



3. Etude des aéronefs et des engins spatiaux

3.2.1 Groupes motopropulseurs

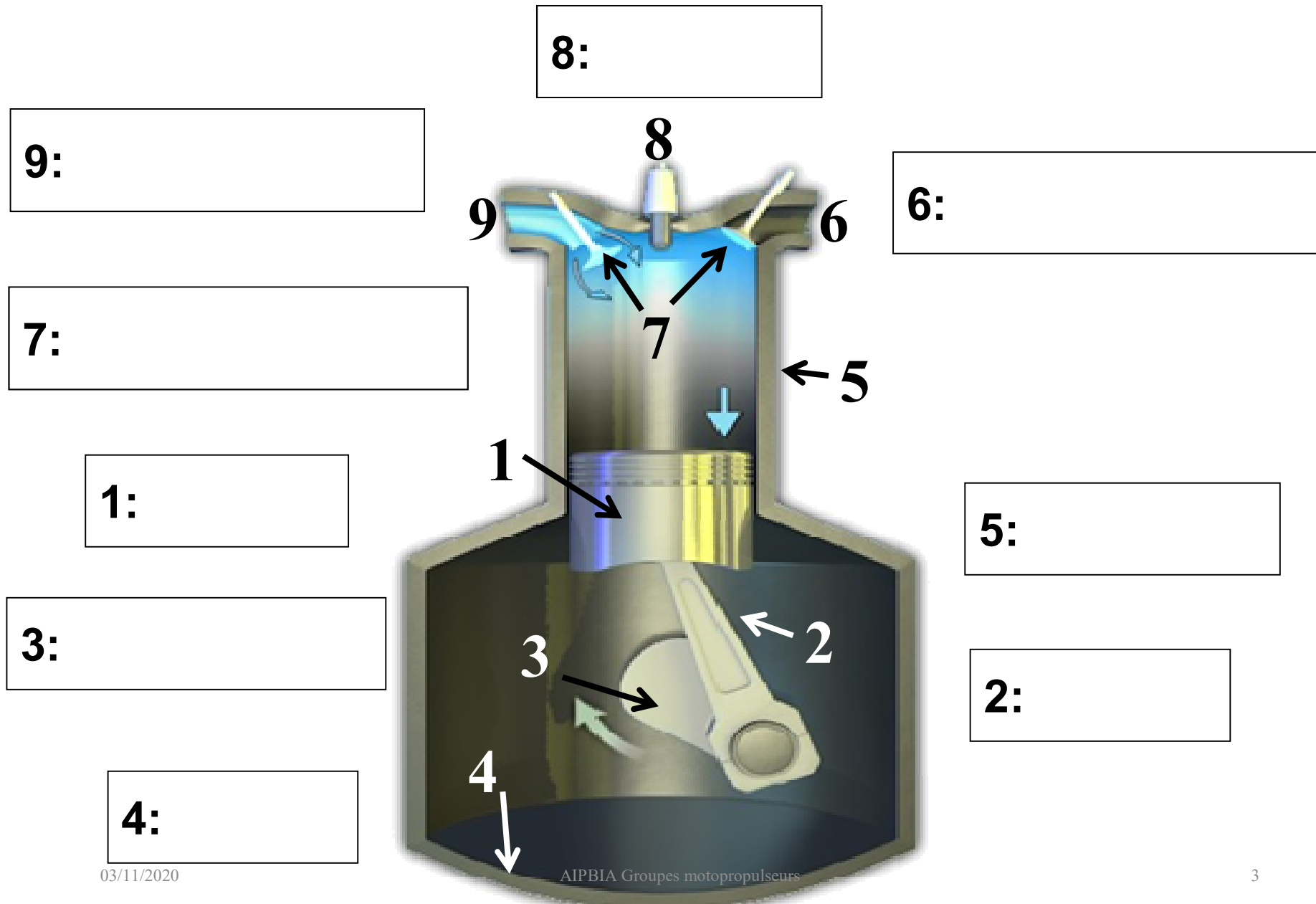


3. Etude des aéronefs et des engins spatiaux

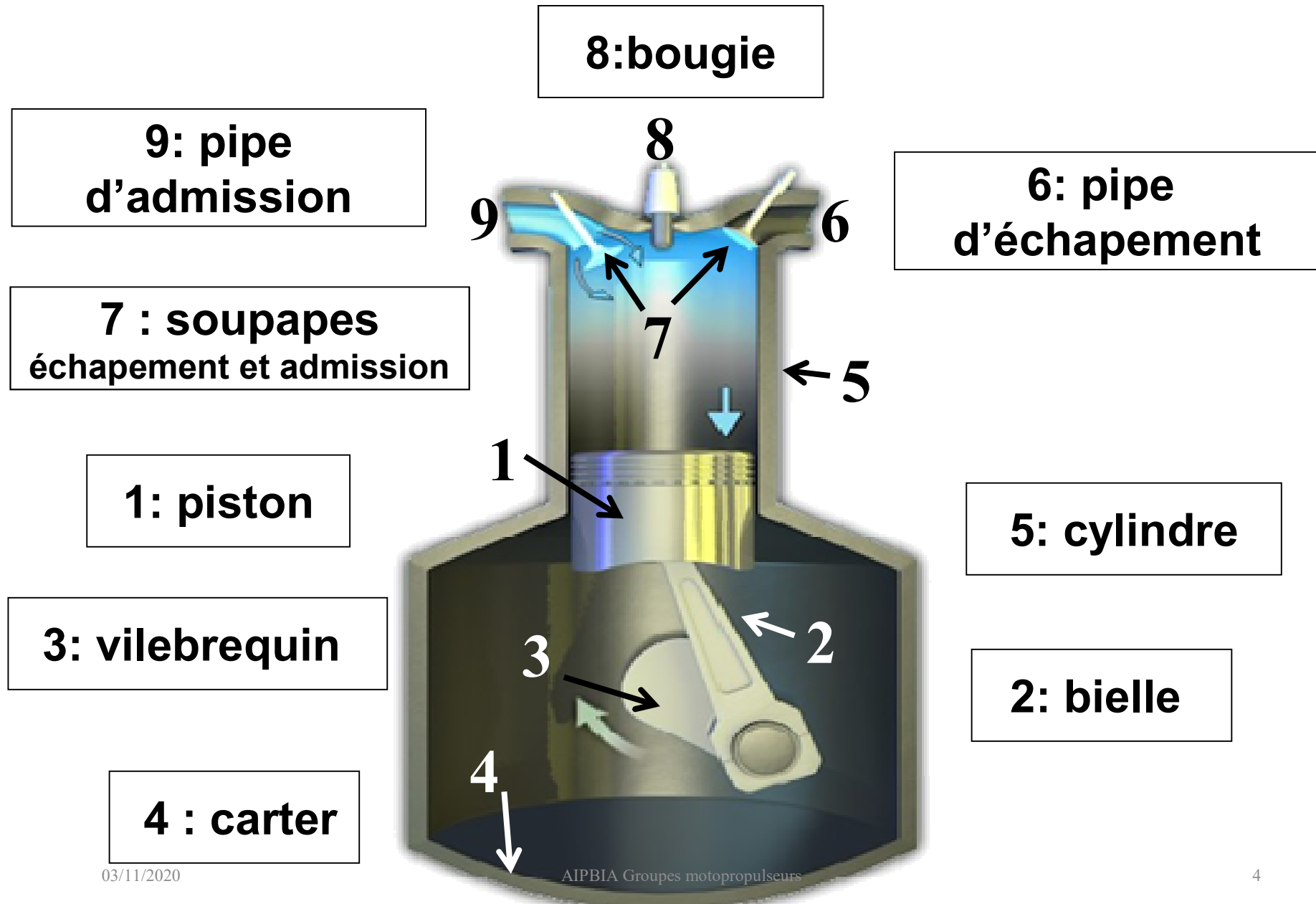
3.2 Les groupes motopropulseurs

- **Moteur à pistons**
- **Propulseurs à réaction**
 - **Turboréacteur**
 - **Turbopropulseur**
 - **Statoréacteur**
 - **Moteur fusées**
- **Motorisation électrique**
- **Hélices et Rotors**
 - **Principe**
 - **Rendement**
 - **Calage**
 - **Coupe gyroscopique et souffle hélicoïdal**
- **Contraintes liées au développement durable**
 - **Bruit**
 - **Optimisation énergétique**

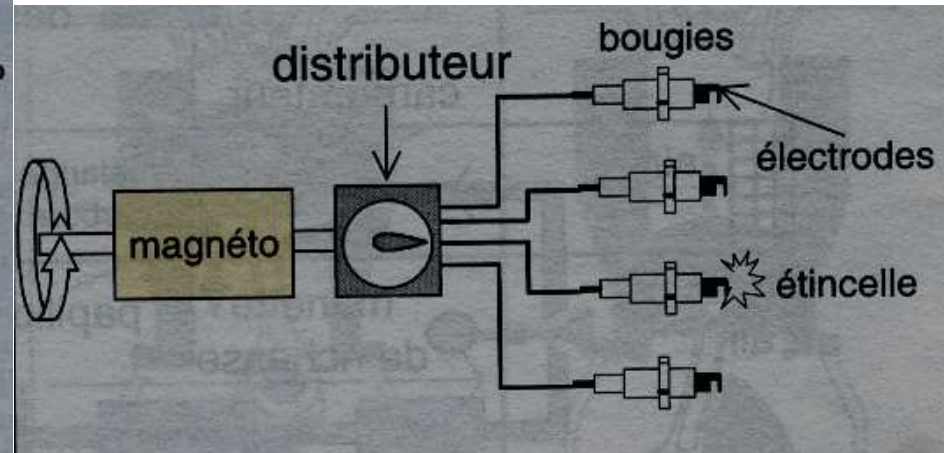
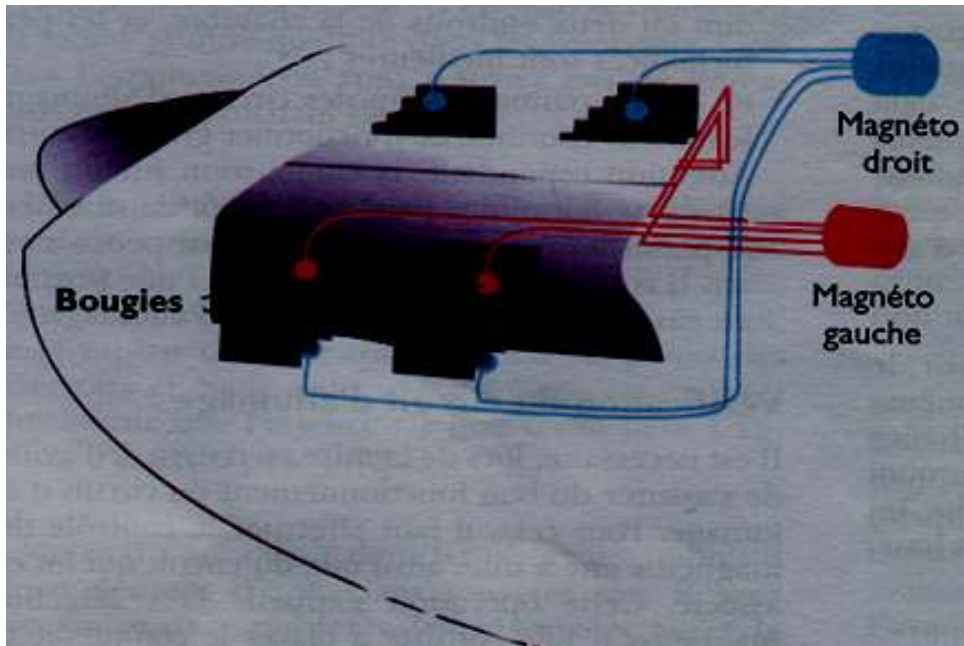
Principe du moteur à explosion : un cylindre



Principe du moteur à explosion : un cylindre



Circuit d'allumage



Principe du moteur à explosion: 4 temps



Admission

Introduction d'un mélange air/essence durant la descente du piston

Principe du moteur à explosion: 4 temps



Admission

Introduction d'un mélange air/essence durant la descente du piston



Compression

Remontée du piston comprimant le mélange dans la chambre de combustion



Principe du moteur à explosion: 4 temps



Admission

Introduction d'un mélange air/essence durant la descente du piston



Compression

Remontée du piston comprimant le mélange dans la chambre de combustion



La bougie produit une étincelle : la combustion se produit. Les gaz chauds repoussent le piston, initiant le mouvement

Combustion / détente



Principe du moteur à explosion: 4 temps



Admission

Introduction d'un mélange air/essence durant la descente du piston



Compression

Remontée du piston comprimant le mélange dans la chambre de combustion



La bougie produit une étincelle : la combustion se produit. Les gaz chauds repoussent le piston, initiant le mouvement



Échappement

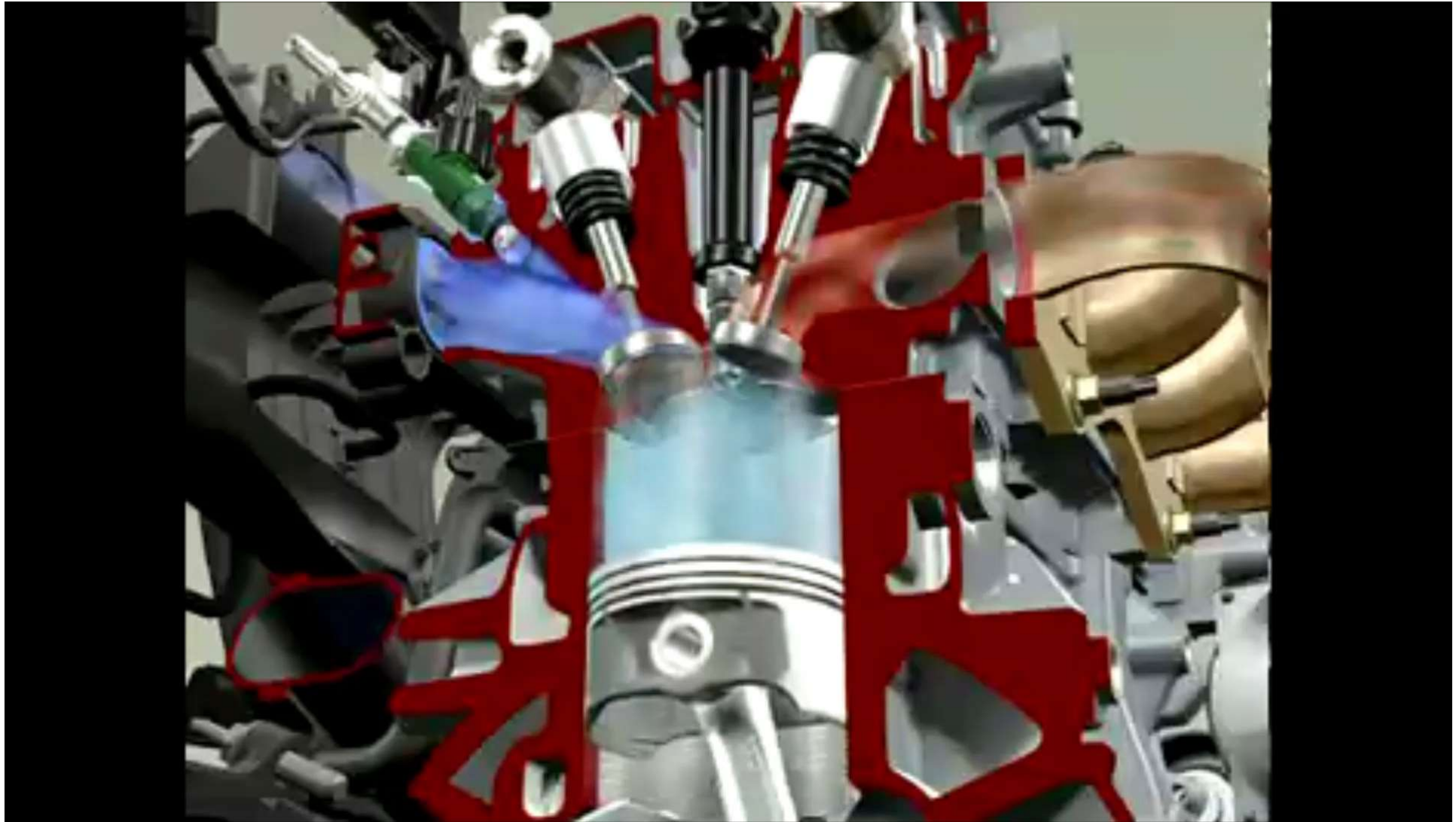
Combustion / détente



Évacuation des gaz brûlés dans l'échappement



Cycle moteur 4 Temps



Principe du moteur à explosion

- Les moteurs à piston comprennent en général de 4 à 8 cylindres (jusqu'à 24).
- Ils sont disposés:

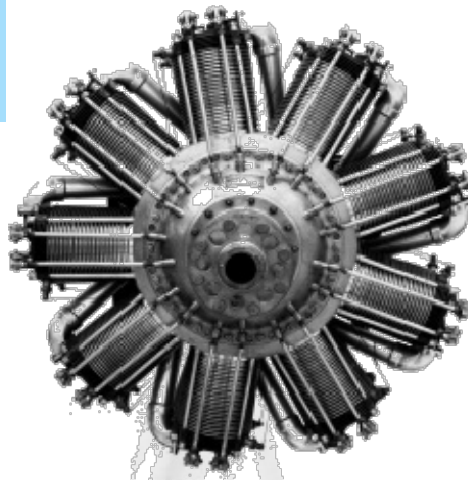
en V



en ligne



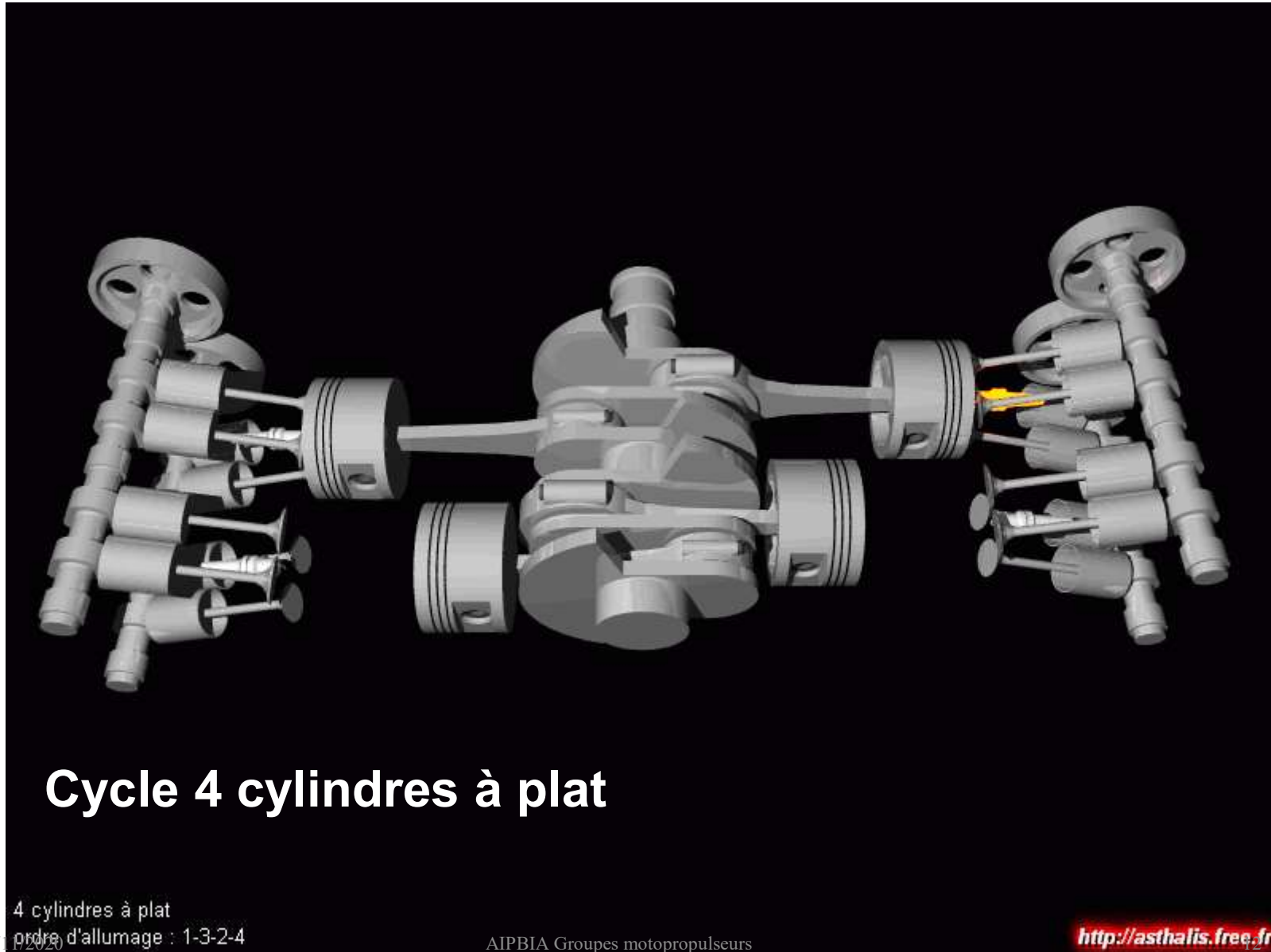
en étoile



à plat

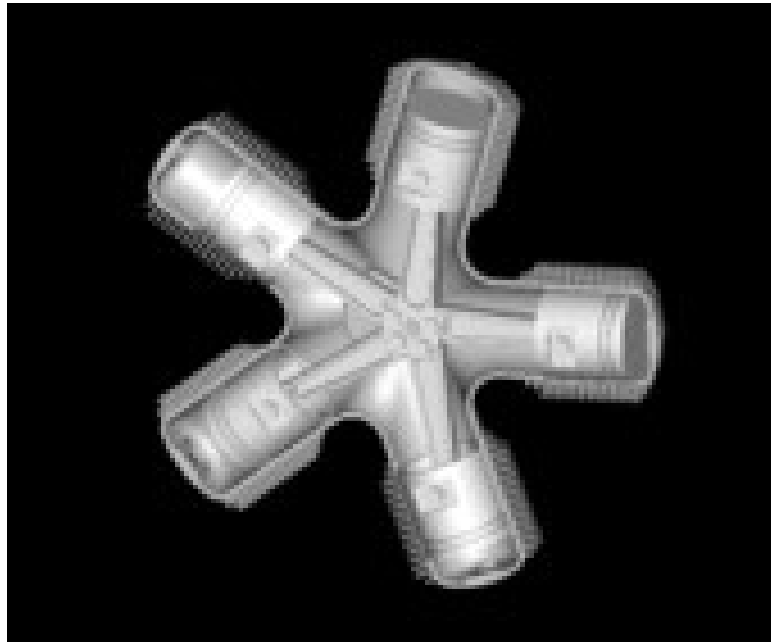


Principe du moteur à explosion



Principe du moteur à explosion

Moteur à explosion en étoile



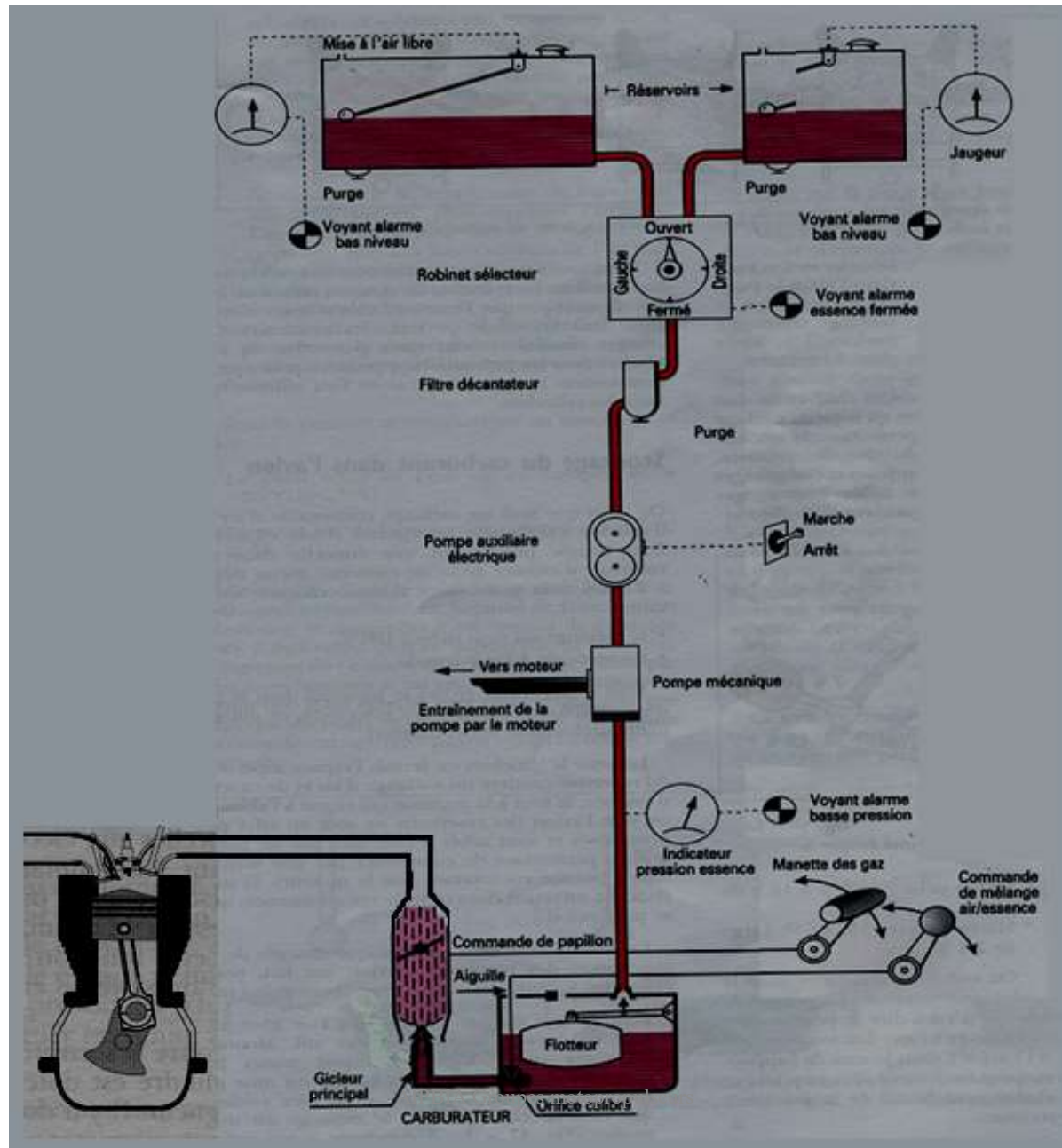
**Le plus puissant construit en série est le Pratt_&_Whitney Cyclone R-4360 (1944).
28 cylindres en quadruples étoile (4 x 7).
72 litres, 4 300 ch**



Groupes motopropulseurs

- **Moteurs à Pistons**
 - **Principe du moteur à explosion**
 - **Carburateur ou injection**
 - **Les essences**
 - **Performances et utilisation**
 - **Contrôle du fonctionnement**

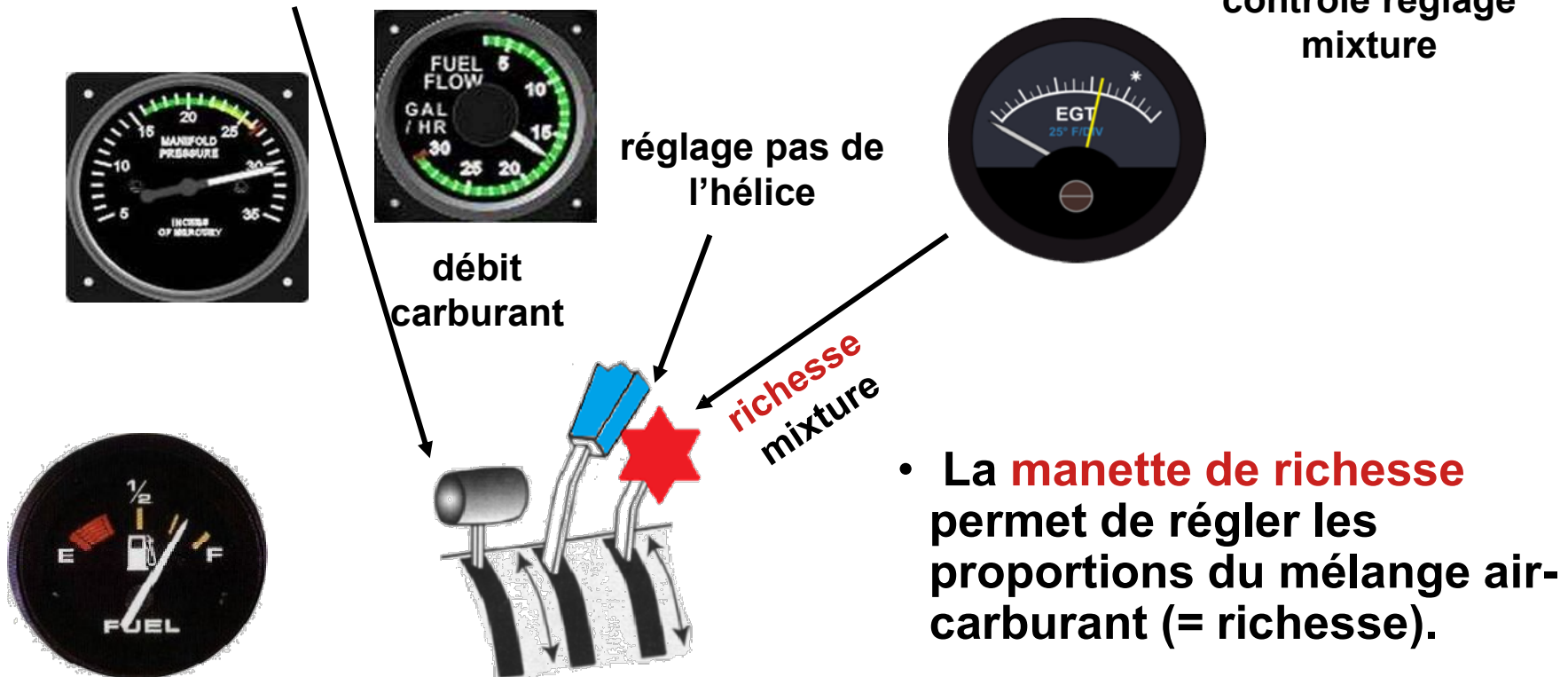
Circuit carburant



Carburateur

- La **manette des gaz** permet de régler le débit du mélange dans les cylindres.

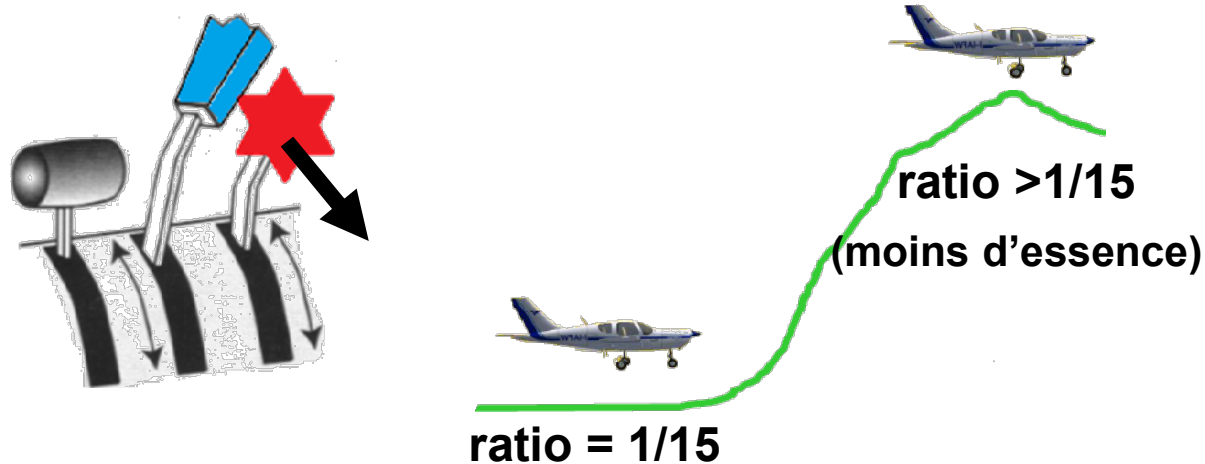
manette des gaz → pression d'admission



- La **manette de richesse** permet de régler les proportions du mélange air-carburant (= richesse).

Carburant

- Le bon ratio **essence/air** est de **1 gr** d'essence pour **15 gr** d'air
- Lorsque l'avion **monte** l'air est moins **dense** donc il faut **diminuer** la quantité d'essence en jouant sur la **richesse**. Manette de mixture / richesse toujours en **rouge**

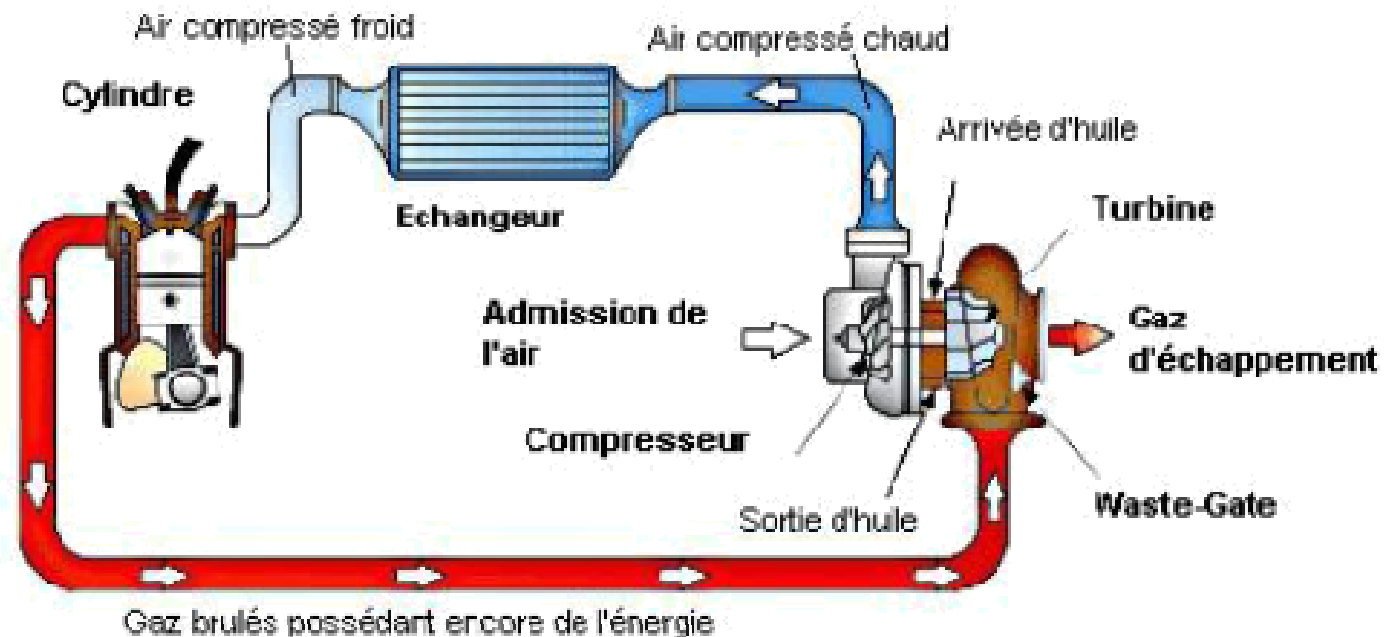


Le mélange est en richesse maximale dans les phases de décollage et d'atterrissage.

Un fonctionnement à régime réduit en pleine richesse entraîne un encrassement du moteur.

