

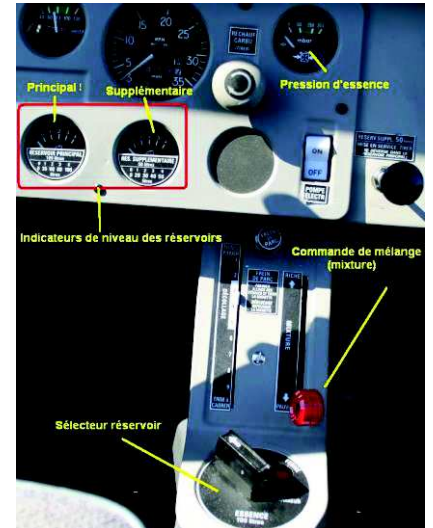


1) L'alimentation en carburant.

Elle assure l'approvisionnement du moteur en carburant. L'essence des réservoirs parvient au carburateur par des canalisations qui comportent en général un **robinet sélecteur** qui permet de "fermer" ou "d'ouvrir" l'arrivée d'essence ou encore de **sélectionner un réservoir**.

Cette alimentation s'effectue soit par gravité (l'essence parvient au carburateur par son propre poids), soit par l'intermédiaire d'une **pompe mécanique** entraînée par le moteur.

Dans ce cas elle est **doublée, par sécurité, d'une pompe électrique**. Celle-ci peut être utilisée en vol en cas de défaillance de la pompe mécanique et également **dans certaines phases de vol à titre de prévention** (décollage par exemple). La pompe électrique est "de gavage" ou "booster" aussi utilisée lors de la mise en route du moteur mais aussi pour lutter contre la formation de "**vapor lock**" (*).



(*Littéralement, c'est un "bouchon de vapeur", provoqué par la proximité du circuit carburant et une zone chaude.

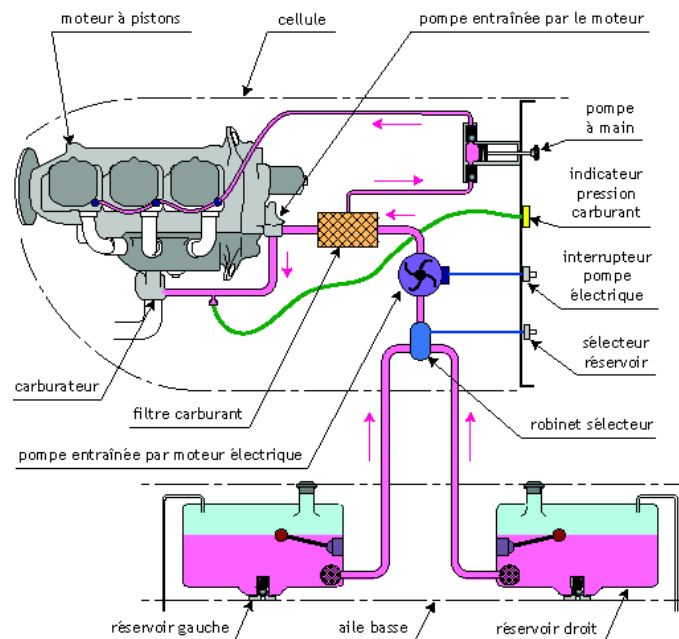
2) Le circuit carburant

Ce schéma permet de visualiser le montage des deux **pompes (mécanique et électrique** dite de gavage) ainsi que le circuit de choix du réservoir par **sélecteur**.

La **pompe de gavage** (électrique) n'est utilisée que lors des phases dangereuse (décollage, atterrissage,...).

Il existe aussi un circuit retour du carburant en excès (refusé par le carburateur) qui ramène le surplus pompé (mécanique ou électrique) vers le réservoir.

Notez aussi les "mises à l'air" des réservoirs qui rééquilibrent les pressions, ainsi que les jauges (flotteurs).



3) Le carburant.

Pour que le moteur fonctionne de façon satisfaisante, il faut l'alimenter avec le carburant prescrit. On classe les essences d'aviation selon leur **indice d'octane**, qui caractérise leur **pouvoir antidétonant**.

Le carburant à utiliser est spécifié par le constructeur. Il figure toujours dans le manuel de vol, il est en général indiqué sur une plaque apposée à l'orifice de remplissage des réservoirs.

La contamination des circuits de carburant par l'eau (*condensation nocturne*) et par la poussière est dangereuse ; il faut l'éviter ou l'éliminer lorsqu'elle s'est produite. Ainsi, il est recommandé de faire le plein des réservoirs après le dernier vol de la journée afin d'éviter la condensation pendant la nuit et de **purger les réservoirs et les canalisations** lors de la mise en œuvre de l'avion.

L'essence aviation est colorée de manière à pouvoir vérifier son indice d'octane.

L'utilisation du supercarburant automobile est possible pour certains avions, sous réserve de respecter certaines conditions et précautions (circulaire d'information N° 1 du 10 janvier 1984, éditée par le Service de l'Information Aéronautique, en vigueur au 01.01.1987).

80 / 87

couleur rose

100 LL

couleur bleue

100 / 130

couleur verte

4) Les commandes moteur

Sur ce tableau de bord d'un bimoteur Beechcraft on repère facilement :

La commande gaz (*Throttle*) en noir.

La commande mélange (*Mixture*) en rouge.

La commande de pas d'hélice en bleu.

Sur ce bimoteur toutes les commandes sont doublées mais peuvent aisément être manœuvrées deux par deux.



- La manette des gaz (*Throttle*)

En tournant, le moteur crée une dépression (pression d'admission) qui aspire dans les cylindres le mélange carburé.

La manette des gaz, reliée au papillon des gaz, permet de faire varier la pression et le volume du mélange air/essence entrant dans les cylindres.

On peut ainsi, en changeant la position du papillon des gaz, modifier la puissance délivrée par le moteur.



- La commande de mélange (*Mixture*)



Le mélange idéal devant partir au cylindre est sensiblement égal à **1 gramme d'essence pour 15 grammes d'air** (mélange 1 / 15^{ème}).

La densité de l'air variant avec l'altitude et la température, sur la plupart des moteurs, on peut régler en vol le mélange air/ essence en agissant sur la commande de mélange, appelé également correcteur altimétrique ou **mixture**.

Cette proportion constitue un des facteurs les plus importants influant sur la puissance fournie par le moteur.



La densité moyenne de l'essence est de 0,7 ce qui signifie que 1 litre d'essence "pèse" 0,7 kg

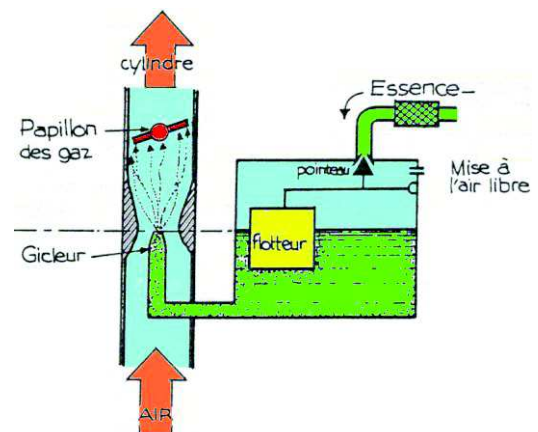
5) Le carburateur

Il assure l'élaboration du mélange air/essence avant son introduction dans les cylindres.

Le carburateur est constitué d'un réservoir de carburant muni d'un **flotteur**.

Le réservoir se remplit de carburant tant que le flotteur n'est pas arrivé à un niveau de référence. Ce réservoir alimente en carburant un **gicleur** qui pulvérise des gouttelettes d'essence dans l'air d'admission.

Certain moteurs disposent de **l'injection** qui introduit directement dans les cylindres de la quantité de carburant nécessaire. Ce système plus sophistiqué est aussi plus performant.



6) Le givrage du carburateur

Il s'agit d'un **phénomène dangereux pour l'aviation légère** ; en effet, le processus de givrage à l'intérieur d'un carburateur peut empêcher l'arrivée du carburant dans la chambre de combustion et provoquer l'arrêt du moteur.

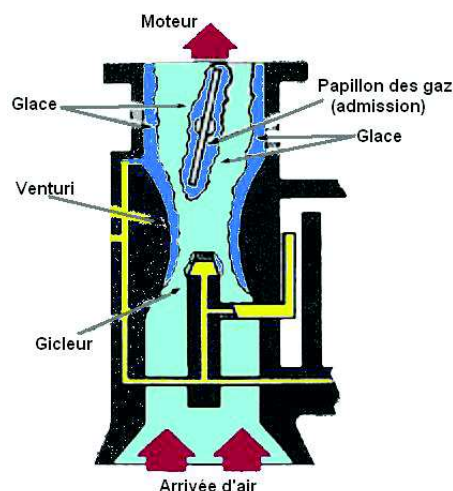
Il est donc nécessaire de bien en connaître les causes, les conditions dans lesquelles le givrage peut apparaître, ainsi que les moyens de prévention et de lutte.

Quelles sont les causes du givrage du carburateur ?

Le mélange air/ essence s'effectue dans une **zone de dépression**, le gicleur étant placé dans un étranglement ménagé sur le tube d'entrée d'air.

La **vaporisation de l'essence** et la **détente** du mélange sont **génératrices de refroidissement**. **L'abaissement de température couramment de 20° C** (pouvant atteindre 35° C !) peut provoquer (en fonction de la température extérieure et de l'humidité de l'air) la condensation et le givrage de la vapeur d'eau contenue dans l'air d'admission.

La glace ainsi formée obture alors plus ou moins l'orifice d'admission, provoquant des troubles de fonctionnement, des pertes de puissance, pouvant aller jusqu'à l'arrêt du moteur.



Quelles sont les conditions propices au givrage du carburateur ?

Ce sont essentiellement :

Une **température au carburateur comprise entre 0° & - 15° C**, la température la plus "favorable" étant de **5°**. Compte tenu de l'abaissement de la température de l'air au carburateur on peut givrer à des températures extérieures relativement élevées (par 15° extérieur on peut avoir - 5° au carburateur).

Une **atmosphère humide** : le risque de givrage du carburateur est plus grand dans les basses couches de l'atmosphère car celles-ci contiennent en général plus d'humidité.

Il faut signaler également que les risques de givrage du carburateur n'existent pas uniquement en nuages ou lorsqu'il pleut.

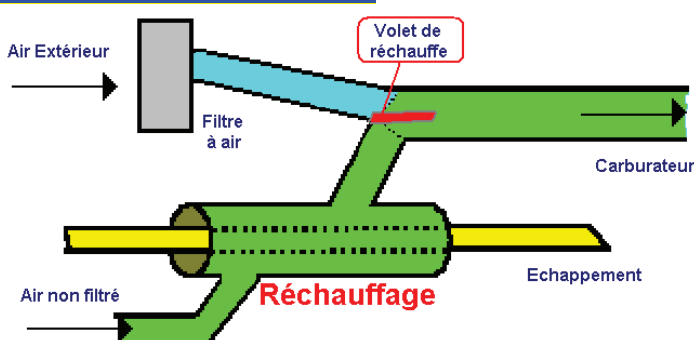
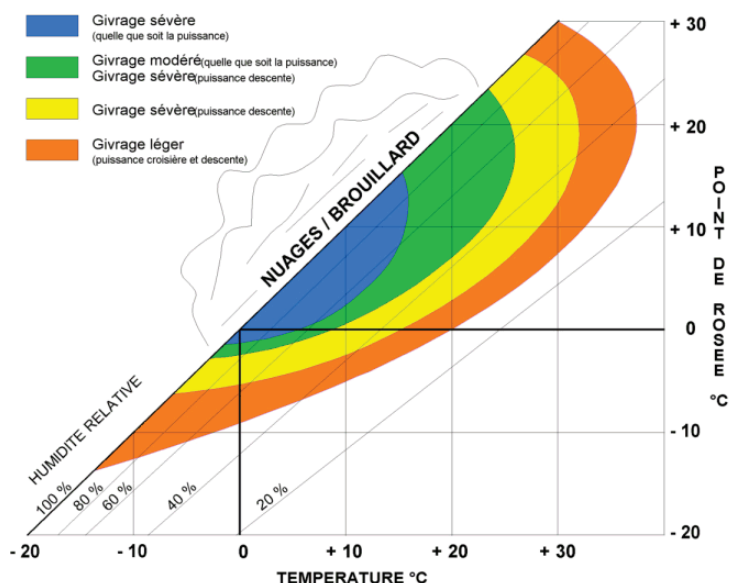
Un ciel clair peut être chargé en humidité, et il suffit alors que les conditions de température extérieure soient réunies pour qu'il y ait givrage.

De quel moyen disposez-vous pour éviter le givrage du carburateur ?

Tous les avions équipés d'un moteur classique à carburateur sont munis d'un dispositif de **réchauffage du carburateur**, dont le principe de fonctionnement est le suivant : l'air extérieur n'est plus admis directement au carburateur.

Il est préalablement réchauffé par circulation autour de l'échappement, pour arriver au carburateur avec une augmentation de température d'environ 50° C.

Mais la température des tubulures d'échappement sur lesquelles cet air est réchauffé, varie énormément selon la puissance développée par le moteur.



C'est donc à pleine puissance que l'efficacité du système de réchauffage sera la plus grande ; à l'inverse, celle-ci sera faible, voire quasiment nulle lorsque les gaz sont réduits totalement.

Par contre, si cet air réchauffé admis au carburateur a pour effet d'éviter le givrage, il a aussi pour conséquence une diminution de la puissance et une augmentation de la richesse du mélange.

Le risque de givrage est plus important lorsque le moteur est utilisé à des puissances réduites car le papillon des gaz étant peu ouvert, la détente augmente et, de plus, une petite quantité de glace suffit à obturer l'orifice d'arrivée du mélange carburé.

7) Repérage et gestion d'un givrage du carburateur (pilotes et CAEA !!!)

Comment devez-vous utiliser le réchauffage du carburateur ?

En première analyse on se demande pourquoi ne pas utiliser le moteur avec un système de réchauffage permanent de l'air comburant. Ce n'est pas possible pour différentes raisons

■ - détérioration rapide du moteur par détonation (*mélange explosif et non plus combustion contrôlée*) lors d'utilisation à forte puissance dans certaines conditions du fonctionnement ;

■ - création de conditions de givrage du carburateur par certaines conditions de température en effet, dans de l'air ambiant humide à -20° C, la température au carburateur avoisinera -40° C. Cette température exclut le risque de givrage carburateur. Par contre, si l'on appliquait le réchauffage du carburateur, on réchaufferait l'air de 35° C environ (valeur courante) ; on atteindrait ainsi une température de -5° C au carburateur, donc condition propice au givrage ;

■ - surconsommation ;

■ - diminution de puissance.

En conséquence, le réchauffage carburateur sera commandé à l'initiative du pilote en fonction

■ - du manuel de vol,

■ - des conditions du moment.

Quels sont, pour vous pilote, les signes annonciateurs du givrage du carburateur ?

Il est important de déceler rapidement les signes d'un givrage carburateur. En croisière et pour une position donnée de la commande de gaz

Sur un avion à hélice à calage fixe :

■ Le givrage du carburateur est annoncé par une chute du nombre de tours.

Sur une hélice à calage variable et à vitesse constante,

■ il est annoncé par une chute de la pression d'admission.

Ces chutes de régime ou de pression d'admission sont naturellement observées lors des trajectoires stabilisées à régime moteur constant (position donnée de la manette des gaz).

Votre attention doit particulièrement être soutenue

■ - au début d'un vol lorsque les conditions sont propices au givrage ;

■ - lorsque ces conditions changent au cours d'un vol.

8) Les huiles

Deux catégories d'huile sont utilisées : les huiles minérales et les huiles dispersantes.

Les huiles minérales

Elles sont obtenues par distillation fractionnée du pétrole brut. Leurs deux composants de base sont le naphte et la paraffine.

Elles sont généralement utilisées pour le rodage du moteur jusqu'à stabilisation de la consommation d'huile.

Elles se caractérisent par leur neutralité chimique, leur viscosité constante et leur point éclair élevé (température d'inflammation spontanée).

Les huiles dispersantes

Ce sont des huiles minérales dont les qualités sont obtenues grâce à l'adjonction d'additifs lors de leur fabrication.

Elles sont dites dispersantes car sans résidus de combustion.

Elles sont particulièrement recommandées pour les moteurs soumis à de gros écarts de température du milieu ambiant et gardent une viscosité plus faible aux basses températures.

Les additifs augmentent considérablement la plage des températures de fonctionnement, facilitent le démarrage à froid, améliorent la lubrification à froid et ont des propriétés anti-friction (ce qui fait que ces huiles dispersantes ne sont pas utilisées pour le rodage).

- **Peut-on mélanger deux huiles ?**

Maintenant, toutes les huiles employées sont miscibles dans leur catégorie (accord entre les fabricants).

Évitez toutefois le mélange huile minérale pure/ huile minérale dispersante, car cette dernière n'est pas neutre chimiquement. Si cela s'est produit, signalez-le dès que possible au mécanicien qui effectuera une vidange.

- **Le grade**

Le grade d'une huile est l'indice qui caractérise ses qualités de viscosité. Le grade de l'huile à utiliser augmente avec la température saisonnière. Les huiles à utiliser sont généralement : au-dessus de 150 C SAE 50 - grade 100 entre 0° et 30° C SAE 40 -grade 80 entre - 20° C et + 20° C SAE 30 - grade 65

En aucun cas, l'huile automobile ne doit être employée car, étant détergente, elle est incompatible avec l'utilisation préalable d'autres huiles. Par ailleurs, les dénominations ne sont pas standardisées, même si la correspondance existe. Exemple : une huile dispersante grade 80 s'appelle D 80 chez BP et W 80 chez SHELL.

De toute façon, vous devez impérativement utiliser l'huile prescrite dans votre manuel de vol.

9) Refroidissement moteur

La combustion du carburant produit une chaleur intense qu'il faut évacuer vers l'extérieur.



Ailettes de refroidissement d'un Clerget diesel en étoile avec double rangée de cylindres

Sur la plupart des moteurs d'avion léger, cette évacuation est assurée par l'air extérieur : c'est le **refroidissement à air** qui est forcé à passer, par le capotage moteur, entre des ailettes situées sur les cylindres.

Ce système nécessite des précautions particulières lors du roulage au sol à faible vitesse et des montées à faible vitesse.

La température des cylindres peut être indiquée sur le tableau de bord par l'intermédiaire d'un indicateur de température cylindre.

Il existe bien entendu des moteurs à refroidissement liquide mais leur complexité les rends beaucoup plus chers... Actuellement ils rentrent alors en concurrence avec les turbines.



Moteur Renault à refroidissement par eau (1915) 220 cv et 12 cylindres en V à 50°. Type 12 F

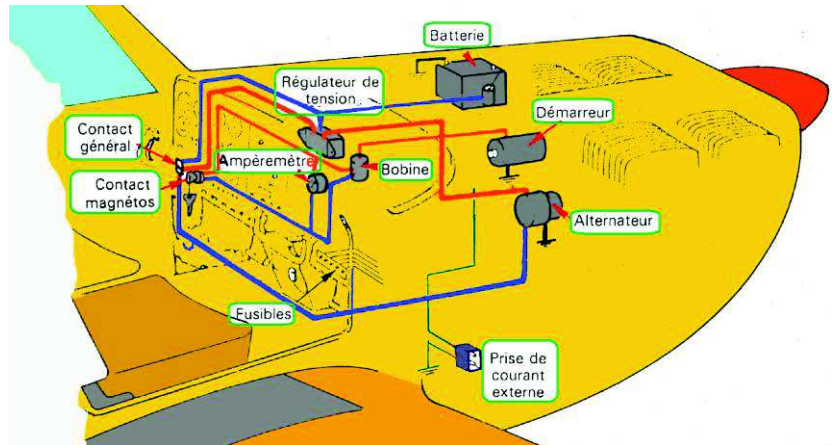


1) le circuit électrique d'un avion à moteur thermique 4 temps

L'**alternateur** produit un **courant alternatif**... qui doit être régulé et redressé pour être transformé en **courant continu**.

L'énergie électrique est alors stockée dans la **batterie** dont la recharge nécessite un redresseur et **régulateur de tension**.

Un **ampèremètre** et parfois un **voltmètre**... permettent de surveiller le bon fonctionnement de la recharge de la batterie...



Circuit électrique

Le **démarrateur électrique** utilise l'énergie électrique accumulée dans la **batterie de bord**.

En fait, les choses se passent exactement comme pour la mise en route d'une automobile... mais la quantité d'énergie demandée est souvent plus importante dans un avion. En effet, la batterie d'accumulateurs électriques de l'avion doit non seulement alimenter en énergie le démarrage, mais aussi les nombreux **appareils de radio**, les **feux de navigation**, le **phare d'atterrissage** et **certaines instruments de bord**.



← L'**ampèremètre** (Ici l'indication permet de savoir si la batterie se charge (+) ou se décharge (-)... signe d'un excès de demande ou d'une faiblesse de l'alternateur ou de la batterie ???) et le **voltmètre** (Tension voisine de 12 V) permettent de surveiller la bonne santé du circuit.

Des **fusibles**, ou des **disjoncteurs** comme ici, permettent de d'isoler un instrument en panne afin d'éviter des conséquences en cascade sur l'ensemble de l'installation électrique. →



L'installation comprend en outre un faisceau électrique reliant tous les accessoires électriques de l'avion. Un **disjoncteur** est installé entre l'alternateur ou la génératrice et la batterie ; un **groupe de fusibles** ou de **disjoncteurs thermiques** protègent les différentes parties de l'installation. Parfois une **prise extérieure** permet d'alimenter le circuit sans décharger la batterie lorsque le moteur est stoppé (pas de recharge via la génératrice).

ATTENTION : le circuit électrique n'a pas en charge l'allumage (étincelles qui emflamment le carburant sur les moteurs à essence).

Si le circuit électrique devient H.S. le moteur continue de fonctionner (sécurité maximum).

2) Les magnétos d'un avion à moteur thermique 4 temps

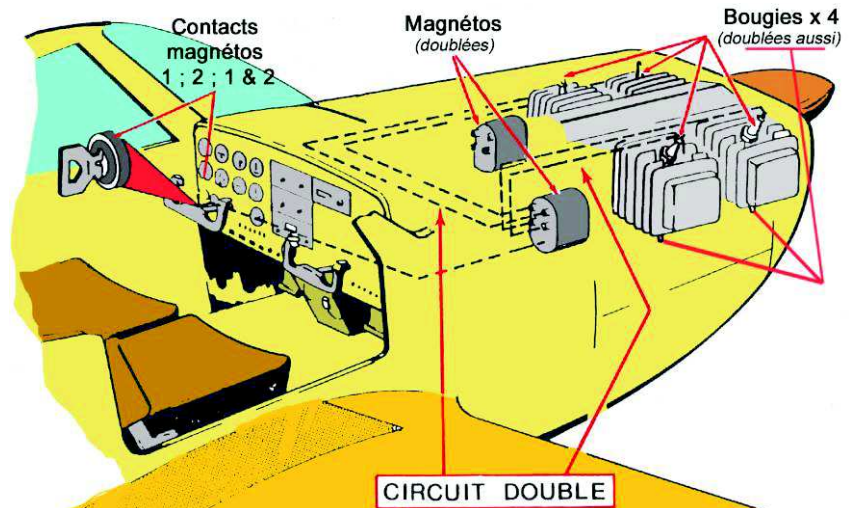
Ce sont donc des organes spécifiques : les **magnétos**, qui fournissent l'énergie électrique nécessaire aux bougies.

