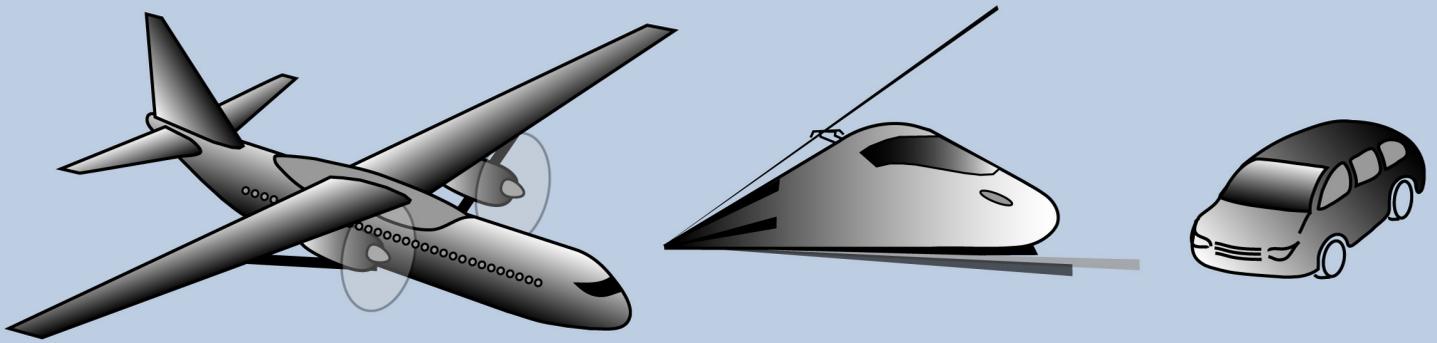
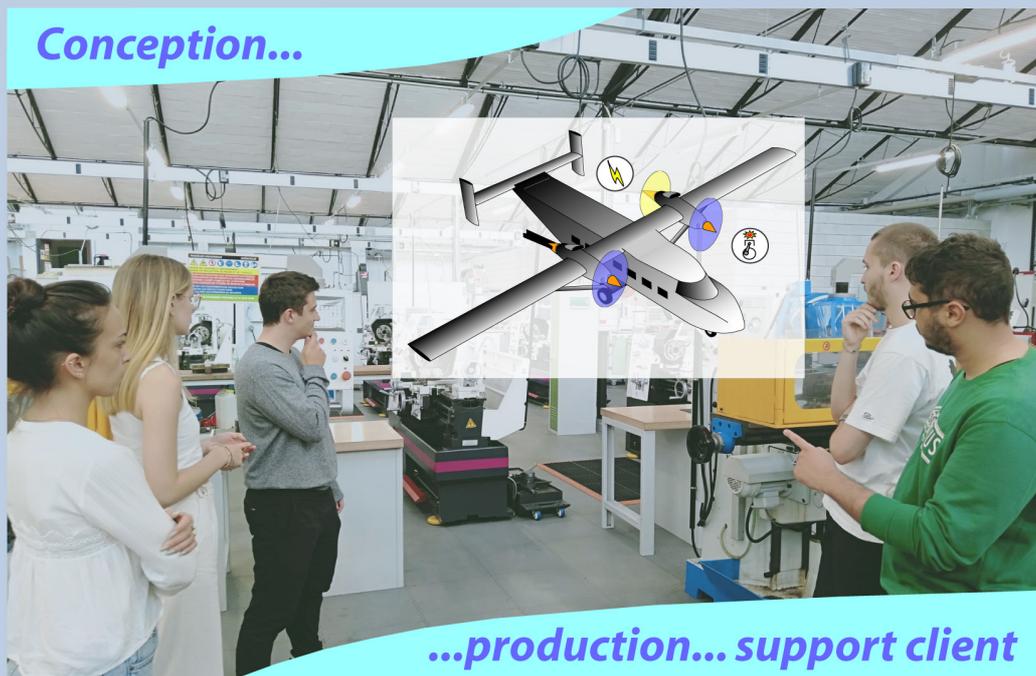


Colloque

Les transports de demain : Quels ingénieurs pour de nouvelles ambitions ?



Musée de l'Air et de l'Espace - Paris le Bourget
18 janvier 2024 de 8h30 à 18h30



Ce colloque est organisé par :



Inscriptions, site de la 3AF :

<https://www.3af.fr/agenda/les-transports-de-demain-quels-ingenieurs-2282>

Colloque

Les transports de demain: quels ingénieurs pour de nouvelles ambitions?

Musée de l'Air et de l'Espace - Paris le Bourget 18 janvier 2024 de 8h30 à 18h30

Ce colloque est organisé par :



8h Accueil

8h30 Allocutions de bienvenue 8h30-9h00

Anne-Catherine ROBERT-HAUGLUSTAINE, Directrice du Musée de l'Air et de l'Espace.

Bruno SERIO, Directeur des Études du Cursus Master Ingénierie Aéronautique Transports et Énergétique, Université Paris Nanterre (CMI-ATE).

Louis LE PORTZ, Président de l'Association Aéronautique et Astronautique de France (3AF).

Vincent CAPO CANELLAS, Sénateur de Seine Saint Denis.

Chairman des sessions

Gérard LARUELLE, Ancien VP recherche, ASTRIUM.

9h00-10h20 Session 1- Futur du transport

- **RISE (Open Fan) – L'innovation de rupture sur les architectures de moteurs.**
François CARUEL, Directeur de l'Audit Technique et Sponsor de la Filière Expertise, Safran Aircraft Engines.
- **Des pistes pour les moyens de transport du futur.**
Michel KIEFFER, Chargé de la spécialisation Aéronautique, Transport et Énergétique du CMI-ATE.
- **Vers une aviation décarbonée, les pistes de recherche de l'ONERA.**
Sébastien DEFOORT, Responsable de l'équipe "conception multidisciplinaire et avant-projets", ONERA et Enseignant en conception avion, ISAE-SUPAERO.
- **Enjeux et perspectives des transports d'ici à 2050.**
Anne de CAGNY, Directrice de la Prospective, ESTACA.

10h20-10h50 Pause-café

10h50-12h10 Session 2- Avants projets rigoureux et pluridisciplinarité

- **Pour des avant-projets innovants et fructueux.**
François CARUEL, Directeur de l'Audit Technique et Sponsor de la Filière Expertise, Safran Aircraft Engines.
- **L'acculturation des futurs ingénieurs aéronautiques aux défis de la transition énergétique.**
Jean Luc CHARRON, Président de la Fédération Française Aéronautique (FFA).
- **Transversalité : approches sécurité et environnementale.**
- **Nicolas CAZALIS**, Directeur Général Adjoint, ENAC.
- **Spécifications et maîtrise des risques.**
Jacques RENVIER, Ancien VP CFM International, Safran Aircraft Engines.

12h10-13h30 Buffet

13h30-14h30 Session 3- Démonstrations critiques, développements rapides et efficaces, intégration des équipements

- **Nouvelles dimensions de l'ingénierie à l'heure du NewSpace.**
Jérôme VILA, Chef de Programme chez MaiaSpace, Académicien en Ingénierie Spatiale à l'IAA (International Institute of Astronautics).
- **Réalisations industrialisées dans un esprit de simplification et d'économies d'énergies.**
Alexandre Sabéné, Alexandre Fernandes Martins, Camille Barbier, étudiants CMI-ATE.
- **Décarbonation des transports : entre acceptation sociale et faisabilité technique.**
Michael Addad, Directeur des Innovations et des Partenariats, Alstom Group.

14h30-15h30 Session 4- La formation des acteurs : clé de l'innovation et de la ré industrialisation

- **Transmission du savoir par l'histoire.**
Mathieu BEYLARD, Responsable Planétarium, Musée de l'Air et de l'Espace.
- **"Do to think" à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM).**
Hugues BAUME, Ingénieur-designer, Enseignant-Chercheur en design-industriel, Formation Mécanique et Ergonomie de l'UTBM.
- **La formation des étudiants par les partenariats. La simplification des produits et des organisations, clé de la compétitivité des entreprises industrielles.**
Claude WALTER, Dirigeant de la société Rythmes & Sons, partenaire industriel des projets du CMI-ATE.

15h30-16h00 Pause-café

16h-17h Session 5- Expériences de grands projets.

- **A 380, quelques surprises pendant la mise au point.**
Claude LELAIE, Ancien Directeur Des Essais En Vol, Airbus.
- **Maîtrise des grands programmes.**
Jean-Claude HIRONDE, Ingénieur en Chef du Rafale et du Falcon F7X, Dassault Aviation.

17h-18h00 Table ronde, chairman : Michel POLACCO, journaliste aviateur.

Lionel De La SAYETTE, Ancien Directeur Général Technique, Dassault Aviation.

Jean-Michel DUREPAIRE, Directeur Général, ESTACA.

Jacques RENVIER, Ancien Senior VP CFM International, Safran Aircraft Engines.

Raoul ROLAND, Technical Expertise Director, Alstom Group.

Bruno SERIO, Directeur des études du Coursus Master Ingénierie Aéronautique Transports et Énergétique (CMI-ATE).

Patrick TEJEDOR, Président de EuroSae, Président de la Commission Éducation Formation de l'Académie de l'Air et de l'Espace.

18h-18h20 Débat.

18h20-18h30 Conclusion.

18h30 Fin du colloque.

Les transports de demain: quels ingénieurs pour de nouvelles ambitions?

Ce colloque est organisé par la 3AF (Association Aéronautique et Astronautique de France) en liaison avec l'Université Paris Nanterre et le musée de l'Air et de l'Espace du Bourget.

Le contexte actuel évolue fortement pour la concrétisation de nos transports de demain, qu'ils soient terrestres, navals ou aériens. Ces nouveaux transports doivent répondre aux attentes sociétales sur les plans sécurité, environnementaux, apporter une forte réduction de la production de CO2. Les exigences économiques et formations correspondantes doivent maintenant être très intimement associés aux avancées écologiques.

L'optimisation du bilan environnemental multicritères sur le cycle de vie complet des véhicules et de leurs composants sera une clé importante de notre réussite comme la recherche de la meilleure efficacité énergétique.

Toutes ces ambitions, fort motivantes pour les jeunes et leur avenir, imposent de multiples progrès dans les outils comme dans les méthodes de travail : de la conception à la maintenance, en passant par la production. Deux points seront particulièrement traités : la gestion des avants projets et la recherche de la simplification.

Industriels, formateurs, étudiants, services officiels, ... seront au cœur des échanges au Musée de l'Air et de l'Espace du Bourget le 18 janvier 2024.

Comité scientifique & organisation.

Mathieu BEYLARD, Responsable Planétarium, Musée de l'Air et de l'Espace.

Michel KIEFFER, Chargé de la spécialisation Aéronautique, Transport et Énergétique, Université Paris Nanterre (CMI-ATE).

Gérard LARUELLE, Ancien VP recherche, ASTRIUM.

Alain MARIANNE, Marine & Offshore Industry Solution Technical Senior Manager, Dassault Systèmes.

Jacques RENVIER, Ancien VP CFM International, Safran Aircraft Engines.

Bruno SERIO, Directeur des Études du Coursus Master Ingénierie Aéronautique Transports et Énergétique, Université Paris Nanterre (CMI-ATE).

Inscription sur le site de la 3AF.

<https://www.3af.fr/agenda/les-transports-de-demain-quels-ingenieurs-2282>

Prix d'inscription : 70 €.

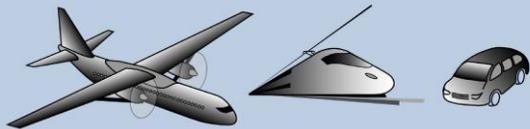
Venue au Musée de l'Air et de l'Espace.

<https://www.museeairespace.fr/visiteurs/acces/>

3, Esplanade de l'Air et de l'Espace.

93350 Le Bourget





**Les transports de demain :
Quels ingénieurs pour de
nouvelles ambitions ?**

MUSÉE
AIR +
ESPACE
AÉROPORT PARIS - LE BOURGET

Université
Paris Nanterre
UFR SITEC
Cursus Master Ingénierie Aéronautique
Transports et Energétique (CMI-ATE)

3AF
Association Aéronautique
et Astronautique de France

Louis LE PORTZ
PRÉSIDENT DE 3AF

DEPUIS SA CRÉATION, 3AF EST AU SERVICE DES FILIÈRES AÉRONAUTIQUE, SPATIAL ET DÉFENSE



SA MISSION : CRÉER UN LIEN PRODUCTIF ENTRE INDUSTRIELS, INSTITUTIONNELS ET MONDE ACADÉMIQUE

QUATRE “PILIERS” OPÉRATIONNELS

- 1) COMMISSIONS TECHNIQUES
- 2) COLLOQUES ET CONFÉRENCES
- 3) GROUPES RÉGIONAUX
- 4) PRÉSENCE INTERNATIONALE



NOS VALEURS



PRIORITÉ À LA PASSION, AUX TALENTS ET AUX RÉALISATIONS

3AF MET EN AVANT LES FEMMES ET LES HOMMES QUI
LA COMPOSENT.

UNE PART IMPORTANTE EST AINSI ACCORDÉE À LA
RECONNAISSANCE DES TALENTS ET DES PARCOURS,
UNE DÉMARCHE QUE CONCRÉTISE CHAQUE ANNÉE
L'ATTRIBUTION DE GRADES SENIOR OU ÉMÉRITE – LES
ÉQUIVALENTS DE MEMBER, FELLOW ET COMPANION
CHEZ NOS HOMOLOGUES ANGLO-SAXONS.

L'ASSOCIATION COMPTAIT AINSI, À L'ÉTÉ 2023, 350
MEMBRES SENIORS ET 248 MEMBRES ÉMÉRITES.



dSPACE



akira
www.akira-tech.com

AUBERT & DUVAL



AHG
ATELIERS DE LA HAUTE-GARONNE
FACTORY PERFORMANCE IN INNOVATION



Trescal

IMA
INGÉNIERIE MAINTENANCE SYSTÈMES
AÉRONAUTIQUE ET TRANSPORTS

cnès
CENTRE NATIONAL
D'ÉTUDES SPATIALES

AIRBUS



SAFRAN



AIRBUS
HELICOPTERS



AIRBUS
DEFENCE & SPACE

**3AF EST UNE ASSOCIATION À BUT NON LUCRATIF
RECONNUE D'UTILITÉ PUBLIQUE**

**ET RASSEMBLANT PLUS DE
60 ENTREPRISES**

REJOIGNEZ-NOUS : WWW.3AF.FR

NAVAL
GROUP

MIDELIA



DASSAULT

THALES



GDTECH
engineering

DGA

dgac

GIFAS

arianeGROUP

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Siemens PLM Software
SIEMENS

inpi
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ
INDUSTRIELLE

INP ENSEEIHT

air training
ACADEMY

INSTITUT
P

CCI FRANCE

LAUAK

Sopemea
opavo

ESTACA
ÉCOLE D'INGÉNIEURS

Roxel
Propulsion systems

Cité de
l'espace
TOULOUSE

ESTIA
INSTITUTE OF TECHNOLOGY

EUROSAT
ADVANCED TRAINING

MEGGITT
smart engineering for
extreme environments

isae
INSTITUT SUPÉRIEUR DE L'AÉRONAUTIQUE ET DE L'ESPACE
EN SMA

EPF
Ecole d'ingénieurs

IMPT
INSTITUT DE MÉCANIQUE
DES FLUIDES DE TOULOUSE

INSA
ROUEN NORMANDIE

GROUPE
isae

CABINET
Boettcher
CONSILIER EN SÉCURITÉ INDUSTRIELLE

HEXCEL

Présentation 3AF - FR

PCB PIEZOTRONICS

PRISME
Laboratoire Polydisciplinaire de Recherche
supérieure des Systèmes, Nouvelles Energies

POLYTECH
ORLÉANS

IPSA
7 PARIS
TOULOUSE

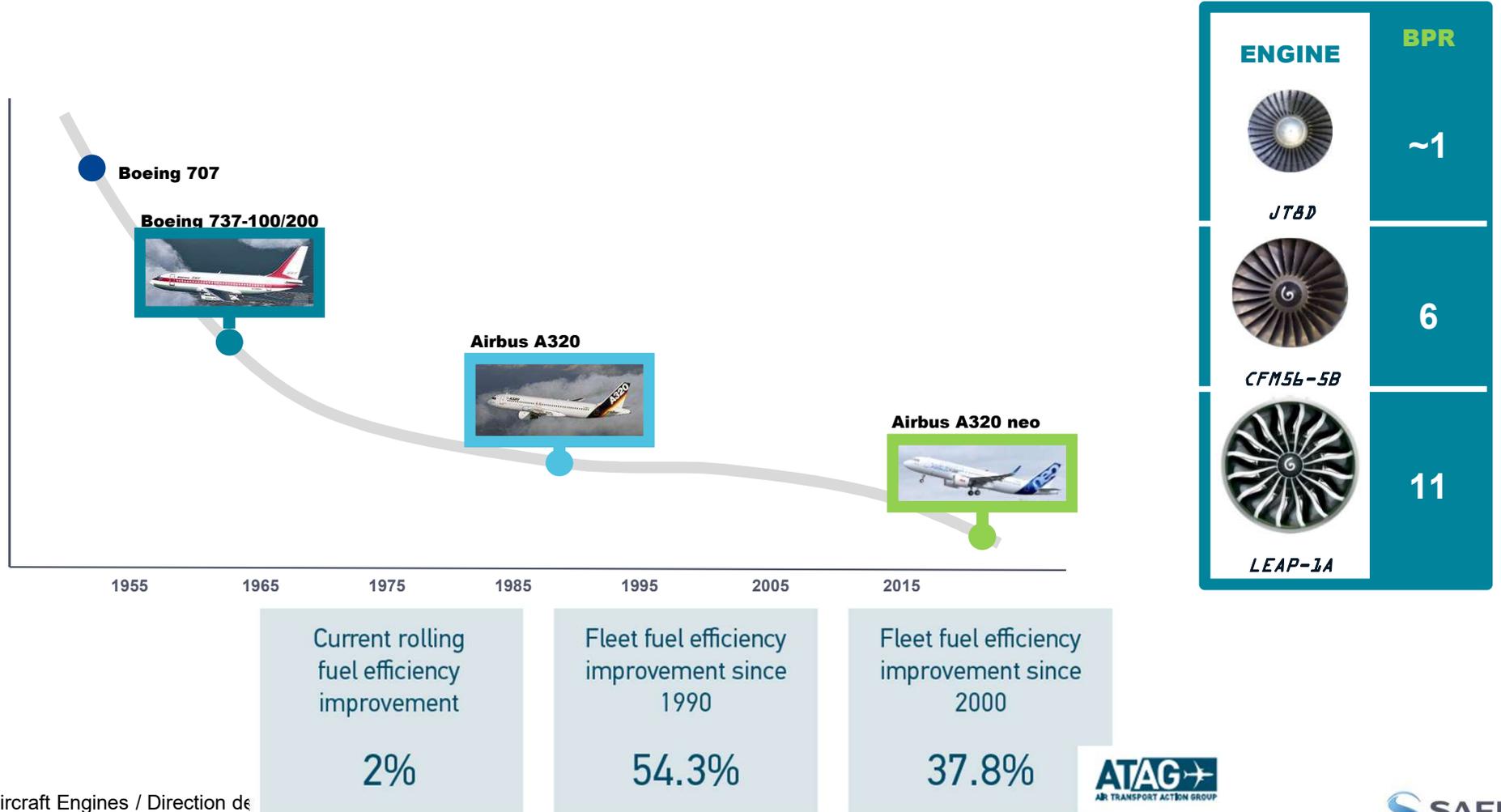
AIRCRAFT ENGINES

RISE – L'INNOVATION DE RUPTURE SUR LES ARCHITECTURES DE MOTEURS

—
Colloque 3AF
Les Transports de Demain :
Quels Ingénieurs pour de nouvelles ambitions?
18 Janvier 2024



