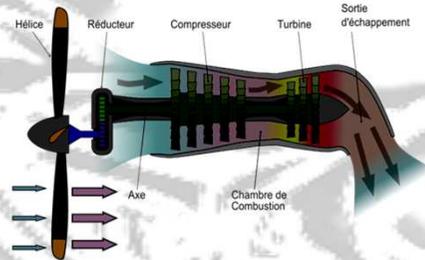
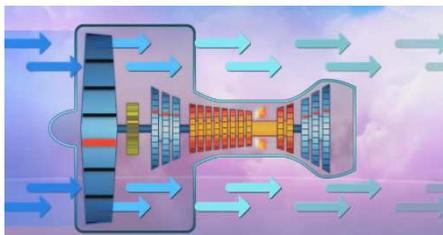




3. Etude des aéronefs et des engins spatiaux

3.2.1 Groupes motopropulseurs



3. Etude des aéronefs et des engins spatiaux

3.2 Les groupes motopropulseurs

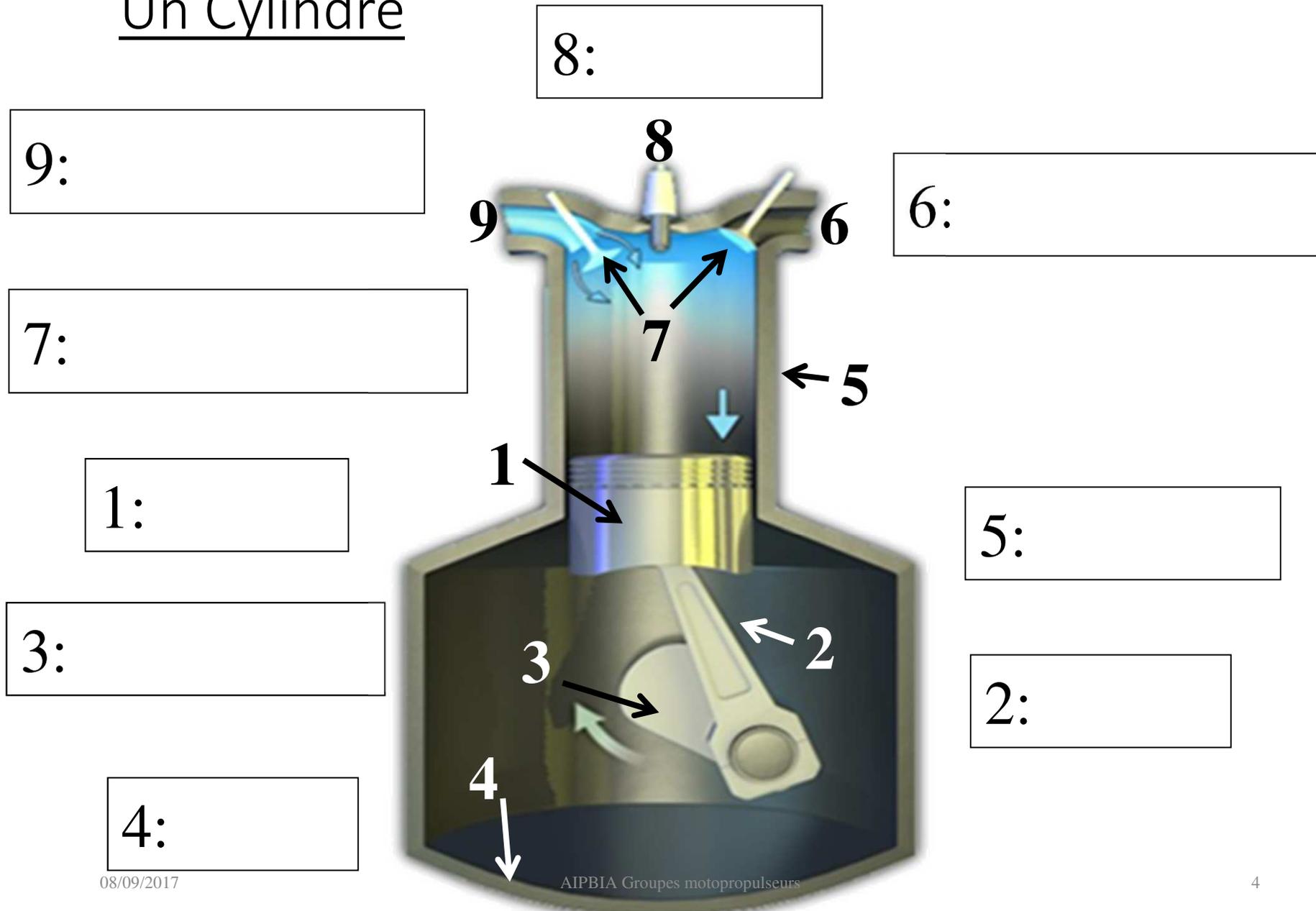
- Moteur à pistons
- Propulseurs à réaction
 - Turboréacteur
 - Statoréacteur
 - Moteur fusées
- Turbopropulseur et Turbomoteurs
- Motorisation électrique

Groupes motopropulseurs

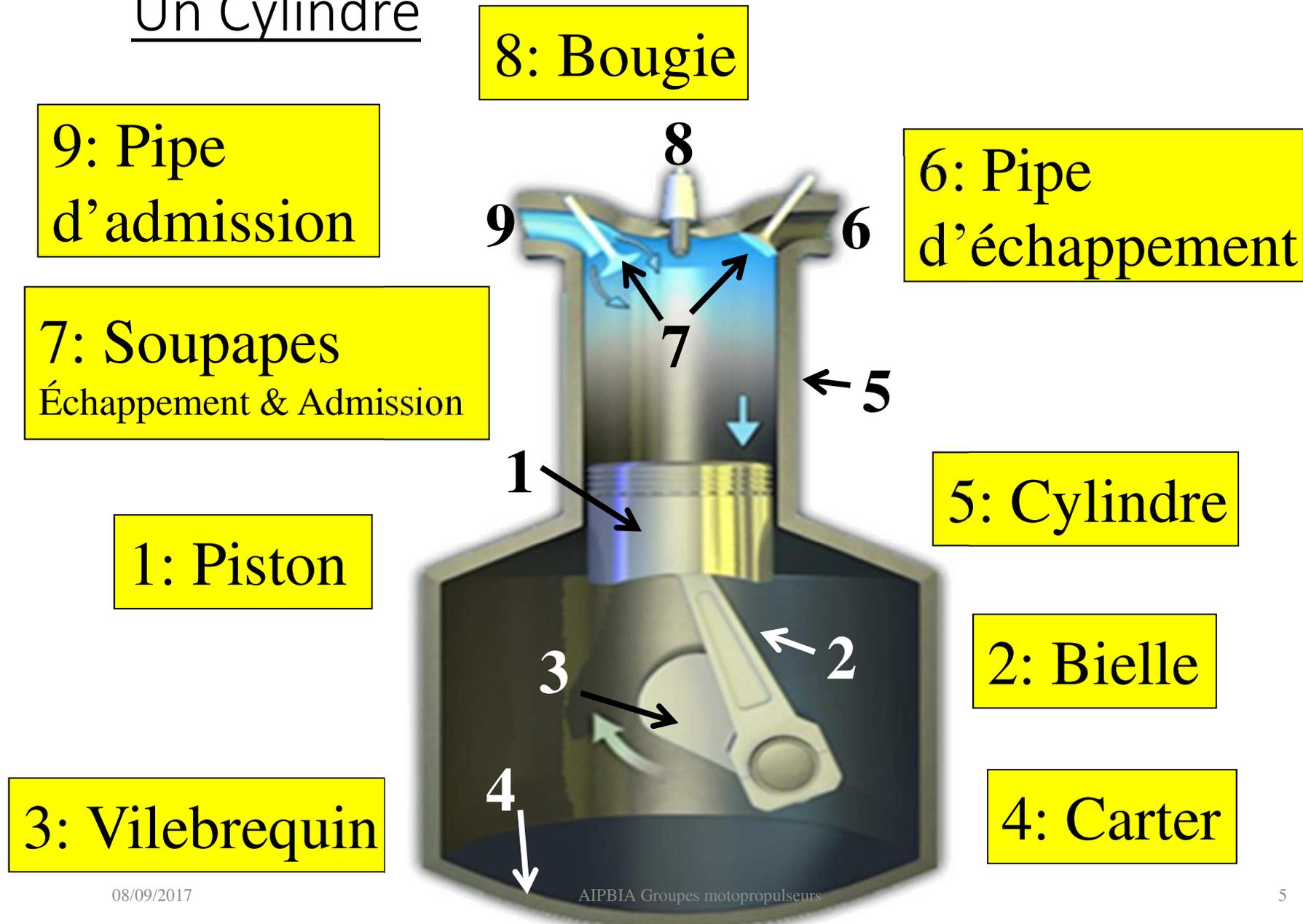
• **Moteurs à Pistons**

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

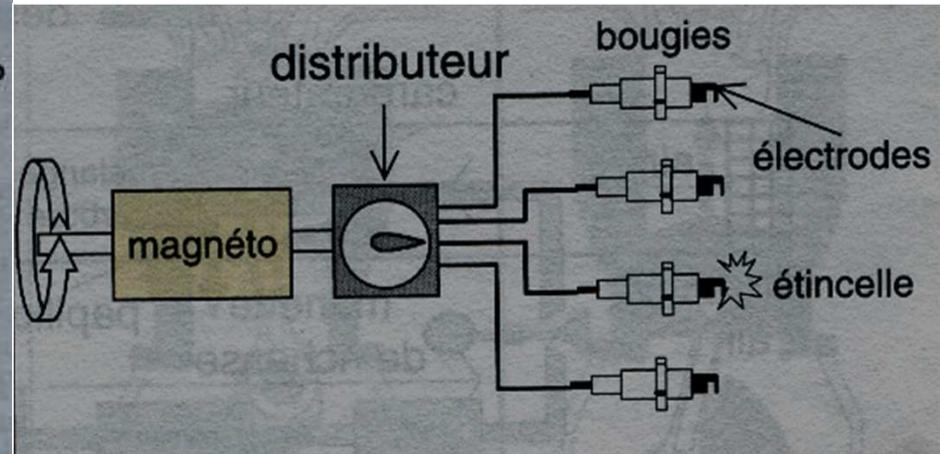
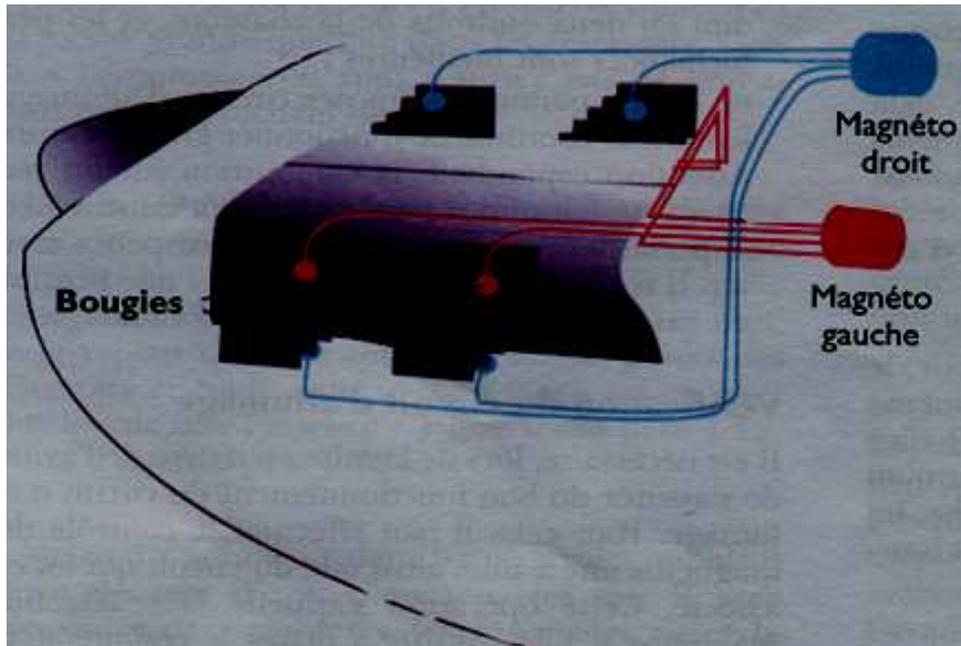
Principe du moteur à explosion Un Cylindre