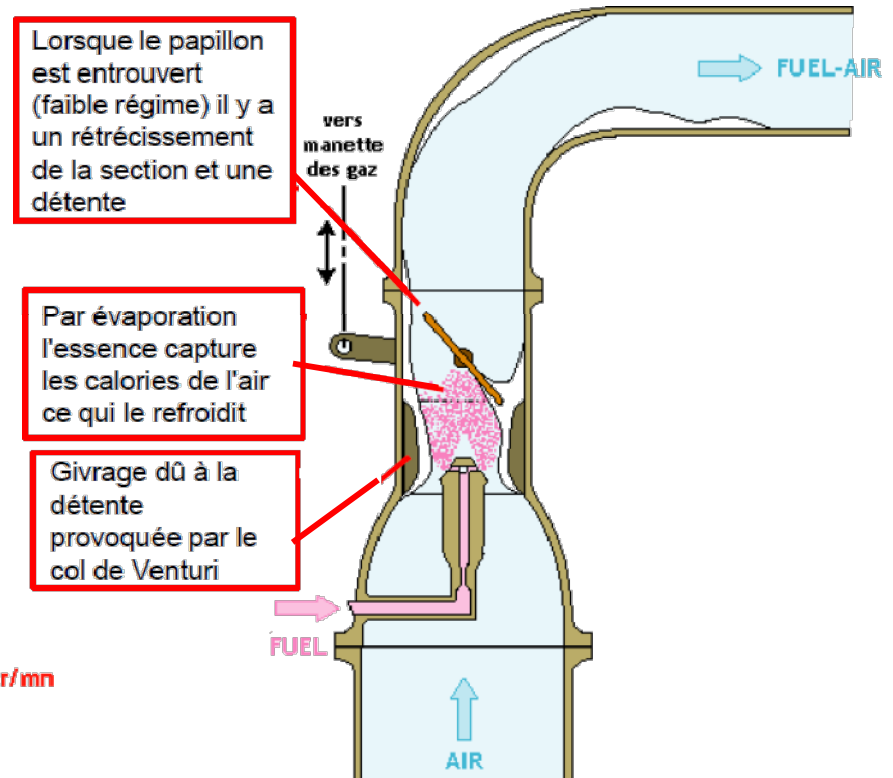
Carburant : turbo-compresseur

- Pour garder la même pression d'air d'admission en altitude, on utilise un compresseur ou un turbocompresseur qui va comprimer l'air entrant dans les cylindres.
- Le but est d'avoir la même pression d'admission quelque soit l'altitude

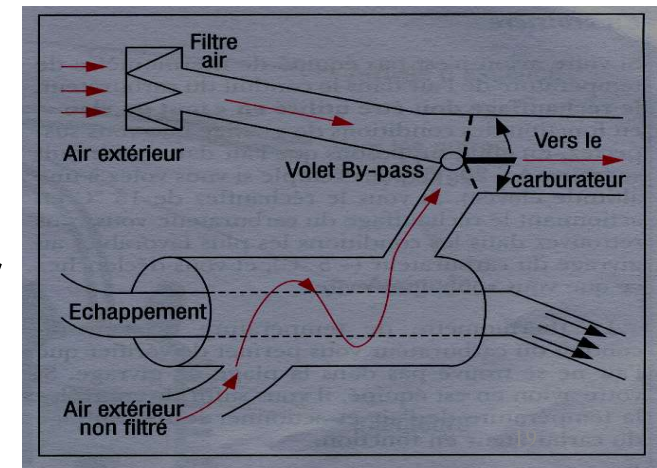


Carburateur : givrage carburateur

- Le mélange air-carburant contient de l'humidité => risque de givrage dans le carburateur.
- Pour un moteur avec une hélice à calage fixe, un givrage carburateur diminue le régime moteur



- Prévention:
 - Utilisation de la réchauffe carburateur

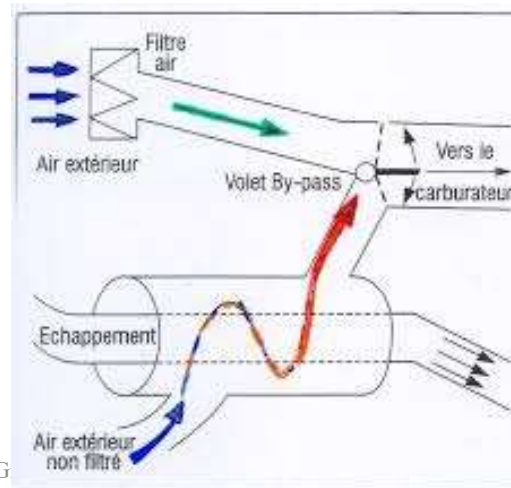
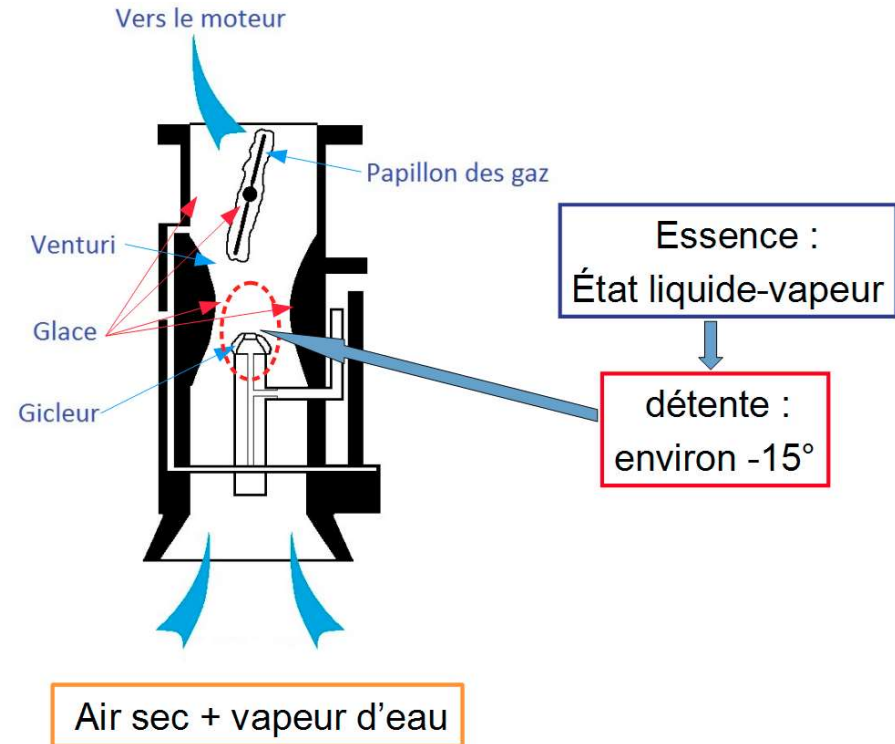


Carburateur : givrage carburateur

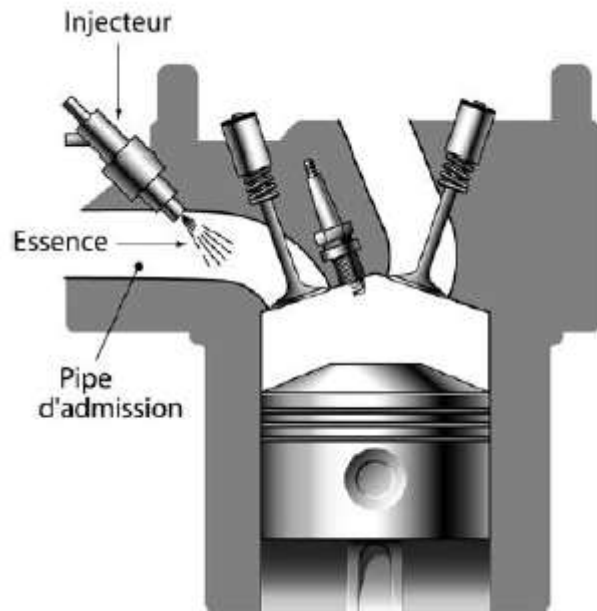
- Le mélange air-carburant contient de l'humidité => risque de givrage dans le carburateur.
- Pour un moteur avec une hélice à calage fixe, un givrage carburateur diminue le régime moteur



- **Prévention:**
 - Utilisation de la réchauffe carburateur



Injection



- **L'injection consiste à injecter directement l'air et le carburant dans le cylindre où le mélange s'effectue.**

- **Le problème de givrage du moteur ne se pose plus.**
- **Le moteur est alimenté dans toutes les positions.**

(nécessaire en voltige pour le vol dos)

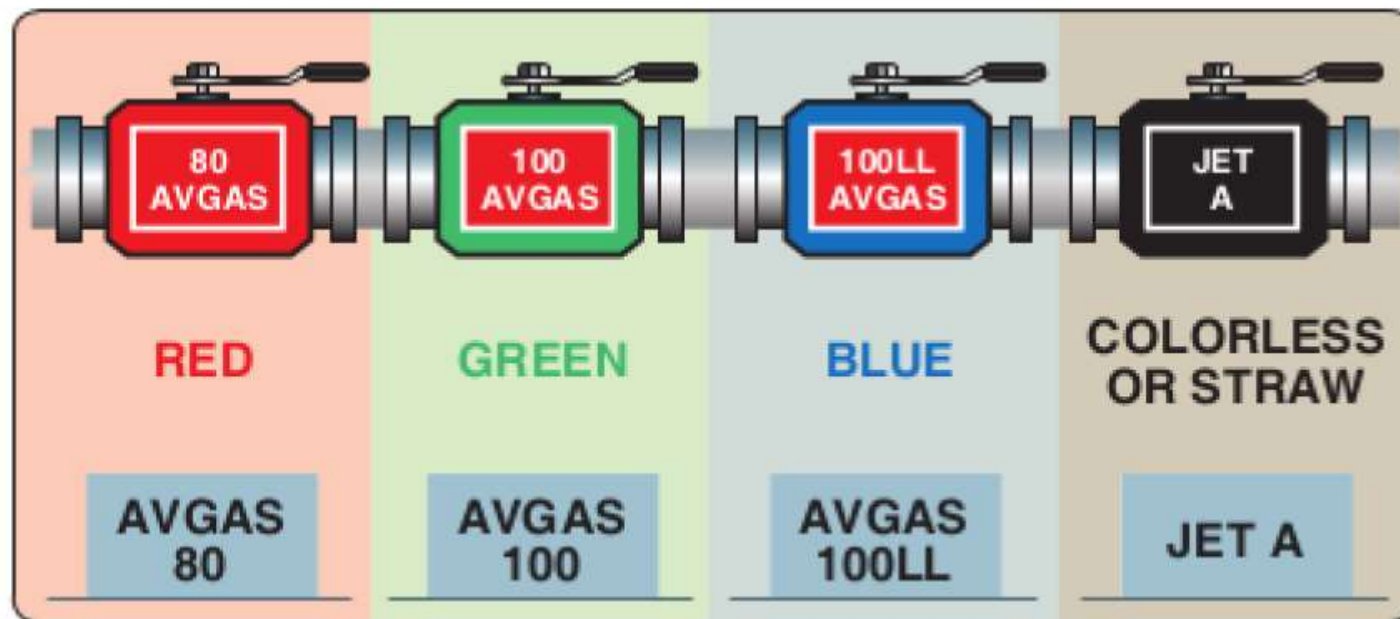
Groupes motopropulseurs

- **Moteurs à Pistons**
 - **Principe du moteur à explosion**
 - **Carburant ou injection**
 - **Les essences**
 - **Performances et utilisation**
 - **Contrôle du fonctionnement**

Les essences

- L'essence doit fournir beaucoup d'énergie et bien résister à la détonation pour éviter de détériorer le moteur.
- Pour qualifier les essence on utilise un « indice d'octane » :
 - indice 0 : extrêmement détonant
 - indice 100 : très peu détonant

La couleur des essences est révélatrice de leurs indices d'octane:



Les essences

- **Certains moteurs d'avion sont réglés pour fonctionner au carburant automobile et même au diesel.**
- **Un indice d'octane trop élevé entraîne un encrassement du moteur par mauvaise combustion**
- **Un indice plus faible peut détruire le moteur par une augmentation excessive de la température et une détonation trop violente.**

Groupes motopropulseurs

- **Moteurs à Pistons**
 - **Principe du moteur à explosion**
 - **Carburateur ou injection**
 - **Les essences**
 - **Performances et utilisation**
 - **Contrôle du fonctionnement**

Moteurs à pistons

- **Puissances de 20 à 3500ch. En général de 90 à 300ch.**
- **Utilisés aujourd'hui pour l'avion générale (sports et loisirs)**
- **Coût modeste et bonne fiabilité pour les faibles puissances.**

Groupes motopropulseurs

- **Moteurs à Pistons**
 - **Principe du moteur à explosion**
 - **Carburateur ou injection**
 - **Les essences**
 - **Performances et utilisation**
 - **Contrôle du fonctionnement**

Moteurs à pistons: contrôle en vol



Huile moteur, carburant, charge

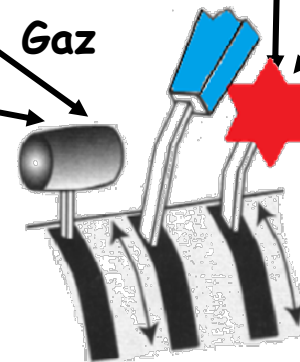
Pression d'admission



richesse mixture



Gaz



Des exemples de QCM d'examen sur la partie de cours qui précède

La plupart des moteurs d'avions légers est équipée d'un système de double allumage qui a pour principal avantage :

- a) de réguler la consommation électrique.
- b) de réduire la consommation de carburant.
- c) d'améliorer la combustion et d'augmenter la sécurité en vol.
- d) de diminuer l'usure des bougies.

Sur un avion certifié, un moteur à pistons contenant 4 cylindres est pourvu au total de :

- a) 2 bougies d'allumage
- b) 4 bougies d'allumage
- c) 8 bougies d'allumage
- d) 0 bougie d'allumage

Pour un moteur à quatre temps, la phase qui produit de l'énergie mécanique est :

- a) l'admission.
- b) la compression.
- c) la combustion.
- d) l'échappement.

Le réchauffage carburateur doit être utilisé :

- a) aux forts régimes du moteur si la température de l'air se situe entre -5°C et $+5^{\circ}\text{C}$.
- b) aux faibles régimes du moteur et forte humidité relative.
- c) pendant tout le vol lorsque la température de l'air est négative.
- d) aux forts régimes du moteur et faible humidité relative.

En vol, la richesse du mélange air-essence peut varier naturellement. Elle :

- a) augmente avec l'altitude.
- b) diminue avec l'altitude.
- c) reste constante quelle que soit l'altitude.
- d) varie avec la pression d'admission.

3. Etude des aéronefs et des engins spatiaux

3.2 Les groupes motopropulseurs

- Moteur à pistons
- Propulseurs à réaction
 - Turbo réacteur
 - Turbo propulseur
 - Statoréacteur
 - Moteur fusées
- Motorisation électrique
- Hélices et Rotors
 - Principe
 - Rendement
 - Calage
 - Coupe gyroscopique et souffle hélicoïdal
- Contraintes liées au développement durable
 - Bruit
 - Optimisation énergétique

Groupes motopropulseurs

- **Propulseurs à réaction**

- **Principes de la propulsion à réaction**

- **Turboréacteurs**

- **Turbopropulseurs**

- **Statoréacteurs**

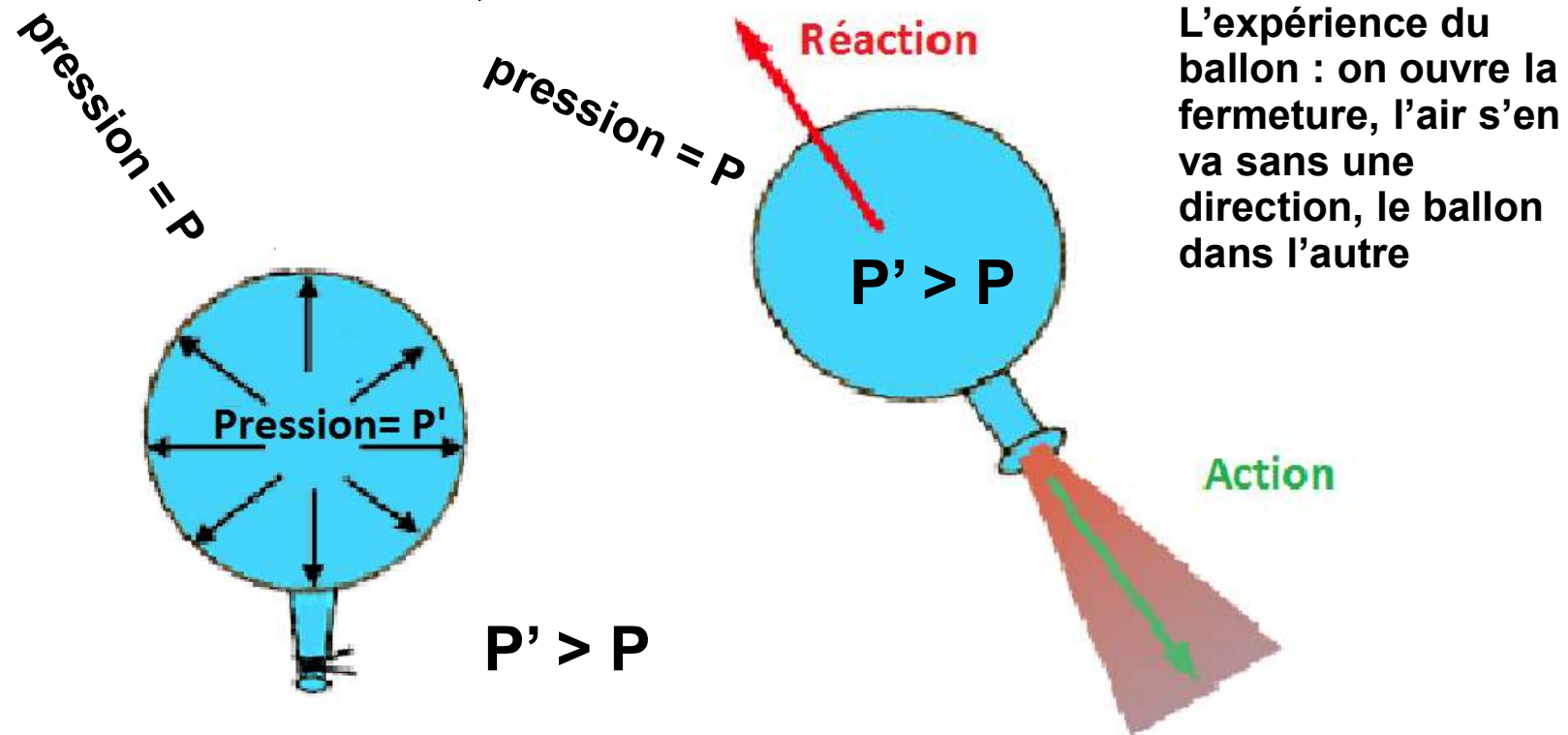
- **Moteur fusée**

- On admet généralement, que le principe du réacteur moderne fut breveté dès 1911 par un ingénieur français François LORIN
- il fallut attendre 1939 que les progrès de la métallurgie permettent de voir les premières réalisations.
- L'inventeur français, Maxime Guillaume, dépose dès **1921** un brevet concernant son principe. Il sera ensuite développé indépendamment par deux ingénieurs durant les années **1930**, Frank Whittle au Royaume-Uni et Hans von Ohain en Allemagne.

