

BIA

AERODYNAMIQUE
ET
MECANIQUE DU VOL

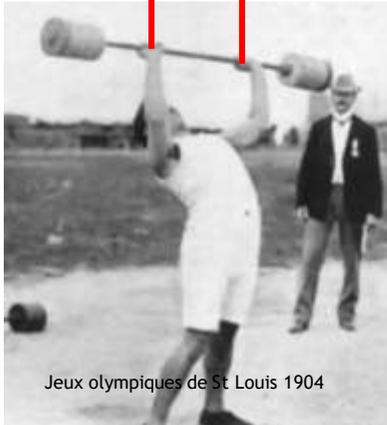
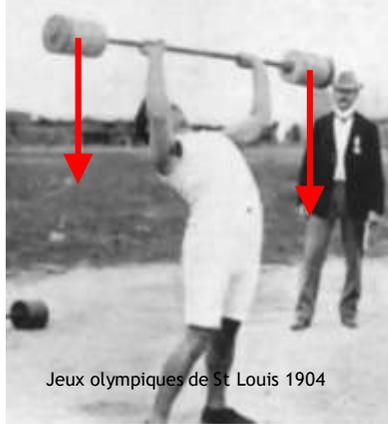
Y. GHERARDI
Edition 2.1
Janvier 2017

1- RAPPELS



Notion de force

C'est l'action d'un corps sur un autre corps (par contact ou à distance).

Forces de contact		Forces à distance	
			
<p>Action du pied sur le ballon : Mise en mouvement</p>	<p>Action de la raquette sur la balle : Modification du mouvement</p>	<p>Action des mains sur la barre : Mise en équilibre</p>	<p>Action de la terre sur les disques = Poids des disques</p>

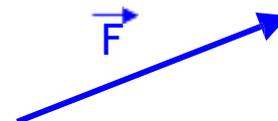
Jeux olympiques de St Louis 1904

Jeux olympiques de St Louis 1904

*Autre exemple de force à distance :
Force d'attraction d'un aimant.*

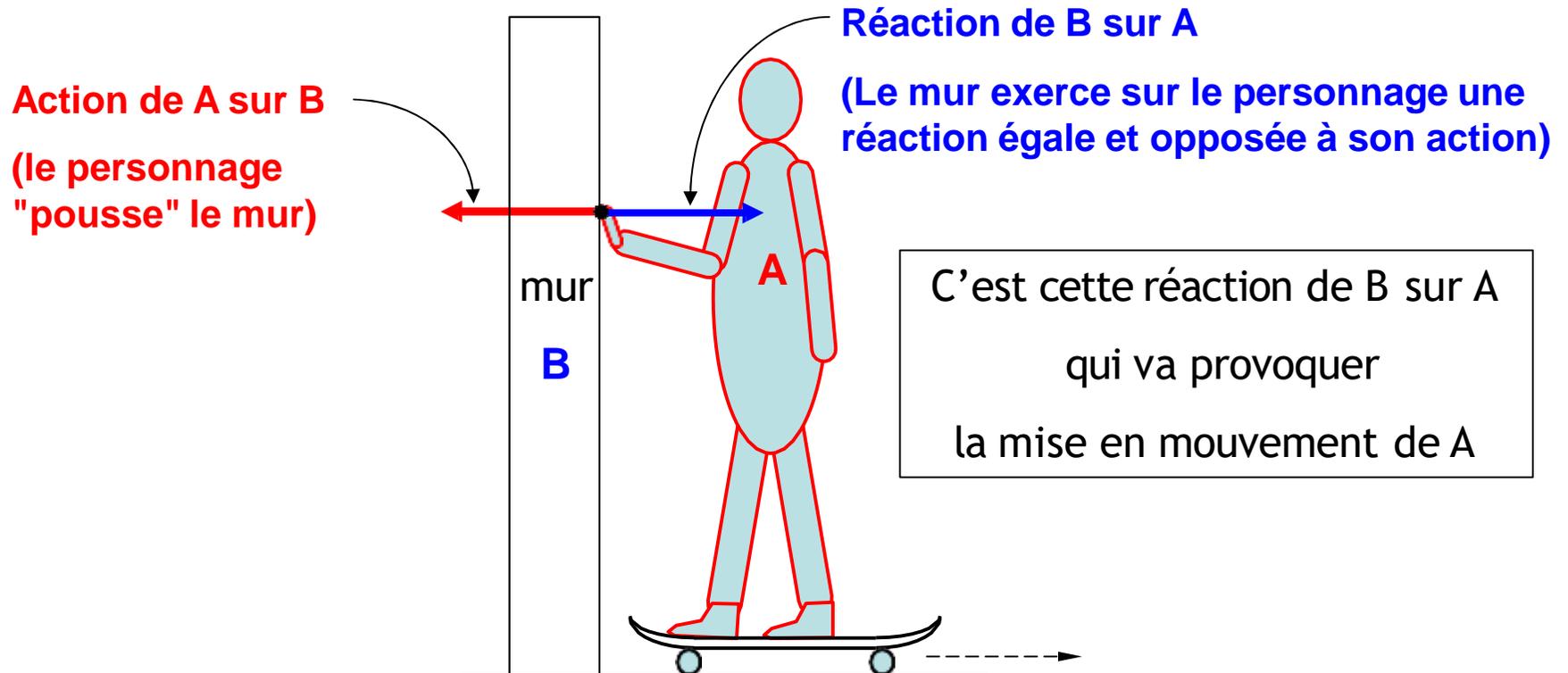
Définition d'une force : Toute cause capable de **produire** ou de **modifier** le **mouvement** ou l'**équilibre** d'un corps.

Une force est caractérisée par une **intensité** mesurée en Newtons (N) et une **direction**.
Elle peut être représentée par un **vecteur** :



Action et réaction

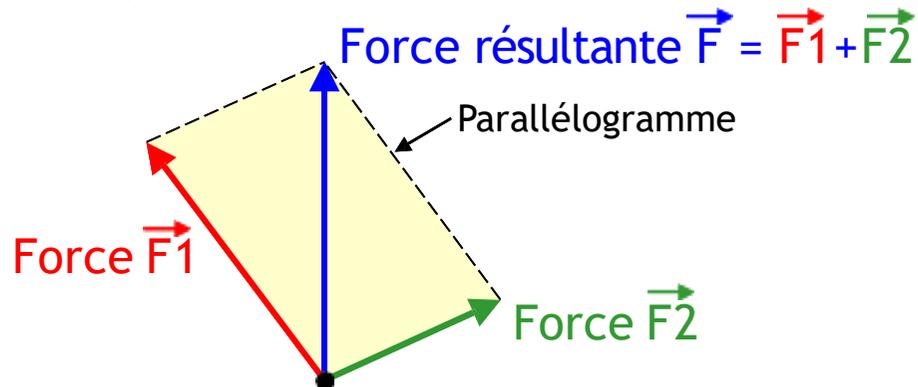
Lorsqu'un corps A exerce une force (**action**) sur un corps B, le corps B exerce toujours une force **égale et opposée** (**réaction**) sur le corps A.



Résultante de 2 ou plusieurs forces

C'est la force qui produira, à elle seule, le même effet que l'ensemble de 2 ou plusieurs forces.

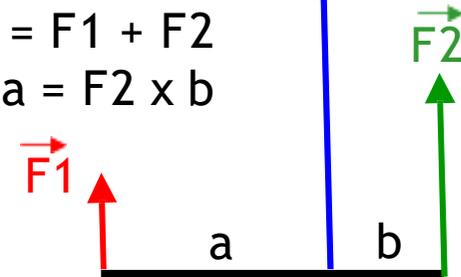
La **résultante de 2 forces** est représentée par la résultante des 2 vecteurs correspondants. Cette résultante se construit de la manière suivante :



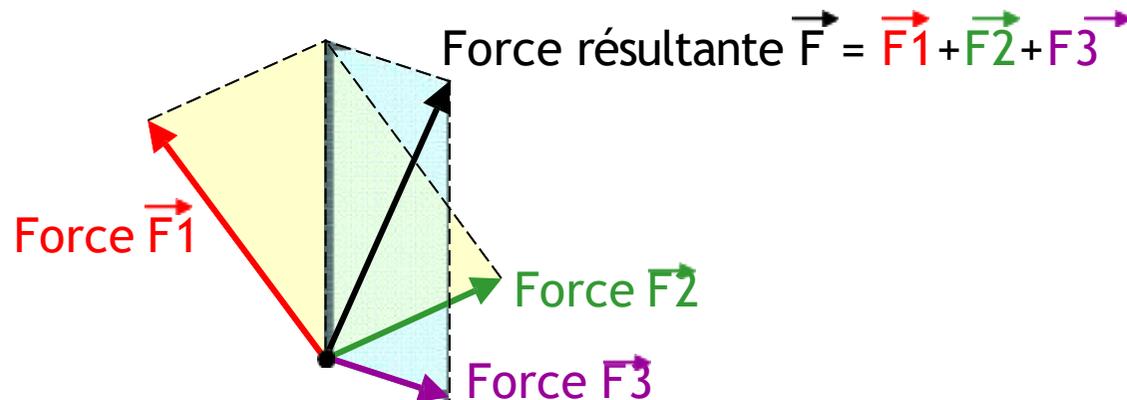
Si les forces sont parallèles :

$$\text{Force résultante } \vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