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



Évacuation des gaz brûlés dans l'échappement

Échappement

Compression

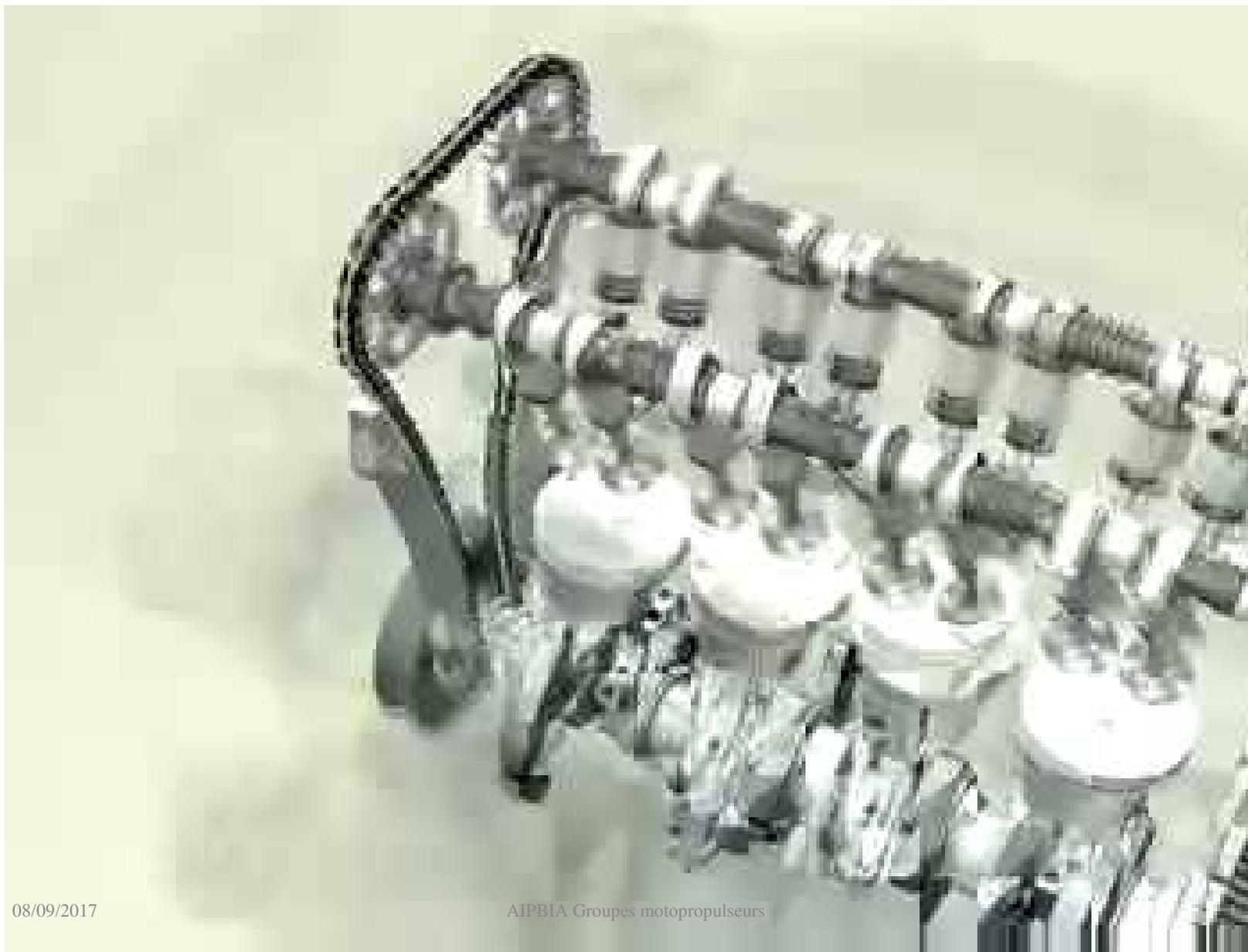
Remontée du piston comprimant le mélange dans la chambre de combustion



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

Combustion / détente

Cycle moteur 4 Temps



08/09/2017

AIPBIA Groupes motopropulseurs

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



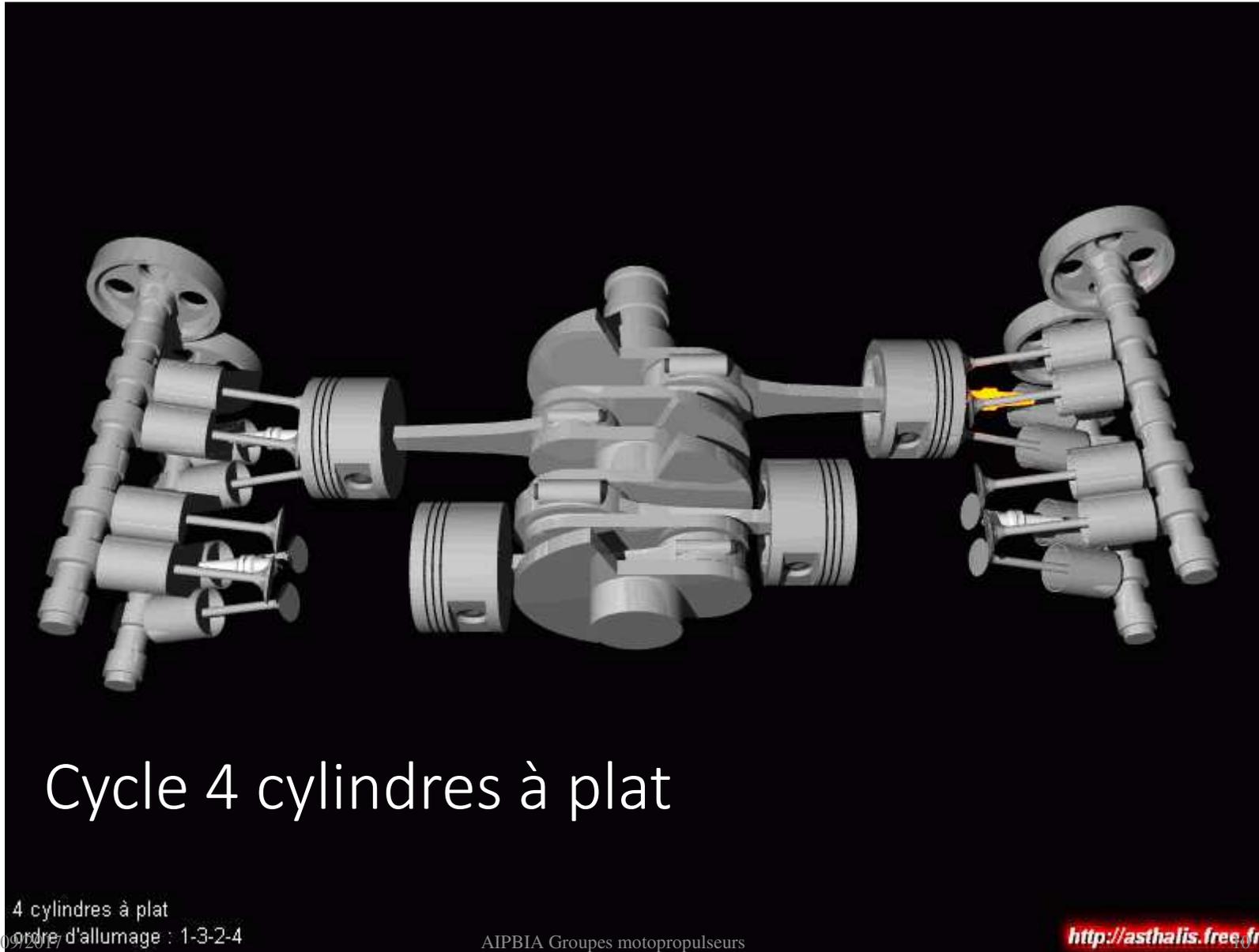
En Etoile



A Plat



Principe du moteur à explosion



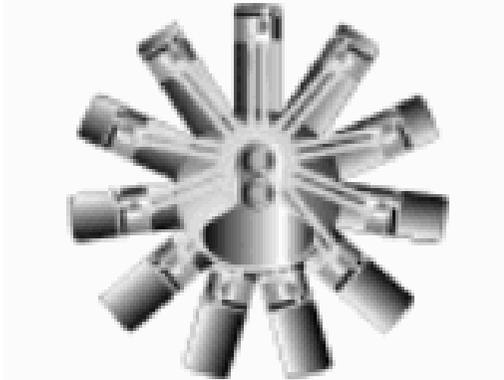
Cycle 4 cylindres à plat

4 cylindres à plat
ordre d'allumage : 1-3-2-4

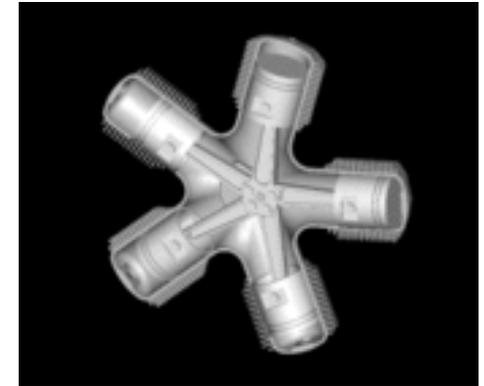
AIPBIA Groupes motopropulseurs

<http://asthalis.free.fr>

Principe du moteur à explosion



Moteur à explosion En Etoile



Le plus puissant
construit en série
est le
Pratt_&_Whitney
Cyclone R-4360.
21 à 28 cylindres
en quadruples
étoile de **4 300 ch**