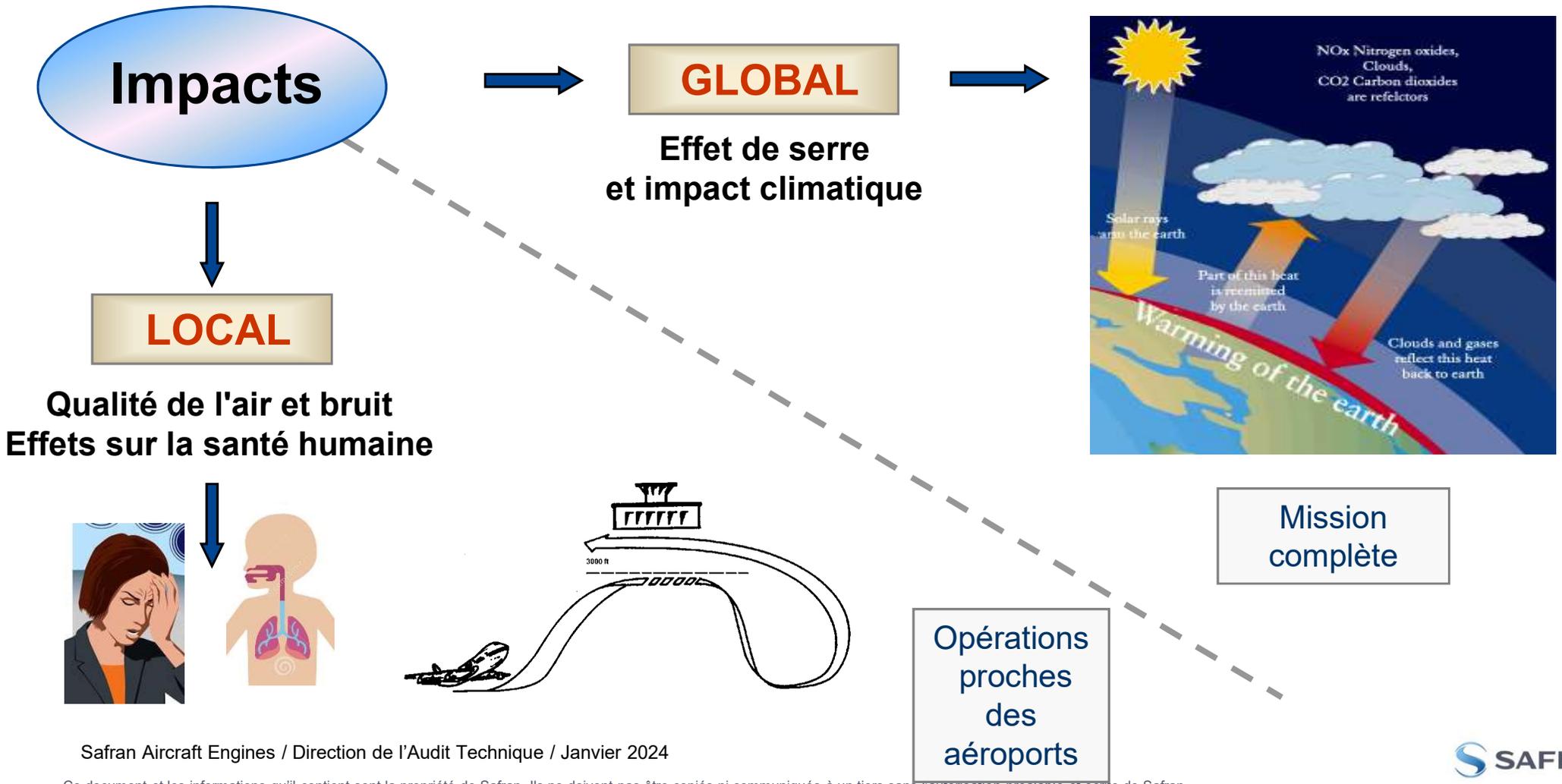
La consommation unitaire d'un avion a été divisée par 5 en 60 ans 70% du fait du moteur

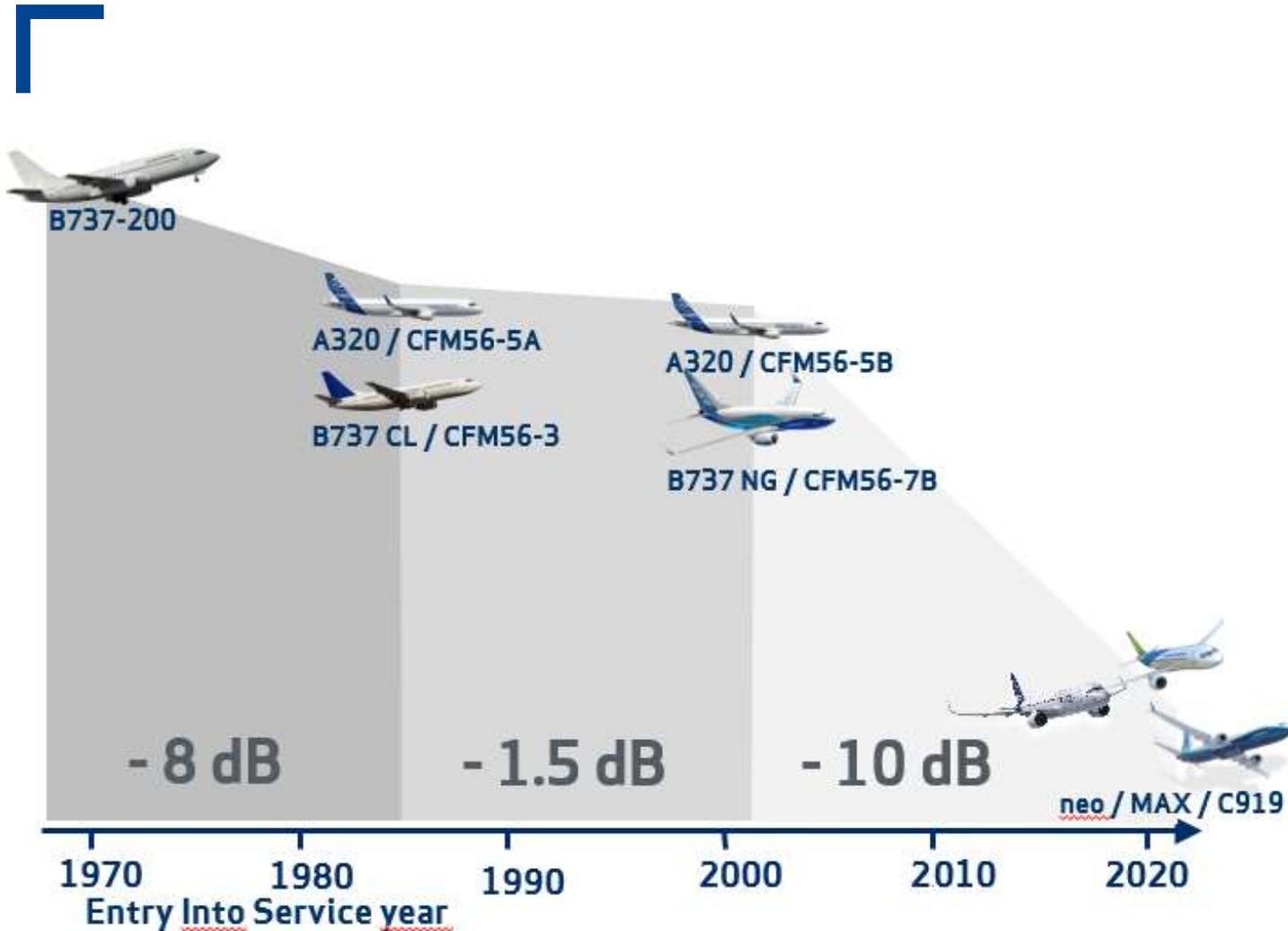


Safran Aircraft Engines / Direction de



Les effets environnementaux de l'aéronautique sont à 2 échelles

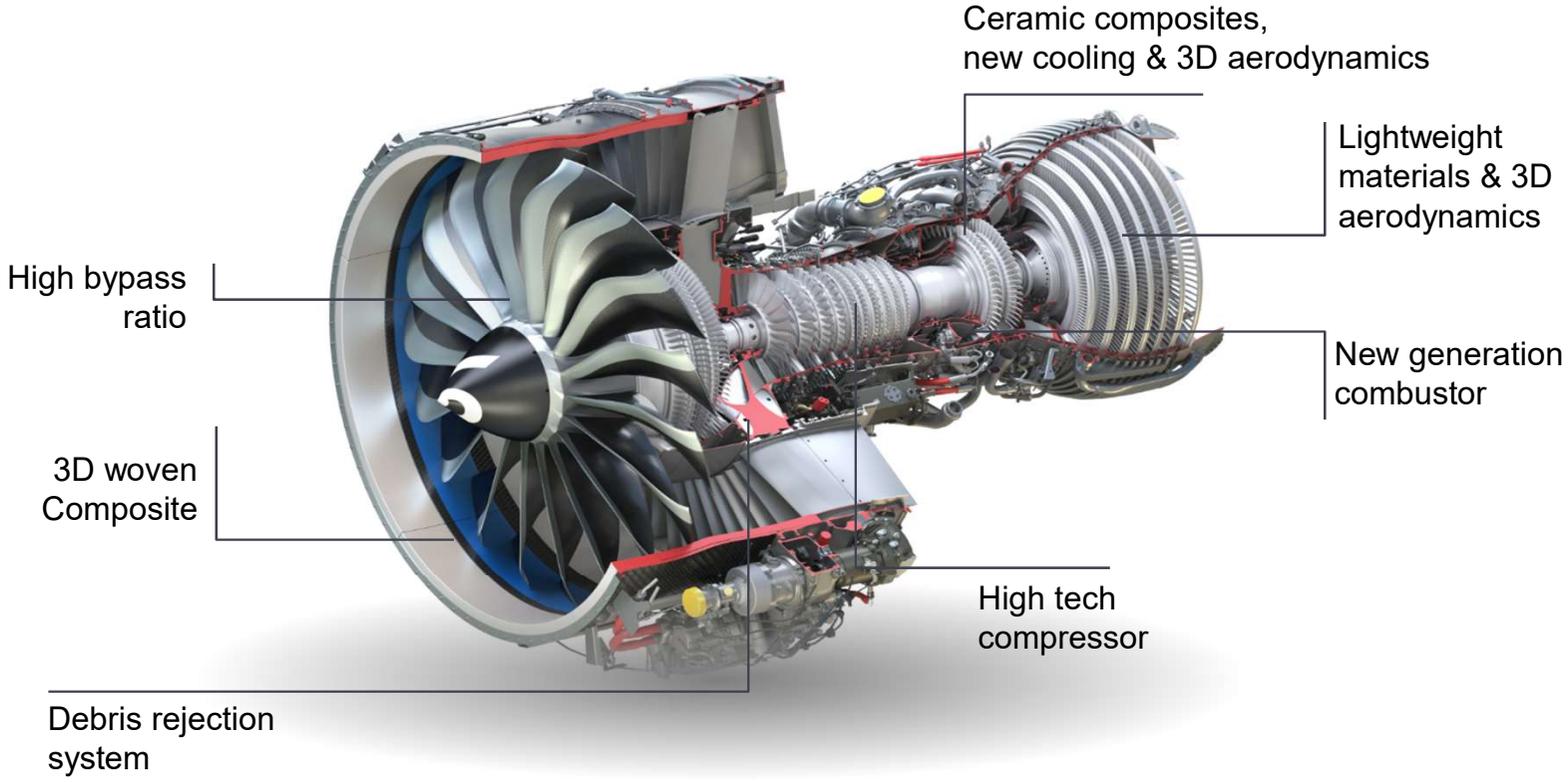




Particules



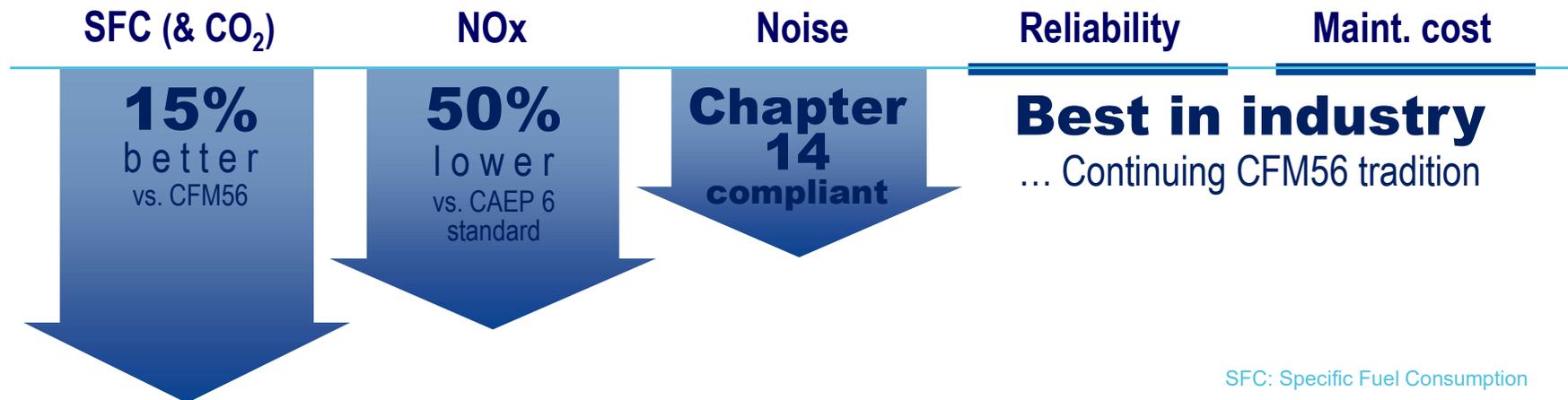
Plus en détail : le LEAP



Le LEAP à l'Etat de l'Art



LEAP

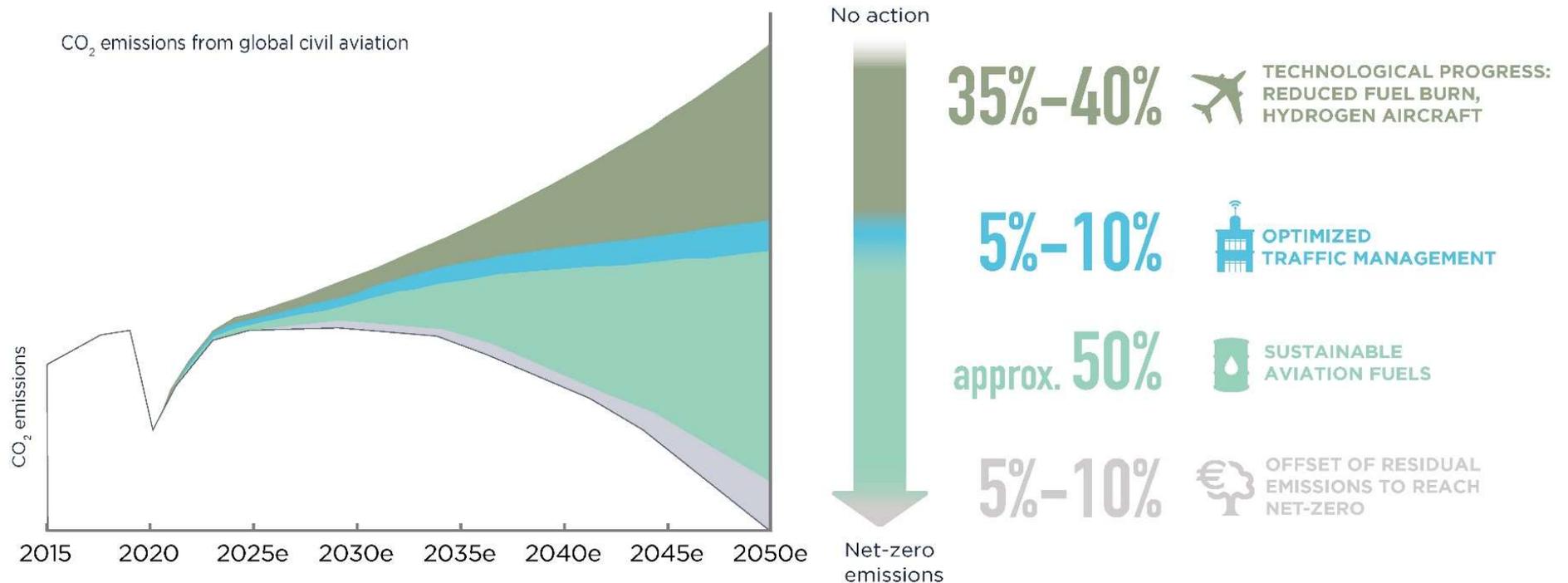


SFC: Specific Fuel Consumption

Moins de carburant, moins d'émissions.

La vision Safran pour décarboner l'aéronautique

AN AMBITIOUS COMMITMENT TO REACH NET-ZERO CARBON EMISSIONS BY 2050



Safran Aircraft Engines / Direction de l'Audit Technique / Janvier 2024

Ce document et les informations qu'il contient sont la propriété de Safran. Ils ne doivent pas être copiés ni communiqués à un tiers sans l'autorisation préalable et écrite de Safran.

Notre stratégie climat et nos engagements

KPI



Engagements

01 Focaliser l'innovation sur la décarbonation



Cibles

75%
de la R&T auto financée
dédiée à améliorer la
performance environnementale
de nos produits

-42.5%
Scope 3 émissions de nos produits /
Passager km en 2035 vs 2018

Aéronautique net zéro en 2050



Résultats 2022

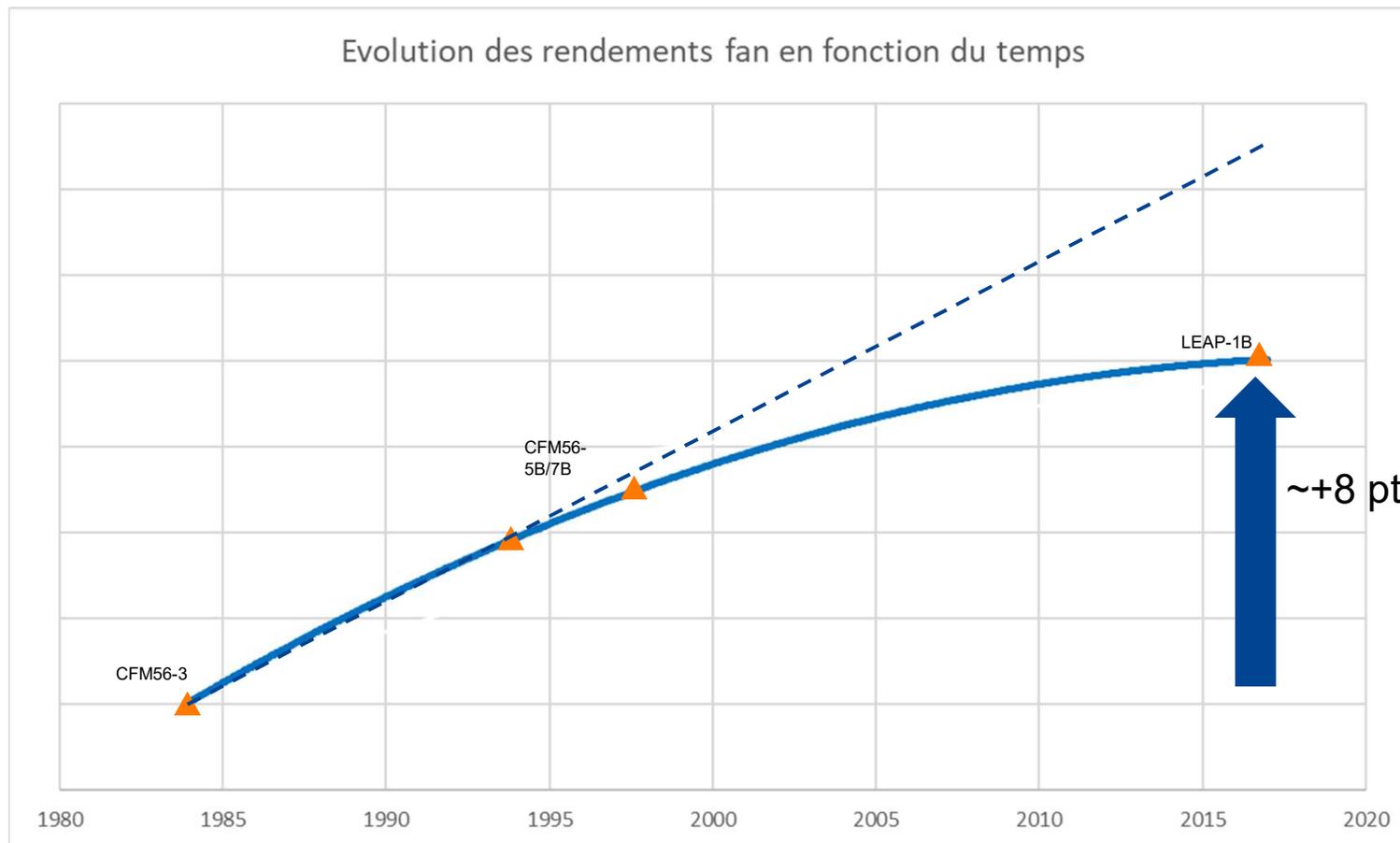
81%

-23,7% CO₂/p.km

Optimiser l'innovation et l'excellence opérationnelle

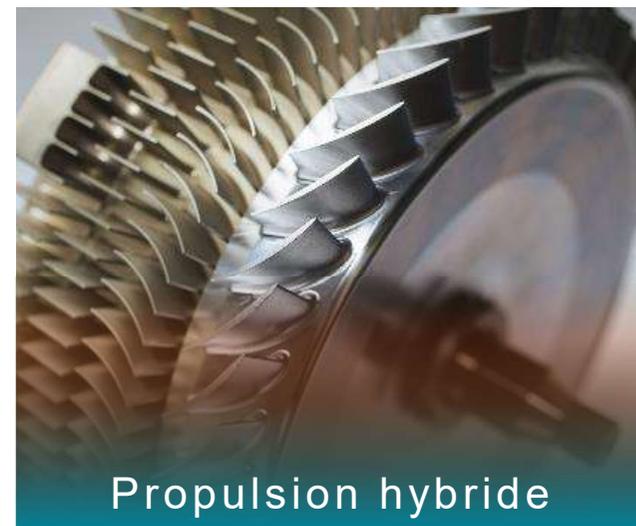
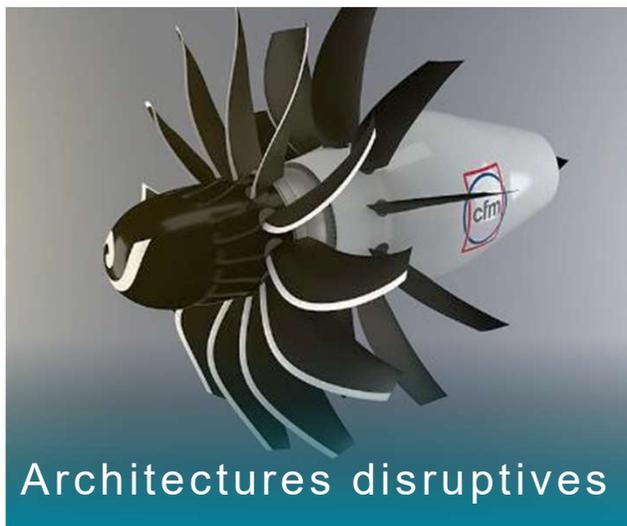
Evolution des Rendements Isentropiques Fan

