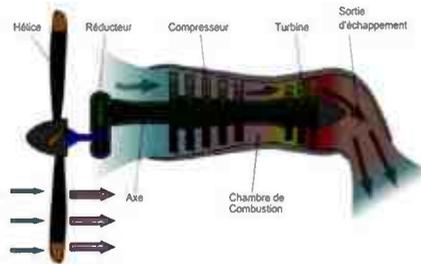




3. Etude des aéronefs et des engins spatiaux

3.2.1 Groupes motopropulseurs Version Aout 2025



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**

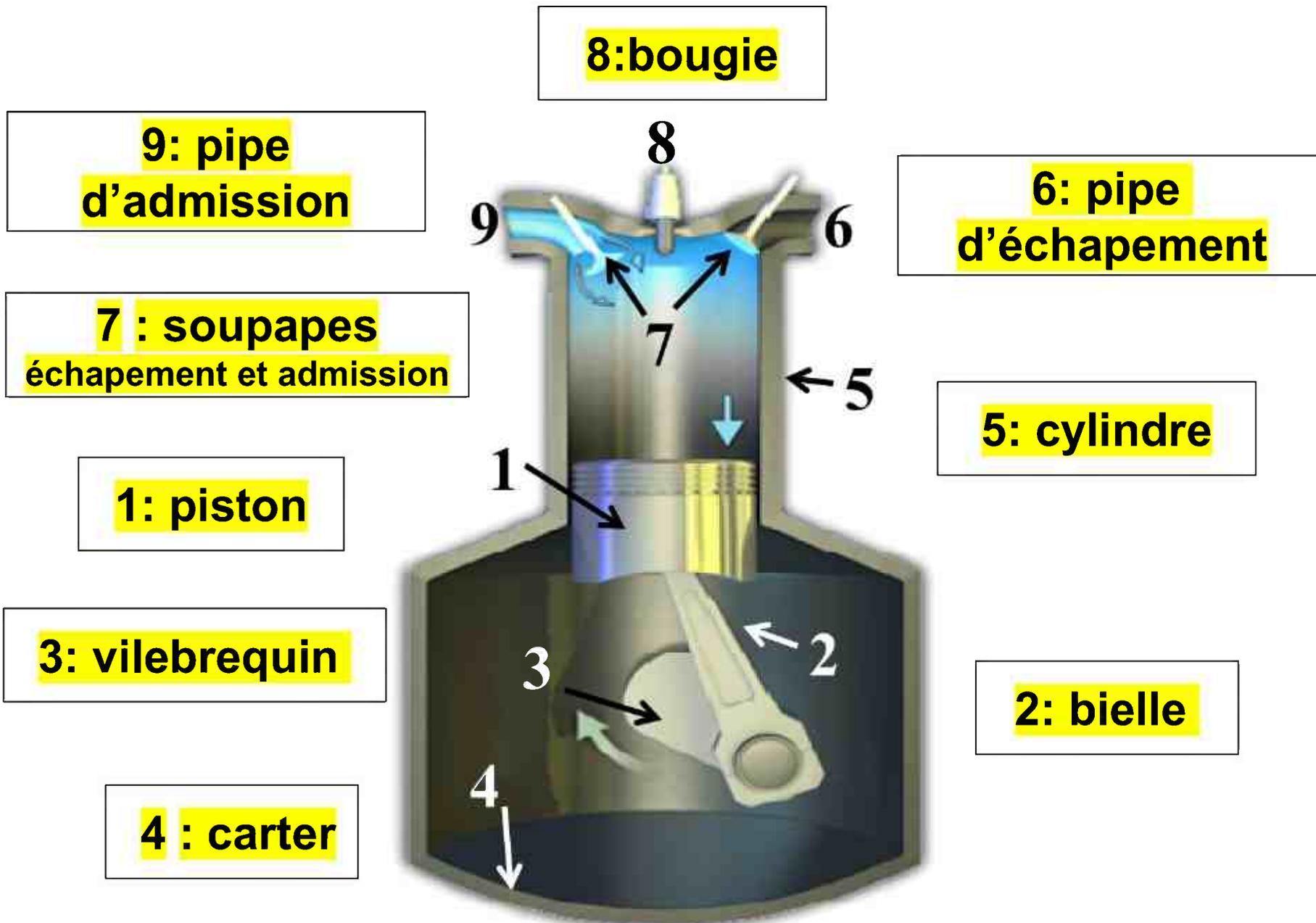
- **Coupe gyroscopique et souffle hélicoïdal**

- **Contraintes liées au développement durable**

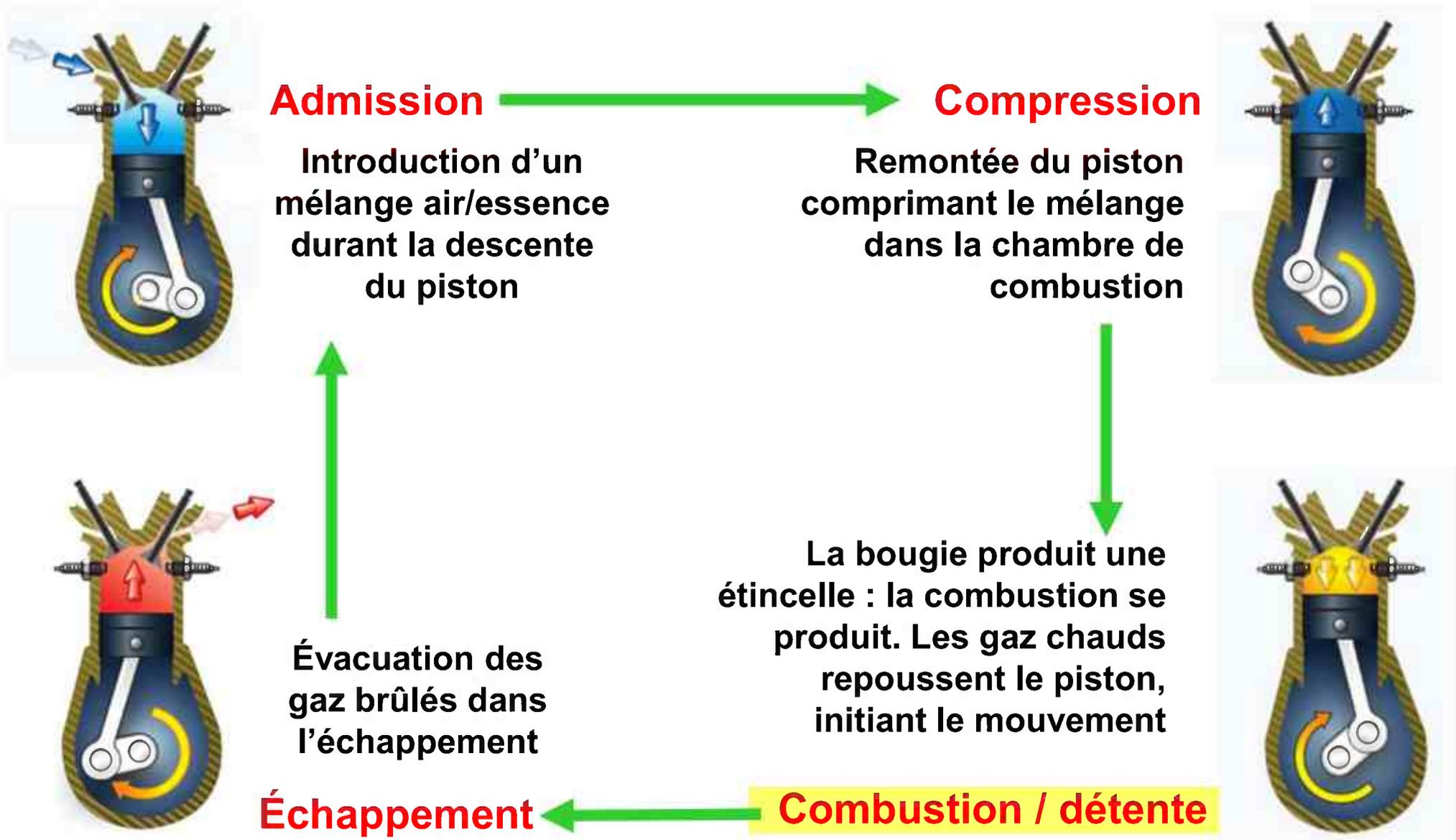
- **Bruit**

- **Optimisation énergétique**

Principe du moteur à explosion : un cylindre



Principe du moteur à explosion: 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:

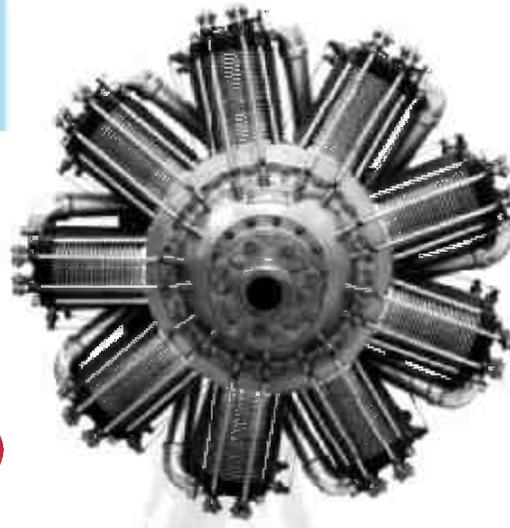
en V



en ligne



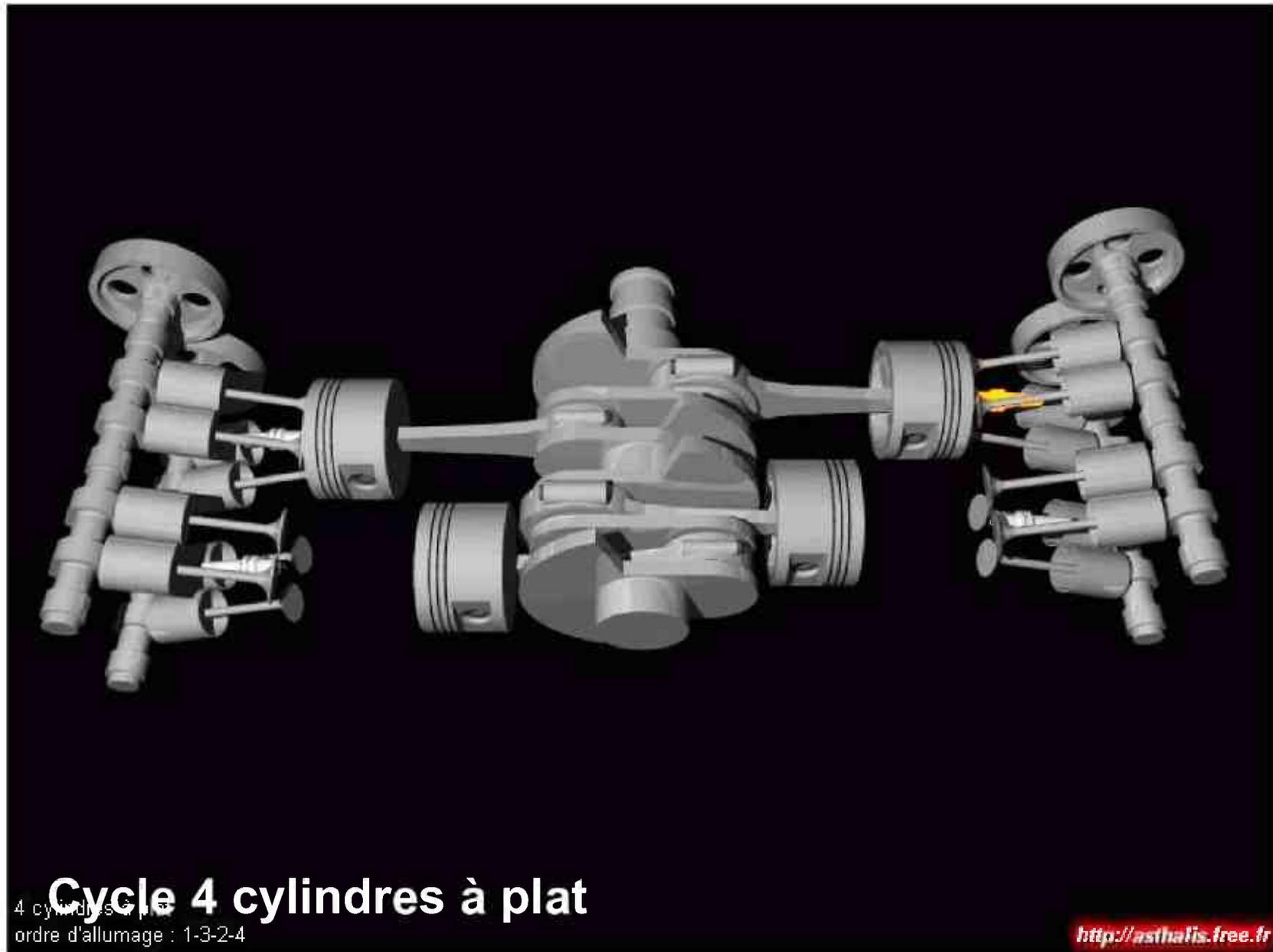
en étoile
(toujours en nombre impair)



à plat

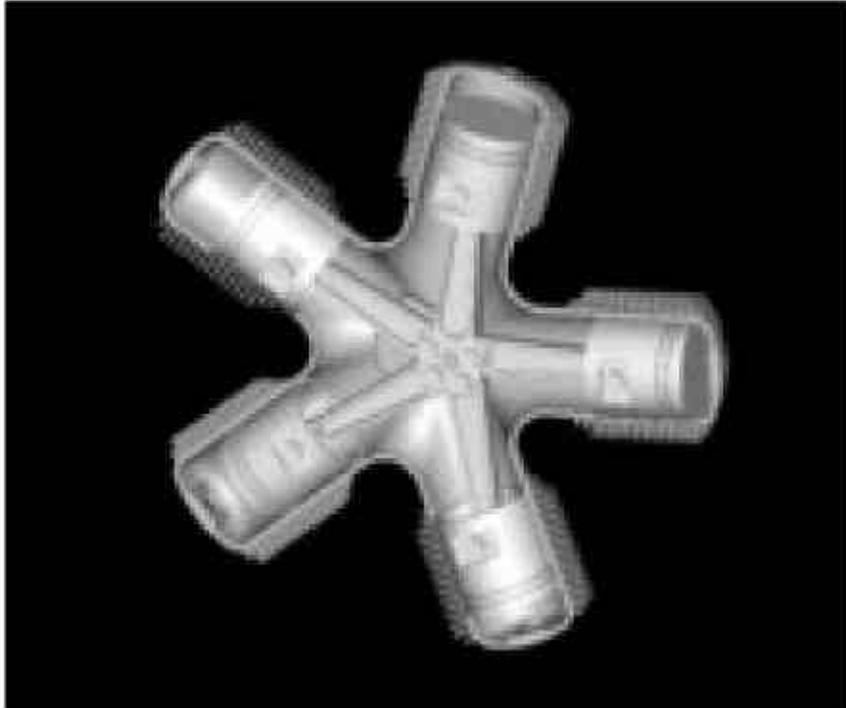


Principe du moteur à explosion



Principe du moteur à explosion

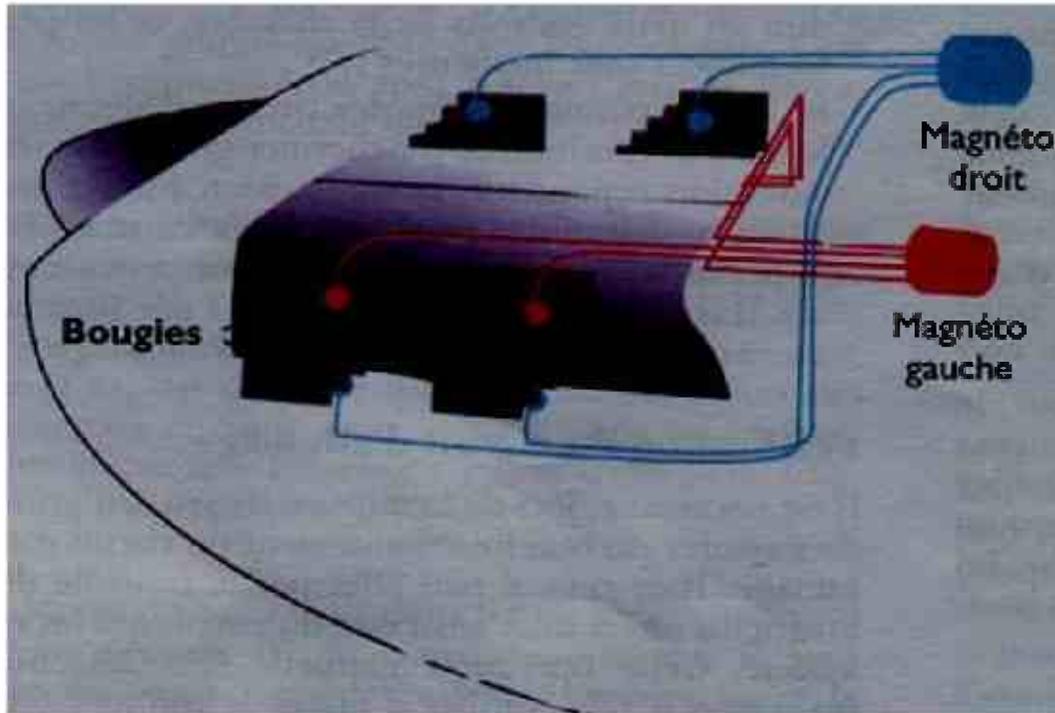
Moteur à explosion en étoile



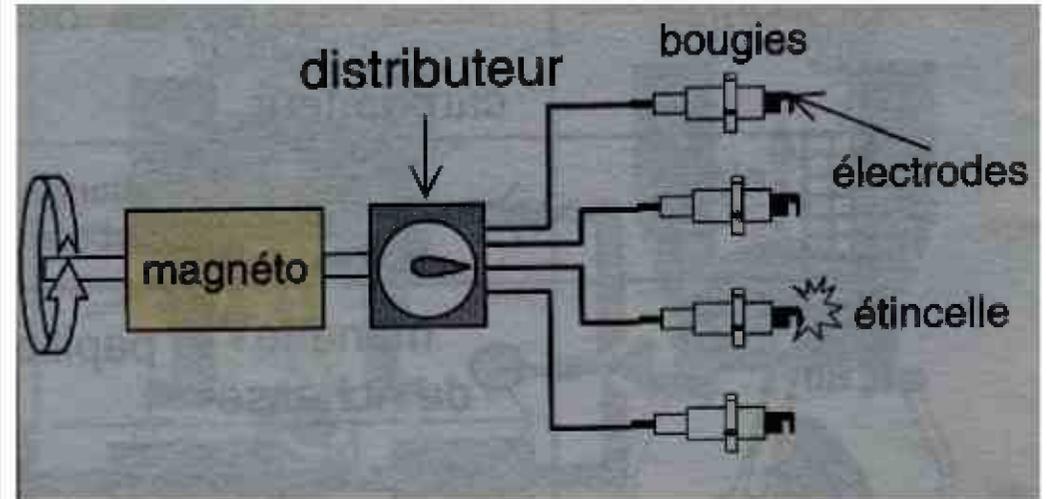
**Le plus puissant construit en série est le Pratt & Whitney Cyclone R-4360 (1944).
28 cylindres en quadruples étoile (4 x 7).
72 litres, 4 300 ch**