08/09/2017

AIPBIA Groupes motopropulseurs

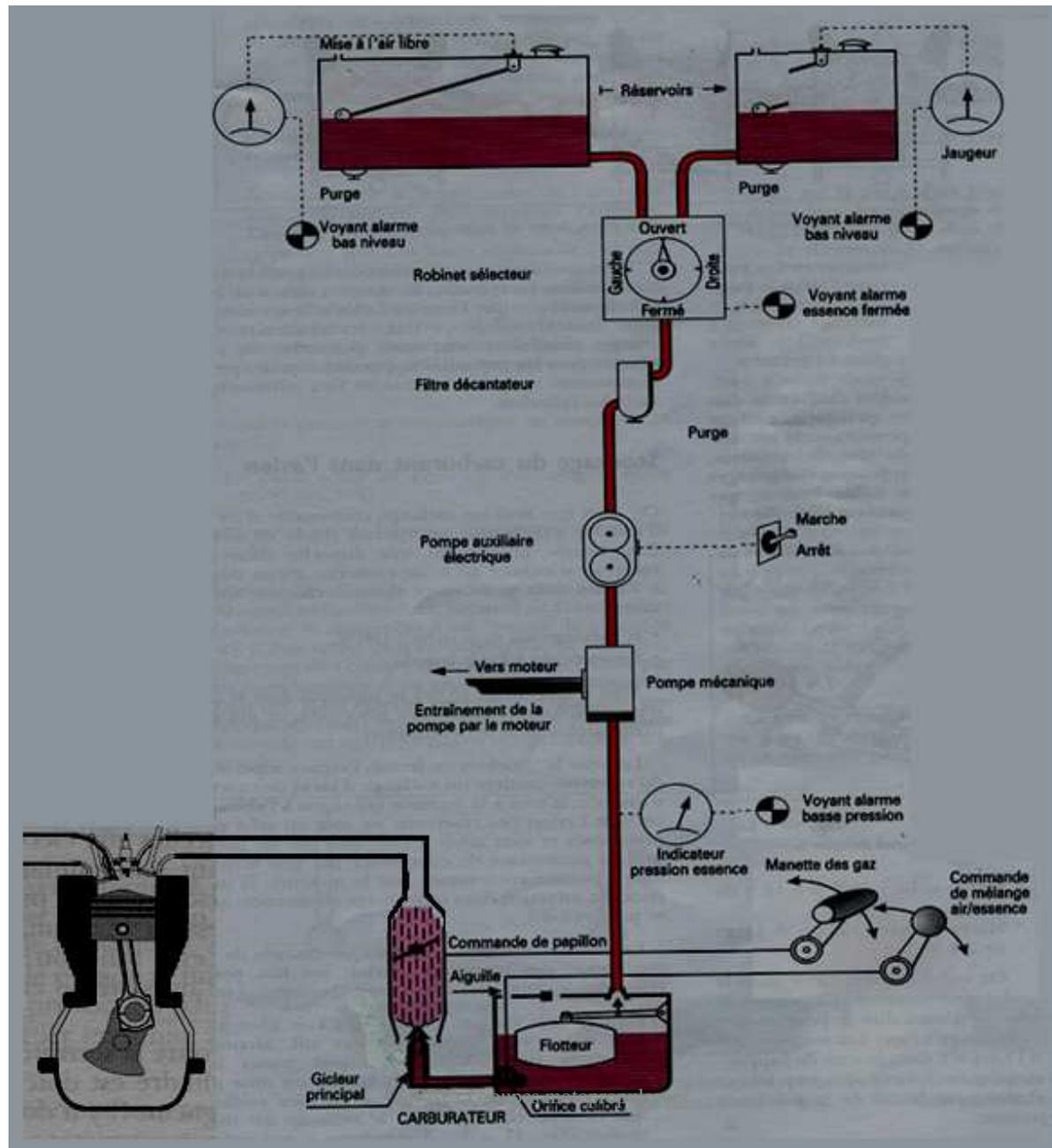
11

Groupes motopropulseurs

- **Moteurs à Pistons**

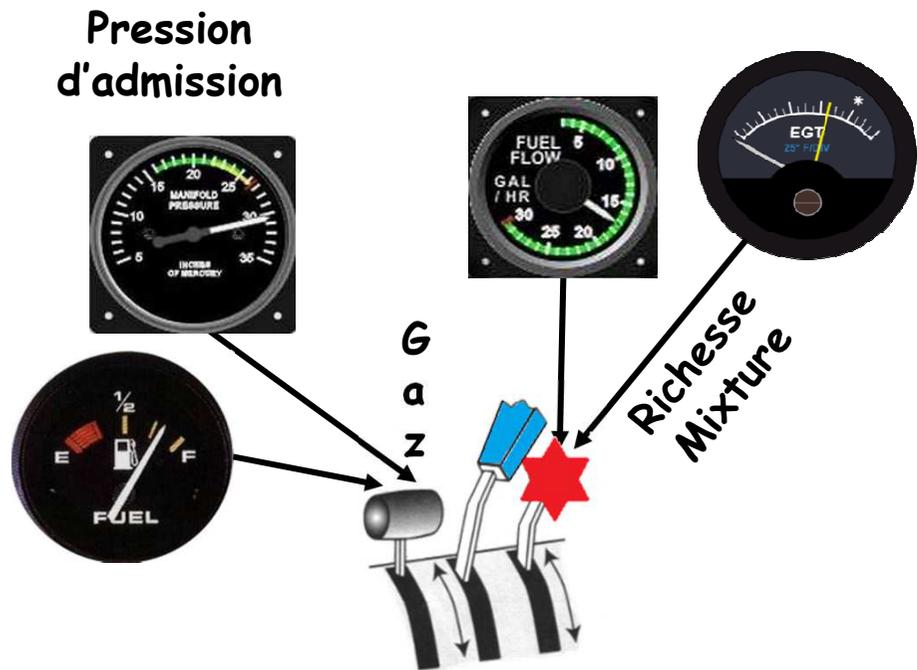
- Principe du moteur à explosion
- Carburateur ou injection
- Les essences
- Performances et utilisation
- Contrôle du fonctionnement

Circuit carburant



Carburateur

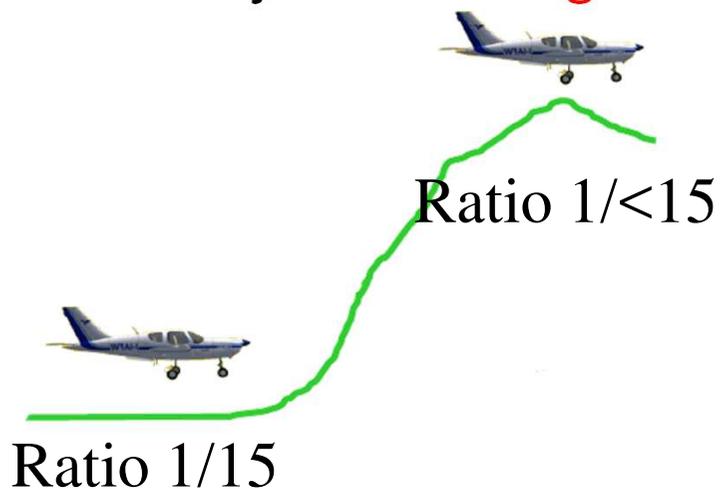
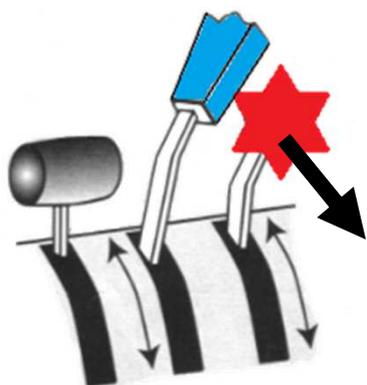
- La manette de richesse permet de régler les proportions du mélange air-carburant (= richesse).



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

Carburant

- Le bon ratio **Essence/Air** est de **1 gr** d'essence pour **15gr** 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**

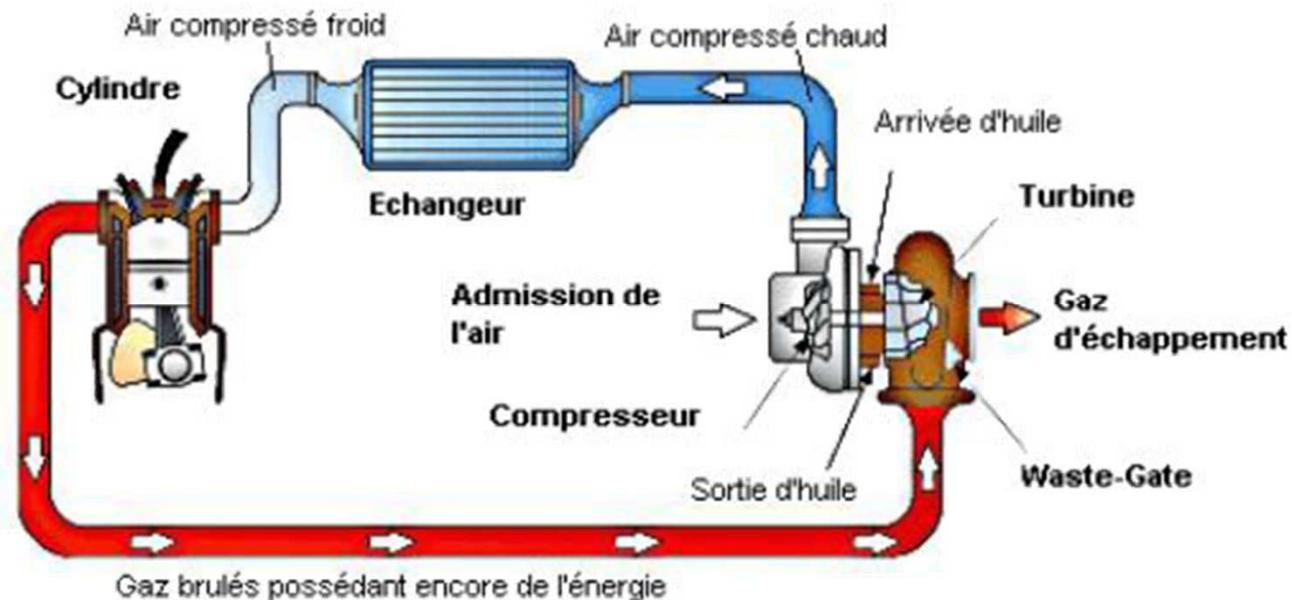


Le mélange est en richesse maximale dans les phases de décollage et d'atterrissage.

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

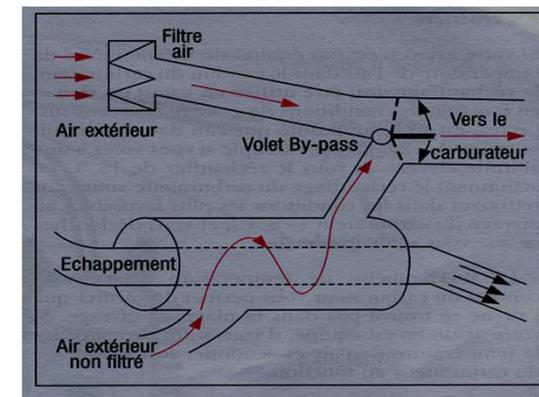
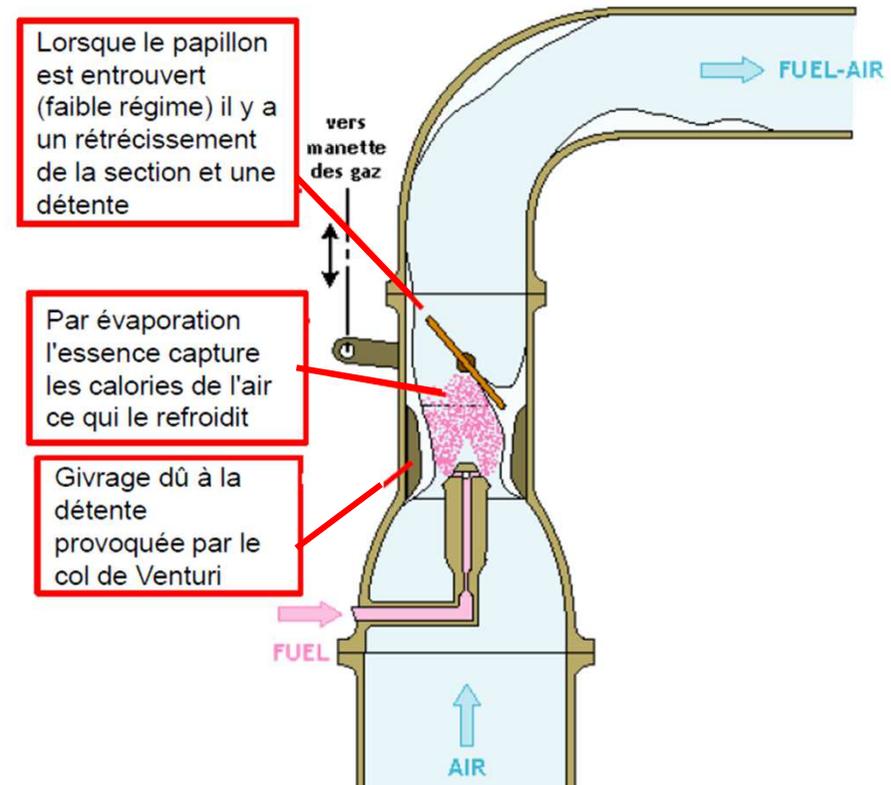


Carburateur. Givrage carburateur

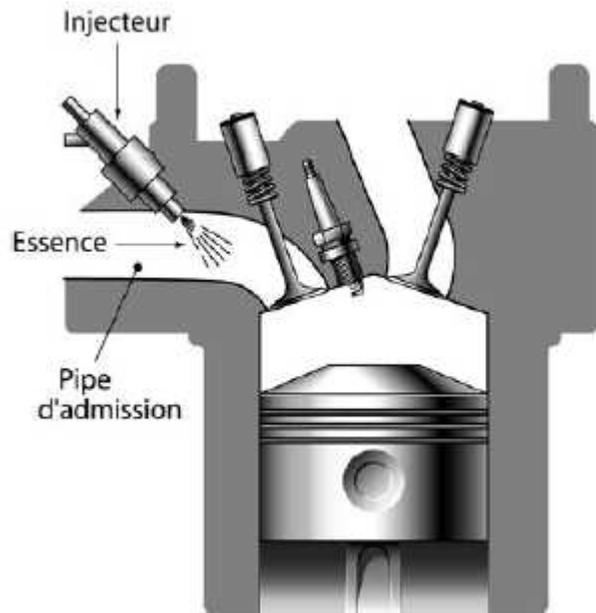
- Le mélange air-carburant contient de l'humidité => risque de givrage dans le carburateur.
- Pour un moteur avec une hélice à calage fixe, un givrage carburateur diminue le régime moteur



- Prévention:
 - Utilisation de la réchauffe carburateur



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.

Groupes motopropulseurs

- **Moteurs à Pistons**
 - Principe du moteur à explosion
 - Carburation 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 grades :

–80/87 : **Rose** (aviation)

–100LL: **Bleue** (aviation)

–100/130 : **Verte** (aviation)

–115/145 : **Violette**

–sans plomb: **Blanche**

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
- Carburation 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.