Avec : $F = F_1 + F_2$
et $F_1 \times a = F_2 \times b$



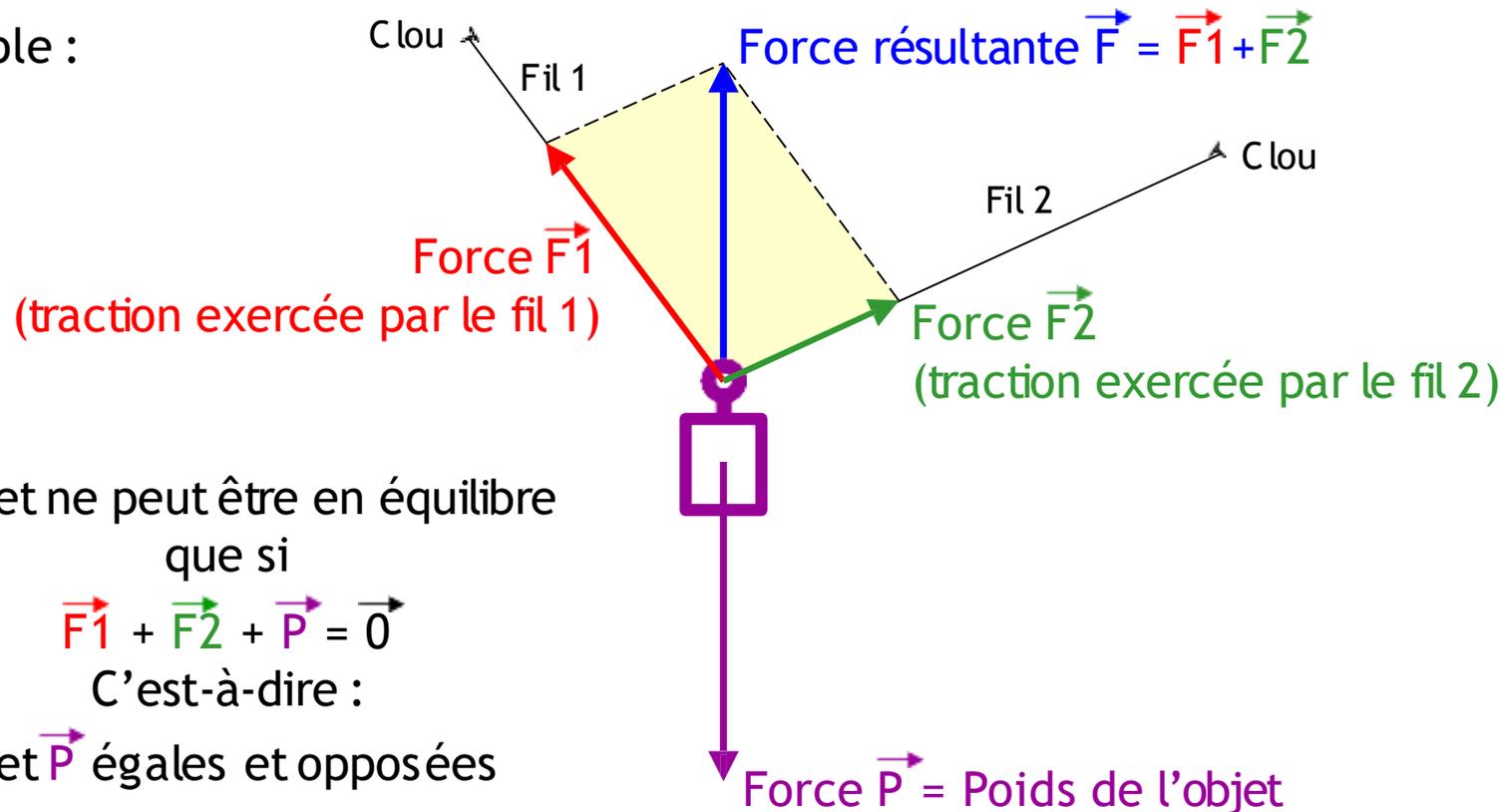
On peut, de la même manière, déterminer la **résultante de plusieurs forces** :



Equilibre d'un corps

Un corps ne peut être en **équilibre** que si la **résultante** de toutes les forces qui lui sont appliquées **est nulle** :

Exemple :



L'objet ne peut être en équilibre que si

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{P} = \vec{0}$$

C'est-à-dire :

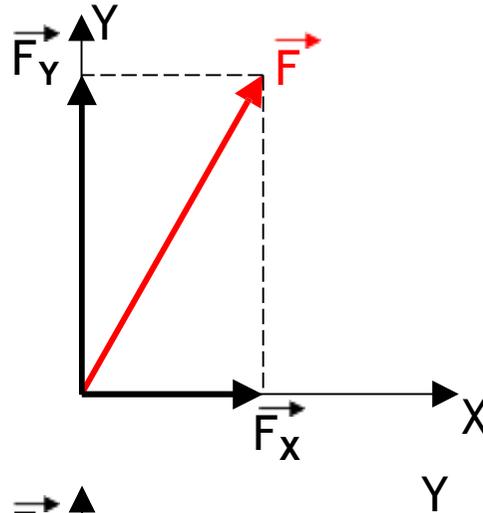
\vec{F} et \vec{P} égales et opposées

Remarque : C'est une condition nécessaire, mais pas forcément suffisante !

Composantes d'une force

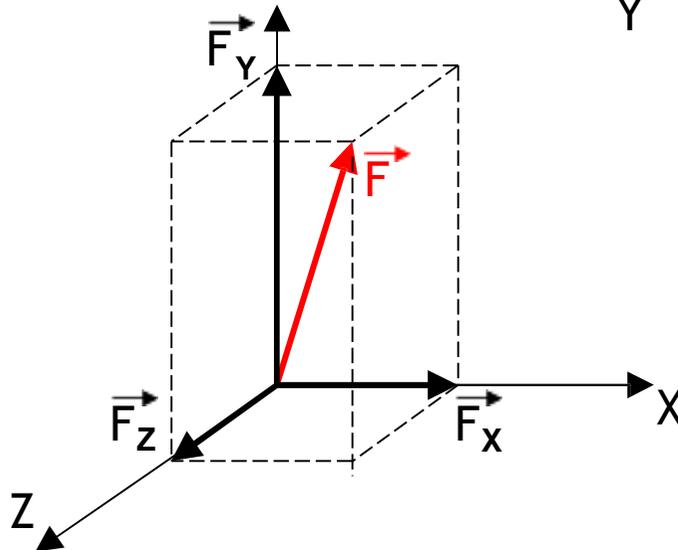
Toute force peut être considérée comme la résultante de plusieurs forces appliquées dans des directions particulières :

En 2D



\vec{F}_x et \vec{F}_y sont les **composantes** de \vec{F}

En 3D



\vec{F}_x , \vec{F}_y et \vec{F}_z sont les **composantes** de \vec{F}

Effet d'une force sur la trajectoire d'un corps

Pour **courber la trajectoire** d'un corps en mouvement il faut lui appliquer une **force transversale**.

- Pour que la moto puisse prendre le virage il faut que la réaction du sol sur la moto ait une composante dirigée vers l'intérieur du virage.

Si on répand de l'huile sur la piste, le virage sera impossible car le sol ne pourra pas exercer de réaction horizontale sur la moto.



- La force d'attraction de la terre (poids) courbe la trajectoire des particules d'eau.



2- AERODYNAMIQUE



L'atmosphère terrestre, l'air (1)

L'atmosphère constitue l'**enveloppe gazeuse de la terre**.

Elle est **retenue par l'attraction terrestre**.

Elle est composée :

- d'**air** (essentiellement)

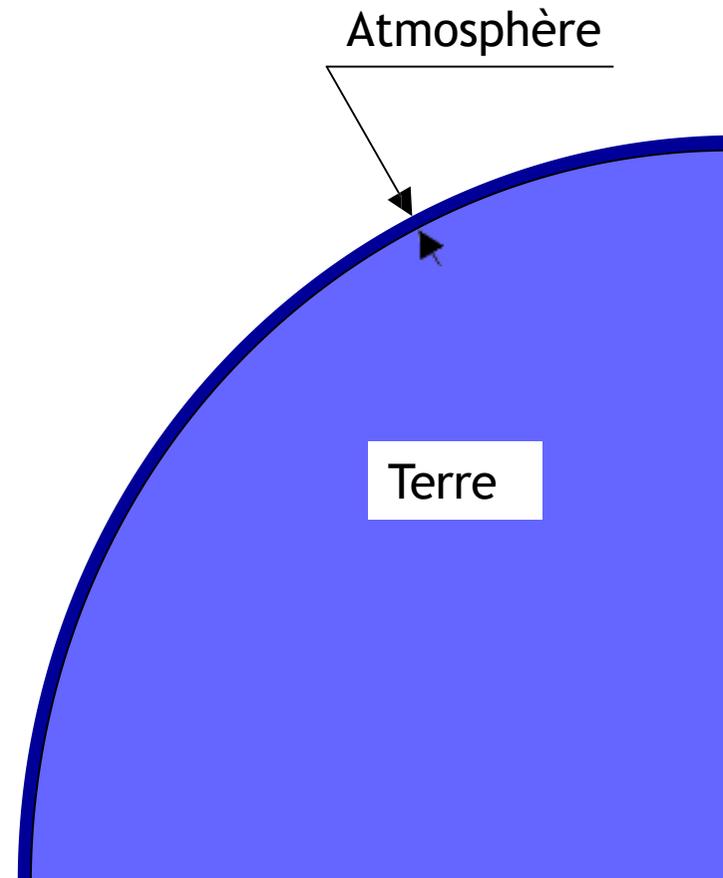
- de vapeur d'eau

- d'eau atmosphérique (nuages)

- de poussières

Pour l'étude de l'aérodynamique nous pouvons négliger ces composants.

Nous en reparlerons quand nous étudierons la météo.



L'atmosphère terrestre, l'air (2)

Comme tous les gaz, l'air est **compressible** (« élastique »).

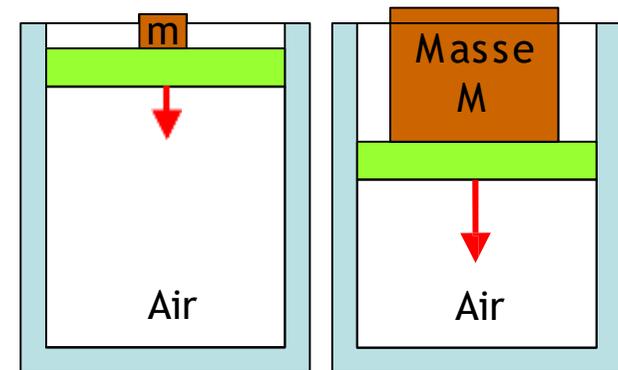
C'est-à-dire qu'on peut **réduire le volume** occupé par une quantité d'air donnée en **augmentant sa pression** (en augmentant la pression qu'on lui applique).

Une **pression** correspond à une **force** répartie de façon uniforme sur une **surface**.

Une pression s'exprime en **Pascal** (Pa)

1 Pascal = 1 Newton / mètre².

On utilise souvent l'**hectopascal** (1hPa = 100 Pa) pour mesurer la pression de l'air dans l'atmosphère (**pression atmosphérique**).



La **pression** et la **température** de l'atmosphère varient en fonction de l'**altitude**, en fonction du **lieu** et en fonction de l'**instant**.

On appelle « **conditions standard** » les conditions de température et de pression « **moyennes** » rencontrées à une altitude donnée.

Ces « conditions standard » ont été définies en considérant l'ensemble de la planète et l'ensemble des saisons.