La **magnéto** est un **organe autonome** qui n'a pas besoin de source d'alimentation électrique extérieure pour fournir le courant d'allumage.

L'énergie leur est fournie par l'arbre de transmission qui les entraîne... ce système ne permet donc pas l'entraînement initial nécessaire pour la mise en route du moteur.

C'est pourquoi lorsqu'on manipule une hélice d'avion à l'arrêt il faut s'assurer que les contacts magnétos sont coupés. A la mise en route, la batterie de bord fournit le courant électrique qui alimente le circuit de démarrage.

Le démarreur électrique entraîne le moteur, donc les accessoires qui lui sont mécaniquement liés, tel l'élément rotatif de la magnéto qui fournit à chaque cylindre, à l'instant opportun, l'étincelle nécessaire.



Circuit d'allumage

Dès que le moteur tourne, le circuit de démarrage est déconnecté et la batterie ne joue plus aucun rôle dans le fonctionnement du moteur qui peut continuer à fonctionner même en cas de panne électrique totale dans le circuit principal.

Position des "contacts magnétos"

Arrêt Gauche Droite Gauche + Droite

C'est pourquoi les contacts magnétos comportent quatre positions : Arrêt, G, D et G + D.

Quand le commutateur est à la position G ou D une seule magnéto fournit du courant et un seul jeu de bougies fonctionne (cela fait partie des tests ou check list moteurs après mise en route). Lorsque le commutateur est à la position G + D, les deux magnétos fournissent du courant et les deux jeux de bougies fonctionnent.

Off	Left	Right	Both
0	1	2	1+2



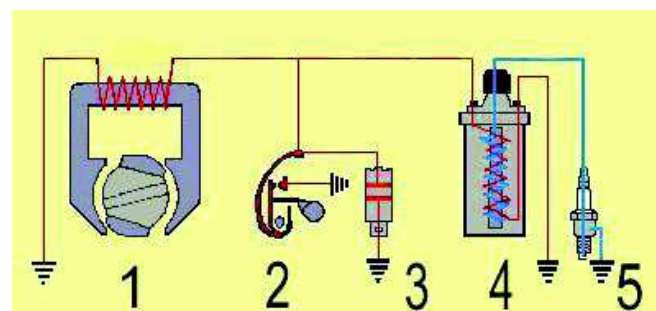
Ce circuit double a pour principaux avantages **d'accroître la sécurité** : (en cas de panne de l'un des circuits, le moteur peut fonctionner sur l'autre) et **d'améliorer l'allumage et la combustion** du mélange et par conséquent, les **performances**.

3) Le circuit d'allumage

Le rôle du circuit d'allumage est de fournir une **étincelle** à la **bougie** qui déclenche la combustion du mélange carburant-air dans le cylindre.

Sur la plupart des moteurs d'avions modernes, on utilise le circuit d'allumage à **magnéto**.

Le circuit d'allumage i-contre est celui d'une voiture (non doublé)



Circuit d'allumage version classique : 1 Générateur de tension ; 2 Vis platines ; 3 Delco ; 4 Bobine haute tension ; 5 Bougie d'allumage



Détail d'une bougie

En pratique, le **circuit d'allumage est doublé** c'est à-dire que deux magnétos fournissent le courant électrique aux deux bougies d'allumage montées dans chaque chambre de combustion. Chacune des magnétos alimente un jeu de bougies.



Bougie d'allumage

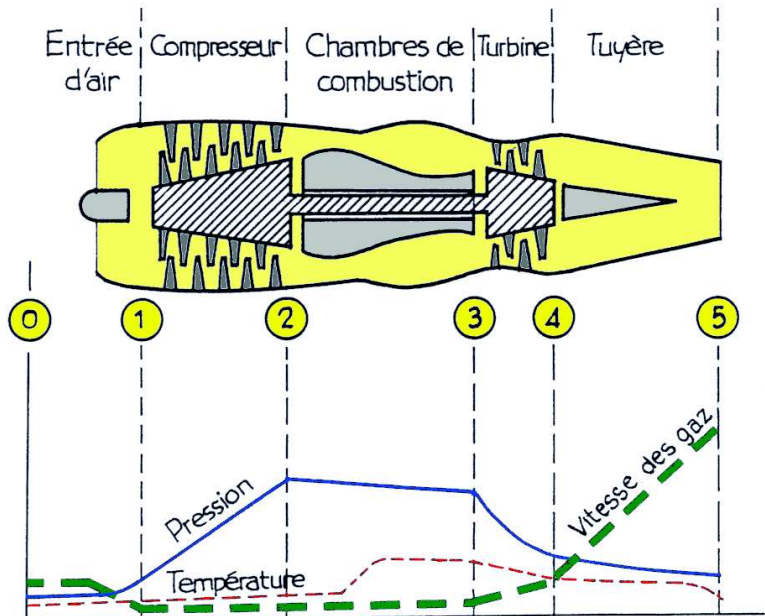


1) Description du fonctionnement d'une turbomachine à réaction.

Les turbomachines utilisent l'éjection à grande vitesse des gaz de combustion soit :

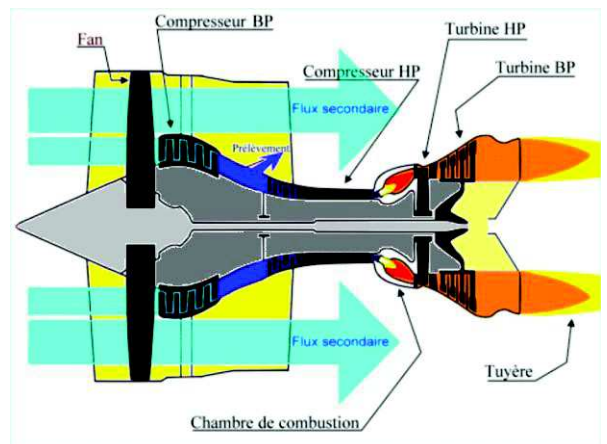
- Dans une direction appropriée (turboréacteurs).
- Sur des turbines pour en récupérer l'énergie (turbopropulseurs et turbomoteurs).

La combustion du carburant consomme du dioxygène prélevé dans l'air mais rejette du CO_2 et de la vapeur d'eau ce qui fait augmenter la quantité de gaz rejetés. Trois paramètres sont liés : ce sont la pression, la température et la vitesse des gaz (voir schéma descriptif de leur évolution).

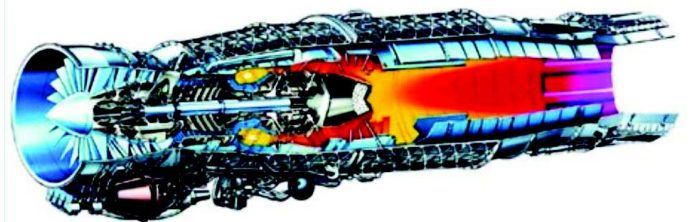


2) Les turboréacteurs

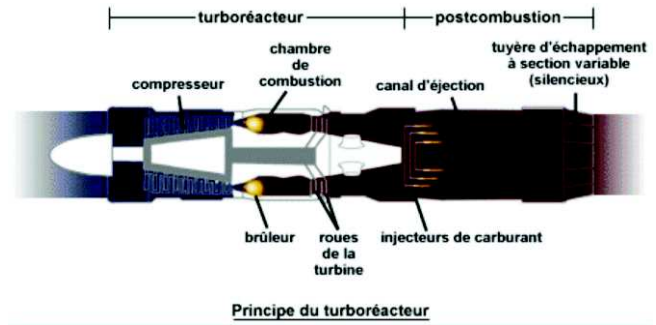
Sur les avions de ligne les modèles simple flux ont été remplacés par des modèles **double flux** permettant d'améliorer le rendement (et donc la consommation) tout en réduisant les nuisances sonores.



Sur les avions militaires (et sur le Concorde) c'est une "**post combustion**" qui a été ajoutée afin d'accroître les performances... au détriment de la consommation !!!



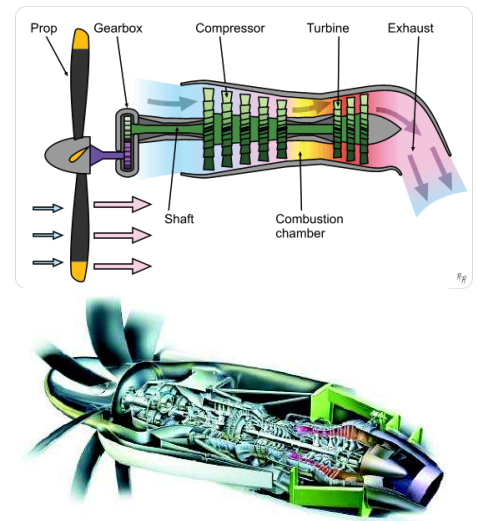
La **PC** ne peut être utilisé que quelques minutes (*sauf cas exceptionnels type Mirage IV*) à cause des contraintes thermiques, de la consommation multipliée par 4 ou 5 et autres PB (signature thermique, bruit...).



3) Turbopropulseur

C'est un turbo réacteur dont la turbine du second étage est conçue pour récupérer le maximum de l'énergie des gaz de combustion sous forme de couple.

Ce couple est transmis à une hélice au moyen d'un réducteur permettant la réduction de la vitesse de rotation.



4) Turbomoteur

Utilisé sur les hélicoptères.

C'est un turbopropulseur dont le réducteur entraîne non plus l'hélice mais une boîte de transmission commandant à la fois le rotor principal et le rotor anti couple.

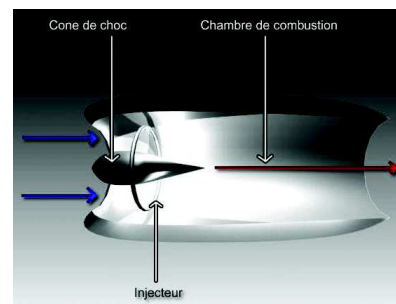


5) Statoréacteur

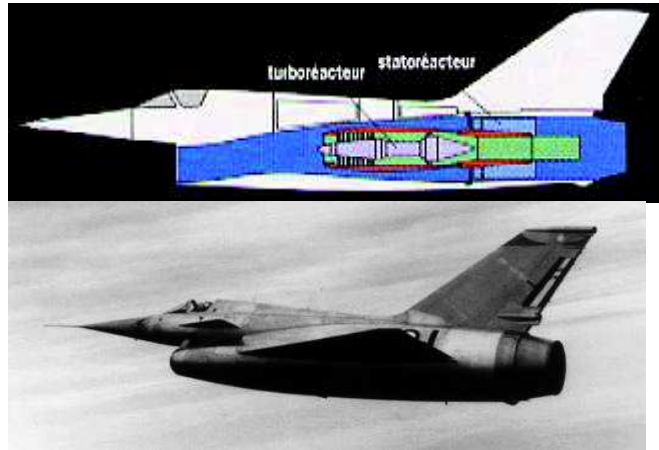
Le statoréacteur ne comprend ni compresseur ni turbine. La compression des gaz s'effectue par ralentissement de l'air à l'aide d'ondes de choc (vol supersonique) et de l'entrée d'air de forme divergente.

Dans ce type de moteur au plus la vitesse avion est grande et au plus le rapport de pression est important.

Voir la vidéo du "Leduc" dans l'histoire e l'aviation.



inconvenients :
 - nécessité d'une vitesse initiale.
 - faible rendement pour des vitesses avion inférieures à mach 3.



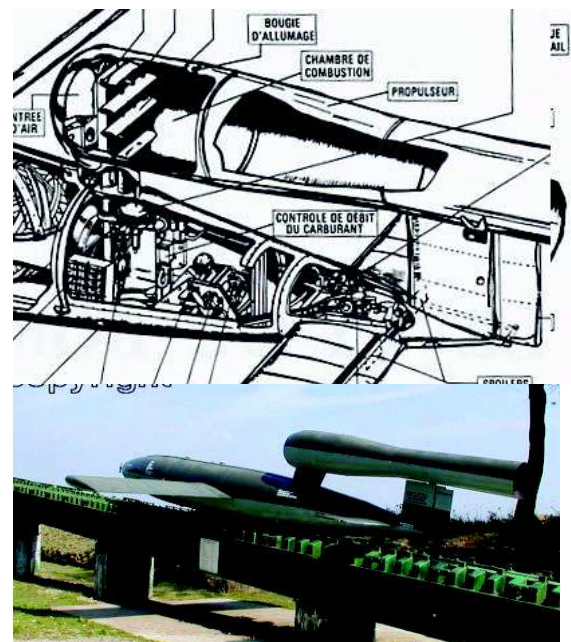
Le Griffon II atteindra mach 2,19 avec une combinaison Turbo/statoréacteur.

6) Pulsoréacteur

Le pulso-réacteur comprend une grille d'obturation munie de clapets, si on injecte du carburant dans la chambre de combustion et si on l'enflamme par l'étincelle de la bougie d'allumage, la pression augmente dans la chambre, les volets se ferment, les gaz brûlés s'éjectent par la tuyère créant une dépression dans la chambre, les clapets s'ouvrent sous l'effet de cette dépression de l'air frais est admis dans la chambre, le cycle recommence et peut se reproduire 50 à 150 fois par seconde.

A chaque éjection correspond une poussée, et un accroissement de vitesse de l'engin qui entraîne une augmentation de pression dans l'entrée d'air et donc une augmentation du rendement.

Il fut utilisé sur les bombes volantes de type V1.



7) Réacteur fusée utilisant des ergols liquides.

Principe de fonctionnement :

Le moteur-fusée à ergols : liquides transforme en force propulsive l'énergie dégagée par la réaction chimique entre deux ergols: le combustible, et le comburant. Ces deux corps sont injectés sous forte pression dans la chambre de combustion. Leur combustion très vive produit une grande quantité de gaz à haute température. Accélérés par leur passage au travers de la tuyère, leur éjection à grande vitesse produit la poussée. Les vitesses d'éjection peuvent être très élevées : 2000 à 3000 m/s. Les impulsions spécifiques, I_{sp} , peuvent atteindre 500 s, suivant les couples d'ergols choisis.

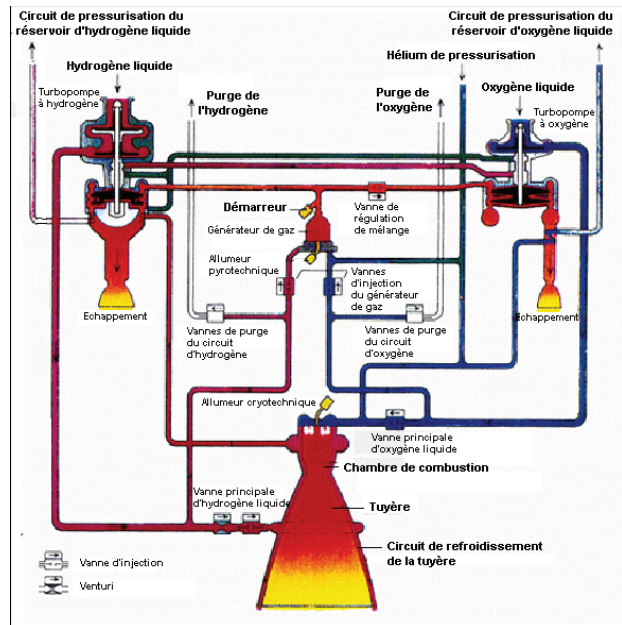
Ci-contre : moteur-fusée Vulcain, de l'étage principal du lanceur Ariane 5. Ce moteur est alimenté par de l'hydrogène et de l'oxygène liquides et développe une poussée de l'ordre de 1100 kN. (photo : Christine Quehen)



Avantages :

Bien que plus complexes que les propulseurs à poudre, les propulseurs à liquides présentent plusieurs avantages :

- Les propergols liquides sont plus énergétiques.
- La durée de fonctionnement peut être commandée.
- Ces moteurs peuvent être rallumés en vol.
- On sait concevoir des moteurs à poussée modulable.
- Avec des chambres refroidies, ils peuvent fonctionner longtemps.
- La qualification au sol est aisée, la fiabilité aisément démontrable.



Ci-contre le schéma de principe du moteur Vulcain

Inconvénients : La nécessité d'injecter les ergols sous forte pression dans la chambre de combustion complique la réalisation des moteurs-fusées à propergols liquides, ainsi qu'on peut le voir sur la photo ci-dessus, dans la partie supérieure du moteur (turbo-pompes).

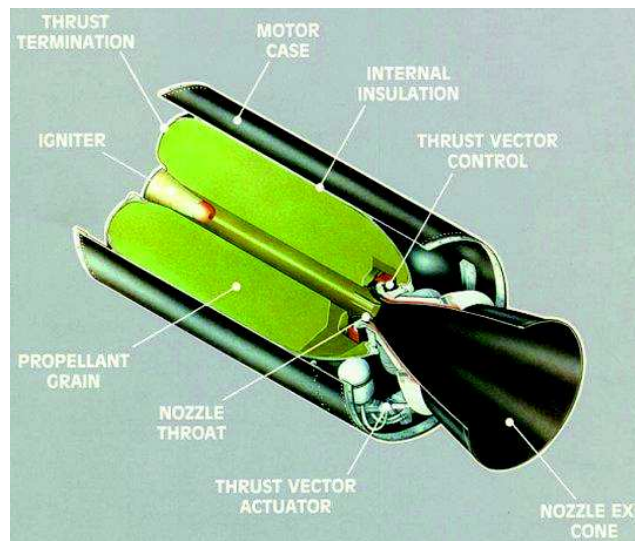
8) Les propulseurs à propergols solides.

Principe de fonctionnement :

Les propulseurs à propergols solides forment un ensemble très simple : le corps renfermant les propergols solides (oxydant + réducteur) et une tuyère. Le propergol, appelé improprement poudre, a la consistance d'un caoutchouc dur.

La combustion des propergols délivre des gaz chauds suivant un débit préétabli que la tuyère détend pour créer la poussée.

Les vitesses d'éjection sont honorables (2600 m/s) et les débits massiques élevés. Ils peuvent donc fournir de très fortes poussées (jusqu'à 6000 kN).

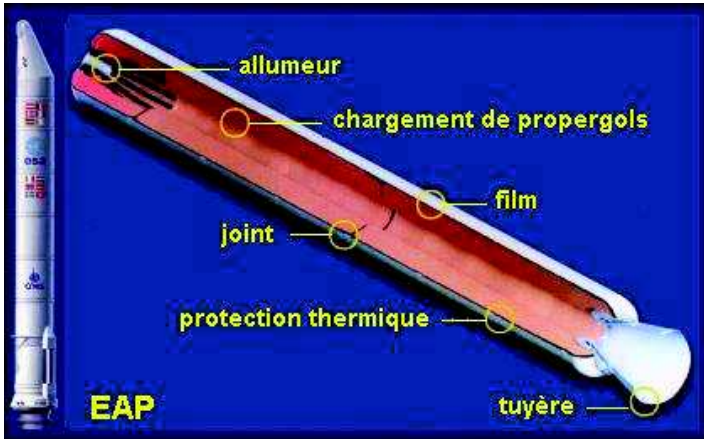


Ariane 5 et le Shuttle (Navette spatiale) combinent toutes deux des boosters à propergol solide et un moteur à propergol liquide.



Ariane 5 comporte deux étages d'accélération à poudre (EAP) qui sont des propulseurs à propergols solides.

Vue en coupe d'un étage d'accélération à propergols solides (EAP).

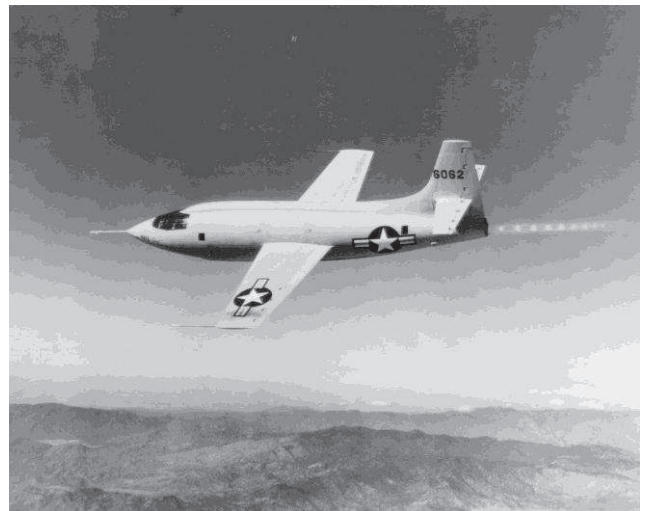


Un missile Harpoon

9) Les propulseurs fusées ... utilisés sur des avions.

Les moteurs fusées ont été utilisés sur certains avions très spéciaux

Du X15 ci-dessous au X1 ci-contre



Parfois des avions conçus pour des missions spécifiques. Mission d'interception pour le Messerschmidt 163. (Me 163 Komet)



On utilise aussi parfois des fusées d'appoint pour améliorer les performances lors d'un décollage. (JATO)

10) Coupe détaillée d'un turboréacteur ... en anglais

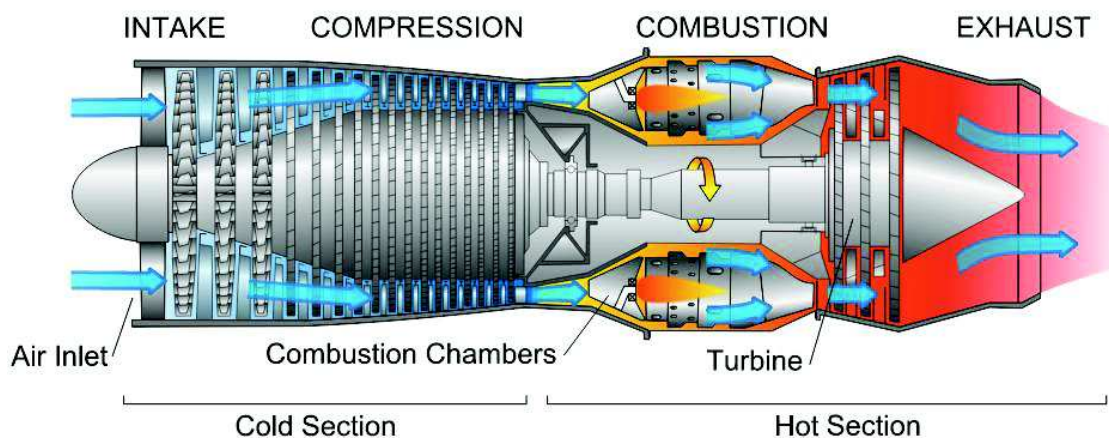
Notez le cheminement des gaz et la zone d'allumage.