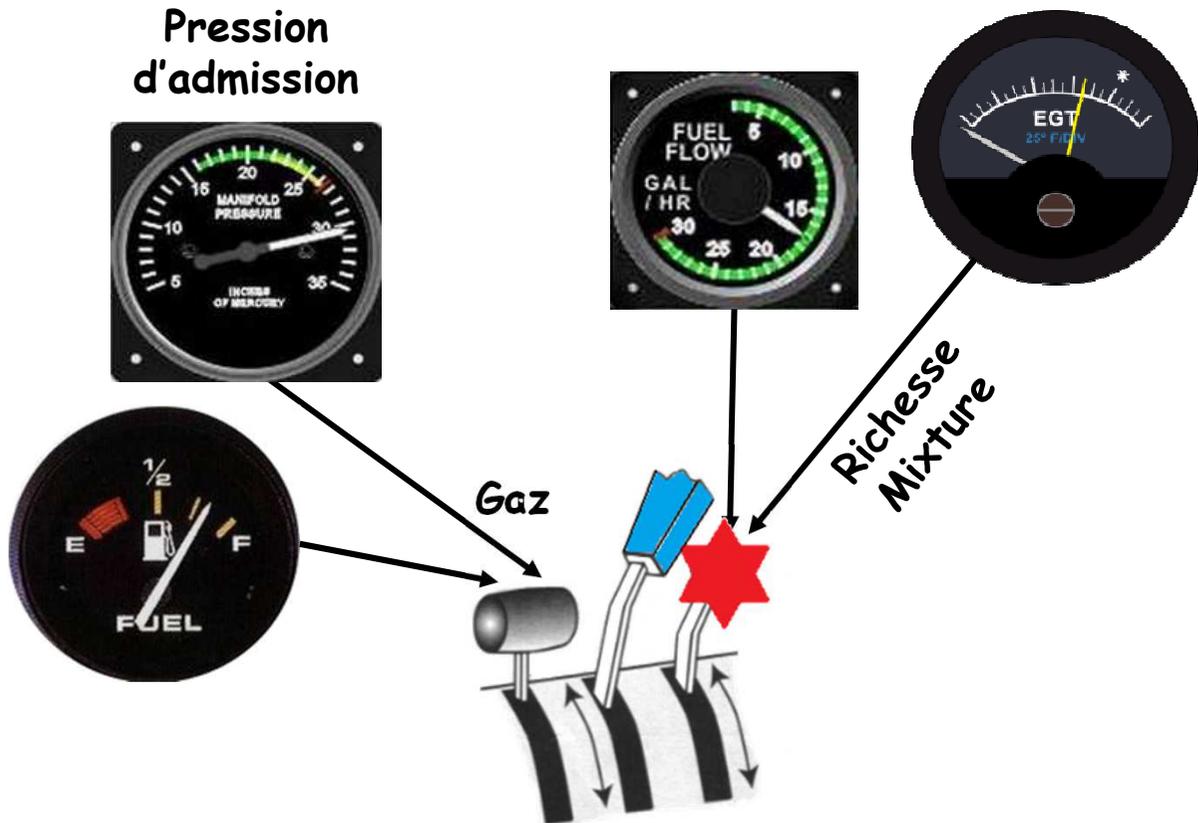
Groupes motopropulseurs

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

Moteurs à pistons: Contrôle en vol



Huile moteur, carburant, Charge



3. Etude des aéronefs et des engins spatiaux

3.2 Les groupes motopropulseurs

- Moteur à pistons

- Propulseurs à réaction

- Turboréacteur

- Statoréacteur

- Moteur fusées

- Turbopropulseur et Turbomoteurs

- Motorisation électrique

Groupes motopropulseurs

- **Propulseurs à réaction**

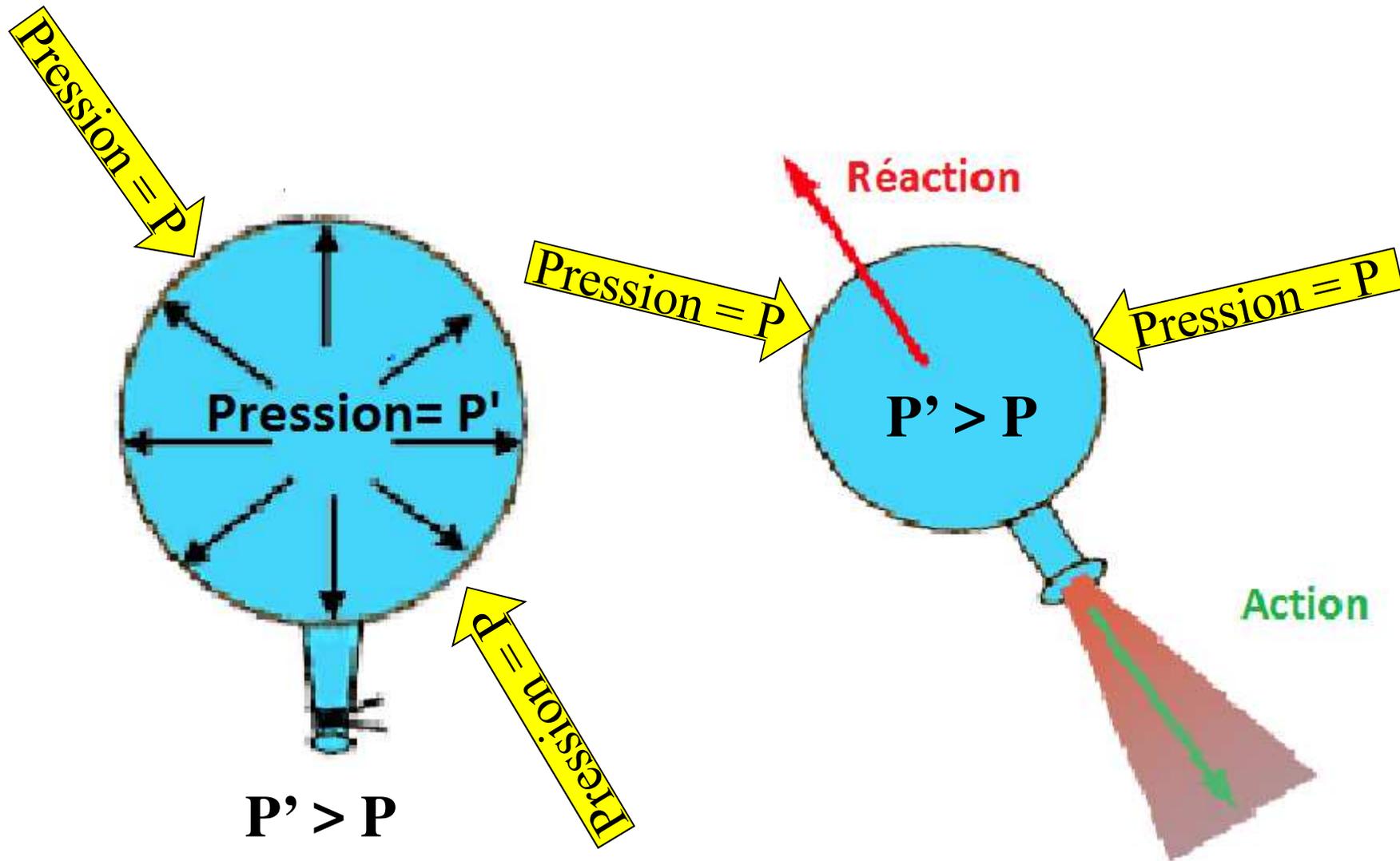
- Principes de la propulsion à réaction

- Turboréacteurs

- Statoréacteurs

- Moteur fusée

Principe de la propulsion par réaction



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.