L'atmosphère terrestre, l'air (3)

L'air est **pesant**. Dans les conditions standard, au niveau de la mer, 1m^3 d'air a une masse de $1,225\text{ kg}$.

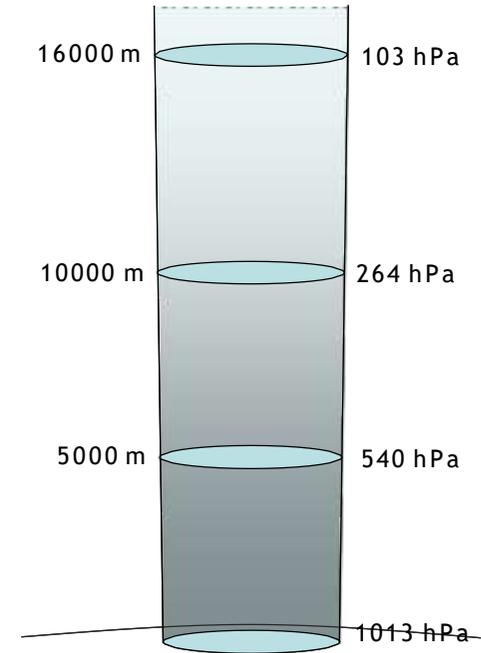
La pression exercée par l'air atmosphérique sur la surface terrestre représente le **poids de la colonne d'air** ayant pour base une unité de surface.

Au niveau de la mer, la pression atmosphérique **standard** vaut **$1013,25\text{ hPa}$** ($=101325\text{ Pa}$).

Chaque colonne d'air ayant pour base 1 m^2 de surface terrestre a donc un poids de 101325 N . Sa masse est donc de l'ordre de **10 tonnes** !

Lorsqu'on s'élève dans la colonne d'air, la pression à une altitude donnée représente le **poids** de la portion de **colonne d'air située au-dessus** de cette altitude. Il est donc logique que la **pression** atmosphérique **diminue** lorsque l'**altitude augmente**.

90% de la masse de l'atmosphère est située en dessous de 16 km .

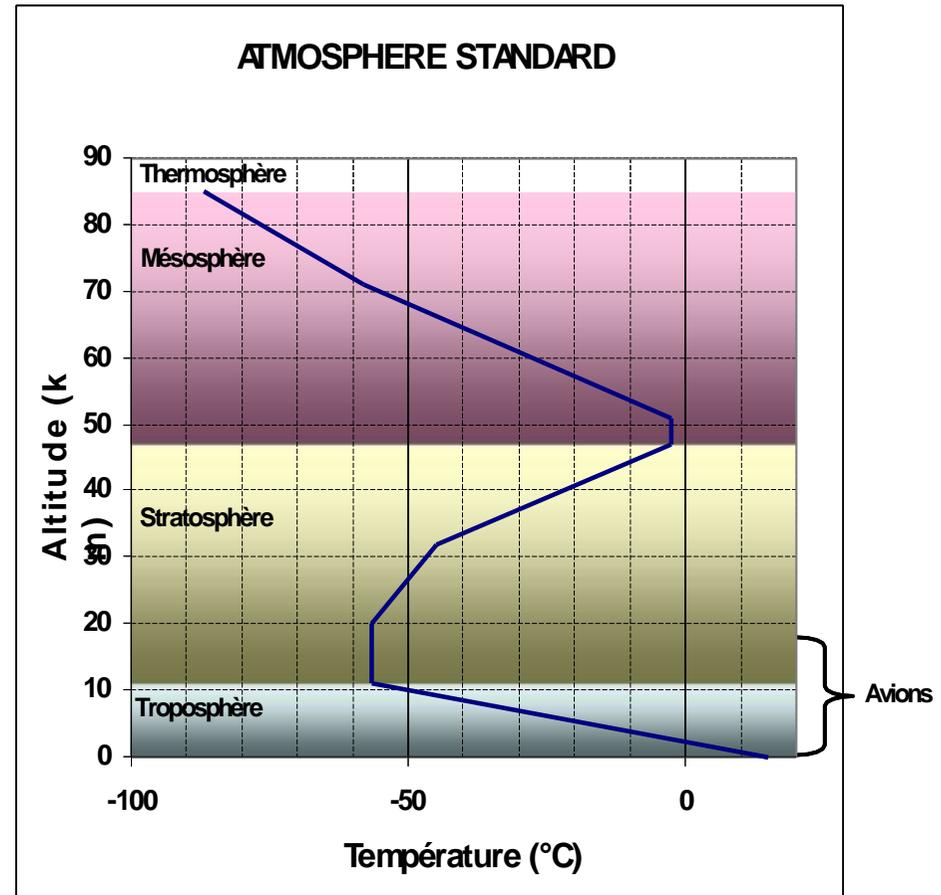


L'atmosphère terrestre, l'air (4)

La **température** de l'atmosphère **varie en fonction de l'altitude**.

Dans la plage d'altitude où évoluent les avions, la température **standard** :

- vaut **15°C** au niveau de la mer.
- diminue de **6,5°** tous les **1000 mètres**, jusqu'à 11000 m d'altitude.
- reste constante à **-56,5°C** au dessus de 11000 mètres d'altitude.



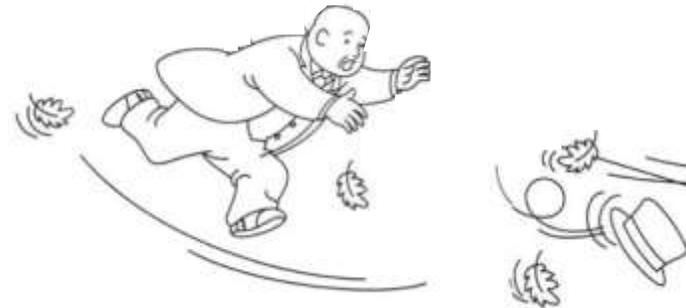
Les évolutions de la température en fonction de l'altitude ont conduit à donner un nom aux différentes couches de l'atmosphère.

Forces aérodynamiques

L'air qui s'écoule autour d'un corps exerce des forces sur ce corps.

On les appelle :

« **forces aérodynamiques** ».



Ces forces apparaissent aussi bien :

- Si le corps est immobile et l'air en mouvement.



- Si l'air est immobile et le corps en mouvement.

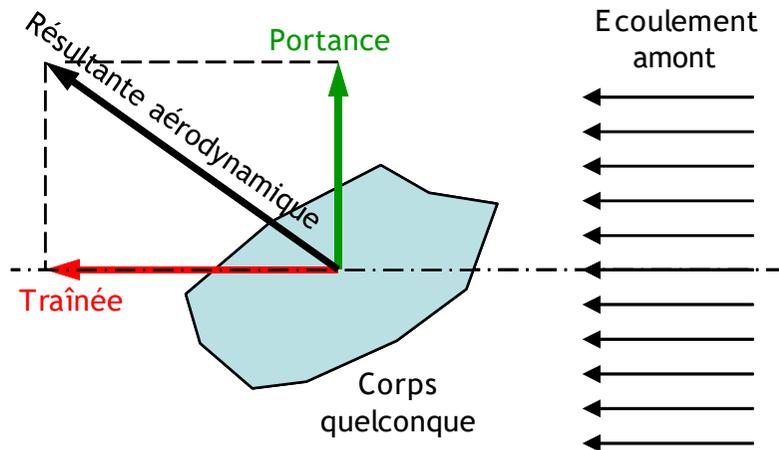


La seule chose qui compte, c'est le **mouvement relatif** de l'air par rapport au corps.

Portance et traînée

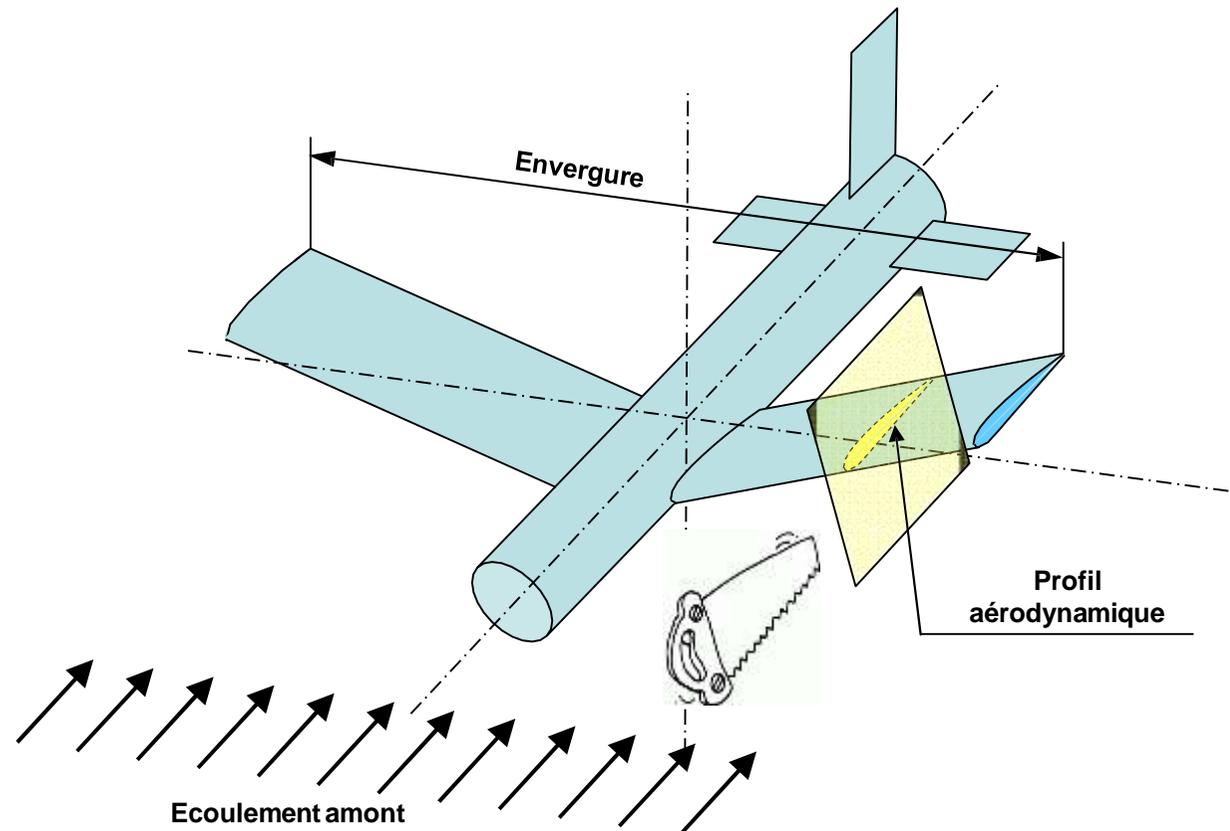
Lorsque l'air s'écoule autour d'un corps :

- On appelle « **traînée** » la composante de la force exercée par l'air sur ce corps, **dans la direction de l'écoulement amont**.
- On appelle « **portance** » la composante de la force exercée par l'air sur ce corps, **perpendiculairement à la direction de l'écoulement amont**.