Le circuit d'allumage



il est doublé



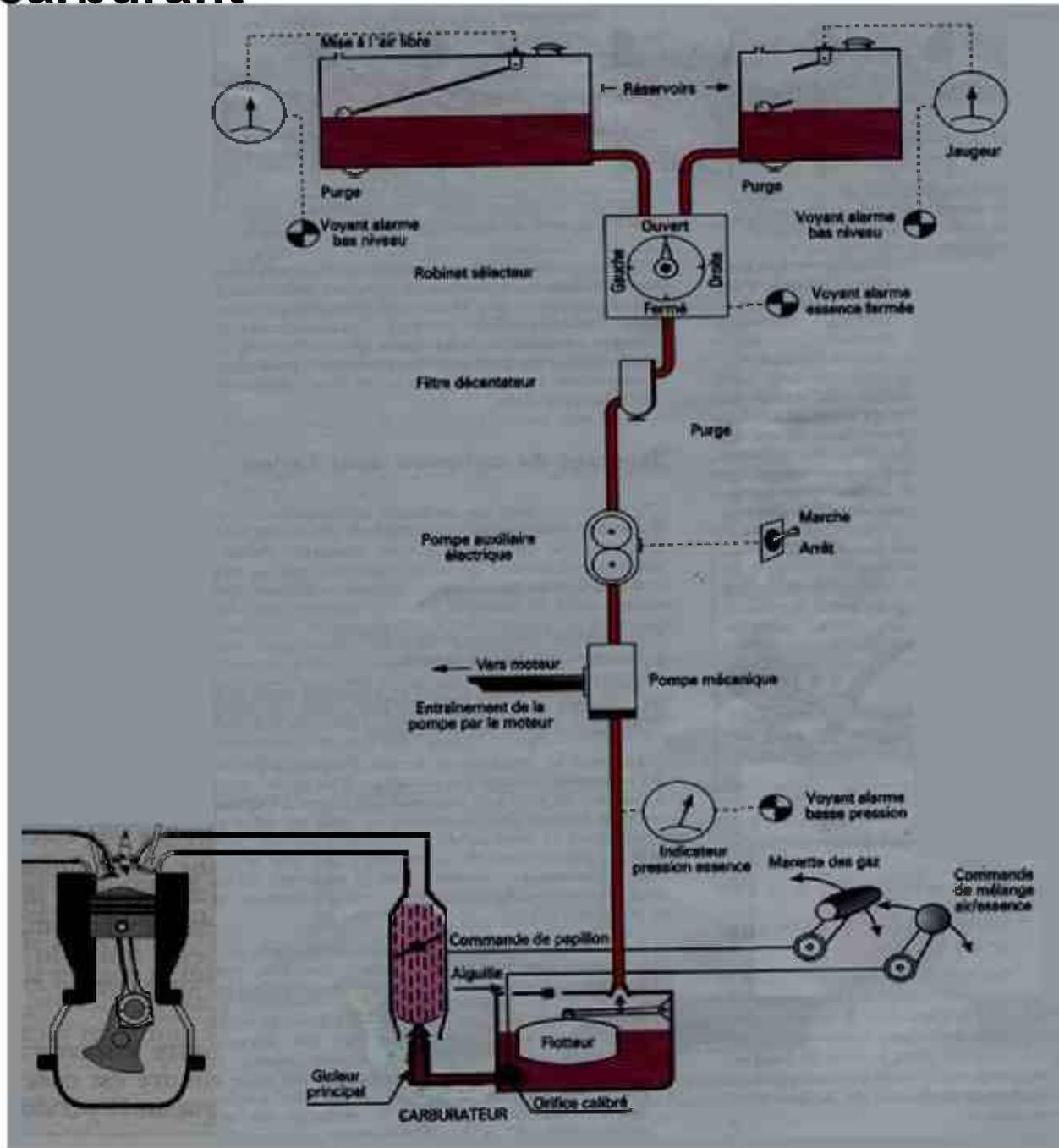
La magnéto : sert à produire l'allumage, grace à une tension de sortie d'env. 20 000V.

Constituée d'un aimant fixe dans lequel tourne une bobine

Groupes motopropulseurs

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

Circuit carburant



Circuit carburant. L'essence

Le bon carburant

100II, 95, 98, 91UL, Jet A1



La bonne qualité. Ni eau ni sable....

La bonne quantité.

Les jauges à lecture directe :

Les jauges à lecture directe comportent un flotteur solidaire d'un index visible de l'extérieur.

Les jauges à lecture indirecte :

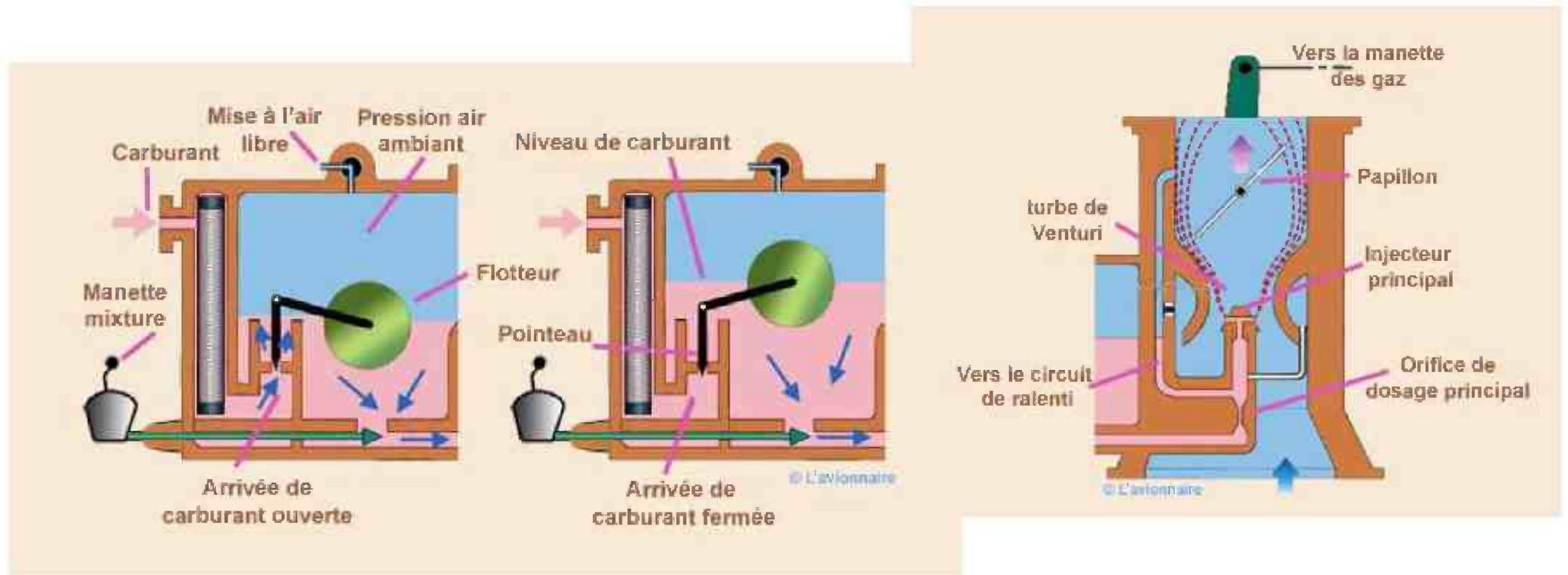
Les jauges à lecture indirecte sont utilisées lorsque les réservoirs se trouvent loin du moteur et du pilote.



Calculer et/ou mesurer la consommation d'essence pour voir si on en a assez pour le vol



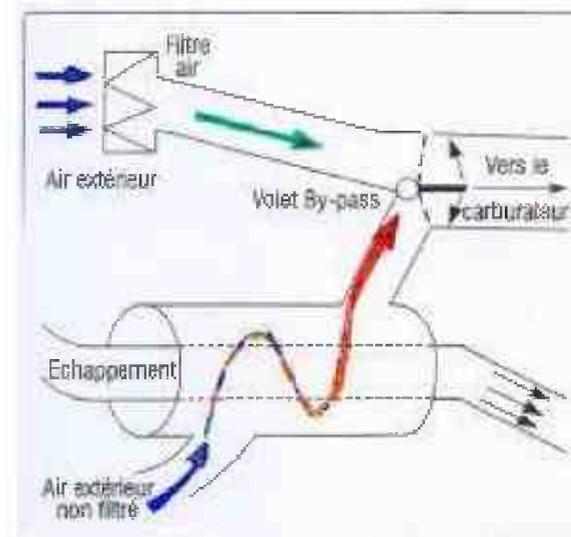
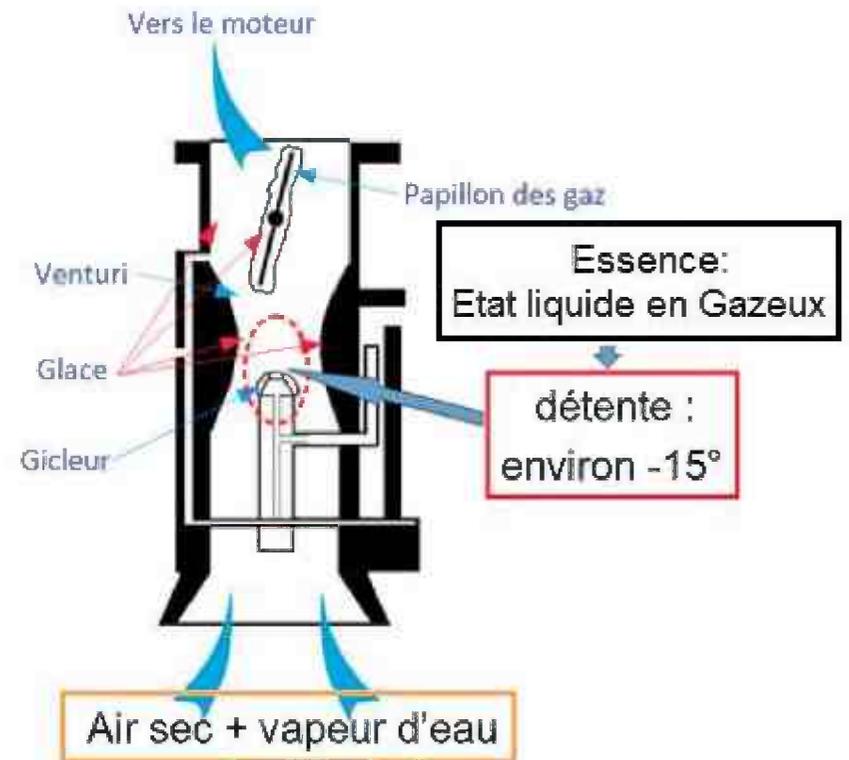
Le carburateur à flotteur



extrait de <https://www.lavionnaire.fr>

Carburateur : givrage carburateur

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



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

Carburateur

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

manette des gaz → pression d'admission

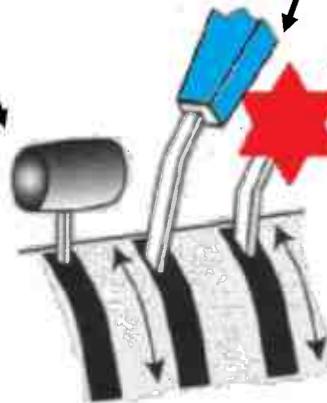


débit carburant

réglage pas de l'hélice



contrôle réglage mixture

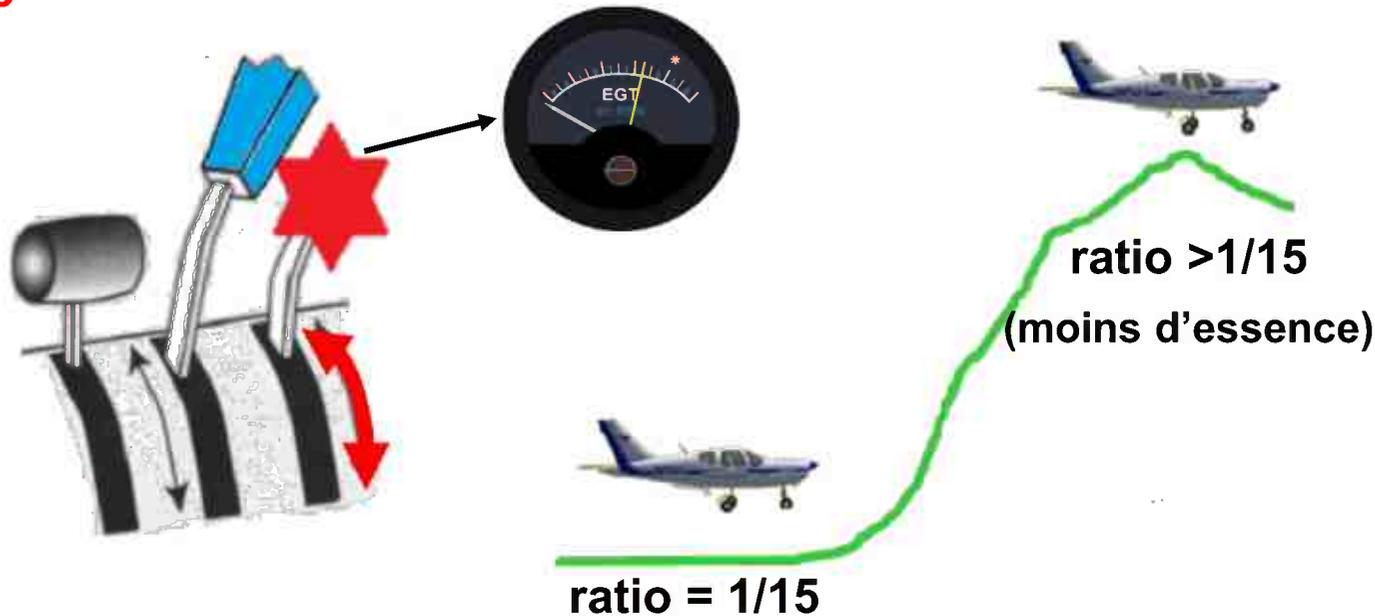


richesse mixture

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

Carburateur

- 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.

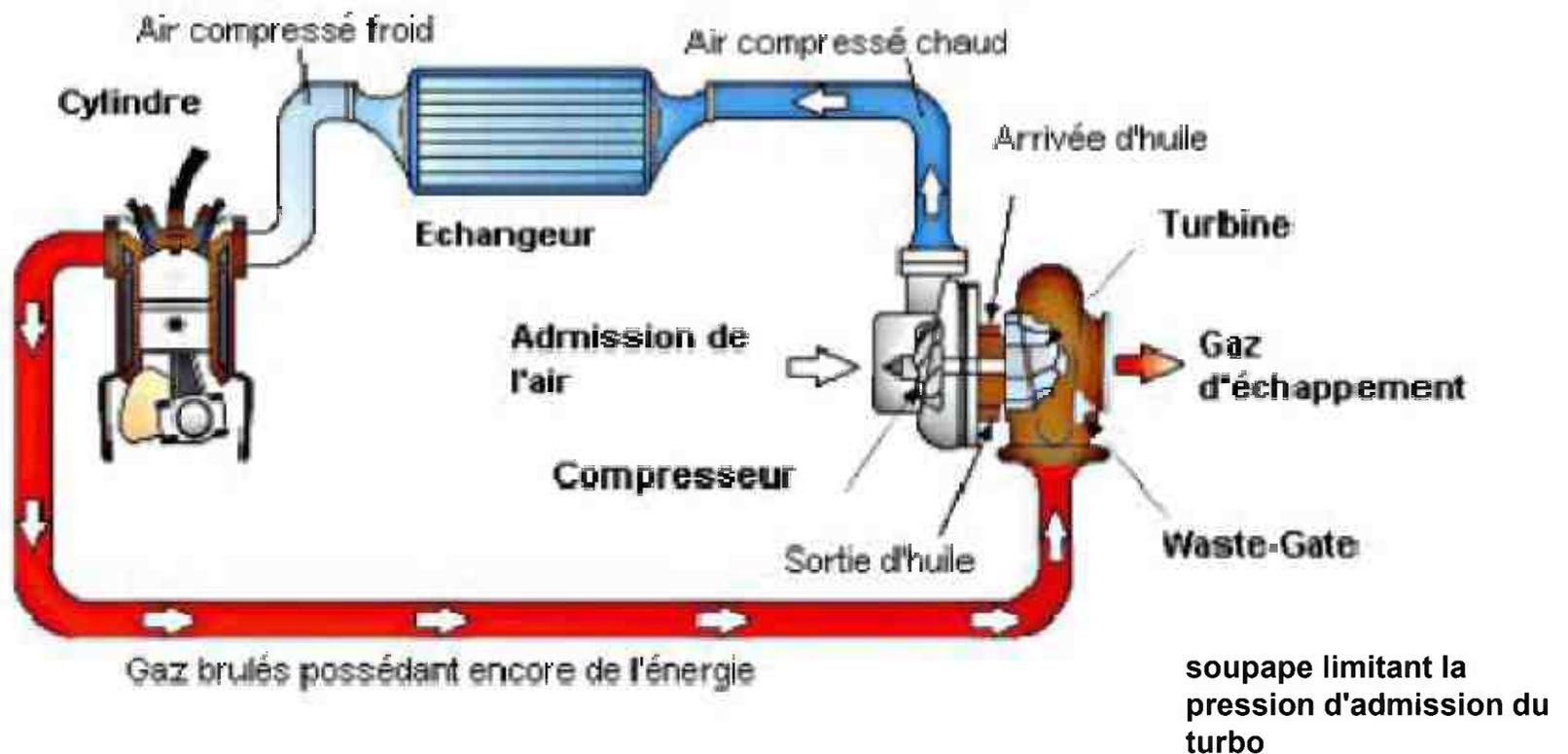
**Manette des gaz
Noire**

**Manette Richesse
Rouge**



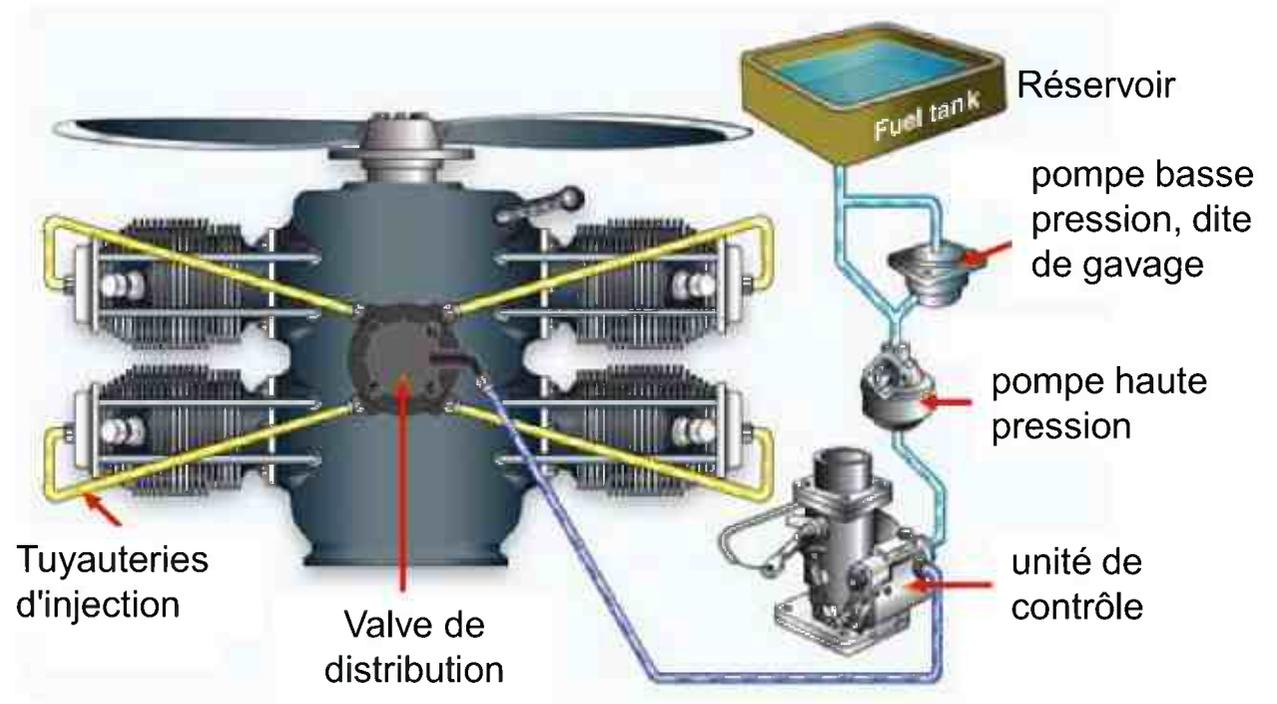
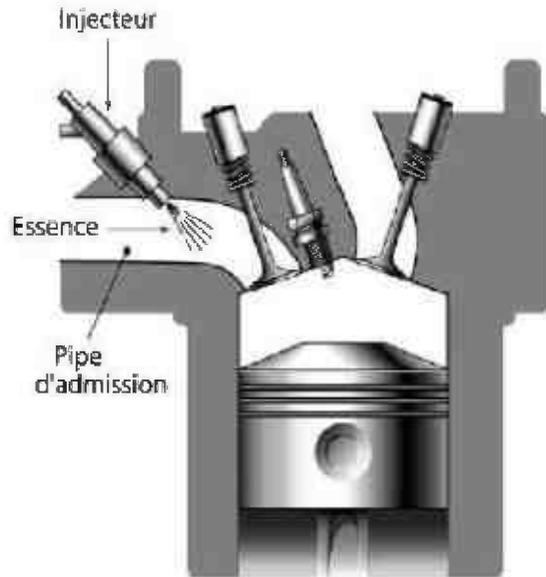
Augmenter la puissance : le turbo

- 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



Injection

- **L'injection consiste à injecter directement l'air et le carburant dans le cylindre où le mélange s'effectue.** C'est un système plus efficace que le carburateur, car il est plus précis dans le dosage du carburant (la combustion et la consommation du moteur sont ainsi mieux contrôlées).