Groupes motopropulseurs

- **Propulseurs à réaction**

- Principes de la propulsion à réaction

- **Turboréacteurs**

- Constitution

- Compresseur

- Chambre de combustion

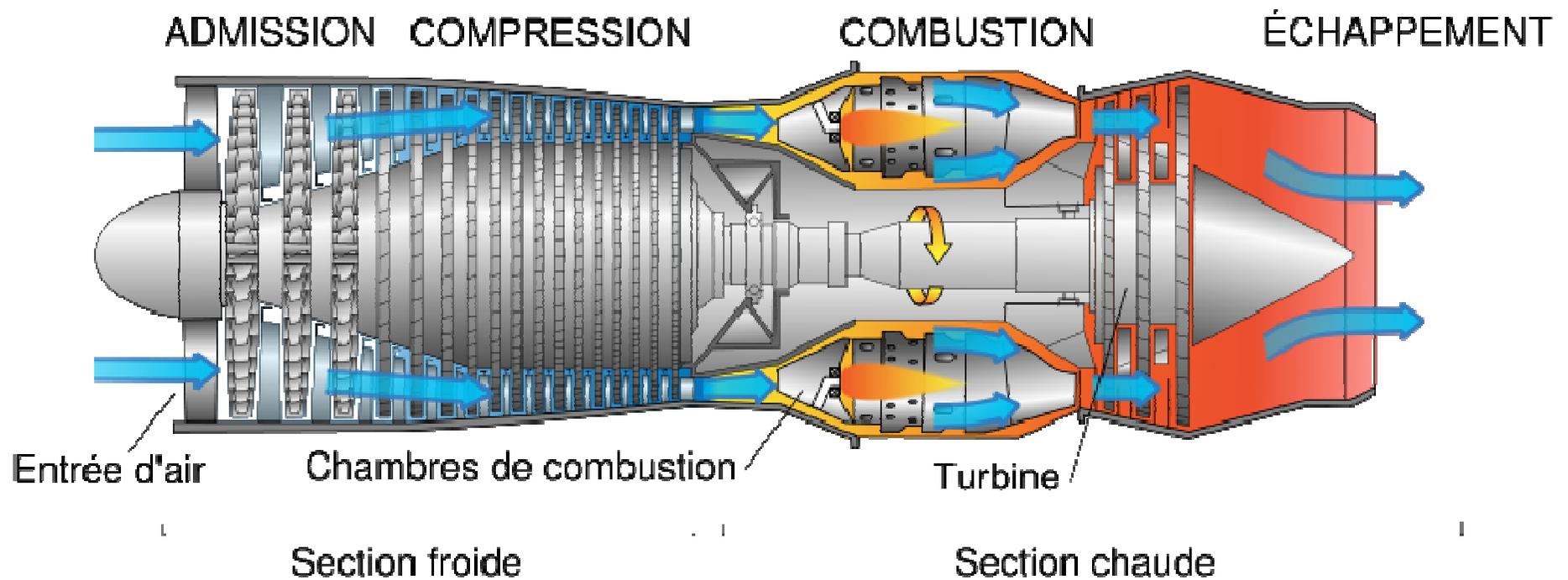
- Turbine

- Double flux

- Statoréacteurs

- Moteur fusée

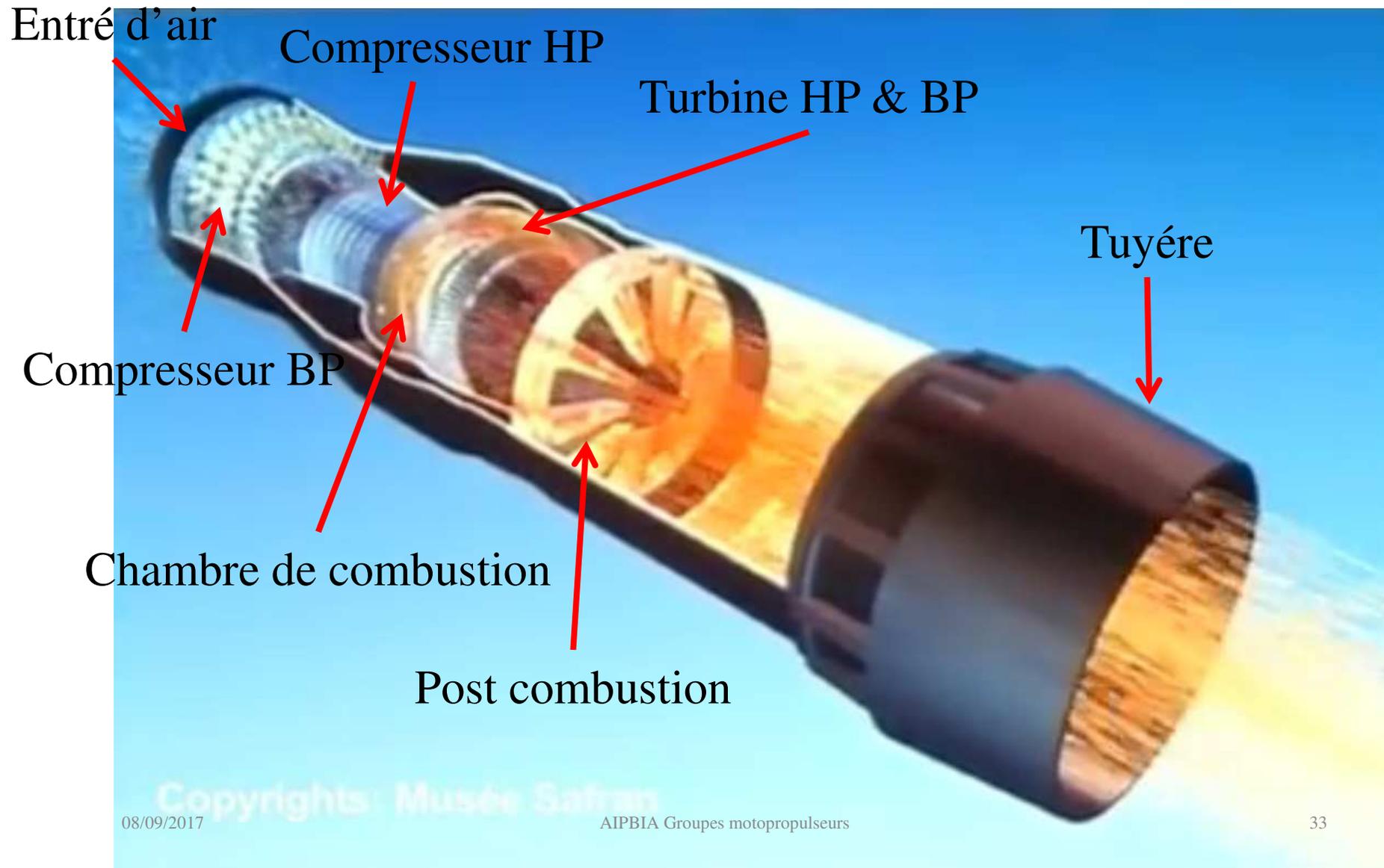
Constitution d'un turboréacteur



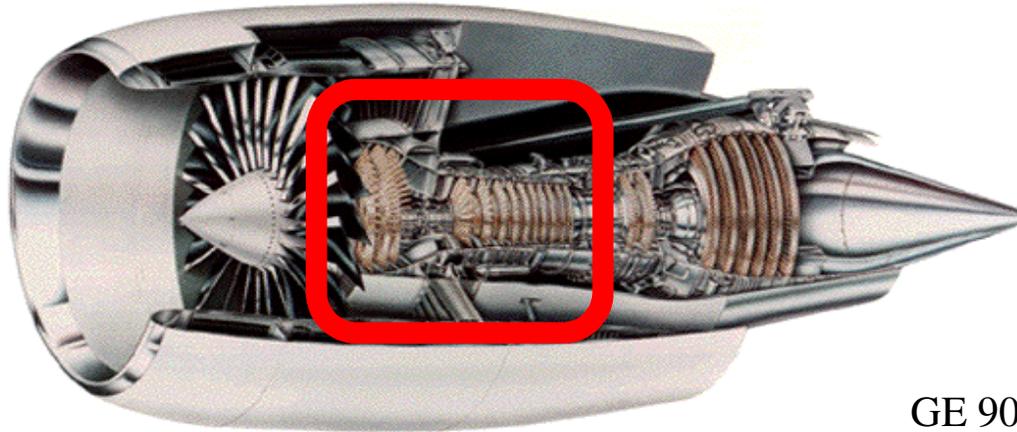
Jeff Dahl, Traduit par Berrucomons

Réacteur simple corps simple flux

Constitution d'un turboréacteur



Turboréacteur: Le Compresseur



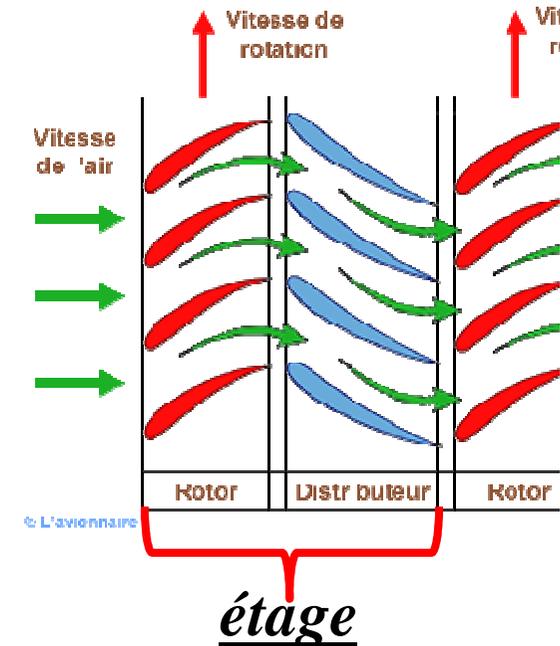
GE 90



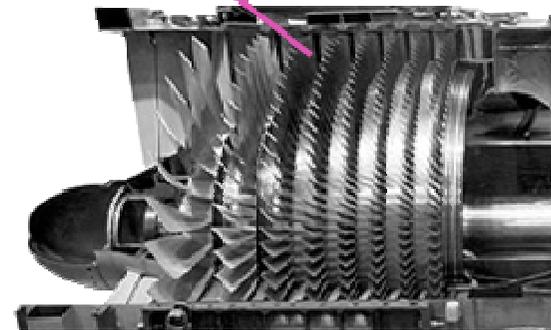
- **Role:**
 - **Aspirer et comprimer l'air** pour l'amener à des vitesse, pression et température optimales à l'entrée de la chambre de combustion.

Compresseur d'un turboréacteur

- Un ensemble d'une roue mobile suivie d'une roue fixe = 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.

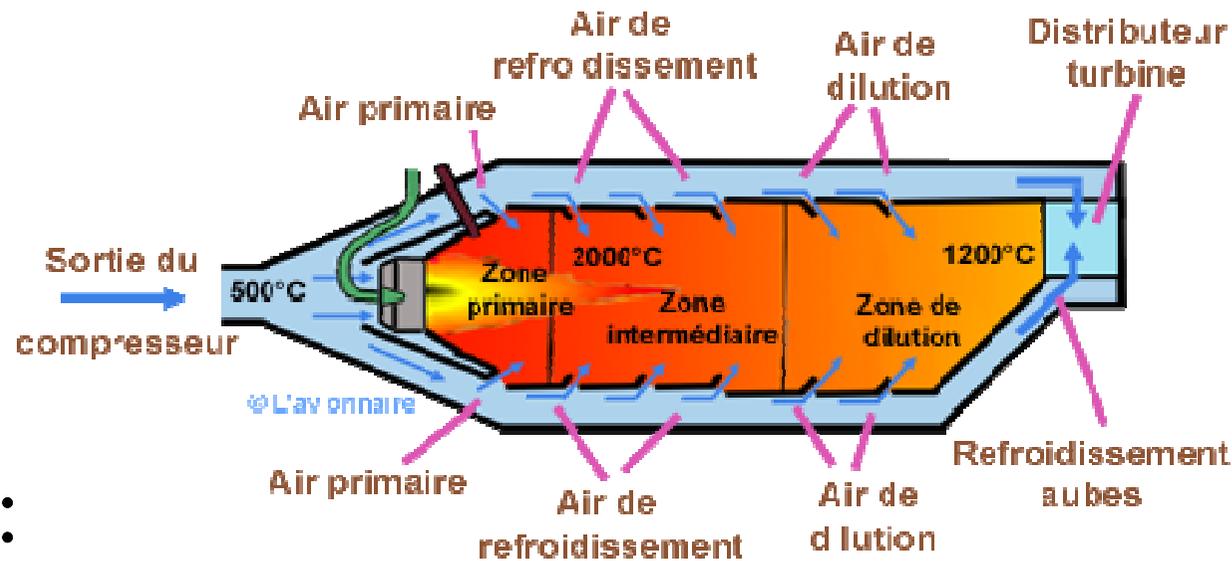


Compresseur à 8 étages



Source Wikimedia Commons/ Photo Sanjay Acharya

Turboréacteur: Chambre de combustion



- Role:

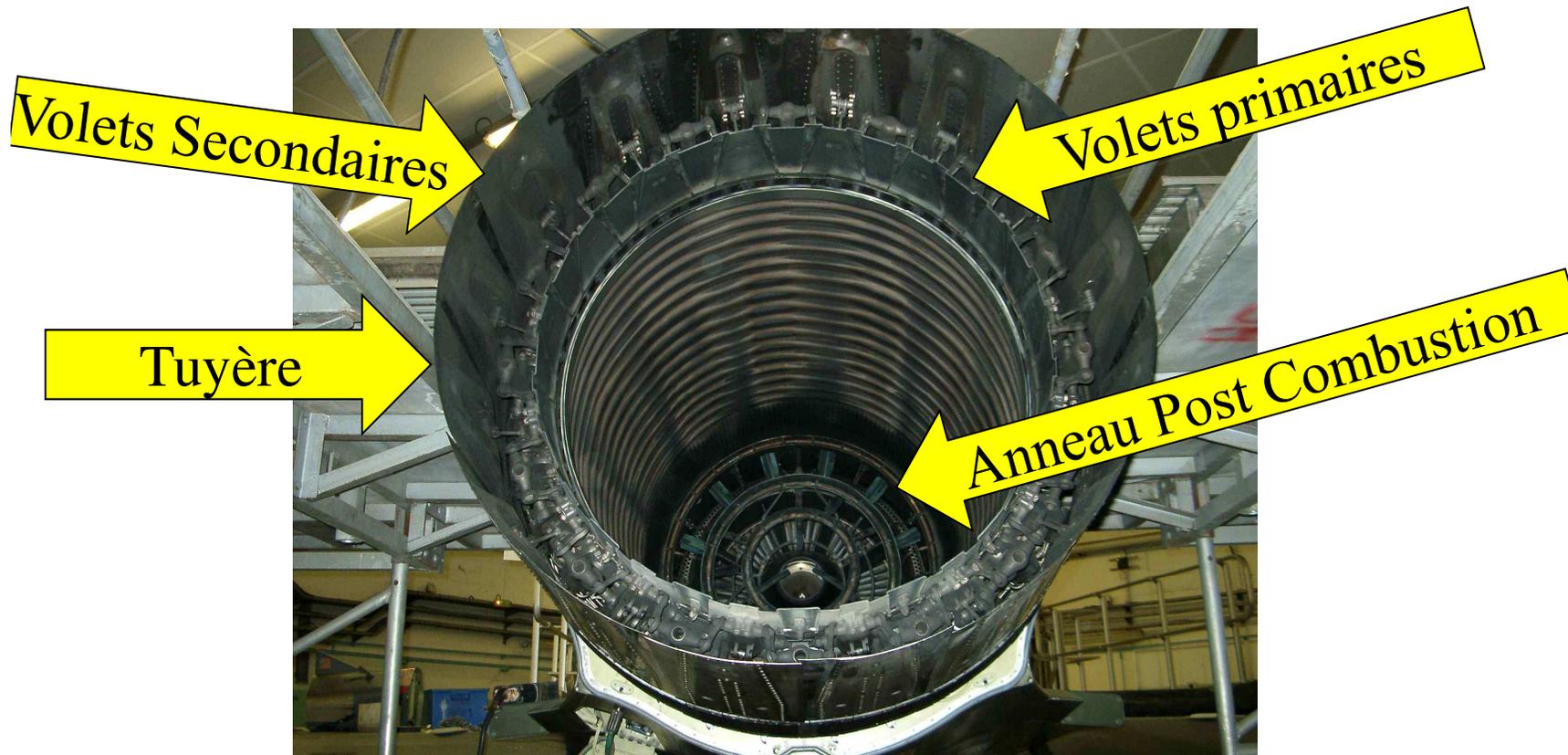
- **Chauffer l'air** qui sort du dernier étage du compresseur HP afin de lui **apporter l'énergie nécessaire** pour ensuite mouvoir la turbine et donner suffisamment de poussée en sortie de tuyère

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.

Tuyère avec anneau de post combustion turboréacteur



La poussée peut être augmentée par la *post-combustion*.

Avions avec Turboréacteur à post combustion



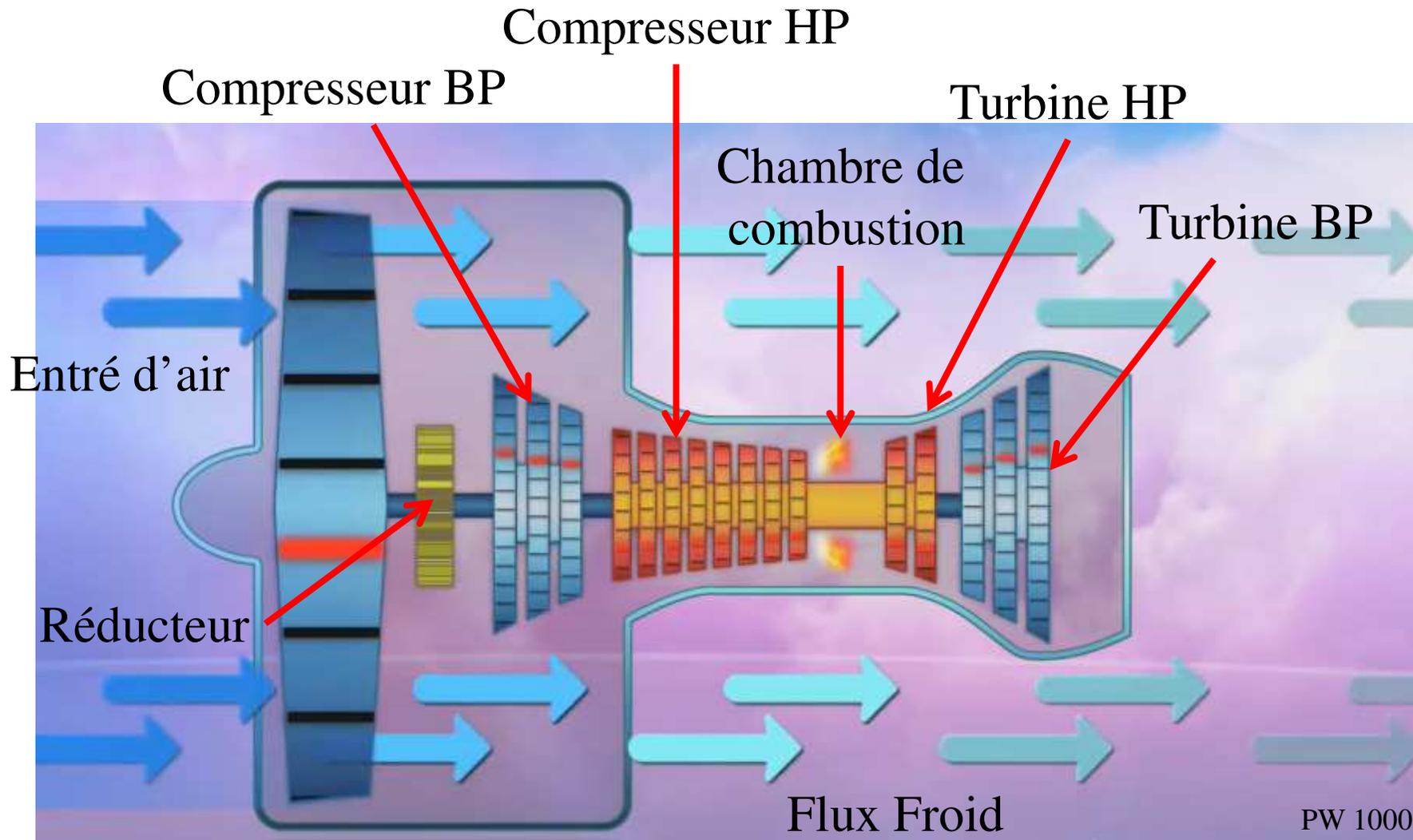
Les moteurs du Rafale et du Concorde sont à post-combustion