Remarquez aussi l'axe et, ici, la liaison directe entre la turbine et le compresseur.

Notez l'absence de flux secondaire (c'est le moteur d'un "chasseur") et l'absence de post combustion au niveau de la tuyère.

Vocabulaire
dans l'ordre de
lecture :

Admission
Compression
Combustion
Echappement
Entrée d'air
Chambre de
combustion
Turbine
Section froide
Section chaude



11) Le futur... Comment augmenter encore le taux de dilution ?

• Le taux de dilution

Il ne concerne actuellement que les turboréacteurs "double flux" : c'est le rapport entre les masses de flux chaud et de flux froid.

Les premiers turboréacteurs à double flux avaient un **taux de dilution** de 1,5 : 1 alors qu'un **CFM 56** moderne a un taux de 6 : 1 son successeur, le **LEAP** sera à 10 : 1 environ !!! Dans un turbofan moderne, donc à haut taux de dilution, pour la pleine puissance, c'est-à-dire au décollage, **la soufflante produit environ 80 % de la poussée.**

L'amélioration des rendements peut passer par une soufflante extérieure carénée ou non.

Sans carénage c'est l'"**open rotor**" qui utilise des hélices contrarotatives.



Le moteur propfan Open rotor en test sur un MD-81 Demonstrator

• L'open rotor et son futur avion ?



Le problème de ce genre de moteur reste les nuisances sonores. Sur les projets futuristes on les place donc plutôt à l'arrière de l'appareil et au-dessus du fuselage.

Reste aussi l'option d'augmenter encore la taille de la soufflante en version carénée... et donc le taux de dilution comme sur le projet le projet Lockheed Martin ci-contre associé au passage à une **sur aile rhomboédrique.**



Projet Lockheed Martin

Notez, sur ces trois projets, que la recherche porte aussi bien sur les motorisation que sur la voilure.

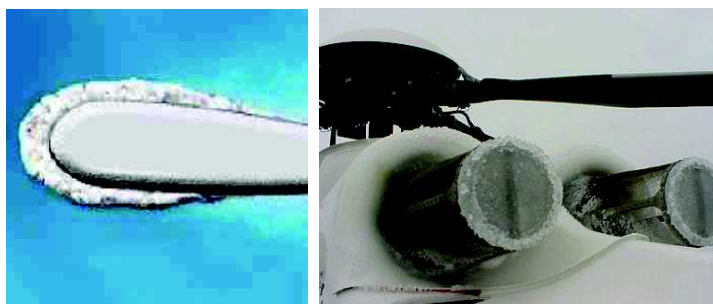


Bien que placé en connaissance des aéronefs ce cours touche la mécanique du vol, la météorologie ainsi que la navigation et la sécurité des vols... Ce cours n'évoque pas le cas particulier du givrage carburateur (traité au paragraphe GMP)... mais tous les autres points de givrage.

1) Les dangers du givrage :

Le givrage est dangereux car il peut provoquer :

- Une modification du profil aérodynamique de l'aile (*ci-contre*).
 - Une augmentation du poids de l'avion qui peut aller au-delà de la masse maximale acceptable dans la configuration du vol.
 - Le blocage d'une gouverne.
 - L'obstruction des prises de pression reliées à certains instruments de bord.
 - Une réduction de la visibilité au travers du pare-brise qui peut aller jusqu'à l'opacification.
 - Une diminution du rendement de l'hélice dont le profil a été modifié ce qui peut en outre provoquer des vibrations.
 - Une diminution de la pression d'admission et de la vitesse de rotation du moteur à piston qui peut même s'arrêter.
 - La destruction des aubes du compresseur d'un réacteur.
 - L'arrêt d'un réacteur si les entrées d'air sont obstruées partiellement par du givre.
 - Un décollage laborieux si l'avion est couvert de glace.
 - Une difficulté à maintenir une altitude de sécurité.
 - Une perte de manœuvrabilité due à la déformation, par le givre, des surfaces portantes : la vitesse de décrochage augmente, le coefficient de portance de l'empennage horizontal diminue, ce qui peut conduire à la perte du contrôle longitudinal qui correspond à l'**ICTS** (*ice contaminated tailplane stall*).
- Dans ce cas, le pilote doit se garder de sortir les pleins volets afin de limiter le moment piqueur que l'empennage horizontal ne pourrait plus compenser, notamment lors d'un centrage avant.*
- Un accroissement des efforts aux commandes car les moments de charnière sont modifiés et parfois difficiles à compenser.
 - Un risque d'injection de morceaux de glace dans les entrées d'air qui pourrait endommager le moteur. *Si le pilote en dispose, il utilisera le séparateur à inertie pour les turbines et la dérivation de l'entrée d'air (alternate-air) pour les moteurs à pistons.*
 - Une perte de la radio ou des moyens de radionavigation due au givrage des antennes.
 - Des obstructions diverses au niveau des prises de pression, des prises d'air, des mises à l'air libre des réservoirs. *Le pilote doit activer par conséquent le réchauffage du tube de Pitot au moindre doute.*



Le dépôt de glace s'effectue principalement sur les parties qui reçoivent le vent relatif (bord d'attaque des ailes et des empennages, bord d'attaque de l'hélice, entrées d'air des réacteurs, etc...).

C'est donc sur ces zones les plus sensibles que sont disposés les systèmes de dégivrage et d'antigivrage.

Pour résumer :

Le givre alourdit l'avion, déforme les surfaces aérodynamiques et peut perturber le fonctionnement des moteurs ainsi que des différentes antennes.

Les performances de l'avion peuvent alors être extrêmement dégradées jusqu'au point de l'empêcher de voler !

2) Le givrage là ou on ne l'attend pas !

Si le givrage carburateur est assez bien connu, le givrage d'un moteur à réaction est en pleine phase d'étude.

Le givre peut se créer dans une zone où il fait déjà très chaud (*bien qu'en amont de la chambre de combustion*) : le compresseur haute pression.

Après un processus d'accumulation, la glace se rompt et est emportée en aval. Cela peut causer divers dysfonctionnements, jusqu'à l'extinction moteur.

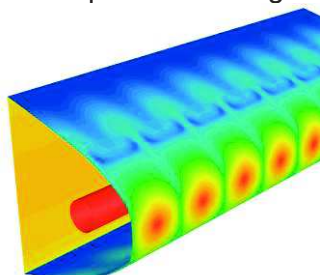


Givre dans un compresseur.

3) Lutte contre le givre : anti-givrage ou dégivrage ?

Dans l'aéronautique, le **dégivrage** consiste à retirer (curatif) la glace et le givre accumulés sur les avions et l'**anti-givrage** s'attache à éviter (préventif) la formation de glace nouvelle.

Les moyens de dégivrage ou d'anti-givrage peuvent être physico-chimiques, mécaniques ou thermiques. On distingue donc :



Simulation d'un système thermique de bord d'attaque.

- **Les systèmes thermiques préventif ou anti-icing :**

Un dispositif de réchauffage permet de traiter modérément les parties vulnérables de l'avion.

- Résistance électrique. (*Concerne toutes les sondes, prises de pression et antennes. Parfois le pare-brise et l'hélice.*)
- Circulation d'air chaud. *Concerne les moteurs qui servent d'alimentation d'air chaud mais aussi leurs propres parties sensibles (entrée d'air réacteur, carburateur) mais aussi les bords d'attaque de la voilure ou de l'empennage.*

- **Les autres systèmes préventifs**

- Le dispositif de suintement de liquides sur les corps poreux des bords d'attaque.

i. Le dispositif des **boudins de dégivrage** utilisés en prévention. Il est constitué de corps gonflables, périodiquement activés par des pompes pneumatiques, qui cassent le givre des bords d'attaque. (Il faut une épaisseur minimum pour que la pellicule de glace devienne cassante...)

Vue d'ensemble de la multiplicité des zones touchées et des méthodes anti-givrage →

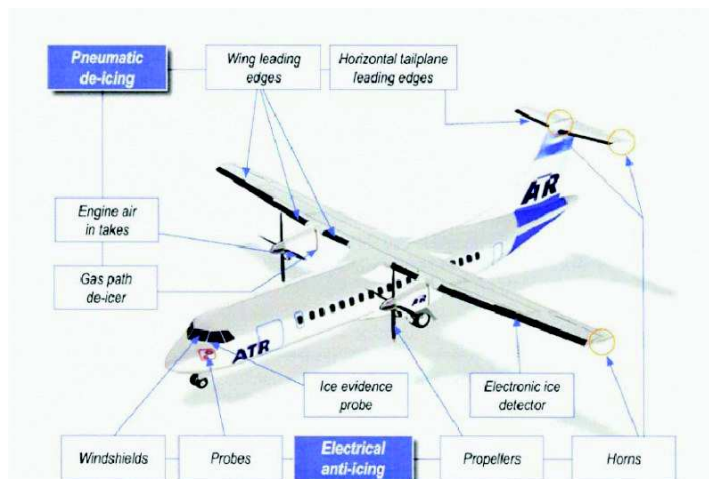


Figure 2 - Example of standard system for protection against icing on ATR (ATR72 shown in figure)

- **Les systèmes curatifs dégivreurs**

Ils sont souvent similaires aux dispositifs préventifs mais délivrant une puissance supérieure.

Le dégivrage peut être obtenu par des **méthodes mécaniques** comme le simple grattage ; par **application de chaleur** ; par l'**utilisation de produits chimiques** liquides ou secs conçus pour abaisser le point de congélation de l'eau (*différents sels ou saumures, alcool, glycol etc.*) ou bien encore par combinaison de ces techniques.

On distingue le dégivrage au sol qui peut être réalisé par un service de l'aéroport et le dégivrage en vol.

4) Les dégivreurs au sol

Au sol, lors de gel importants, le dégivrage doit permettre d'éliminer les particules de glace qui peuvent paralyser les parties mobiles des avions (*gouvernes, volets etc*).



Dégivrage rapide suivi de la projection d'un anti-givre sur un aéroport ↑

La glace peut aussi gêner le déplacement des appareils ou les endommager (*projection de morceaux sur des parties sensibles comme les aubes de réacteurs*).

Après un dégivrage (curatif) on peut appliquer un anti-givrage (préventif). Il est effectué par application d'une couche de protection à l'aide de fluides anti-glace.

5) Les différents dispositifs de lutte contre le givre en vol

En vol le danger principal vient de l'eau en surfusion qui se transforme en glace au contact de l'avion.

Le flux d'air aérodynamique sur les ailes est extrêmement perturbé ce qui réduit la portance... sans parler de l'alourdissement qui peut être important !



Cristaux de glace se formant sur le bord d'attaque d'une pale de rotor, dans un tunnel de givrage expérimental de la NASA.

Il existe donc :

- Des moyens mécaniques de type pneumatiques (*gonflage de boudins en caoutchouc*). Cette méthode concerne les bords d'attaque de tous les profils (*aile et empennage*).
- Des moyens chimiques (*des alcools abaissant le point de congélation de l'eau*). Limités par la quantité d'alcool disponible ils sont destinés à des zones particulières (*pare-brise, hélices*).
- Et des moyens thermiques



Dispositifs thermiques en pied de pale d'hélice.



Boudins gonflables sur l'empennage



Boudins gonflables de bord d'attaque d'aile.

- Les moyens physico-chimiques :

On utilise de l'alcool mais aussi des mélanges d'éthylène glycol et d'alcool isopropylique. Ces fluides abaissent le point de congélation de l'eau.

On les utilise (alcools) sur le bord d'attaque de la pale des hélices, sur les pare-brises, dans les carburateurs. Mais aussi (glycol) sur les bords d'attaques des ailes et gouvernes sur lesquelles il est distribué au travers de parties métalliques finement percées.



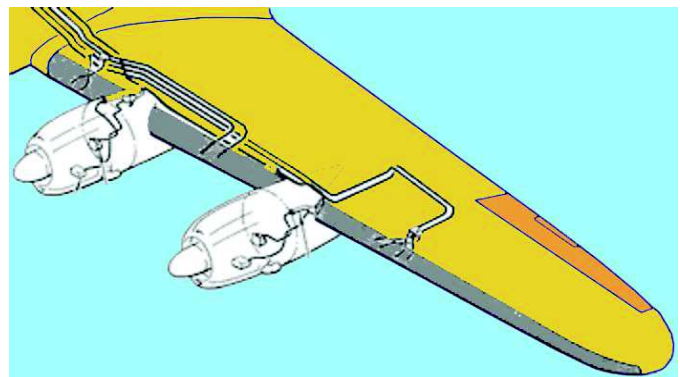
The curved tubes at the base of the propeller blades delivered anti-icing fluid (isopropyl alcohol) to the grooved edges. (Douglas C 47...ou DC 3)

Les avantages des systèmes alcool glycol (par rapport au dégivrage pneumatique ou thermique) sont qu'il n'y a pratiquement plus de glace résiduelle. En outre, les mélanges de glycol créent une pellicule de protection qui peut perdurer plusieurs dizaines de minutes ce qui peut être utile en cas de panne électrique.

- Les moyens mécaniques :

Le plus simple ! Il est constitué de chambres en tissu caoutchouté alternativement gonflées et vidées.

Le givre est cassé et emporté par le vent relatif. Ils ne sont utilisés que pour les bords d'attaque des ailes et des empennages.



Boudins pneumatiques de dégivrage.

Ce dispositif demande assez peu d'énergie mais d'une part il perturbe le profil et d'autre part il vieillit mal et assez rapidement ... comme tous les caoutchoucs.

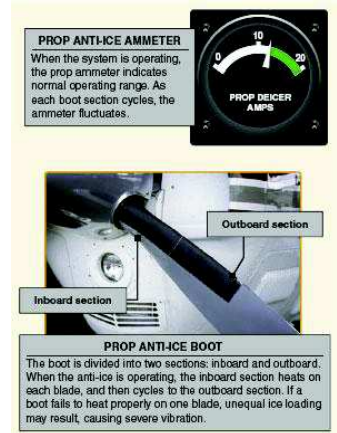
- Les moyens thermiques :

Les moyens thermiques sont les plus efficaces et sont généralisés sur les gros avions car ils agissent par fusion de la pellicule de glace. De plus, ils peuvent être utilisés pour l'antigivrage.

Il y a des systèmes à air chaud (80°C) pour les bords d'attaque des ailes et des empennages et pour les entrées d'air des réacteurs.

La source de chaleur peut provenir d'un brûleur à essence, des gaz d'échappement ou d'air pris au dernier étage du compresseur des réacteurs.

Il y a des systèmes électriques pour les pare-brises et les bords d'attaque (hélice...). Mais aussi des éléments tels que les antennes anémométriques et les entrées d'air.



Système thermique complet pour hélice

6) Gestion de la situation de givrage en vol

Les systèmes de dégivrage peuvent fonctionner en anti-givrage, dégivrage ou les deux à la fois en fonction de leur principe. Cette utilisation d'équipements de dégivrage permet aussi au pilote VFR de "survivre plus longtemps" à un épisode de givrage inopiné et de prendre plus facilement les bonnes décisions que les conditions de vol imposent.



Cependant, la meilleure des préventions reste et restera celle qui consiste à éviter de voler, de manière prolongée et volontaire, dans les zones à haut risque de givrage sévère, même en IFR.

En cas d'échec des opérations de dégivrage, le pilote doit :

- Sortir au plus vite de la zone de givrage.
- Si le relief le permet, demander un niveau inférieur, mais sans se risquer toutefois au-dessous de la "**Moca**" (minimum obstruction clearance altitude).
- Sinon, changer de cap pour sortir de la zone givrante ou pour s'éloigner du relief.

La préparation du vol, surtout si des conditions de givrage sont prévues, doit tenir compte de cette éventualité.

- Dans les situations graves, transmettre les messages "PAN , PAN" ou "MAYDAY", et afficher 7700 au transpondeur.

7) Les conditions du givrage

- C'est quoi le givre ?

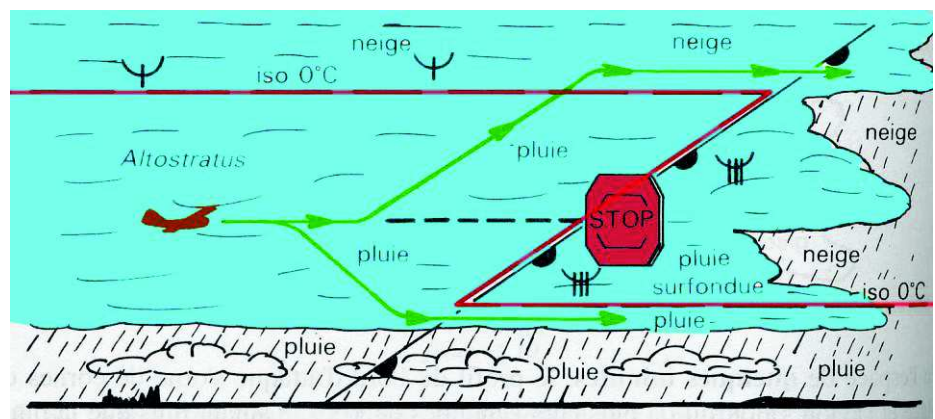
Le givre est un dépôt de glace provenant souvent de gouttes de brouillard ou de pluie en surfusion sur des objets dont la surface est à une température inférieure ou légèrement supérieure à 0°C.

- Où trouve-t-on du givre ?

On peut trouver du givre dans la plupart des nuages lorsque ceux-ci sont à une température négative et plus particulièrement dans les nuages instables. A priori ce risque ne concerne pas les pilotes volant en VFR.

La zone la plus dangereuse se situe au niveau des fronts.




Il faut repérer l'altitude de l'**isotherme 0°C** et passer soit au dessus (*glace déjà formée*) soit au dessous (*pluie*). Bien tenir compte que la position change lorsque qu'on change de masse d'air (*ici on passe de la masse d'air chaud à la masse d'air froid*)



Bien repérer sur ce schéma les zones de givrage modérées ou sévère (pluie surfondue = verglas)

- **Infos météo sur les cartes (TEMSEI) et dans les messages**

Le risque de verglas est indiqué par le symbole 

Le givrage faible par :  puis modéré :  et enfin fort : 

On trouve aussi FZ ou FZRA (freezen rain)

8) Les différents types de glaces (CAEA)

- **Le plus dangereux : le verglas**

Une masse d'air de température négative peut être observée au-dessous d'une masse d'air de température positive : c'est en effet le cas d'un côté et de l'autre d'un front (Voir l'exemple du front froid ci-dessus). On note, en suivant l'avion, qu'avant le front (froid), l'air est chaud, l'isotherme 0 °C est donc élevée alors qu'après le passe dans la masse froide, l'air est plus froid et l'isotherme 0 °C est donc plus basse.

Dans la zone où les deux isothermes 0 °C se superposent, les précipitations qui se produisent dans l'air chaud traversent la masse d'air de température inférieure à 0 °C. Les gouttes de pluie traversant cet air froid, peuvent rester en surfusion. Mais en cas de choc, par exemple sur le bord d'attaque de l'aile, l'eau change d'état et se transforme instantanément en glace.

Lorsqu'un avion traverse une zone de pluie surfondue l'avion se couvre de glace en très peu de temps. C'est la formation de verglas.

Ce type de givrage est très dangereux car extrêmement rapide.

Le pilote peut être surpris car il vole en dehors des nuages, dans une zone de pluie.

- **Le givre mou:**

Constitué d'une couche de glace friable il est beaucoup plus fragile que le verglas.

Il se forme à partir de fines gouttelettes en surfusion provenant de nuages stables (Stratus, brouillard...). Le givrage est aussi beaucoup plus lent.

Comme des bulles d'air sont emprisonnées au cours de la solidification cela lui donne son aspect blanc opaque.

- **Le givre blanc ou la gelée blanche**

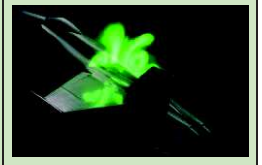
Ici le phénomène est différent : c'est un avion FROID qui pénètre dans une atmosphère chaude (*température positive*) et humide. L'humidité (*vapeur d'eau*) peut se déposer sur l'avion par condensation solide (*passage de l'état gazeux à l'état solide*).

Ce type de givrage peut aussi se produire lorsque l'avion reste au sol en hiver (c'est le même phénomène que dans la nature).

Il faudra donc nettoyer l'avion avant le vol car ces dépôts, même légers, dégradent fortement les performances de l'avion en particulier au décollage ou en montée.

IV - Le freinage à l'atterrissage.

Train, parachute, reverses... et brins d'arrêt (CAEA)



1) Comment ralentir puis stopper un avion ?

Supposer que l'on va arrêter un avion comme une voiture serait absurde même si les avions sont équipés de freins sur les roues.



F16 en finale (becs, volets, aérofreins)

Les vitesses très importantes et la masse de la machine détruiraient totalement les freins de roues s'ils étaient seul à être mis à contribution.

On distingue trois phases de ralentissement

:

- 1 - ralentir AVANT de se poser (*c'est du pilotage avec des aides aérodynamiques (spoiler, aérofreins...)*)
- 2 - ralentir sur la piste (*C'est la partie complexe avec beaucoup d'énergie à éliminer*)
- 3 - s'arrêter, contrôler puis manœuvrer au sol (*ces évolutions à basse vitesse sont principalement contrôlées par les roues et leurs freins*)

• Ralentir avant de se poser.

Poser un avion à la plus basse vitesse possible est le premier objectif.

On réduira la vitesse minimale de sustentation grâce à l'utilisation des **volets** qui font augmenter la portance.

Les **spoilers** et les **aérofreins** compléteront le dispositif afin d'amener l'avion jusqu'au sol.

Volets aérofreins et spoilers font l'objet de chapitres à part coté mécanique du vol (AMV).



A 380 en finale (spoilers et volets)

• Ralentir sur la piste.

Les systèmes aérodynamiques participent encore largement au freinage. Les **volets** les **spoilers** et les **aérofreins** sont encore mis à contribution tant qu'ils sont utiles... (*la portance des volets peut, par exemple, être néfaste au freinage des roues*)

Pour les avions militaires (*ou quelques rares exceptions ... comme les navettes spatiales*) un **parachute de freinage** pourra compléter le dispositif purement aérodynamique.



Space shuttle Endeavour with its drag parachute deployed



Va-t-on **freiner aussi avec les roues** ???

Oui mais pas forcément tout de suite car les vitesses sont encore très importantes... et ce ne sera pas forcément la meilleure solution pour dissiper autant d'énergie cinétique ($1/2.m.V^2$) ... en chaleur (*grosse dégradation des disques et plaquettes si utilisés seuls*).