Notion de profil aérodynamique (1)

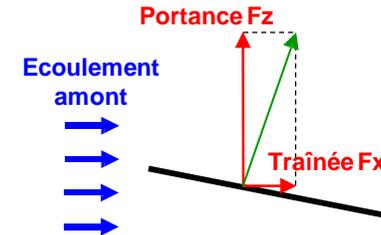
Un **profil aérodynamique** est la forme obtenue si on coupe (par la pensée) l'aile d'un avion par un plan parallèle à l'écoulement amont et perpendiculaire au plan moyen de l'aile.



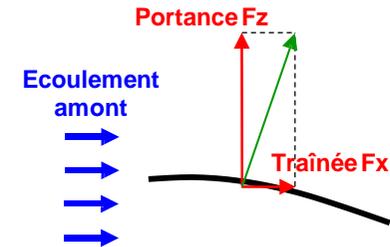
Notion de profil aérodynamique (2)

Un bon profil d'aile est un profil capable de développer le **maximum de portance** pour le **minimum de traînée**.

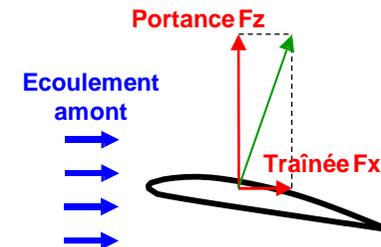
- L'idée la plus simple consiste à utiliser une plaque plane inclinée (profil mince rectiligne).



- Dans les débuts de l'aviation, on a beaucoup utilisé des profils minces cambrés.



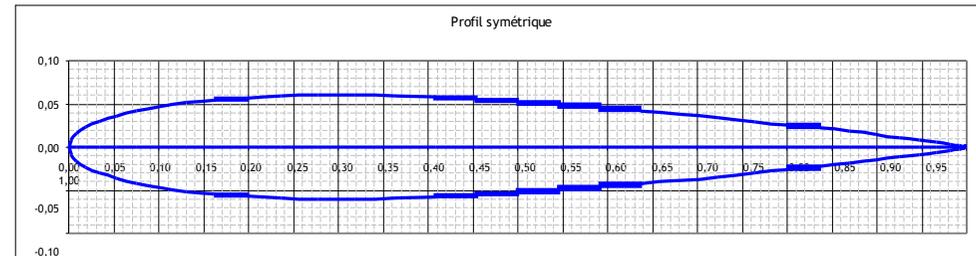
- Rapidement, les profils épais, arrondis à l'avant et effilés à l'arrière ont démontré leur efficacité.



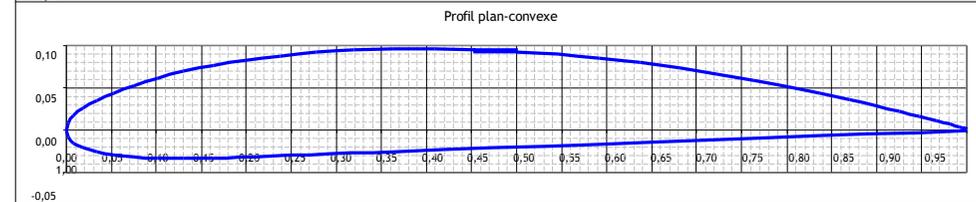
Catégories de profils aérodynamiques

Il existe une immense variété de profils aérodynamiques. On les regroupe en catégories, parmi lesquelles on peut citer :

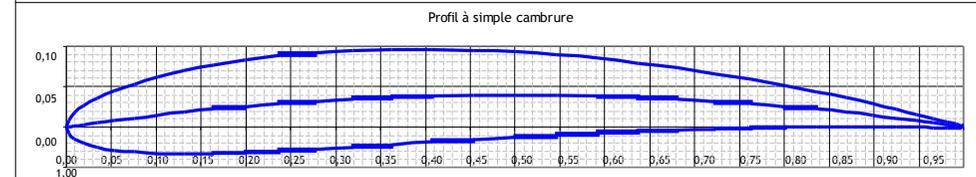
- Profil **symétrique biconvexe**



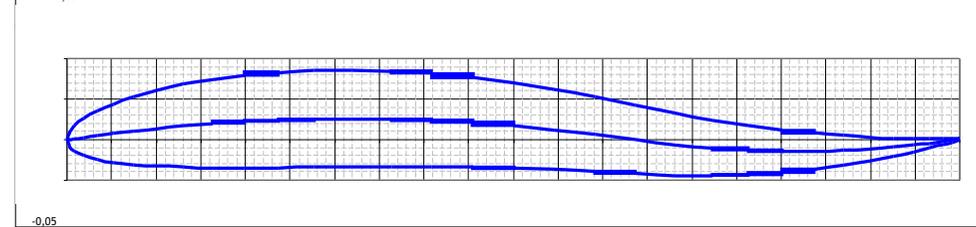
- Profil **plan-convexe**



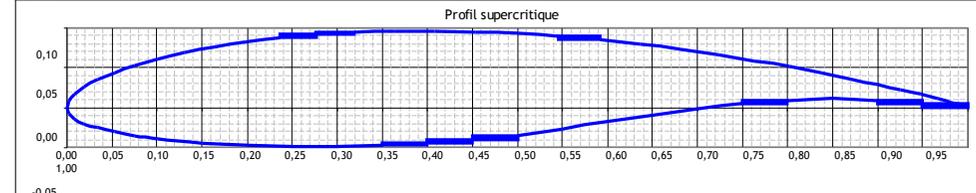
- Profil **creux**



- Profil à **double courbure**
(profil auto-stable)



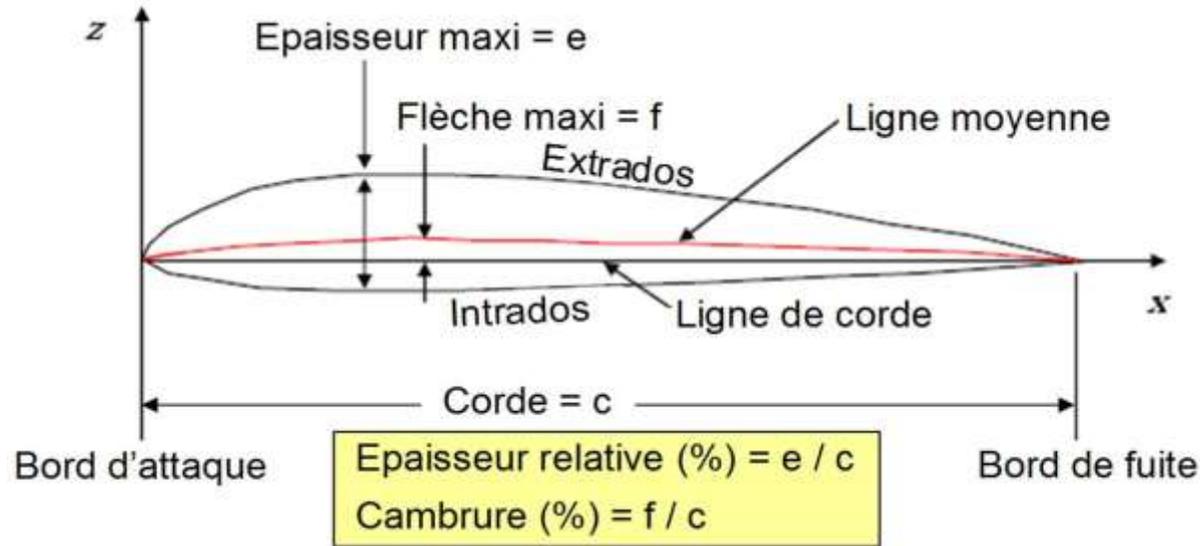
- Profil **supercritique**



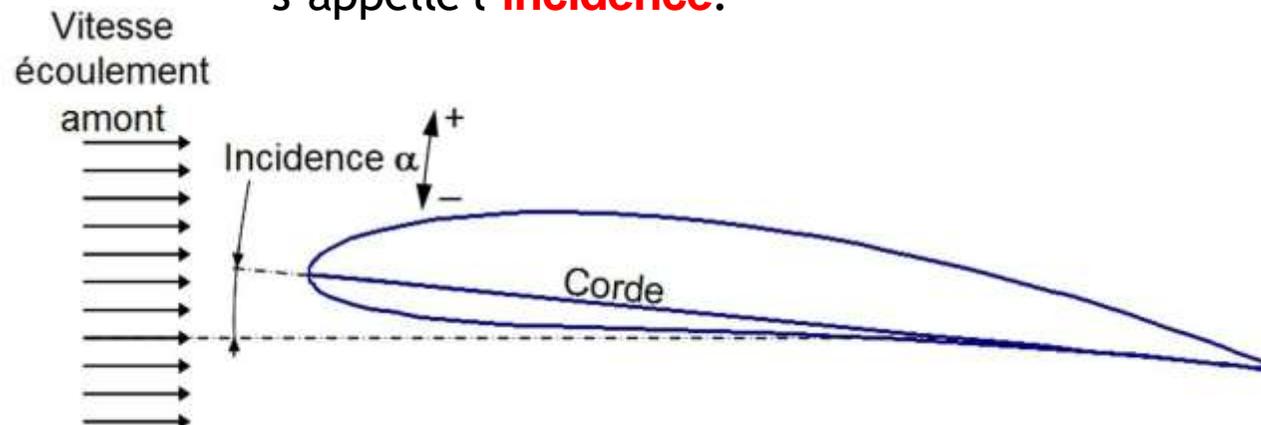
- ...

