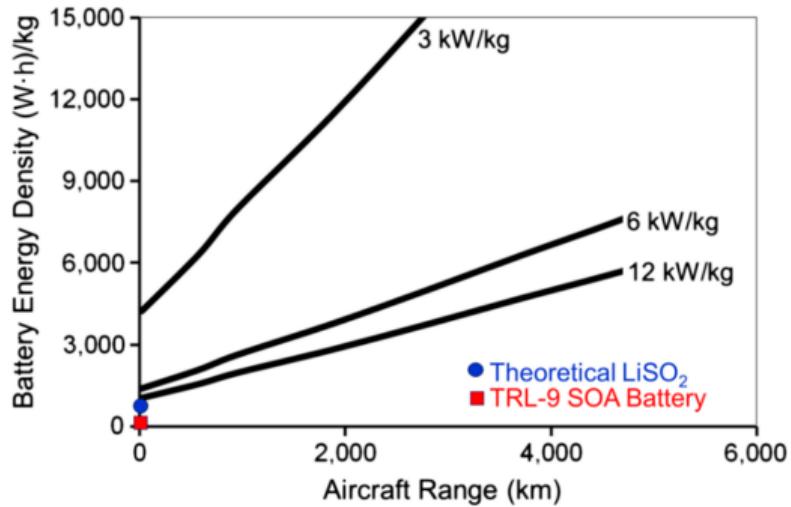


Figure – Un King Air 350 de l'armée royale néerlandaise (page Wikipedia du "Beechcraft Super King Air")

Figure – Energie et puissance embarquées pour différentes catégories de véhicules (référence planche suivante)

## Densité d'énergie nécessaire pour le vol d'un monocouloir (type Airbus A320)



*Usable battery energy density needed vs. range for a single-aisle airliner at three electrical system power-to-weight ratios*

**Figure –** Densité d'énergie nécessaire pour différents distance franchissable et systèmes propulsifs (Considerations for Reducing Aviation's CO<sub>2</sub> with Aircraft Electric Propulsion", Alan-H. Epstein and Steven M. O'Flarity, Journal of Propulsion and Power, Vol. 35, No. 3, May-June 2019)

# L'hydrogène comme solution de stockage de l'énergie ?

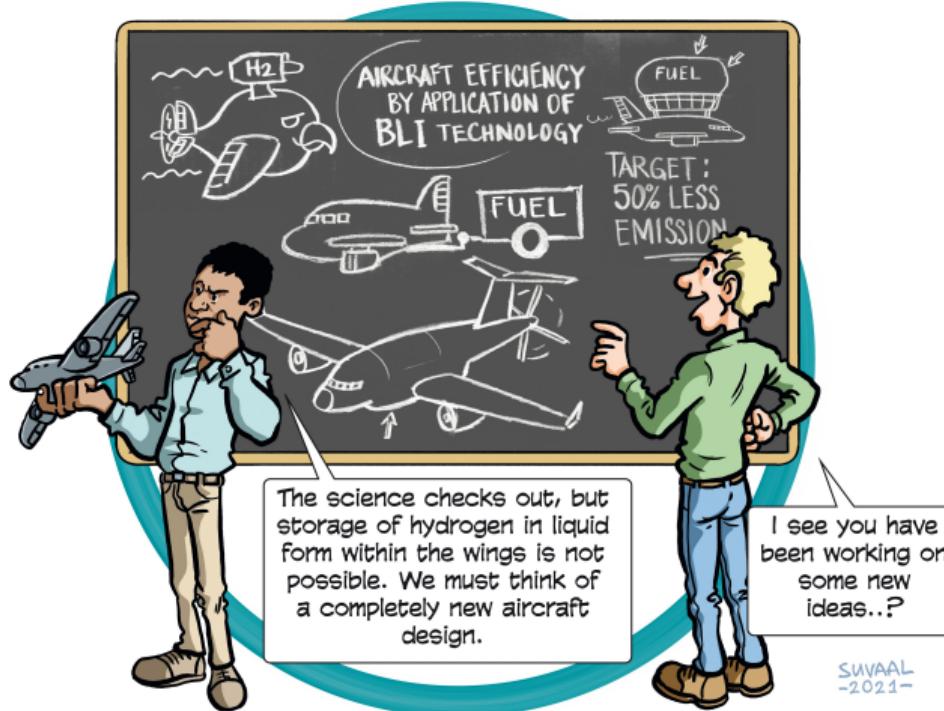


Figure – Extrait de la présentation du projet *Advanced Propulsion & Power Unit*, TU Delft, 2022 ([tudelft.nl](http://tudelft.nl))