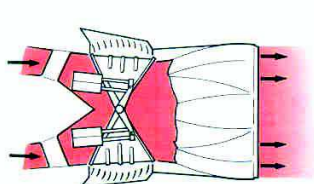
En fait, le mieux c'est d'utiliser le moteur... à l'envers : les **reverses** ou inverseurs de poussée. Ils n'ont pour inconvénients que leur incidence sur la fiabilité, la consommation et surtout le BRUIT !

2) Les "reverses"

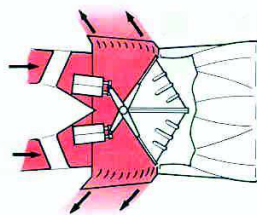
Principalement utilisés sur les jets commerciaux les "**inverseurs de poussée**" ou "**reverses**" ou "**reverse thrust**" consistent à utiliser le réacteur avec la poussée dirigée vers l'avant.

En pratique, un système mécanique de volets commandés par le pilote dévient le flux sortant... le plus possible vers l'avant.

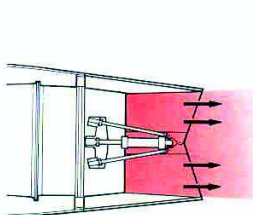
On différencie les 3 systèmes suivants :



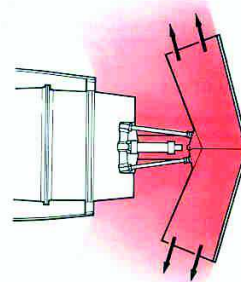
CLAMSHELL DOORS IN FORWARD THRUST POSITION



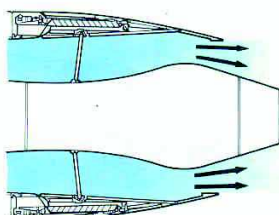
CLAMSHELL DOORS IN REVERSE THRUST POSITION



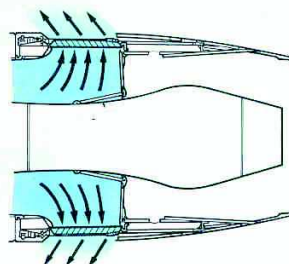
ACTUATOR EXTENDED AND BUCKET DOORS IN FORWARD THRUST POSITION



ACTUATOR AND BUCKET DOORS IN REVERSE THRUST POSITION



COLD STREAM REVERSER IN FORWARD THRUST POSITION



COLD STREAM REVERSER IN REVERSE THRUST POSITION



Notez la différence entre les deux premiers qui redirige le flux chaud (en rouge) et le troisième qui utilise le flux froid (ici en bleu) de la soufflante.

Sauf cas exceptionnels (C17 Globemaster, C5 Galaxie, en forte pente...) les reverses ne peuvent être actionnés que lorsque l'avion est posé au sol.

Pour moteurs à hélice, une position "reverse" du pas variable peut agir de la même façon.



Les hélices de ce C130 peuvent se positionner en "reverse".

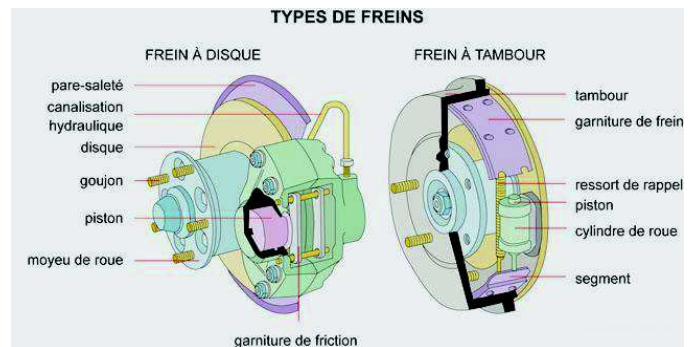
3) Comment freine-t-on les roues d'un avion ?

- Freins à disque ou a tambour ?

Il existe deux type de freins :

- Les freins à tambour *sur les avions légers et/ou anciens*
- Les freins à disque *sur les avions modernes*

Les disques initialement en acier sont maintenant en carbone.



- Détails des freins à disque.

Les avions possèdent des freins à disques multiples. Les pistons actionnent un empilement de plusieurs couches disque/garnitures/disque/garnitures (quatre visibles ici) qui forment un gros bloc.

On utilise plutôt des disques de freins en carbone, plus légers et plus endurants que les disques en acier.

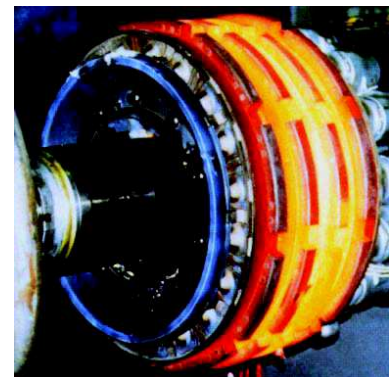
On peut mesurer d'un coup d'œil l'usure du bloc de frein, au moyen d'une pique (cerclée de rouge) qui est visible à l'intérieur du train. Un petit amortisseur limite les problèmes de shimmy vertical (cerclé de jaune).



- Test de résistance des freins carbone.

Aujourd'hui généralisés sur tous les gros porteurs, les composites C/C sont des matériaux de choix pour le freinage aéronautique ou automobile de compétition.

Ces matériaux permettent, de part leurs propriétés thermiques et tribologiques, de dissiper l'énergie cinétique en énergie thermique (jusqu'à 125 MJ par roue en freinage aéronautique).



Test de freins C / C chez messier

4) Cas particulier de l'utilisation de brins d'arrêt.

L'appontage sur **porte avion** nécessite d'arrêter un avion sur des distances très courtes.

On a donc mis au point des systèmes de câbles qui sont accrochés par un crochet placé au bout de la **crosse d'appontage**.



Rafale M



Super étendard

Malheureusement il faut aussi prévoir les incidents et on a développé des filets (**aircraft barricade crash** en anglais).



Ces barrières existent aussi à terre sur certains aéroports...

Comme ici à Sao Paulo pour le Concorde ! ⇒





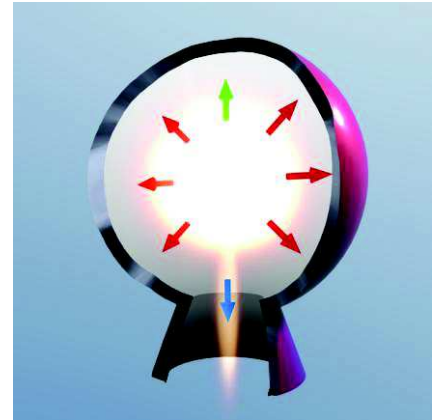
1) Description du fonctionnement d'une fusée

• Le moteur et la propulsion

La propulsion d'une fusée est similaire à celle d'un avion "à réaction". (Principe d'interaction – 3^{ème} loi de Newton).

Interaction (Action et Réaction) ⇒

La nuance provient du fonctionnement des moteurs qui, en atmosphère raréfiée ou hors de l'atmosphère, doivent emporter le comburant (la plupart du temps de l'oxygène) en plus du carburant !



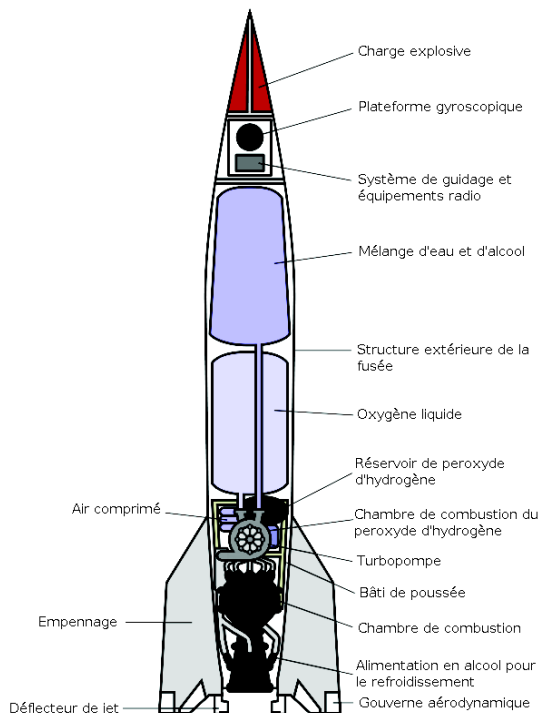
• Le vol, et les lois de la mécanique

Les lois de la mécanique utilisées correspondent à la **conservation de la quantité de mouvement** à chaque instant...

Dans le système fusée, le décollage étant vertical, on se préoccupe très peu des lois de l'aérodynamique (*portance entre autre*), ce sont alors les lois de la balistique qui sont prises en compte.

La fusée décolle lorsque la poussée devient supérieure au poids. A noter que le poids diminue au fur et à mesure de la combustion (aucun apport extérieur).

La caractéristique principale des fusées est que les réservoirs représentent 80 à 90 % de la masse et du volume total du système.



Un missile : le V2 ↑

• Le contrôle et le guidage de la fusée (pilotage)

Le contrôle de trajectoire est effectué par des **gyroscopes**. Le guidage s'effectue selon plusieurs systèmes

- Des **tuyères orientables** (ou des **déflecteurs de jet**) pour les premières parties du vol (forte puissance)
- Parfois, pour les engins évoluant dans la troposphère, des **gouvernes aérodynamiques**
- Puis de **petits moteurs auxiliaires** pour les petites corrections en dehors de l'atmosphère terrestre.

2) Un peu d'histoire...

Si le principe de propulsion par transformation d'énergie chimique en énergie cinétique est connu depuis l'antiquité et les pièces d'artifice propulsées par de la **poudre noire** (*poudre à canon*) depuis le IX^{ème} siècle av. J.C., les moteurs à **ergols liquides** ne sont connus que depuis la fin du XIX^{ème} siècle. Ce n'est que dans les années qui suivirent la Seconde guerre mondiale que les moteurs à poudre et à ergols liquides prirent leur énorme importance, pour la propulsion de missiles et de fusées spatiales.



Fusée utilisée lors d'une bataille en 1232 ↑

Depuis, on n'a cessé de les perfectionner et aujourd'hui leur emploi reste primordial pour la propulsion spatiale. Afin de pallier leurs défauts, on recherche actuellement des solutions alternatives, par exemple pour la propulsion de sondes spatiales ou l'accélération atmosphérique par d'autres moteurs, plus ou moins proches : **superstatoréacteur**, moteur **ionique** ou **VASIMR**. *Variable specific impulse magnetoplasma rocket = Fusée magnétoplasma à impulsion spécifique variable*

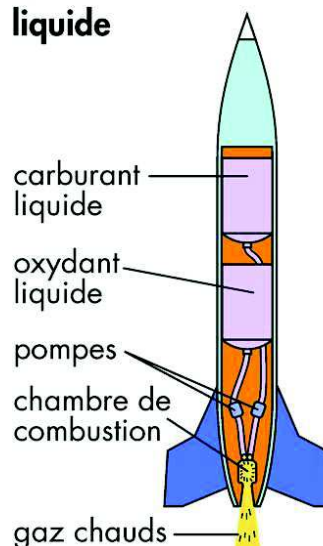
3) Les différents "moteurs-fusées"

Le moteur-fusée est le type de moteur au principe de fonctionnement le plus simple : deux **ergols** brûlent dans une chambre de combustion, sont accélérés par une tuyère de Laval et sont éjectés à grande vitesse par une tuyère.

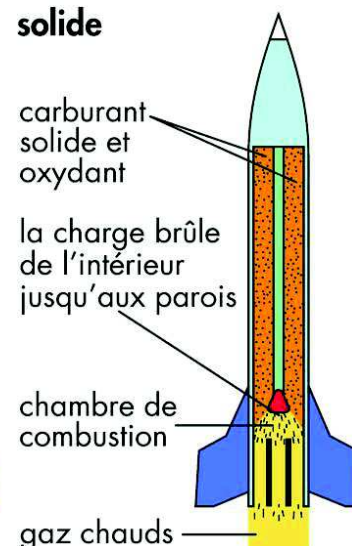
Il en existe deux grandes catégories :

- * moteurs-fusées à **ergols solides** ;
- * moteurs-fusées à **ergols liquides**.

fusée à carburant liquide



fusée à carburant solide



4) Caractéristiques des propulseurs fusées

• Plusieurs caractéristiques importantes des moteurs de fusées :

L'**impulsion spécifique**, exprimée en seconde, mesure combien de secondes un kilogramme d'ergol fournit une poussée de un kilogramme-force, soit 9,8 Newton.

Plus elle est élevée, meilleur est le rendement massique du système, en termes de force exercée ; attention cependant, ce qui compte en réalité n'est pas cette force, mais la quantité de mouvement transmise au véhicule, de sorte que l'optimum énergétique ne s'obtient pas en maximisant l'impulsion spécifique.

Le **débit massique**, correspondant à la masse d'ergols consommée par unité de temps.

La **vitesse d'éjection des gaz**, dont dépend indirectement la vitesse atteinte par le véhicule.

Le **rapport poids/poussée**, qui représente le poids du moteur sur sa poussée. Plus le moteur est léger et plus sa poussée est importante, et plus avantageux est son rapport.

- **La sortie des gaz (Tuyère de Laval & Tuyère)**

La **tuyère de Laval** (*) est la partie située entre la chambre de combustion et la tuyère. Elle sert à accélérer les gaz jusqu'à la vitesse du son.

La **tuyère** est la partie où les gaz accélèrent et sortent du moteur. Sa forme caractéristique est due au besoin d'adapter la pression du flux de sortie à la pression ambiante, pour de raisons de stabilité de combustion et de poussée. *Cependant, en gagnant de l'altitude, le diamètre de sortie devrait s'élargir, ce qui est difficile à faire avec une configuration classique. Pour contrer ce problème, un nouveau type de tuyère est développée : la tuyère à compensation d'altitude. Ce genre de tuyère a la particularité de laisser un large espace aux gaz, leur permettant de 'coller' aux changements de pression...*

(* Wikipédia) La tuyère de Laval est un tube pincé utilisé pour accélérer les gaz qui le traversent à une vitesse supersonique. Elle a été inventée en 1887 par Gustaf de Laval. En 2011, elle est utilisée dans les moteurs-fusées, les turbines à vapeur et les turbines à gaz. Cette tuyère améliore la poussée d'un moteur-fusée, poussée qui est (entre autres) proportionnelle à la vitesse d'éjection des gaz.

Ci-contre le schéma correspondant et l'augmentation de vitesse obtenue (but recherché).

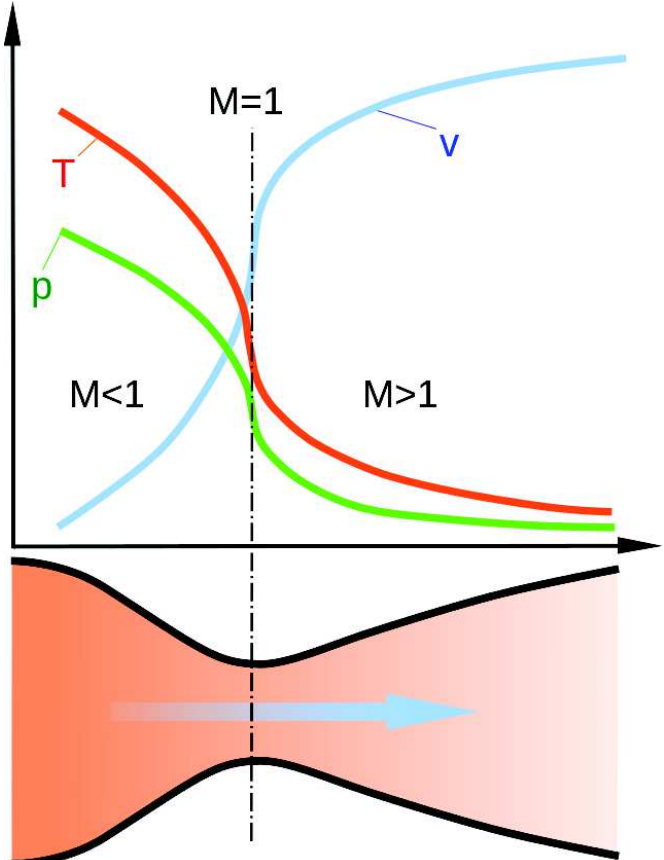


Diagramme pression (P), vitesse (V), température (T) dans une tuyère de Laval

5) Réacteur fusée utilisant des ergols liquides.

• Principe de fonctionnement :

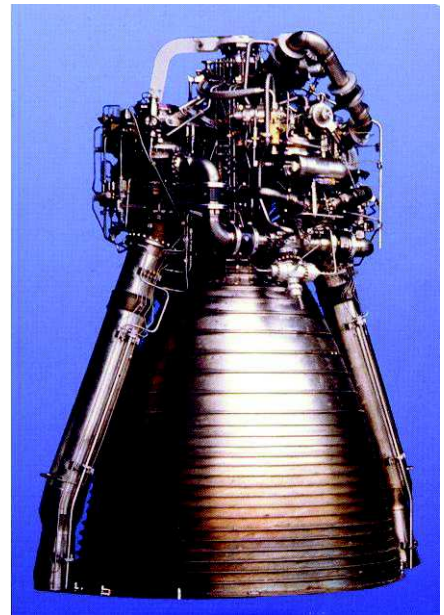
Ces moteurs utilisent des ergols stockés dans des réservoirs séparés, qui sont injectés dans une chambre de combustion puis éjectés par la tuyère, générant la poussée.

Ces deux corps sont injectés sous forte pression dans la chambre de combustion.

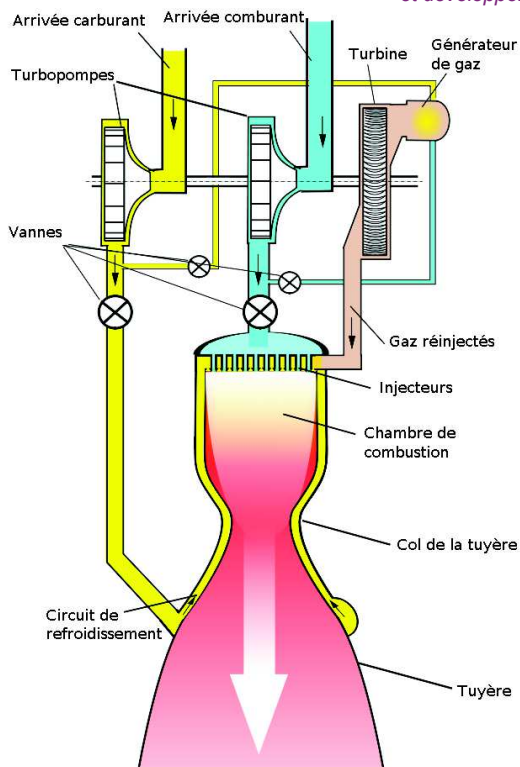
Leur combustion très vive produit une grande quantité de gaz à haute température.

Accélérés par leur passage au travers de la tuyère, leur éjection à grande vitesse produit la poussée.

- Les **vitesse d'éjection** peuvent être très élevées : 2000 à 3000 m/s.
- Les **impulsions spécifiques, Isp**, peuvent atteindre 500 s, suivant les couples d'ergols choisis.



Moteur Vulcain, (étage principal Ariane 5), alimenté par de l'hydrogène et de l'oxygène liquides et développent une poussée de l'ordre de 1100 kN.



↑ Schéma de fonctionnement d'un moteur-fusée à ergols liquides classique

Les principaux couples d'ergols sont :

- * acide nitrique - kérosène
- * hydrogène liquide - oxygène liquide (LOX)
- * LOX - kérosène
- * peroxyde d'hydrogène - hydrazine/méthanol
- * oxygène-hydrazine
- * peroxyde d'azote - kérosène
- * peroxyde d'azote - hydrazine
- * peroxyde d'azote - 1,1-diméthylhydrazine

Avantages :

Bien que plus complexes que les propulseurs à poudre, les propulseurs à liquides présentent plusieurs avantages :

- Les propergols liquides sont plus énergétiques.
- La durée de fonctionnement peut être commandée.
- Ces moteurs peuvent être rallumés en vol.
- On sait concevoir des moteurs à poussée modulable.
- Avec des chambres refroidies, ils peuvent fonctionner longtemps.
- La qualification au sol est aisée, la fiabilité aisément démontrable.

Inconvénients : La nécessité d'injecter les ergols sous forte pression dans la chambre de combustion complique la réalisation des moteurs-fusées à propergols liquides, ainsi qu'on peut le voir sur la photo du moteur Vulcain, dans la partie supérieure du moteur (turbo-pompes).

6) Les propulseurs à propergols solides.

• Moteur à ergols solides

Le plus simple, le moins cher et le plus fiable... On le retrouve dans la plupart des missiles tactiques et balistiques et dans les propulseurs d'appoint.

Les propergols (*) les plus courants sont :

* **Poudre noire** (salpêtre = nitrate de potassium, soufre et charbon de bois en pourcentages dépendant de l'usage souhaité), très souvent utilisée dans la construction amateur.

* Monergol à base de **nitrocellulose** (Jules verne l'île mystérieuse), amélioré par l'ajout d'aluminium.

* **Nitrate d'ammonium** (souvenez vous d'AZF), souvent mélangé avec de la poudre d'aluminium.

* **Perchlorate d'ammonium**

* **Zinc-Soufre**

(*) On utilise le terme de propergol pour désigner un mélange oxydant/réducteur **autonome** de ce type de moteur. La combustion se déroule idéalement en couches parallèles. La géométrie initiale du bloc de propergol fixe alors la loi d'évolution de surface du bloc, donc sa loi de débit et de poussée. Les géométries les plus courantes sont :

* à combustion frontale : le bloc brûle "en cigarette", c'est-à-dire avec une surface de combustion faible en regard du volume mais constante ;

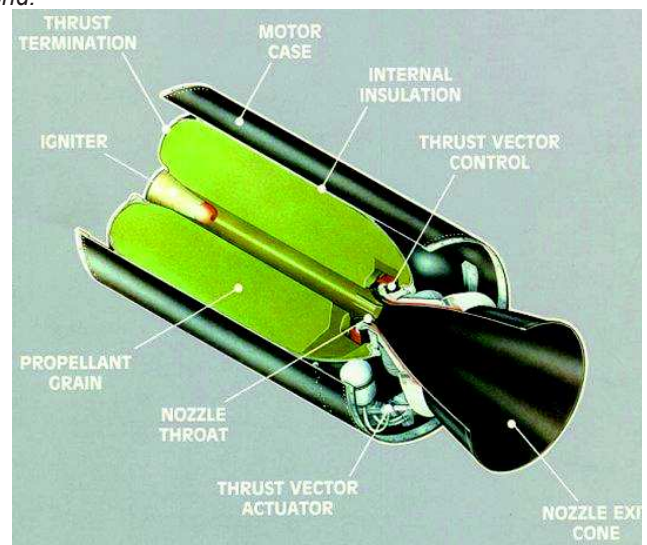
* avec un canal : un canal est pratiqué dans l'axe du bloc et la combustion évolue radialement. Le canal peut être axisymétrique ou présenter un motif particulier, en étoile, en U ou rond.