Description et positionnement d'un profil

Pour décrire un profil aérodynamique, on emploie un **vocabulaire précis** :



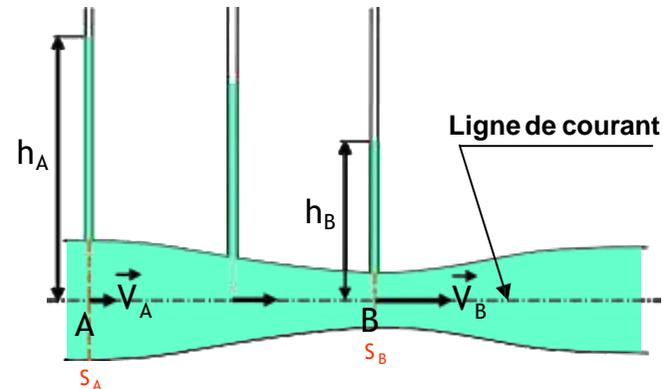
L'angle entre la corde du profil et la direction de l'écoulement amont s'appelle l'**incidence**.



Relation entre vitesse et pression

Lorsque l'air s'écoule dans un conduit de section variable, il va plus vite là où la section est la plus étroite.
(comme dans un entonnoir)

L'air est accéléré entre la section A et la section B.



Cette accélération n'est possible que si la pression en A est supérieure à la pression en B.

La **loi de Bernoulli** établit la relation entre les variations de pression et les variations de vitesse :

Le long d'une ligne de courant, la somme $P + \frac{1}{2}\rho \cdot V^2$ reste constante.

$$P_A + \frac{1}{2}\rho \cdot V_A^2 = P_B + \frac{1}{2}\rho \cdot V_B^2$$

Dans cette expression, ρ est la **masse volumique** de l'air en kg/m^3 ,
 V est la **vitesse** en m/s , P est la **pression** en Pa.

Remarque : La loi de Bernoulli n'est strictement applicable qu'aux écoulements permanents de fluides considérés comme incompressibles et de viscosité négligeable.

Acceptable pour l'air, en dessous d'une vitesse de 100 m/s environ.

Application : Le tube de Pitot

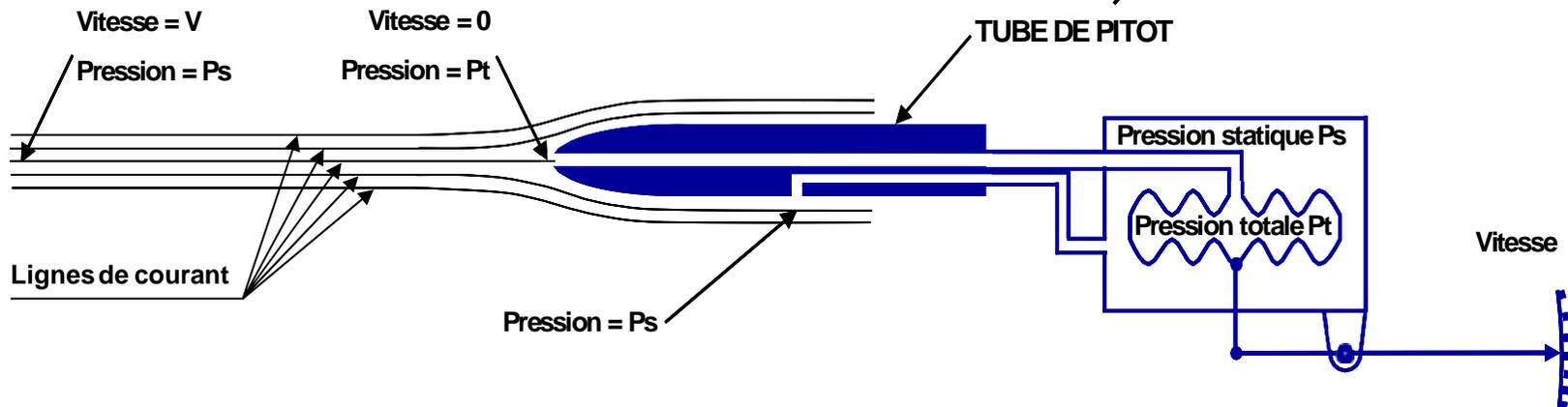
Comment **mesurer la vitesse** d'un avion par rapport à l'air ?

Dans un écoulement, on peut mesurer la vitesse de l'air **en créant un point d'arrêt** et en mesurant la différence entre :

- la pression **au point d'arrêt** (appelée **pression totale : Pt**)
- et
- la pression dans l'écoulement, **hors de toute perturbation** (appelée **pression statique : Ps**).

D'après Bernoulli $\rightarrow \overbrace{Pt + 0}^{\text{au point d'arrêt}} = \overbrace{Ps + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2}^{\text{hors perturbation}}$
donc **$Pt - Ps = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$** \leftarrow vitesse nulle au point d'arrêt

La **différence** $Pd = Pt - Ps$ est appelée **pression dynamique**. Elle est directement représentative de la **vitesse**.

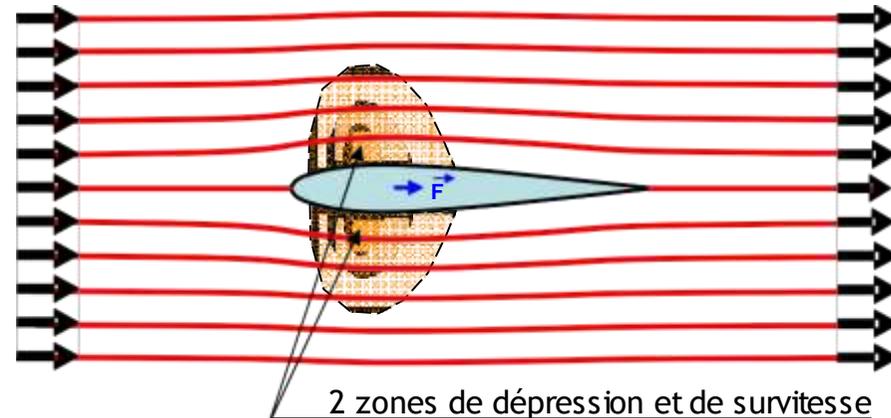


Écoulement symétrique

Lorsque l'air s'écoule autour d'un **profil symétrique** et que l'angle d'**incidence** est **nul** :

- Les lignes de courant s'écartent de façon symétrique de part et d'autre du profil. Elles **se rapprochent** donc localement **les unes des autres**.

- Dans les zones où les lignes de courant se resserrent, la **vitesse de l'air augmente** (comme dans un conduit à section variable). La **pression diminue** donc (loi de Bernoulli).



- Tout étant symétrique :

- il n'y a **pas de portance** (même dépression à l'intrados et à l'extrados).
- la direction de l'air en aval du profil est la même qu'en amont : **pas de déviation**.

- L'air étant visqueux (faiblement), il est légèrement **freiné au contact de la peau du profil**, ce qui occasionne une petite force de traînée qui porte le nom de **traînée de frottement**.

Écoulement à incidence modérée (1)

Lorsque on donne de l'incidence à un profil (symétrique ou cambré) :
Les lignes de courant **se resserrent à l'extrados** et **s'écartent à l'intrados**

Il y a donc :

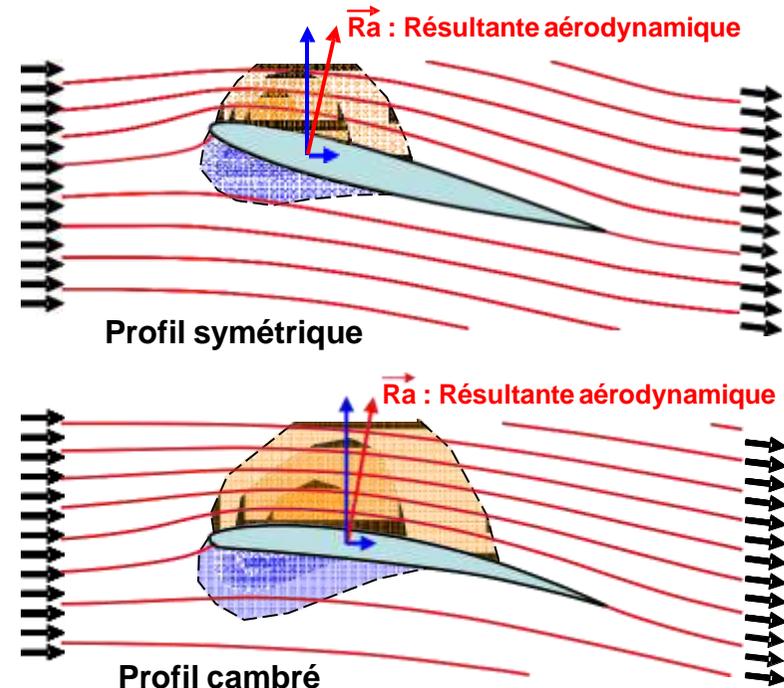
- sur vitesse et **dépression à l'extrados**
- ralentissement et **surpression à l'intrados**.

La dépression d'extrados et la surpression d'intrados se conjuguent pour donner la **portance**.

Comme dans le cas précédent, L'air est légèrement freiné au contact du profil, ce qui occasionne une petite **traînée de frottement**.

On constate que la direction de l'air en aval du profil n'est plus la même qu'en amont, car l'air qui s'écoule à l'extrados « colle » au profil jusqu'au bord de fuite.