- **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**
 - **Carburateur ou injection**
 - **Les essences**
 - **Performances et utilisation**
 - **Contrôle du fonctionnement**

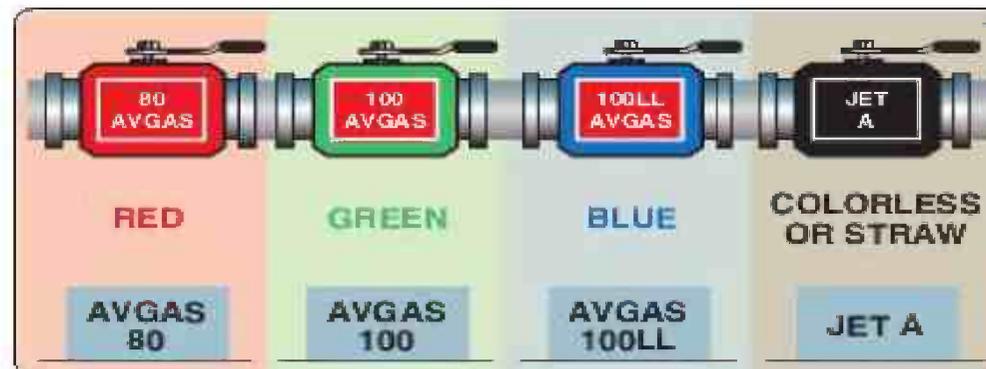
Les essences

- 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:

- 80/87 : **rose** (aviation)
- 100LL: **bleue** (aviation)
- 100/130 : **verte** (aviation)
- 115/145 : **violette**
- sans plomb: blanche

Le Jet A1 est remplacé progressivement par du SAF (Safe Alternative Fuel)



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.

Mauvaise qualité d'essence, mauvaise mixture : attention à l'encrassement des bougies !



Bamako (Mali). MCR 4S, moteur Rotax en panne !

Groupes motopropulseurs

- **Moteurs à Pistons**
 - **Principe du moteur à explosion**
 - **Carburant 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'aviation générale (sports et loisirs)**
- **Coût modeste et bonne fiabilité pour les faibles puissances.**

Groupes motopropulseurs

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

Moteurs à pistons: contrôle en vol



Huile moteur, carburant, charge

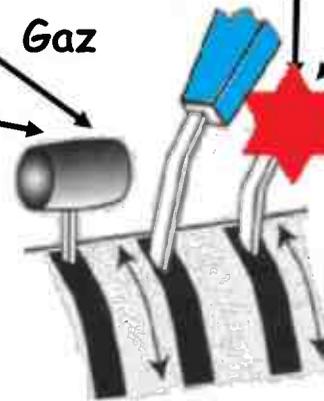
Pression d'admission



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

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.

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.

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.

3.17 Les acteurs du transport aérien (motoristes, compagnies aériennes, pétroliers) se sont engagés dans le développement d'un nouveau carburant pour remplacer à terme le kérosène (JET A1), compatible et mixable avec le kérosène. De quel carburant s'agit-il ?

- A. EFIS : Ecological Fuel International Standard
- B. JET A2 : 2ème génération du JET
- C. AKI : Alternative Kerosene Initiative
- D. SAF : Sustainable Aviation Fuel

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

Groupes motopropulseurs

- Propulseurs à réaction

- Principes de la propulsion à réaction

- Turboréacteurs

- Turbopropulseurs

- Statoréacteurs

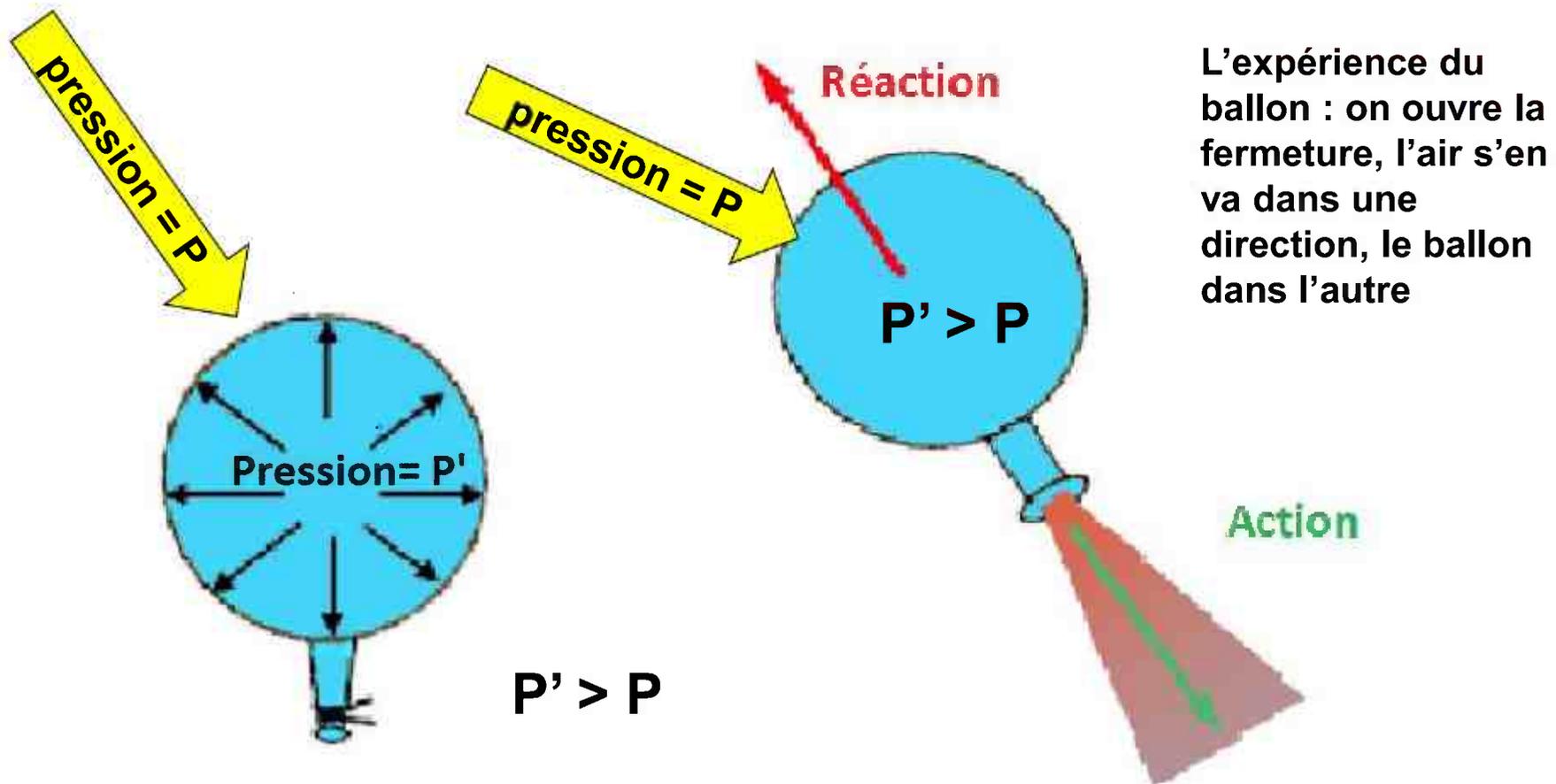
- Moteur fusée

- 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 reprojété à l'arrière : **turboréacteur, statoréacteur**



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

Groupes motopropulseurs

- **Propulseurs à réaction**
 - **Principes de la propulsion à réaction**

- **Turboréacteurs**

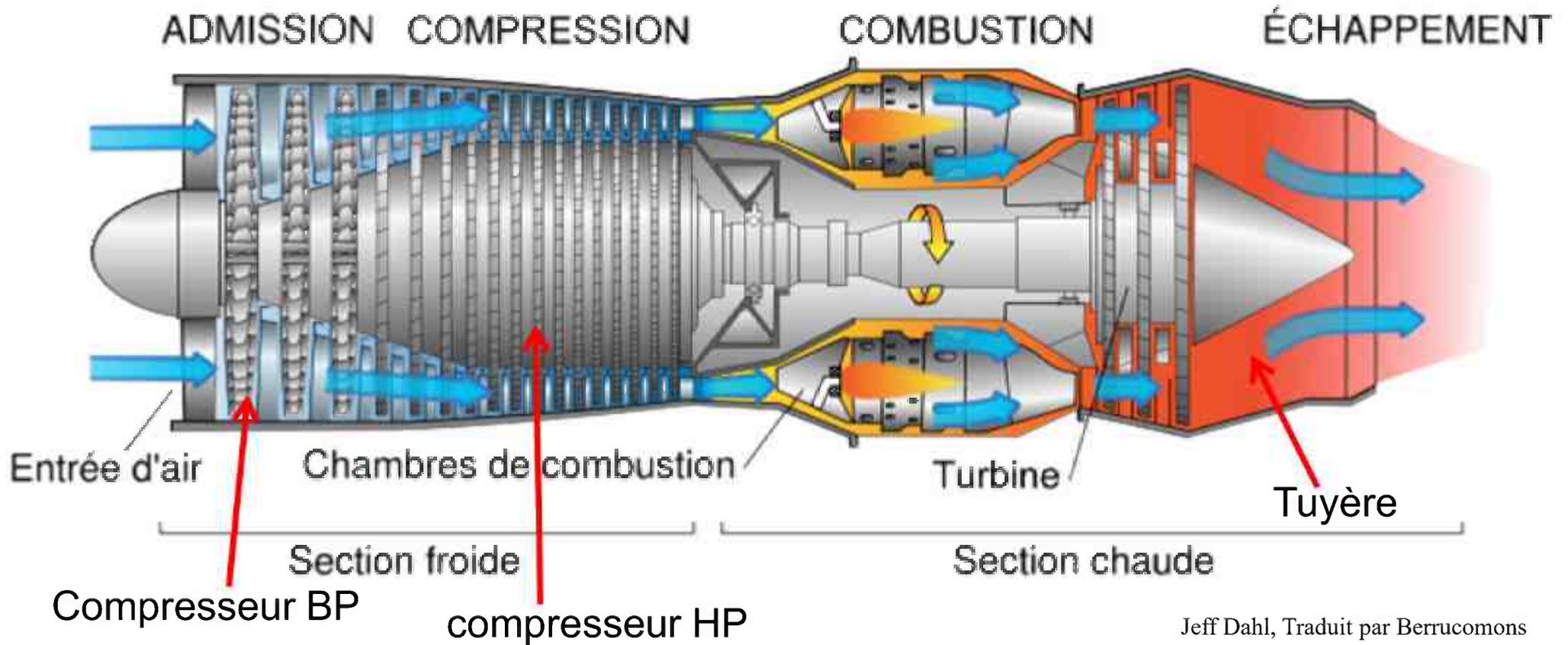
- **Constitution**

- **Compresseur**
 - **Chambre de combustion**
 - **Turbine**

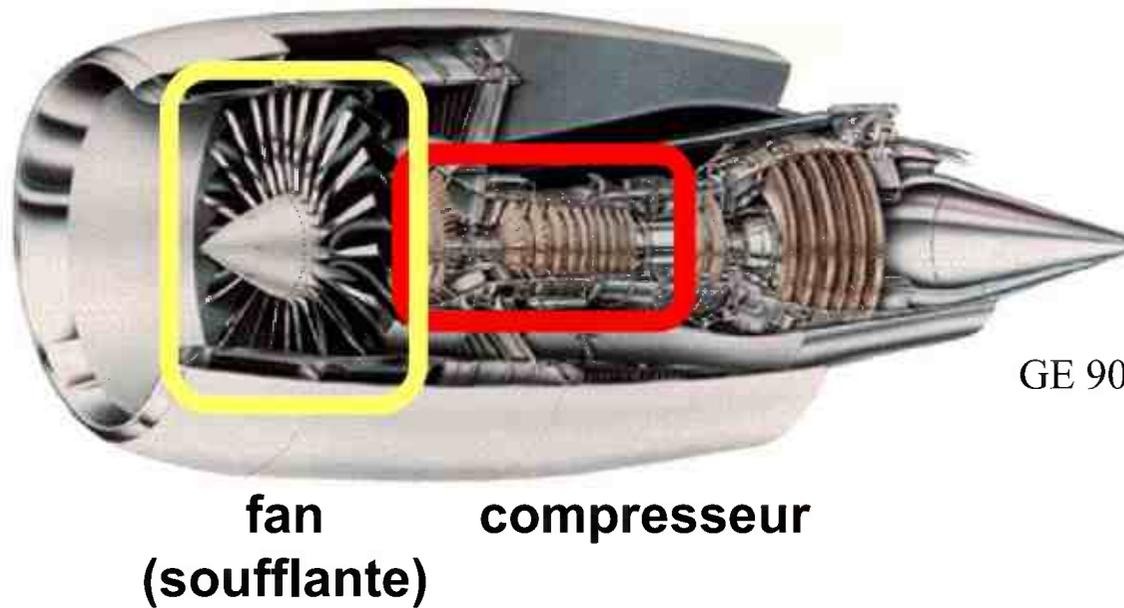
- **Turbopropulseurs**
- **Statoréacteurs**
- **Moteur fusée**

Différentes parties d'un turboréacteur

Réacteur simple corps - simple flux



Turboréacteur : le fan et le compresseur



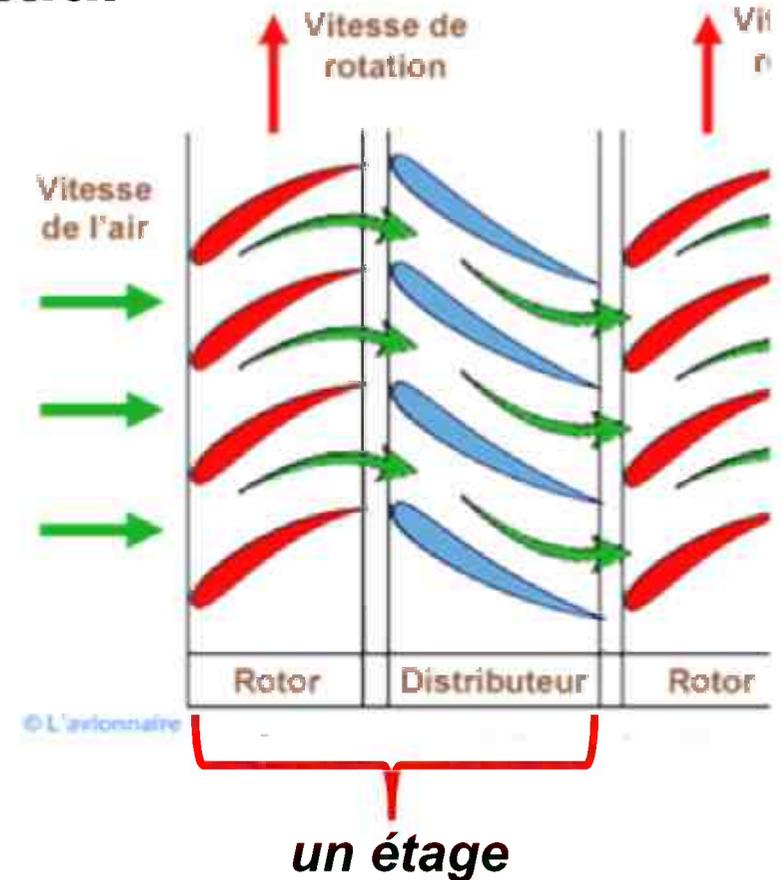
- Rôles :
 - Aspirer (fan) puis **compresser** (compresseur) l'air pour l'amener à des vitesse, pression et température optimales à l'entrée de la chambre de combustion.

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.

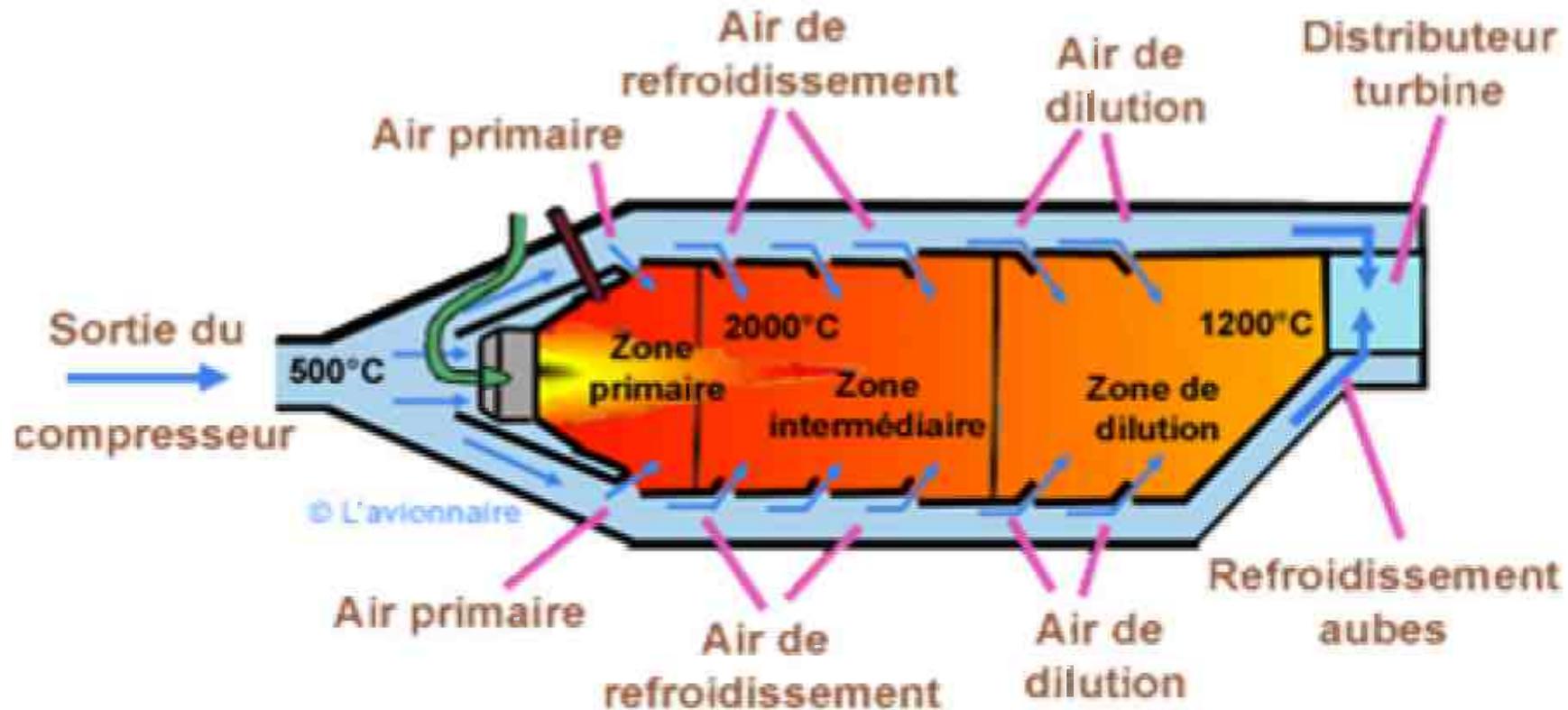
Le rotor aspire l'air en tournant
Le stator (fixe) ralentit l'air
→ augmentation de la pression