Principe de fonctionnement :

Les propulseurs à propergols solides forment un ensemble très simple : le corps renfermant les propergols solides (oxydant + réducteur) et une tuyère. Le propergol, appelé improprement poudre, a la consistance d'un caoutchouc dur.

La combustion des propergols délivre des gaz chauds suivant un débit préétabli que la tuyère détend pour créer la poussée.

Les vitesses d'éjection sont honorables (2600 m/s) et les débits massiques élevés. Ils peuvent donc fournir de très fortes poussées (jusqu'à 6000 kN).

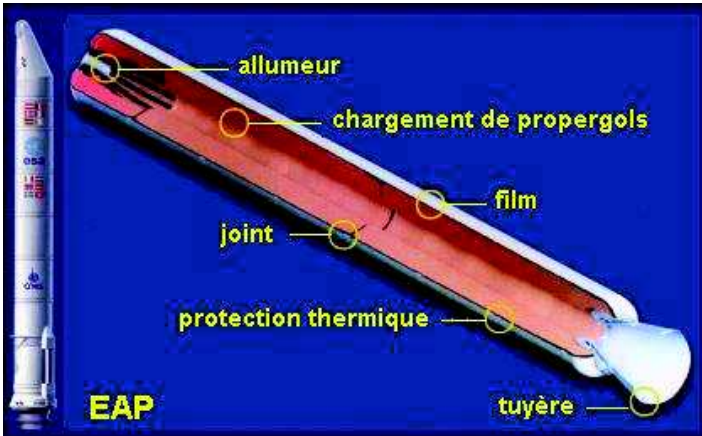


Ariane 5 et le Shuttle (Navette spatiale) combinent toutes deux des boosters à propergol solide et un moteur à propergol liquide.

Ariane 5 comporte deux étages d'accélération à poudre (EAP) qui sont des propulseurs à propergols solides.



Vue en coupe d'un étage d'accélération à propergols solides (EAP).



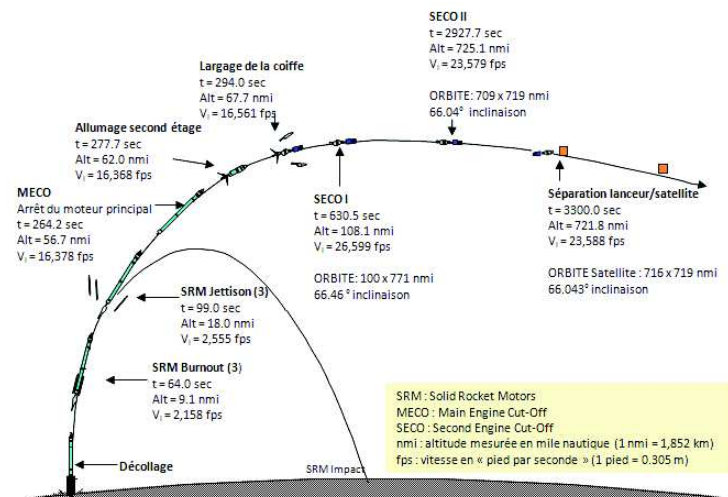
Un missile Harpoon

7) Le vol des fusées (Bonus CAEA).

• La phase propulsée

Elle comprend une première partie accélérée (V_z augmente) et une deuxième partie durant laquelle la vitesse est stabilisée par équilibre entre la poussée du propulseur et les forces de résistance à l'avancement (traînée et composante de poids) comme pour le vol aérodynamique.

Une inclinaison programmée en fin de propulsion permet d'atteindre l'objectif visé (orbite ou point précis).



Lancement d'un satellite altimétrique Jason-2 par un lanceur Delta II en 2008

• La phase balistique

Dès l'extinction du propulseur, la fusée n'est plus soumise qu'à l'attraction terrestre comme une balle de fusil (balistique). La vitesse varie donc évidemment puisque la somme des forces n'est pas nulle.

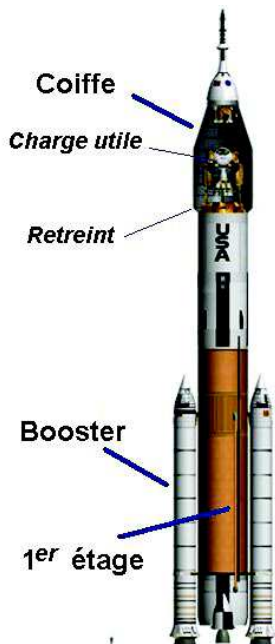
La fusée va atteindre un "**point culminant**" avant de redescendre vers le sol selon une trajectoire balistique ... ou une trajectoire freinée (parachute).

Dans les deux cas la résistance de l'air va permettre d'obtenir une vitesse limite.

• Le vol oblique

Le vol oblique se distingue pas la décomposition du poids en deux forces composante sur l'axe de la fusée qui oppose une moindre résistance à l'avancement. Sur la rampe de lancement, cette composante déviatrice est compensée par la réaction de la rampe.

8) Caractéristiques géométriques de la fusée



L'axe de la Fusée est l'axe de symétrie que l'on s'efforce de maintenir parallèle à la trajectoire pour minimiser la traînée.

Il existe des fusées non symétriques. C'est le cas de la navette installée sur son lanceur. On retrouve dans ce cas les axes de roulis, tangage, et lacet...

On appelle **maître couple**, la section S perpendiculaire à l'axe de la fusée. Elle est utilisée pour le calcul de la traînée aérodynamique.

On appelle **retreint d'une fusée**, le raccord conique reliant deux éléments de sections différentes du corps de la fusée, le diamètre le plus grand étant du côté de la "coiffe".

On appelle **finesse d'une fusée**, le rapport Longueur fusée / Diamètre le plus grand de la fusée

On appelle **rapport des masses** ou **indice de construction** la valeur du rapport :

$\text{Indice de construction} = \frac{\text{Masse totale au décollage}}{\text{Masse finale}}$
--

L'altitude maximum atteinte dépend de la masse de carburant et de la masse de son enveloppe. On utilise plusieurs étages pour se débarrasser des enveloppes inutiles au fur et à mesure que le carburant est consommé. Au final, la charge utile contenue dans une coiffe n'excède pas 5%.

9) Orbite des satellites

• Les orbites.

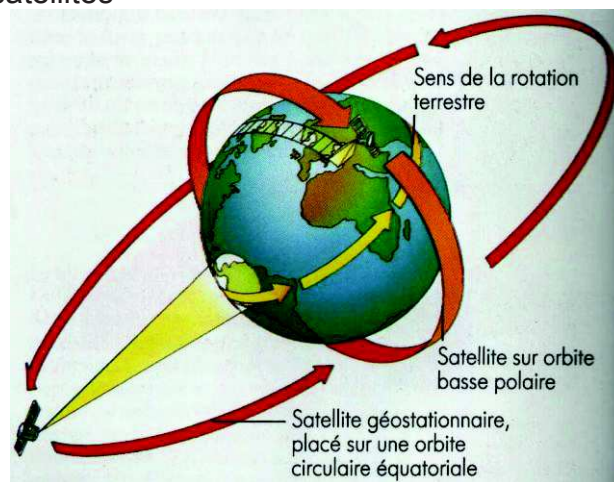
Les **orbites** : ce sont les trajectoires, parcourues par les engins spatiaux autour de la Terre (ou autour d'autres planètes). Cette trajectoire est nécessairement plane et inclus le centre d'attraction... donc le centre de la Terre pour les satellites

Selon leur distance par rapport à la terre, il y a :

- les **orbites circulaires** qui peuvent être **polaires** ou **équatoriales** ou d'incidences différentes, l'on distingue les orbites circulaires basses (200 à 1.000 km), utilisées pour les vols habités et pour les satellites d'observation, et les orbites circulaires hautes (surtout pour les satellites de navigation).

- les **orbites elliptiques**, avec apogée (point distal) et périégée (point proximal).

- **l'orbite géostationnaire** est située à environ **36 000 km**. Au delà de cette distance évoluent les fusées interplanétaires, capables d'échapper à l'attraction terrestre.



Quelques "orbites" usuelles

• L'orbite circulaire.

Sur cette trajectoire (c'est vrai pour toutes les orbites !) la seule force est l'attraction du corps central (le poids !) ... on a donc (2^{ème} loi de Newton) $P = m.a$ avec $P = m.g = G m M_T / (R_T + h)^2$ (**loi de la gravitation universelle**) et $m.a = m.v^2 / (R_T + h)$ l'égalité permet d'extraire

$$V = \sqrt{\frac{G.M_T}{(R_T + h)}}$$

La vitesse est dépendante du rayon de l'orbite... elle diminue lorsque le rayon de cette orbite augmente.

$M_T = 6 \times 10^{24}$ kg $G = 6,67 \times 10^{-11}$ (S.I.) $R_T = 6400$ km (approx)

Une orbite circulaire se définit par :

- le **plan de l'orbite**
- l'**inclinaison** (*i* angle en degré) / **plan de l'écliptique**
- la **période** (*T*) de révolution ou période orbitale

- **L'orbite géostationnaire (circulaire).**

Sur cette orbite un satellite reste à la verticale d'un point situé sur la terre. Elle est fondamentale pour les satellites de télécommunications et télévision. Elle sert pour certains satellites d'observation de la terre. Elle ne peut se situer que sur le plan équatorial avec une période de révolution identique et de même sens que à celle de la terre.

- Altitude : 36 000 km
- Inclinaison : 0°
- Période orbitale: **23 h 56 minutes**
- $V = 3\,070$ m/s

- **Exemple de calcul associé**

Orbite géostationnaire
$$V = \sqrt{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 6 \cdot 10^{24}}{(36000 + 6400) \cdot 10^3}} = 3072 \text{ m.s}^{-1} \text{ (en simplifiant } 3070 \text{ m.s}^{-1}\text{)}$$

En recalculant le trajet (pour un cercle la distance à parcourir est de $2\pi(R_T+h)$)

On en déduit la période (durée d'un tour) par $T = D/V$ et, si on respecte les unités, on retombe sur $T = 23 \text{ h } 56'$.

- **Orbites héliosynchrones (circulaire).**

Un satellite placé sur une telle orbite repasse au-dessus d'un point donné de la surface terrestre à la même heure solaire locale.

Cette orbite est utilisée par tous les satellites qui effectuent des observations photographiques en lumière visible, car l'éclairement solaire du lieu observé sera peu variable d'un cliché à l'autre : satellites météorologiques, satellite de reconnaissance, satellite de télédétection, etc...

Il s'agit d'une orbite polaire (qui passe près du pôle), basse (entre 600 et 1000 km) et de périodicité courte (décrite toutes les 96 à 110 minutes).

Le satellite coupe environ 12 fois par jours le plan de l'équateur terrestre et survole les lieux vers 15 h locale.

- **Orbite elliptique.**

En pratique les objets satellisés suivent des orbites elliptiques... le cas particulier des orbites circulaires étant exceptionnel. Le grand axe de l'ellipse s'appelle aussi ligne des **apsides**. Il relie les deux points remarquables ou extrêmes de l'orbite d'un objet céleste pour lesquels la distance est minimale (apside inférieure, ou **périapside** ou périapse) ou maximale (apside supérieure, ou **apoapside**, ou apoapse) par rapport au foyer de cette orbite.

On utilise aussi des termes **périhélie** et **aphélie** ou encore **périgée** et **apogée**.

10) La vitesse de libération

La **vitesse de libération** (aussi appelée vitesse d'évasion, en anglais escape velocity) d'un engin spatial est la vitesse qui, si elle est communiquée à un objet partant depuis la surface d'une planète, sera suffisante pour qu'il s'échappe définitivement de l'attraction gravitationnelle de cette planète (on néglige la résistance de l'atmosphère).

C'est la vitesse minimale que doit atteindre théoriquement un corps pour s'éloigner indéfiniment d'un astre malgré l'attraction gravitationnelle de ce dernier.

Inversement ... la vitesse de libération d'une planète est aussi la vitesse qu'un corps, initialement au repos et à distance infinie, acquiert en tombant jusqu'à la surface de la planète.

La vitesse de libération se détermine à partir de la conservation de l'énergie mécanique.

On utilise DEUX points. Le premier à l'infini...

- À une distance infinie, sa vitesse et son énergie potentielle de gravitation sont nulles. Son énergie mécanique est donc nulle.

Le second au niveau du sol...

- À la distance R_T (sur la terre), la vitesse V du corps est la vitesse de libération recherchée. L'énergie potentielle de gravitation est négative puisque la référence a été placée nulle à l'infini.

$$E_m = (E_c + E_p)_{\text{au sol}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_L^2 - \frac{G \cdot M \cdot m}{R_T} = (E_c + E_p)_{\text{à l'infini}} = 0$$

Les masses se simplifient et on obtient la formule $\frac{1}{2} \cdot V_L^2 = \frac{G \cdot M}{R_T}$ soit $V_L = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M}{R_T}}$.

• **Exemple de calcul**

La **vitesse de libération d'un corps quittant la surface de la Terre**, avec $M_T = 6 \times 10^{24}$ kg, $G = 6,67 \times 10^{-11}$ (S.I.) et $R_T = 6400$ km (approx), est de l'ordre de **11,2 km/s** (soit environ 40 000 km/h). Pour quitter la Lune on trouverait 2,4 km/s.

11) Un petit rappel des 3 lois de Kepler

• **Première loi - Loi des orbites**

Les satellites décrivent des trajectoires elliptiques... pour lesquelles le corps attracteur (la Terre) est l'un des foyers. L'orbite circulaire n'est donc qu'un cas particulier !

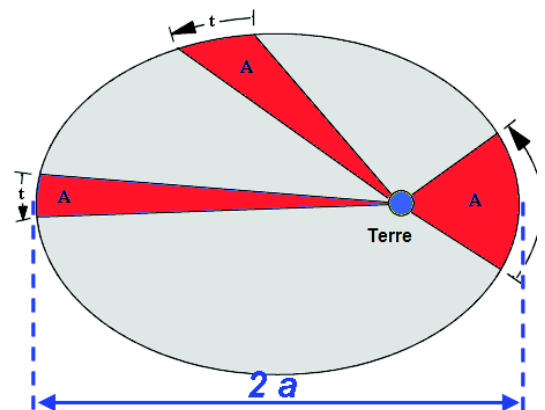
• **Seconde loi - Loi des aires.**

Les aires balayées (A) par le rayon de la trajectoire pendant des durées égales (t) ... sont égales !

Sur ce schéma la trajectoire est elliptique ce qui permet de constater que, pour une durée identique (t), les distances parcourues sont plus faibles lorsque le satellite est éloigné de la Terre.

La vitesse d'un satellite devient donc plus grande lorsqu'il se rapproche de la planète.

Elle est maximale au voisinage du rayon le plus court (**périhélie**), et minimale au voisinage du rayon le plus grand (**aphélie**).



Loi des aires (Képler)

• **Troisième loi - Loi des périodes**

Le carré de la période (sidérale) T (*) d'un satellite est directement proportionnel au cube du demi-grand axe (a) de la trajectoire elliptique de l'objet.

(*) temps entre deux passages successifs devant une étoile lointaine.

$$T^2 = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot a^3}{G \cdot M_T}$$

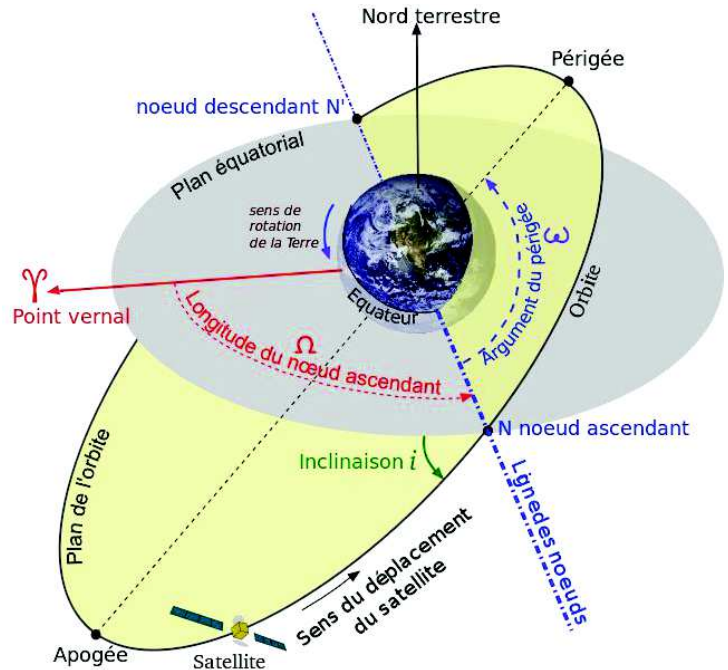
- T est la période du satellite,
- a est le demi grand axe de la trajectoire elliptique,
- $G = 6,67 \times 10^{-11}$ (S.I.) est la constante de la gravitation universelle,
- M_T est la masse de l'objet attracteur (en l'occurrence la Terre 6×10^{24} kg)

La vitesse d'un satellite dépend donc de son altitude : plus le satellite est éloigné plus il évolue lentement !

En prenant (*pour simplifier*) des trajectoires circulaires on a les ordres de grandeurs suivant :

A 280 km d'altitude un satellite évolue à **7,75 km/s** et fait le tour de la Terre en 1 h 30.

A 35 900 km d'altitude on tombe à **3,07 km/s** et une durée de quasiment 24 h pour un tour !



• **Un peu de physique"**

Un élève de terminale S vous établira que, pour un satellite tournant autour de la Terre sur une orbite circulaire :

La vitesse sur orbite :
$$V_{Sat} = \sqrt{\frac{G.M_T}{R_T + h}}$$

La période orbitale :
$$T_{Sat} = 2.\pi \sqrt{\frac{(R_T + h)^3}{G.M_T}}$$

L'altitude se déduit de la distance au centre de la Terre $R_T + h = \sqrt[3]{\frac{T_S^2.G.M_T}{4\pi^2}}$ en enlevant R_T

avec : $G = 6,6 \times 10^{-11} N.kg^{-1}$ $M_T = 6,6 \times 10^{24} kg$; $R_T = 6,378 \times 10^6 m$ au niveau de l'équateur

12) La propulsion électrique

La propulsion électrique est un type de propulsion à réaction à applications spatiales. Le principe est similaire à la propulsion chimique dans le sens où les produits éjectés sont accélérés comme les gaz brûlés dans une tuyère.

On distingue 3 modes : thermique (on chauffe un gaz); électromagnétique (comme le type plasma), et électrostatique (comme pour le moteur ionique)

• **Le moteur à plasma**

Le concept théorique date des années 70 et la réalisation des années 90. Les recherches continuent et de nouveaux prototypes sont actuellement testés au sol (VS 200) avant d'effectuer des test programmées dans l'ISS à partir de 2013.

Les études de propulseur spatial à plasma les plus abouties concernent le projet VASIMR, (*acronyme de Variable specific impulse magnetoplasma rocket*) : « Fusée magnétoplasma à impulsion spécifique variable ». Il utilise des champs et des rayonnements électromagnétiques variables (sans électrodes) pour chauffer, ioniser et accélérer un propergol vaporisé (hydrogène argon ou hélium).

1. Le gaz neutre (*hydrogène ou hélium*) est injecté en entrée du dispositif.

2. Un tube en quartz recueille et confine ce gaz neutre avant son ionisation.

3. Une « antenne hélicon » spéciale pré-ionise le gaz (*chauffage à 30 000 kelvins*) à l'aide de radiofréquences émises dans un champ magnétique axial (*rayonnement hélicon excitant les électrons*).

4. Le plasma est confiné à distance de la paroi par des solénoïdes entourant la chambre cylindrique, créant un champ magnétique axial dans l'enceinte.

5. Une « antenne ICRH » (*Ion Cyclotron Resonant Heating*) ionise totalement le plasma en le portant à très haute température (*10 megakelvins*) et génère un champ électrique induit qui accélère les ions en une trajectoire hélicoïdale vers la sortie. C'est le booster principal.

6. Une « tuyère magnétique » en sortie contrôle le jet de plasma en modelant axialement la trajectoire des ions.

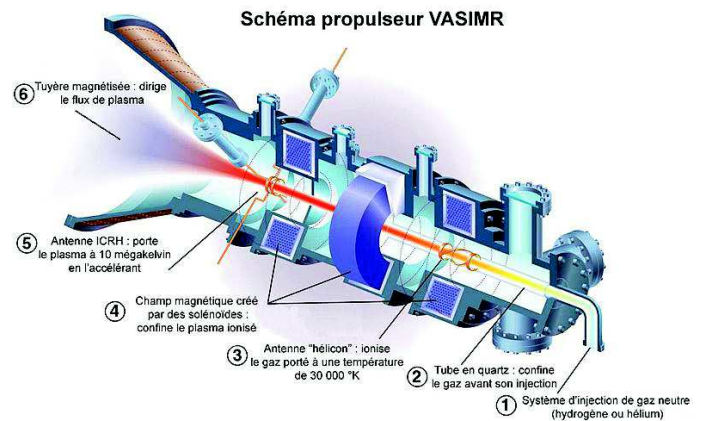


Schéma de VASIMR en coupe :

VASIMR est une solution polyvalente, alternative aux deux systèmes spécialisés existants que sont les propulseurs à haute poussée et à faible impulsion spécifique (comme les moteurs-fusées à propulsion chimique) d'un côté, et les propulseurs à faible poussée et à haute impulsion spécifique (comme les moteurs ioniques) de l'autre, car il est capable de fonctionner dans les deux modes en ajustant à tout moment ses paramètres de fonctionnement.

• Le moteur ionique

Un moteur ionique est un moteur qui produit sa force de propulsion en projetant des ions à très haute vitesse. Son principe a déjà été pensé au début du XXe siècle et il est employé au début du XXIe siècle pour le vol spatial.

Par comparaison avec les moteurs fusée conventionnels, dans lesquels il faut embarquer la masse à éjecter et l'énergie pour l'éjecter, les moteurs ioniques ne transportent que la masse à éjecter. L'énergie nécessaire pour l'éjection peut être générée sur place avec des panneaux solaires ou provenir d'un générateur thermoélectrique à radioisotope.