Constitution d'un turboréacteur

- 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



Turboréacteur double flux Soufflante ou Fan



**Redresseur
Aubages fixes
flux secondaire**



**Redresseur
Aubages fixes
flux primaire**

Source : Pilote-Virtuel.com/ Photo: Jujug



réacteur double flux

- 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

- Les réacteurs des chasseurs modernes sont 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
- **Consomment beaucoup de kérosène:**
 - 52 kg/min Mirage 2000 avec P.C.
 - 17 000 l/hr pour un 777 au décollage
 - 30 000 l/hr pour le J58 du SR-71 Blackbird
 - 500 l/minute

Les turboréacteurs

Performances et utilisation

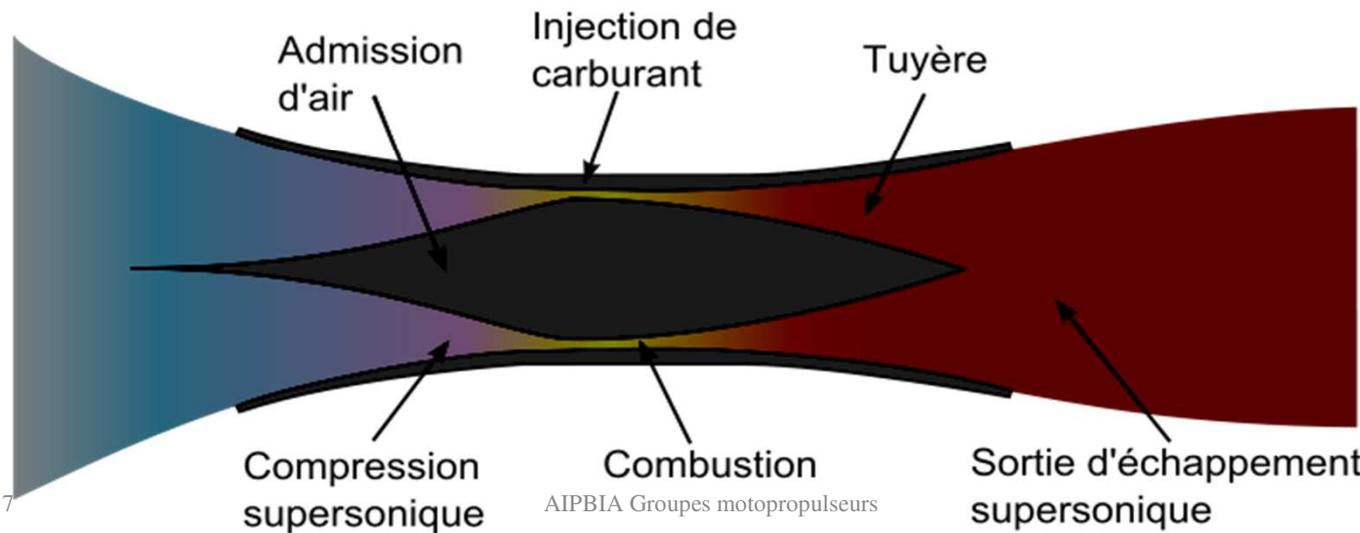
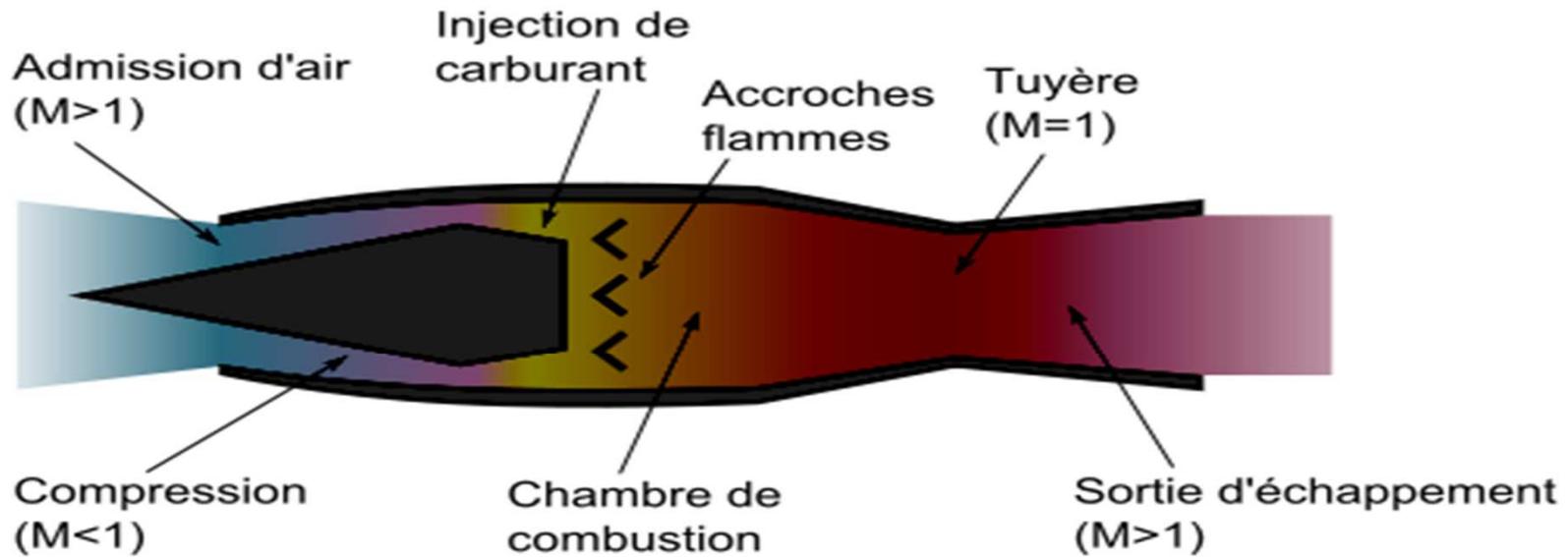
- **Utilisés pour la propulsion des avions de:**
 - Ligne long et moyens courriers.
 - D'affaire.
 - D'usage Militaire
- **Leur part progresse avec les progrès techniques récents.**
- **L'augmentation du taux de dilution diminue le bruit et la consommation de carburant.**

Groupes motopropulseurs

- **Propulseurs à réaction**

- Principes de la propulsion à réaction
- Turboréacteurs
- Statoréacteurs
- Moteur fusée

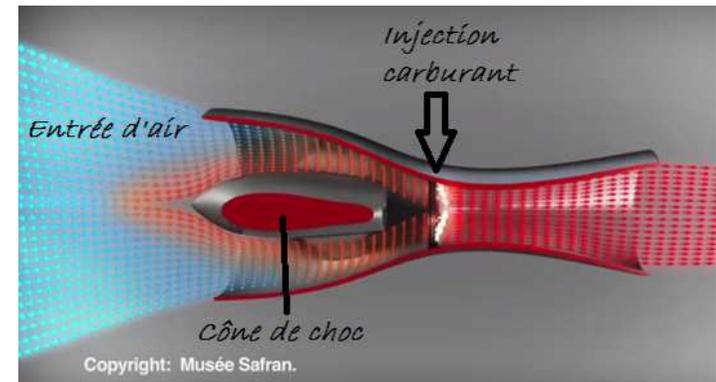
Constitution d'un Statoréacteur (Ramjet) & Super Statoréacteur (Scramjet)



Constitution d'un Statoréacteur (Ramjet)

Réacteur sans turbine ni compresseur composé de:

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



- Le statoréacteur nécessite une vitesse d'environ **300 kms/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 SUPERSTATORÉACTEUR (scramjet)

- Vitesse de l'air à l'entrée de la chambre de combustion:

- Supersonique.



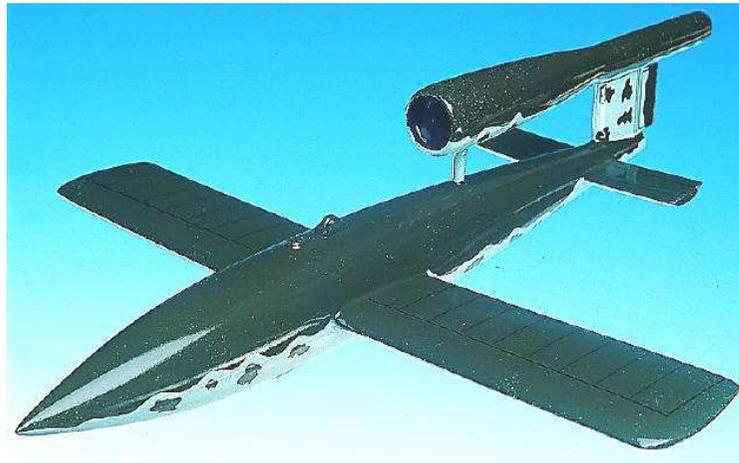
- Très difficile à mettre au point.
 - maîtrise de la combustion du carburant à des vitesses supersoniques
 - matériaux capables de résister à la chaleur et aux contraintes mécaniques générées
- Certains sont théoriquement capables d'atteindre Mach 9 et plus.

Constitution d'un Statoréacteur & Super Statoréacteur

- Sans la nécessité d'un premier moteur pour atteindre la vitesse d'amorçage, ils représenteraient la solution idéale pour les avions rapides.
- Leur intérêt est relancé avec les projets de réacteurs à cycles variables.

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.



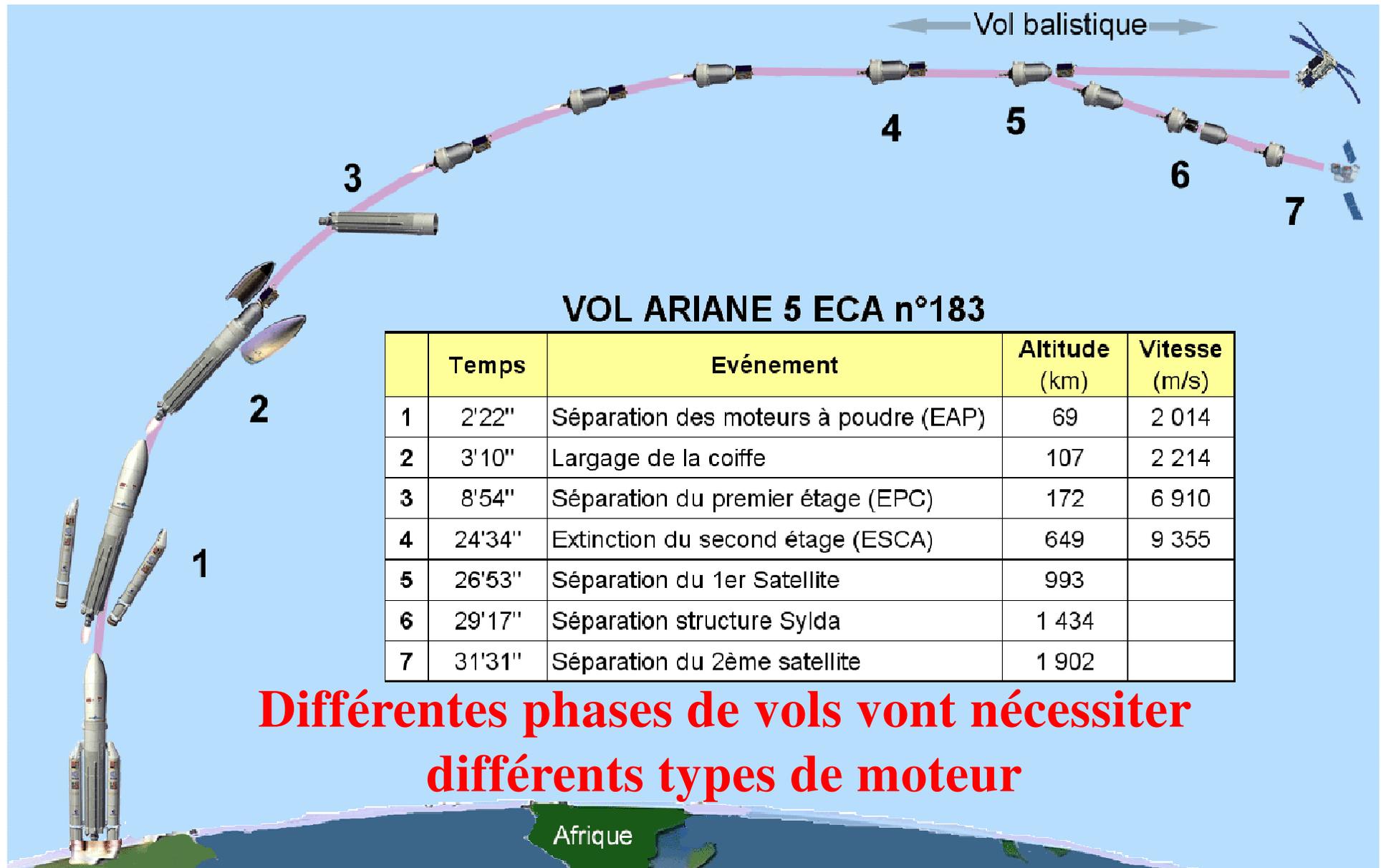
Pendant la seconde guerre mondiale, les allemands utilisèrent des pulsoréacteurs sur les premiers avions sans pilote, les V1. Les Spitfire anglais ne pouvaient les détruire qu'en les touchant du bout de l'aile, ce qui déstabilisait leurs gyroscopes.