# Puisqu'on ne peut plus stocker le carburant dans les ailes...

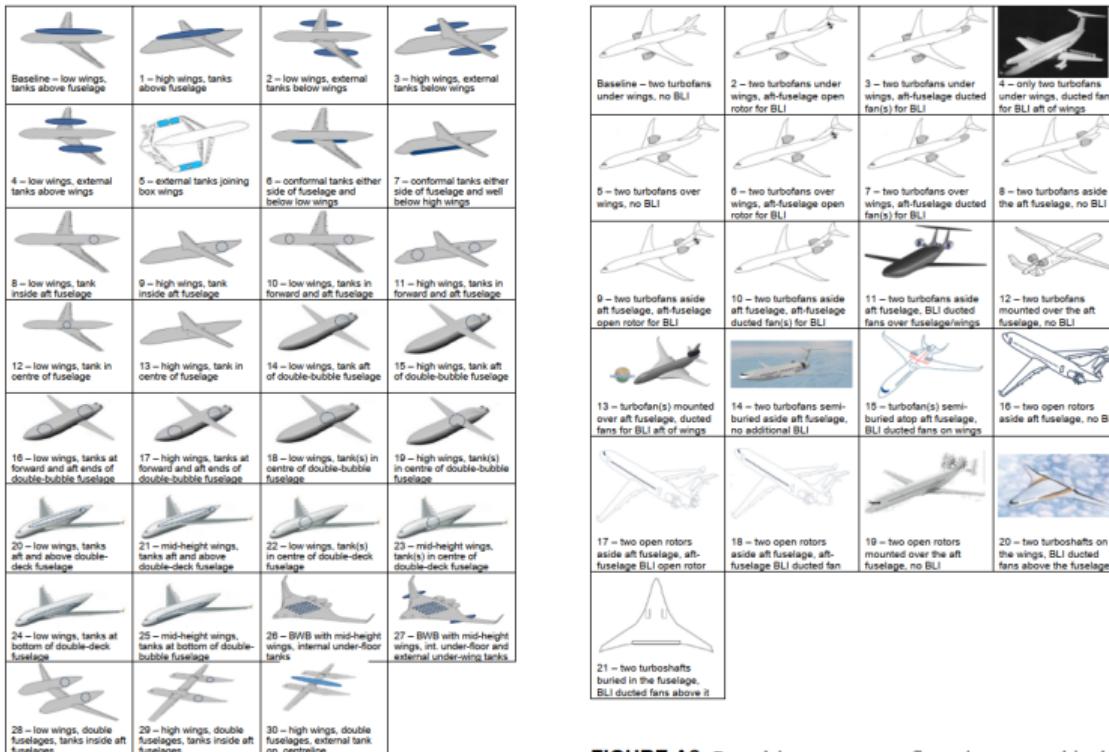


FIGURE A2.2 - Synergistic Technology Combinations for Future Commercial Aircraft using Liquid Hydrogen, 2020.

Figure – Extrait de Rompokos et al., "Synergistic Technology Combinations for Future Commercial Aircraft using Liquid Hydrogen, 2020.