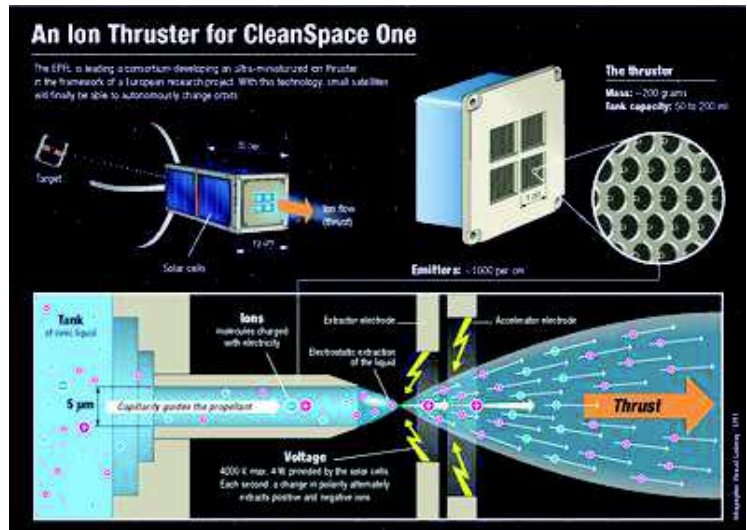
Les moteurs fusée conventionnels fournissent en peu de temps une accélération importante mais utilisent pour cela de grandes quantités de carburant. La réserve de carburant elle-même doit être propulsée tout autant que le véhicule spatial. Les moteurs fusée doivent pouvoir supporter des contraintes énormes (pression, températures), ce qui les rend lourds, et ils doivent eux-mêmes être propulsés. En conséquence, le véhicule spatial doit emmener avec lui encore plus de carburant.

Les moteurs ioniques, qui produisent une force de propulsion faible mais sur une très longue durée, sont particulièrement économes. Ils produisent, par kilogramme de carburant embarqué, une quantité de travail très supérieure à celui des moteurs fusée conventionnels. Ils peuvent donc, après un temps, certes, non négligeable, conférer la même vitesse au véhicule spatial au prix d'une consommation de carburant bien moindre. Ce véhicule peut alors emporter moins de carburant. Les moteurs ioniques sont également beaucoup plus légers (une dizaine de Kg), permettant ainsi une économie supplémentaire de carburant.

Ces moteurs sont déjà en service sur plusieurs satellites (Astra, Intelsat, ...) et des sondes (Hayabusa). Ils ont aussi montré leur efficacité sur un véhicule spatial : Deep Space 1 !

Le satellite géostationnaire (36 000 km) Artémis, mal positionné (17 000 km !!!) ... a pu rejoindre son orbite en 18 mois grâce à cette motorisation qui n'avait pourtant pas été conçue pour ça !!!

Des prototypes de 200 g sont étudiés pour propulser les nano satellites jusqu'à la lune !!!



Propulseur ionique pour nano satellite.

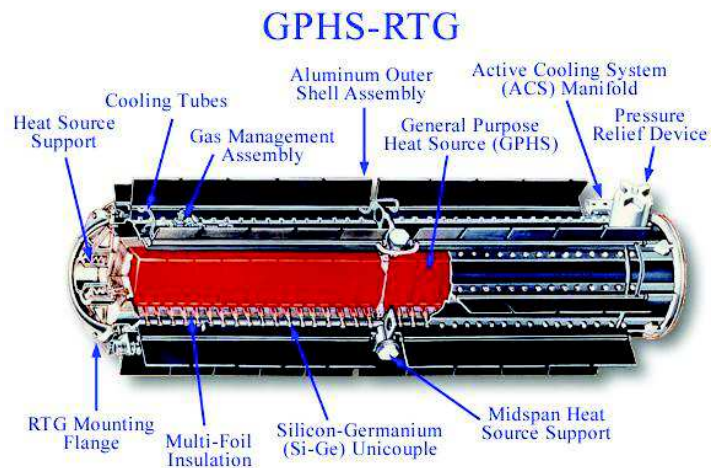
<http://www.enerzine.com/603/13757/impression-breve.html>

13) Le nucléaire dans l'espace

La grande quantité d'énergie /kg transporté tente les ingénieurs spatiaux... Ils ont déjà utilisé cette source dans des générateurs électriques... ils projettent de l'utiliser dans la propulsion !

• Les générateurs thermoélectriques nucléaires

Un générateur thermoélectrique à radioisotope (RTG en anglais, pour Radioisotope Thermoelectric Generator ; en français : GTR) est un générateur électrique nucléaire conçu comme une minuscule centrale classique terrestre... même si la récupération de la chaleur dans l'espace utilise des processus plus complexes. Il produit son l'électricité à partir de la chaleur résultant de la désintégration radioactive de matériaux riches en un ou plusieurs radioisotopes comme le Pu₂₃₈.



Ces générateurs sont utilisés pour les sondes spatiales qui s'éloignent du Soleil et pour les robots déposés sur la Lune ou sur Mars.

Les panneaux solaires ne peuvent alimenter les sondes spatiales d'exploration lointaine car la puissance reçue du soleil décroît rapidement (selon une loi en 1/r²) au fur et à mesure qu'on s'en éloigne. On utilise ce type de générateurs pour aller au-delà de l'orbite de Mars, (Pioneer 10 et 11, Voyager 1 et 2, Galileo, Cassini, New Horizons etc ...).

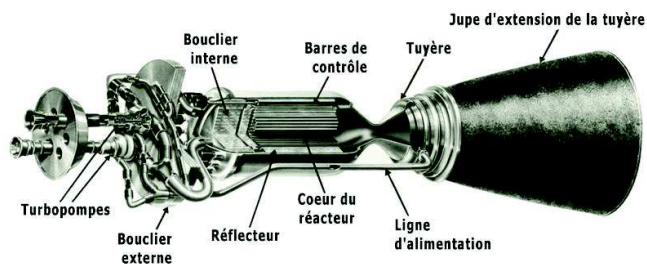
Pour les robots (Viking 1 et 2 sur Mars) l'intérêt est de pouvoir fonctionner la nuit.

• La motorisation nucléaire ? (Wikipédia)

La propulsion nucléaire thermique ou nucléo-thermique est un mode de propulsion des fusées qui utilise un réacteur nucléaire pour chauffer un fluide propulsif. Celui-ci, comme dans le cas d'un moteur-fusée classique, est expulsé via une tuyère pour fournir la poussée qui propulse la fusée. Ce type de propulsion permet d'atteindre en théorie des vitesses d'éjection de gaz nettement plus élevées et donc un **meilleur rendement que la propulsion chimique** utilisée sur les lanceurs actuels.

Différentes architectures ont été étudiées depuis le début de l'ère spatiale du simple cœur solide (similaire à celui d'une centrale nucléaire) jusqu'aux concepts plus complexes mais plus efficaces tels que les cœurs gazeux.

Bien qu'un prototype ait été testé au sol par les États-Unis (moteur NERVA 1960 à 1972), aucune fusée utilisant ce type de propulsion n'a encore jamais volé. Des recherches importantes sont encore nécessaires entre autres pour diminuer le rapport poids/poussée.



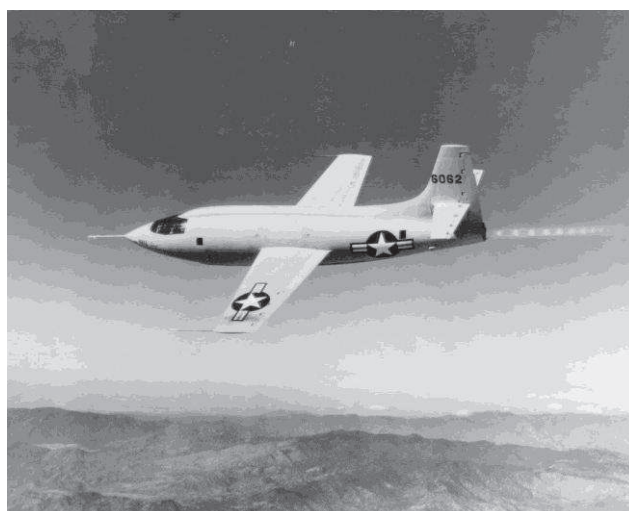
Le moteur NERVA (Nuclear Engine for Rocket Vehicle Application)

Si elle est retenue, la propulsion nucléaire devra faire face à une partie de l'opinion publique fondamentalement hostile à tout lancement d'engins nucléaires. Aujourd'hui, le recours à la propulsion nucléaire n'est évoqué que dans le cadre du programme Constellation, pour des missions habitées hypothétiques vers Mars, à échéance éloignée (après 2037).

14) Les propulseurs fusées ... utilisés sur des avions.

Les moteurs fusées ont été utilisés sur certains avions très spéciaux

Du X15 ci-dessous au X1 ci-contre



Parfois des avions conçus pour des missions spécifiques. Mission d'interception pour le Messerschmidt 163. (Me 163 Komet) .

On utilise aussi parfois des fusées d'appoint pour améliorer les performances lors d'un décollage.(JATO)

15) Pour aller plus loin

- [Compléments sur l'impulsion spécifique \(Wikipédia\)](#)

L'impulsion spécifique (notée généralement Isp), dans le domaine de l'aéronautique, est le quotient de deux grandeurs, dont l'une est la poussée d'un propulseur, et l'autre le produit du débit massique de propergol par la valeur normale de l'accélération de la

pesanteur (ou débit-poids du propergol éjecté). L'impulsion spécifique permet donc de comparer l'efficacité d'un système de propulsion ; plus elle est grande, plus le système est efficace.

L'impulsion spécifique, homogène à un temps, s'exprime en unités de temps (le plus souvent en secondes).

Elle indique la durée pendant laquelle un kilogramme de propergol produit une poussée permettant de déplacer une masse d'un kilogramme (soit environ 9,81 N) dans le champ

gravitationnel terrestre : $I_{SP} = \frac{F}{q \cdot g_0}$

avec F la poussée (en N), q le débit massique d'éjection des gaz (en kg/s) et g_0 l'accélération de la pesanteur (en m/s^2 ou N/kg). À poussée égale, plus l'impulsion spécifique d'un propulseur est grande, moins il consomme d'ergols.

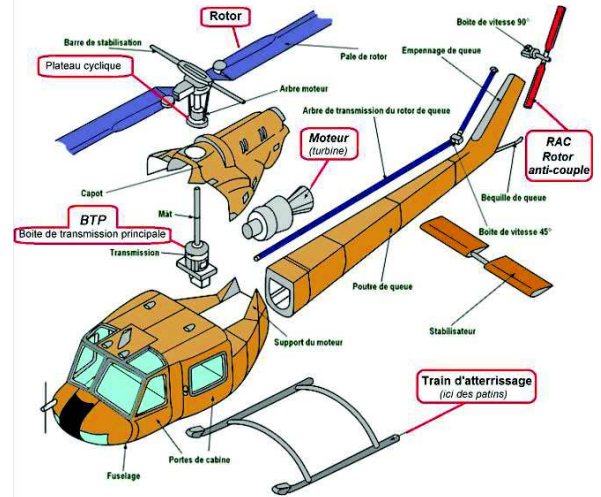
On utilise le couple dihydrogène liquide (H_2_{liq}) / (O_2_{liq}) dioxygène liquide, qui est le meilleur choix actuel sur le second étage de la fusée Ariane 5. Il a une impulsion spécifique d'environ 440 s.



1) Description globale de l'appareil

L'hélicoptère comporte généralement et principalement :

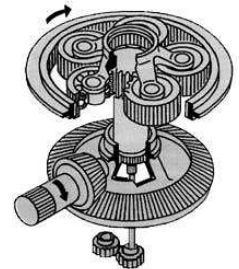
- D'une **voilure tournante**, ou **rotor**, constituée de **pales**.
- D'une **boîte principale de transmission (BTP)**.
- De commandes de vol agissent sur le rotor grâce au **plateau cyclique**.
- D'un **moteur** (turbines ou 4 temps à piston).
- D'un **rotor de queue anti-couple**.
- D'un **train d'atterrissage** (patins, flotteurs ski ou roues).



2) La boîte de transmission principale BTP

La **boîte de transmission principale (BTP)** est un élément primordial de l'hélicoptère. La BTP permet la transmission de la puissance des moteurs vers le rotor principal, ainsi que vers le **rotor anti-couple (RAC)**. Elle est dimensionnée pour répondre à plusieurs contraintes mécaniques :

- réduction de vitesse (entre la prise de mouvement « entrée » et « sortie ») ;
- alimentation des accessoires (prise de puissance) ;
- renvoi d'angle (horizontal/vertical).



Elle est composée généralement de plusieurs engrenages appelés planétaires et satellites permettant de réduire la vitesse de rotation de sortie moteur (plusieurs dizaines de milliers de tours par minute pour les moteurs à turbine) et de transmettre la puissance au **rotor principal** (généralement aux alentours de **200 à 400 tr/min** selon le diamètre rotor) ainsi qu'au RAC. Cette transmission de puissance est assurée par des engrenages (droits, hélicoïdaux, trains épicycloïdaux...).



BTP en coupe

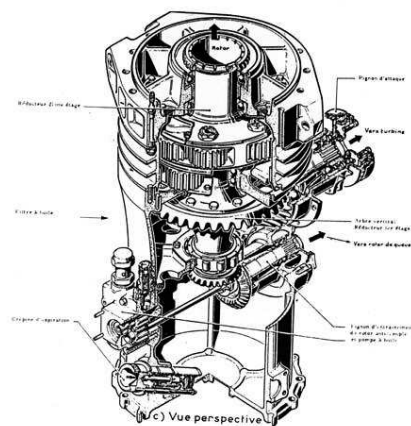
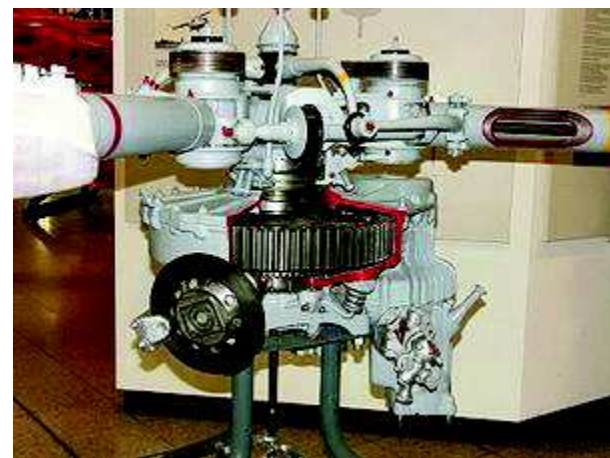


Fig. 9-8 - RÉDUCTEUR PRINCIPAL pour hélicoptère à turbomoteur (S.E. 3130)

BTP schéma



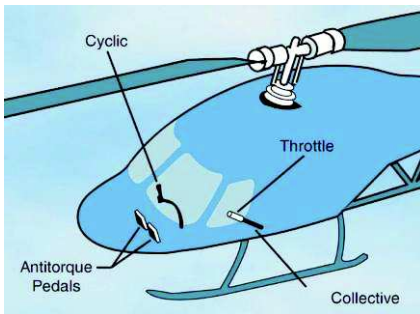
BTP du Bristol 171 Sycamore

(au premier plan à gauche, le disque du frein de rotor)

La BTP comporte également une ou plusieurs **roues libres**, pour désolidariser le rotor du moteur pour le **démarrage** et aussi en cas de **panne** ou pour permettre l'**autorotation** sans frein.

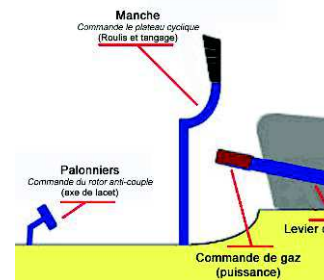
Les accessoires fixés sur la BTP sont généralement ceux qui ont besoin d'énergie mécanique : la ou les pompes hydrauliques, le ou les alternateurs, un entraînement pour le ventilateur (circuit de refroidissement huile BTP)...

3) Les commandes de pilotage

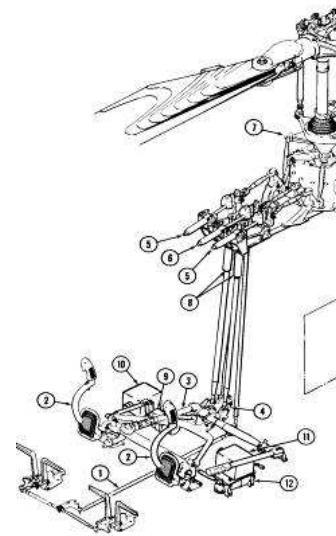


Palonniers : action sur l'anticouple, c'est une commande de pas variable qui fait tourner autour de l'axe de lacet.

Manche : il commande la position du plateau cyclique c'est-à-dire les axes de roulis et tangage par inclinaison de la portance.



1. Tail rotor control system
2. Cyclic control system
3. Collective control system
4. Mixing lever assembly
5. Cyclic servo actuators
6. Collective servo actuator
7. Swashplate assembly
8. Control tube actuators
9. Pitch trim damper
10. Roll computer
11. Pitch computer
12. Roll trim damper



Pas collectif : c'est le pas variable du rotor. Il délivre la portance. A régime moteur constant, la portance du disque rotor peut être modifiée en changeant l'inclinaison des pales (la portance augmente avec l'angle, c'est le principe des hélices à pas variable des avions).

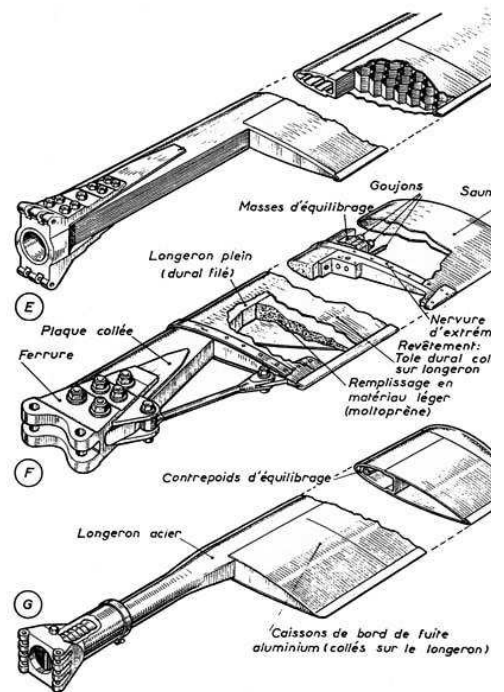
Pour cela on ajuste le pas collectif qui descend ou remonte un plateau situé sous le rotor et relié aux pales par des biellettes d'inclinaison. Le levier de commande du pas général (ou collectif) est habituellement situé à gauche du pilote, en le tirant vers le haut, on augmente le pas, en le rabattant, on le diminue.

La **commande des gaz** est située au bout de ce levier

4) Le rotor

Constitué d'au moins deux **pales** il peut en comporter beaucoup plus (jusqu'à 8 !!!) car l'augmentation du nombre des pales d'un système permet d'augmenter la surface portante et la force de traction. La longueur des pales étant limitée par leur résistance mécanique. Les pales actuelles sont principalement réalisées en matériaux composites stratifiés (anciennement en bois puis en métal). Un équilibrage complexe permet d'adapter la pale à l'hélicoptère.

La **vitesse de rotation** du rotor (200 à 400 t/min) est limitée par la vitesse en bout de pale... pouvant approcher la vitesse du son. Des évolutions (profil supersonique, courbure, flèche) servent à repousser le problème.



QUELQUES TYPES DE PALES.



Bell 47 G (moteur à pistons Lycoming de 280 ch et rotor 2 pales). Notez la barre stabilisatrice dite "barre de Bell" du nom de son inventeur



Tigre (4 pales)



Bell UH-1 Iroquois « Huey » (2 pales)



Eurocopter EC135 Mil (rotor 4 pales)



SA 341 Gazelle (3 pales)



Mil Mi 6 Hook (rotor 5 pales diamètre 35 m)



Eurocopter EC155 (rotor 5 pales)



Super frelon (6 pales)

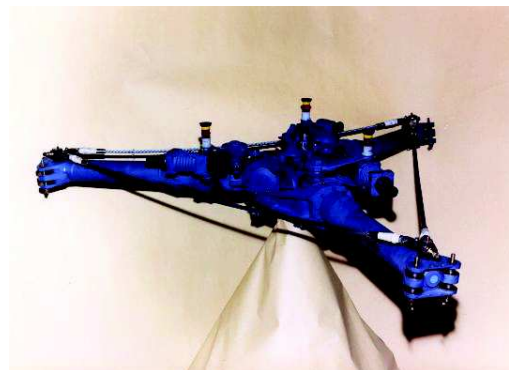


MIL MI 26T (rotor 8 pales diamètre 32 m
Charge utile 40 tonnes)

5) L'articulation et la commande du rotor

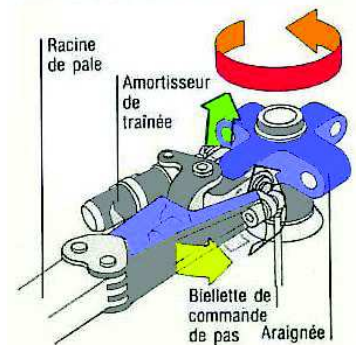
Sur les rotors de technologie ancienne, on assure les articulations de pas, de traînée, et de battement à l'aide de pièces métalliques reliées entre-elles par des roulements à billes.

Cette technologie tend à disparaître, elle est lourde, chère, et nécessite une maintenance importante (lubrifications...).

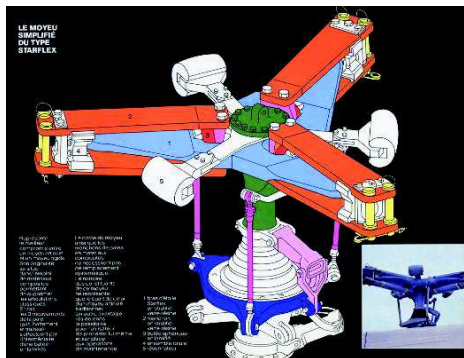


Tête de rotor "classique" d'Alouette

Les articulations de rotors



On tend à la remplacer par une technologie faisant appel aux matériaux composites qui assurent les articulations grâce à leur flexibilité naturelle !



Tête de rotor "Starflex" (partie bleue clair sur l'image ci-contre) en composite (écureuils). Avec plateaux cycliques et vérins de commande.

• Les commandes de pas

Le rotor tournant toujours à vitesse angulaire constante, c'est la **variation de l'angle d'incidence des pales** (angle formé entre la corde de la pale et le vent relatif), commandée par le **levier de pas collectif**, qui provoque une modification du comportement du rotor, et par conséquent de la position de l'aéronef.

L'autre manière de contrôler l'incidence des pales est réalisée au moyen de la **commande de pas général** (aussi appelée « **pas collectif** ») tenue par la main gauche du pilote.