Principe de la propulsion par réaction

Fondée sur le principe d'**action-réaction** (Isaac Newton). **L'éjection de matière dans une direction crée une force dans le sens inverse.**

- Ejection de matière emportée par l'engin : **moteur fusée**
- Ejection d'air absorbé à l'avant, accéléré et reprojeté à l'arrière : **turboréacteur, statoréacteur**



Principe de la propulsion par réaction

- Le théorème de BERNOULLI justifie que les gaz sous pression accélèrent en se détendant pour sortir de la boudruche :

$$p' = p + \rho \cdot \frac{v^2}{2}$$

Principe de la propulsion par réaction

- Le théorème d'EULER montre que les gaz éjectés, produisent une poussée sur la baudruche :

$$\mathbf{F}_{\text{(poussée)}} = \mathbf{Dm} (\mathbf{V}_{\text{itesse Sortie}} - \mathbf{V}_{\text{itesse Entrée}})$$

Dm = Débit massique de l'air passant dans le moteur,

L'effet propulsif est proportionnel à la masse éjectée mais aussi au carré de la vitesse de cette masse.

Principe de la propulsion par réaction

Une masse d'air entrant dans un réacteur à une vitesse V_1 et en sortant à une vitesse V_2 telle que $V_2 > V_1$ produit **une force de réaction utilisée comme force de poussée propulsive.**

Équation d'Euler simplifiée (mécanique des fluides)

$$F_{\text{poussée}} = Dm \cdot (\text{vitesse sortie} - \text{vitesse entrée})$$

avec Dm = **débit massique** de l'air passant dans le moteur.

Débit massique : masse d'air traversant une surface donnée (l'entrée ou la sortie de la tuyère) par unité de temps. Souvent noté \dot{m}

La vitesse d'entrée de l'air est celle de l'avion (vent relatif). Sa vitesse de sortie est celle liée à la dilatation de l'air dans la chambre de combustion

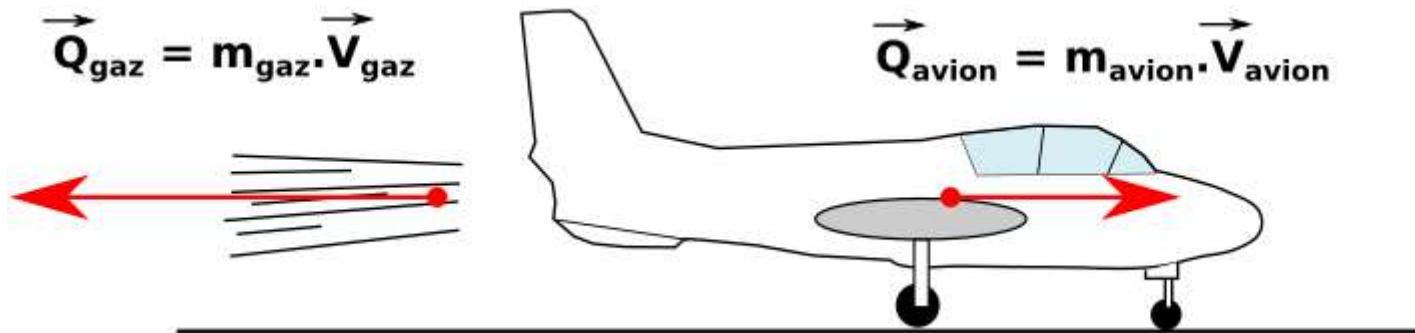
L'effet propulsif dépend de la masse d'air éjectée et de la vitesse d'éjection

Une autre approche: **quantité de mouvement**

La **quantité de mouvement** d'un système est la grandeur $\vec{Q} = m \cdot \vec{V}$
 Dans un système en équilibre (par exemple un avion en vol stabilisé), il y a **conservation de la quantité de mouvement** (second principe de Newton)

m = masse, V = vitesse, Q = quantité de mouvement en kg ms^{-1})

Pour un avion à réaction : $\vec{Q}_{\text{tot}} = \vec{Q}_{\text{avion}} + \vec{Q}_{\text{gaz éjecté}}$



Dans un avion au démarrage ($V = 0$, donc $Q_{\text{tot}} = 0$) \blacktriangleright $V_{\text{avion}} = - (m_{\text{gaz}} \times V_{\text{gaz}}) / m_{\text{avion}}$

La vitesse du gaz V (gaz) étant dirigée vers l'arrière, l'avion est propulsé en avant, c'est le mode de **propulsion par réaction**.

Note : pour retrouver l'équation d'Euler, la poussée F s'obtient en dérivant Q par rapport au temps

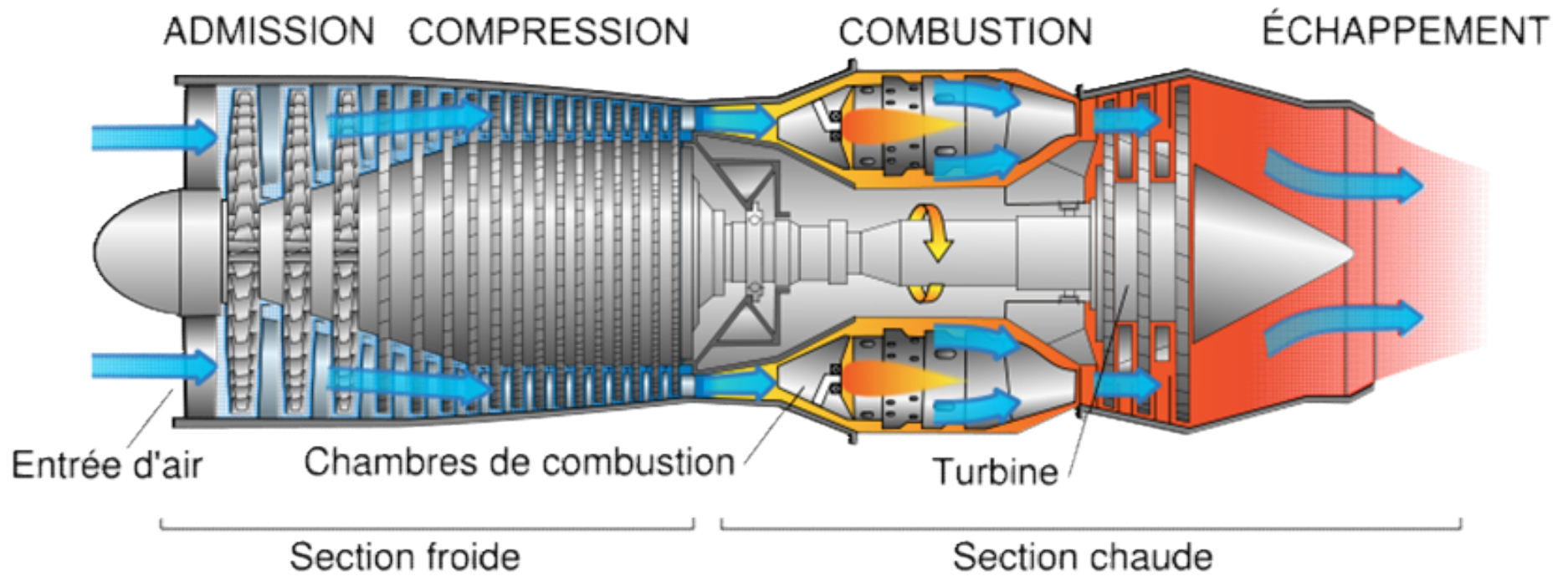
Groupes motopropulseurs

- **Propulseurs à réaction**
 - **Principes de la propulsion à réaction**
 - **Turboréacteurs et Turbofan**
 - Constitution**
 - **Compresseur**
 - **Chambre de combustion**
 - **Turbine**
 - **Turbopropulseurs**
 - **Statoréacteurs**
 - **Moteur fusée**



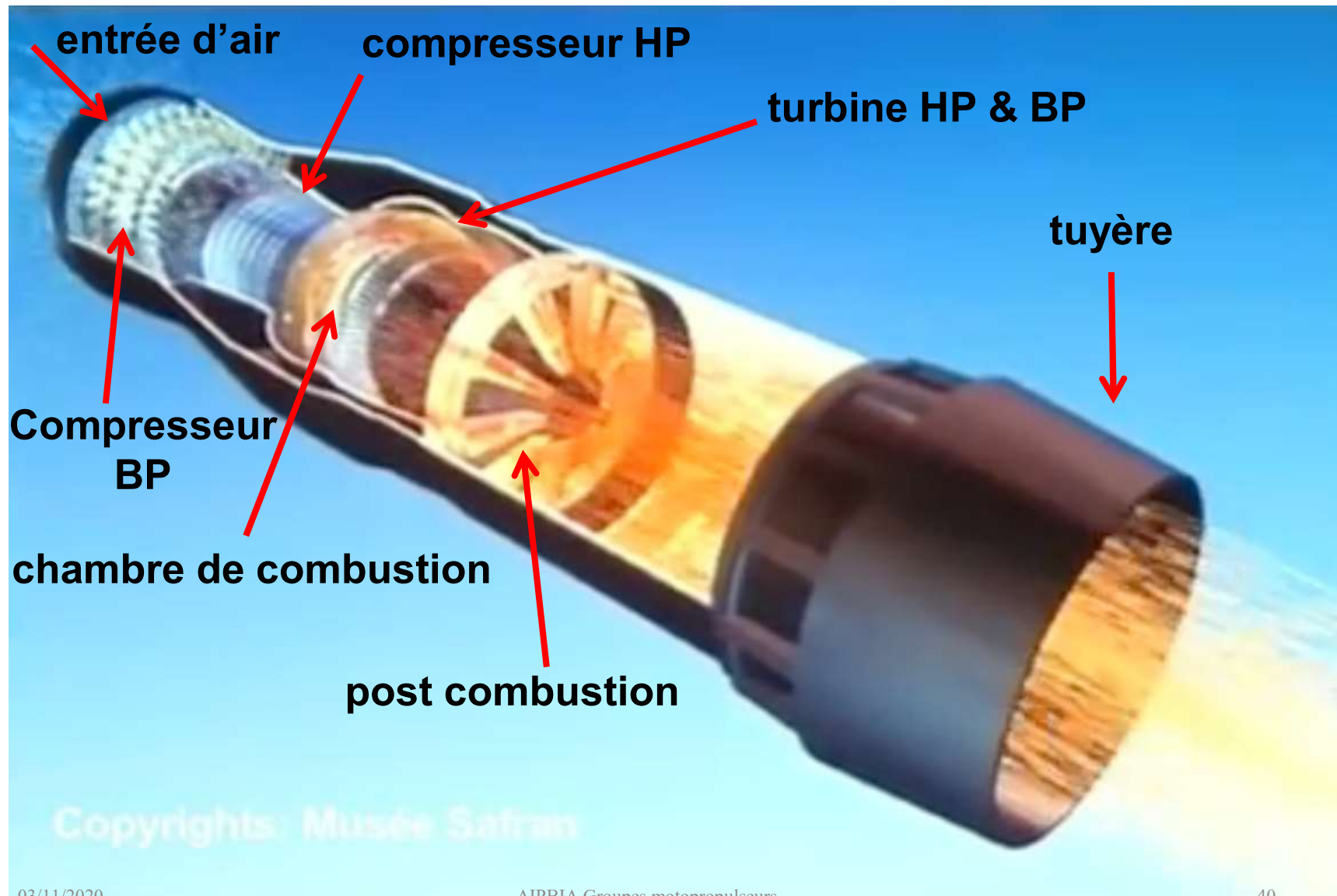
Différentes parties d'un turboréacteur

Réacteur simple corps - simple flux

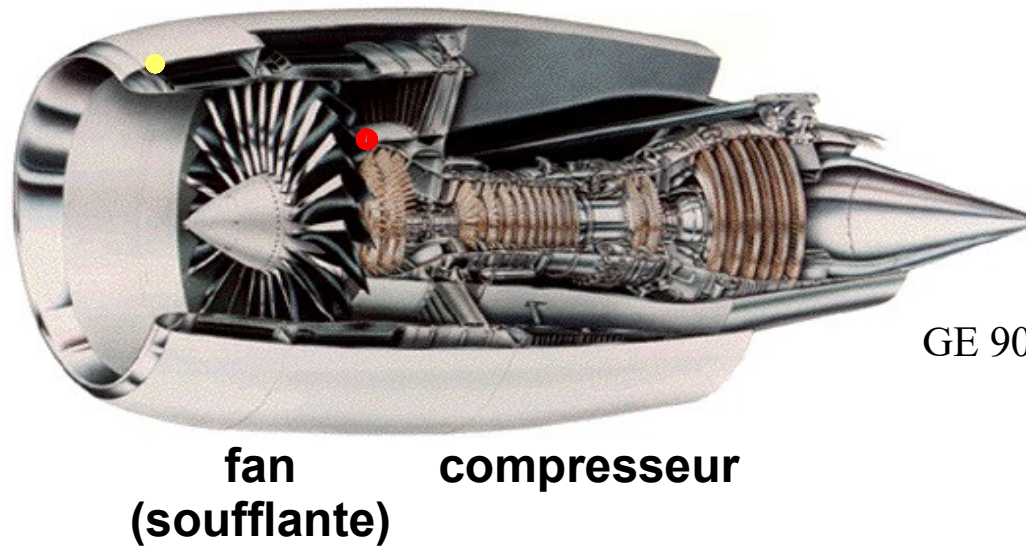


Jeff Dahl, Traduit par Berrucomons

Différentes parties d'un turboréacteur



Turboréacteur : le fan et le compresseur



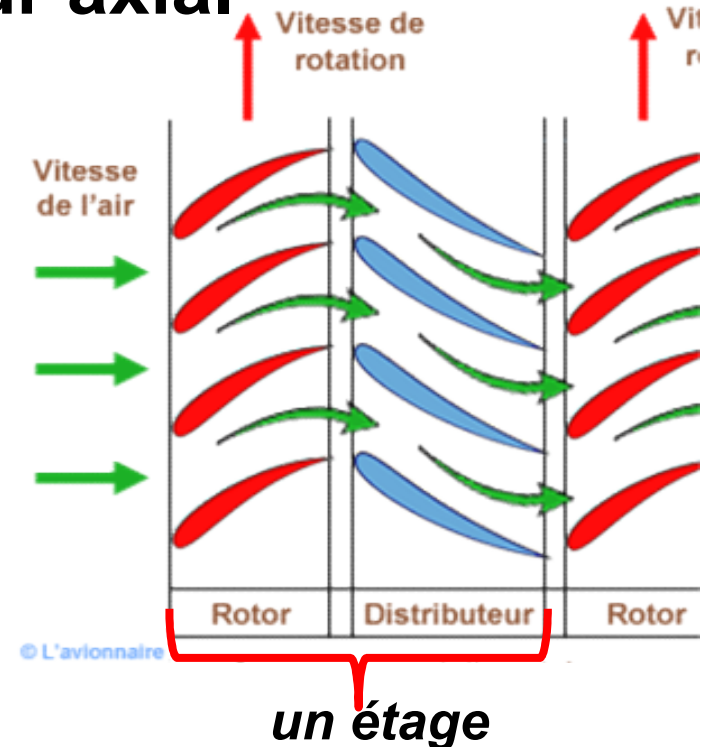
- Rôles :
 - Aspirer (fan) puis **compresser** (compresseur) l'air pour l'amener à des vitesse, pression et température optimales à l'entrée de la chambre de combustion.

Turboréacteur : le compresseur axial

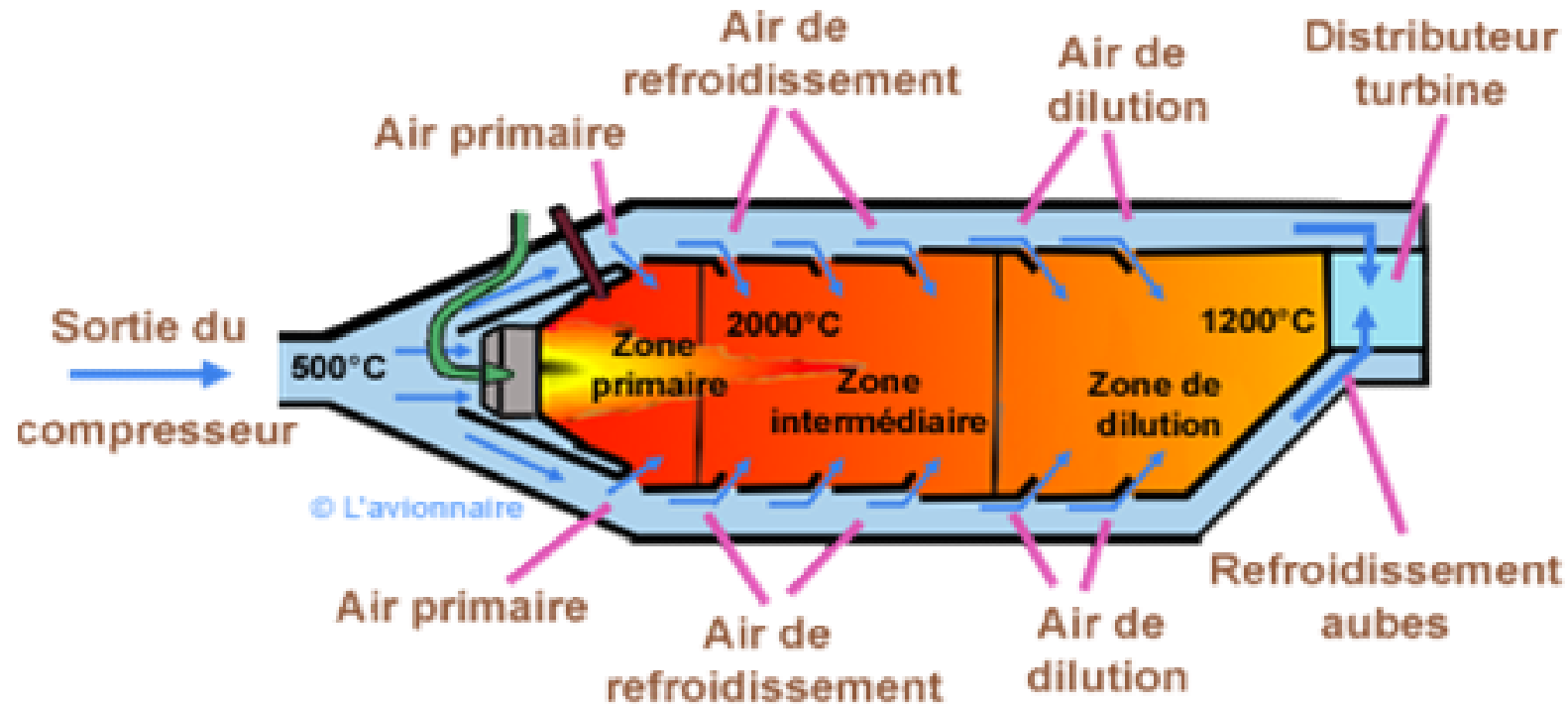
- Un ensemble d'une roue mobile (rotor) suivie d'une roue fixe (stator) = un **étage**.
- Un ensemble d'étages dont les éléments mobiles tournent à la même vitesse = **un corps**.
- Chaque corps de turbine est **solidaire** d'un corps de compresseur.