# Evolution du taux de dilution des *turbofans*

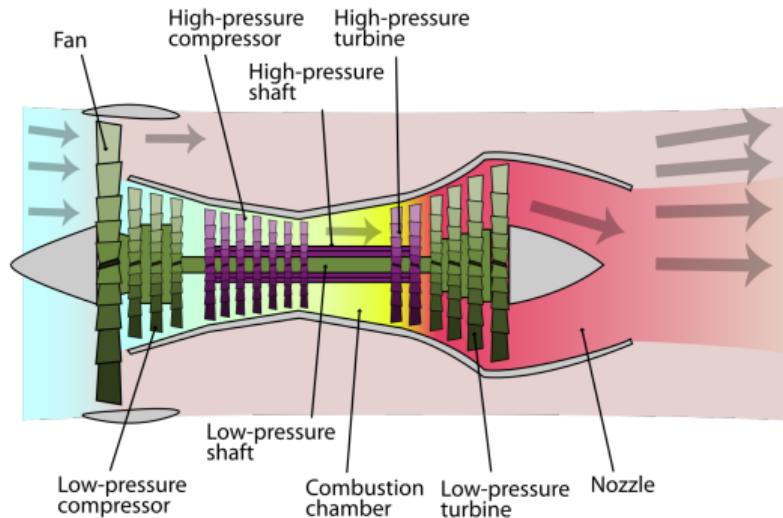


Figure – Représentation schématique du fonctionnement d'un turbofan (d'après K. Aainsqatsi)

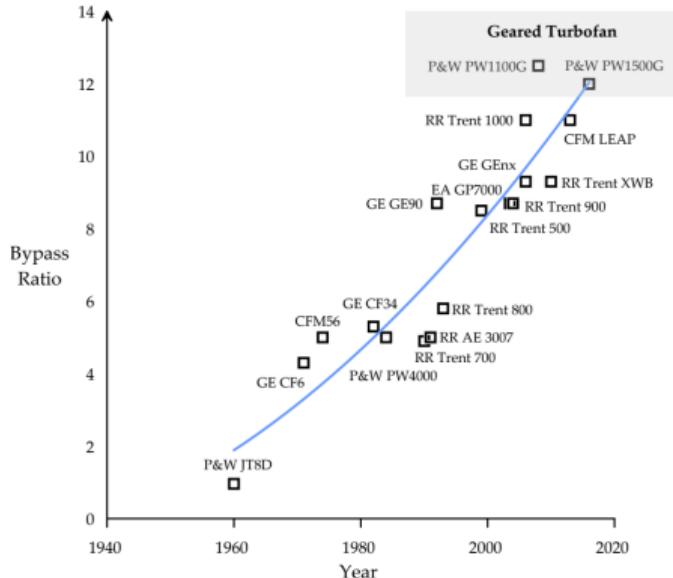


Figure 5. Evolution on the Turbofan Bypass Ratio.

Figure – Evolution du taux de dilution depuis les années 1960 (Alves, Silvestre et Gamboa, "Aircraft Propellers - Is There a Future?", 2020)

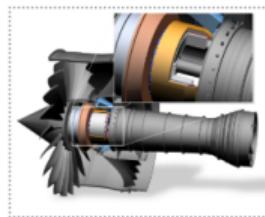
# La «micro-hybridation» des turbofans



On-going, optimized geared turbofan engine for cruise by adding boost power for take off and climb

- Parallel hybrid, 150 passenger
- 2.1 MW machines, 1000 W-hr/kg batteries
- 6% reduction in fuel burn and 2.5% reduction in energy usage

(a) UTRC hGTF



On-going, parametrically optimized engine with hybrid climb & cruise segments

- Parallel hybrid, 150 passenger
- 28% reduction in fuel burn for a 900-nm mission
- Up to a 10% total energy reduction for a 500-nm
- Optimizing for minimum fuel usage predicts an 18 percent reduction in total fleet fuel usage.