- Les rendements composants ne pourront plus évoluer de manière à amener une amélioration significative de la consommation carburant



Les trois leviers pour décarboner déjà entrepris

Technologies innovantes
pour contribuer à l'aéronautique net zéro en 2050



RISE

Les ambitions en termes de performance



-20%

CONSUMMATION DE CARBURANT*

-20%

ÉMISSIONS DE CO₂**



FIABILITÉ



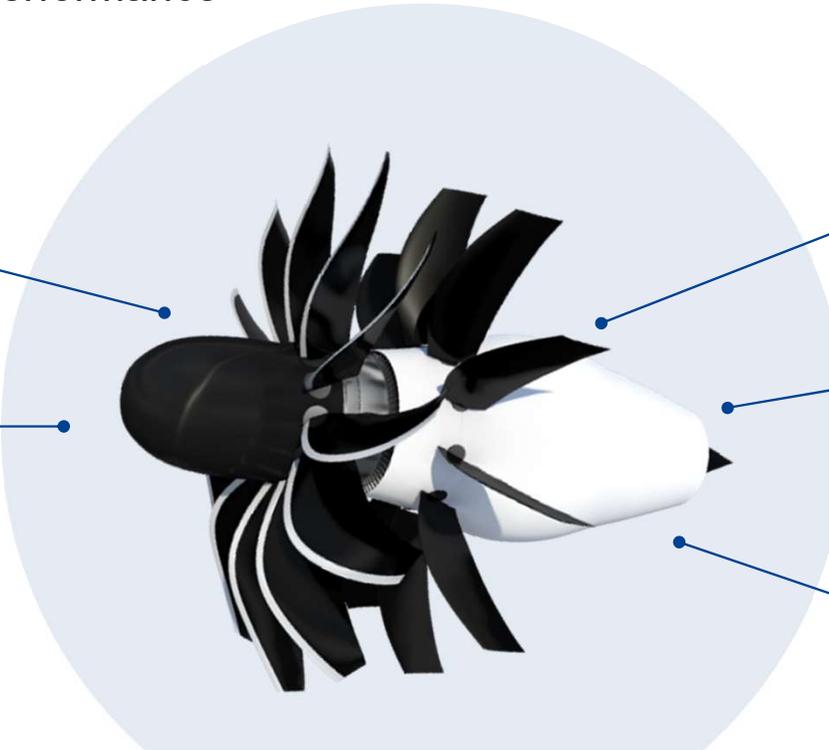
COÛT DE POSSESSION

En ligne avec les standards CFM



ACOUSTIQUE & ENVIRONNEMENT
Cohérent des prochaines normes

Compatible carburants durables (SAF) / hydrogène liquide (LH2)



*par rapport au moteur LEAP
**jusqu'à -80% avec les SAF



ÉTAPE CLÉ

» LANCEMENT D'UNE PHASE DE MATURATION DES TECHNOLOGIES ET DE DÉMONSTRATION DE L'ARCHITECTURE EN AMONT D'UN LANCEMENT PRODUIT

Les évolutions des grandes fonctions

■ L'Open Fan

- > Flux d'air non caréné
- > Acoustique sans traitement intégré
- > Chargement aérodynamique variable avec l'attitude avion

■ L'hybridation

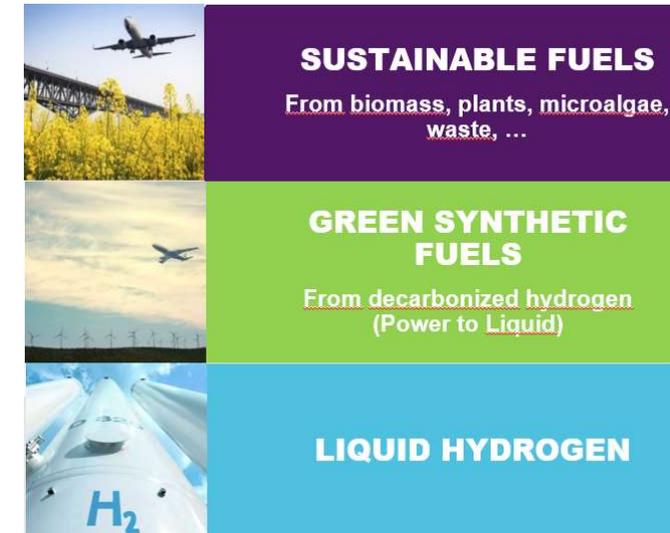
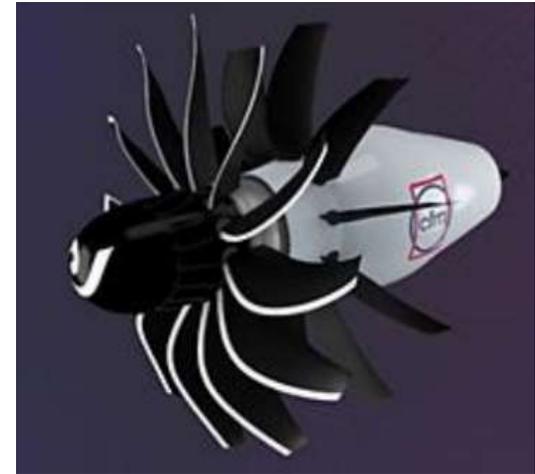
- > Gain Fuel Burn et potentiellement opérabilité
- > Interactions avec les systèmes avion

■ Les nouveaux carburants

- > Hydrogène : Conditions de fonctionnement différentes du spatial. H2 liquide, gestion du passage au gazeux, gestion des fuites
- > SAF : Durée de vie des équipements, Capacités de réallumage en vol

■ L'intégration aux nouvelles architectures et les impacts opératoires

- > Acoustique cabine, impact des modes de panne moteur par exemple en cas d'aile soufflée, blindage cabine, ...
- > Gestion des phases ralentis (Optimum de taux de descente)

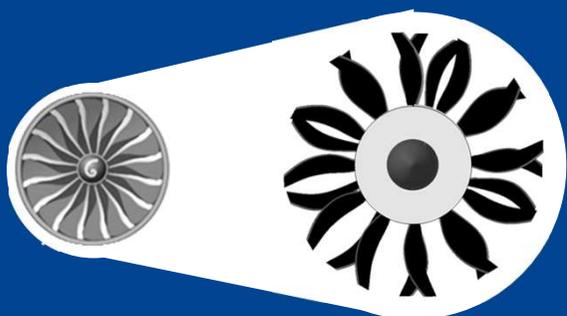


OPEN FAN

Des challenges en matière d'environnement, d'installation et de certification



LEAP vs OPEN FAN



x2

DIAMÈTRE FAN

(156" – 4M Vs 78" – 2.0M)

CHALLENGES D'INTÉGRATION AVION

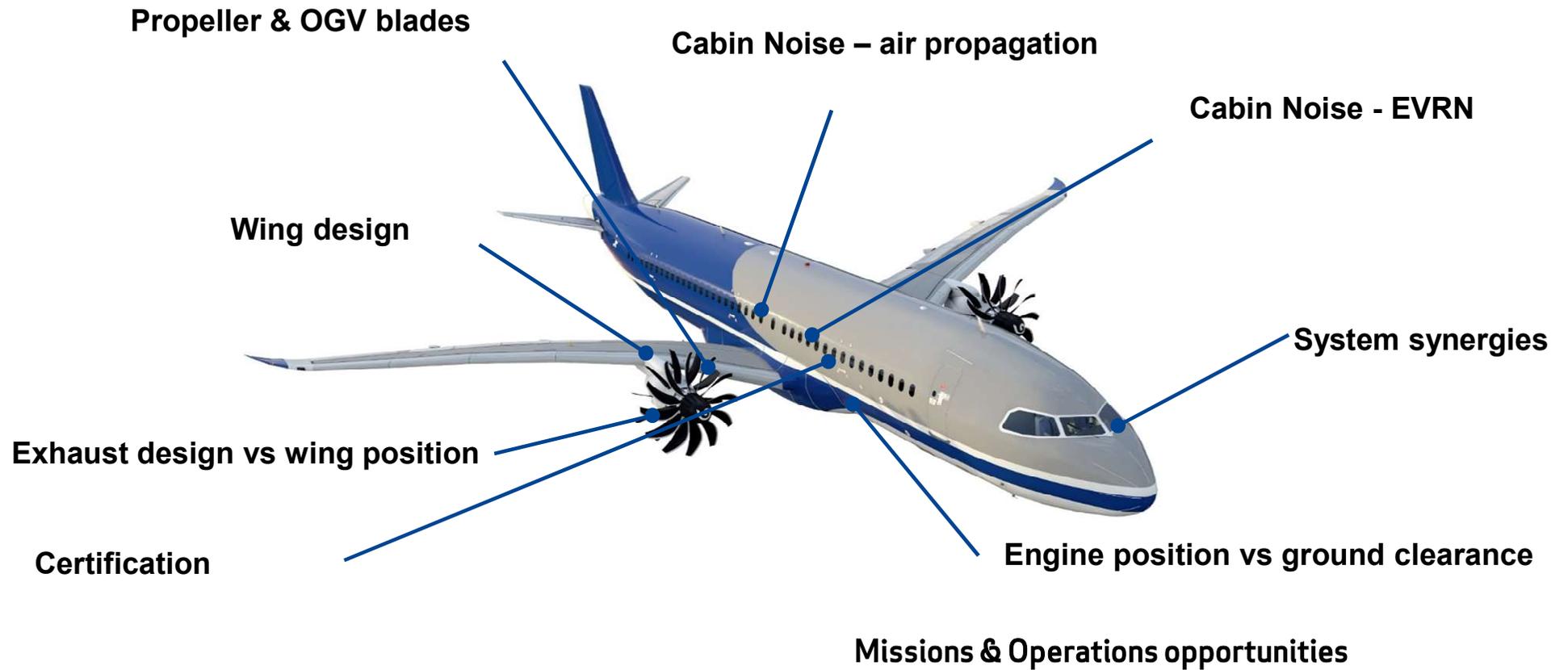
Études Avionneurs pour optimiser le couple Avion / Propulsion



- Aérodynamique / Acoustique / Structures
- Echanges Autorités de Certification

ARCHITECTURE OPEN FAN

Effets d'installation travaillés avec les avionneurs





Colloque

Les transports de demain :
quels ingénieurs pour de
nouvelles ambitions ?

—

Musée de l'Air et de l'Espace
Paris le Bourget, jeudi 18 janvier 2024

*Des pistes pour les moyens de transport du
futur - Michel Kieffer*

 **Université
Paris Nanterre**

1- Attentes et acceptations

Transition énergétique

Phase 1-

Les déclarations d'intentions...



...donnent bonne conscience

Phase 2-

Ce qu'il est possible de faire sans changer nos habitudes...

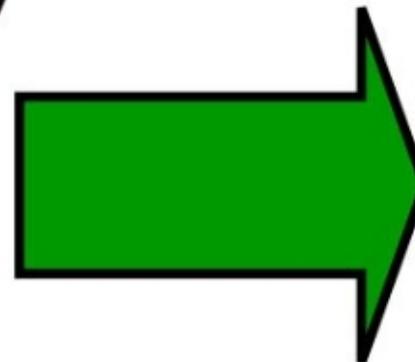


...couteux et peu efficace



Phase 3-

Changer un peu nos habitudes, un potentiel énorme...

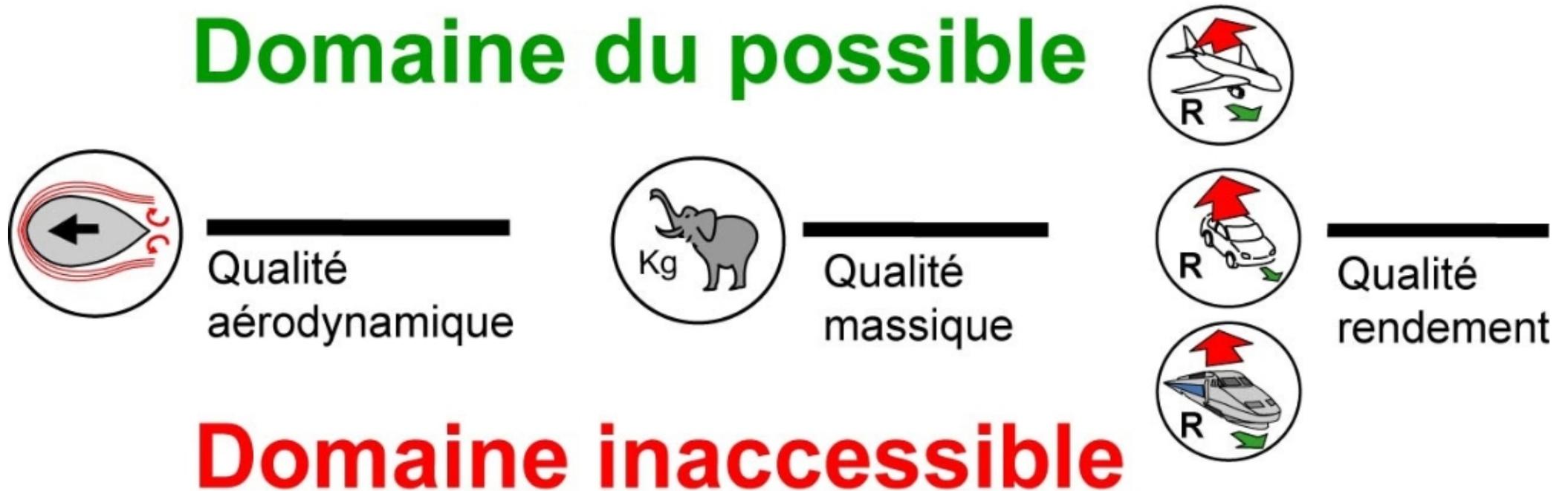


...peu coûteux et très efficace



2- Identifier et agir sur les causes de premier ordre pour imaginer les moyens de transport du futur

2 1- Critères de qualité d'un système de transports



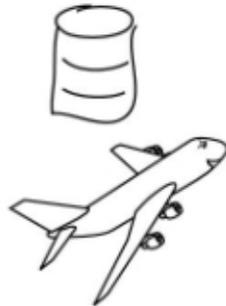
© Michel Kieffer

L'objectif est de quantifier les limites de ces critères de qualité afin de s'en rapprocher au maximum.

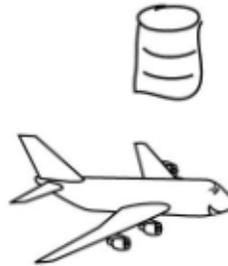
2 2- Avions et vols très long courrier

Qualité massique : $QM(t) = Mv / M_{tot}(t)$

$$QM(t) = 0,48$$



$$QM(t) = 0,62$$



$$QM(t) = 0,73$$



$$QM(t) = 0,81$$

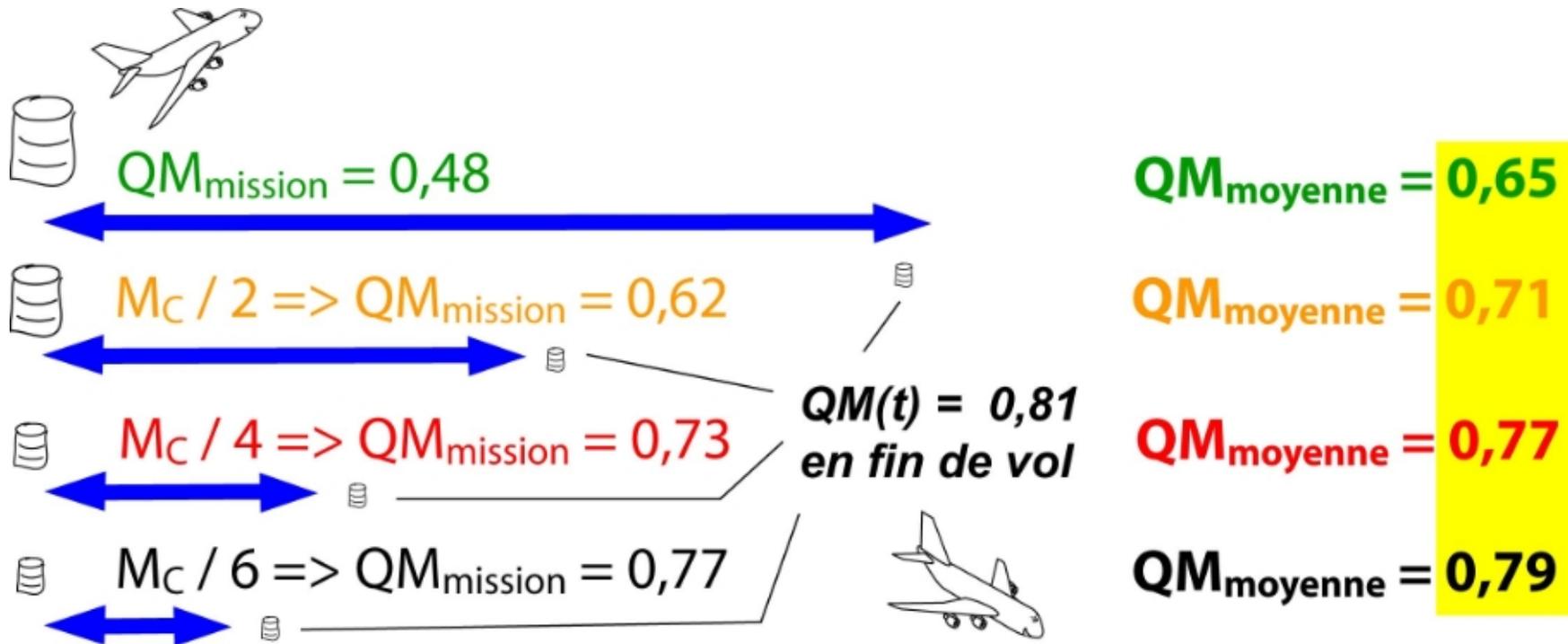


$$QM(t) = 0,81 \text{ en fin de vol}$$

Soit une $QM(t)$ moyenne de 0,65

Cette qualité massique moyenne élevée (0,65) laisse augurer des consommations au cent par siège elles aussi élevées.

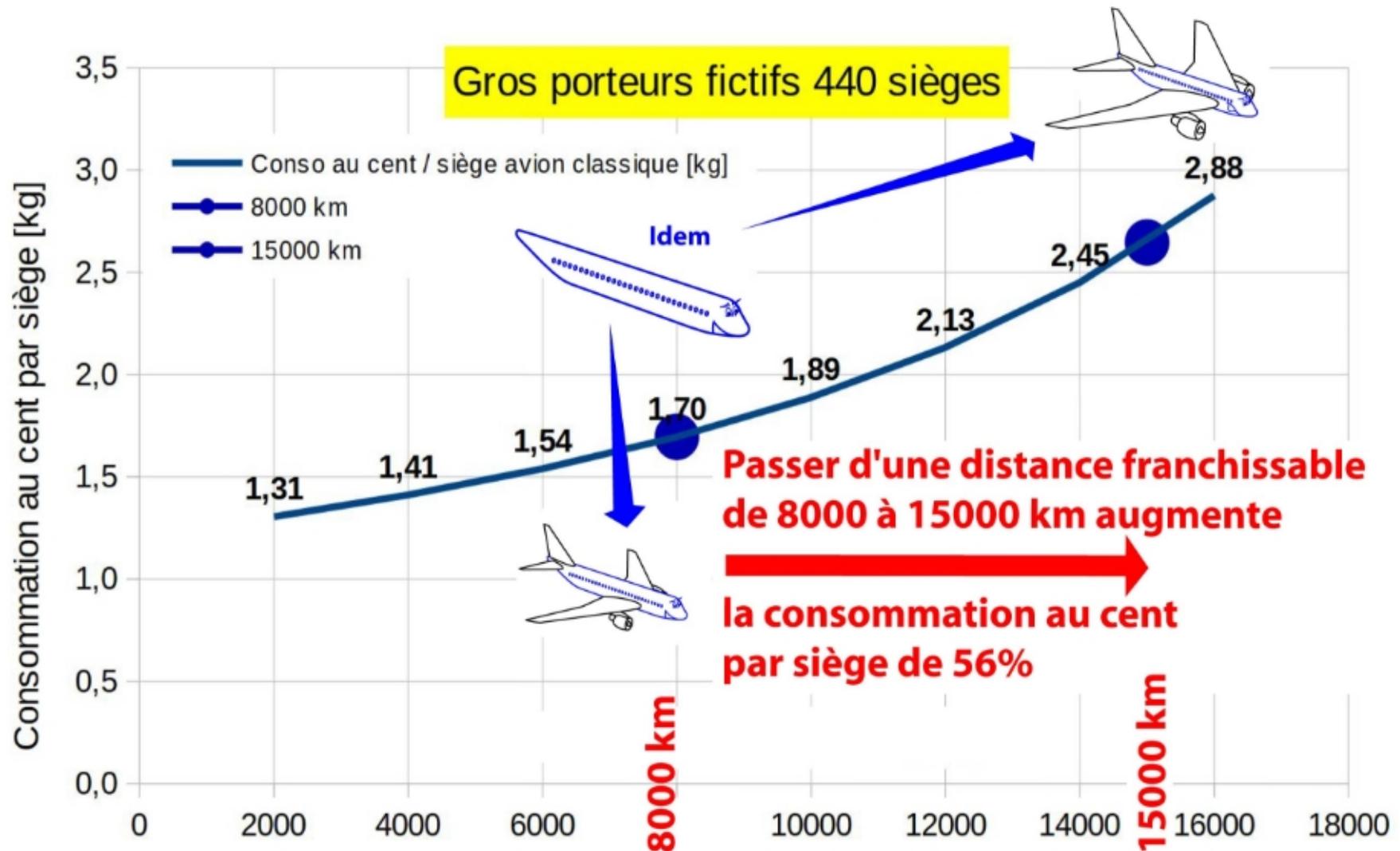
La problématique des vols d'avions long courrier à pleins partiels, qualité massique mission : QM_{mission}



Nous pouvons en déduire la fonction : conso au cent par siège en fonction de QM .
 Mais attention au coût de l'allègement =>
 il est aussi utile de relier la QM avec le coût de réalisation de l'avion.