Le rendement de chaque étage d'un compresseur axial est $\sim 1,15$ => il faut plusieurs étages

Il existe un autre type de compresseur : le compresseur centrifuge. Utilisé par exemple pour les Turbopropulseurs d'hélicoptère.

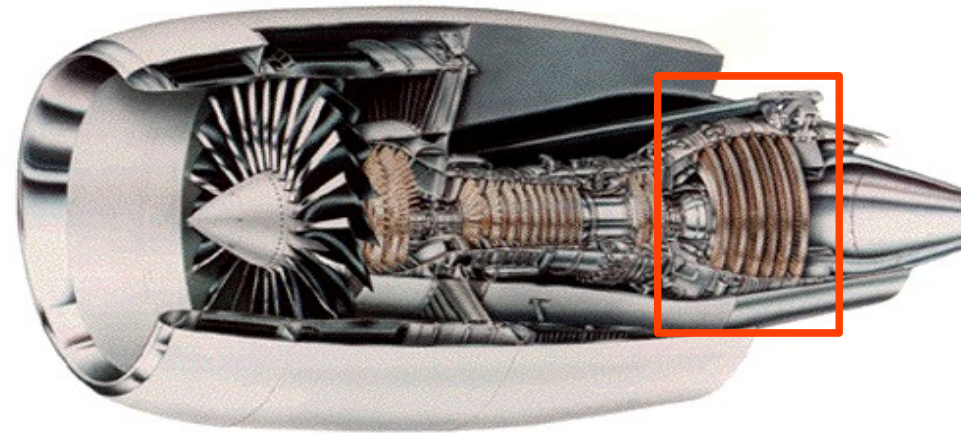


Turboréacteur : la chambre de combustion



- Rôle:
 - **Chauffer l'air** qui sort du dernier étage du compresseur HP afin de lui apporter **l'énergie nécessaire** pour ensuite **mouvoir la turbine** et lui donner suffisamment de vitesse (donc de poussée) en sortie de tuyère

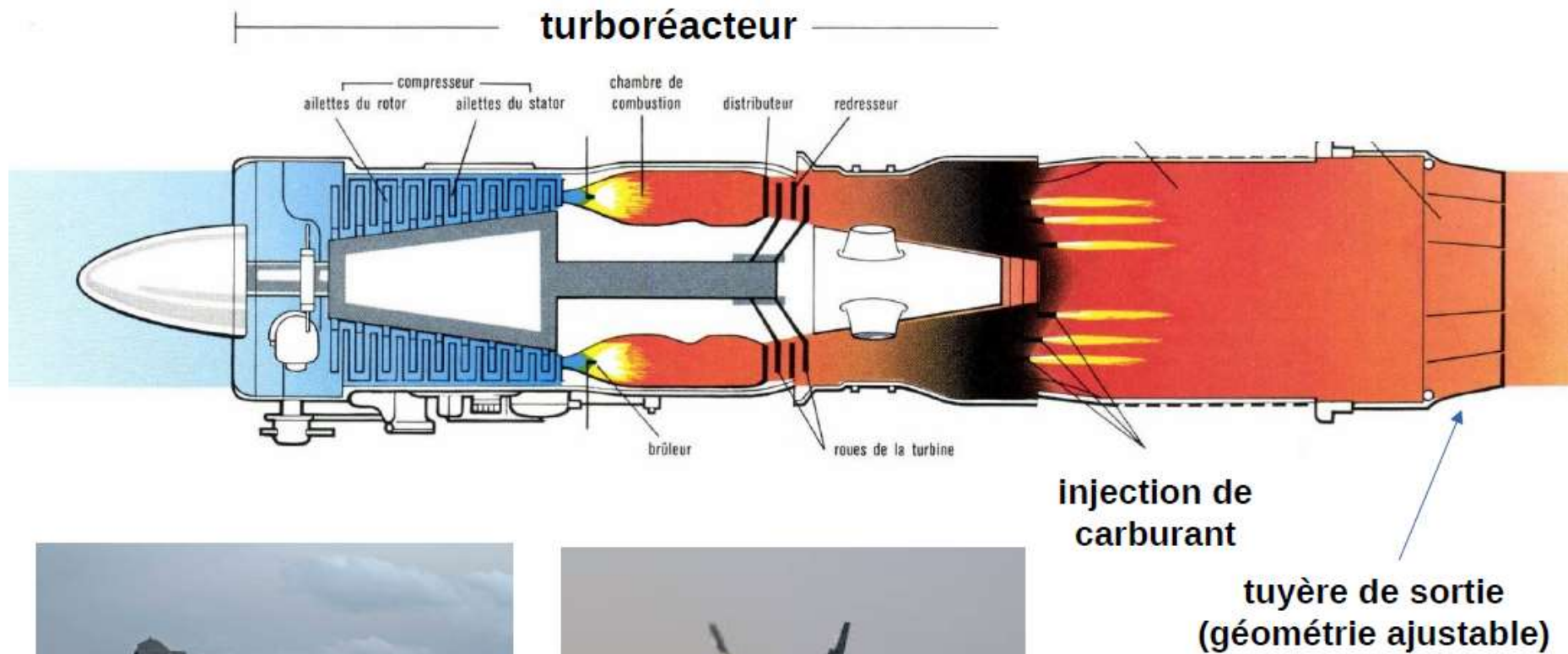
Turboréacteur : la turbine



- **Role:**
 - **Sur un turboréacteur:**
 - Récupère une partie de l'énergie issue de la combustion des gaz pour le **fonctionnement de la soufflante, du compresseur et des accessoires.**
 - **Sur un turbopropulseur:**
 - Récupère la **quasi totalité** de l'énergie issue de la combustion des gaz pour **entraîner l'arbre de transmission de l'hélice, le compresseur et les accessoires.**

Turboréacteur : la post-combustion

Injection de combustible dans une tuyère derrière la turbine => forte augmentation de puissance (et de consommation !)



03/11/2020



AIPBIA Groupes motopropulseurs

Turboréacteur : la post-combustion



**Les moteurs du Rafale sont à post-combustion.
Ceux du Concorde l'étaient aussi**

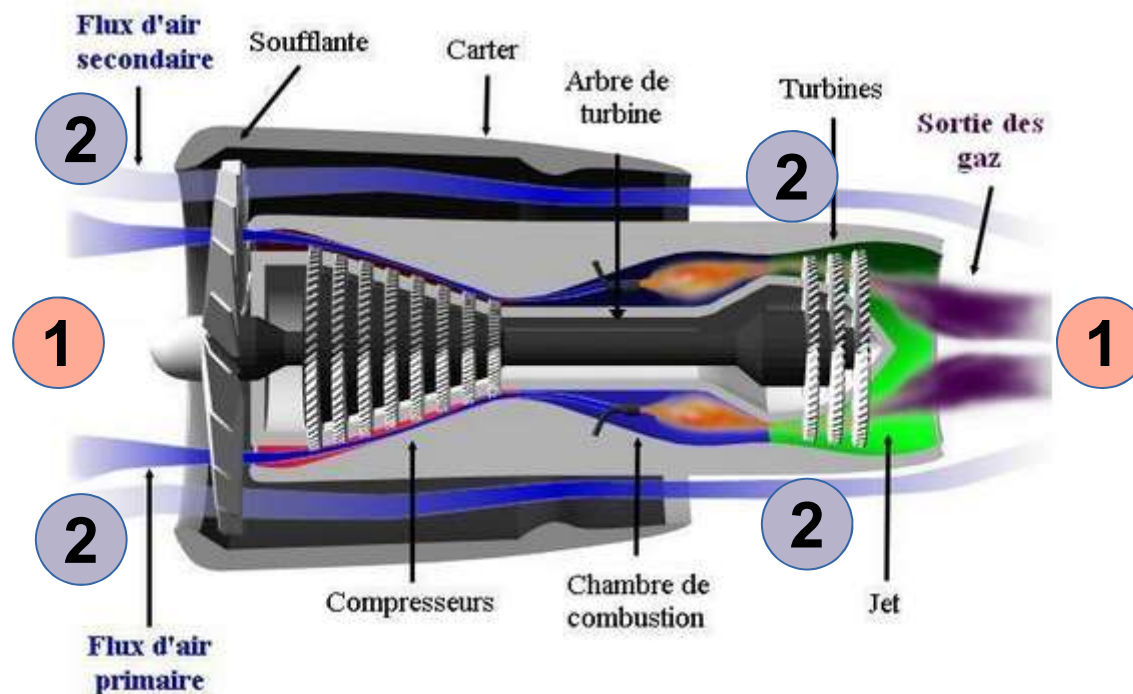
Constitution d'un turboréacteur

- Très haute technologie (30 % coût avion)
- Les réacteurs délivrent de **très fortes puissances**, surtout à vitesse élevée.
- Ce sont des machines très **gourmandes en carburant**.
- Ce sont des machines d'autant plus bruyantes que la vitesse des gaz éjectés est grande.

Turboréacteur double flux = Turbofan

Pour obtenir la même quantité de mouvement $Q = mV$, on peut jouer
(1) sur la vitesse d'éjection : petite quantité d'air fortement accélérée
(2) sur la masse d'air : grande quantité d'air faiblement accélérée

- (1) correspond au turboréacteur simple flux
- L'association (1) + (2) est réalisée dans le **turboréacteur double flux**

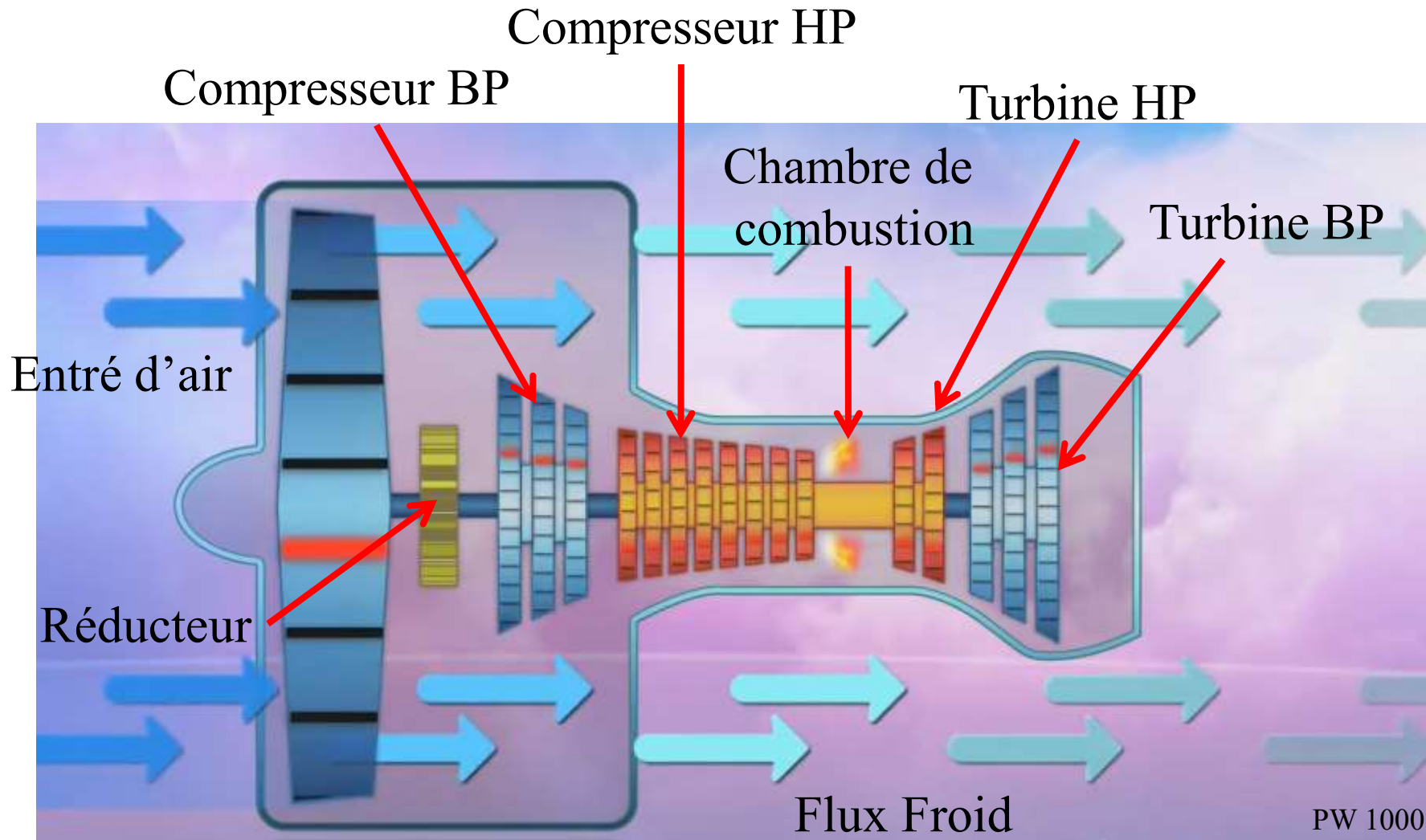


Une soufflante de grande taille, entraînée par la turbine du moteur, sépare l'air absorbé en 2 flux

- (1) flux primaire qui traverse le compresseur (air de sortie chaud)
- (2) flux secondaire directement éjecté (air de sortie froid)

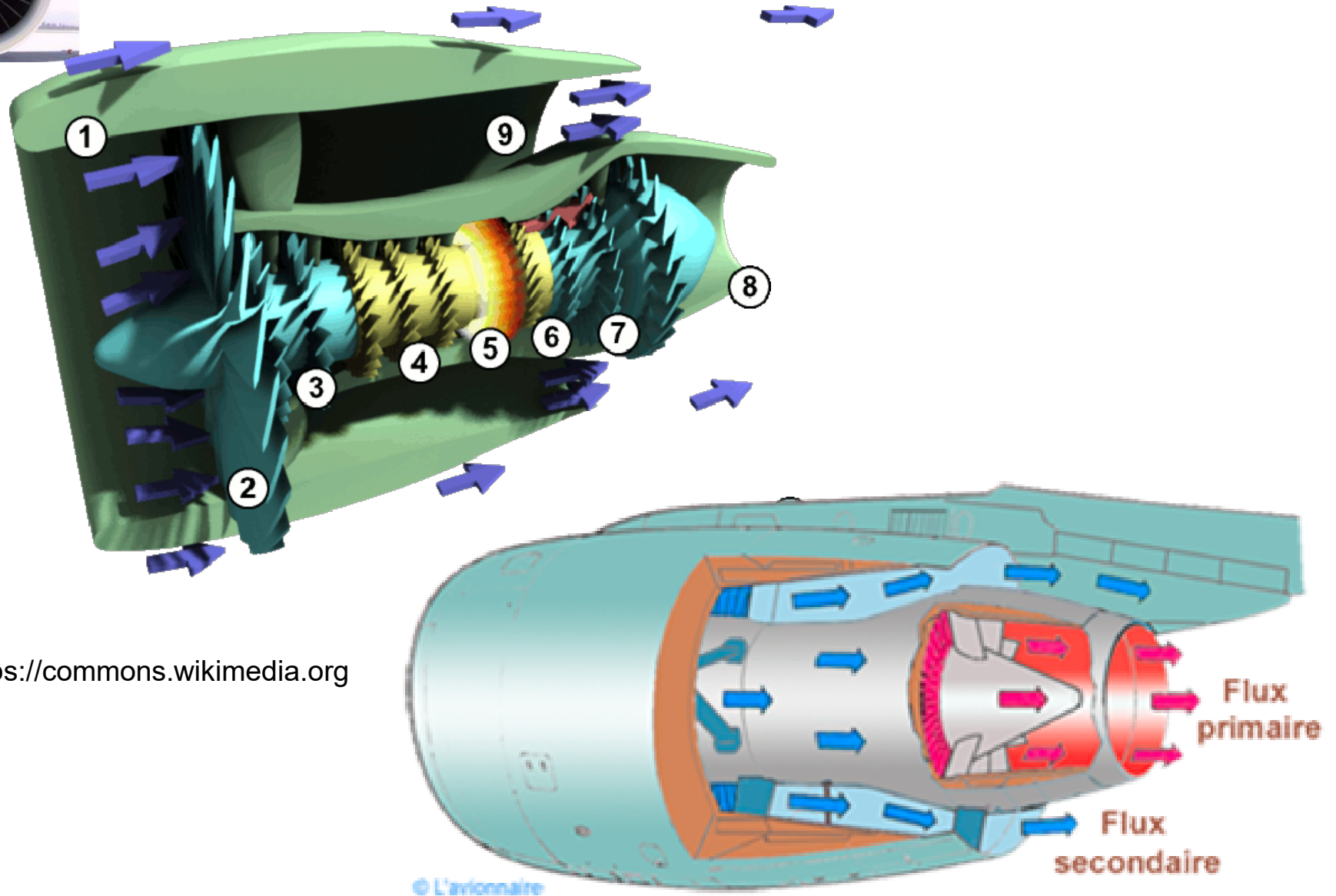


Turboréacteur double flux = Turbofan





Turboréacteur double flux = Turbofan



in <https://commons.wikimedia.org>

Turbofan. Le Fan ou Souflante



**Redresseur
Aubages fixes
flux secondaire**



**Redresseur
Aubages fixes
flux primaire**

Source : Pilote-Virtuel.com/ Photo: Jujug



Source : Pilote-Virtuel.com/ Photo: Jujuk

Turboréacteur = Turbofan

- Un réacteur double flux permet de **diminuer la consommation en kérosène** et le bruit.
- Le flux primaire (ou **flux chaud**) traverse la chambre de combustion.
- Le flux secondaire (ou **flux froid**) ne passe que dans le premier compresseur (ou fan). **Environ 80% de la poussée.**
- Ces réacteurs sont caractérisés par leur **taux de dilution**: flux froid/flux chaud.

Turboréacteur = Turbofan

- **Presque tous les avions civils ont des réacteurs double flux à fort taux de dilution, qui assurent un meilleur rendement aux vitesses subsoniques**
- **Les réacteurs des chasseurs modernes sont en général aussi des doubles flux, mais avec de faibles taux de dilution**
- **L'avenir sera aux réacteurs à cycles variables, fonctionnant en mono flux, double flux ou statoréacteur selon le régime de vol.**

Les turboréacteurs : performances et utilisation

- Poussées énorme qui propulse des avions:
 - de 300 tonnes à 800 km/h
 - de 30 tonnes à 2 500 km/h
- Un Boeing 747, modèle ancien, consomme 13 000l de carburant à l'heure. Un Airbus A320 consomme lui environ 3000 l/h (2,5t/h).
- **Mais quelle est la mesure pertinente pour la consommation d'un avion?** Tout cela dépend de la capacité d'emport passager et/ou fret de l'avion.
 - un **747** consomme aux alentours de 3,1l/100km/passager et un **A380** 2,9l. Plus récent, l'**A350** consomme lui 2,5l.
 - Pour comprendre les progrès effectués à chaque génération d'appareils, la différence entre un 350 et un A380 peut n'être "que" de 0,4l/100km/passager mais si on multiplie par 300 passagers ce sont 12 000 litres de consommation en moins sur un vol de 10 000 km ! Imaginez ce que cela donne sur la durée de vie d'un appareil !