(b) R-R LibertyWorks EVE

Figure – La micro-hybridation apparaît comme un opportunité à plus court terme pour l'électrification de la propulsion (extrait du site du NASA Glenn Research center)

# Architectures de propulsion hybride-électriques

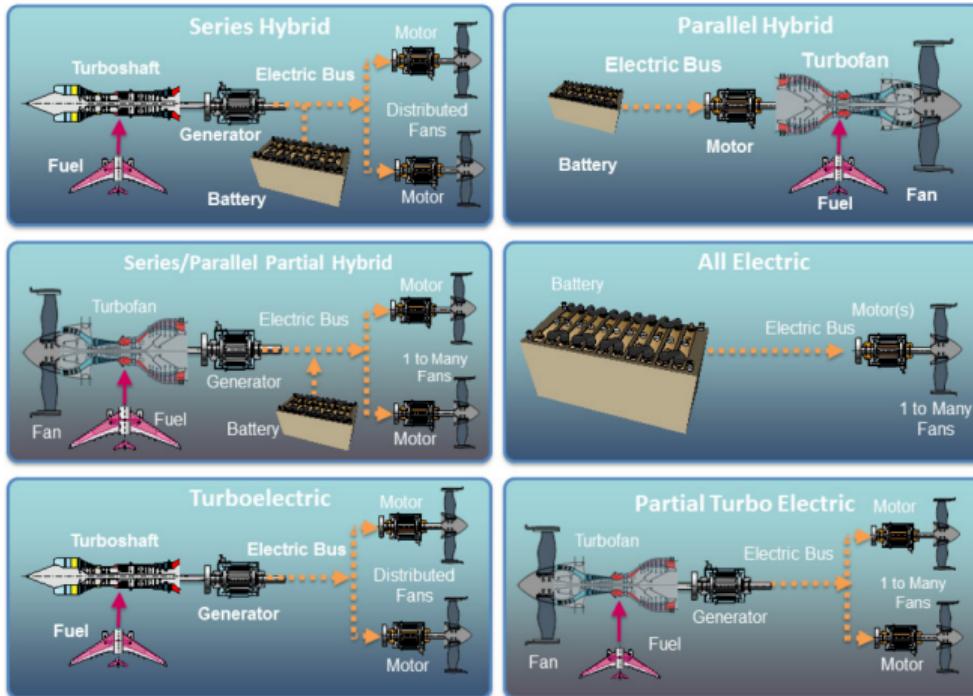


Figure – L'électrification ouvre de nouvelles possibilités pour l'architecture de la chaîne de propulsion (extrait de "Commercial Aircraft Propulsion and Energy Systems Research", document complet disponibles sur [nap.nationalacademies.org](http://nap.nationalacademies.org))

# L'électrification et les effets d'installation

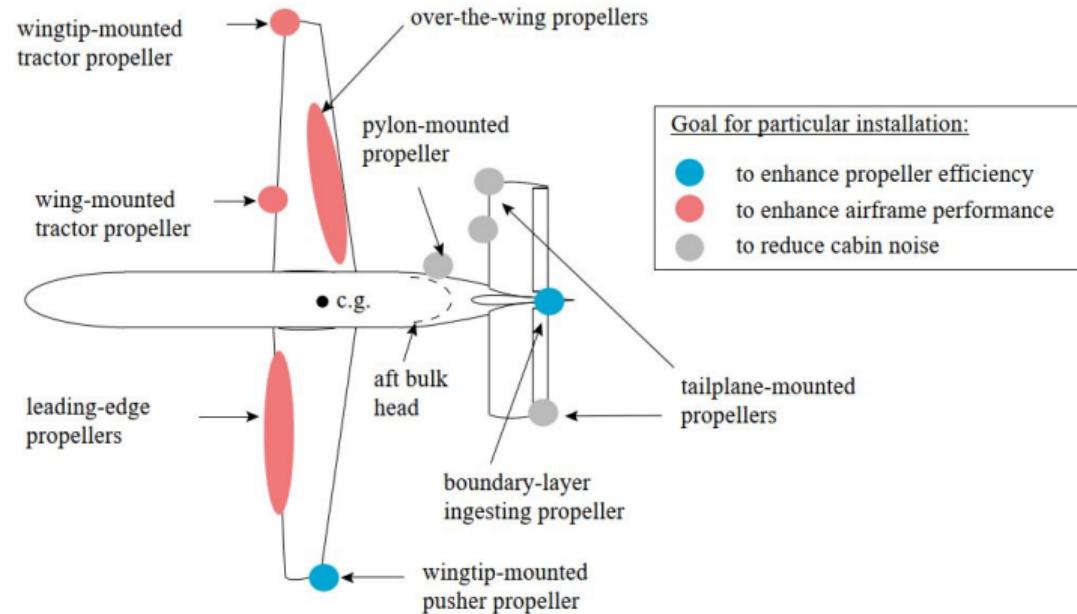


Figure 1.4: Examples of propeller integration at configuration level with main goals annotated.