© Michel Kieffer 2013/23

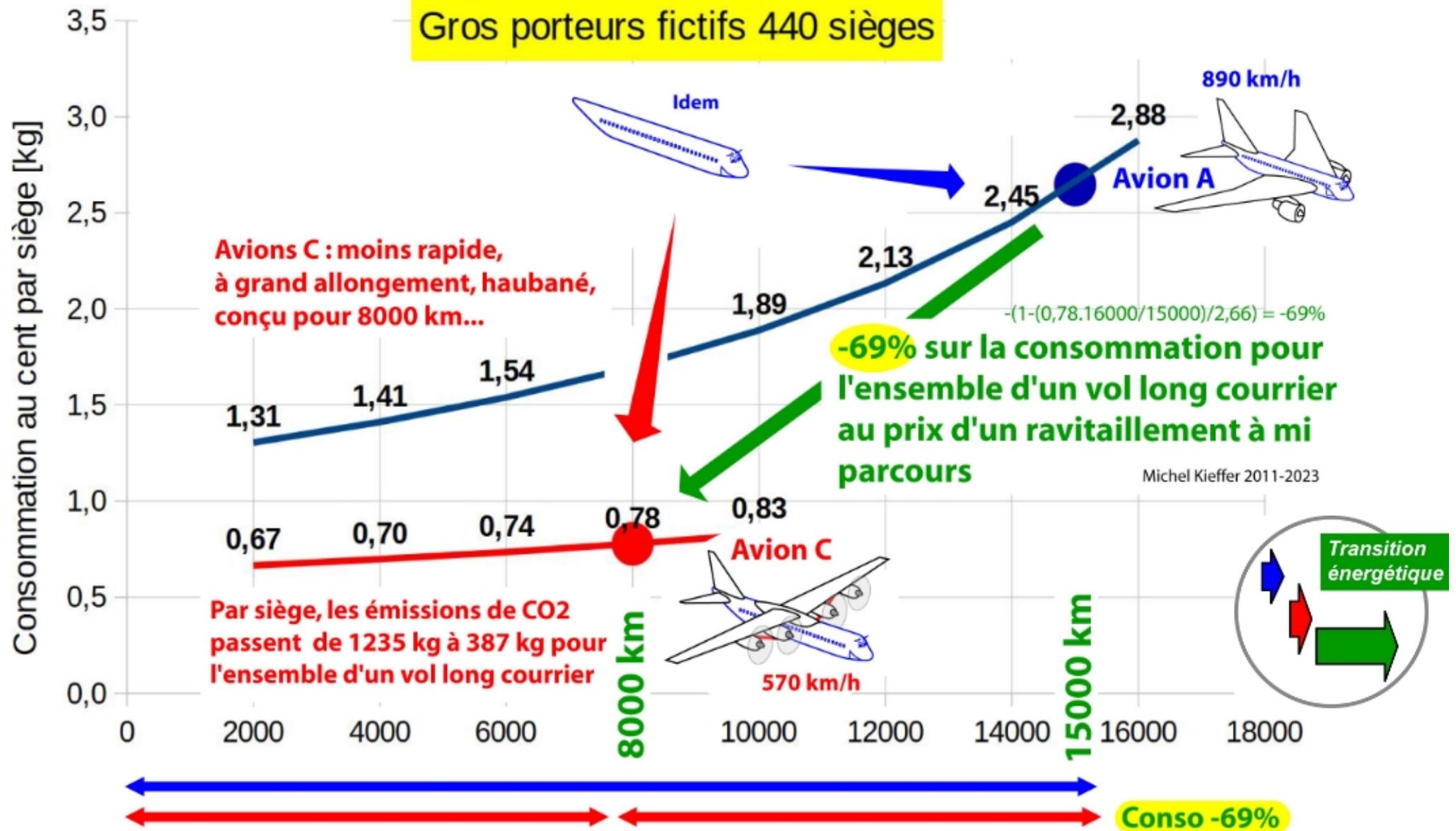
A pleins partiels, les qualités massiques restent particulièrement élevées avec pour effet des consommations au cent par siège elles aussi très élevées.

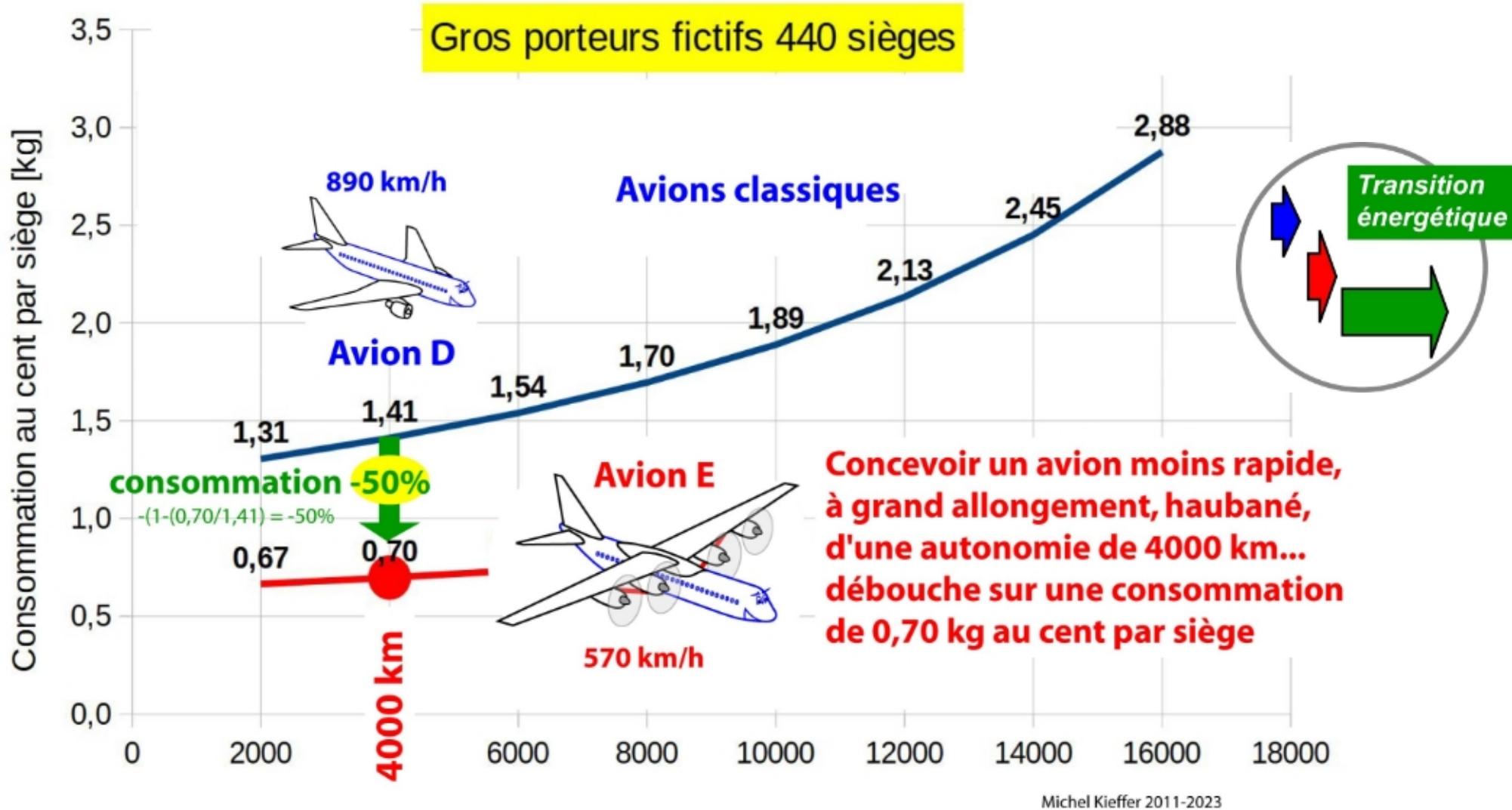


Michel Kieffer 2011-2022

A capacité équivalente, un avion très long courrier doit avoir une puissance installée et des ailes plus grandes pour transporter le carburant pour aller loin. Ainsi, l'impact de l'autonomie pour laquelle est conçu l'avion a un impact considérable sur la consommation au cent par siège.

2 3- Des avions qui n'existent pas...



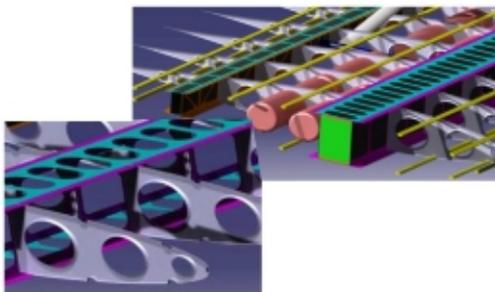


La consommation d'énergie ci-dessus est proche de celle des trains à grande vitesse. Les trains consomment toutefois de l'énergie en partie décarbonée.

2 4- Avion de transport régional : concept CMI hybride à moteurs non liés

Avion de transport hybride à moteurs non liés +
vitesse de croisière réduite de 30% =
-60% sur la consommation

1- Motorisations thermiques et électriques non liées pour ne pas dégrader le rendement global par le produit des rendements des sous-ensembles de la chaîne de propulsion



3- Hélices repliées dès arrêt de la propulsion électrique

380 kW

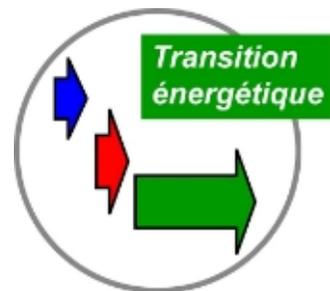


2- Alimentation de la motorisation électrique limitée à trois minutes pour ne pas trop dégrader la masse de l'avion par la masse des batteries

295 kW



4- Propulsion thermique optimisée pour la croisière



2 5- Un porteur multi-mission optimisé pour des missions très différentes, la formule push-pull

Certaines des missions ci-contre ne mobilisent que la moitié de la puissance installée avec pour effet une dégradation conséquente du rendement des turbomachines. La configuration push-pull permet d'arrêter un moteur et de laisser le moteur restant fonctionner à son régime de rendement optimal.

Le concept multimission, une grande variabilité de vitesses et de charges utiles autorisée par le concept push-pull

Single carrier:

- empty mass: 19400 kg
- take off mass: 45900 kg
- installed power: 2x8200 kW, 2 TP400
- wing area: 118 m²

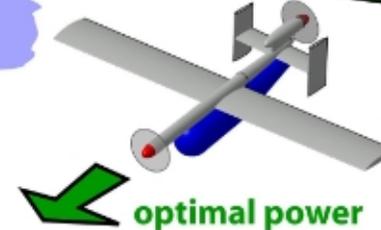
Water mission:

different needs, but 46 tons, 8000 kW (the half of the nominal power for cruise) => an engine stopped:

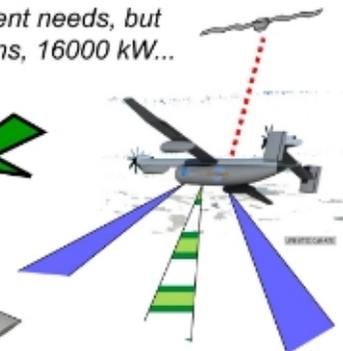
optimal power



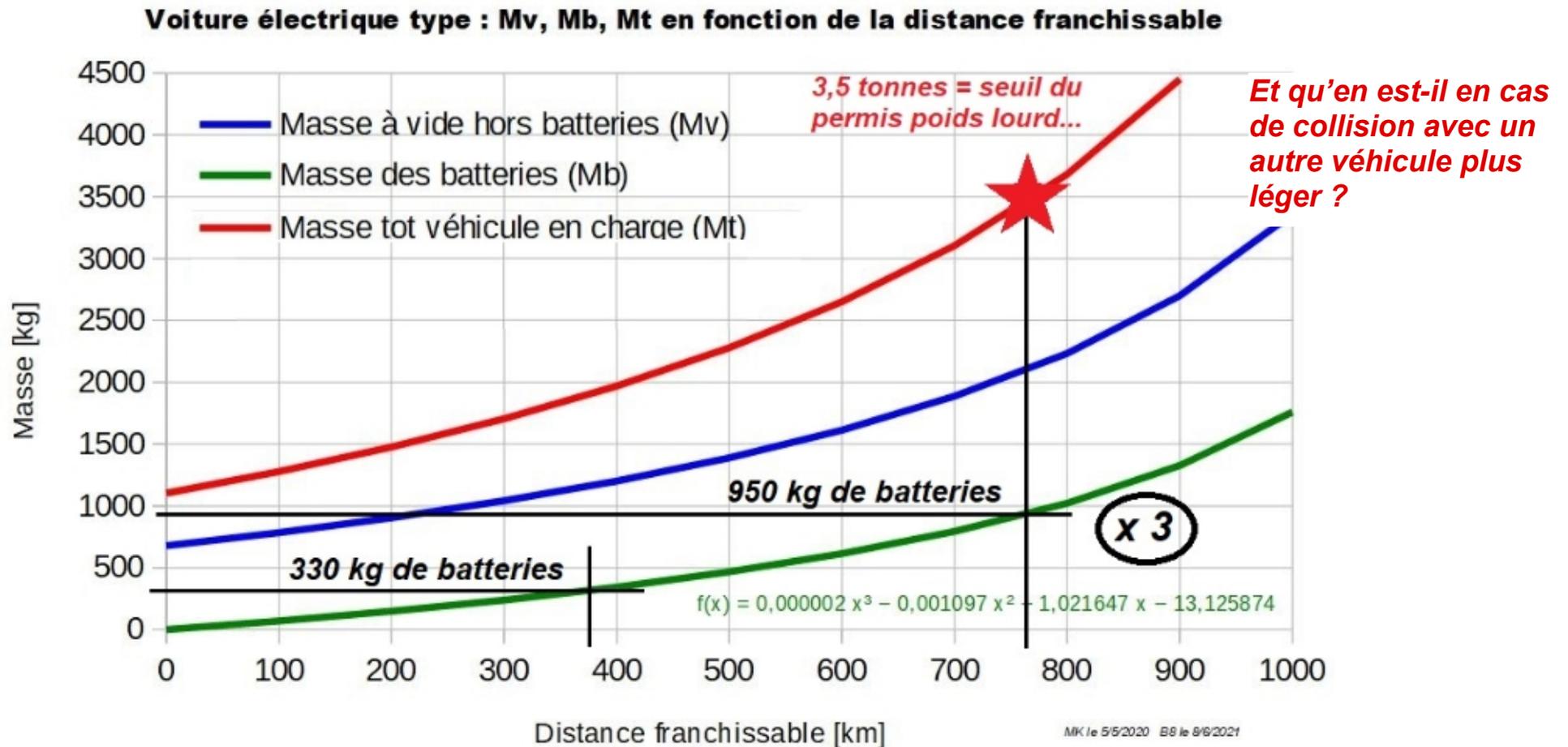
optimal power



Reco mission: different needs, but 46 tons, 16000 kW...



2 6- Voitures : la problématique des voitures électriques à grandes autonomies



Les fabricants de voitures premium font pression sur l'Europe pour faire passer le seuil du permis poids lourd de 3,5 tonnes à 4 ou 5 tonnes...

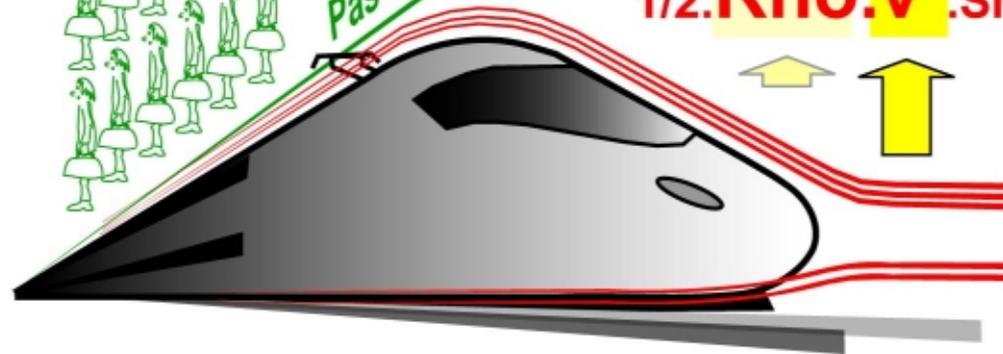
2 8- Trains

La haute densité
minimise la
consommation
d'énergie
par siège

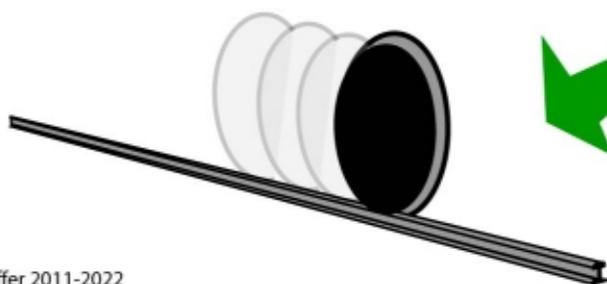
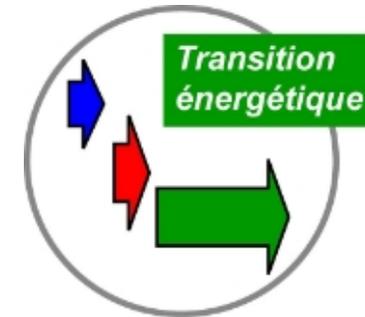


Pas d'énergie embarquée

Traînée parasite =
 $1/2 \cdot \text{Rho} \cdot v^2 \cdot \text{SMT} \cdot \text{Cfe}$



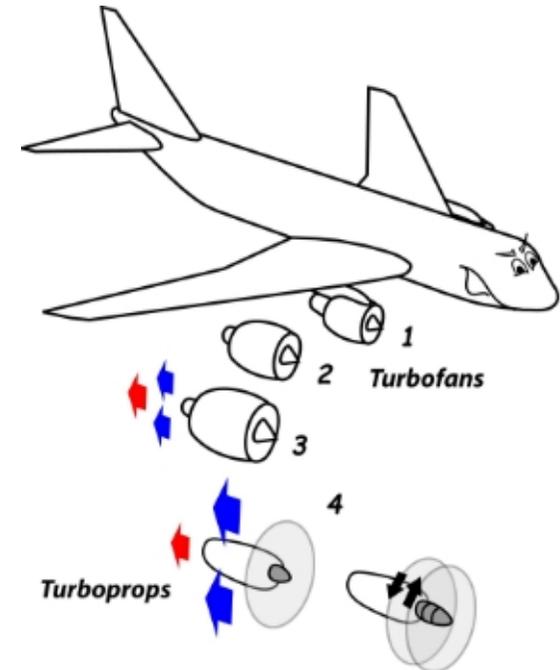
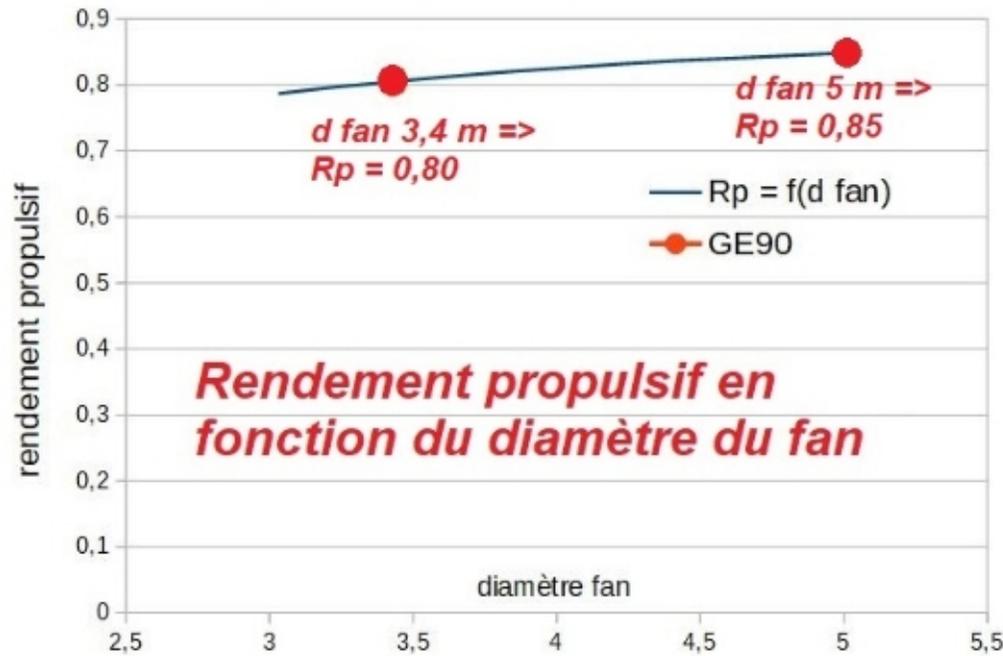
Selon la
vitesse et le
mode de
production
d'électricité :



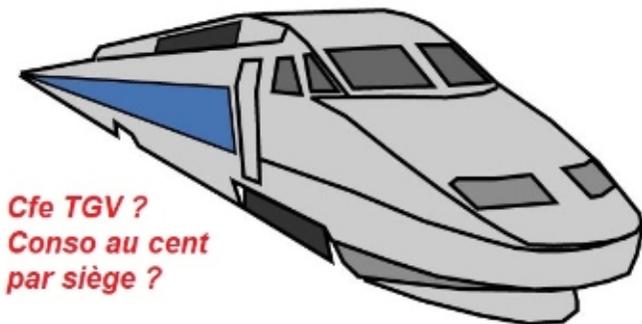
Très peu de déformations =>
très peu de pertes d'énergie

Beaucoup de points forts pour les trains au prix d'une traînée parasite élevée à grande vitesse et de la construction de LGV.