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



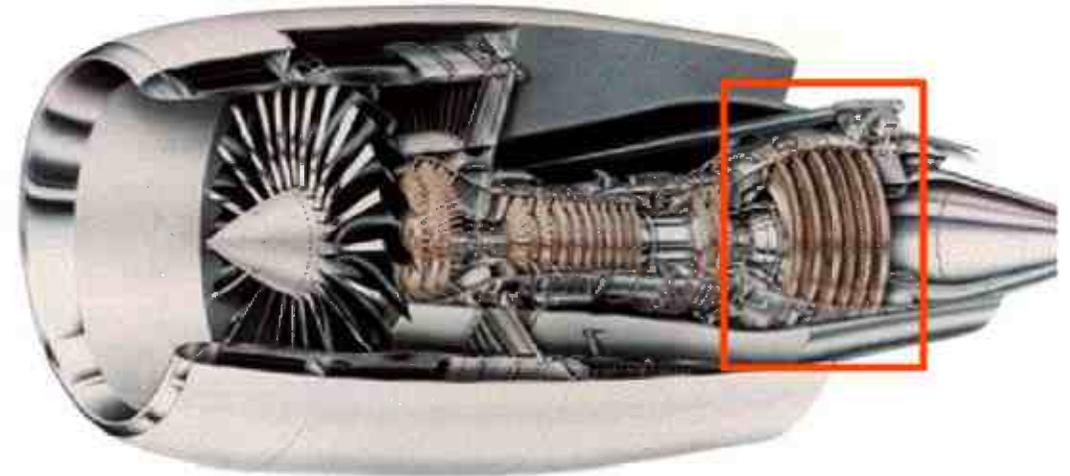
Il existe un autre type de compresseur : le compresseur centrifuge

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

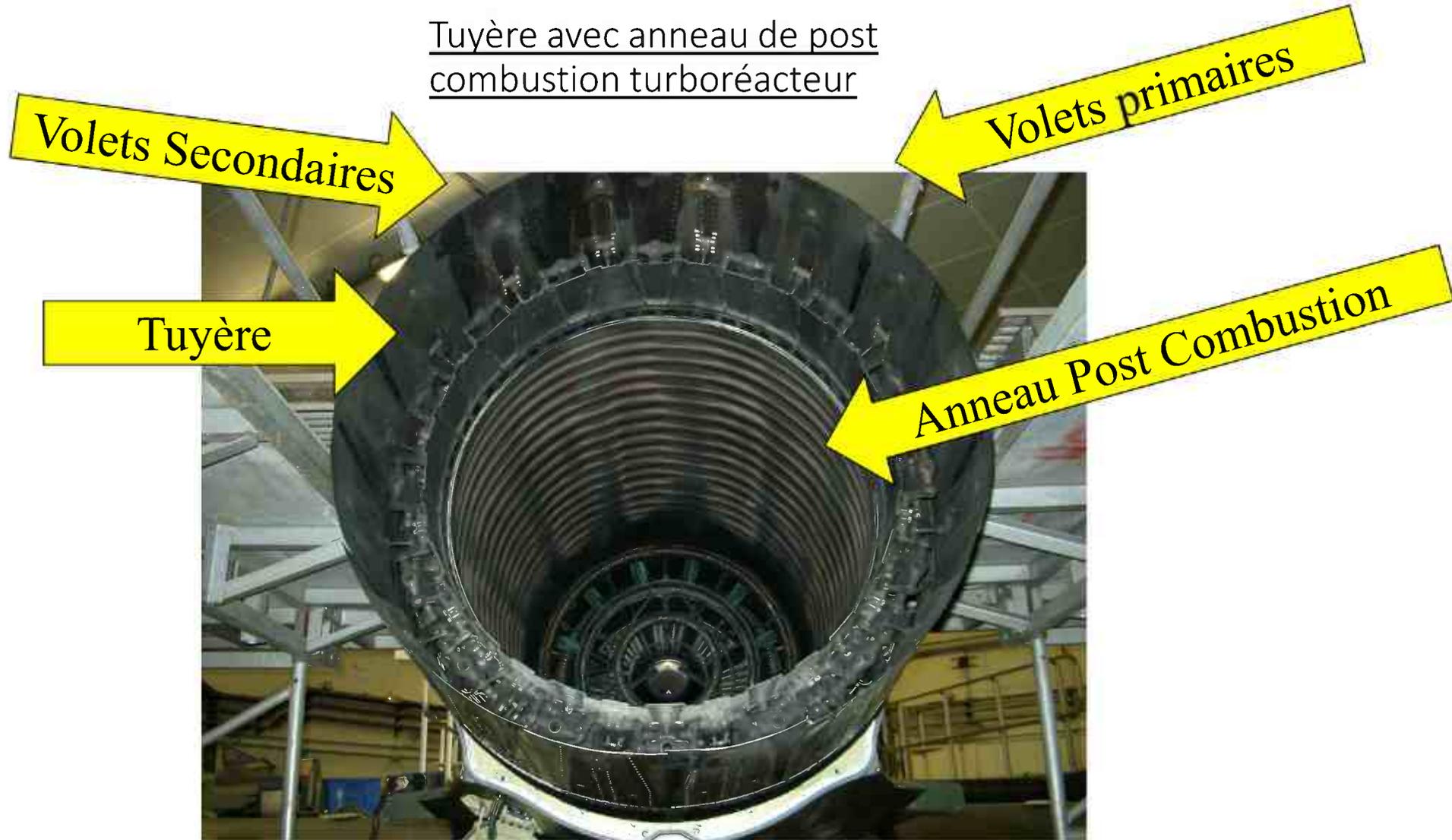


- **Role:**
 - **Sur un turboréacteur:**
 - Récupère une partie de l'énergie issue de la combustion des gaz pour le **fonctionnement de la soufflante, du compresseur et des accessoires.**
 - **Sur un turbopropulseur:**
 - Récupère la **quasi totalité** de l'énergie issue de la combustion des gaz pour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

Turboréacteur : la post-combustion

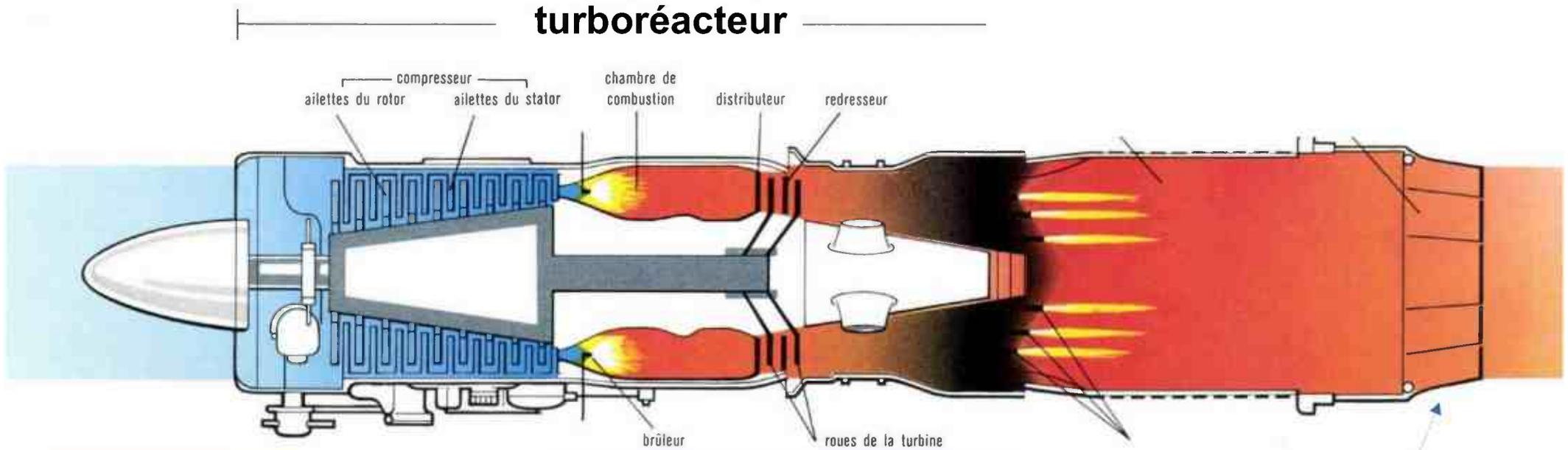
**Injection et allumage de combustible dans une tuyère derrière la turbine
=> forte augmentation de puissance (et de consommation)**

Tuyère avec anneau de post combustion turboréacteur



Turboréacteur : la post-combustion

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



injection de carburant

tuyère de sortie (géométrie ajustable)

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.

Turbofan



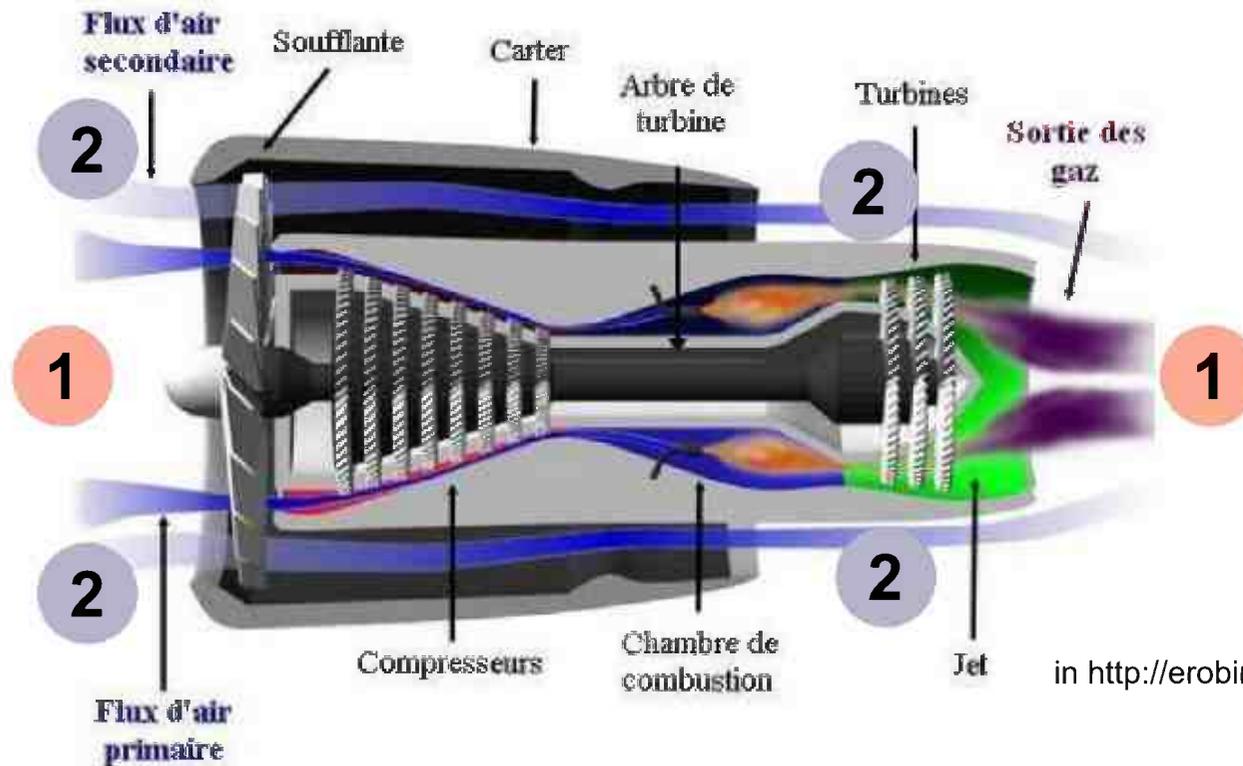
Turboréacteur double flux

Pour obtenir la même quantité de mouvement $Q \cong mV$, 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)

in <http://erobin.e-monsite.com>



Turboréacteur double flux

Compresseur HP

Compresseur BP

Turbine HP

Chambre de combustion

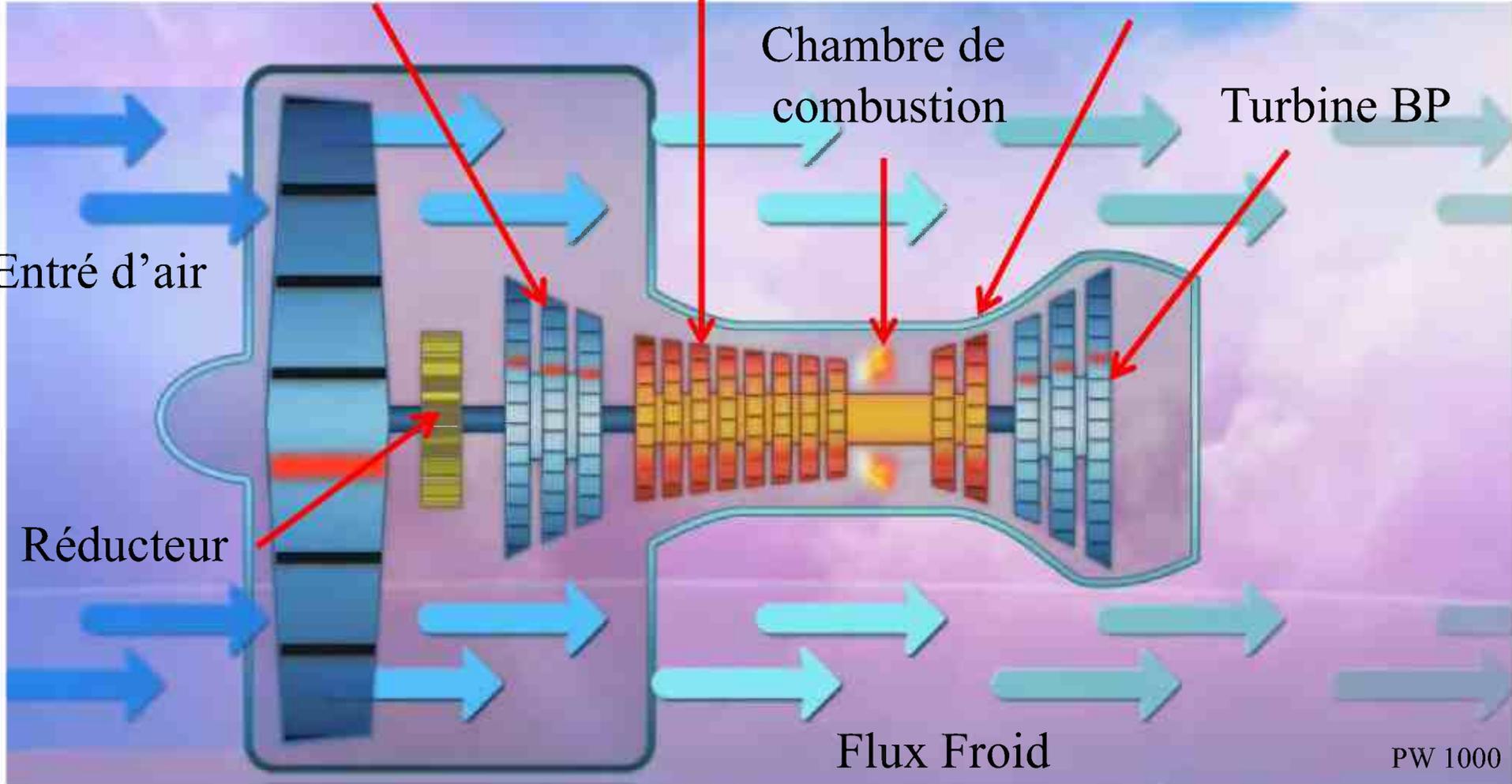
Turbine BP

Entrée d'air

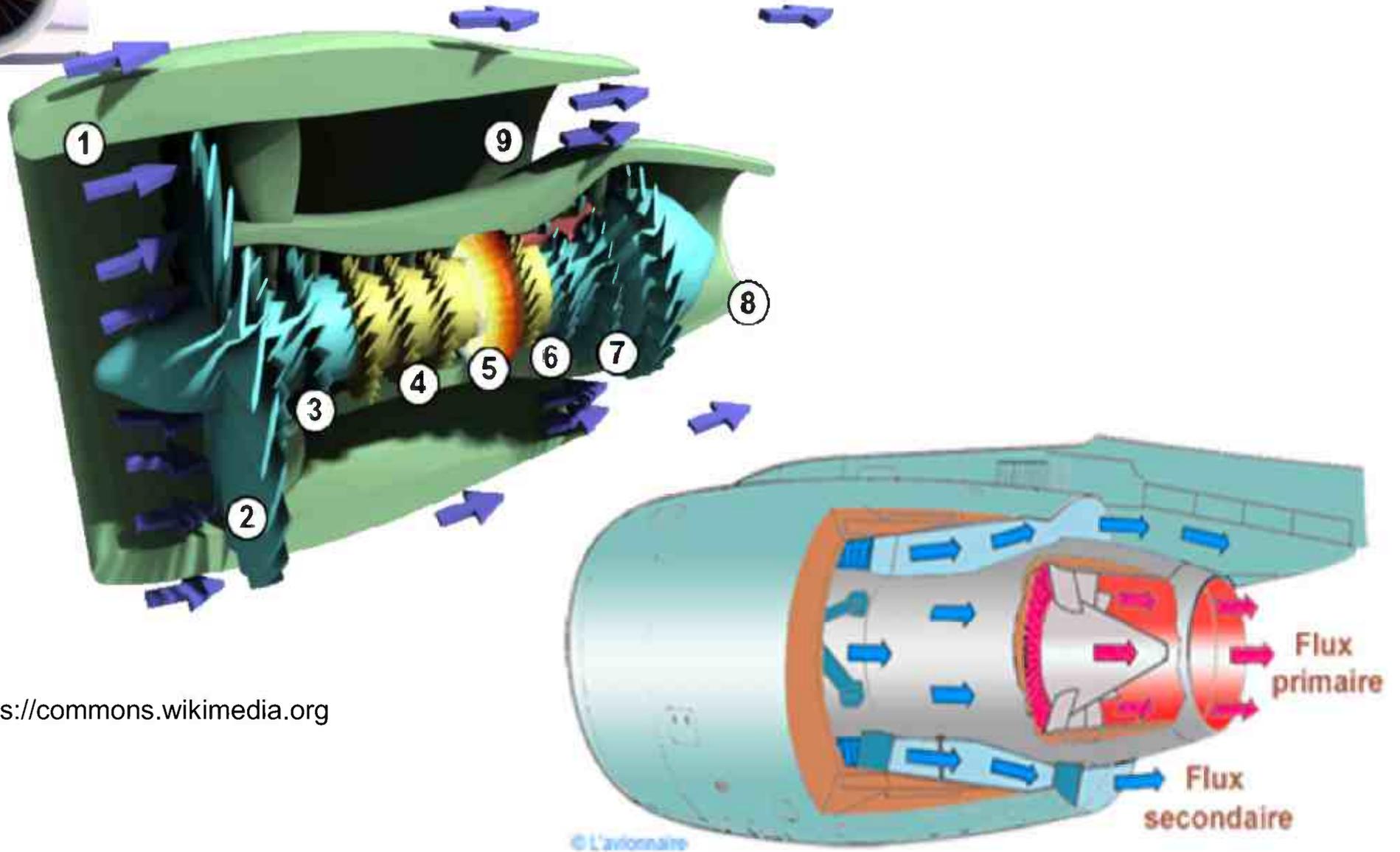
Réducteur

Flux Froid

PW 1000



Turboréacteur double flux



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

Turboréacteur double flux : le fan



Redresseur
Aubages fixes
flux secondaire



Redresseur
Aubages fixes
flux primaire

Source : Pilote-Virtuel.com/ Photo: Jujug

Turboréacteur double flux



Source : Pilote-Virtuel.com/ Photo: Jujug

- 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 double flux

- **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 2500 km/h**
- **Consommement du kérosène (Jet A) ou du SAF:**
 - 58 l/min Rafale avec Post Combustion. 124 et 211 litres pour 100 km
 - Un Airbus A 350 consomme 1000 litres de carburant pour 100 kilomètres Ce qui fait **3,3 l / passager / 100 km.**
 - Airbus A 320 de 160 places consommera environ : $3,5 \times 160 = 560$ litres / 100 km soit **3,5l / passager / 100km**
 - En moyenne les avions de ligne, consomment 3,5 / 4 l de kérosène / passager / 100 km.
 - Pour un trajet Paris – New-York, un A380 embarque environ 80 T de kérosène.
 - l'A330neo a réduit sa consommation de carburant de 14% par rapport à l'A330 classique.