Les turboréacteurs et Turbofan : performances et utilisation

- Utilisés pour la propulsion des avions :
 - de ligne long et moyens courriers.
 - d'affaire.
 - d'usage militaire
- Leur part progresse avec les progrès techniques récents.
- L'augmentation du taux de dilution diminue le bruit et la consommation de carburant.



Des exemples de QCM d'examen sur la partie de cours qui précède

Le pilote peut utiliser la postcombustion pour :	
a)	augmenter la poussée pendant une durée assez courte.
b)	perdre de la vitesse très rapidement.
c)	effectuer des virages à plat.
d)	atterrir par vent de travers.

Un turboréacteur possède entre autres :

- a- une tuyère et un vilebrequin
- b- une hélice quadripale
- c- un compresseur et une tuyère
- d- une turbomachine couplée à une hélice

Groupes motopropulseurs

- **Propulseurs à réaction**
 - **Principes de la propulsion à réaction**
 - **Turboréacteurs et Turbofan**
 - **Turbopropulseurs**
 - **Statoréacteurs**
 - **Moteur fusée**



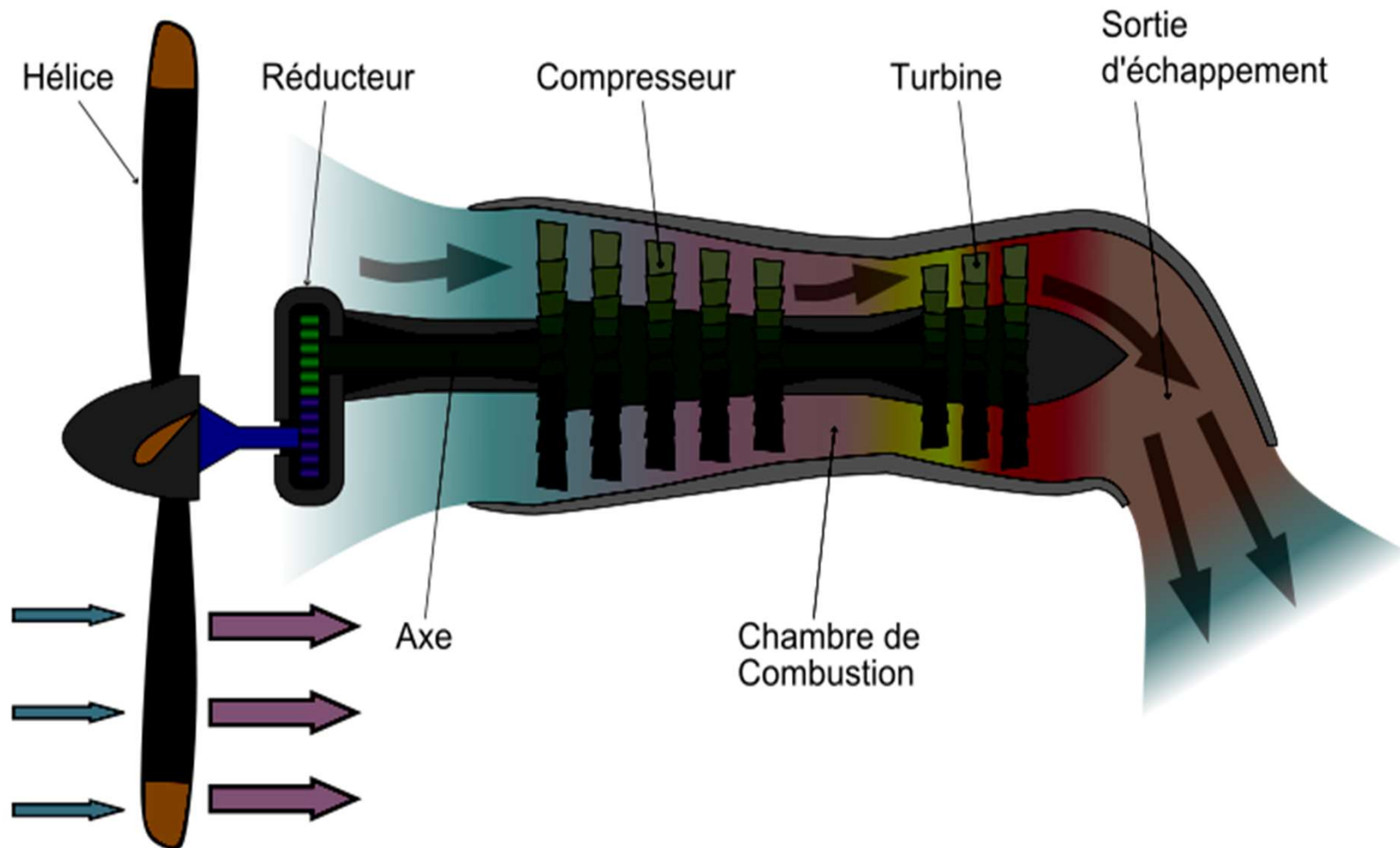
Source: Snecma/ Photo: Eric Drouin

Les turbopropulseurs

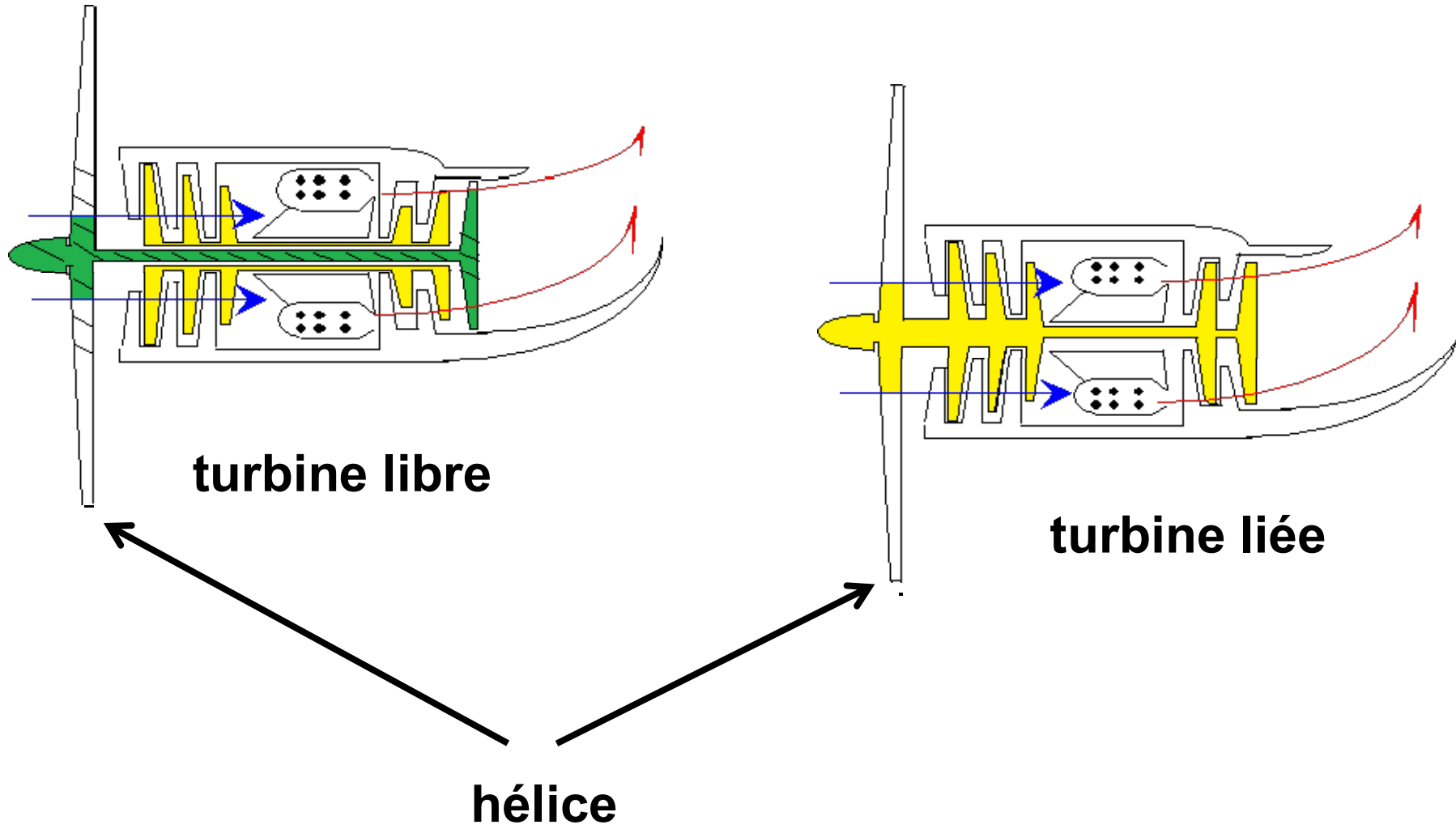
- Le turbopropulseur est **l'association d'un réacteur et d'une hélice** propulsive ou de pales d'hélicoptère.
- Le réacteur assure **l'entraînement de l'hélice**. Les gaz éjectés ne participent que très peu (< 20%) à la propulsion.



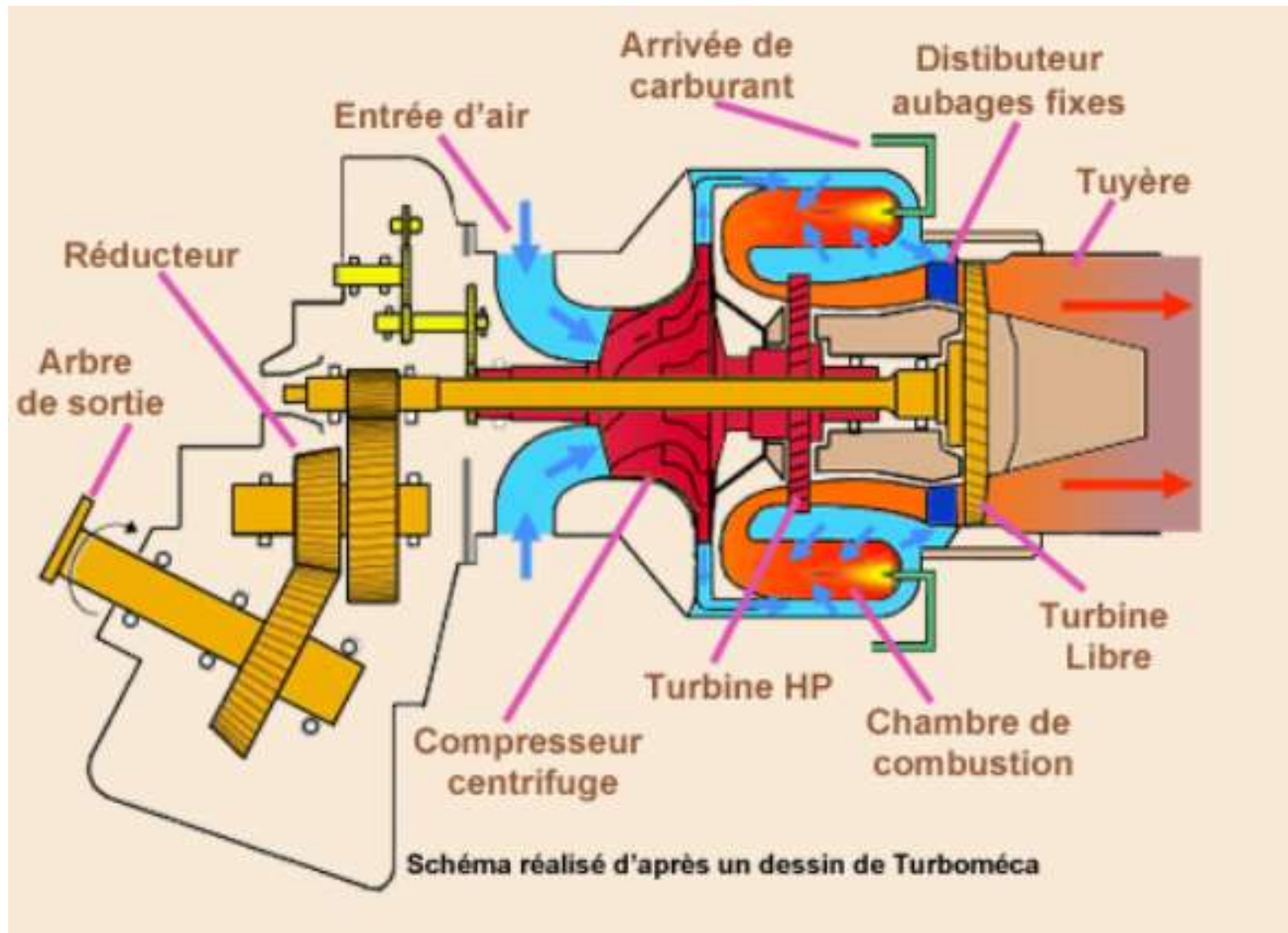
Les turbopropulseurs



Les turbopropulseurs



Le turbopropulseur d'hélicoptère



Le turbopropulseur : performances, utilisation

- A puissance équivalente, **les turbopropulseurs ont une consommation moindre que celle des réacteurs.** Mais ne peuvent pas fournir des puissances aussi importantes.
- Ils sont très utilisées pour les avions de transport régionaux et pour les avions d'affaire et sont devenus le type de moteur presque exclusif des hélicoptères.

Le turbopropulseur : performances, utilisation



Airbus A400 M (2013)

- ◆ Masse à vide : 80 000 kg
- ◆ 4 turboprop de 11 600 cv
- ◆ Vmax : 882 km/h
- ◆ Plafond : 12 000 m



Pilatus PC6A (1961)

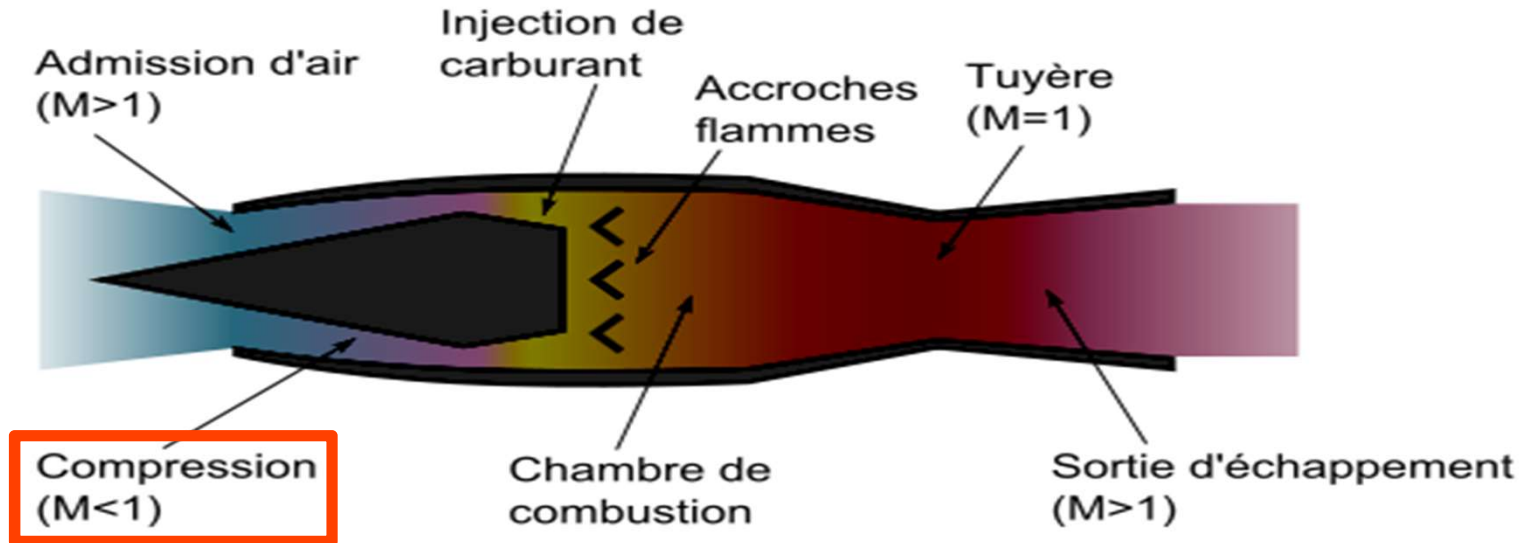
- ◆ Avion STOL
- ◆ Masse à vide : 1250 kg
- ◆ Masse max : 2800 kg (plus du double de sa masse à vide!)
- ◆ 1 turboprop de 573 cv
- ◆ Vmax : 230 km/h
- ◆ Plafond : 8000 m

Groupes motopropulseurs

- **Propulseurs à réaction**
 - **Principes de la propulsion à réaction**
 - **Turboréacteurs et Turbofan**
 - **Turbopropulseurs**
 - **Statoréacteurs**
 - **Moteur fusée**

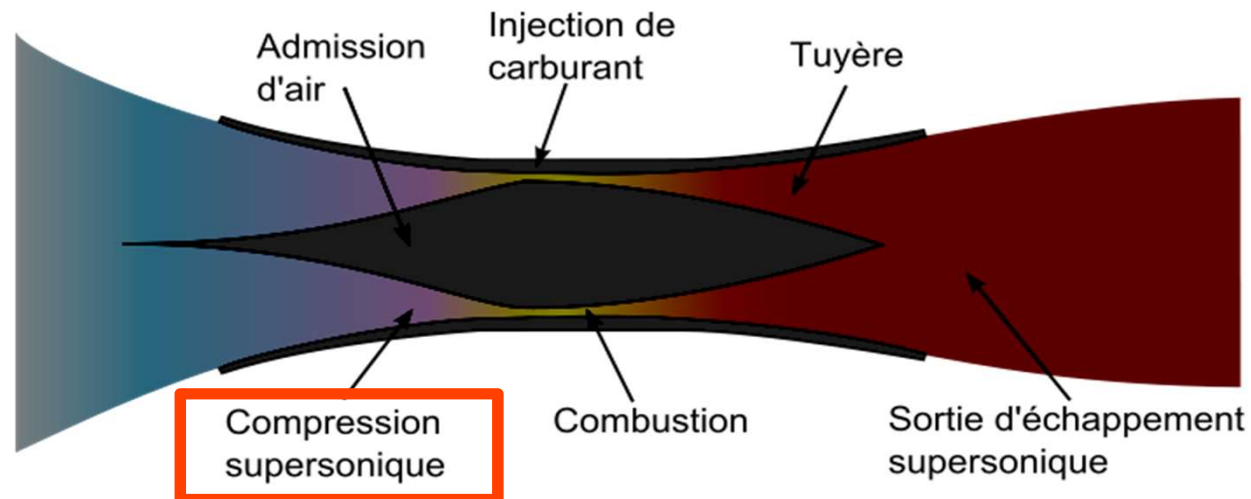
Statoréacteur (Ramjet) Super Statoréacteur (Scramjet)

Ramjet



Scramjet

supersonic
combustion
ramjet



Statoréacteur (Ramjet)

Réacteur **sans turbine ni compresseur** composé de :

- une entrée d'air. L'air ralenti à vitesse subsonique (environ Mach 0,5) puis est comprimé (**ramjet** = l'avion « percute » l'air)
- une chambre de combustion
- une tuyère d'éjection où les gaz chauds s'accélèrent et se détendent

Aucune pièce mobile !