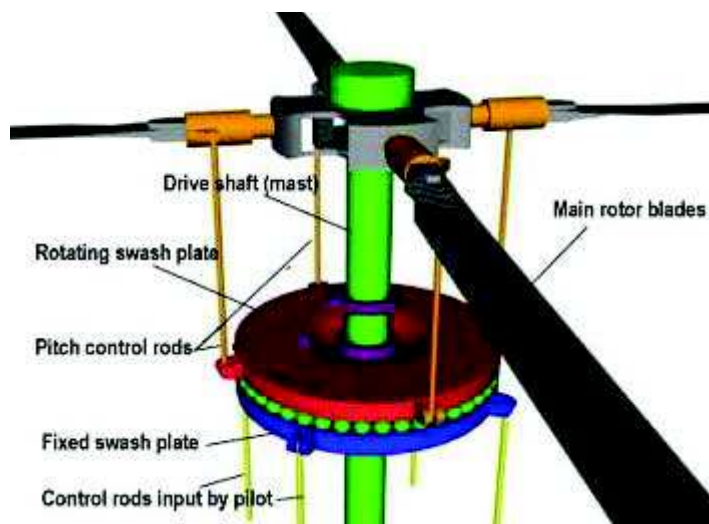
Pour cabrer par exemple, il faut que le rotor ait un moment à cabrer. On modifie donc l'incidence de la pale de sorte que la portance de celle-ci soit maximale au passage à l'avant de l'appareil, et minimale à l'arrière de l'appareil. L'incidence de la pale varie donc de manière sinusoïdale en effectuant un tour rotor. Cette variation d'incidence est réalisable dans n'importe quelle direction. Elle est contrôlée par le pilote à l'aide du **manche cyclique** (l'équivalent du manche à balai sur un avion).

Cette variation d'incidence est identique sur chacune des pales (modification générale de l'incidence - aussi appelée le « pas » - des pales) et permet de contrôler la portance générale générée par le rotor (pour prendre de l'altitude ou descendre).

• Le plateau cyclique

Pour déplacer l'hélicoptère dans une direction ou une autre, on bascule légèrement la composante de portance du rotor principal dans la direction souhaitée. La force de sustentation, perpendiculaire au plan formé par le rotor en rotation vu de côté et auparavant verticale, va donc être inclinée et « tirer » l'hélicoptère dans le sens désiré. Ceci est obtenu en augmentant de façon sélective l'incidence des pales : celle qui aura une incidence plus grande aura aussi une portance plus importante et aura tendance à se soulever par rapport aux autres, provoquant par là l'inclinaison du rotor.

Pour une pale donnée, au cours de sa rotation, son incidence va donc varier d'un angle donné au départ pour augmenter puis revenir à cette même valeur quand la pale aura terminé un tour complet. Puisqu'à chaque tour les pales connaîtront une modification de leur incidence de façon récurrente, on nomme ces changements d'état la **variation cyclique** et c'est pour cette raison que la commande qui provoque ces modifications est appelée « **commande de pas cyclique** » et tenue par la main droite du pilote (voir **plateau cyclique**). En complément, la force de sustentation ainsi inclinée garde la même valeur et voit sa composante verticale, servant effectivement à la sustentation de l'aéronef, diminuer ce qui provoque un enfoncement de celui-ci. Ceci est compensé en augmentant légèrement l'incidence générale des pales (main gauche), action qui demandera aussi une correction au niveau du palonnier.



6) Les motorisations

Les anciens hélicoptères ou les plus légers sont motorisés par des **moteurs à pistons** (plus économiques).

Dans tous les autres cas, la **turbine**, plus puissante et plus fiable a été préférée !



Turbine d'hélicoptère Makila (Turboméca) équipant les hélicoptères bimoteur Super Puma, Cougar et EC 725-225 d'Eurocopter



Ce Cicare CH-6 est propulsé par un Rotax 582 à pistons

7) Le train d'atterrissage

On trouve des patins, des flotteurs des skis des roues... et pour les plus performants des roues escamotables



Bell 47 (Flotteurs)



Robinson R44 (Flotteurs)



Agusta AB-412HP (Skis)



Boeing AH-64DHA Apache Longbow
(Roues)



NHI NH-90 (Train rentrant - Roues)



Eurocopter EC-120B Colibri (Patins)

8) Les instruments de bords de l'hélicoptère

On retrouve les mêmes instruments que sur les avions avec de très petites variantes



Bell 206



Agusta AB-412HP



Cockpit d'un Eurocopter EC-135T



Agusta AB-412HP différemment équipé

9) Les records

- Record de distance.

Le 6 avril 1966, un **Hughes YOJ-6A** relie Culver City, Californie à Ormond Beach en Floride.

Le record : **3561,55 km** en 15 heures et 8 minutes

Hughes YOJ-6A



Le 31 mai 1967 un **Sikorsky S-61R** effectue le trajet New York - Paris en 30 h et 46 min (9 ravitaillements en vol) il parcourt ainsi **6870 km**

Sikorsky S-61R

(Notez la perche de ravitaillement qui s'allonge sous le rotor)



- Record d'altitude.

En 1969, le plus gros hélicoptère du monde, le **MIL Mi-12 Homer** éleva jusqu'à **2 255 m** une charge de **44 tonnes**.

MIL Mi-12 Homer

(L'un des 3 prototypes sans suite... celui-ci, présenté au Bourget est aux couleurs de l'Aeroflot)



En juin 1972 Jean Boulet, a mené son **SA 315 B Lama** (dérivé de l'**Alouette II**) à l'altitude de **12 442 m** au-dessus d'Istres.

SA 315 B Lama



En mai 2005, un hélicoptère monoturbiné **Ecureuil AS350 B3** s'est posé à **8.850 mètres** sur le sommet de l'Everest (Népal), pulvérisant ainsi le record du monde de posé et de décollage en altitude. Ce record ne pourra jamais être battu, l'Everest étant le plus haut sommet du monde !

L'Ecureuil AS350 B3 du record

Comme l'exige la Fédération Aéronautique Internationale (FAI), l'appareil est resté posé plus de 2 minutes sur la cime avant de reprendre sa descente vers le camp de base. La température extérieure était de -36°C ! L'appareil était une machine de série, qui avait seulement été allégée des instruments inutiles et des



aménagements de confort (soit un gain de 120 kg).

- **Record de vitesse.**

Jusqu'à présent le record de vitesse en hélicoptère datait de 1986 et détenu par le **Westland Lynx** Britannique " G-LYNX" avec **400,87 Km/h**. (Plus de 200 nœuds)

Le Westland Lynx du record



Le record est tombé le 15 septembre 2010 avec **463 Km/h** par une machine expérimentale américaine de nouvelle génération, le **Sikorsky X2**.

Sikorsky X2



Le record n'a pas été enregistré car il a eu lieu lors d'un vol d'essai de l'aéronef et non lors d'une homologation officielle.

16 mai 2011, l'hélicoptère hybride **X3** d'**Eurocopter**, dépasse son objectif de vitesse en franchissant le cap des **430 km/h** (232 nœuds).

Eurocopter X3

Cet hélicoptère est un gyrodyne puisque les mouvements verticaux sont assurés par un rotor entraîné par un moteur, comme un hélicoptère, et la traction obtenue par plusieurs autres moteurs, comme un avion.



10) Le rotor anticouple

Si on fabriquait un hélicoptère avec une cellule et un seul rotor on obtiendrait un engin instable ... la cellule se mettant à tourner à l'inverse du rotor... On a donc installé un **rotor anti-couple** (RAC) constitué de plusieurs pales à pas variable commandés par les palonniers.

Le **fenestron**, inventé par SudAviation/Eurocopter, améliore l'efficacité tout en diminuant le bruit.

Un prototype Boeing Sikorsky RAH 66 Comanche avec fenestron
A côté d'un Boeing AH-64 Apache anticouple classique

La furtivité du RAH 66 a été particulièrement étudiée. La signature radar est 600 fois plus faible qu'un AH 64 ! La signature infrarouge 4 fois plus faible et le niveau sonore 2 fois plus faible par rapport à un AH-64 Apache. En pratique, le Comanche pourrait s'approcher quatre fois plus près d'une cible sans être repéré... son programme de recherche exorbitant a été abandonné en 2005.



11) Peut-on se passer de l'anticouple ?...

• Solution 1 ... supprimer le couple



Sortie d'air sur l'extrémité de la pale du Djinn



Djinn... hélicoptère sans anti couple

Dans le Djinn le rotor principal n'est pas entraîné par la force mécanique d'une turbine, mais par la réaction produite par l'éjection d'air comprimé en bout de pales (voir ci-dessus).

Ce procédé n'induit donc pas d'effet de couple car aucune force n'est exercée par le moteur.

Le contrôle en lacet utilise sur le jet résiduel de la turbine sur une gouverne verticale mobile.

• Solution 2 ... créer un autre couple en sens inverse... ce sont les bi-rotors



Les rotors en tandem du Vertol Sea Knight. Assez semblable au Chinook plus connu



Les rotors en tandem du Piasecki H-21...dit "La banane"



Les rotors contrarotatifs dits « engrenants », cote a cote chez Kaman avec le K-Max

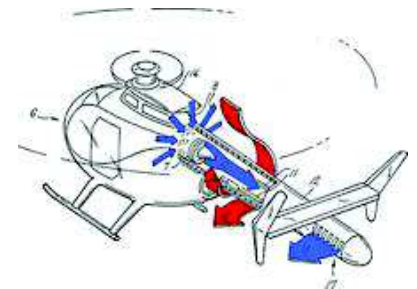


Les rotors contrarotatifs coaxiaux chez Kamov

• Autres solutions ...

Pour le MD 900, le rotor anticouple conventionnel est remplacé par le système **NOTAR** (pour « NO Tail Rotor ») qui envoie de l'air comprimé à l'aide de la turbine dans la queue et l'éjecte latéralement par des fentes.

Ce système améliore la sécurité mais reste moins efficace qu'un RAC classique.



Le schéma de circulation d'air vers la queue pour le MD 900 (ou pour le McDonnell Douglas MD-520N)

Le Mil Mi 12 présente une configuration de **rotors en tandem côte à côte** :

Ci contre le MIL Mi 12

C'est le plus gros hélicoptère du monde avec une charge utile de 40 tonnes.



12) D'autres solution à voilures tournantes ... ou rotors pivotants

• L'autogire

L' **autogire**, inventé en 1923 par **Juan de la Cierva**, était constituée d'un avion dont les ailes étaient remplacées par des pales. Un petit succès dans l'armée avant de tomber dans l'oubli à cause de l'hélicoptère. Un américain, Igor Bensen, le réhabilita dans le domaine civil. Aujourd'hui les nouveaux matériaux de haute technologie (matériaux composite, aluminiums spéciaux ultra-résistants, moteurs légers et surpuissants) ont permis la construction d'appareils ultra-légers, fiables et d'une maniabilité souvent supérieure à n'importe quel autre aéronef.



- Le Fairey Rotodyne



Le **Rotodyne** dispose d'un rotor à quatre pales entraîné par réaction (air comprimé et essence) et des moteurs montés sur de courtes ailes. Il décolle verticalement et peut voler comme un hélicoptère classique, avec seulement le rotor en fonction, ou en autogire avec uniquement la traction des hélices. En pratique le rotor était utilisé au décollage et à l'atterrissage et était en autorotation en vol.

- Le Boeing/Bell V-22 Osprey

C'est un appareil de transport **hybride** résultant du croisement entre un avion de transport militaire et un hélicoptère. Sa formule à rotors basculants lui permet de décoller et atterrir verticalement, comme les hélicoptères de transport lourds qu'il doit remplacer.

C'est le premier appareil de ce type et de cette taille à être construit en série, malgré les controverses sur la sécurité soulevées lors de son développement.



Boeing/Bell V-22 Osprey

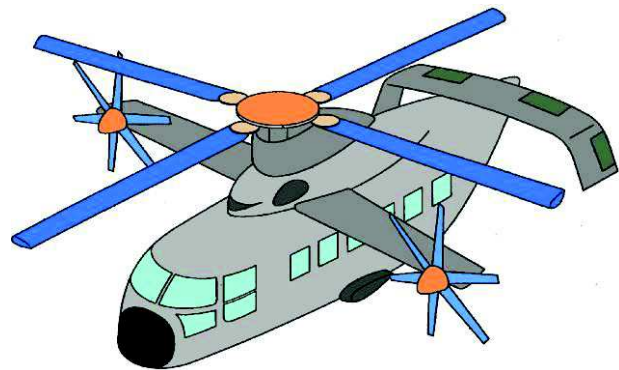
* (Osprey = balbuzard pêcheur)

13) Un petit point sur le vocabulaire utilisé (Dictionnaire)

Tous ces objets font partie de la famille des **giravions**.

Giravion : « Appareil sur lequel la sustentation aérodynamique est produite au moyen de pales relativement longues tournant autour d'un axe sensiblement vertical »

L'Hélicoptère : "Est un appareil volant dont la sustentation et la propulsion se font au moyen d'une ou de plusieurs hélices horizontales appelées rotors."

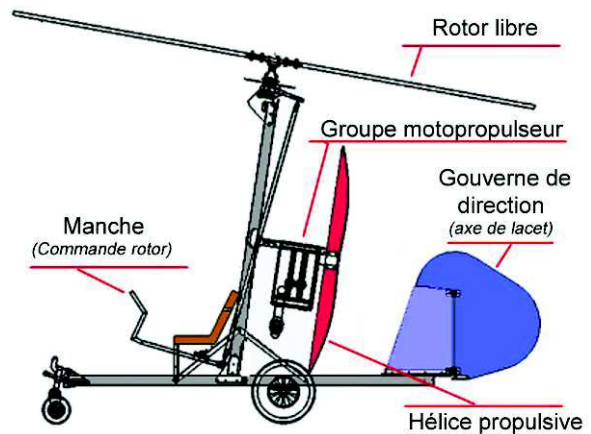


Girodyne

Girodyne : « Giravion dans lequel le rotor, entraîné par un moteur, assure seulement la sustentation et les mouvements verticaux de l'appareil, et dont la traction ou la translation est obtenue par un ou plusieurs autres moteurs, comme un avion. »

L'autogire est un aéronef à voilure tournante libre. Un moteur et une hélice assure sa propulsion.

*L'X3 d'Eurocopter est un hybride ou Girodyne,
Le Rotodyne est un hybride hélicoptère/autogire/girodyne*



Autogire

14) Et si le moteur d'un hélicoptère tombe en panne ???

- **L'autorotation !**

Un avion en panne conserve une capacité de plané qui peut sauver des vies. C'est aussi le cas pour l'hélicoptère ! Le moteur se débraye (une roue libre comme sur un vélo) et les pales sont entraînées par le vent relatif...

La finesse (plané) est très mauvaise mais permet tout de même des atterrissages en limitant les dégâts. Si le pilote dispose d'une possibilité de commande suffisamment active il peut en cabrant et en augmentant fortement le pas des pales au voisinage du sol réussir un posé convenable...

Compléments

L'alphabet aéronautique et le Morse

Alpha	A	■	November	N	■	0	■
Bravo	B	■	Oscar	O	■	1	■
Charlie	C	■	Papa	P	■	2	■
Delta	D	■	Quebec	Q	■	3	■
Echo	E	■	Roméo	R	■	4	■
Fox-trot	F	■	Sierra	S	■	5	■
Golf	G	■	Tango	T	■	6	■
Hotel	H	■	Uniform	U	■	7	■
India	I	■	Victor	V	■	8	■
Juliett	J	■	Whiskey	W	■	9	■
Kilo	K	■	Xray	X	■	.	■
Lima	L	■	Yankee	Y	■	,	■
Mike	M	■	Zulu	Z	■	?	■

LISTE DES ABREVIATIONS UTILISEES :



sq ft	.....	Square foot
ft	.....	Pied
in	.....	Pouce
Nm	.....	Mille nautique
km	.....	Kilomètre
m	.....	Mètre
cm	.....	Centimètre
kt	.....	Noeud
m/s	.....	Mètre par seconde
tr/min ou rpm	...	Tour par minute
Va	.....	Vitesse de manoeuvre
VC	.....	Vitesse conventionnelle
Vfe	.....	Vitesse limite volets sortis (Flap Extended)
Vne	.....	Vitesse à ne jamais dépasser (Never Exceed)
Vno	.....	Vitesse maximale de croisière (Normal Opérating)
Vso	.....	Vitesse de décrochage configuration atterrissage (s = stall = décrochage)
Vs1	.....	Vitesse de décrochage en lisse
VI	.....	Vitesse indiquée
km/h	.....	Kilomètre par heure
HP	.....	Horse Power (Chevaux (<i>puissance</i>))
hPa	.....	Hectopascal
in.Hg	.....	Pouce de mercure
Zp	.....	Altitude pression
l	.....	Litre
Imp gal	.....	imperial gallon
us gal	.....	US gallon
psi	.....	Pound per square inch (Livre par pouce carrés)
lb	.....	Pound (Livre)
kg	.....	Kilogramme
°C	.....	Degré Celcius
°F	.....	Degré Farenheit
V	.....	Volt
A	.....	Ampère

FACTEURS DE CONVERSION :

mille nautique	.....	X	.....	1.852.....	=	....	kilomètres
pieds	.....	X	.....	0.305.....	=	....	mètres
inches	.....	X	.....	0.0254.....	=	....	mètres
Inches	.....	X	.....	25.4.....	=	....	millimètres
pieds/minute	.....	X	.....	0.00508 ...	=	....	mètre/seconde
gallons (US)	.....	X	.....	3.78	=	....	litres
gallons (Imp)	.....	X	.....	4.546.....	=	....	litres
quarts (US)	.....	X	.....	0.946	=	....	litres
noeuds	.....	X	.....	1.852.....	=	....	km/h
psi	.....	X	.....	0.0689	=	....	bar
lb	.....	X	.....	0.453	=	....	kg
(°F- 32)	.....	X	.....	5/9	=	....	°C

Et en inverse

kilomètres	X.....0.539	=.....	Mille nautique
mètres	X..... 3.281.....	=	Pied
mètres	X..... 39.37	=	Inches
millimètres	X..... 0.03937...	=	Inches
mètre/seconde	X.... 197	=	Pied/minute
litres	X..... 0.264.....	=	gallons (US)
litres	X..... 0.220	=	gallons (Imp)
litres	X..... 1.057	=	quarts (US)
km/h	X..... 0.539	=	Noeuds
bar	X..... 14.51	=	psi
kg	X..... 2.205	=	Ib
°C	X..... $9/5 + 32.$	=	°F

LISTE DES ABREVIATIONS RADIO :

ADF	Automatic Direction Finder (<i>Radio compas</i>)
ATC	Air Traffic Control (<i>Transpondeur</i>)
COM	Communication Transceiver (<i>Emetteur-récepteur de communications</i>)
DME	Distance Measuring Equipment (<i>Equipement de mesure de distance</i>)
ELT	Emergency Locator Transmitter (<i>Balise de détresse</i>)
IFR	Instrument Flight Rules (<i>Vol aux instruments</i>)
ILS	Instrument Landing System (<i>Système d'atterrissage radiogoniométrique</i>)
MKR	Marker Beacon Receiver (<i>Récepteur de balise</i>)
NAV	Navigation Indicator and Receiver (<i>Indicateurs-récepteurs de navigation</i>)
AUDIO	Audio Control Panel (<i>Sélecteur d'écoute</i>)
VFR	Visual Flight Rules (<i>Règles de vol à vue</i>)
VHF	Very High Frequency
VOR	Visual Omni-Range (<i>beacon</i>) (<i>Radio-phare omni-directionnel</i>)

Index

1

100 / 130	65
100 LL	65

4

4 temps	59
---------------	----

8

80 / 87	65
---------------	----

A

à plat	59
abaissement de température	67
ABREVIATIONS RADIO	113
accélérateur	9
admission	59
Aérodynes	5
aérofreins	14, 84
aérostats	8
Aérostats	6
aiguille	40
aile en anneau	31
aile infinie	31, 33
aile Rogallo	10
ailerons	14
ailes	12, 13
Airbus 380	26
Airbus A319	53
allongement	15
ALLUMAGE	71
alphabet aéronautique	112
alternateur	70
altimètre	42
ampèremètre	70
anémomètre	43, 46
angle de calage	62
Angle de calage	16
angle de déport	18
angle de garde	18
antenne	43
antenne de compensation	48, 50
anticouple	103
anti-givrage	79
anti-icing	79
Apex	35
apopside	95
appareils radio	70
apsides	95
arbre à cames	59
Ariane 5	75
assiette	38
assiette à cabrer	38
Assiette à piquer	38

assiette longitudinale	38
atmosphère humide	67
atterrisseur principal	18
autogire	8, 110, 111
avion asymétrique	21
axes de roulis	103

B

B 24 "Libérateur"	21
B 52	21
Badin	43, 46
Balancines	19
bande de couleur	57
baromètre	41
bâti-moteur	20
batterie	70
batterie de bord	70
bielle	59
bille	40
bille-aiguille	40
bimoteurs	20
biplan	13
Blériot	23
Blériot III	32
Boeing/Bell V-22 Osprey	111
boggies	19
boîte principale de transmission	102
bord d'attaque	13
bord de fuite	13
boudins de dégivrage	79
bougie	71
bougies d'allumage	59
brin de laine	53
BTP	102

C

cabine	20
cadres	23, 24, 25
caisson central	22, 26
caissons	9
capots moteurs	21
capsule anéroïde	41
capsule de Vidie	41
capsule élastique	43
capteur de pression	43
carburant	65
carburateur	66
casserole	62
casserole de l'hélice	21
cellule	20
cellule de l'avion	12
Cessna 172	23
CFM 56	77
charges dues à la pressurisation	26
Charles Lindbergh	39
cintres supérieurs	23
circuit d'allumage est doublé	71

circuit visuel	58
climatisés	24
cloison pare-feu	20
cloisons verticales	24
collage	26
commande de pas d'hélice	66
commande de pas général	105
commande gaz	66
commande mélange	66
compas	52
compas magnétique	39
comprimée	23
Concorde	36
cône de queue	22
conservateur de cap	37, 39
conservation de la quantité de mouvement	88
contraintes	22
contraintes de cisaillement	26
contraintes de traction-compression	26
coquilles	22
corde	62
corde de référence	62
Corde de référence	16
cordes à piano tendues	23
couples	18
cruciformes	17
culasse	59
cylindre	59

D

dacron	23
De la Cierva	8
débit massique	89
défecteurs de jet	88
dégivrage	79
dégivreurs	80
Deltaplane	10
démarrateur électrique	70
dérapé	40
dérive	16
détente	67
Dewoitine 520	20
diabolo	19
Dièdre	16
directionnel	39
disjoncteur	70
disjoncteurs thermiques	70
DLE	35
double flux	72
Drooped Leading Edge	35

E

EAP	75
économiques en carburant	61
efforts	22
élévateurs	9

élevon	17
Empennage cruciforme	17
Empennage en T	17
Empennage en V	17
empennage horizontal	16
empennage vertical	16, 17
empennages	12
emplanture	13
en étoile	59
en ligne	59
en V	59
entoilé	23
envergure	15
épaisseur	16
Épaisseur relative	16
équatoriales	94
équipements de bord	12
ergols	75
ergols liquides	74, 89, 91
étages d'accélération à poudre	75
Étalonnage	45
étincelle	60
étriers métalliques	23