Les turboréacteurs : 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**
 - **Turbopropulseurs**
 - **Statoréacteurs**
 - **Moteur fusée**



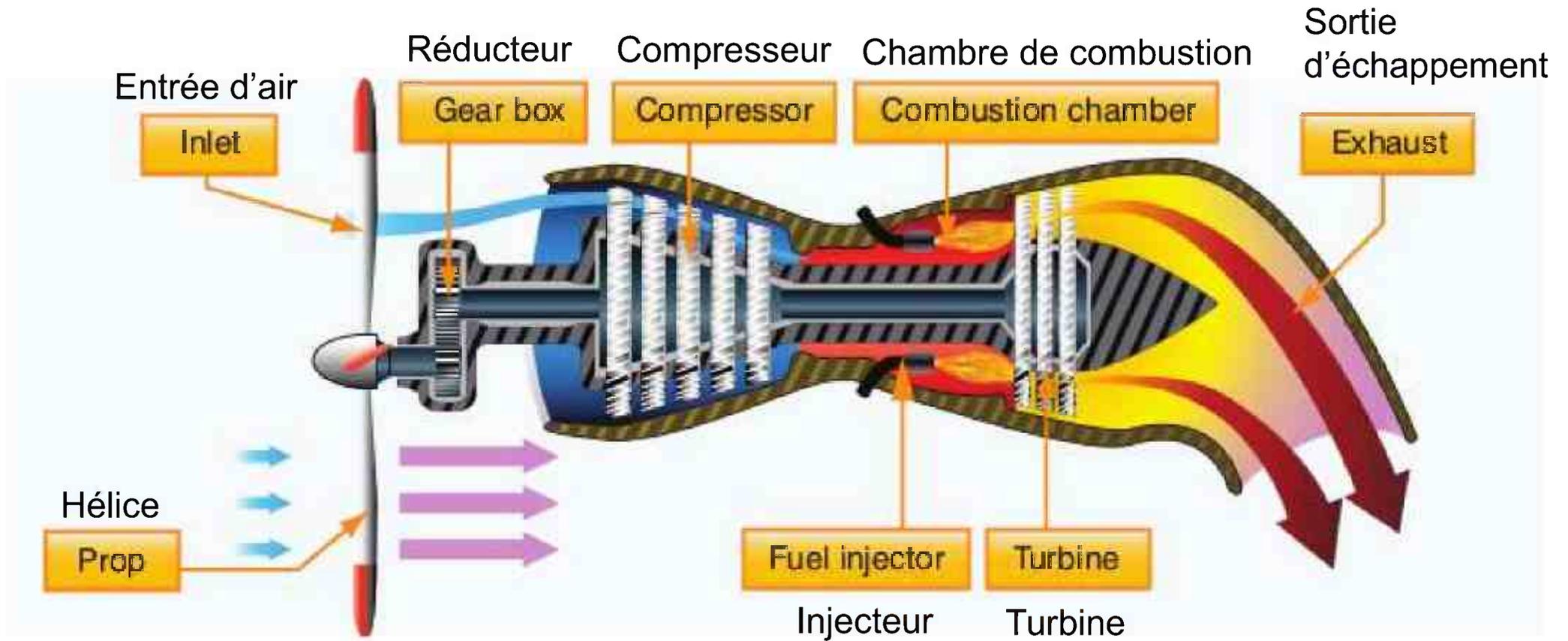
Source: Snecma/ Photo: Eric Drouin

Les turbopropulseurs

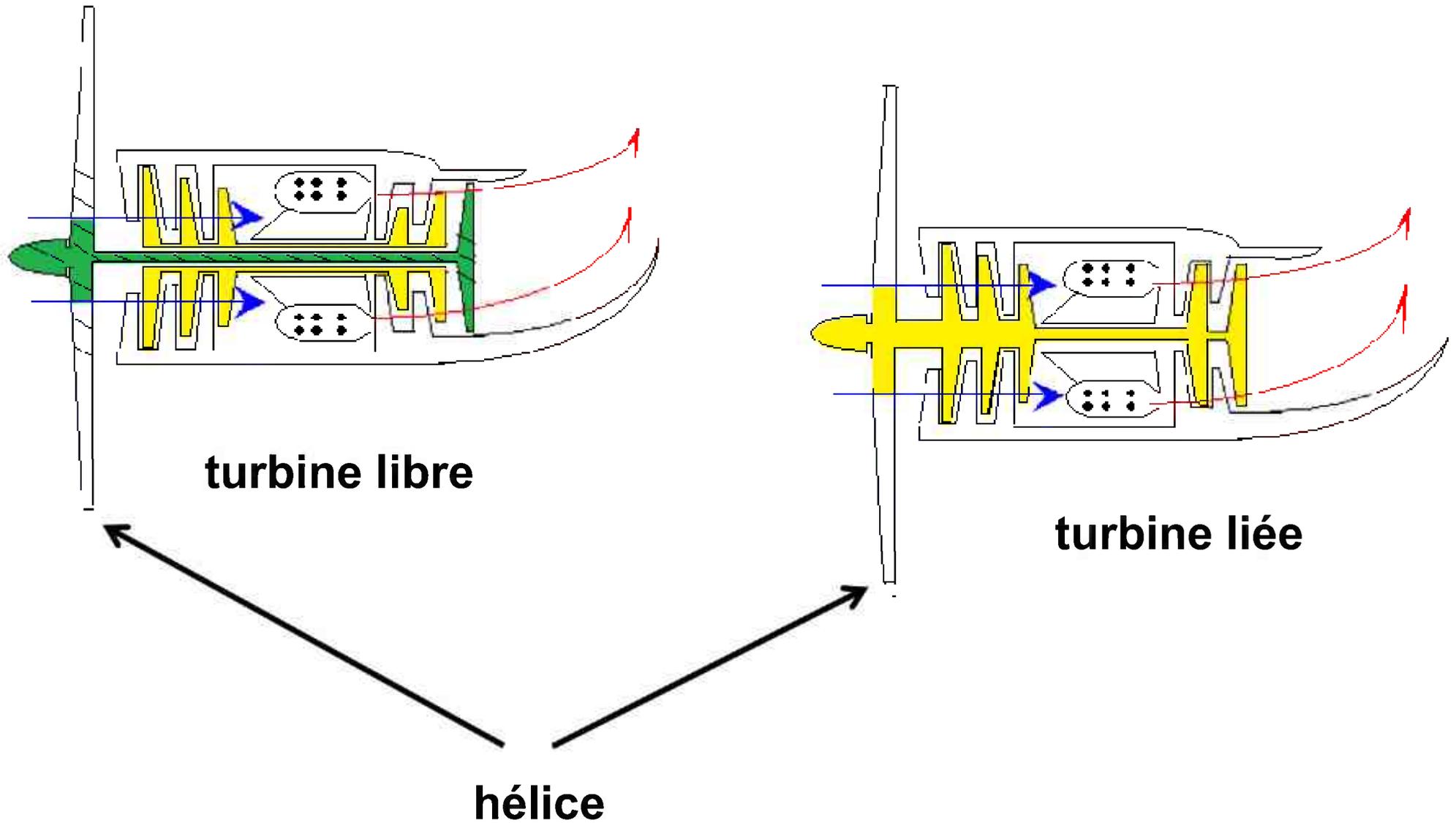
- Le turbopropulseur est **l'association d'un réacteur et d'une hélice** propulsive ou de pales d'hélicoptère.
- Le réacteur assure **l'entraînement de l'hélice**. Les gaz éjectés ne participent que très peu (< 20%) à la propulsion.



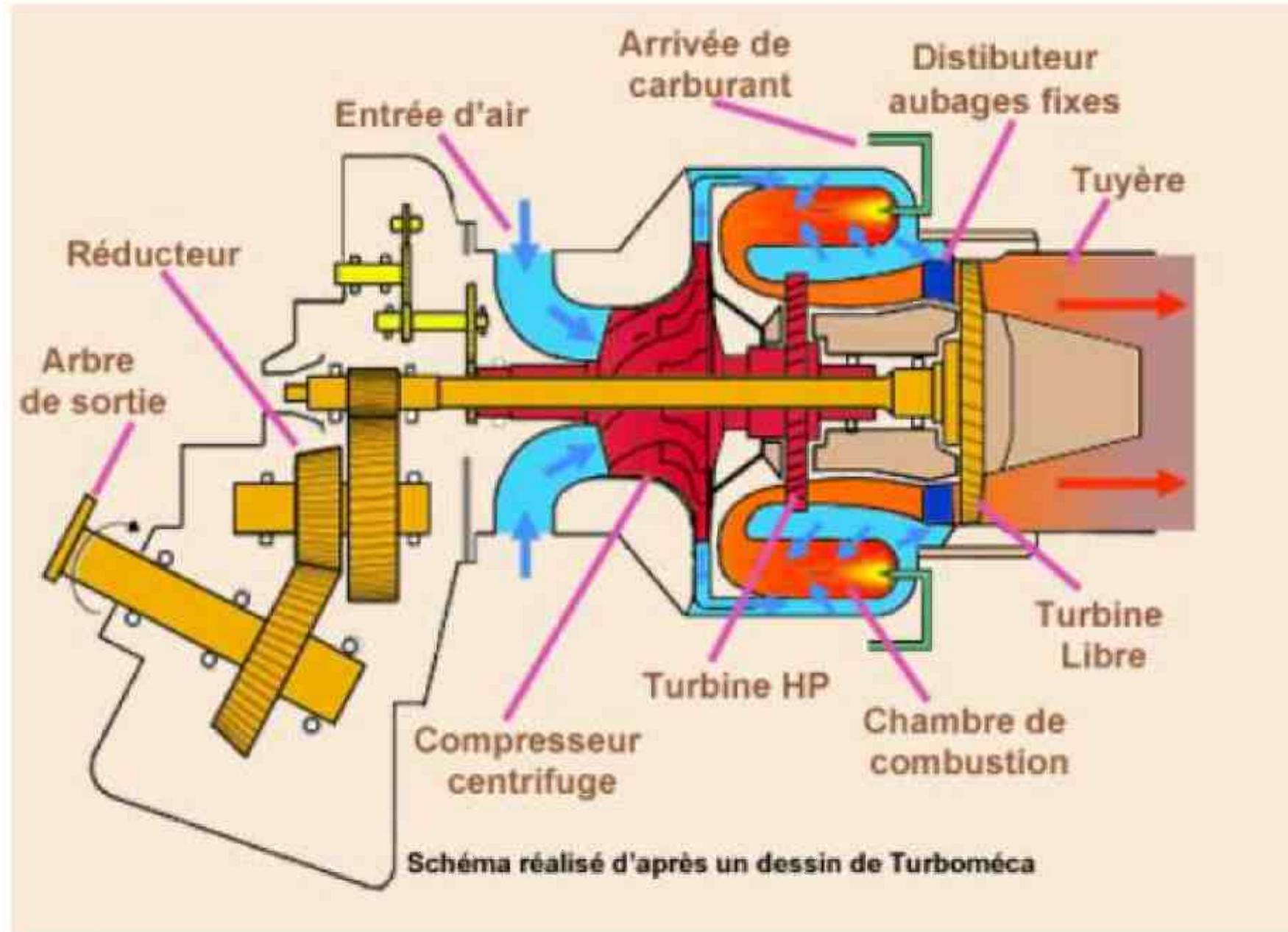
Turbopropulseur



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 utilisés pour les avions de transport régionaux et pour les avions d'affaire et sont devenus le type de moteur presque exclusif des hélicoptères.



ATR 42-600 (Wikipedia)

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!)
- ◆ turboprop de 573 cv
- ◆ Vmax : 230 km/h
- ◆ Plafond : 8000 m

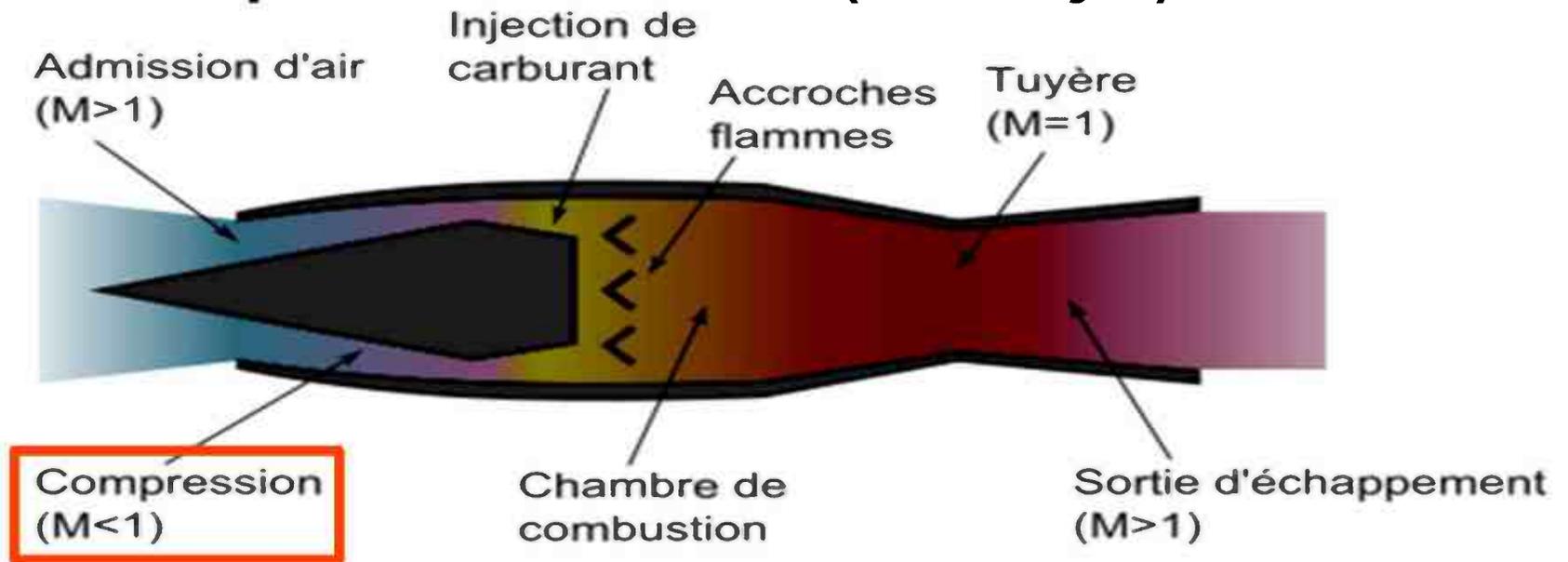
Groupes motopropulseurs

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

Statoréacteur (Ramjet) Super Statoréacteur (Scramjet)

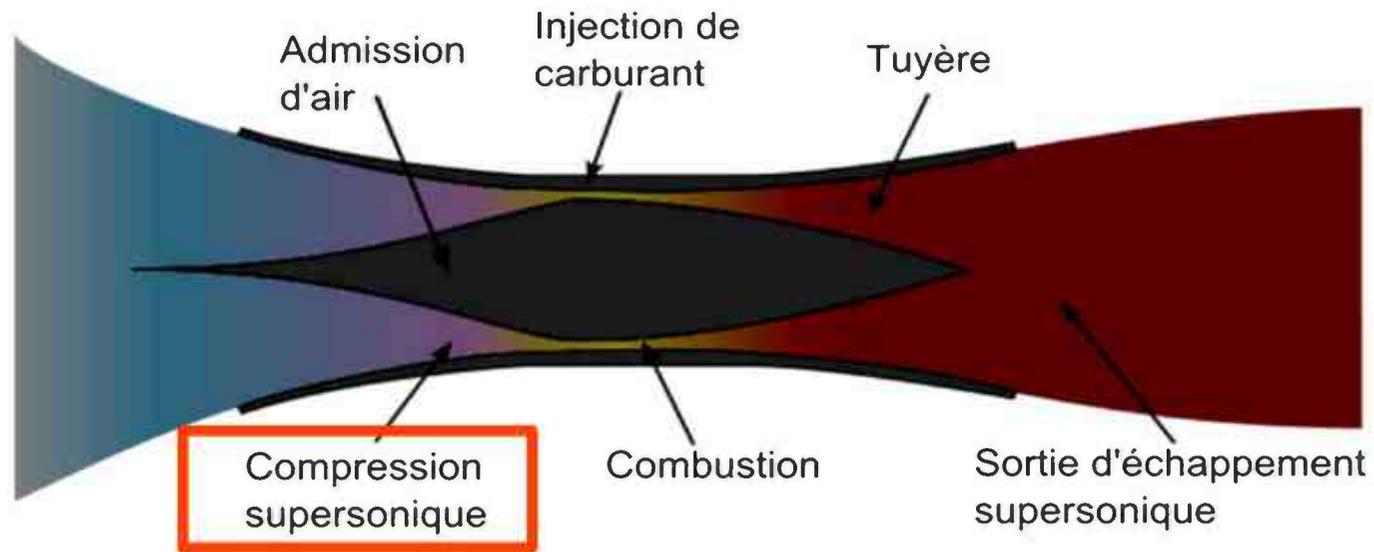
Ramjet

Ram :
pression
dynamique
produite par
l'air sur un
objet en
mouvement



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

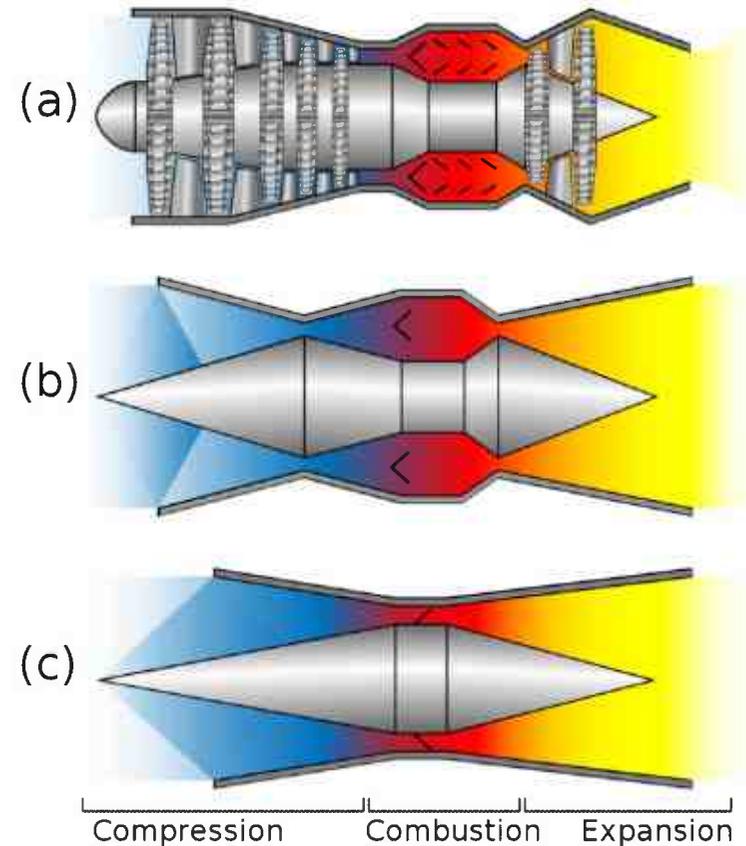
Le Wu-14 (Chine) : Mach 10 en 2014

**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.

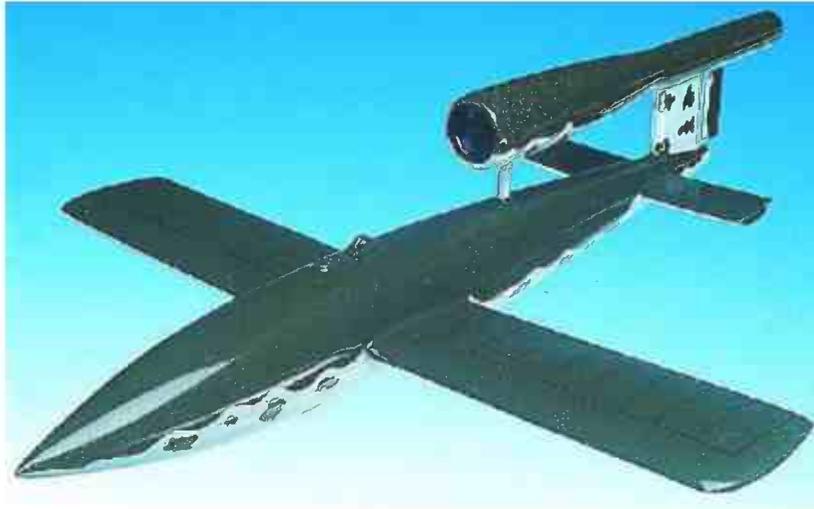


Zones de compression, combustion et extension dans un turbojet (a), ramjet (b) et scramjet (c)