**Figure – Extrait de van Arnhem, "Unconventional Propeller-Airframe Integration for Transport Aircraft Configurations", 2022**

La thermique peut contraindre les performances et le degré d'hybridation pendant le vol

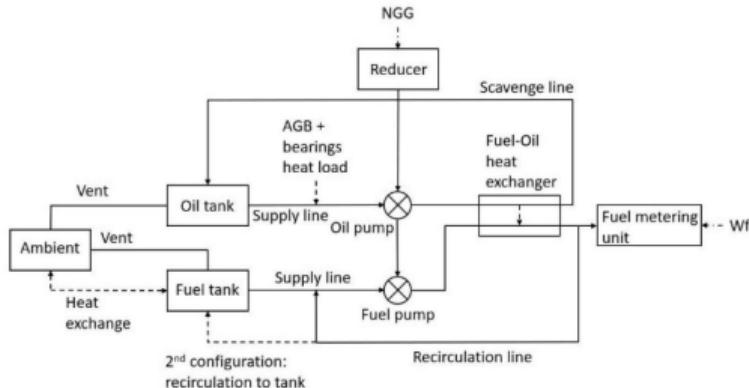
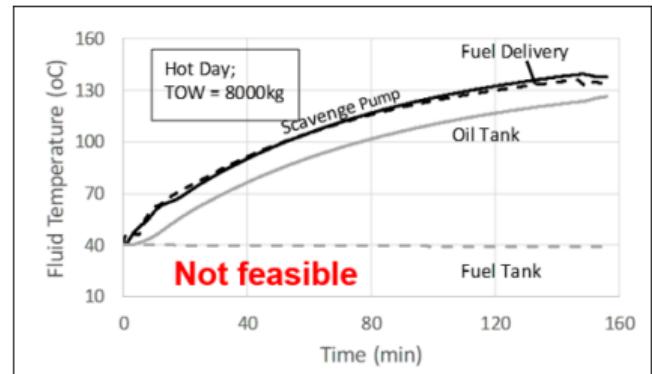


Figure 8: Tank recirculating FOS

(a) Exemple de système avec recirculation du carburant.



(b) Influence du profile de mission et du degré d'hybridation sur la thermique.

Figure – Extrait de Roumeliotis *et al.*, "Integrated Systems Simulation for assessing fuel thermal management capabilities for hybrid-electric rotorcraft", 2020. (GT2020-15107)