Le statoréacteur nécessite une vitesse d'environ **300 km/h pour s'amorcer.**

- Consomme beaucoup de carburant.
- Idéal pour les vitesses allant de **Mach 3 à Mach 7**
- Utilisé pour la propulsion des missiles de croisière.



le Leduc 021 (France, 1953)

Super Statoréacteur (Scramjet)

- Vitesse de l'air à l'entrée de la chambre de combustion:
supersonique (Scramjet = supersonic combustion ramjet)
- Très difficile à mettre au point.
 - maîtrise de la combustion du combustible (comburant = air, combustible = hydrogène) à des vitesses supersoniques
 - matériaux capables de résister à la chaleur et aux contraintes mécaniques générées
- Nécessitent d'être lancés à Mach 5. Certains sont théoriquement capables d'atteindre ensuite Mach 10 et 75 km d'altitude.

HyShot (Australie) : Mach 7 en 2001

Le Boeing X-51 (USA) : Mach 6 en 2010

Le YU-71 (Russie) : Mach 10 en 2011

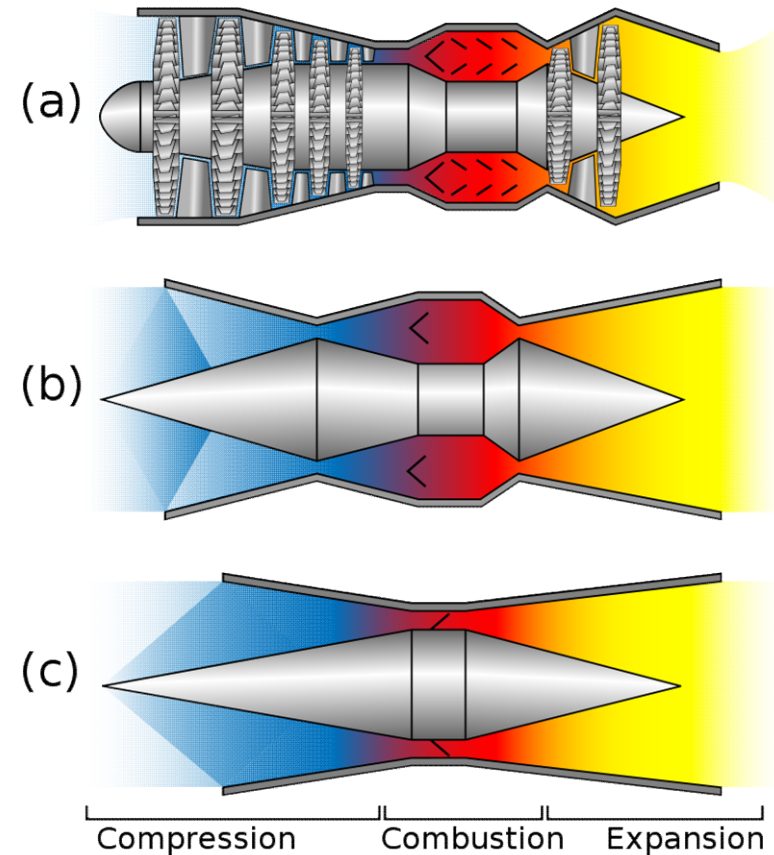
Le Wu-14 (Chine) : Mach 10 en 2014

**Boeing X-43 Scramjet (USA):
Mach 9,1 en 1954**



Turboréacteur, statoréacteur et super statoréacteur

- Le turboréacteur est limité à des vitesses de l'ordre de Mach 3
- Sans la nécessité d'un premier moteur pour atteindre la vitesse d'amorçage, les statoréacteurs pourraient représenter une solution idéale pour les avions ultra-rapides.
- Combiné à un moteur fusée, ils peuvent être utilisés dans les lanceurs spatiaux
- Leur intérêt est relancé avec les projets de réacteurs à cycles variables.



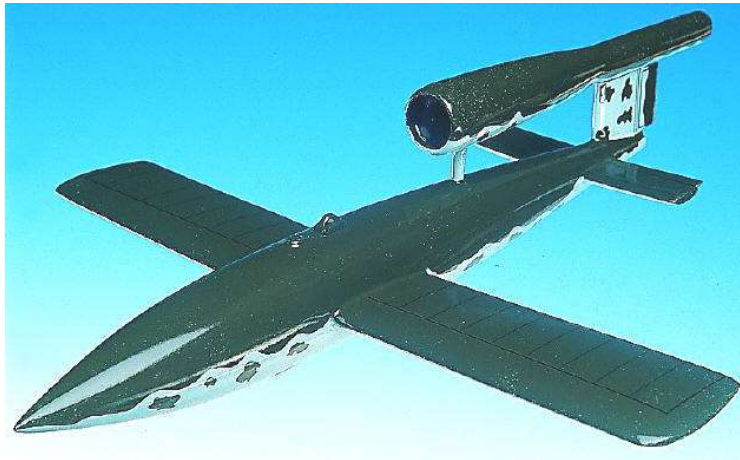
Zones de compression, combustion et extension dans un turbojet (a), ramjet (b) et scramjet (c)

© Wikipedia

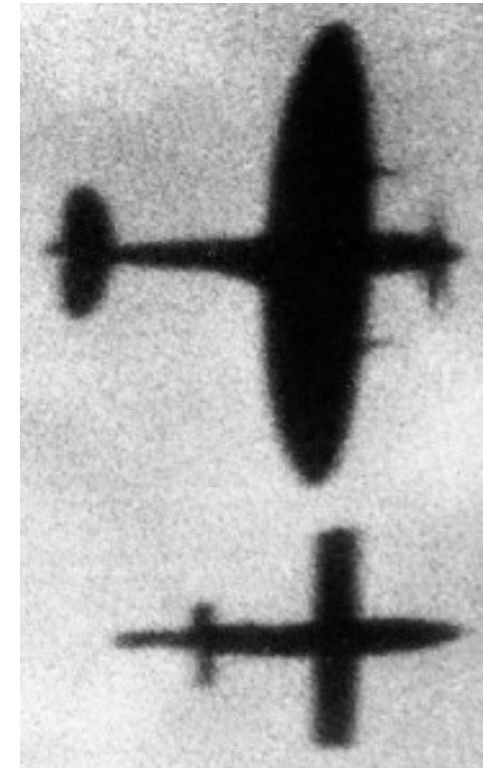
Le pulsoréacteur

C'est un statoréacteur muni de clapets automatiques situés à l'entrée de la chambre de combustion.

Lors de l'inflammation de l'air avec le combustible, la force de l'explosion ferme les clapets, qui se rouvriront grâce à la pression de l'air entrant, quand le mélange aura été éjecté. C'est donc un phénomène pulsatile, d'où son nom.



Pendant la seconde guerre mondiale, les allemands utilisèrent des pulsoréacteurs sur les premiers avions sans pilote, les V1. Les Spitfire anglais ne pouvaient les détruire qu'en les touchant du bout de l'aile, ce qui déstabilisait leurs gyroscopes.



Des exemples de QCM d'examen sur la partie de cours qui précède

Le pulso-réacteur (ou pulsoréacteur) :

- a) n'a jamais propulsé d'objets volants. C'est un système d'analyse de vibrations, sans chambre de combustion, uniquement destiné aux bancs d'essais des réacteurs.
- b) est un moteur fusée à réaction qui ne comporte qu'une turbine mais aucun étage de compression.
- c) est un moteur fusée fonctionnant avec un couple carburant / comburant solide (poudre) injectés de manière pulsée (alternativement l'un puis l'autre).
- d) est un moteur à réaction qui ne comporte comme pièce mobile que des volets placés sur l'entrée d'air.

Un groupe turbopropulseur est conçu pour être alimenté en carburant de type :

- a) kérosène.
- b) super 98.
- c) 100LL.
- d) du propergol.

Un turbopropulseur :

- a) est un pulsoréacteur précédé d'un réducteur et d'une hélice
- b) est un statoréacteur précédé d'un réducteur et d'une hélice
- c) est un moteur thermique équipé d'un turbocompresseur
- d) est un turboréacteur précédé d'un réducteur et d'une hélice

Dans un statoréacteur :

- a) l'hélice est entraînée par la turbine.
- b) le compresseur est entraîné par la turbine.
- c) on ne trouve aucune partie mobile.
- d) la turbine est située sur le même axe que le compresseur.

Groupes motopropulseurs

- **Propulseurs à réaction**
 - **Principes de la propulsion à réaction**
 - **Turboréacteurs**
 - **Statoréacteurs**
 - **Turbopropulseurs**
 - **Moteur fusée**

Le moteur fusée

- **La poussée est produite par la réaction entre un comburant embarqué et un carburant (le combustible), appelés ergols.**

Les ergols sont soit solides (poudre), soit liquides

Ils réagissent entre eux pour produire un gaz sous très haute pression, qui est expulsé par l'intermédiaire d'une tuyère. L'énergie chimique est transformée en énergie cinétique

La forme de la tuyère est un élément clé pour la performance du système.

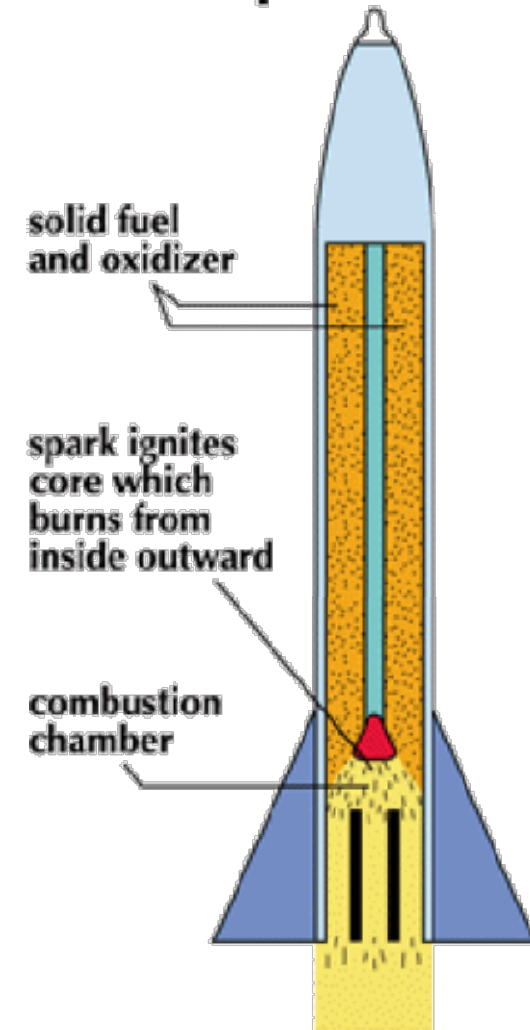
- **Le principal avantage de ce moteur:**
le comburant est emporté à bord de l'engin, qui s'affranchit ainsi de l'oxygène de l'atmosphère : le moteur **peut fonctionner dans le vide spatial**
- **Les principaux inconvénients de ce système:**
 - Nécessite une réserve très importante d'ergols
 - Forte poussée produite mais rendement assez faible (rapport poussée /carburant consommé relativement faible).

Le moteur fusée

Moteur à ergols solides (poudre)

- La combustion de la poudre fournit une grande quantité de gaz sous pression qui s'échappent alors à très grande vitesse.
- Mise à feu à l'aide d'une cartouche pyrotechnique. C'est la chaleur qui déclenche et entretient la combustion.
- Cette solution est retenue pour la plupart des missiles ainsi que pour les propulseurs d'appoint des lanceurs spatiaux.

Solid Propellant

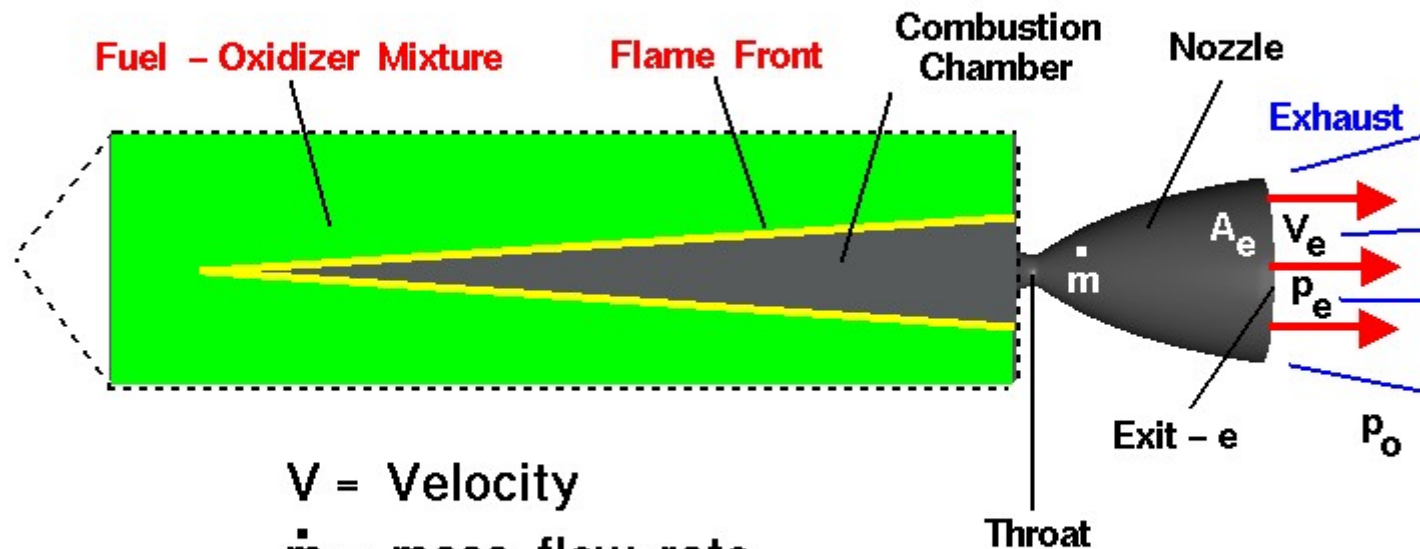


Le moteur fusée à ergol solide (poudre)



Solid Rocket Engine

Glenn
Research
Center



V = Velocity
 \dot{m} = mass flow rate
 p = pressure

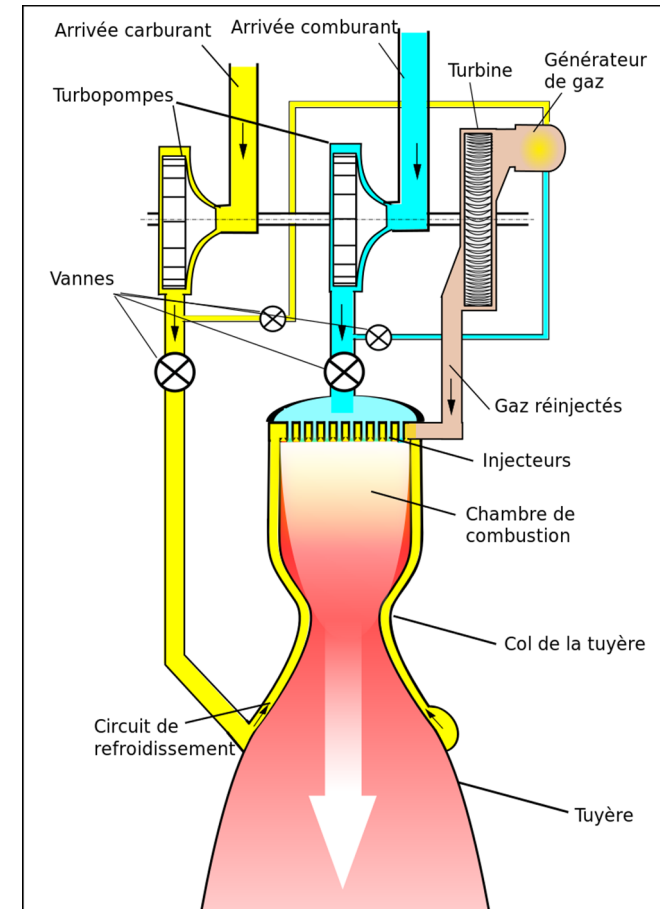
P_o : pression ambiante
 P_e : pression statique de sortie
 M : débit massique
 A_e : aire du flux à la sortie
 V_e : vitesse de sortie

$$\text{poussée} = F = \dot{m} V_e + (p_e - p_o) A_e$$

Le moteur fusée

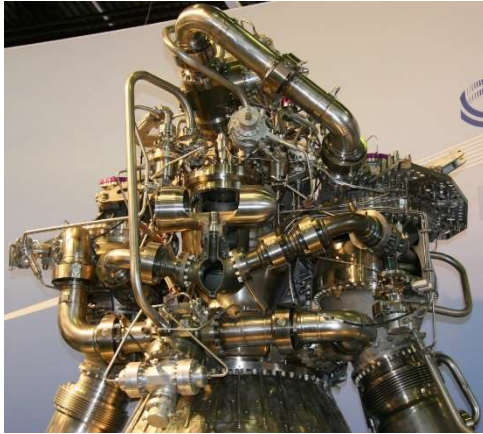
Moteur à ergol liquide

- **Hydrogène liquide (LH2) / oxygène liquide (LOX)**
 - C'est l'un des couples les plus efficaces
 - Nécessite des températures de stockage extrêmement basses (-253°C , pour LH2), et donc des réservoirs imposants.
 - Utilisé dans la fusée Ariane 5 et la Navette Spatiale Américaine.
- **Le couple oxygène liquide (LOX) / kérosène.**
 - A été utilisé notamment dans la fusée Saturn V (qui a transporté les premiers hommes sur la Lune), et dans la Navette Spatiale Américaine.
- **Ergol comburant et ergol combustible sont stockés dans 2 réservoirs distincts**
- **Meilleur rendement que les ergols solides**
- **Peuvent être éteints puis rallumés plusieurs fois**
- **Équipent tous les vaisseaux spatiaux**



in Wikipedia

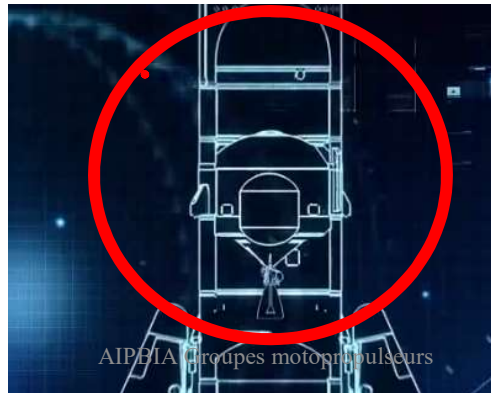
Exemples de moteur fusée



Vulcain. Moteur **cryogénique**
principal d'Ariane V
135 Tonnes de poussée



HM7 Moteur **cryogénique**.
Etage supérieur 6,5 Tonnes
de poussée



Utilisations du moteur fusée

- **Utilisés pour:**
 - **Les lanceurs spatiaux (seule propulsion possible).**
 - **Les missiles.**
 - **Fournir une poussée auxiliaire aux avions**
 - **décollages à la masse maximale sur des pistes courtes.**
 - **Avions fusée (ex: North American X15)**

Un **avion-fusée** propulsé par un moteur utilisant comme carburant du propergol liquide (LOX-amoniaque): le North American X15 (1959).