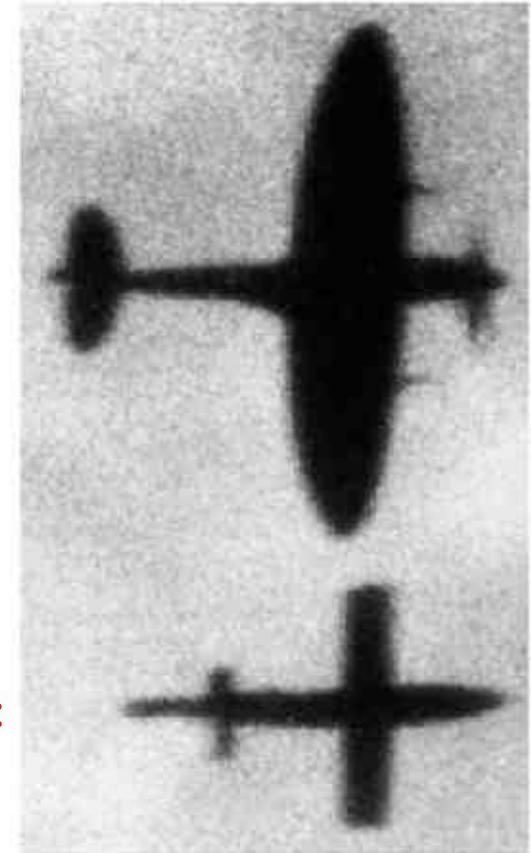
© Wikipedia

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 (ce qui fait brûler le combustible) 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:**

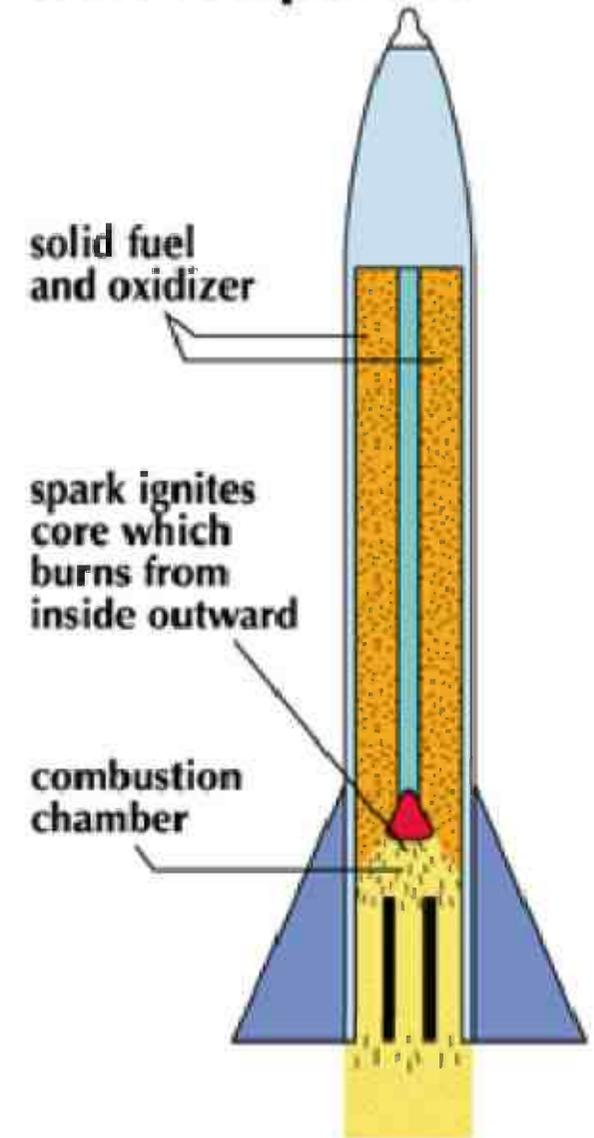
- Nécessite une réserve très importante d'ergols
- Forte poussée produite mais rendement assez faible (rapport poussée /carburant consommé relativement faible).

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.

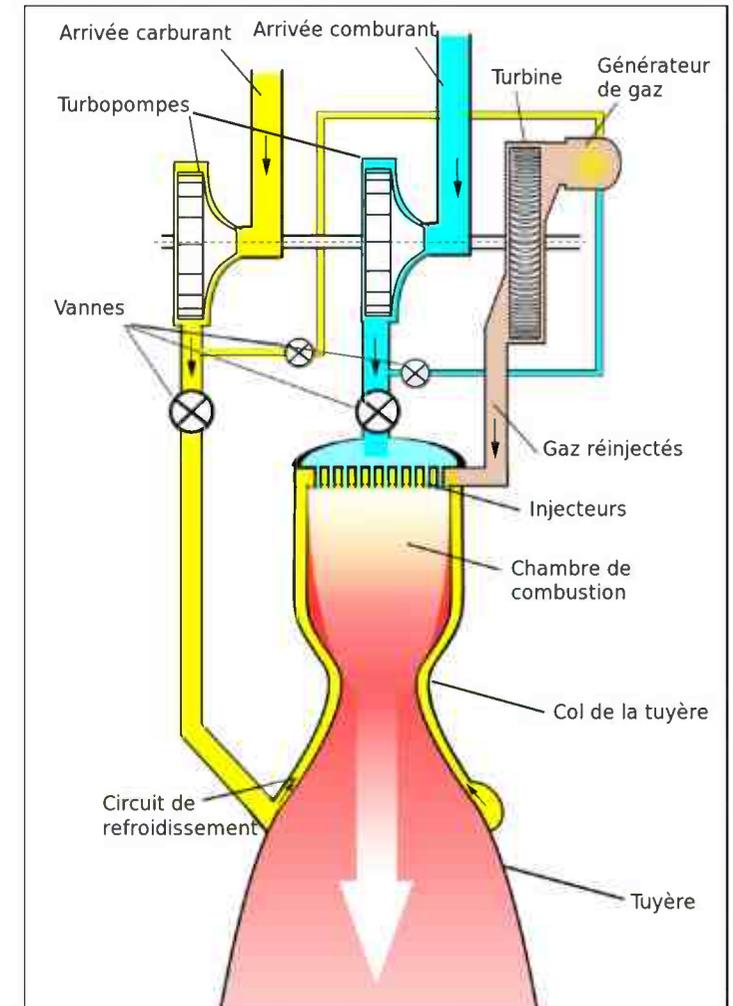
Solid Propellant



Le moteur fusée

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**.
Étage supérieur 6,5 Tonnes de
poussée



Space Engines. SAFRAN. Snecma

Utilisations du moteur fusée

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

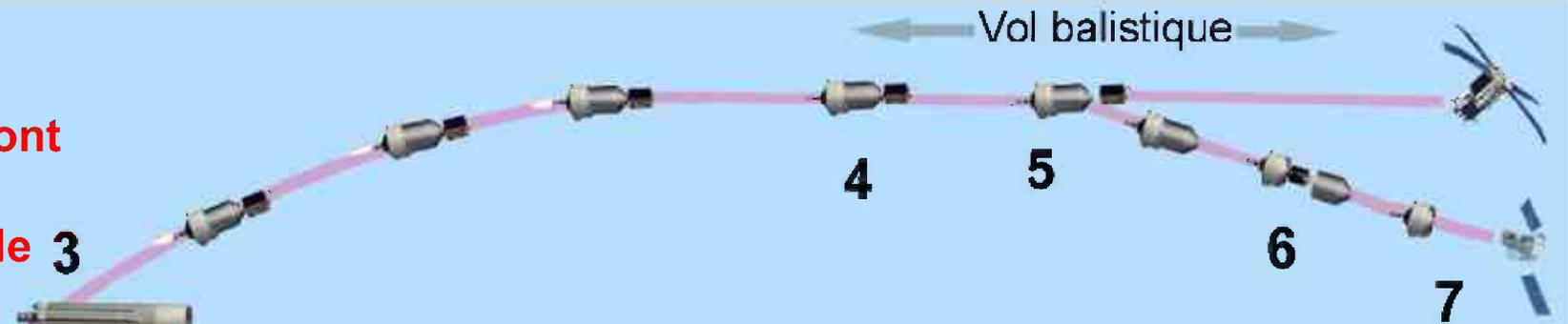
Un **avion-fusée** propulsé par un moteur utilisant comme carburant du propergol liquide (LOX-amoniaque): le North American X15 (1959).

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



Schéma du lancement-Ariane-5

1) 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	

« Schema-lancement-Ariane-5 » par Pline — Travail personnel. Sous licence CC BY-SA 3.0 via Wikimedia Commons

EAP : propulseur d'appoint à poudre

EPC : étage principal cryogénique

ESCA : vitesse sur orbite d'échappement

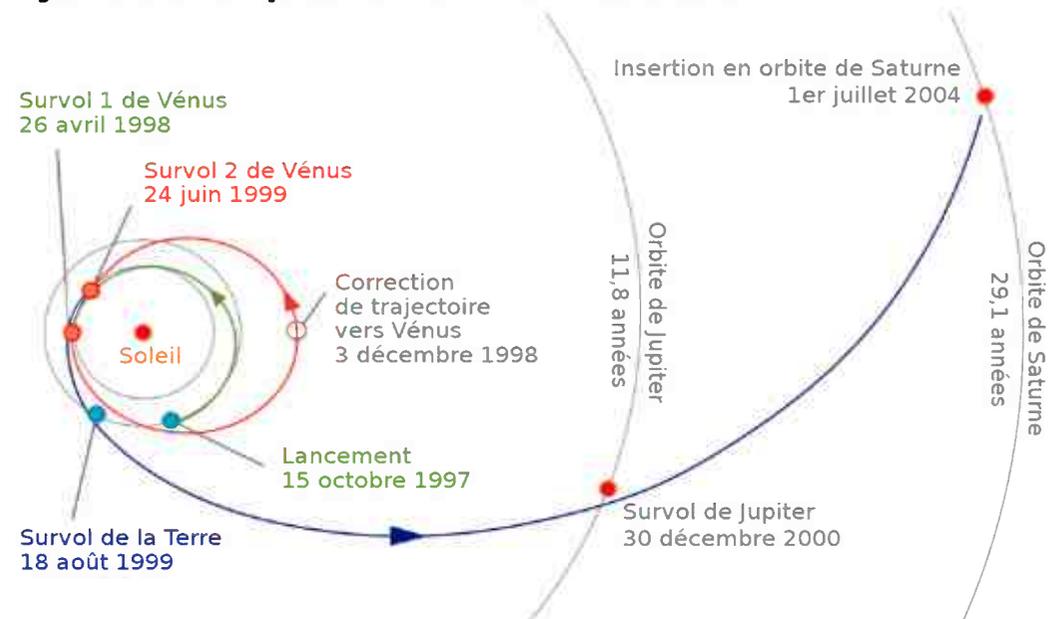
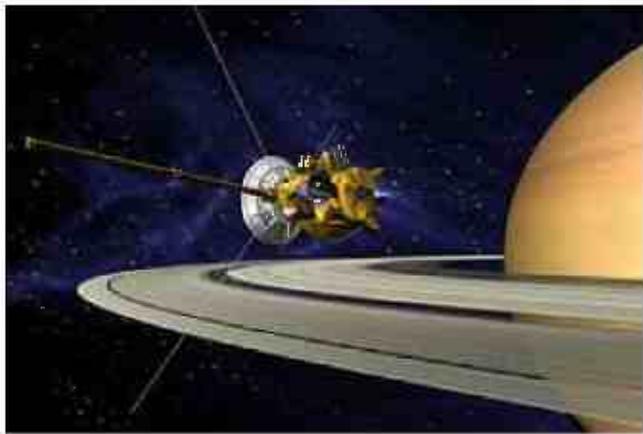
Afrique

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



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

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

3. Etude des aéronefs et des engins spatiaux

Les groupes motopropulseurs

- Moteur à pistons
- Propulseurs à réaction
 - Turboréacteur
 - Turbopropulseur
 - Statoréacteur
 - Moteur fusées
- Motorisation électrique



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**



Pipistrel Velis (600 kg, 2 passagers, 50 mn d'autonomie opérationnelle, 1h30 de recharge)



Solar Impulse (envergure 72 m, 2300 kg, 1 passager, 17248 cellules photovoltaïques, 62 km/h)

Motorisation électrique hybride

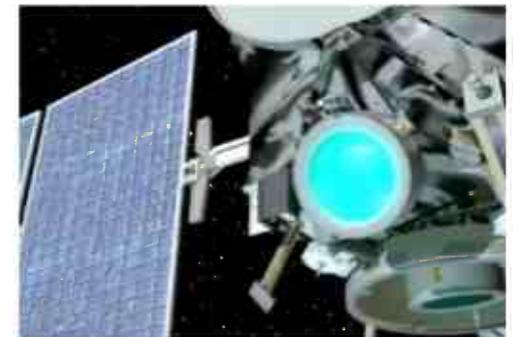
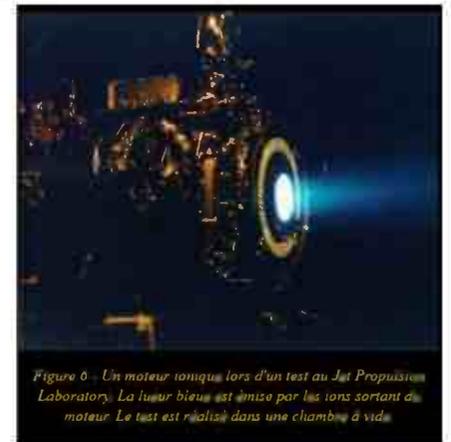
- **Un moteur thermique fournit de la puissance en tournant à un bas régime constant.**
 - **Consommation faible, émission CO₂ faible**
- **Un régulateur alimente le moteur électrique de l'hélice à partir du générateur et d'une batterie.**
- **La batterie fournit le surcroît de puissance nécessaire au 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.**



1) 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)

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 (50 km/s).
 - L'effet propulsif est proportionnel à la masse éjectée et au carré de la vitesse d'éjection.
 - **Faible poussée** (SAFRAN PPS 1350: 9 N) mais très longtemps (5 000 heures pour Smart-1 vers une orbite lunaire).
 - **Très bon rendement** : 10 fois plus que les moteurs chimiques
- 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**.

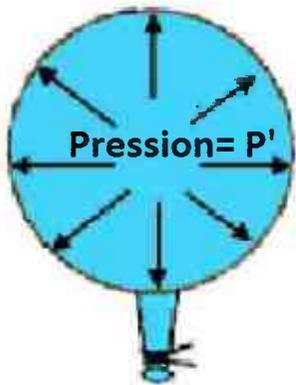


**Pour aller au-delà du
programme BIA sur
la compréhension
des groupes
motopropulseurs.**

Principe de la propulsion par réaction

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

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



P est la pression statique en pascals.

ρ est la masse volumique en Kg/m³.

V est la vitesse du fluide en m/s.

Principe de la propulsion par réaction

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

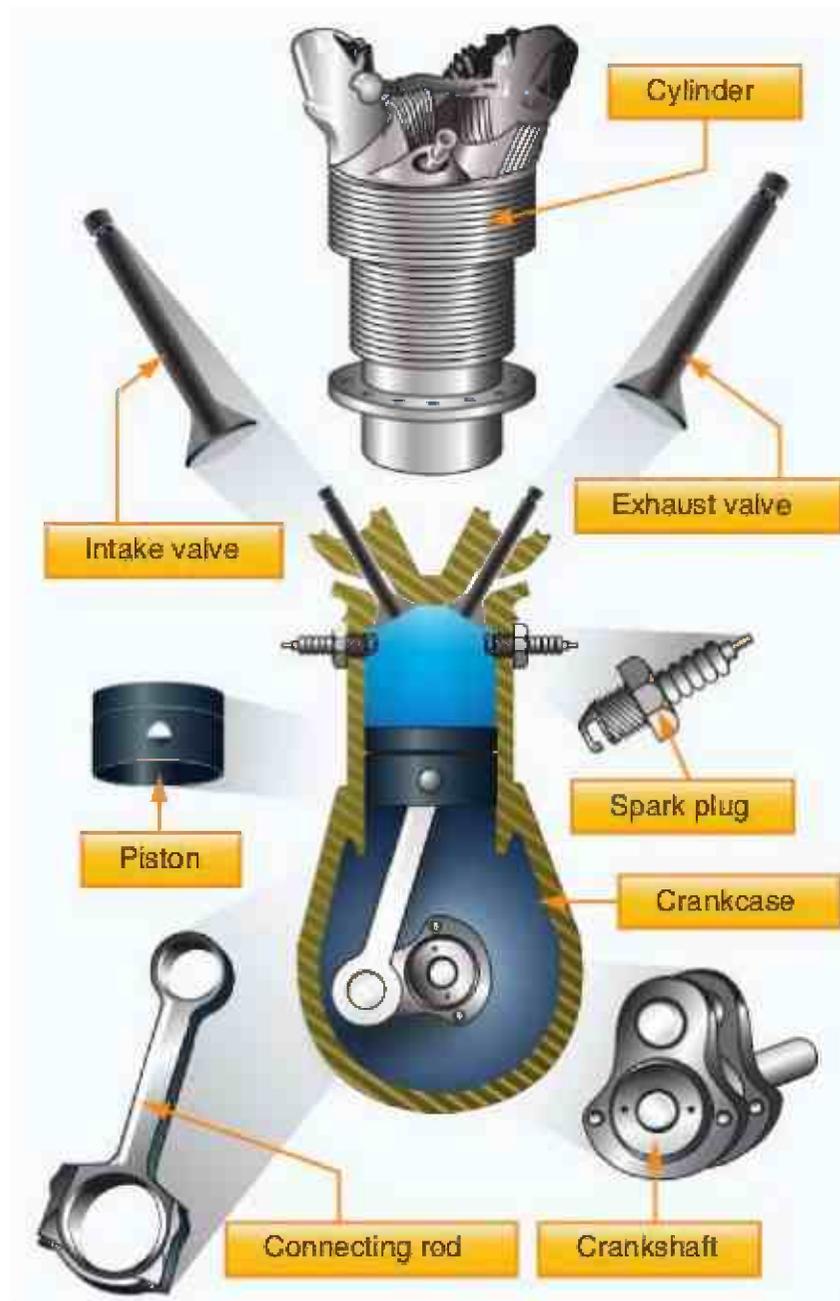
$$\mathbf{F}_{\text{(poussée)}} = \mathbf{Dm} (\mathbf{V}_{\text{itesse Sortie}} - \mathbf{V}_{\text{itesse Entrée}})$$