Groupes motopropulseurs

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

Schema-lancement-Ariane-5



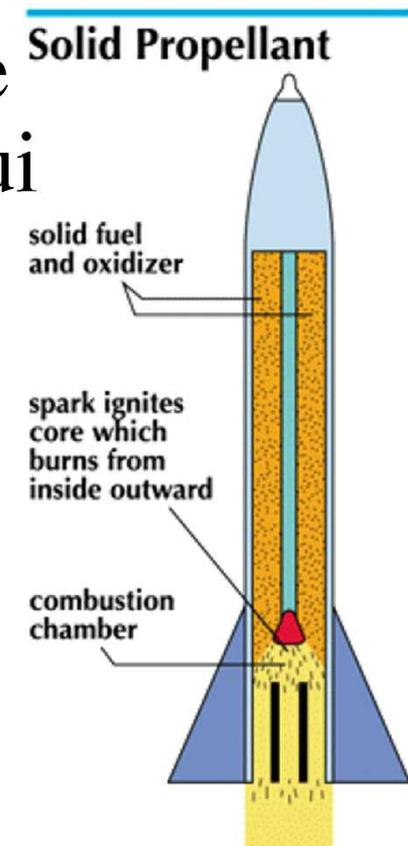
Les moteurs fusées

- La poussée est produite par la réaction entre un carburant et un comburant, appelés ergols.
- Cette réaction produit un gaz sous très haute pression, qui est expulsé par l'intermédiaire d'une tuyère, pour produire la force de poussée.
 - La forme de la tuyère est un élément clé pour la performance du système.
- Le principal inconvénient de ce système:
 - Nécessite une réserve très importante de carburant
 - **Forte poussée produite mais rendement assez faible** (beaucoup de carburant consommé pour une poussée relativement faible).

Les moteurs fusées

Principe et constitution

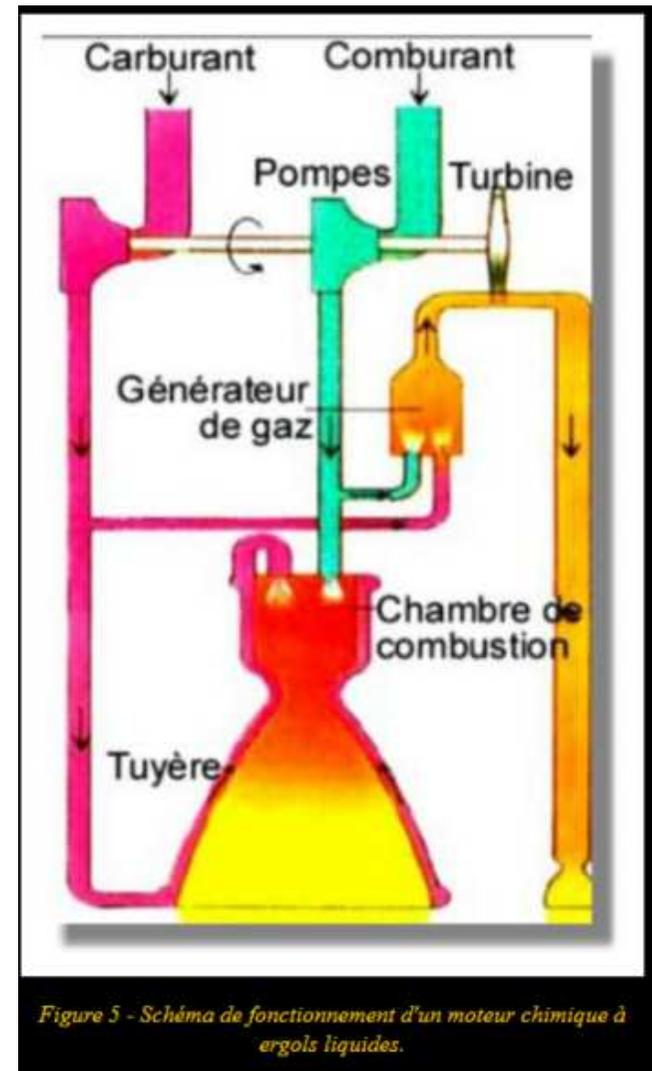
- Moteur à **poudre**:
- Utilisent des **propergols solides**
- La combustion de la poudre fournit une grande quantité de gaz sous pression qui s'échappent alors à très grande vitesse.
- Mise à feu à l'aide d'une cartouche pyrotechnique. C'est la chaleur qui déclenche et entretient la combustion.
- Cette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



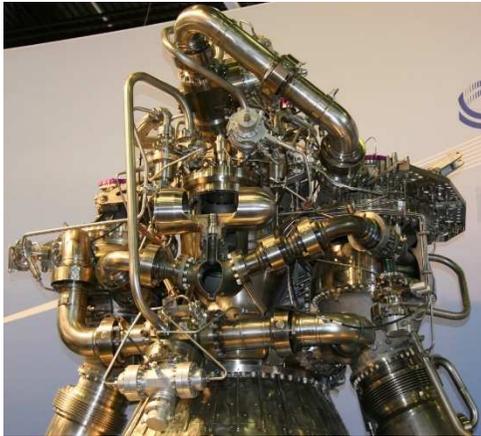
Les moteurs fusées

Principe et constitution

- Moteur à ergols liquides:
- Le couple dihydrogène liquide (LH2) / dioxygène liquide (LOX).
 - C'est l'un des couples les plus efficaces
 - Nécessite des températures de stockage extrêmement basses (-253°C, pour le dihydrogène), et donc des réservoirs imposants.
 - utilisé dans la fusée Ariane 5 et la Navette Spatiale Américaine.
- Le couple dioxygène liquide (LOX) / Kérosène. Il a été utilisé notamment dans la fusée Saturn V, qui a emmené les premiers hommes sur la Lune.
- La combustion amorcée s'auto entretient.



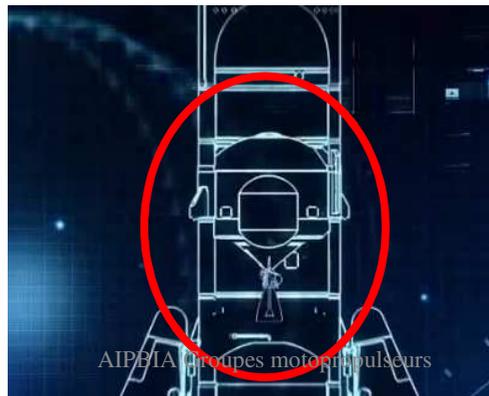
V Les moteurs fusées



Vulcain. Moteur Cryogénique principal d'ARIANE V
135 Tonnes de poussée



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



- Un **avion-fusée** propulsé par un moteur utilisant comme carburant du propergol liquide (ex: le Bell X-15).

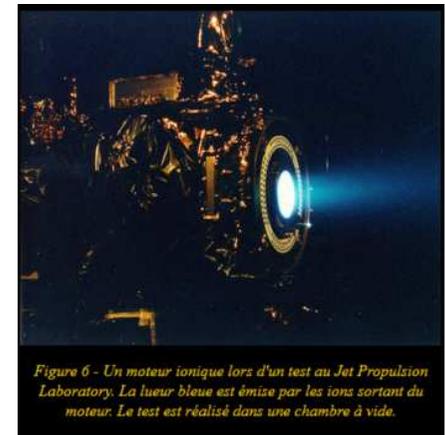


Les moteurs fusées Performances et utilisation

- Ils sont 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: Bell X15)

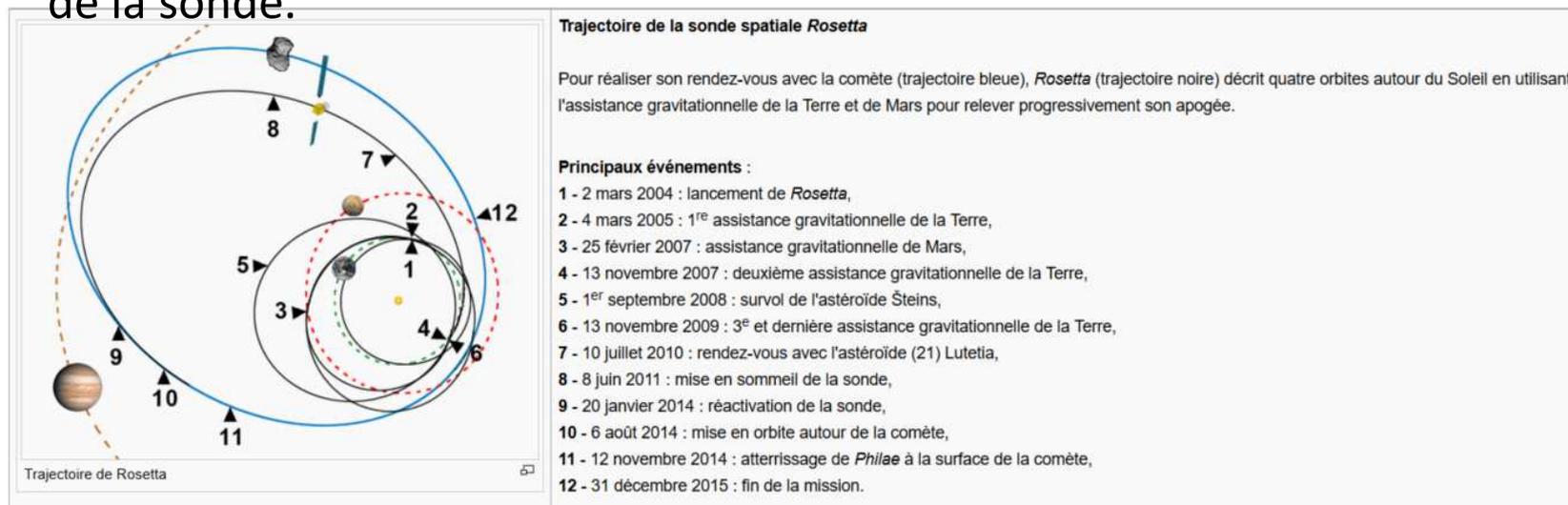
Moteur Ionique

- 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**.



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.**

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.

2008-2011 DEUX ESSAIS TECHNIQUES

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

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.

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.

4 JUIN 2011 L'HIBERNATION

La sonde poursuit sa route, tous instruments éteints.