3- Des approximations justes pour des résultats très rapides, exemples :



Mais attention aux effets sur l'ensemble du système...



Rendement propulsif d'un pulsoréacteur ?



**Cfe bateaux ?
Consommation au cent
par tonne transportée ?
...**



Et son corollaire, un risque majeur...

"L'enfer de la recherche de précision au stade des avants projets"

ou

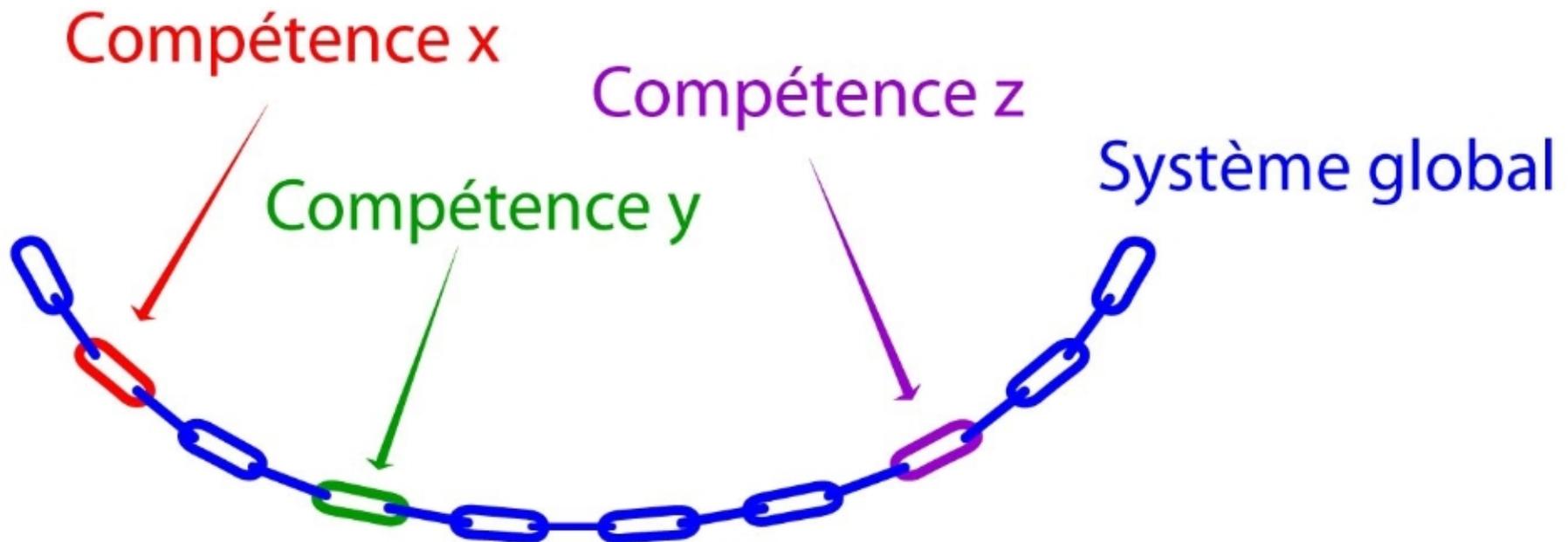
"L'art de mener des projets qui n'aboutiront probablement jamais malgré des dépenses conséquentes..."



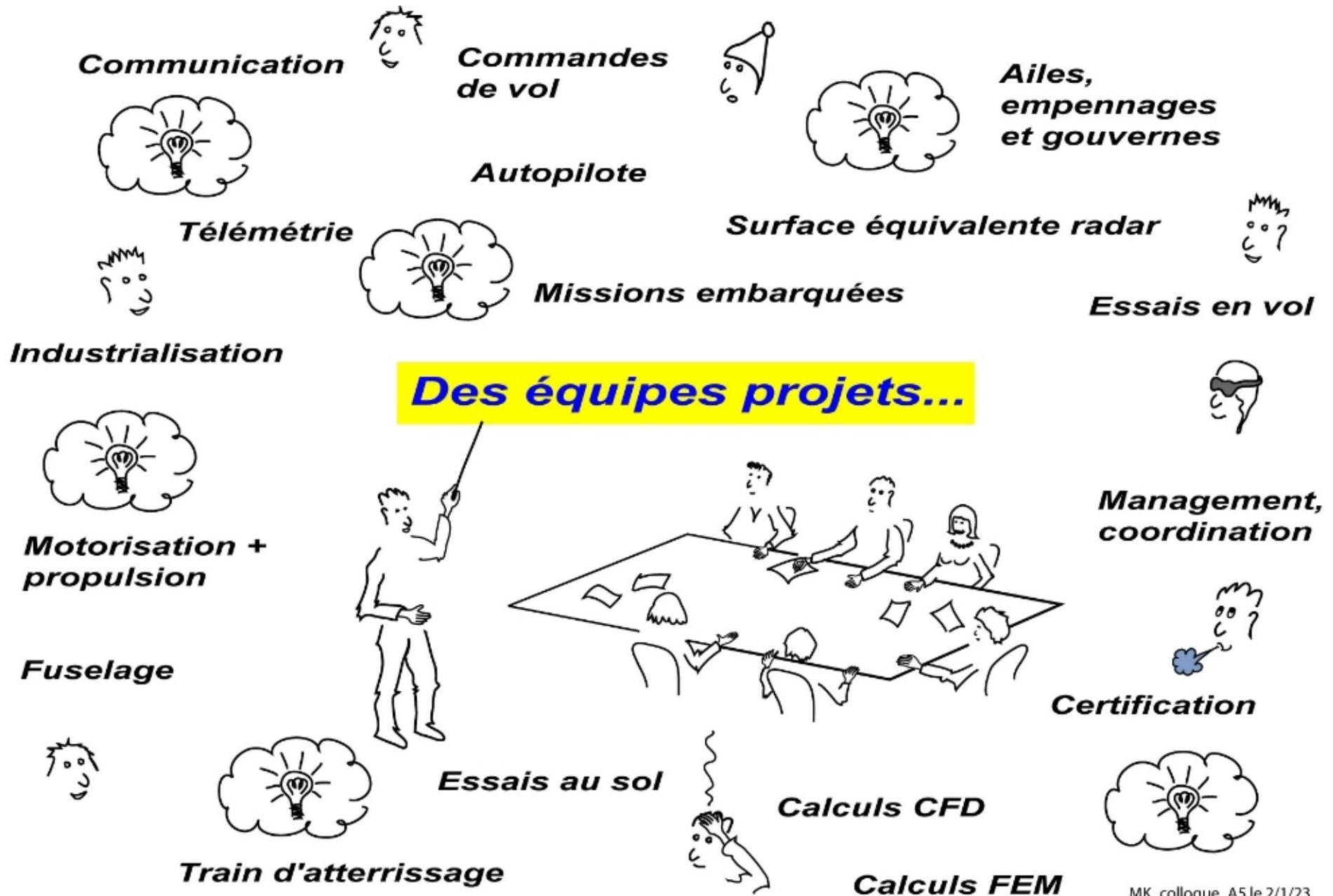
C'est l'enfer :) !



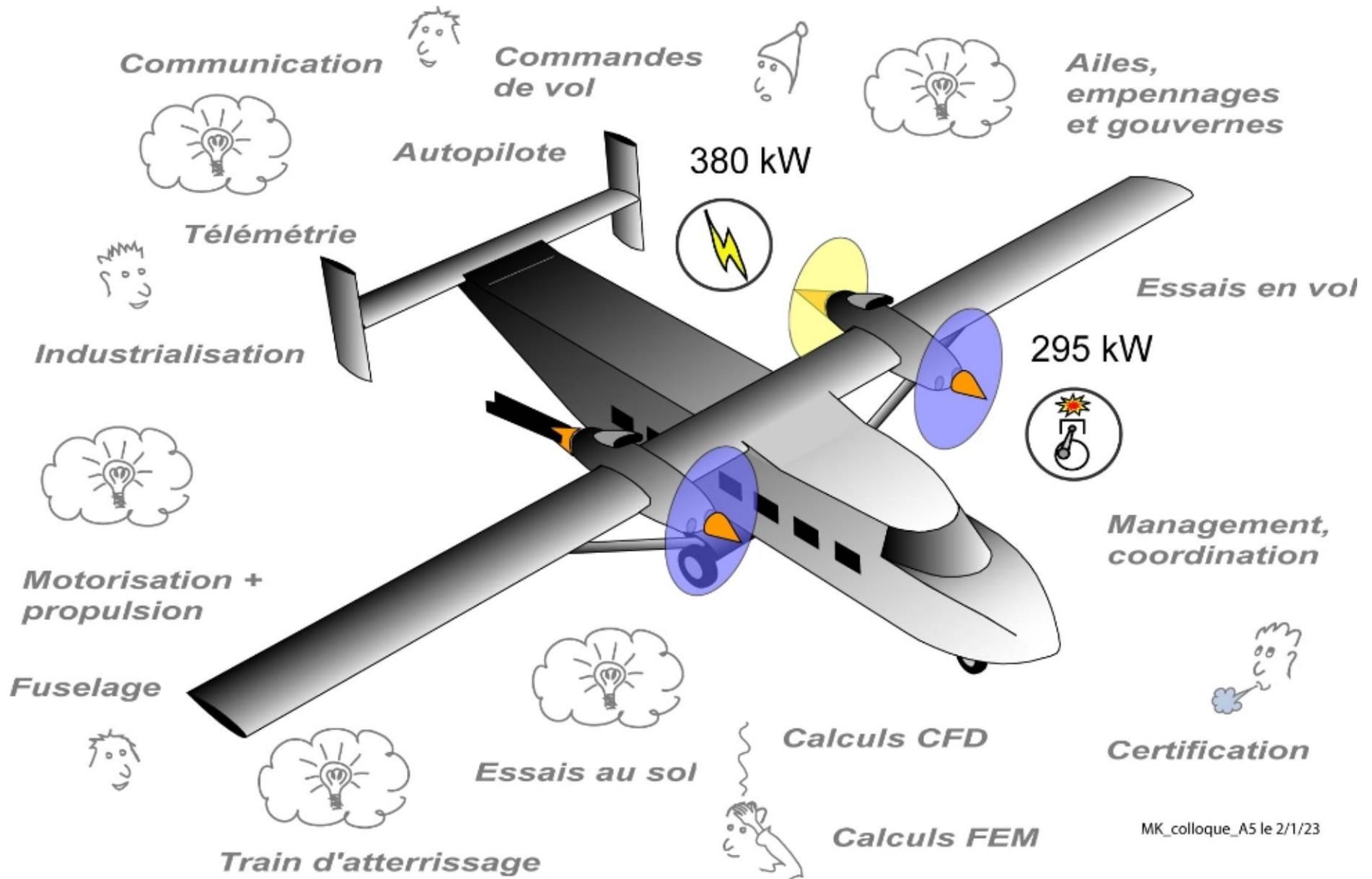
4- Construire des chaînes de compétences pour aboutir les projets, approche systèmes



L'objectif est d'avoir une chaîne homogène.



...pour des objectifs communs.



5- Réduire les coûts par la simplification des systèmes pour produire en France (coûts produits, investissements, organisations...)

Exemple d'un avion industrialisé CS23-1 :

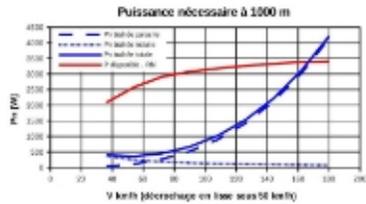
- montage en deux semaines à deux étudiants
- du premier coup de crayon au premier vol : moins de six mois

Simplifier les systèmes est une démarche complexe qui mobilise des méthodes et des processus élaborés.

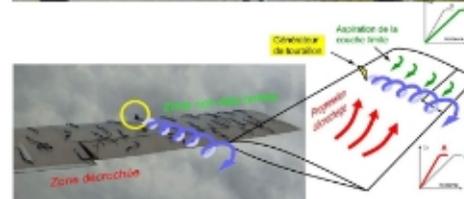


6- L'itération théorie application pour progresser

6 1- process conception avion



© Michel Kieffer 2011-2023

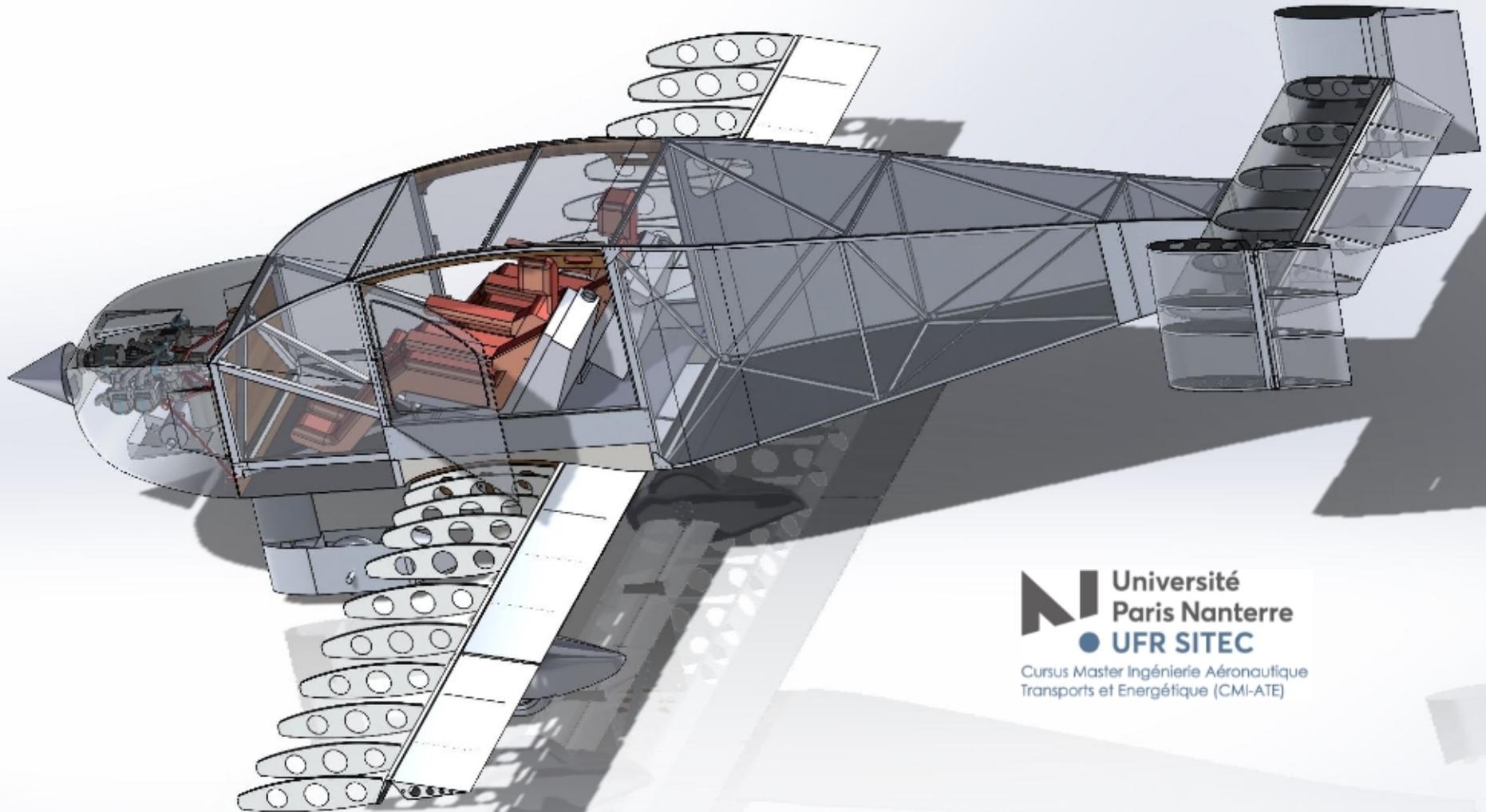


6 2- Dès la conception initiale, importance d'industrialiser et de respecter la réglementation aéronautique

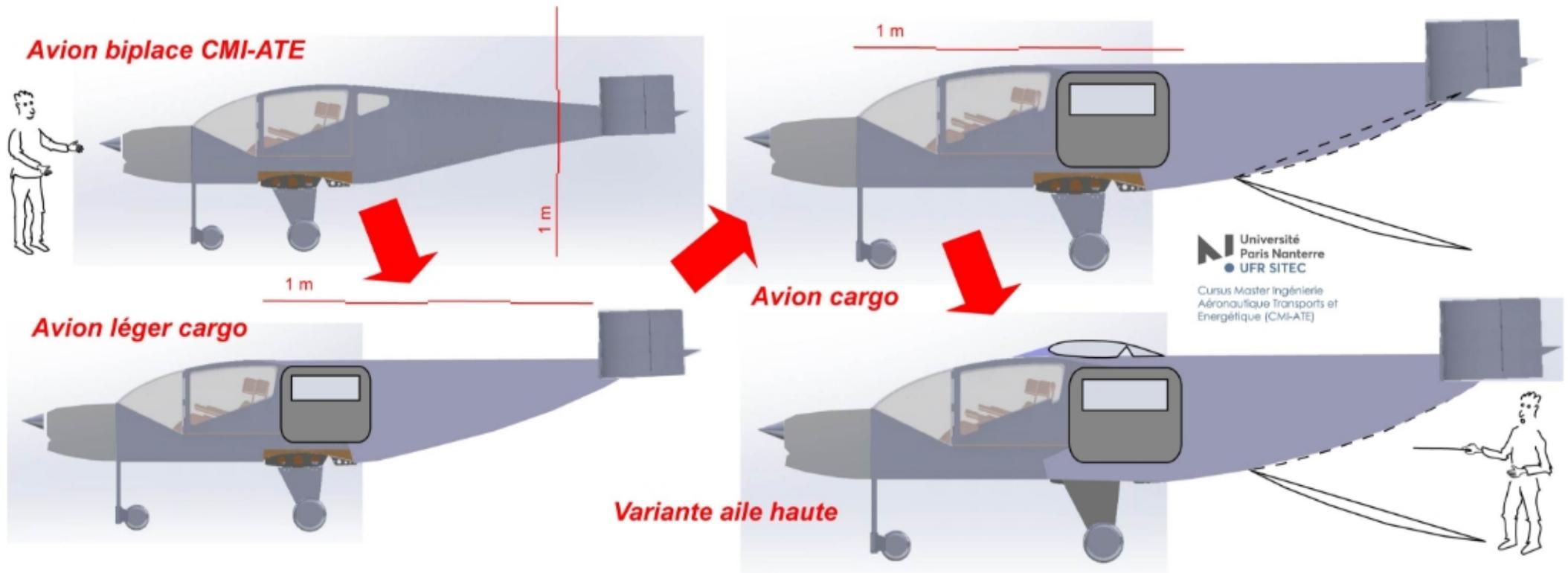
Industrialiser dès la conception initiale conditionne la recherche et le choix de solutions et évite de réaliser deux avions différents (un prototype puis un avion série).