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

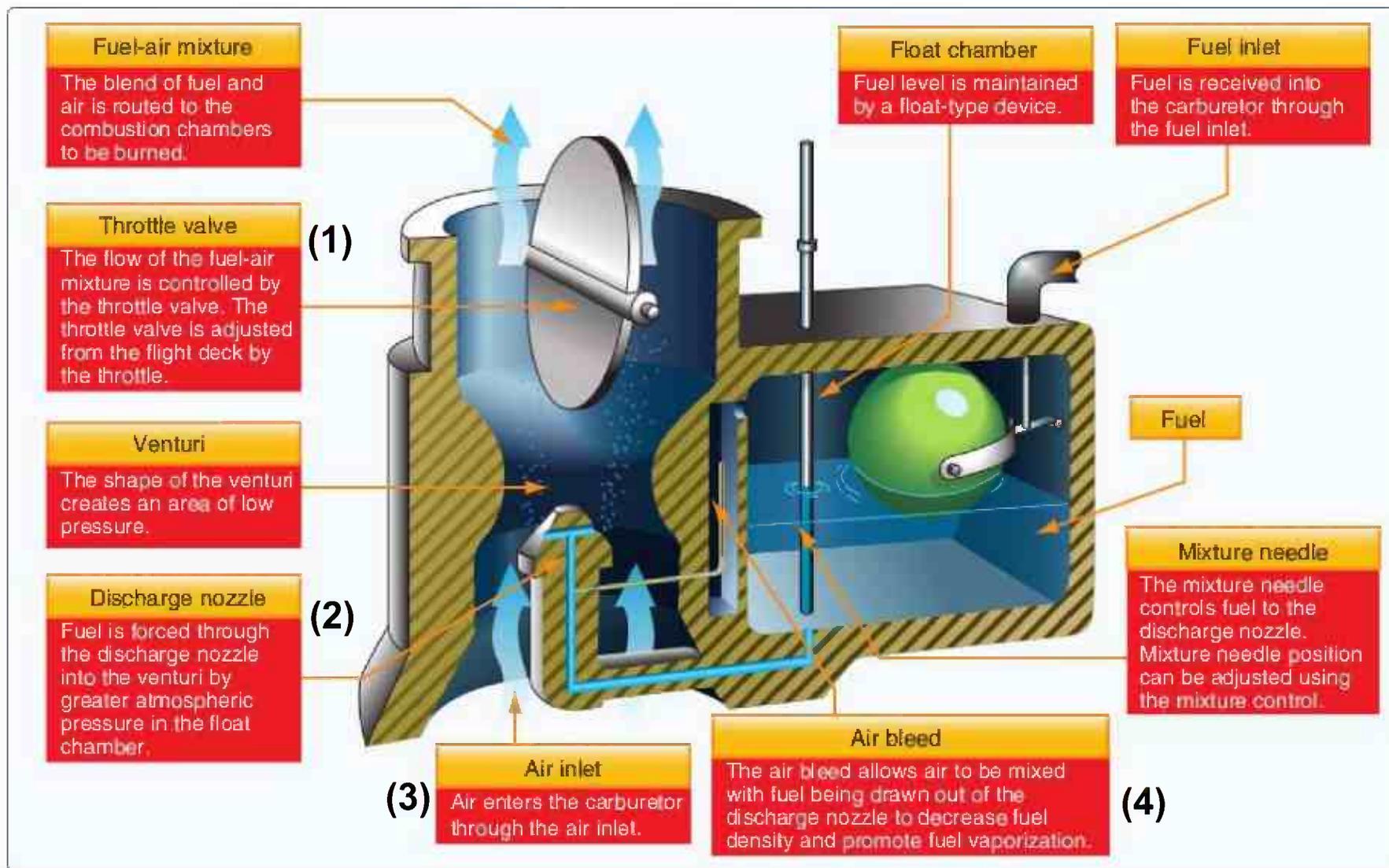
L'effet propulsif est proportionnel à la masse éjectée mais aussi au carré de la vitesse de cette masse.

Eléments d'un cylindre In English

in : FAA Pilots Handbook



Le carburateur à flotteur



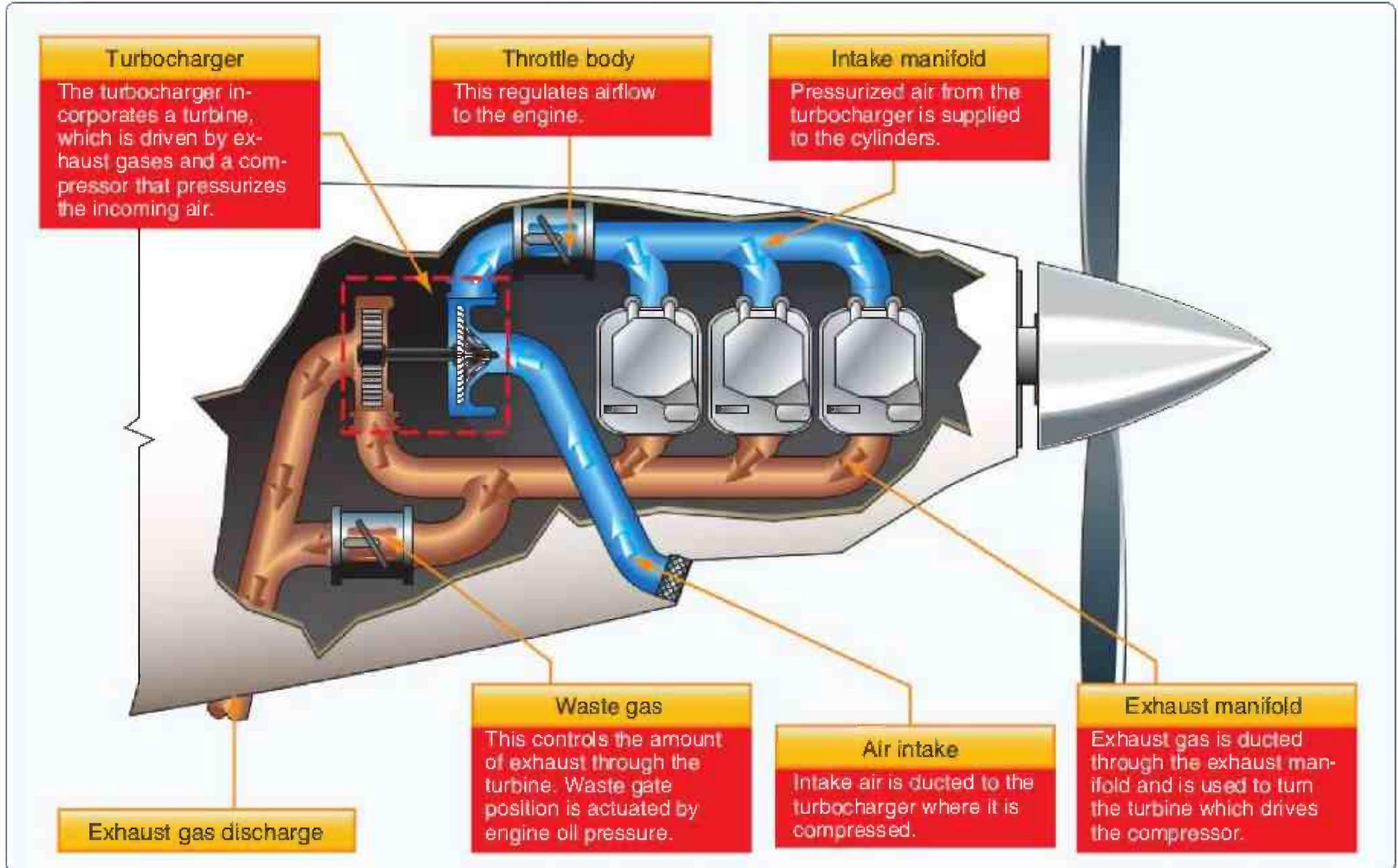
1 - papillon des gaz

3 - entrée d'air

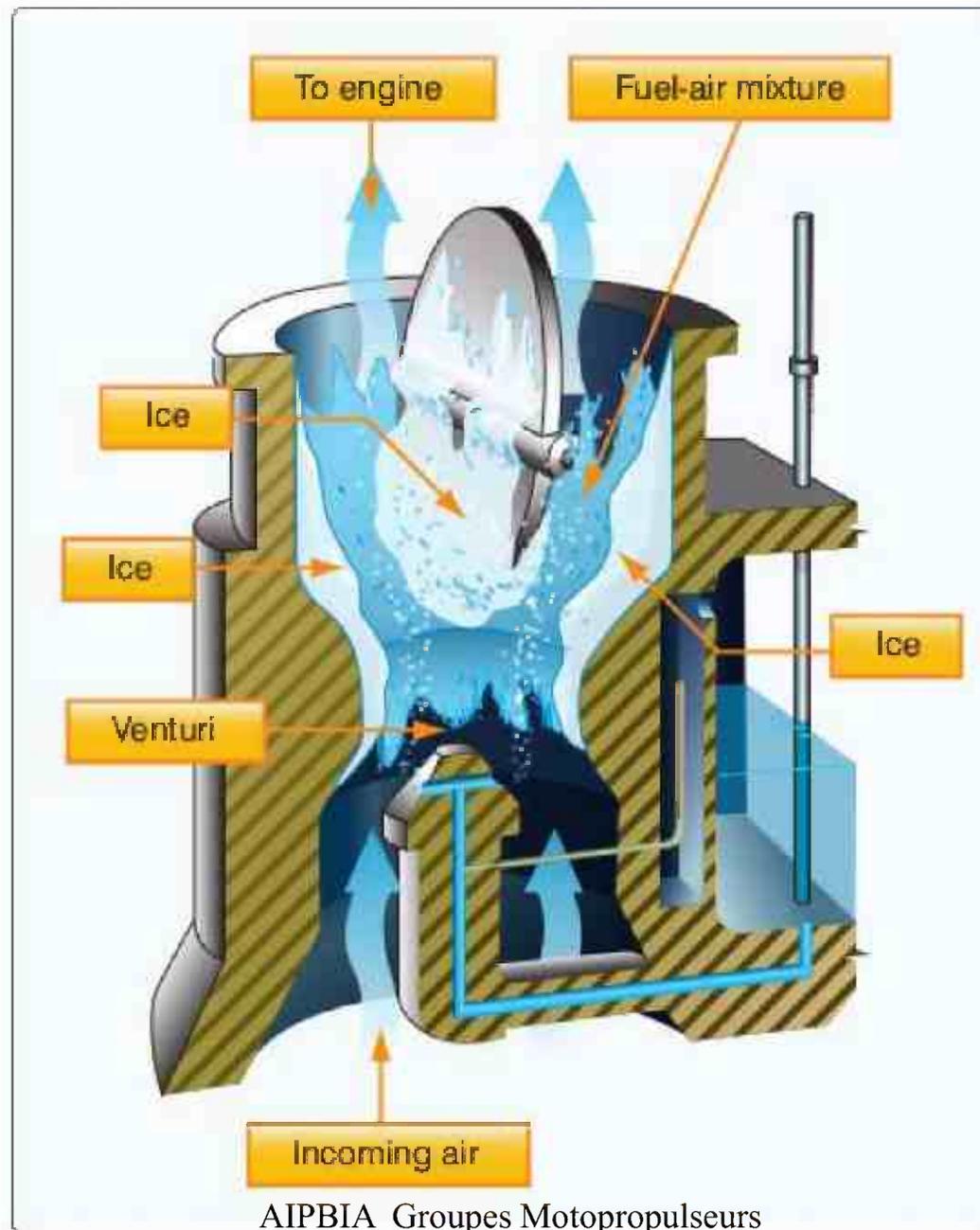
4 - purge d'air

2 - buse de refoulement

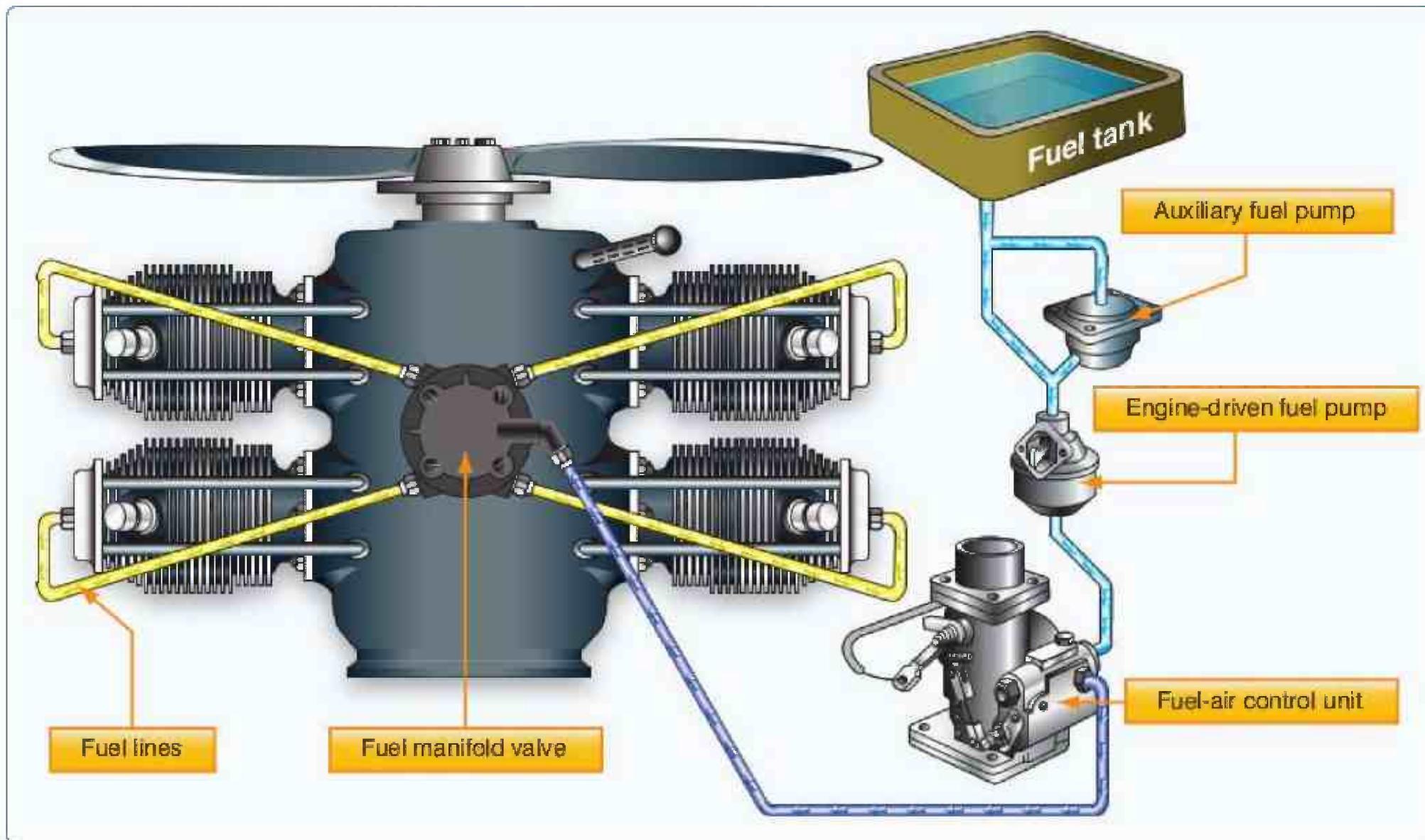
Augmenter la puissance : le turbo



Carburation : Carburetor icing



Circuit d'injection





Moteur à explosion en étoile

Pourquoi un nombre impair de cylindres ?

Le nombre impair s'explique du fait qu'un moteur 4 temps a **1 temps moteur pour 2 tours de vilebrequin.**

Géométriquement les cylindres d'un moteur en étoile de N cylindres sont décalés d'un angle de $360^\circ/N$; or le cycle thermodynamique se fait en 2 tours, soit 720° .

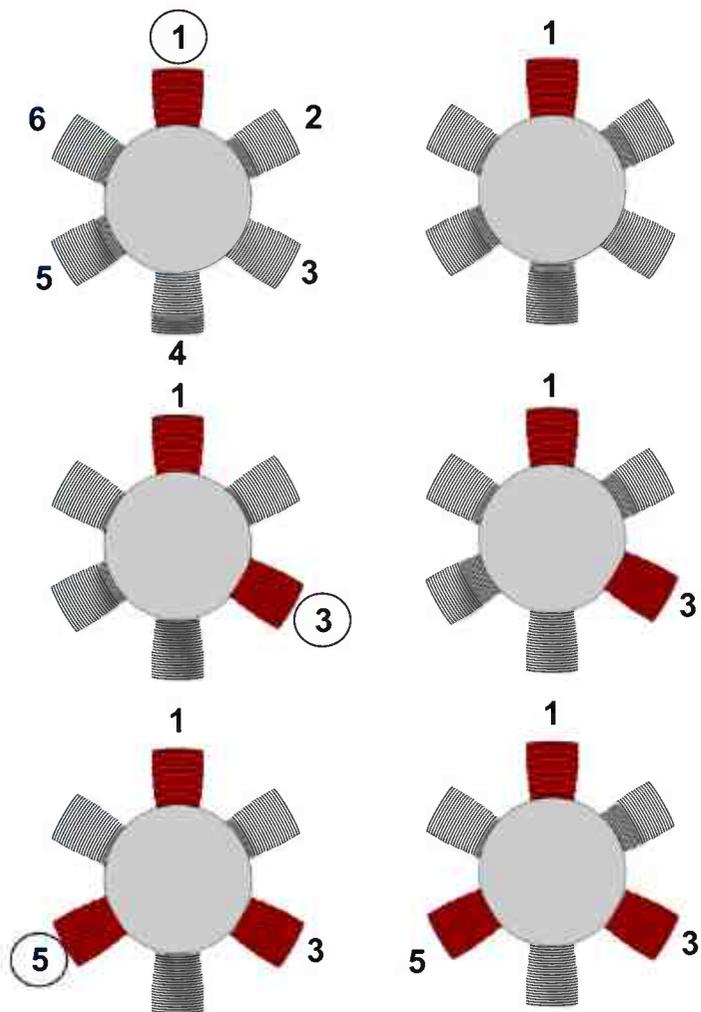
Si l'allumage des cylindres se fait géométriquement les uns à la suite des autres alors on s'aperçoit que l'on aura N temps moteurs le premier tour et zéro le second tour.

Pour rendre les temps moteurs plus réguliers il faut que la phase de combustion saute un cylindre sur deux, ainsi les cylindres restant auront des temps moteurs pendant le second tour. On a alors N/2 temps moteurs le premier tour et N/2 le second tour.