Longueur : 15,45 m - masse max : 15 T - Vmax : Mach 6,7 (7300 km/h) (1967) - plafond : 95 km - autonomie : 450 km après largage à 14 000 m depuis un B52 - atterrissage en plané, finesse 4 - siège éjectable ok → Mach 4 et 36 000 m ! - 199 vols → 1967 - 4 crashes



Moteur Ionique

- Le moteur ionique produit sa force de propulsion en éjectant **des ions à très grande vitesse**.
 - La masse éjectée est très faible mais la vitesse est très élevée.
 - L'effet propulsif est proportionnel à la masse éjectée mais aussi au carré de la vitesse de cette masse.
 - Faible poussée (SAFRAN PPS 1350: 9 grammes) mais très longtemps (5 000 Heures pour Smart-1 vers une orbite lunaire).
- Les ions éjectés sont produits à partir d'un gaz: **le xénon**.
- Pour ioniser les atomes éjectés il faut générer un **champ électromagnétique** et pour cela on utilise de **l'électricité**.
 - Pour produire l'électricité on peut utiliser des **panneaux solaires**.
- Utilisé pour les **satellites et les sondes spatiales**.

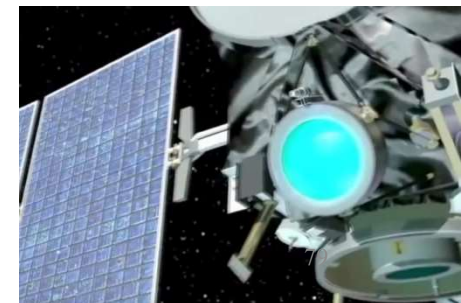
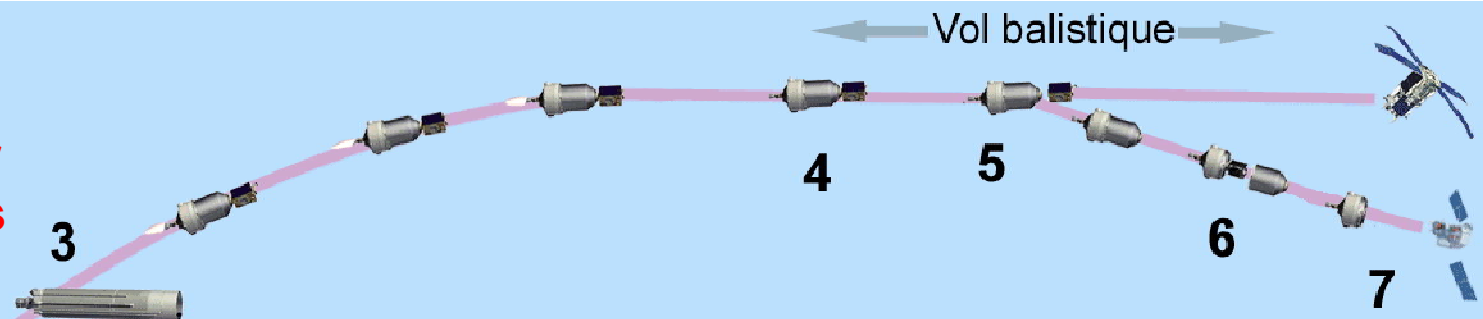


Schéma du lancement-Ariane-5

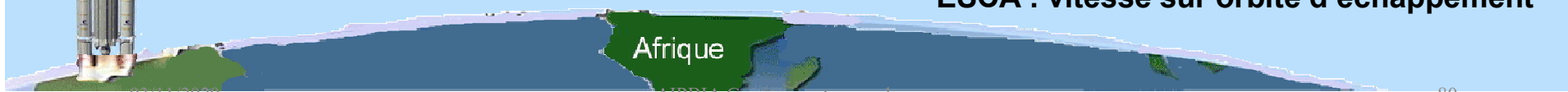
Les différentes phases de vols vont nécessiter différents types de moteur



VOL ARIANE 5 ECA n°183

	Temps	Evénement	Altitude (km)	Vitesse (m/s)
1	2'22"	Séparation des moteurs à poudre (EAP)	69	2 014
2	3'10"	Largage de la coiffe	107	2 214
3	8'54"	Séparation du premier étage (EPC)	172	6 910
4	24'34"	Extinction du second étage (ESCA)	649	9 355
5	26'53"	Séparation du 1er Satellite	993	
6	29'17"	Séparation structure Sylda	1 434	
7	31'31"	Séparation du 2ème satellite	1 902	

EAP : propulseur d'appoint à poudre
EPC : étage principal cryogénique
ESCA : vitesse sur orbite d'échappement



Un « moteur » très écologique: L'assistance gravitationnelle

- L'assistance gravitationnelle:
 - utilise l'attraction d'un corps céleste massif, planète (terre) ou lune.
- L'assistance gravitationnelle modifie la vitesse et la trajectoire de la sonde.



Ce type de « moteur » est utilisé pour les **satellites et les sondes spatiales**.

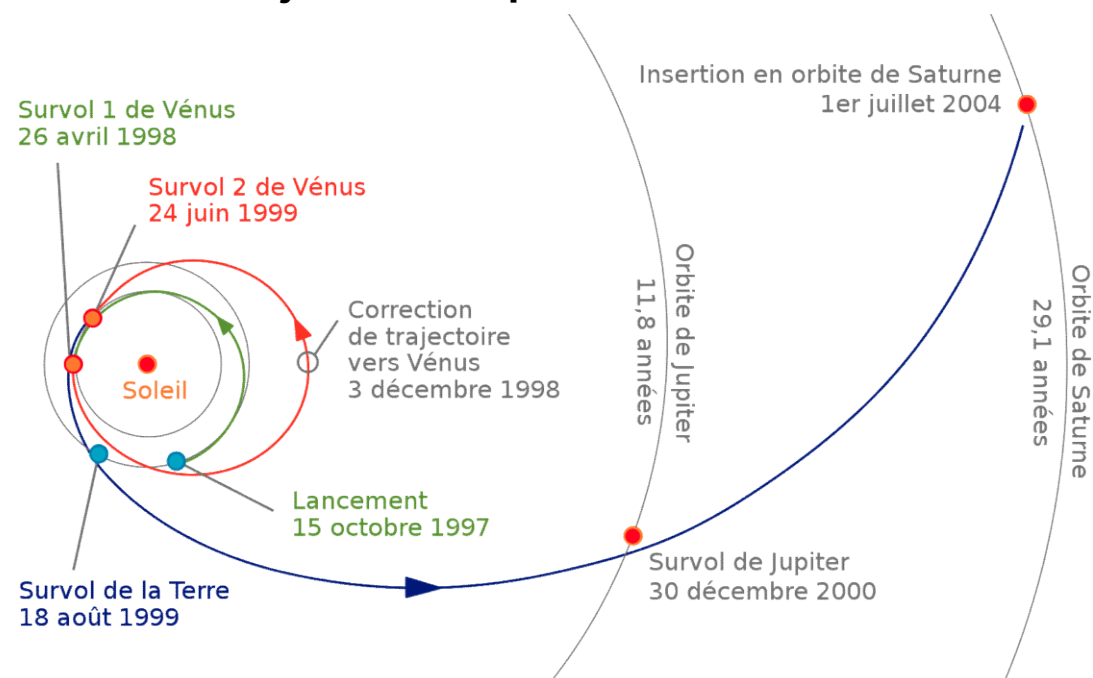
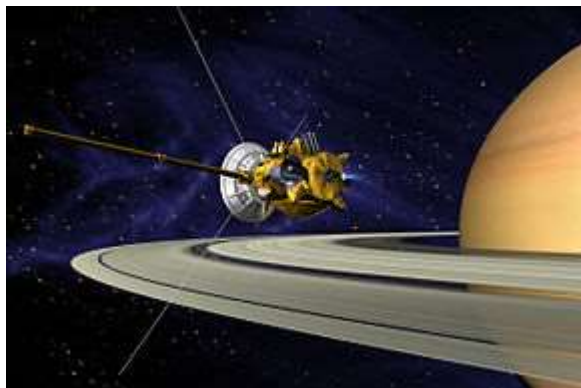
Pour mémoire: un « moteur » écologique, l'assistance gravitationnelle

Assistance gravitationnelle : utilisation de l'attraction d'un corps céleste (une autre planète) pour modifier la trajectoire d'un engin spatial.

Permet d'économiser le carburant transporté par l'engin.

En arrivant dans le champ d'attraction d'une planète, la sonde accélère, la dépasse, puis repart avec une direction différente et retrouve sa vitesse initiale. Près de la planète, sa trajectoire a décrit un tronçon de parabole.

Exemple : la sonde Cassini envoyée vers Saturne a utilisé à plusieurs reprises Vénus, puis la Terre, puis Jupiter pour optimiser sa trajectoire en préservant son carburant



UN LONG VOYAGE DE 6,5 MILLIARDS DE KILOMÈTRES AVANT D'ATTEINDRE LA COMÈTE

2004 LE DÉCOLLAGE

Le 2 mars 2004, Rosetta s'envole depuis la Guyane au sommet d'une Ariane 5G+.

2004-2008 L'ACCÉLÉRATION

Cinq ans durant, elle accélère, s'aidant de l'attraction gravitationnelle de la Terre et de Mars, jusqu'à atteindre 43 000 km/h.

2015-2016 LA FIN

La comète s'approchant du Soleil, Philae sera neutralisé. Rosetta s'éteindra elle aussi, fin 2016, faute de carburant.

11 NOV. 2014 L'ATTERRISSAGE

Le module Philae se pose sur Churyumov-Gerasimenko.

10 SEPT. 2014 ENFIN, LA COMÈTE

La sonde entre en orbite autour de la comète.

2008-2011 DEUX ESSAIS TECHNIQUES

En septembre 2008 et en juillet 2010, la sonde survole les astéroïdes Steins et Lutetia et les mitraille de 20 à 300 de vérifier le bon fonctionnement des instruments de bord.

4 JUIN 2011 L'HIBERNATION

La sonde poursuit sa route, tous instruments éteints.

15 JANVIER 2014 LE RÉVEIL

Rosetta se réveille et entame la manœuvre de décélération. En six mois, elle brûle plus de 700 kg de carburant pour ralentir à la vitesse relative de 1 mètre par seconde.

Sonde ROSETTA

Des exemples de QCM d'examen sur la partie de cours qui précède

Le rôle d'une sonde spatiale est :	
a)	d'être habitée pour permettre à l'homme d'effectuer des expériences en apesanteur.
b)	d'explorer le système solaire.
c)	d'évoluer en orbite basse pour analyser l'atmosphère terrestre.
d)	d'être satellisée en orbite géostationnaire.

Le vol d'un lanceur de type fusée commence par :

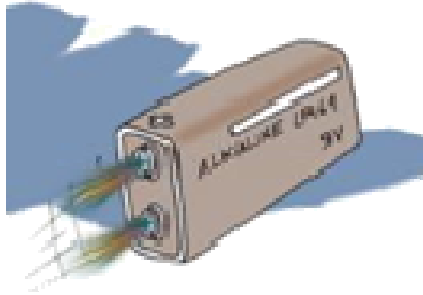
- a) une phase centrifuge
- b) une phase tractive
- c) une phase propulsée
- d) une phase balistique

Les lanceurs spatiaux utilisent principalement des propulseurs fonctionnant :

a)	au kérosène.
b)	à l'oxygène et l'hydrogène.
c)	au méthane.
d)	au gasoil.

Un moteur de fusée fonctionne :

- a) dans l'atmosphère et dans l'espace
- b) uniquement dans l'atmosphère
- c) uniquement dans l'espace
- d) uniquement à une altitude comprise entre 0 et 100 km

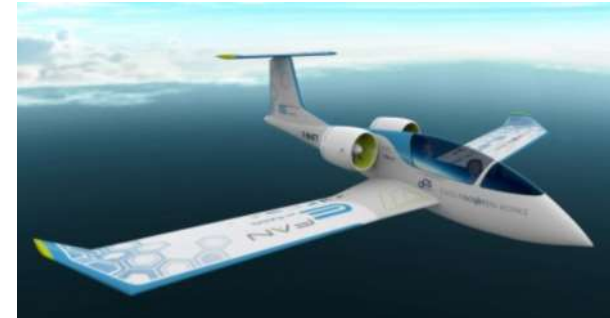


Motorisation électrique

- **Un avion de transport 100 % électrique est envisageable... mais pas avant plusieurs décennies.**
- **A puissance égale un moteur électrique est plus petit mais plus efficaces qu'un moteur thermique.**
- **Plus silencieux que le moteur thermique et moins polluant.**
- **Le facteur limitant reste le stockage ou la production à bord de l'énergie électrique.**
- **Les satellites utilisent des moteurs électriques pour se maintenir en orbite géostationnaire.**
 - **Moteur ionique à grille**
 - **Moteur à effet Hall**

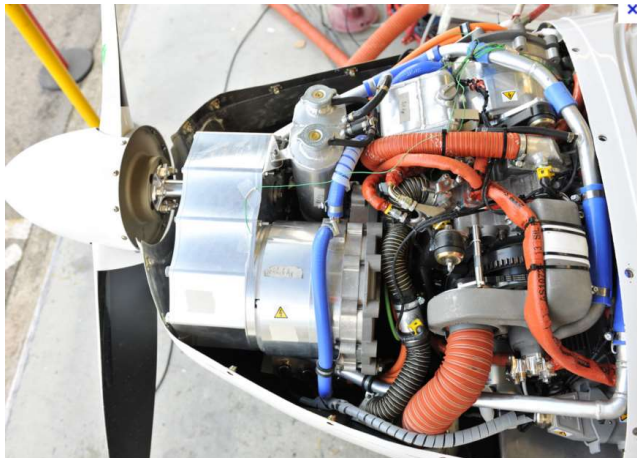
Motorisation électrique 100%

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



Motorisation électrique hybride

- **Un moteur thermique fournit de la puissance en tournant à un bas régime constant.**
 - **Consommation faible, émission CO₂ faible**
- **Un régulateur alimente le moteur électrique de l'hélice à partir du générateur et d'une batterie.**
- **La batterie fournit le surcroît de puissance nécessaire au décollage et dans la phase d'ascension. Elle est rechargée par le générateur durant la phase de croisière.**
- **Le système d'entraînement hybride garantit un bruit inférieur durant le décollage.**

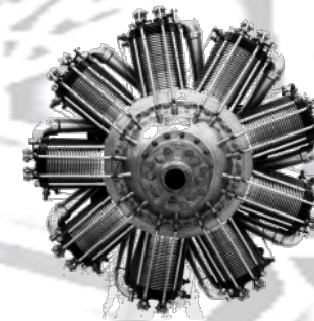
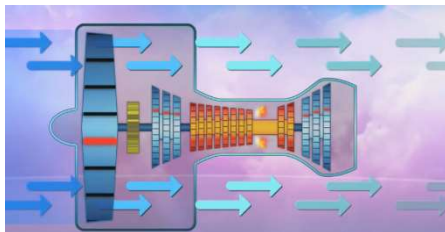
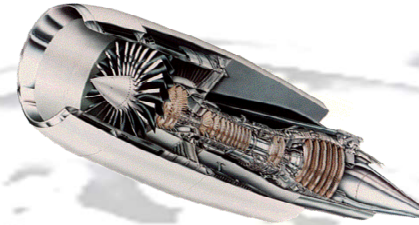
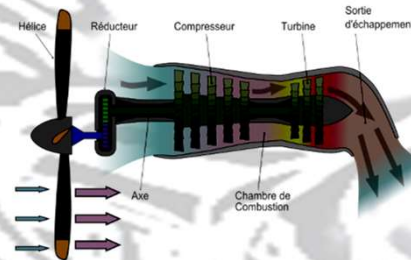


Un système de propulsion hybride. A gauche, on distingue le moteur électrique et son réducteur entraînant l'hélice. A droite, on voit le petit moteur thermique Wankel. (crédit Siemens)



3. Etude des aéronefs et des engins spatiaux

3.2.1 Groupes motopropulseurs



Bibliographie

- *Véronique SALMON-LEGAGNEUR et Eric SAVATTERO. Hélice*
- *Avionaire* <https://www.lavionnaire.fr>
- *Wikipedia:* <https://fr.wikipedia.org/>
- *Site FFA* https://www.ffa-aero.fr/FR/Federation_Aeronautique.awp
- *F. Willot cours BIA*
- *Jean Luc Philippe. Hélice aériennes*
- *Site Internet de : GE, SAFRAN; Dassault*
- *La chronique de Michel Barry: le choix d'une hélice*
- *Philippe LOUSSOUARN*
- *Air & Cosmos*
- *Philippe Raguin 2012*
- <http://spaceconquest.pagesperso-orange.fr/Propulsion.htm>
- *Site DGAC*
- <http://www.developpement-durable.gouv.fr/>
- www.nasa.gov/images/
- *Manuel BIA 2019 CIRAS Toulouse.* <http://www.ciras.fr>
- *FFP* <https://www.ffp.asso.fr>
- <https://www.travelguys.fr/2021/08/24/combien-de-carburant-consomme-un-avion/>