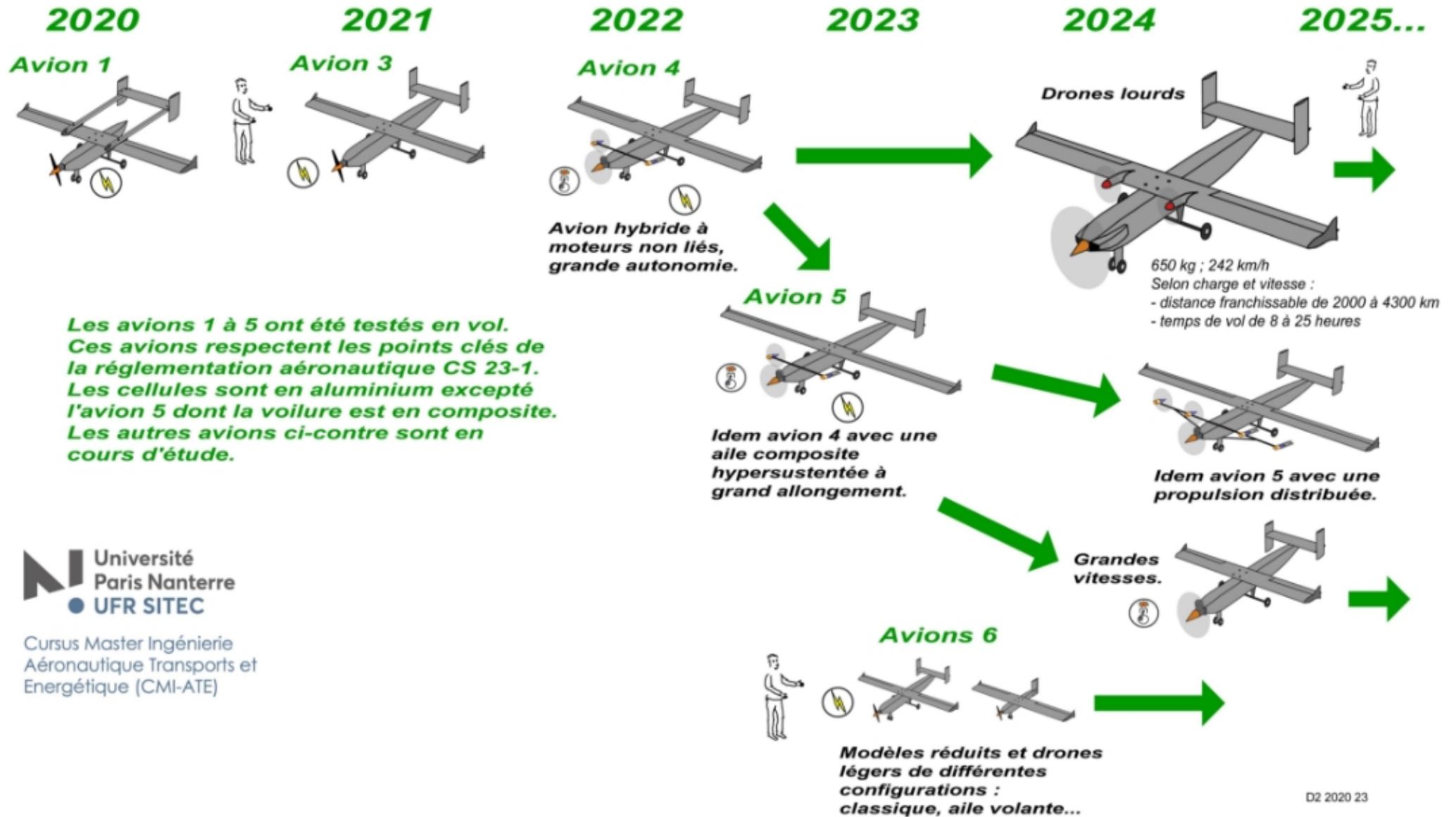
7- Introduction aux présentations des étudiants :

Avion biplace, un exemple d'avion piloté biplace performant particulièrement économique autant à l'achat qu'à l'usage :



Des gammes et des extrapolations pour capitaliser l'expérience





2020

2021

2022

2023

2024

2025...

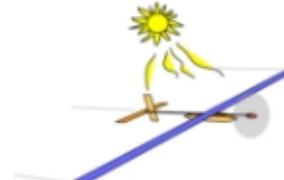
2020-2025
Drone
électro-solaire
stratosphérique.

Avion 2.1



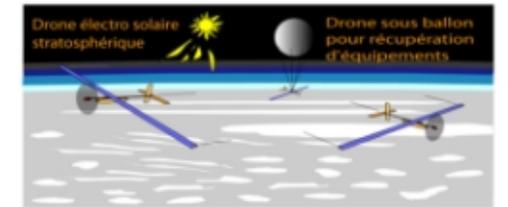
Démonstrateur.

Avion 2.2



Equipement en
cellules
photovoltaïques.

Essais dans la stratosphère,
objectif 25000 m

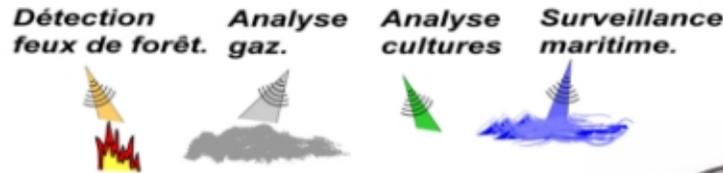


2021-2024
Autopilote
Communications.



Autopilote,
communication.

2021-2025
Missions
embarquées.



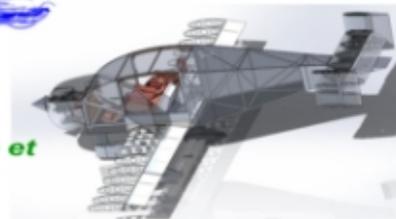
Détection
feux de forêt.

Analyse
gaz.

Analyse
cultures

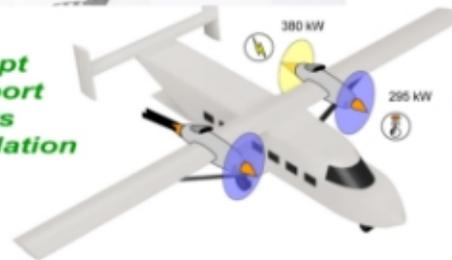
Surveillance
maritime.

2022-2025
Avion biplace et
dérivés.



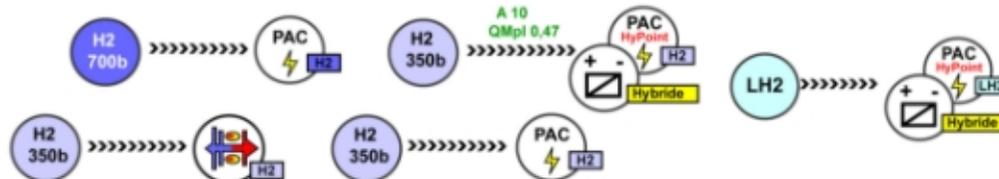
Avions 7

2023-2025 Concept
d'avion de transport
hybride à moteurs
non liés (extrapolation
de l'avion 4).



Avion 8

2021-2025 Avions H2.



8- Conclusion

Changer un peu nos habitudes
débouche sur des résultats
spectaculaires pour un coût réduit.

Des approximations justes pour des
résultats rapides.

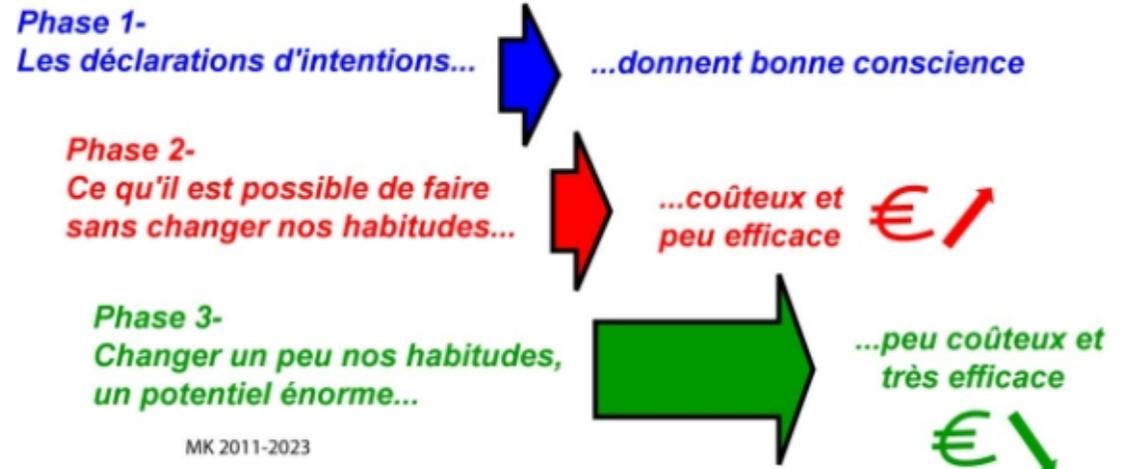
Construire des chaînes de compétences pour aboutir les projets.

Réduire les coûts par la simplification des systèmes pour produire en France tout
en étant compétitif comparé aux pays à bas coûts.

L'itération théorie application pour progresser et apprendre.

Des gammes et des extrapolations pour capitaliser l'expérience.

Transition énergétique





**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

www.onera.fr



Vers une aviation décarbonée : les pistes de recherche de l'ONERA

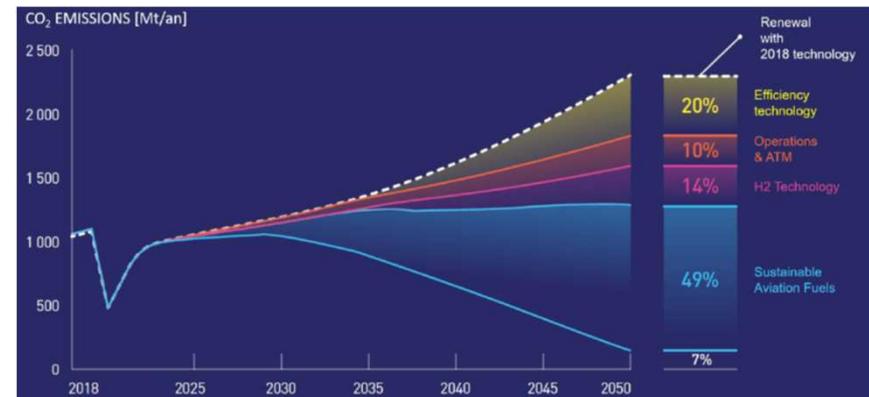
Sébastien Defoort, Ingénieur de recherche, ONERA Toulouse

Colloque « Les transports de demain », Musée de l'Air et de l'Espace, 18 janvier 2024

Ce document est la propriété de l'ONERA. Il ne peut être communiqué à des tiers et/ou reproduit sans l'autorisation préalable écrite de l'ONERA, et son contenu ne peut être divulgué.
This document and the information contained herein is proprietary information of ONERA and shall not be disclosed or reproduced without the prior authorization of ONERA.

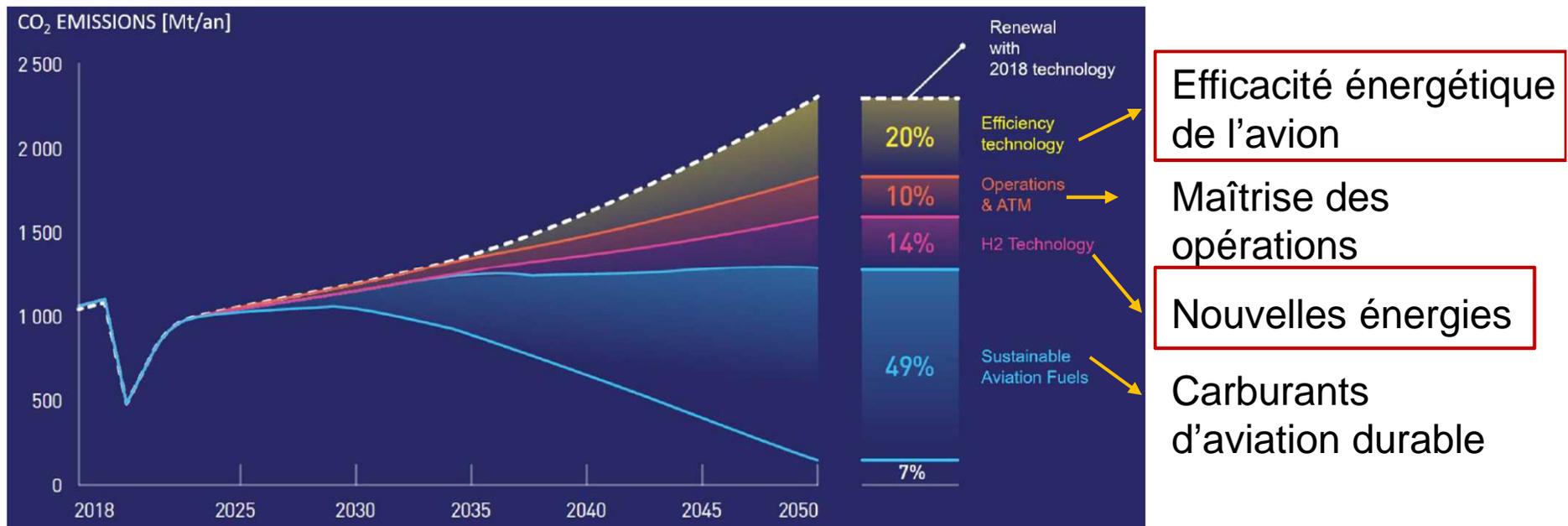
Avant-propos : impact environnemental de l'aviation

- ✓ Le secteur du transport aérien contribue pour **2 à 3 %** aux émissions globales de CO₂
- ✓ Si l'on inclut les effets non-CO₂ encore mal quantifiables (NO_x, traînées de condensation), l'effet sur le réchauffement pourrait se monter à **5 à 6 %**
- ✓ L'augmentation continue du trafic tend à augmenter cette part



Avant-propos : impact environnemental de l'aviation

✓ Plusieurs leviers existent pour atteindre la neutralité carbone du secteur

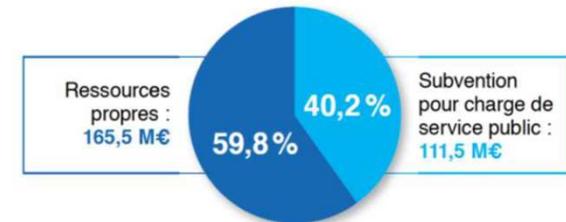


Feuille de route OACI, 2021

Avant-propos : l'ONERA et la décarbonation

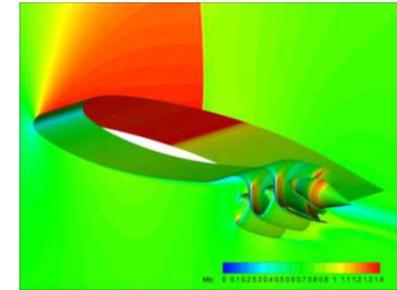


- ✓ Le laboratoire national de recherche aéronautique et spatiale
 - ✓ Statut d'EPIC, fondé en 1946
- ✓ 3 secteurs d'activité : Défense, Aéronautique, Espace
- ✓ 2135 employés
 - ✓ 1679 ingénieurs de recherche
 - ✓ 118 directeurs de recherche, 341 doctorants
- ✓ Budget : 277 M€



Avant-propos : l'ONERA et la décarbonation

- ✓ Des feuilles de route pour l'aéronautique civile
 - ✓ Réduction de l'empreinte environnementale
 - ✓ Nouvelles mobilités, nouvelles missions
 - ✓ Moyens et outils d'aide à la certification
 - ✓ ATM et environnement de l'avion
 - ✓ Nouveaux moyens de simulation
- ✓ Intervention à différentes étapes du processus de conception de l'avion : études conceptuelles, intégration technologique, design préliminaire, essais de mise au point et de qualification

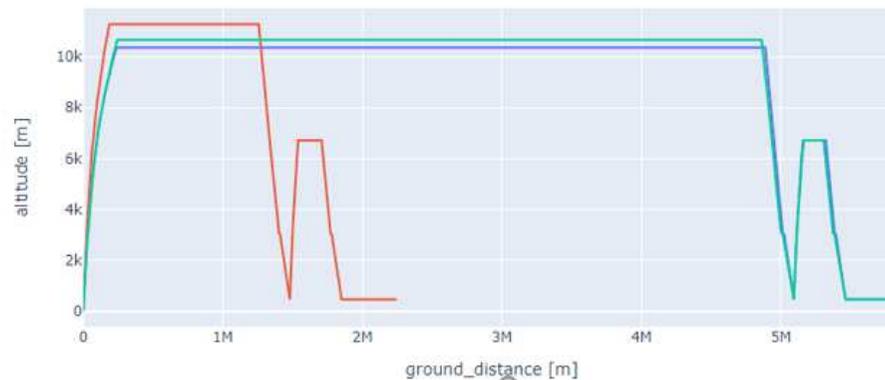


Un avion décarboné : les leviers

✓ Retour aux sources : la formule de Bréguet-Leduc

$$R = \frac{V}{gSFC} \cdot \frac{L}{D} \cdot \ln \left(\frac{M_0 + M_{fuel}}{M_0} \right) \quad \Rightarrow \quad M_{fuel} = \underbrace{M_0}_{\text{Structure}} \left[\exp \left(\frac{\underbrace{R \cdot g \cdot SFC}_{\text{Propulsion}}}{\underbrace{V \cdot \frac{L}{D}}_{\text{Aérodynamique}}} \right) - 1 \right]$$

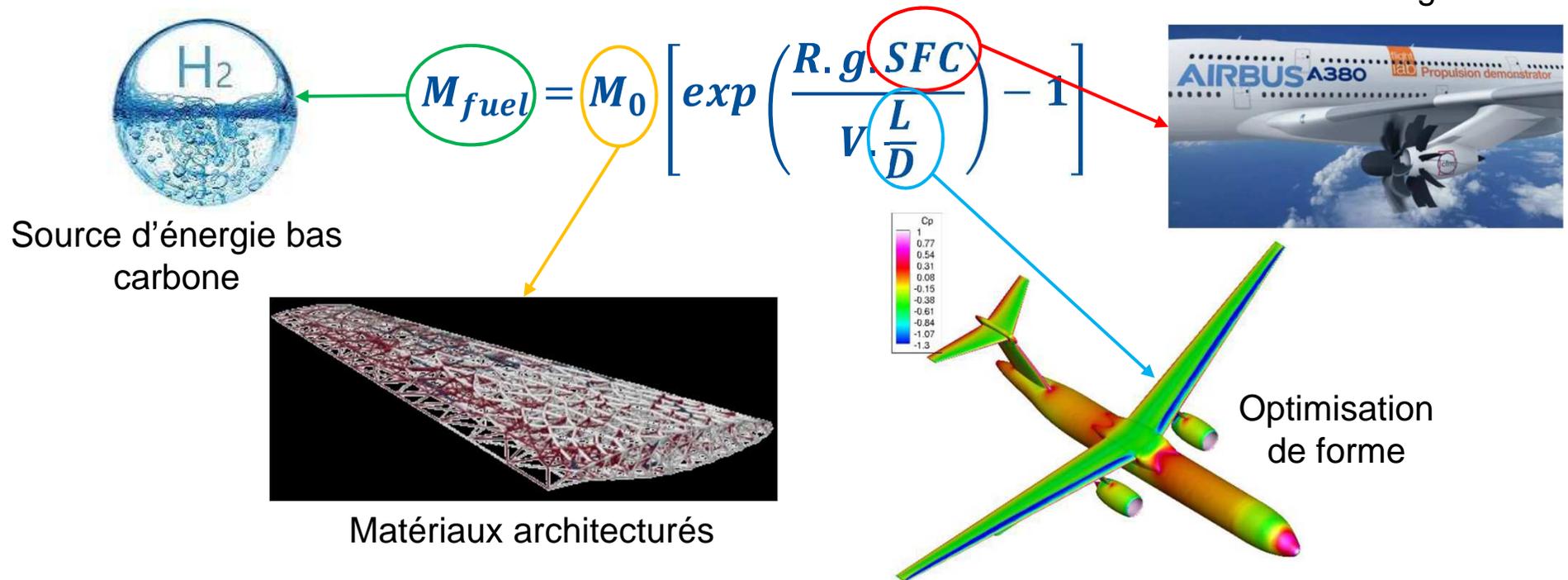
R : distance parcourue
 V : vitesse en croisière
 SFC : Specific Fuel Consumption
 L/D : finesse aérodynamique
 M₀ : masse en début de croisière