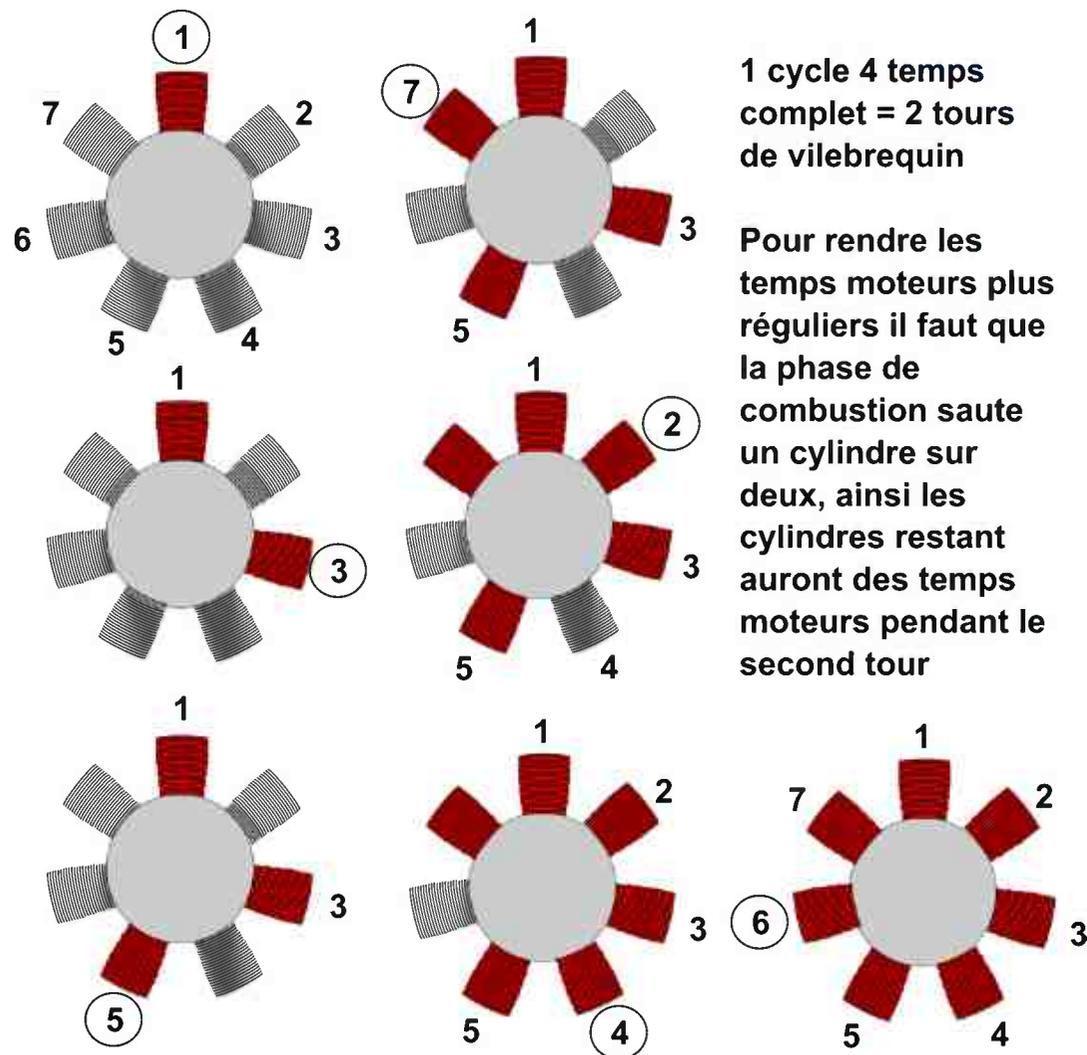
Le problème est que si N est pair, en sautant un cylindre sur deux on reste toujours sur les mêmes cylindres, tandis qu'avec N impair le cycle de combustion parcourt tous les cylindres en deux tours de façon régulière.

in : <https://forums.futura-sciences.com/technologies/221312-moteur-etoile.html>

Moteur en étoile - Pourquoi un nombre impair de cylindres ?



Nombre pair de cylindre (ici 6) :
au cours d'un cycle moteur, pas de temps
moteur pour les cylindre 2, 4 et 6 !



Nombre impair de cylindre (ici 7) :
tous les cylindres ont eu un temps moteur, dans
l'ordre 1 - 3 - 5 - 7 - 2 - 4 - 6

1 cycle 4 temps
complet = 2 tours
de vilebrequin

Pour rendre les
temps moteurs plus
réguliers il faut que
la phase de
combustion saute
un cylindre sur
deux, ainsi les
cylindres restant
auront des temps
moteurs pendant le
second tour

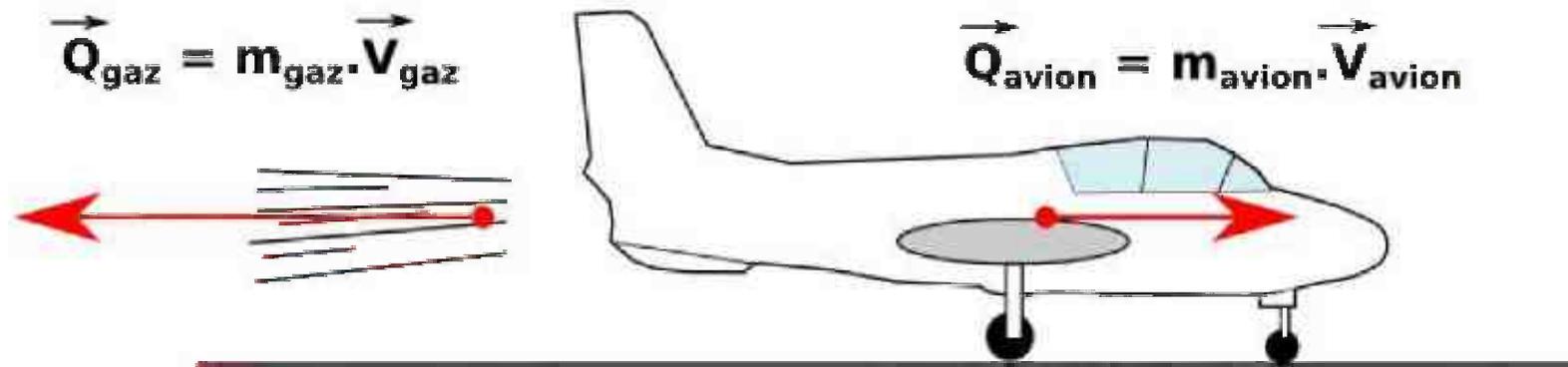
Une autre approche: **quantité de mouvement**

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 : $\vec{Q}_{\text{tot}} = \vec{Q}_{\text{avion}} + \vec{Q}_{\text{gaz éjecté}}$

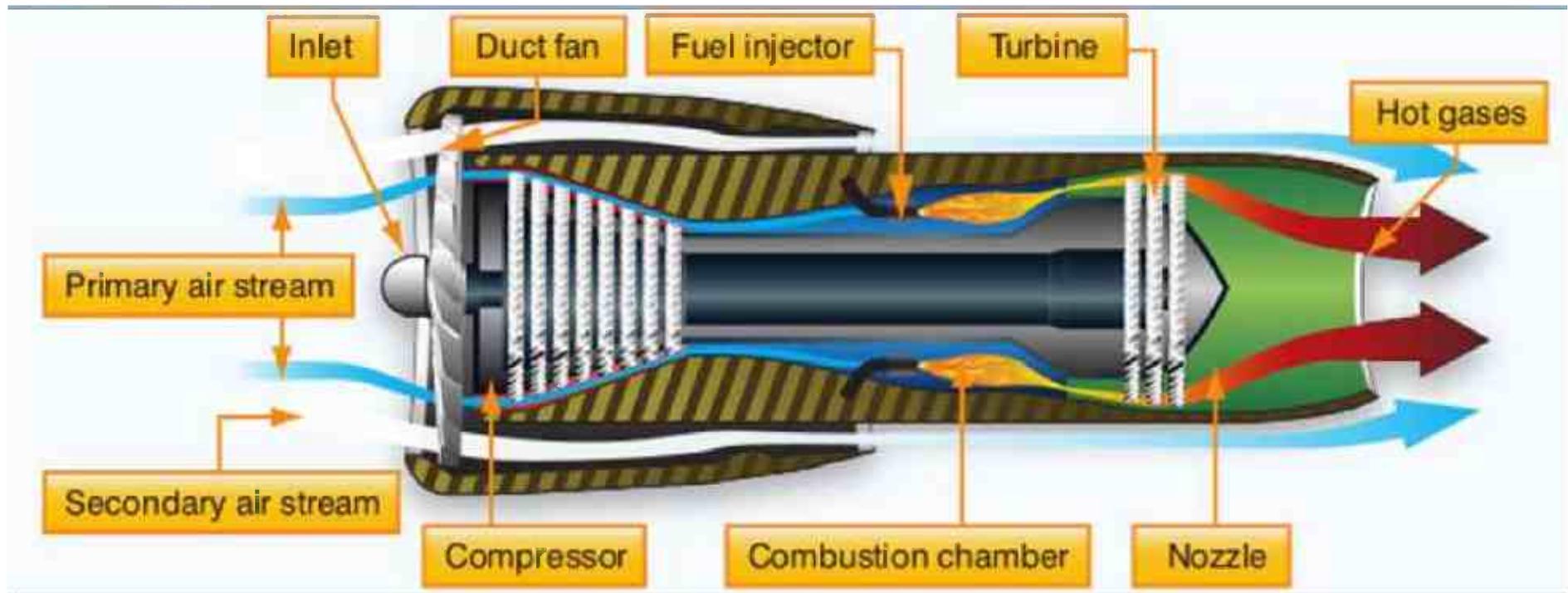


Dans un avion au démarrage ($V = 0$, donc $Q_{\text{tot}} = 0$) $\blacktriangleright V_{\text{avion}} = - (m_{\text{gaz}} \times V_{\text{gaz}}) / m_{\text{avion}}$

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

Turbofan

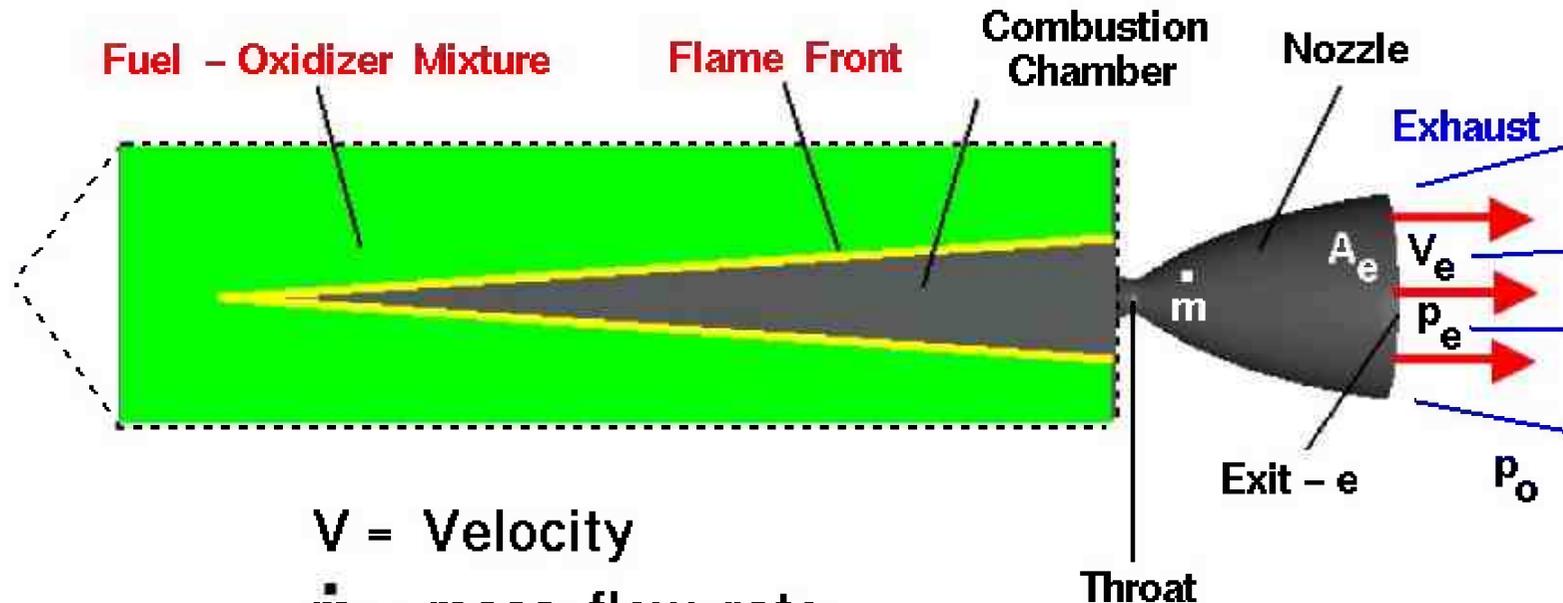


Le moteur fusée à ergol solide (poudre)



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

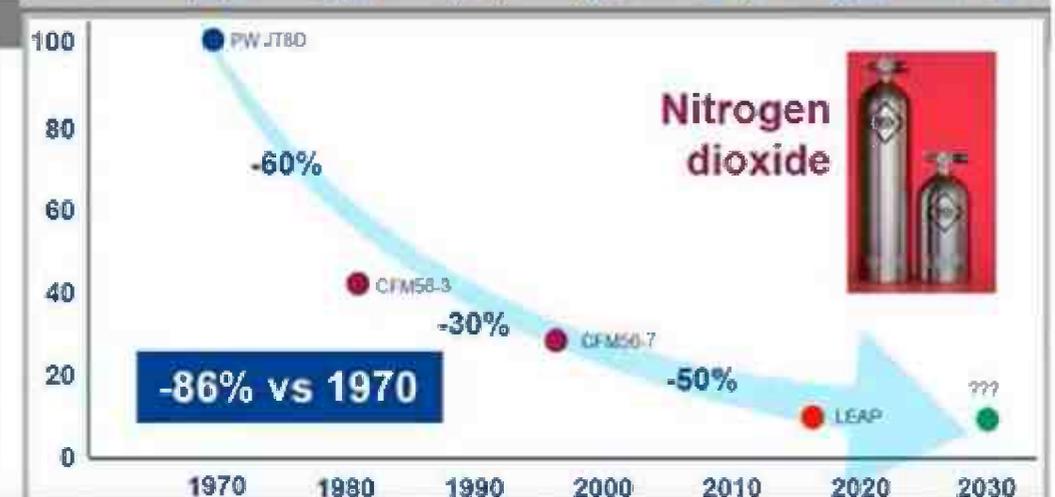
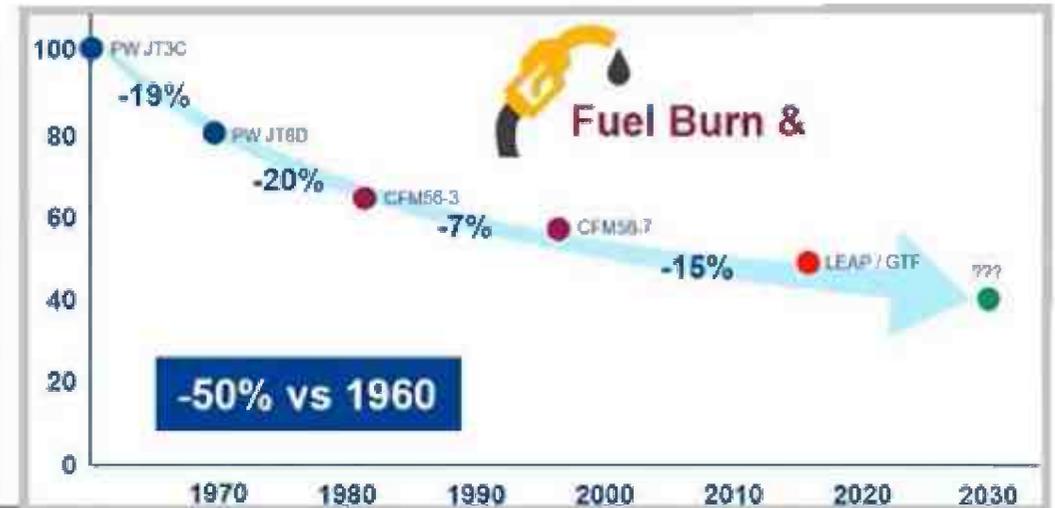
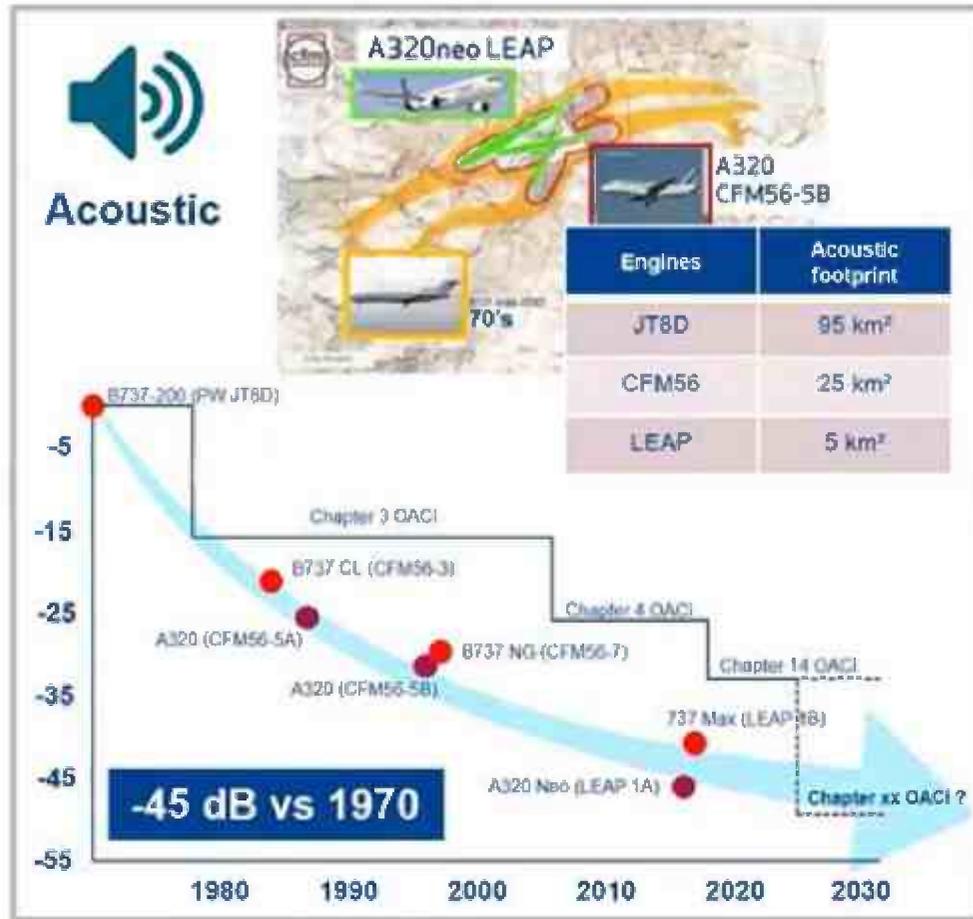
m : débit massique

A_e : aire du flux à la sortie

V_e : vitesse de sortie

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

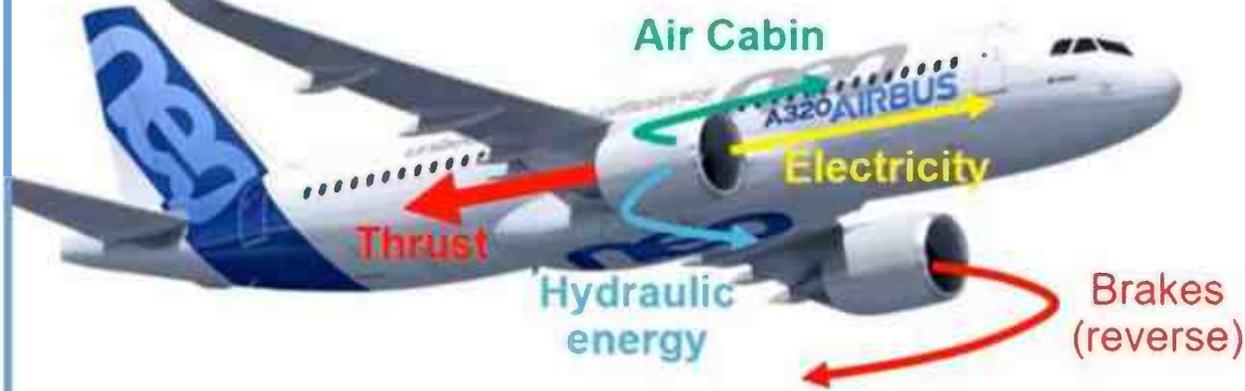
Evolution des moteurs à Réaction



Safran. Jérôme Bonini. Directeur recherche.

<https://www.youtube.com/watch?v=jR6MEzu8AQM>

Principaux Rôles des moteurs et données chiffrées



21 000 000 km

32 320 hp

3,6 kg / 100 hp

50 000 000 km

73400 hp

4 kg / 100 hp

$$P_{\max (\text{hp})} = \text{Thrust}_{(\text{kN})} \times V_{\max (\text{m/s})} / 136$$

200 000 km

100 hp

53725 hp

1,5 kg / 100 hp

100 kg / 100 hp

SAFRAN

Distance parcourue durant la vie d'un moteur
 Nombre de chevaux
 Poids du moteur pour 100 cv

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>