Sonde ROSETTA

3. Etude des aéronefs et des engins spatiaux

3.2 Les groupes motopropulseurs

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



Source: Snecma/ Photo: Eric Drouin

Les turbopropulseurs

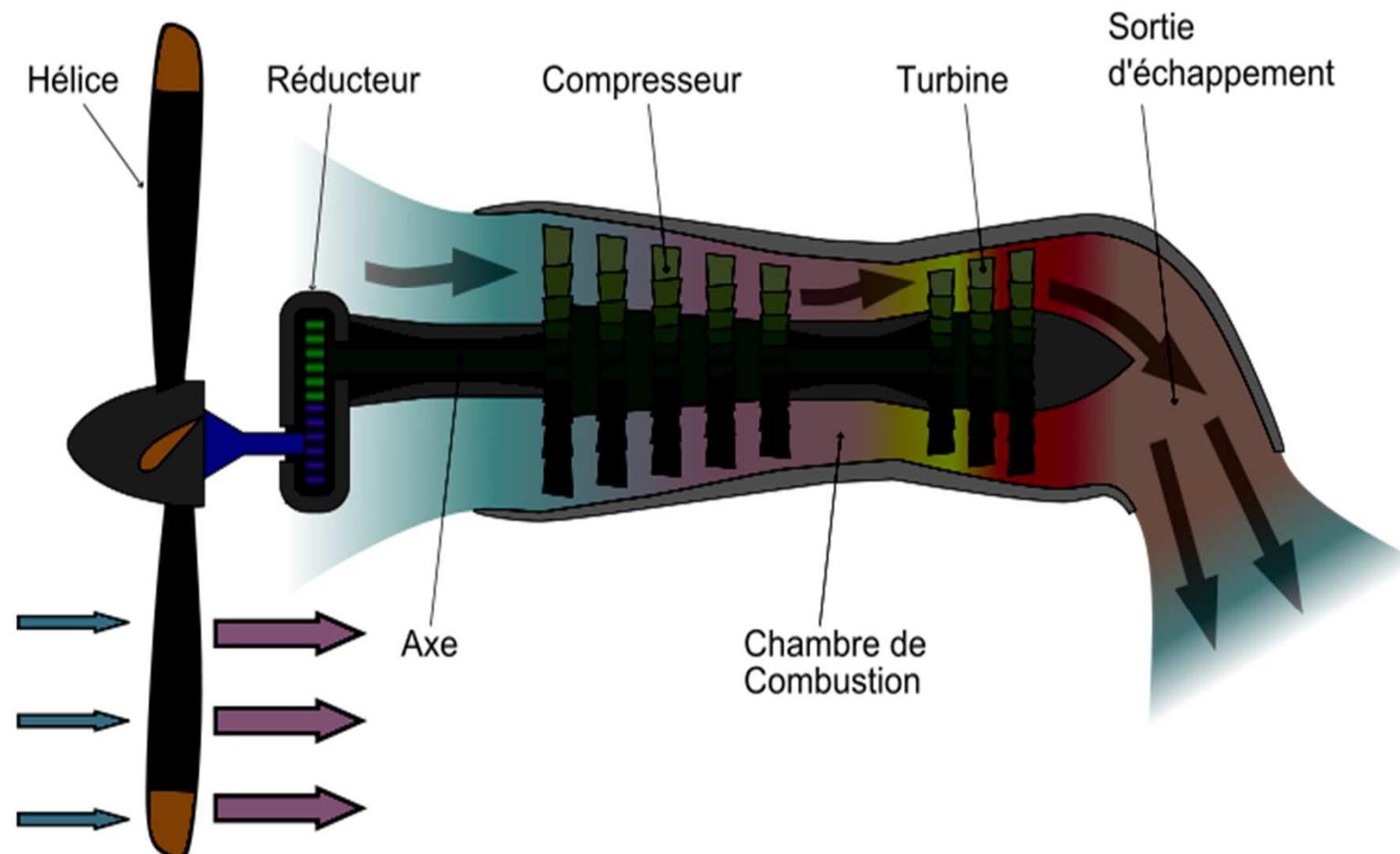
Principe du turbopropulseur

- 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 brûlés ne participent pas à la propulsion.

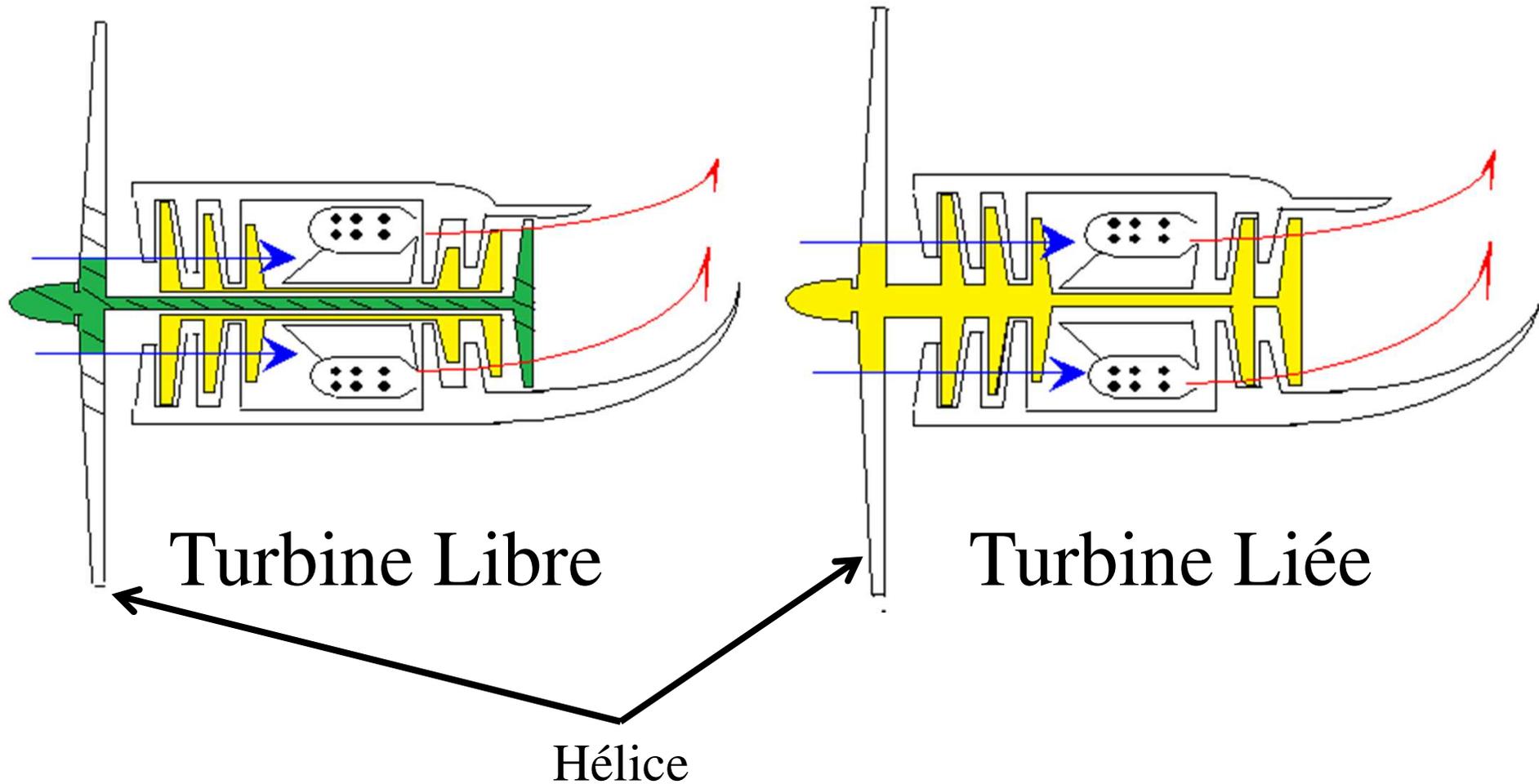


Les turbopropulseurs

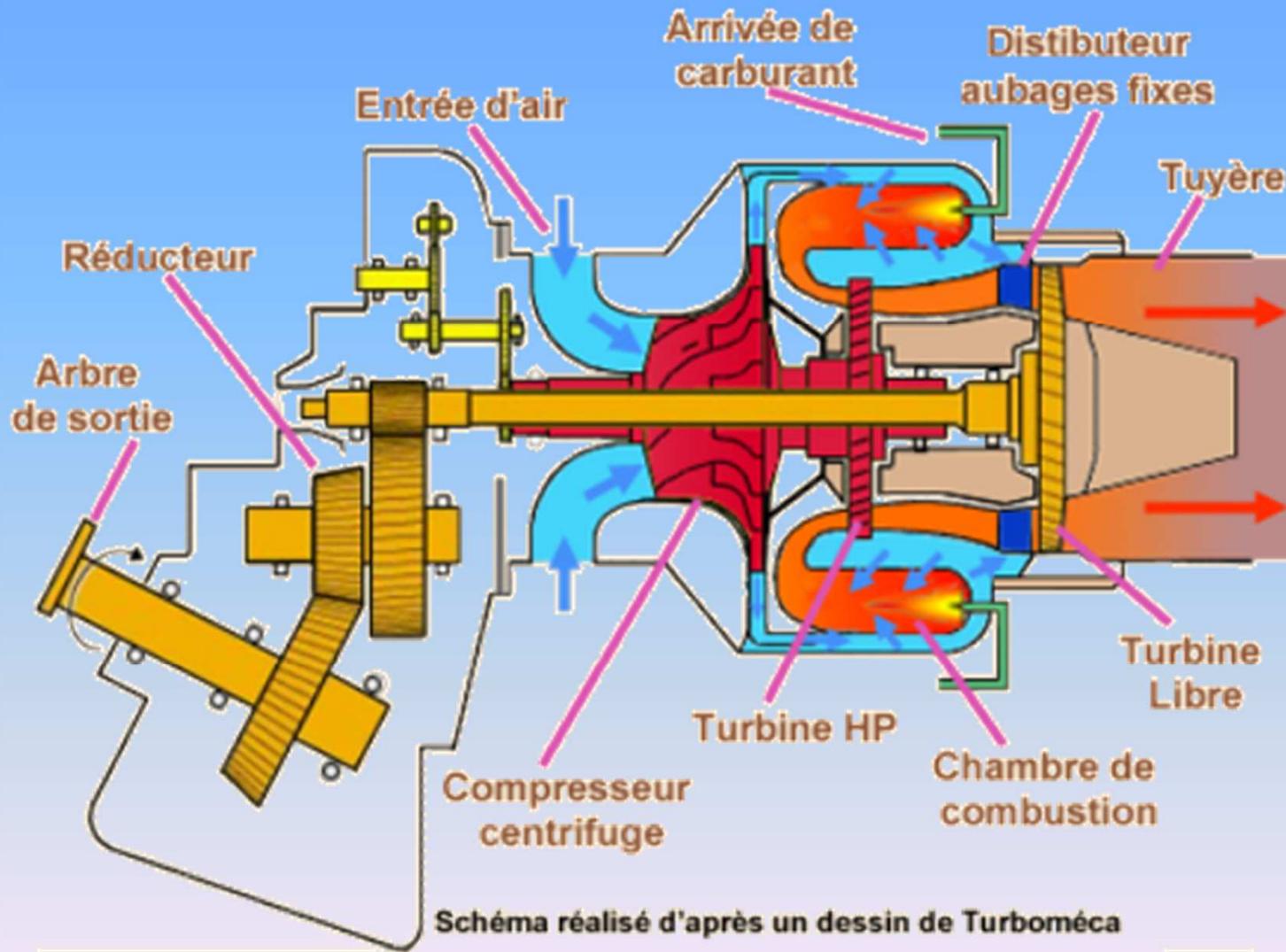
Principe du turbopropulseur



Principe du turbopropulseur



Principe du turbopropulseur d'hélicoptère



Les turbopropulseurs Performances et utilisation

- Les turbopropulseurs fournissent des puissances importantes pour 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 exclusif des hélicoptères.

3. Etude des aéronefs et des engins spatiaux

3.2 Les groupes motopropulseurs

- Moteur à pistons
- Propulseurs à réaction
 - Turboréacteur
 - Statoréacteur
 - Moteur fusées
- Turbopropulseur et Turbomoteurs
- 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.
- Le facteur limitant reste le stockage ou la production à bord de l'énergie électrique.
- Plus silencieux que le moteur thermique et moins polluant.
- 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.



08/09/2017

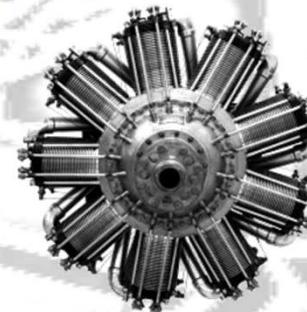
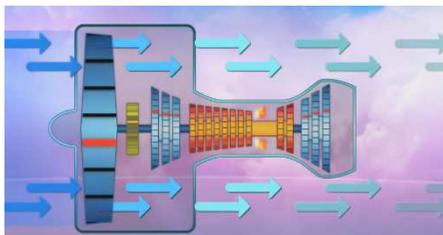
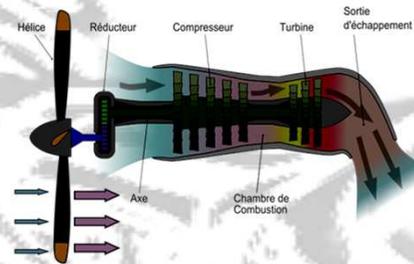
Sur la photo ci-dessus le système de propulsion hybride. A gauche, on distingue le moteur électrique et son réducteur entraînant l'hélice. A droite, on voit le petit moteur thermique

Wankel. Crédit Siemens



3. Etude des aéronefs et des engins spatiaux

3.2.1 Groupes motopropulseurs



Bibliographie

- *Véronique SALMON-LEGAGNEUR et Eric SAVATTERO. Hélice*
- *Avionneur*
- *Wikipedia: <https://fr.wikipedia.org/>*
- *Site FFA*
- *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/*