Range R

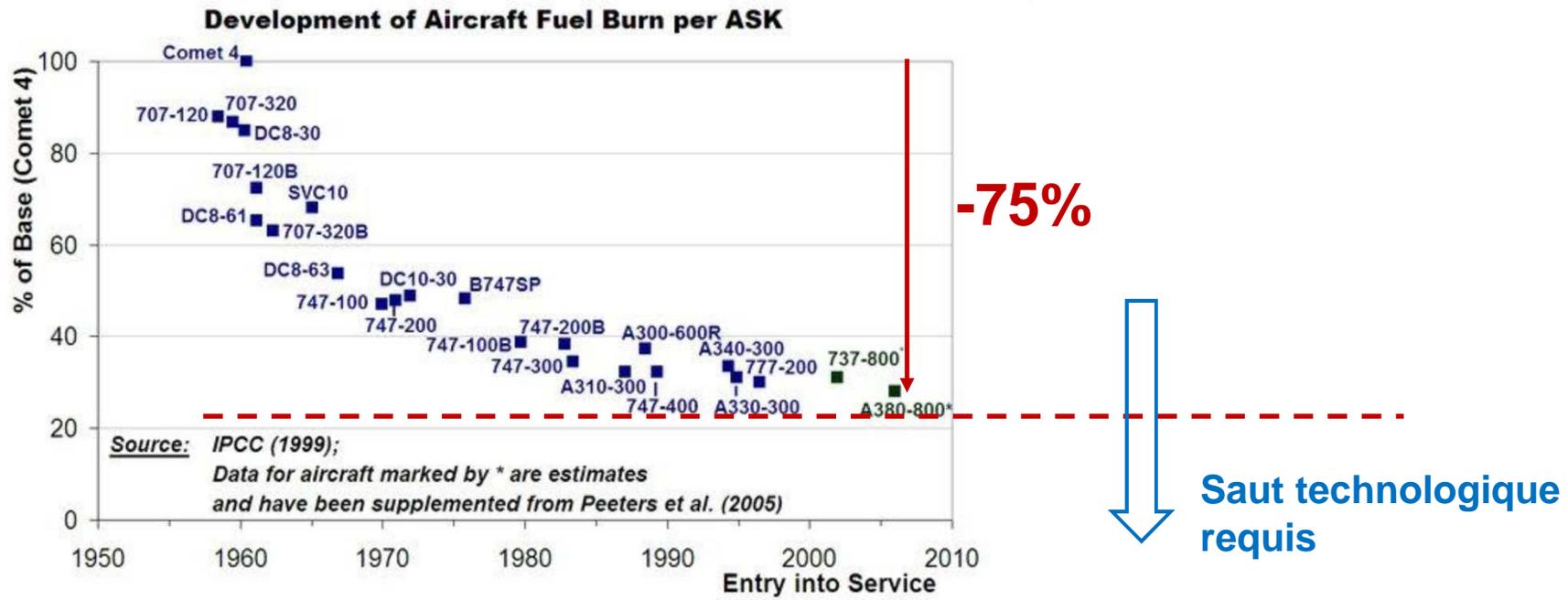
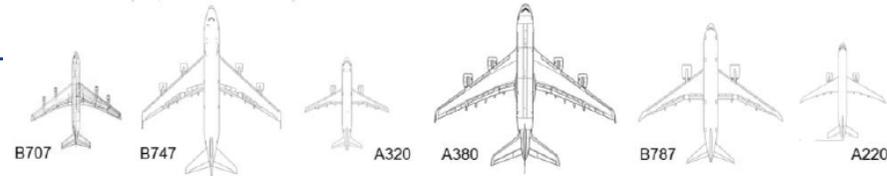
Un avion décarboné : les leviers

✓ Retour aux sources : la formule de Bréguet-Leduc



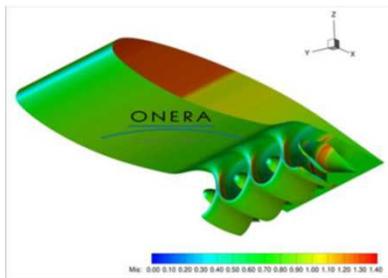
Un avion décarboné : les leviers

✓ Les limites de l'approche incrémentale



De nouvelles configurations moyen-courrier décarbonées ?

- ✓ DRAGON : un avion hybride électrique à propulsion distribuée
 - ✓ Utiliser l'énergie électrique comme vecteur d'une propulsion ultra-sobre

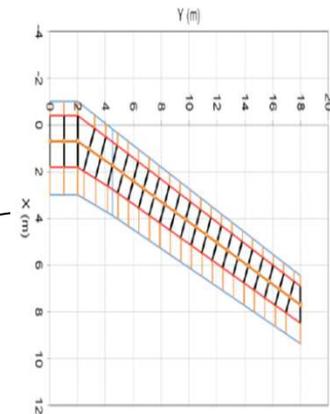
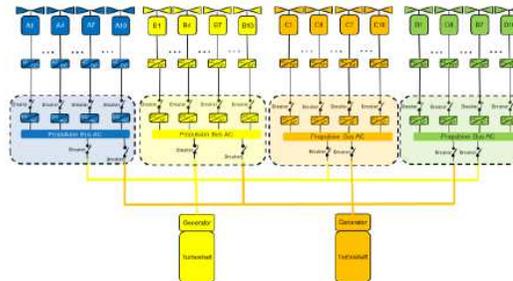


Intégration aéro-propulsive innovante



Taux de dilution > 30

Architecture électrique haute puissance

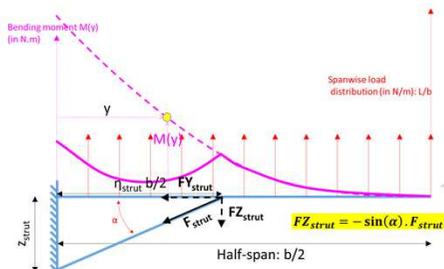


Structure répartie

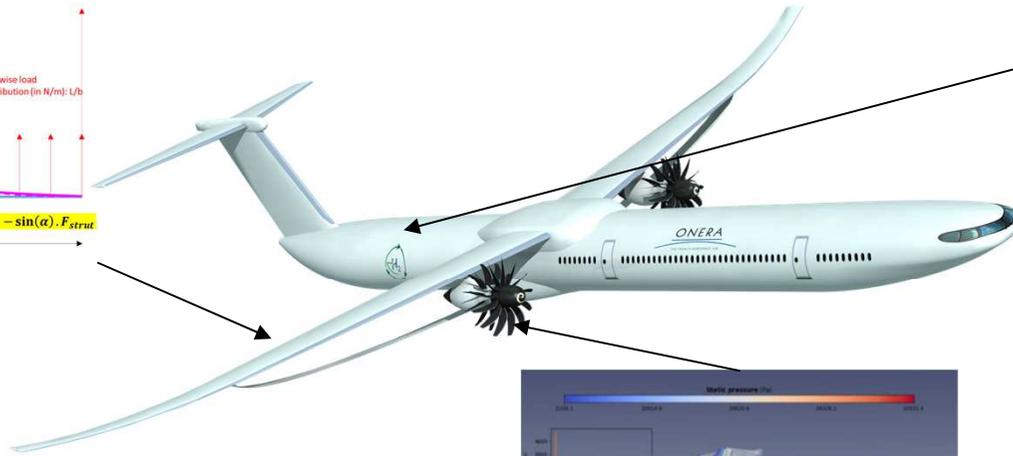
Architecture « classique », gains modérés (5-10%)

De nouvelles configurations moyen-courrier décarbonées ?

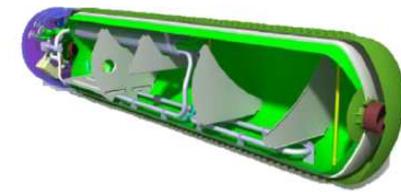
- ✓ GULLHYVER : l'aile à grand allongement et l'open fan au service de l'hydrogène
 - ✓ Un concept moyen-terme (2040) tirant parti des synergies technologiques



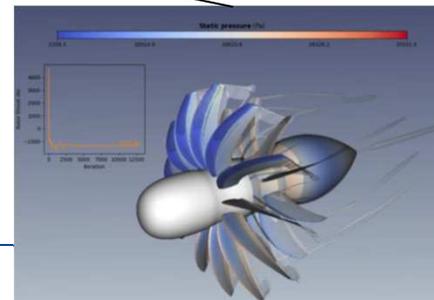
Aile haubanée de très grand allongement



Open Fan sous voilure haute, très grand taux de dilution



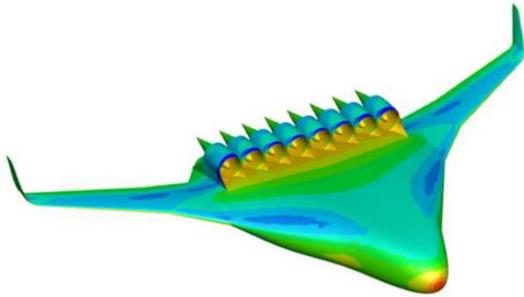
Tenue thermique et structurale des réservoirs H2



Architecture « augmentée », gains significatifs (15-20%, zeroE)

De nouvelles configurations moyen-courrier décarbonées ?

- ✓ SMILE : l'aile volante revisitée, adaptée au transport moyen-courrier
 - ✓ L'intégration des fonctions de l'avion poussée à l'extrême

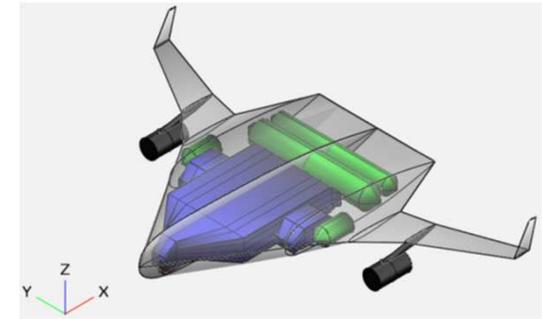


Optimisation de la finesse aérodynamique, intégration propulsive innovante (ingestion de couche limite)



Architecture « disruptive », gains importants (> 20%)

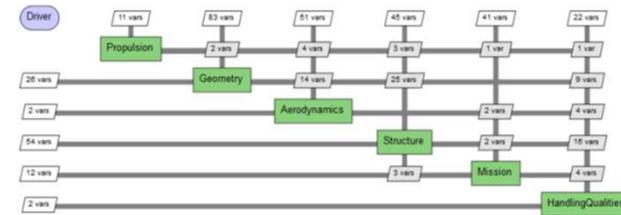
Volume disponible pour des réservoirs H2, concepts structurels intégraux



Quels ingénieurs pour l'avion bas carbone ?

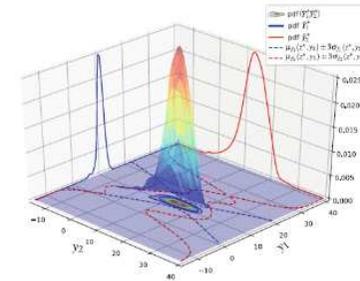
✓ Des ingénieurs *multicartes* :

- ✓ Les configurations intégrées nécessitent une maîtrise de la complexité multidisciplinaire
- ✓ De nouveaux métiers sont nécessaires : électricité haute puissance, thermique, chimie des carburants, physique de l'atmosphère,...



✓ Des ingénieurs *“digitaux”* :

- ✓ Maîtrise de la simulation pour la conception, la certification, les jumeaux numériques
- ✓ Apport du machine learning et de l'IA pour la réduction des cycles de conception et la maîtrise des incertitudes



✓ Des ingénieurs *créatifs et responsables* :

- ✓ La maîtrise des impacts environnementaux et sociétaux nécessite des approches nouvelles, pensées au delà du seul secteur aéronautique



Remerciements

- ✓ Les travaux présentés ont été réalisés principalement dans le cadre des programmes européens Clean Sky 2 (2015-2023) et Clean Aviation (2023-2026)
- ✓ Ils impliquent des ingénieurs de nombreux départements métiers de l'ONERA : DTIS, DAAA, DMAS, DMPE, DEMR



Questions ?

RÉINVENTONS LES TRANSPORTS



AUTOMOBILE



AÉRONAUTIQUE



SPATIAL



FERROVIAIRE



NAVAL

Colloque :
Les transports de demain
Quels ingénieurs pour de nouvelles ambitions ?
18 janvier 2024

Anne de CAGNY - ESTACA

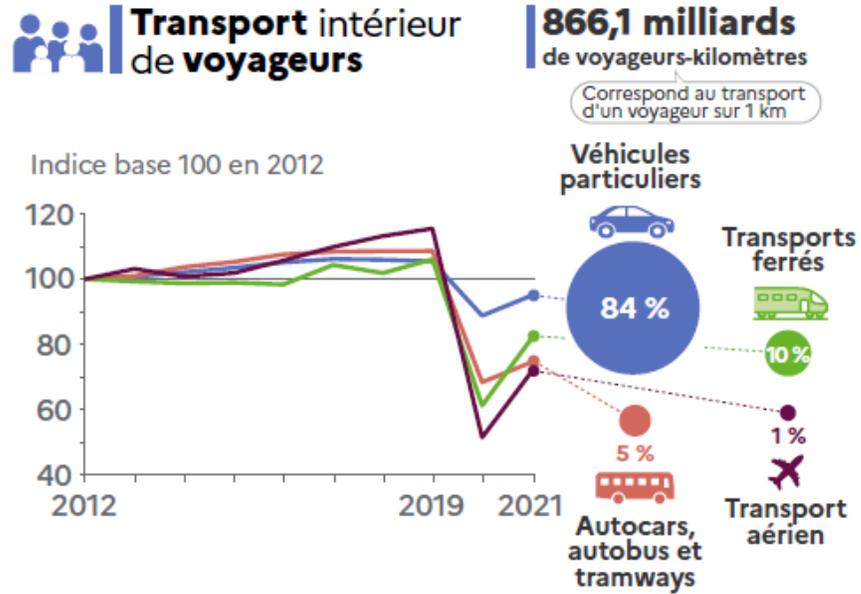


CREATEUR DE NOUVELLES MOBILITES

SITUATION ACTUELLE DES TRANSPORTS EN FRANCE

Colloque : Les transports de demain - 18 janvier 2024

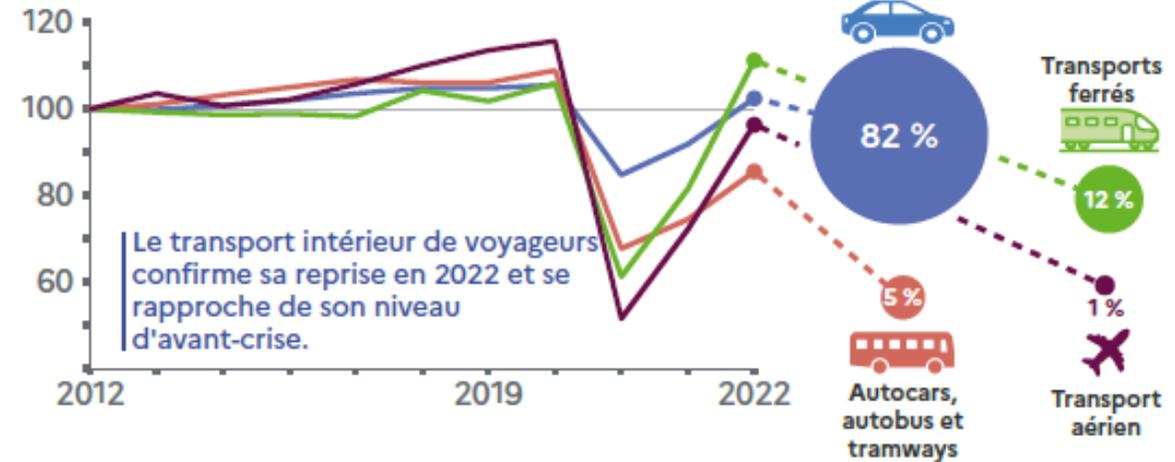
STATISTIQUES TRANSPORTS FRANCE 2021 & 2022



2021



Indice base 100 en 2012

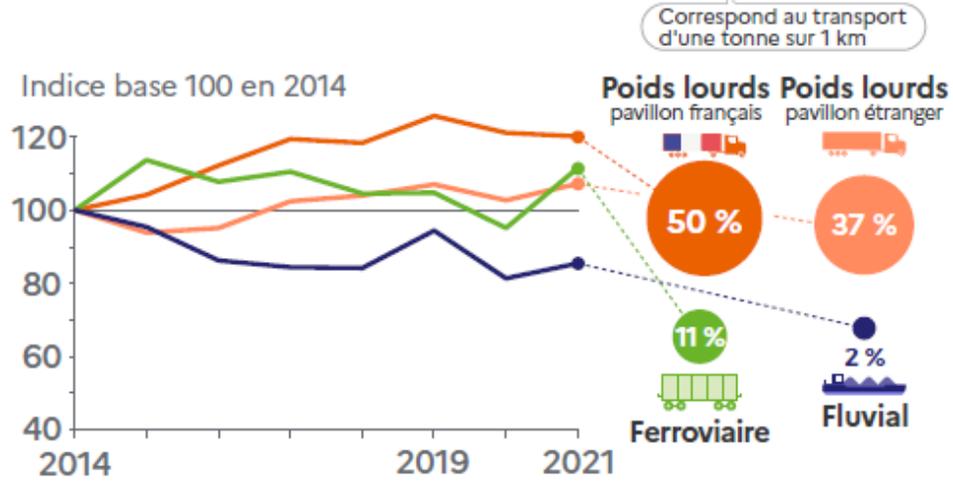


2022

Source : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/>

STATISTIQUES TRANSPORTS FRANCE 2021 & 2022

Transport intérieur de marchandises



2021



Transport intérieur de marchandises

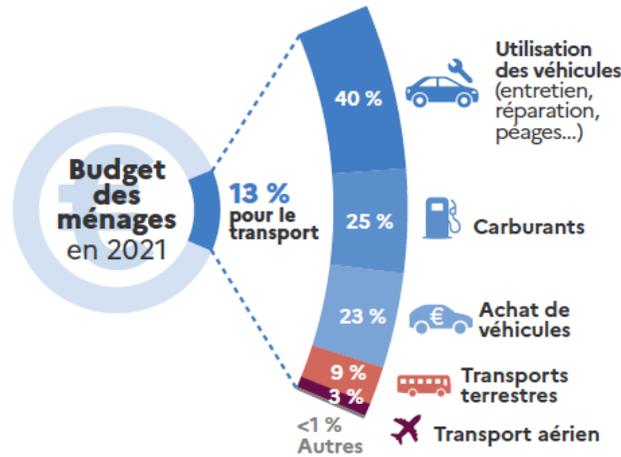


2022

Source : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/>

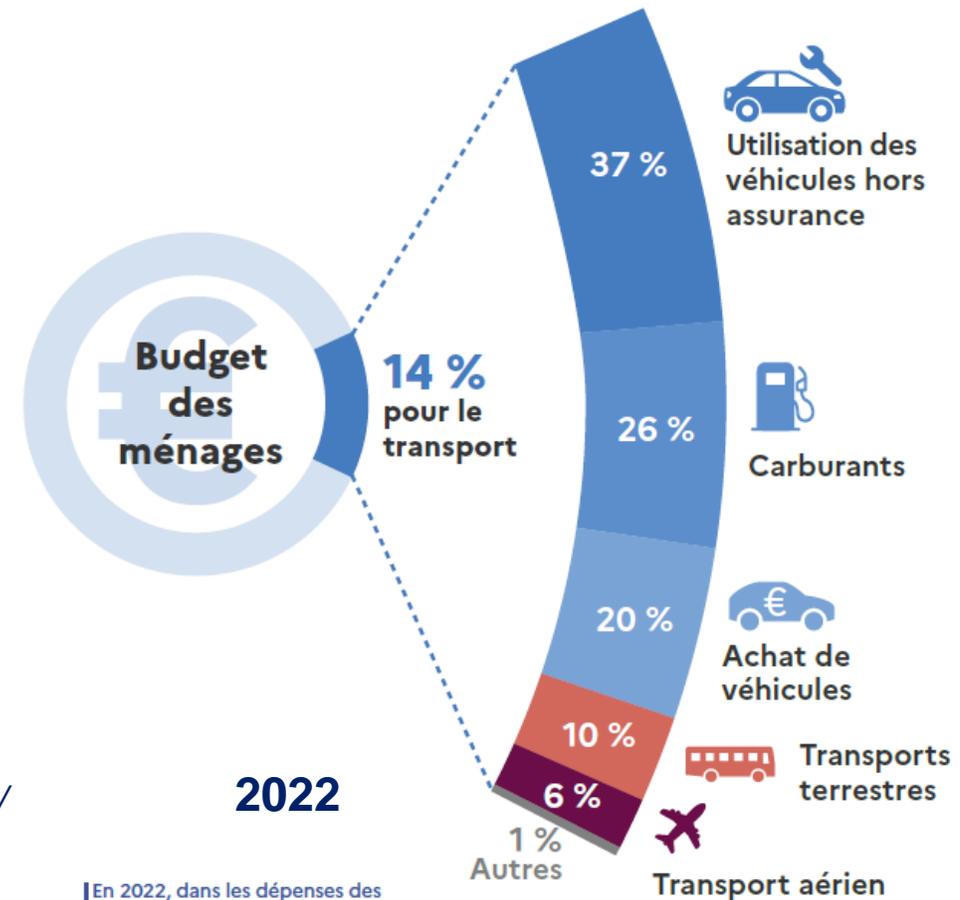
DEPENSES DES MENAGES FRANCE EN TRANSPORT 2021 & 2022

€ | **Dépenses des ménages en transport** | **161,8 milliards** d'euros (hors assurance)



2021

€ | **Dépenses des ménages en transport** | **187,2 milliards** d'euros (hors assurance)



2022

En 2022, dans les dépenses des ménages en transport, la part des transports collectifs est proche de celle d'avant-crise.