# Les français et l'avion

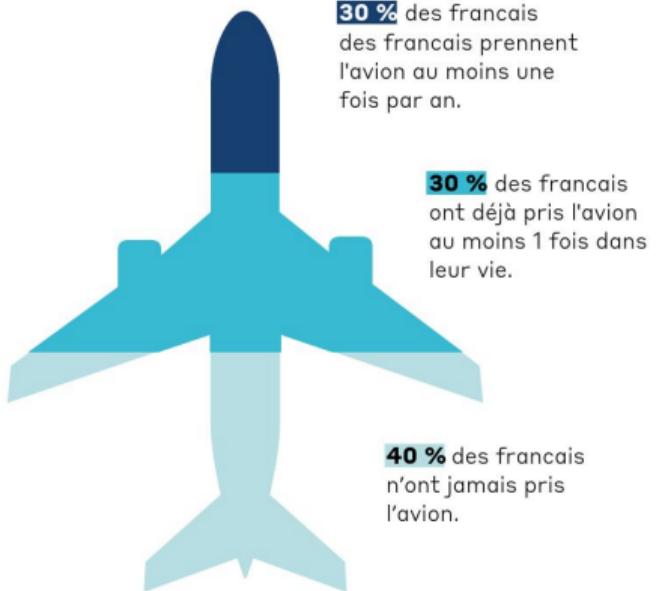
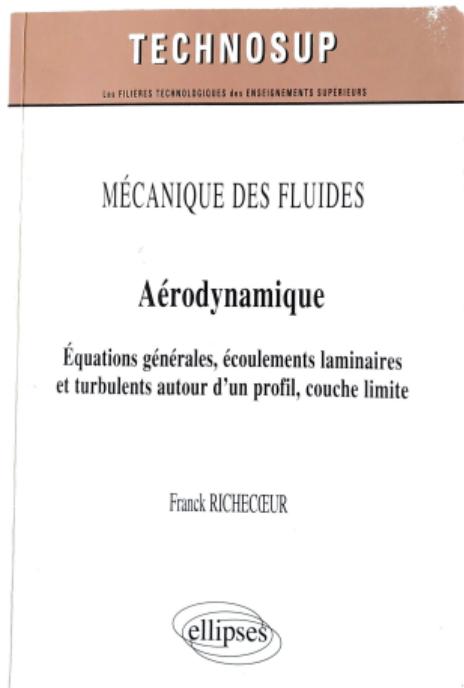
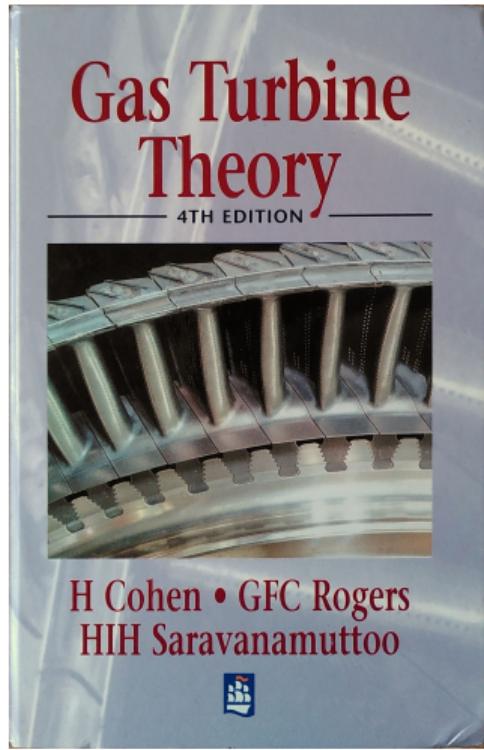
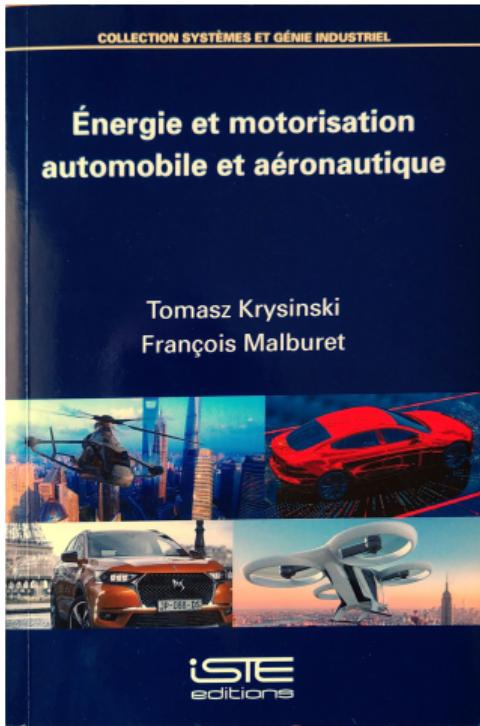


Figure – Extrait du rapport «Pouvoir voler en 2050, quelle aviation dans un monde contraint» du 03 mars 2021 ([theshiftproject.org](http://theshiftproject.org))

Pour aller plus loin



Electrification des véhicules aériens  
Mastère Spécialisé Expert en Véhicules Electrifiés  
INSA Lyon

sylvain.pluchart@gmail.com

3 Février 2023