*Il faut savoir que le **bord de fuite effilé** et la **viscosité de l'air** (même très faible) ont un rôle prépondérant dans cet attachement de l'air à l'extrados du profil jusqu'au bord de fuite.*



Écoulement à incidence modérée (2)

L'apparition de la **portance** liée à l'**attachement à l'extrados** et à la **déviaton de l'écoulement** peut être mise en évidence par cette vidéo :



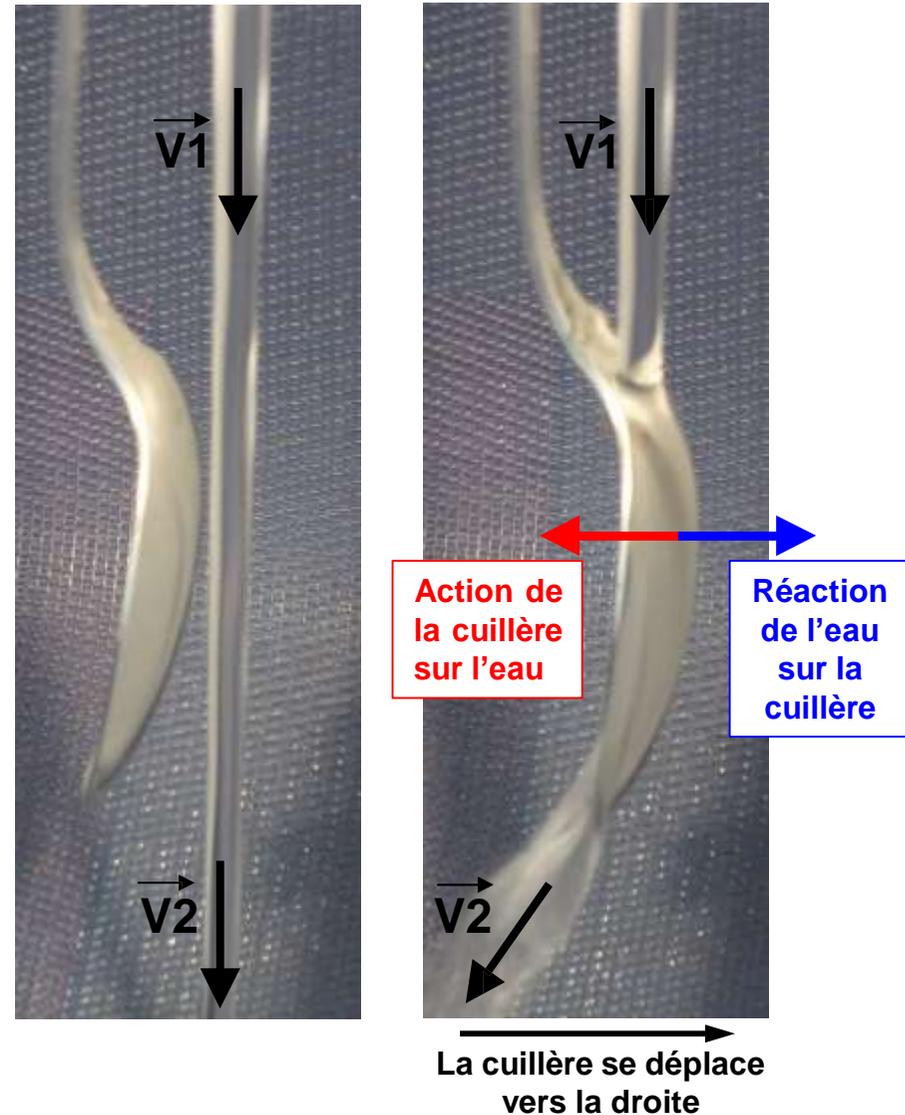
Écoulement à incidence modérée (3)

La cuillère est « aspirée » vers la droite.

L'apparition de la portance n'a rien d'étonnant :

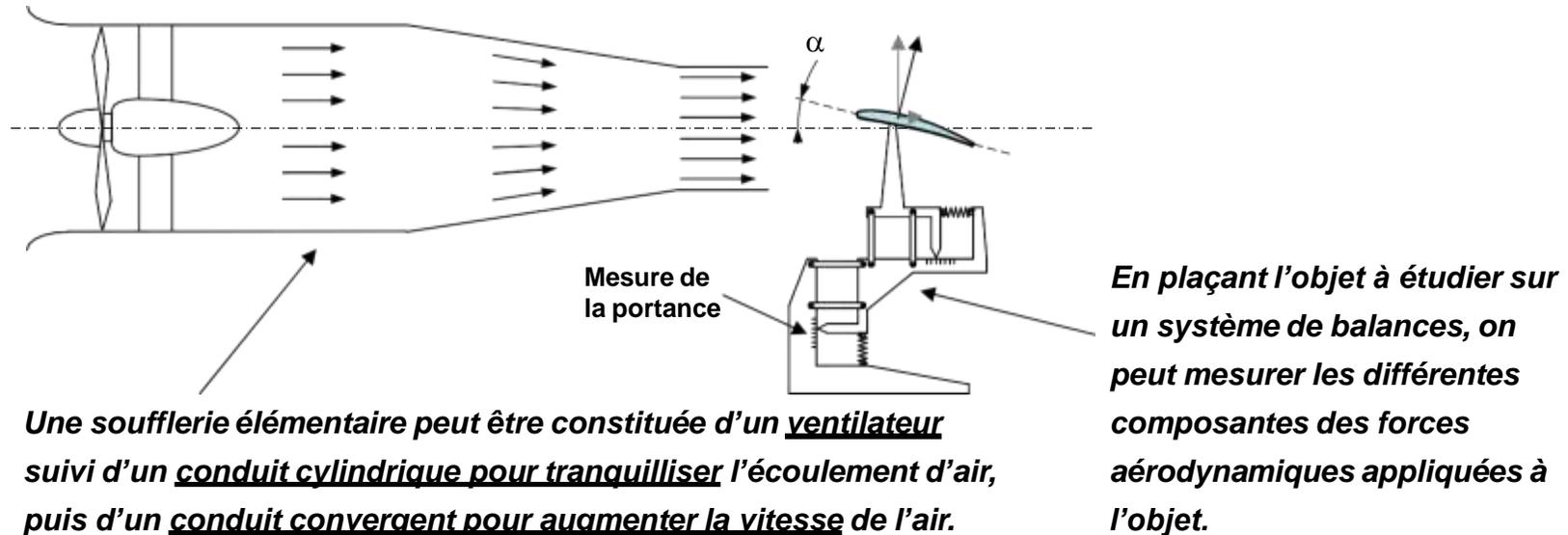
Pour que l'eau soit déviée il faut que la cuillère exerce sur l'eau une **force** vers la **gauche**.
(effet d'une force sur la trajectoire d'un corps en mouvement, déjà vu)

L'eau exerce donc sur la cuillère une **réaction** (égale et opposée) dirigée vers la **droite**. C'est la **portance**.



Etude de la portance (1)

Au moyen d'une soufflerie, recherchons les facteurs influençant la portance :



1° Influence de la vitesse :

Sans changer le profil étudié et sans changer son angle d'incidence α , faisons **varier la vitesse de l'air** :

On constate que **la portance est proportionnelle au carré de la vitesse**

(La portance est multipliée par 4 si on double la vitesse, par 9 si on la triple, etc...)

Etude de la portance (2)

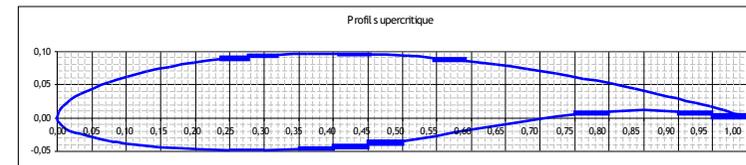
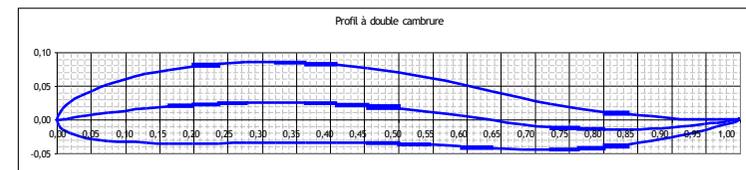
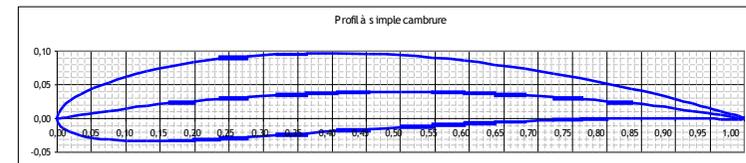
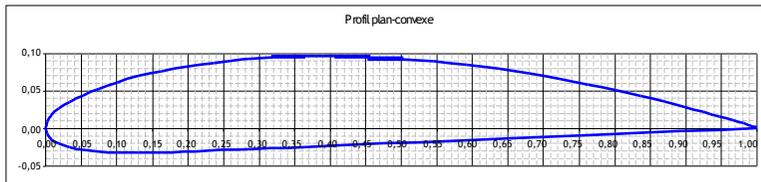
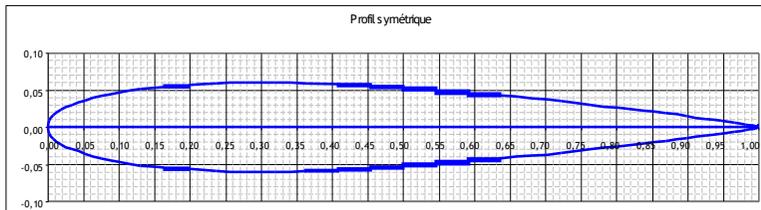
2° Influence du profil :

Plaçons successivement **différents profils**

- de même dimension
- positionnés à la même incidence
- et en réglant la soufflerie pour obtenir la même vitesse de l'air

On constate que certains profils génèrent une portance supérieure.

La **portance dépend** du **profil choisi**

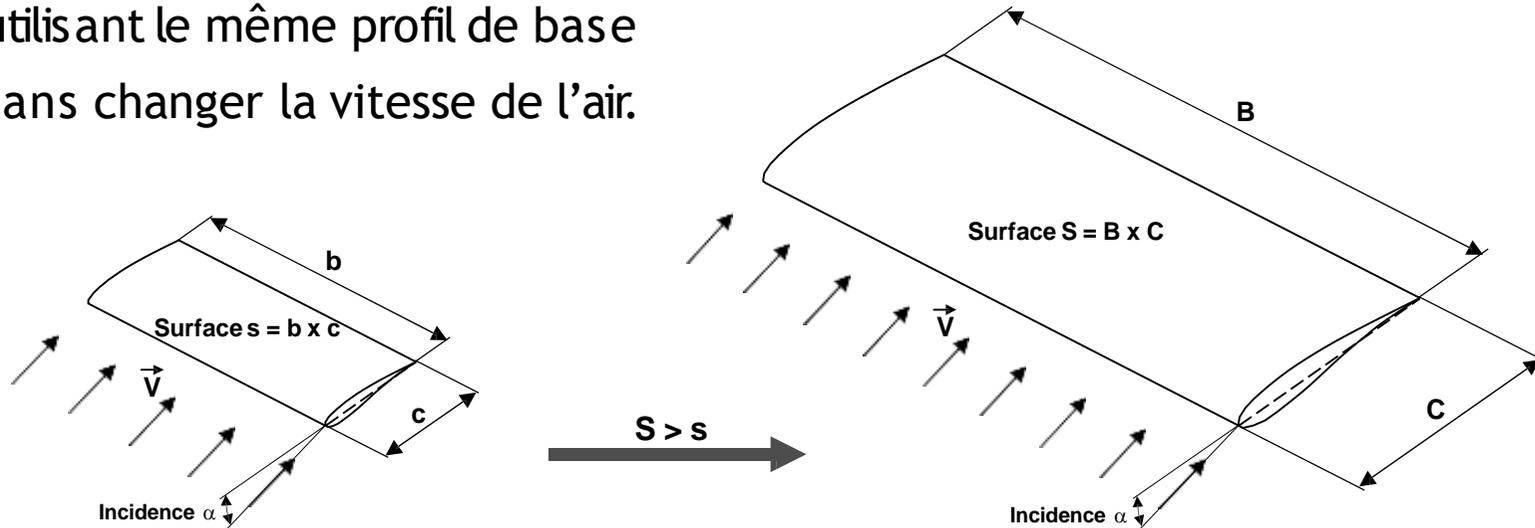


Etude de la portance (3)

3° Influence des dimensions :

Remplaçons l'élément placé dans la soufflerie par un élément :

- **plus grand**
- calé à la même incidence
- utilisant le même profil de base
- sans changer la vitesse de l'air.