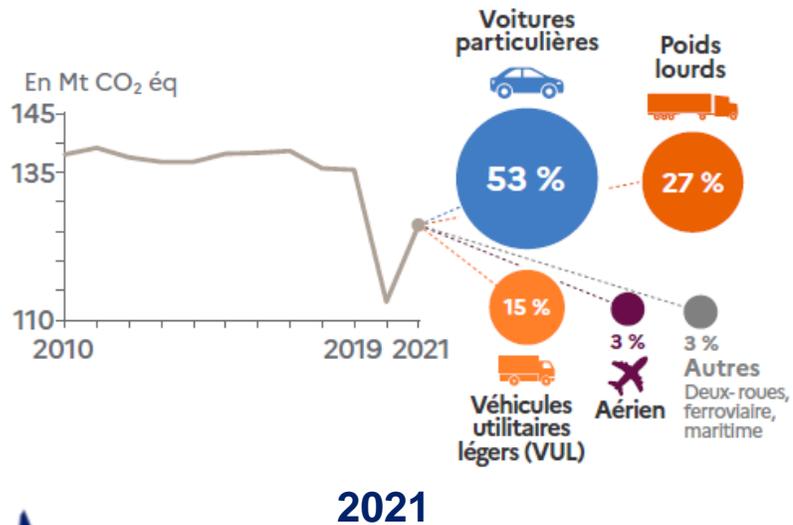
Source : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/>

ÉMISSIONS GES LIÉES AUX TRANSPORTS FRANCE 2021 & 2022

Émissions de gaz à effet de serre (GES)

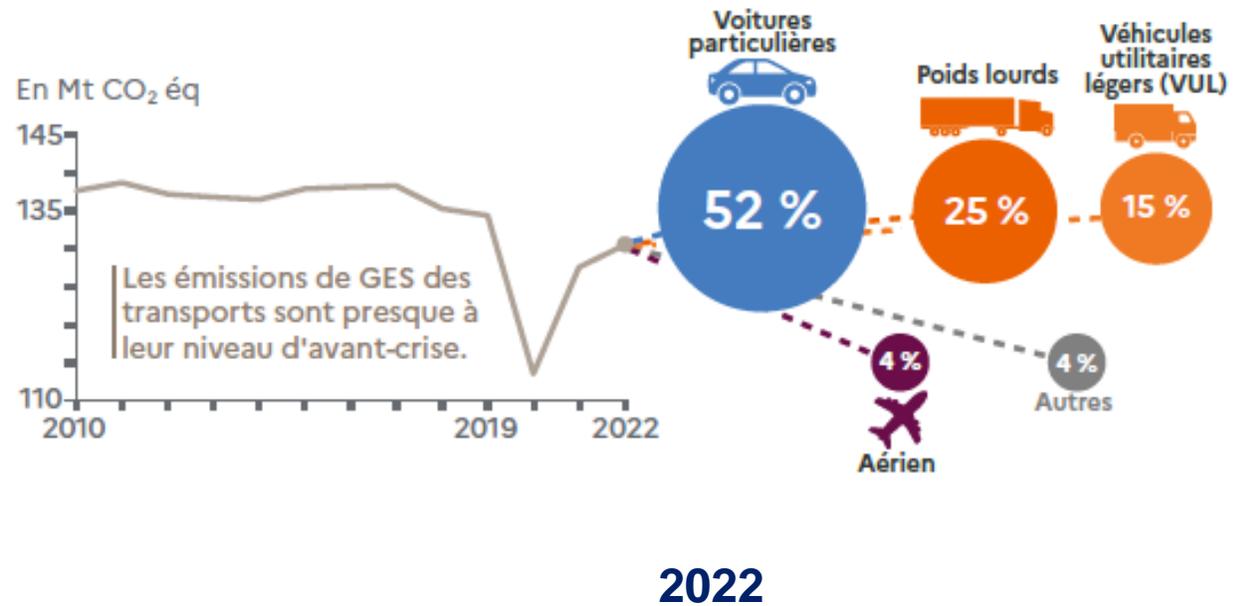


Émissions de GES des transports intérieurs | 126 millions de tonnes équivalent CO₂



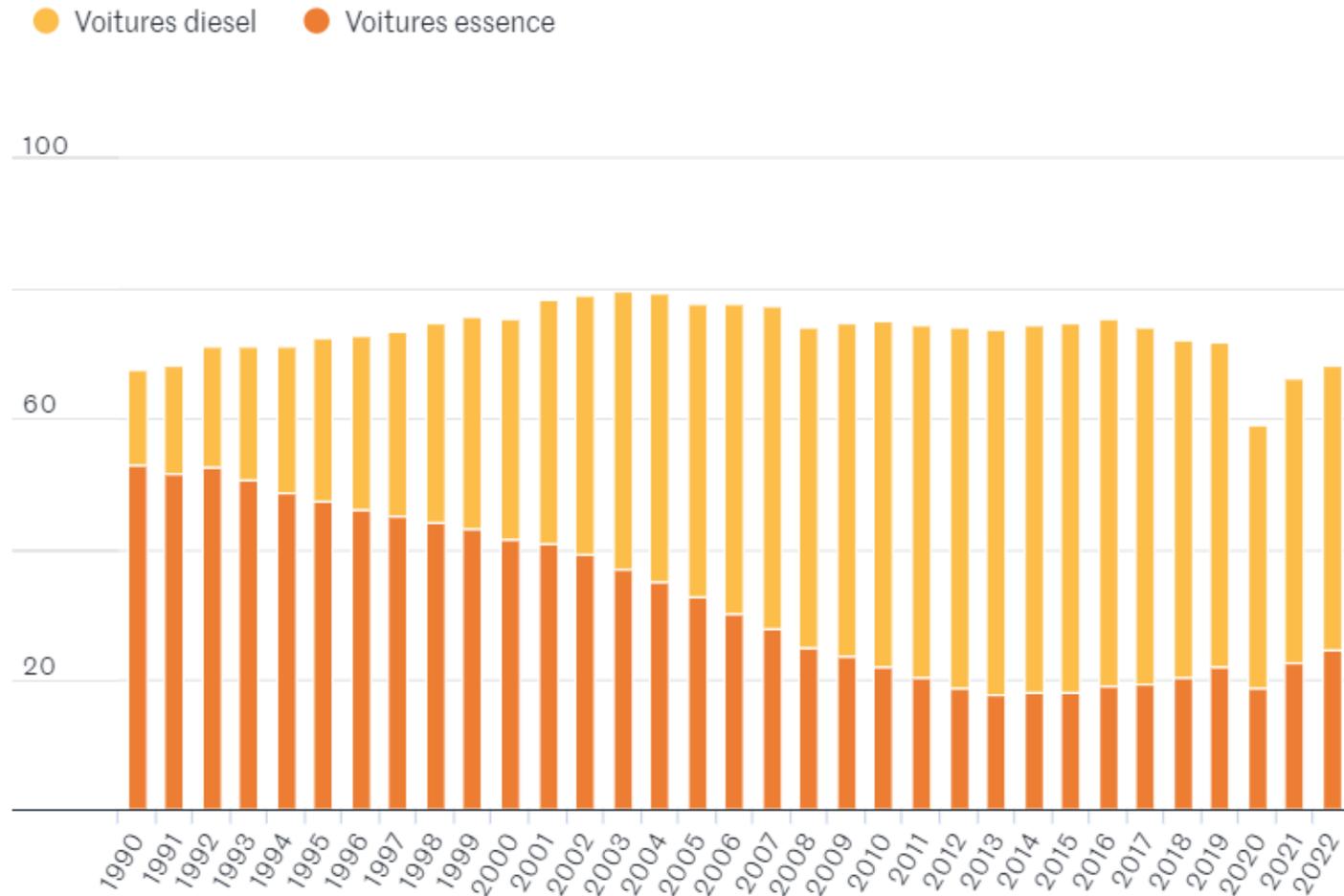
Émissions de gaz à effet de serre des transports intérieurs

130,5 millions de tonnes équivalent CO₂



EMISSIONS GES VÉHICULES THERMIQUES FRANCE

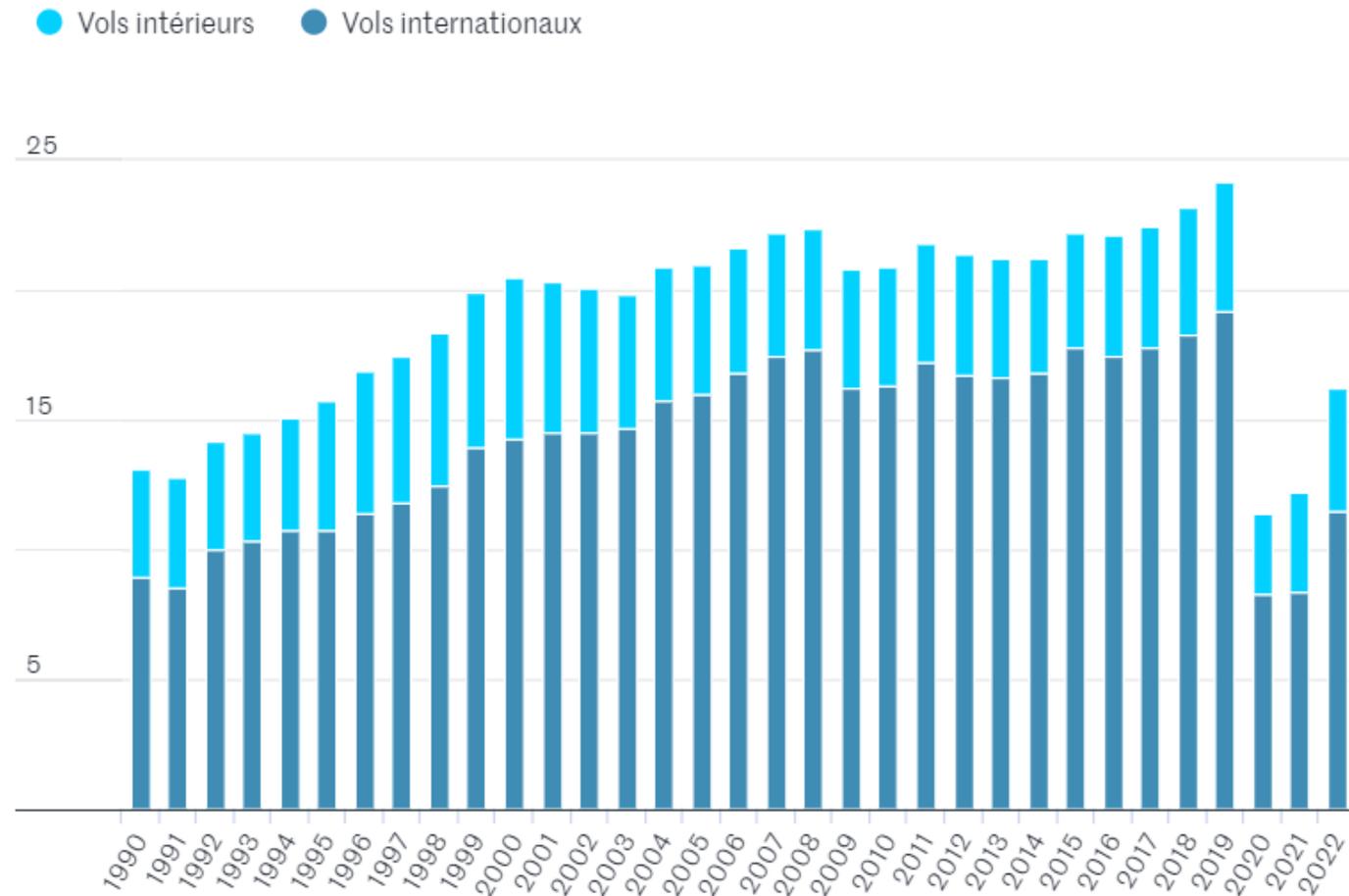
Emissions annuelles de gaz à effet de serre des voitures thermiques en France depuis 1990, en millions de tonnes de CO2 équivalent.



Source : CITEPA

EMISSIONS GES TRANSPORT AÉRIEN FRANCE

Émissions annuelles de gaz à effet de serre du transport aérien en France depuis 1990, en millions de tonnes de CO2 équivalent.



Source : CITEPA



CREATEUR DE NOUVELLES MOBILITES

PROSPECTIVE À 2050/2060

Colloque : Les transports de demain - 18 janvier 2024

LA SOCIÉTÉ EN 2050 : SCENARIOS

S1 GÉNÉRATION FRUGALE

Des transformations importantes dans les façons de se déplacer, de se chauffer, de s'alimenter, d'acheter et d'utiliser des équipements permettent d'atteindre la neutralité carbone uniquement avec des puits naturels (forêts et sols), préservant ainsi les services écologiques associés.



S3 TECHNOLOGIES VERTES

C'est davantage le développement technologique qui permet de répondre aux défis environnementaux plutôt que les changements de comportements vers plus de sobriété.



S2 COOPÉRATIONS TERRITORIALES

Pour atteindre la neutralité carbone, la société mise sur une évolution progressive, mais à un rythme soutenu du système économique vers une voie durable alliant sobriété et efficacité.



S4 PARI RÉPARATEUR

La société place sa confiance dans la capacité à gérer, voire à réparer les systèmes sociaux et écologiques avec plus de ressources matérielles et financières pour conserver un monde vivable. Les technologies de captage et stockage de CO₂, indispensables, sont incertaines et consommatrices d'électricité.

Source :
Transitions 2050
ADEME

LA SOCIÉTÉ EN 2050 : SCENARIOS

*2050 : Objectif neutralité carbone
Union Européenne*

Scénarios Transitions 2050 - ADEME Mobilité de la société française

LA SOCIÉTÉ EN 2050



Mobilité des personnes

- Réduction forte de la mobilité
- Réduction d'un tiers des km parcourus par personne
- La moitié des trajets à pied ou à vélo



- Mobilité maîtrisée
- - 17 % de km parcourus par personne
- Près de la moitié des trajets à pied ou à vélo



- Mobilités accompagnées par l'État pour les maîtriser : infrastructures, télé-massif, covoiturage
- + 13 % de km parcourus par perso
- 30 % des trajets à pied ou à vélo



- Augmentation forte des mobilités
- + 28 % de km parcourus par personne
- Recherche de vitesse
- 20 % des trajets à pied ou à vélo



TRANSITIONS 2050 : SCÉNARIO 1



- Les **kilomètres parcourus baissent de 26%** d'ici 2050, par l'évolution vers davantage de proximité et de la baisse de la mobilité.
- Favorise en particulier les **modes actifs** (marche et vélo)
- **Fort retrait de la voiture et de l'avion** (moitié moins de trajets en voiture par rapport à 2015)
- **Electrification progressive des voitures** pour couvrir à terme 90% des usages, **allègement** et baisse de leur vitesse de circulation (par ex.: 110 km/h sur autoroute)
- Développement du **covoiturage solidaire et de l'autostop** dans les zones rurales.
- La relocalisation de l'économie et la sobriété poussent à une **baisse de 45% des trafics de marchandises nationaux**.
- Les **émissions directes de GES** du secteur des mobilités **baissent ainsi de 91%**.

TRANSITIONS 2050 : SCÉNARIO 2



- **Demande de mobilité en repli de 8 %**
- Plus de proximité avec le **développement des trains du quotidien, des vélos cargos, pliants, vélomobiles, mini-voitures** et autres, du **covoiturage** et de **l'électrification** massive portés par des investissements dédiés importants.
- Les **trafics de marchandises baissent de 35 % en tonne-km** sous l'effet d'une réduction des volumes et des distances parcourues avec une part du ferroviaire et du fluvial qui fait plus que doubler.
- **Optimisation des remplissages** et de l'efficacité permettant de réduire également les consommations d'énergie.
- Les **émissions directes de GES du secteur des mobilités baissent ainsi de 95 %**.

TRANSITIONS 2050 : SCÉNARIO 3



- La demande de transport est satisfaite par les différents modes, menant à une **hausse de 23 % des kilomètres pour les voyageurs par rapport à 2015**, tandis que le **transport de marchandises est stable**.
- **Report modal faible et concentré dans les grandes villes** et les grands axes des lignes ferroviaires et fluviales.
- Principaux efforts concentrés sur l'accélération de la **décarbonation des flottes et de l'énergie, en particulier par l'électrification des véhicules**.
- **Mix énergétique plus diversifié pour les marchandises**, avec l'électricité pour les utilitaires et sur les axes d'autoroutes électriques, mais aussi le biogaz, l'hydrogène et les biocarburants.
- **Les émissions directes de GES du secteur des mobilités baissent ainsi de 94 %**.

TRANSITIONS 2050 : SCÉNARIO 4



- Les **kilomètres parcourus augmentent de 39 %** sous l'effet d'une hausse des voyages longue distance, en particulier aérien et d'une recherche constante de vitesse.
- La **voiture individuelle garde une place centrale**, malgré l'essor de **véhicules autonomes** partagés.
- Poussée par l'essor du e-commerce, la **logistique est de plus en plus connectée**, à flux tendus, et valorise la rapidité des livraisons. Cela soutient l'hégémonie des transports maritimes et routiers, tandis que la fragmentation des envois multiplie les livraisons en véhicules utilitaires légers.
- Les progrès technologiques facilitent l'**électrification**, le recours au **biogaz** augmente, mais la décarbonation est limitée par les ressources disponibles.
- Les **émissions directes de GES du secteur des mobilités baissent ainsi de 90 %**.

TRANSITIONS 2050 : BILAN GÉNÉRAL

Cinq leviers ont été identifiés pour réduire les émissions liées à la mobilité des personnes et des marchandises :

- la modération de la demande de transport,
- le report modal,
- le remplissage des véhicules,
- l'efficacité énergétique des véhicules,
- la décarbonation de l'énergie.

En partie grâce aux schémas d'aménagement du territoire plus recentrés sur l'économie locale, S1 et S2 peuvent agir plus fortement sur les trois premiers leviers et sur certains leviers d'efficacité davantage en lien avec la sobriété, tandis que S3 et S4 agissent plus fortement sur les deux derniers leviers, plus technologiques.

Les 4 scénarios explorent des futurs possibles : par exemple, en matière de **besoins de mobilité voyageurs**, qui évoluent de -26% (S1) à +39% (S4) par rapport à 2015.

Les **leviers de sobriété** permettent de diviser par plus de 2 les besoins énergétiques par rapport au scénario tendanciel.

TRANSITIONS 2050 : BILAN GÉNÉRAL

Les leviers **d'efficacité et de décarbonation** sont indispensables dans tous les scénarios :

- l'électrification est incontournable pour les véhicules routiers légers
- la biomasse (biocarburants et biogaz) complète le mix des modes des poids lourds, du maritime ou de l'aérien, plus difficiles à décarboner.
- l'hydrogène est sollicité en complément dans certains scénarios

Pour le **transport de voyageurs**, 80 à 87% de la demande énergétique en 2050, transports aériens longues distances inclus, réalisée par des **vecteurs énergétiques sans carbone fossile** (électricité, hydrogène, biocarburants liquides et gazeux et carburants de synthèses);

Pour le **transport de marchandises**, la décarbonation est plus lente et les vecteurs énergétiques sont plus diversifiés, notamment pour les poids lourds et le transport maritime international. Selon les scénarios, les **vecteurs sans carbone fossile** remplissent de 65 à 91% de la demande énergétique en 2050.

VISION SECTORIELLE VERS 2060

- Pour le secteur **automobile**, se repositionner sur le véhicule électrique et sur la fabrication des batteries, mais aussi, sur la fabrication de moteurs électriques, sur le recyclage des batteries ainsi que sur le développement de l'ordinateur de bord des véhicules.
- Pour le secteur **aéronautique**, qui représente une industrie fortement exportatrice en France, la poursuite des recherches sur l'avion du futur et la montée en puissance d'une filière de biokérosène (voire d'e-kérosène) sont une priorité.
- L'accompagnement du dynamisme émergent du secteur **ferroviaire** autour des enjeux d'innovation :
 - décarbonation des derniers engins thermiques (trains hydrogènes et hybrides),
 - fabrication de locomotives à batteries sur de courtes distances ou, sur de plus longues distances en particulier pour le fret, de locomotives hybrides (caténares et batteries) ou à hydrogène,
 - allègement (et recyclage) des matériels roulants et infrastructures adaptées aux différents types de services (y compris en zones moins denses),
 - performance et intensification d'usage du réseau grâce au déploiement de la digitalisation des systèmes d'exploitation.

VISION SECTORIELLE VERS 2060

- Pour le secteur **maritime et fluvial**, soutien au développement de la propulsion ou de l'assistance à la propulsion vélique, ainsi que les expérimentations d'énergies alternatives aux énergies fossiles (gaz naturel liquéfié avec capture et stockage du CO₂, hydrogène, méthanol, éthanol, diméthyléther) : les solutions électriques constituent une solution idéale pour des trajets plus courts, en particulier pour le fluvial et les ferries.
- Consolidation et le développement de la filière française de fabrication du **vélo** (électrique ou non) et des **véhicules intermédiaires légers**.

Enfin, le changement technologique lié à la décarbonation de l'économie conduit aussi à identifier de nouveaux besoins en **minéraux** dont certains deviennent rares ou sont contrôlés par un nombre réduit de pays et à renforcer les filières de recyclage correspondantes.

Source : CGEDD – France Stratégie Prospective 2040 - 2060 des transports et des mobilités



CREATEUR DE NOUVELLES MOBILITES

EVOLUTION DES TRANSPORTS

Colloque : Les transports de demain - 18 janvier 2024

VERS LE FUTUR DES TRANSPORTS