F

<i>F 18 Hornet</i>	35
FACTEURS DE CONVERSION	113
faisceau électrique	70
Falcon 50	33
<i>fences</i>	27, 33
feux de navigation	70
fibres synthétiques	22
finesse	9, 15
finesse d'une fusée	94
Flèche	15
flexion	22
flotteur	66
flotteurs	20
freins	9
fusée	74
fusées d'appoint	76, 100
fuselage	12, 22, 24
FUSELAGE	17

G

gaz brûlés	60
gelée blanche	83
générateurs de vortex	33
gicleur	66
Giravion	111
Girodyne	111
givrage du carburateur	67, 68
givre	82
givre blanc	83
givre mou	83
glace	67
glissé	40
<i>Gloster Javelin</i>	34
Gossamer Penguin	61
gouverne de direction	16
gouverne de profondeur	16
gouvernes	12
gouvernes aérodynamiques	88
<i>grade</i>	69
Griffon II	74

groupe de fusibles	70
groupe motopropulseur	12, 20
gyrocompas	39
gyroscope	37, 40

H

haubans	10
hecto pascals	42
hélice	21, 62
Hélice à calage fixe	63
Hélice à calage variable	63
Hélicoptère	111
<i>hélicoptères</i>	102
horamètre	56
horizon artificiel	37, 38

I

<i>ice contaminated tailplane stall</i>	78
ICTS	78
impulsion spécifique	89, 100
impulsions spécifiques	91
inclinaison	38, 95
indicateur de virage	37, 40
indice de construction	94
injection	66
isotherme 0°C	82

J

JATO	76
Jodel	23
<i>Ju 52</i>	21
Juan de la Cierva	110

K

karman	14
Kepler	96

L

lamage	26
le pied va chercher la bille	40
LEAP	77
<i>Leduc</i>	73
ligne de foi	52
Ligne moyenne	16
lisses	24, 25, 26
loi de la gravitation universelle	94
loi de St Venant	55
Loi des aires	96
Loi des orbites	96
Loi des périodes	96
lois de Kepler	96
longerons	13, 23

M

machmètre	55
magnéto	71
maître couple	94
Manche	103

manche à air	57
manche cyclique	105
manette des gaz	66
marouflé	23
mât	10
<i>Me 163 Komet</i>	76
<i>mélange</i>	66
mélange carburé	60
minimum obstruction clearance	
altitude	82
<i>Mirage III</i>	34
mixture	66
<i>Mixture</i>	66
Moca	82
mono roue	19
monomoteur	20
monoplan	13
monotrace	19
montants	23
montre	56
moteur à plasma	97
moteur Diesel	60
moteur ionique	89, 98
moteur-fusée	74
moteurs à pistons	105
moteurs auxiliaires	88
motorisation nucléaire	99
moyeu	62
multiaxe	7
multiplan	13

N

NASA	32
<i>Navette spatiale</i>	36
nervures	13
nombre de Mach	55
non-planar winglet	29
non-planar winglets	30
Nord Magnétique	52
NOTAR	110
nucléaire	99

O

Orbite elliptique	95
orbite géostationnaire	94, 95
orbites	94
orbites circulaires	94
orbites elliptiques	94
Orbites héliosynchrones	95
<i>Osprey</i>	111

P

<i>P38 lightning</i>	21
pale	62
Palonniers	103
paramoteur	7
parapente	9, 11
pas collectif	105
Pas collectif	103
pas de l'hélice	62
pas général	105
pas variable	63
patins	20
PC	73

pendulaire	7
périapside	95
période	95
phare d'atterrissage	70
phase balistique	93
phase propulsée	93
ped par minute	47
pilotes de planeurs	47
piston	59
plage jaune	44
plage verte	44
plan de l'écliptique	95
plan de l'orbite	95
plan fixe stabilisateur	16
plateau cyclique	102, 103, 105
polaires	94
pompe de gavage	65
pompe électrique	65
pompe mécanique	65
portance tourbillonnaire	35
post combustion	72
poudre noire	89
pression statique	43
pression totale	43
pressurisé	23
pressurisés	24
principe d'interaction	111
prises statiques	48
Profil de l'aile	16
Profondeur	16
propergols	75
propergols solides	75, 91, 93
propfan	20
propulseurs fusées	76, 100
propulsion électrique	97
puissance des moteurs	20
Pulsoréacteur	74
purger les réservoirs et les canalisations	65
Push Pull	21
pylône	18

Q

quatre temps	59
--------------	----

R

radio compas	56
raidisseurs	18
raked winglet	29
rappel des masses	94
rapport poids/poussée	89
réchauffage du carburateur	67
Record d'altitude	107
Record de distance	107
Record de vitesse	107
Refroidissement moteur	69
régulateur de tension	70
réservoirs de carburant	14

retrait d'une fusée	94
revêtement	24
revêtement intégral	23
rigidité	23
risque de givrage	68
rivets	26
robinet sélecteur	65
Rogallo	10
rose des caps	52
rotin	23
Rotodyne	110
rotor	102
rotor de queue anti-couple	102
rotors en tandem côte à côte	110
roulette de nez	18
roulette de queue	18
roulis	103

S

Saab Drakken	36
saumon	13
sélectionner un réservoir	65
sellette	9, 10
semi-monocoque	22
séparations	35
sharklet winglet	29
Sharklets	29
Shuttle	75
skis	20
soupapes	59
soyale	26
spirale	49
Spirit of Saint Louis	39
spiroid winglets	33
spoilers	84
Stato réacteur	73
structure en treillis	22
structure géodésique	22
structure monocoque	22
structure semi-monocoque	24
superstatoréacteur	89
surface alaire	15
suspentes	9
symétrie du vol	40

T

tableaux de bords électroniques	53
tachymètre	56
tangage	103
taux de virage	40
Throttle	66
tirée	23
tourbillon aérodynamique	27
tourbillon de Prandtl	27
tourbillon marginal	27, 28
train d'atterrissage	18
train d'atterrissage	12, 102
train d'atterrissage classique	18, 19

train d'atterrissage tricycle	18
train principal	18
trait radial rouge	44
traverses	23
trim	10
Tube de Pitot	43
turbine	105
turbomachine à réaction	72
turbomachines	72
Turbomoteur	73
Turbopropulseur	73
turboréacteurs	72
turbulence de sillage	27, 28
tuyère	74, 90
tuyère de Laval	90
tuyères orientables	88
type semi-monocoque	24

U

U.L.M.	7
--------	---

V

vapor lock	65
vaporisation de l'essence	67
variomètre	47, 51
variomètre à énergie totale	48
variomètre électronique	50
verglas	83
verrière	23
vilebrequin	59
vitesse à ne pas dépasser en atmosphère agitée	44
vitesse de décrochage	44
vitesse de décrochage en lisse	44
vitesse de libération	95
vitesse d'éjection des gaz	89
vitesse verticale	47
vitesse d'éjection	91
voile	9
voilure	13
voilure tournante	102
vol oblique	93
volets hypersustentateurs	14
voltmètre	70
VOR	57
Vulcain	74

W

winglets	28
----------	----

Z

zone de dépression	67
--------------------	----

Table des matières

<i>Présentation du document & auteurs</i>	2
<i>Illustrations & Copyrights</i>	2
I.1- Généralités sur les aéronefs	5
<i>Les différents objets volants</i>	5
1) Les plus lourds que l'air ou Aérodynes.....	5
• Les aérodynes non motorisés	5
• Motorisés	5
2) Les plus légers que l'air ou Aérostats.....	6
• Ballons	6
• Dirigeables.....	6
3) Les aérospatiaux au comportement balistique.....	6
<i>Les U.L.M.</i>	7
1) Qu'est ce qu'un U.L.M. ?	7
2) Les différents types d'ULM	7
<i>Vol libre : parapentes Delta ... Kite</i>	9
1) Qu'est ce qu'un parapente ?.....	9
2) Description et pilotage d'un parapente.....	9
3) Le Deltaplane.....	10
4) Le Kite surf.....	11
I.2- Généralités sur les aéronefs	12
<i>L'avion (principales parties)</i>	12
1) Composition d'un avion.....	12
2) Schéma détaillé	12
3) Les ailes	13
4) Constitution d'une aile "classique".....	13
5) Géométrie et comportement aérodynamique de l'aile.....	15
6) Les empennages.....	16
• L'empennage horizontal comprend :	16
• L'empennage vertical comprend :	16
• Les élevon ! Empennage ou aile ???.....	17
7) Le fuselage.....	17
8) Le train d'atterrissage.....	18
• Le train d'atterrissage classique	18
• Le train d'atterrissage tricycle	18
• Les groupements de roues (diabolo, boggies).....	19
• Le train d'atterrissage monorace... éventuellement avec "balancines".....	19
• Les trains d'atterrissages particuliers !	20
9) Le groupe motopropulseur (GMP).....	20
<i>Compléments sur la structure du fuselage (CAEA)</i>	22
1) Les différents types de construction	22
• La structure en treillis	22
• La structure géodésique	22
• La structure monocoque.....	22
• La structure semi-monocoque.....	22
2) Les efforts appliqués au fuselage.....	22
3) Fuselage des premiers avions	23
• Fuselage en bois.....	23
• Fuselage métallique d'un avion léger	23
• Fuselage d'un avion de transport.....	24
• Les cadres	25
• Les cadres forts	25
• Les cadres courants.....	25
• Les lisses.....	25

• Le revêtement	26
• Le caisson central	26
<i>Winglets, fences et tourbillons.(CAEA)</i>	27
1) Existence du tourbillon marginal (ou tourbillon de Prandtl).....	27
• Quel est le problème ?	27
• Notion de turbulence de sillage.....	27
• Les conséquences sur l'avion	28
2) Les avancées techniques visant à réduire le tourbillon de Prandtl	28
• Les winglets	28
3) Les winglets du futur ?.....	29
• Les raked Winglets	29
• Les Sharklet (ou Sharked winglets)	29
• Non-Planar winglet.....	30
4) Les winglets ne produisent-ils pas eux-même une force de poussée ?	31
5) L'aile infinie, l'aile de demain?	31
• L'aile théoriquement infinie.	31
• L'aile infinie dans l'histoire.	32
• Spiroid winglets	33
6) Les fences	33
• Les fences	33
7) La portance tourbillonnaire.....	33
• Les générateurs de vortex	33
• Les séparations.....	34
• Bec DLE (Drooped Leading Edge).....	35
8) L'apex... un dispositif pour les basses vitesses !	35
• Equivalent apex : flèche variable et gothique	35
<i>II.1- Les instruments de bord</i>	37
<i>Instruments utilisant des gyroscopes</i>	37
1) Introduction	37
2) Principe de fonctionnement d'un gyroscope	37
<i>II.1.1- Les instruments de bord</i>	38
<i>L'horizon artificiel</i>	38
1) Présentation du l'horizon artificiel	38
• Un exemple :	38
<i>II.1.2- Les instruments de bord</i>	39
<i>Le conservateur de cap</i>	39
1) Le conservateur de cap ou directionnel ou gyrocompas	39
• Particularité d'utilisation	39
<i>II.1.3- Les instruments de bord</i>	40
<i>L'indicateur de virage</i>	40
1) Présentation de l'indicateur de virage ou bille-aiguille	40
2) Le taux de virage	40
3) La symétrie du vol en utilisant la bille.....	40
<i>II.2- Les instruments de bord</i>	41
<i>Instruments utilisant des mesures de pression</i>	41
1) Introduction	41
2) Principe de la mesure.....	41
<i>II.2.1- Les instruments de bord</i>	42
<i>L'altimètre</i>	42
1) L'altimètre... est un baromètre !	42
<i>II.2.2- Les instruments de bord</i>	43
<i>L'anémomètre ou badin</i>	43
1) Présentation de l'anémomètre ou Badin.....	43
• Il mesure la vitesse de l'aéronef par rapport à l'air qui l'entoure	43
• L'antenne ou capteur de pression totale	43
• Significations des arcs de couleur.....	44
• Détaillons ces plages.....	44
• Récapitulatif d'Les vitesses qui limitent les arcs de couleur	45

• D'autres limites existent (non exigibles au BIA)	45
• D'autres vitesses utiles:	45
• Étalonnage.	45
• Il faut retenir que :	45
2) Exercices de correction de vitesses (CAEA)	46
• Exercice 1	46
• Solution 1	46
• Exercice 2 (quasiment le même !)	46
• Solution 2	46
II.2.3- Les instruments de bord.	47
Le variomètre.	47
1) Présentation du variomètre	47
2) Autres schéma du variomètre à capacité (CAEA)	48
3) Le variomètre à énergie totale (CAEA)	48
• Pourquoi un autre variomètre ?	48
• Utilisation en air calme	48
• Piloter un planeur ... trouver et spiraler dans l'ascendance :	49
4) Le variomètre électronique :	50
5) Le pilotage au variomètre :	50
6) Emplacement de l'antenne :	50
II - Compléments sur les instruments.	51
Servitudes pression et gyroscopes.	51
1) Schéma complet du système "mesures basées sur les pressions"	51
2) Schéma pour des ensembles gyroscopiques pneumatiques	51
II.3- INSTRUMENTS DE BORD.	52
LE COMPAS.	52
1) Le compas.....	52
II.4- INSTRUMENTS DE BORD.	53
Compléments divers.	53
1) Le brin de laine utilisé en vol à voile	53
2) Les tableaux de bords électroniques	53
• L'EFIS (systèmes d'information électroniques de vol)	53
• le PFD Primary Flight Display	54
• Système d'instrument de moteur (SME).....	54
3) Le machmètre.(CAEA seulement).....	55
II.5- INSTRUMENTS DE BORD.	56
Autres instruments et circuit visuel.	56
1) L'horamètre :	56
2) Autres instruments :	56
• Instruments de surveillance des systèmes	56
• Le tachymètre :	56
• La montre (développé en radionav) :	56
• Le radio compas (développé en radionav) :	56
• Le VOR (développé en radionav) :	57
• La manche à air (biroute): un instrument ... au sol	57
• Le GPS.....	57
3) Le circuit visuel	58
4) Le pilotage en panneau partiel	58
III-LE GROUPE MOTOPROPULSEUR.	59
Les moteurs à explosion.	59
1) Description du fonctionnement d'un moteur "4 temps"	59
2) Montage des cylindres :	59
3) Le cycle de fonctionnement : Les quatre temps.....	60
4) Un cas à part : le moteur Diesel	60
5) La propulsion électrique... des projets dans l'air du temps !	61
L'hélice.	62
1) Description d'une hélice.....	62
• Le pas de l'hélice.....	62

• Le calage.....	62
2) Fonctionnement :	62
3) Hélice à calage fixe.....	63
4) Hélice à calage variable (ou "pas variable") :	63
III-LE GROUPE MOTOPROPULSEUR.....	65
<i>Les servitudes. Le circuit carburant.....</i>	<i>65</i>
1) L'alimentation en carburant.....	65
2) Le circuit carburant.....	65
3) Le carburant.....	65
4) Les commandes moteur	66
• La manette des gaz (<i>Throttle</i>)	66
• La commande de mélange (<i>Mixture</i>)	66
5) Le carburateur.....	66
6) Le givrage du carburateur.....	67
7) Repérage et gestion d'un givrage du carburateur (pilotes et CAEA !!!)	68
• Sur un avion à hélice à calage fixe :	68
• Sur une hélice à calage variable et à vitesse constante,	68
• Votre attention doit particulièrement être soutenue	68
8) Les huiles.....	68
• Les huiles minérales	68
• Les huiles dispersantes.....	68
• Peut-on mélanger deux huiles ?	69
• Le grade	69
9) Refroidissement moteur.....	69
III-LE GROUPE MOTOPROPULSEUR.....	70
<i>Les servitudes : le circuit électrique.....</i>	<i>70</i>
1) le circuit électrique d'un avion à moteur thermique 4 temps	70
2) Les magnétos d'un avion à moteur thermique 4 temps	70
3) Le circuit d'allumage.....	71
III-LE GROUPE MOTOPROPULSEUR.....	72
<i>Les moteurs à réaction.....</i>	<i>72</i>
1) Description du fonctionnement d'une turbomachine à réaction.....	72
2) Les turboréacteurs.....	72
3) Turbopropulseur	73
4) Turbomoteur	73
5) Stato réacteur	73
6) Pulsoréacteur	74
7) Réacteur fusée utilisant des ergols liquides.....	74
8) Les propulseurs à propergols solides.....	75
9) Les propulseurs fusées ... utilisés sur des avions.....	76
10) Coupe détaillée d'un turboréacteur ... en anglais.....	77
11) Le futur... Comment augmenter encore le taux de dilution ?	77
• Le taux de dilution.....	77
• L'open rotor et son futur avion ?	77
IV - Le givre... et le dégivrage.....	78
<i>Les servitudes : le dégivrage.....</i>	<i>78</i>
1) Les dangers du givrage :	78
2) Le givrage là ou on ne l'attend pas !	79
3) Lutte contre le givre : anti-givrage ou dégivrage ?	79
• Les systèmes thermiques préventif ou anti-icing :	79
• Les autres systèmes préventifs.....	79
• Les systèmes curatifs dégivreurs	79
4) Les dégivreurs au sol	80
5) Les différents dispositifs de lutte contre le givre en vol	80
• Les moyens physico-chimiques :	81
• Les moyens mécaniques :	81
• Les moyens thermiques :	82
6) Gestion de la situation de givrage en vol	82
7) Les conditions du givrage	82

• C'est quoi le givre ?.....	82
• Ou trouve-t-on du givre ?.....	82
• Infos météo sur les cartes (TEMSE) et dans les messages.....	83
8) Les différents types de glaces (CAEA).....	83
• Le plus dangereux : le verglas.....	83
• Le givre mou.....	83
• Le givre blanc ou la gelée blanche.....	83
<i>IV - Le freinage à l'atterrissage.</i>	84
<i>Train, parachute, reverses... et brins d'arrêt (CAEA)</i>	84
1) Comment ralentir puis stopper un avion ?.....	84
• Ralentir avant de se poser.....	84
• Ralentir sur la piste.....	84
2) Les "reverses".....	85
3) Comment freine-t-on les roues d'un avion ?.....	86
• Freins à disque ou à tambour ?.....	86
• Détails des freins à disque.....	86
• Test de résistance des freins carbone.....	86
4) Cas particulier de l'utilisation de brins d'arrêt.....	87
<i>V- Fusées et engins spatiaux.</i>	88
1) Description du fonctionnement d'une fusée.....	88
• Le moteur et la propulsion.....	88
• Le vol, et les lois de la mécanique.....	88
• Le contrôle et le guidage de la fusée (pilotage).....	88
2) Un peu d'histoire.....	89
3) Les différents "moteurs-fusées".....	89
4) Caractéristiques des propulseurs fusées.....	89
• Plusieurs caractéristiques importantes des moteurs de fusées :.....	89
• La sortie des gaz (Tuyère de Laval & Tuyère).....	90
5) Réacteur fusée utilisant des ergols liquides.....	91
• Principe de fonctionnement :.....	91
6) Les propulseurs à propergols solides.....	91
• Moteur à ergols solides.....	91
7) Le vol des fusées (Bonus CAEA).....	93
• La phase propulsée.....	93
• La phase balistique.....	93
• Le vol oblique.....	93
8) Caractéristiques géométriques de la fusée.....	94
9) Orbite des satellites.....	94
• Les orbites.....	94
• L'orbite circulaire.....	94
• L'orbite géostationnaire (circulaire).....	95
• Exemple de calcul associé.....	95
• Orbites héliosynchrones (circulaire).....	95
• Orbite elliptique.....	95
10) La vitesse de libération.....	95
• Exemple de calcul.....	96
11) Un petit rappel des 3 lois de Kepler.....	96
• Première loi – Loi des orbites.....	96
• Seconde loi – Loi des aires.....	96
• Troisième loi – Loi des périodes.....	96
• Un peu de physique".....	97
12) La propulsion électrique.....	97
• Le moteur à plasma.....	97
• Le moteur ionique.....	98
13) Le nucléaire dans l'espace.....	99
• Les générateurs thermoélectriques nucléaires.....	99
• La motorisation nucléaire ? (Wikipédia).....	99
14) Les propulseurs fusées ... utilisés sur des avions.....	100
15) Pour aller plus loin.....	100

• Compléments sur l'impulsion spécifique (Wikipédia).....	100
<i>VI - Les hélicoptères.</i>	102
<i>Et leurs cousins à voilure tournantes.</i>	102
1) Description globale de l'appareil.....	102
2) La boîte de transmission principale BTP.....	102
3) Les commandes de pilotage.....	103
4) Le rotor.....	103
5) L'articulation et la commande du rotor.....	104
• Les commandes de pas.....	105
• Le plateau cyclique.....	105
6) Les motorisations.....	105
7) Le train d'atterrissage.....	106
8) Les instruments de bords de l'hélicoptère.....	106
9) Les records.....	107
• Record de distance.....	107
• Record d'altitude.....	107
• Record de vitesse.....	108
10) Le rotor anticouple.....	108
11) Peut-on se passer de l'anticouple ?.....	109
• Solution 1 ... supprimer le couple.....	109
• Solution 2 ... créer un autre couple en sens inverse... ce sont les bi-rotors.....	109
• Autres solutions	110
12) D'autres solution à voilures tournantes ... ou rotors pivotants.....	110
• L'autogire.....	110
• Le Fairey Rotodyne.....	110
• Le Boeing/Bell V-22 Osprey.....	111
13) Un petit point sur le vocabulaire utilisé (Dictionnaire).....	111
14) Et si le moteur d'un hélicoptère tombe en panne ???.....	111
• L'autorotation !.....	111
<i>Compléments</i>	112
L'alphabet aéronautique et le Morse.....	112
LISTE DES ABREVIATIONS UTILISEES :.....	112
FACTEURS DE CONVERSION :.....	113
Et en inverse.....	113
LISTE DES ABREVIATIONS RADIO :.....	113
<i>Index</i>	115
<i>Table des matières</i>	118
<i>Conseils d'utilisation</i>	123
<i>Copyrights</i>	124

Conseils d'utilisation

En version modifiable (Word)

Ajout d'un renvoi vers la table d'Index.

*Sélectionner le mot ou le groupe de mot puis la combinaison de touches **Maj+Alt+X**
Choisir vos options puis valider.*

Avant impression du document complet. (*Avantage = pagination + index + table des matières*)

Vérifier ensuite en mode aperçu qu'il n'y a pas de pages blanches, des erreurs de numérotation ou des polices anormales (des bugs de Word assez pénibles).

Mettre ensuite à jour les références (table des matière et index)

Clic droit sur les éléments actifs (tables des matières simplifiée du début et la complète de la fin ainsi que sur l'index) pour une MISE à JOUR des CHAMPS ou mieux de toute la table.

Copyrights

De nombreux sites de qualité existent sur internet et servent de source documentaire et de base d'illustration pour ce document. Les citer tous serait difficile ... je vais donc citer le plus agréable à visiter, le mieux illustré et surtout le plus pointu sur le plan technique et théorique :

<http://www.lavionnaire.fr/>

Qui m'a énormément servi à illustrer et compléter cette série de document.