On constate que la **portance** est **proportionnelle** à la **surface de l'élément**

Etude de la portance (4)

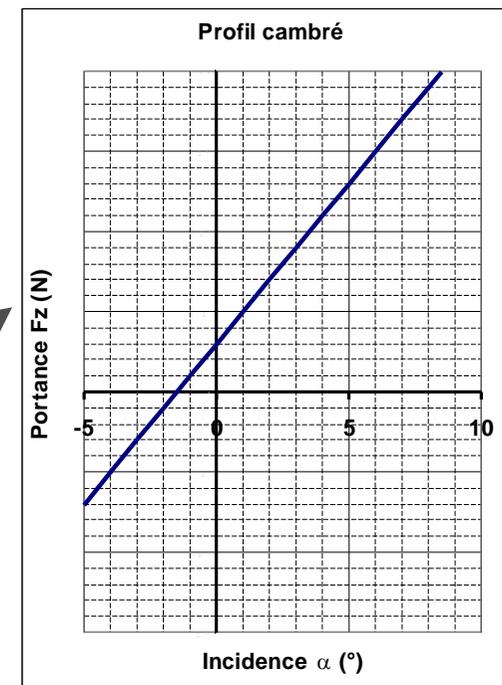
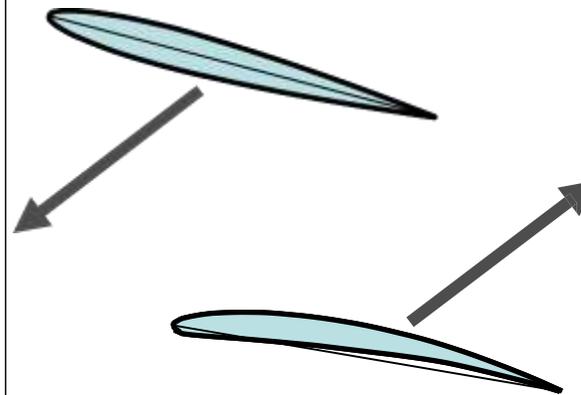
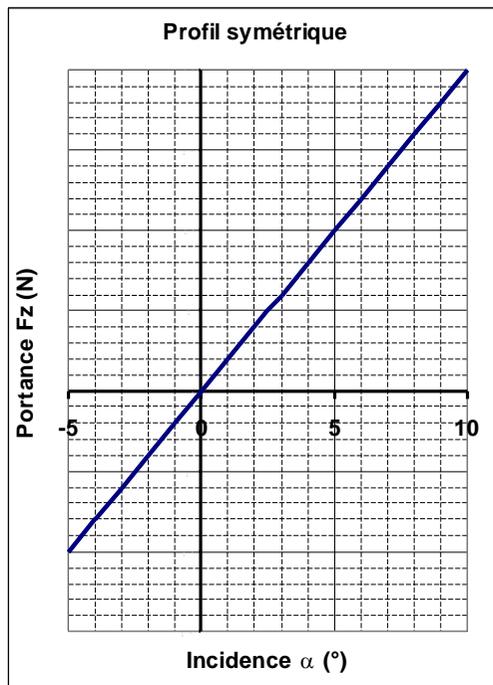
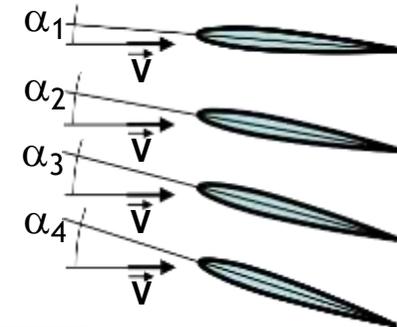
4° Influence de l'angle d'incidence :

Sans changer :

- l'élément placé dans la soufflerie
- la vitesse de l'air

Faisons varier l'**angle d'incidence**.

On constate que la **portance augmente** avec l'**incidence**



Expression de la portance (1)

Pour résumer l'ensemble des observations faites sur la portance, on peut écrire :

$$F_z = k_1 \cdot V^2$$

Car la portance est proportionnelle à V^2 .

Expression de la portance (2)

Pour résumer l'ensemble des observations faites sur la portance, on peut écrire :

$$F_z = k_2 \cdot V^2 \cdot S$$

Car la portance est aussi proportionnelle à **S**.

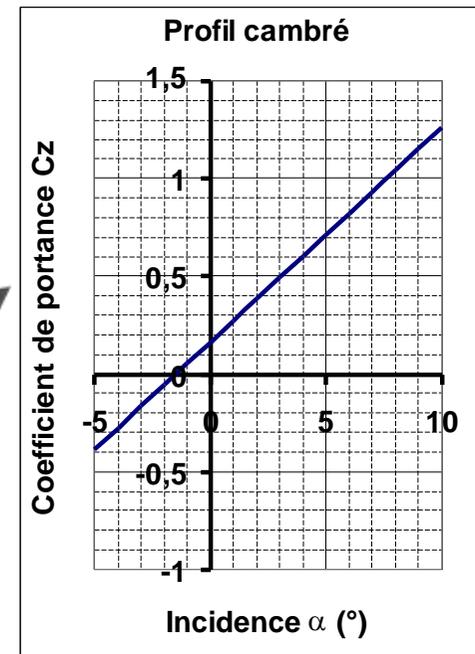
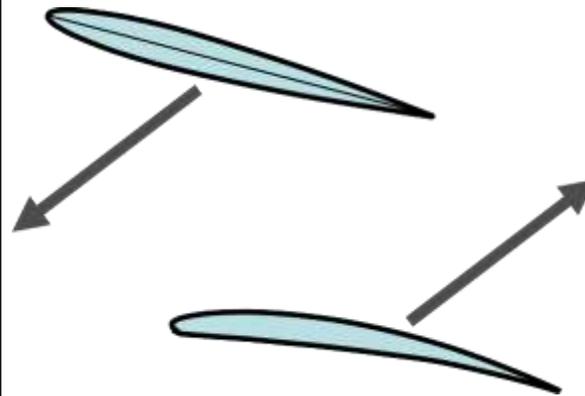
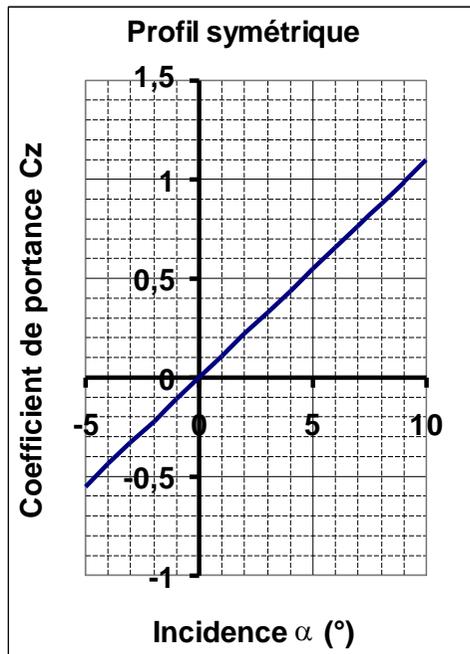
Expression de la portance (3)

Pour résumer l'ensemble des observations faites sur la portance, on peut écrire :

$$F_z = k_3 \cdot V^2 \cdot S \cdot C_z$$

Car la portance dépend du **profil** et de son **incidence**.

(on introduit le coefficient de portance **Cz** qui dépend du profil et de son incidence)



Expression de la portance (4)

Pour résumer l'ensemble des observations faites sur la portance, on peut écrire :

$$F_z = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_z$$

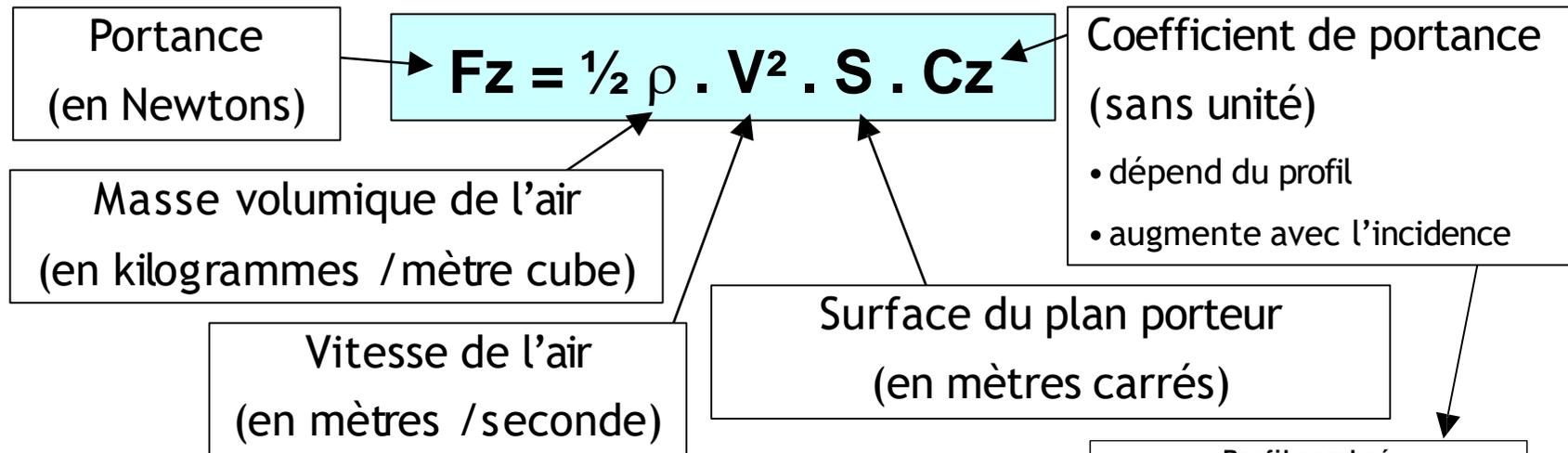
k_3 dépend, en fait, de la **masse volumique** ρ de l'air.

Remarque 1 : La masse volumique de l'air diminue quand l'altitude augmente.

Remarque 2 : On retrouve ici $\frac{1}{2} \rho \cdot V^2$ qui représente la pression dynamique (déjà vue à propos du tube de Pitot)

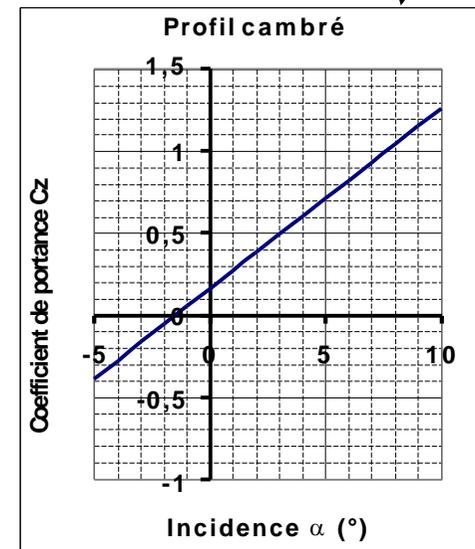
Expression de la portance (5)

En résumé :



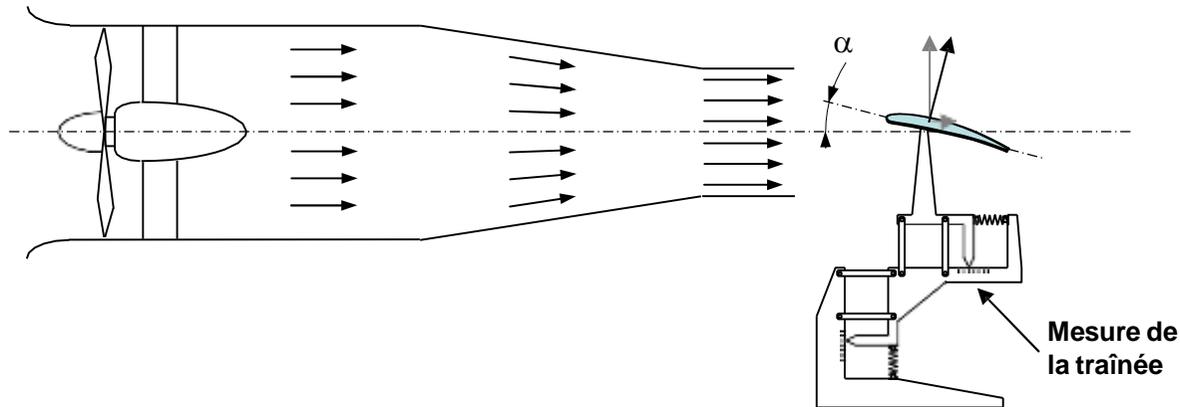
Remarque importante :

Pour obtenir la **même portance** il faut **augmenter l'incidence** si la **vitesse diminue**.



Etude de la traînée

Recherchons maintenant les facteurs influençant la traînée :



1° Influence de la vitesse de l'air, de la surface de l'élément et du profil choisi :

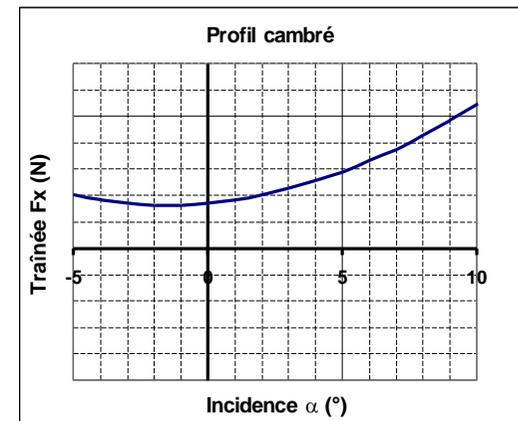
Comme pour la portance, on constate que **la traînée** :

- est **proportionnelle** au **carré de la vitesse**
- est **proportionnelle** à la **surface de l'élément**
- **dépend du profil** choisi.

2° Influence de l'incidence :

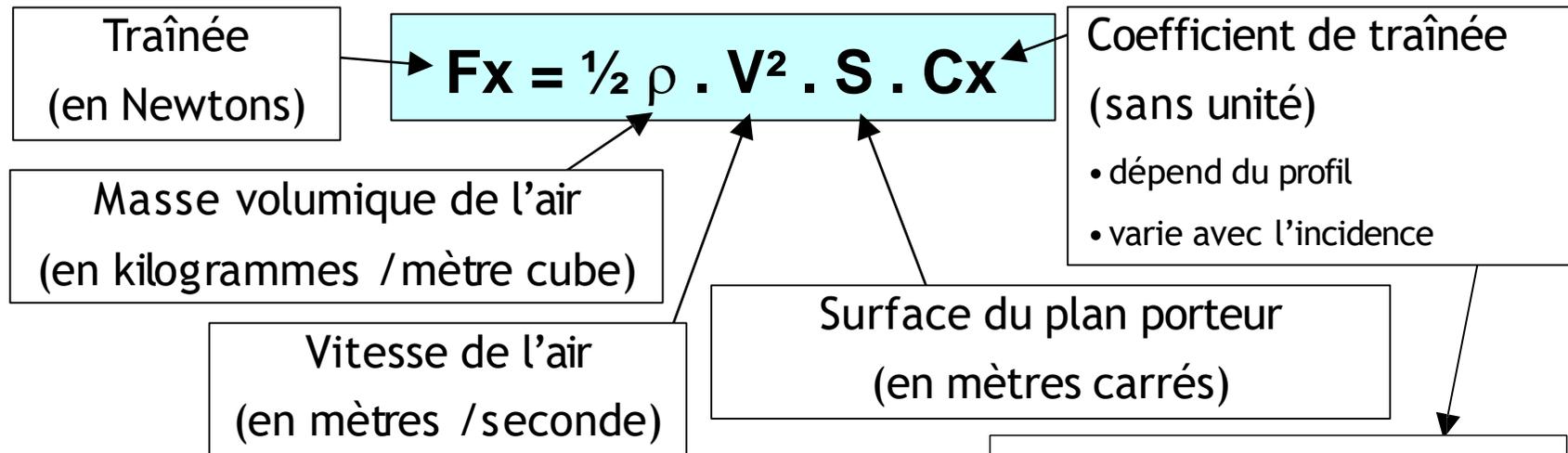
On constate une traînée :

- **minimale** au voisinage de l'incidence de portance nulle
- qui **croît progressivement** quand l'**incidence augmente**.

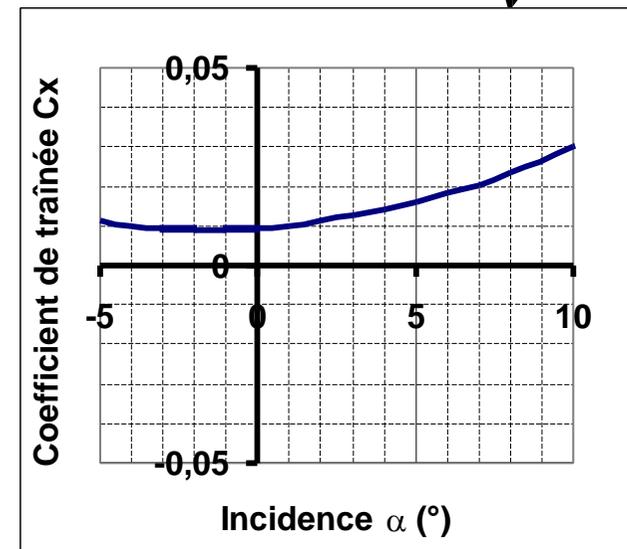


Expression de la traînée

Pour résumer l'ensemble des observations faites sur la traînée, on peut écrire :



Remarque : Cette expression ressemble beaucoup à celle de la portance ($F_z = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_z$).



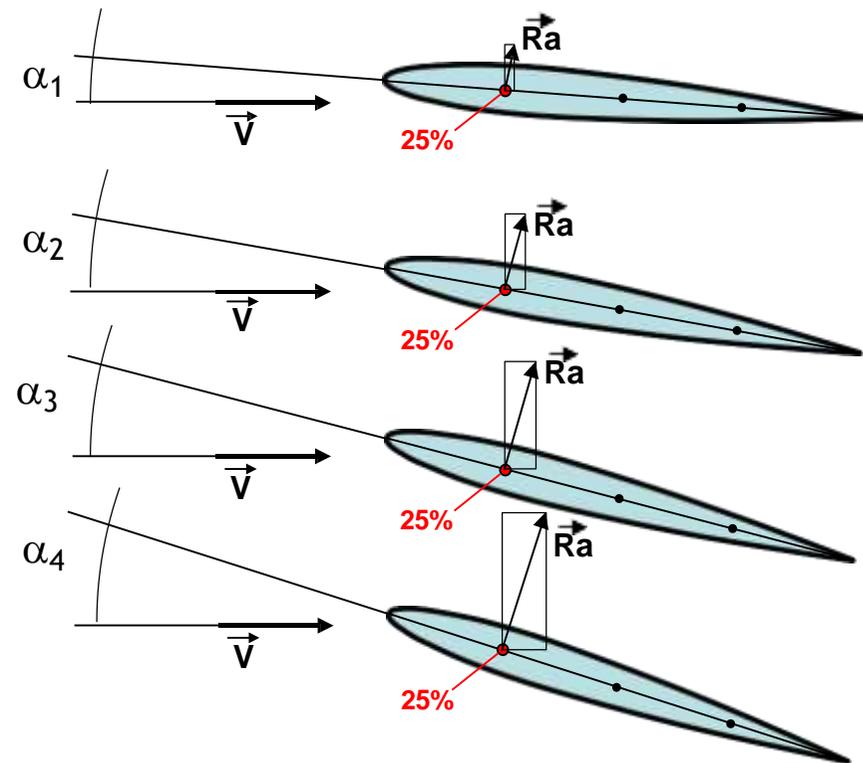
Position de la portance et de la traînée (1)

La résultante de la portance F_Z et de la traînée F_X s'appelle la **résultante aérodynamique** R_a .

Le point de la corde par lequel passe cette résultante s'appelle le **centre de poussée aérodynamique**.

1° - Pour les profils **symétriques**, la position du centre de poussée :

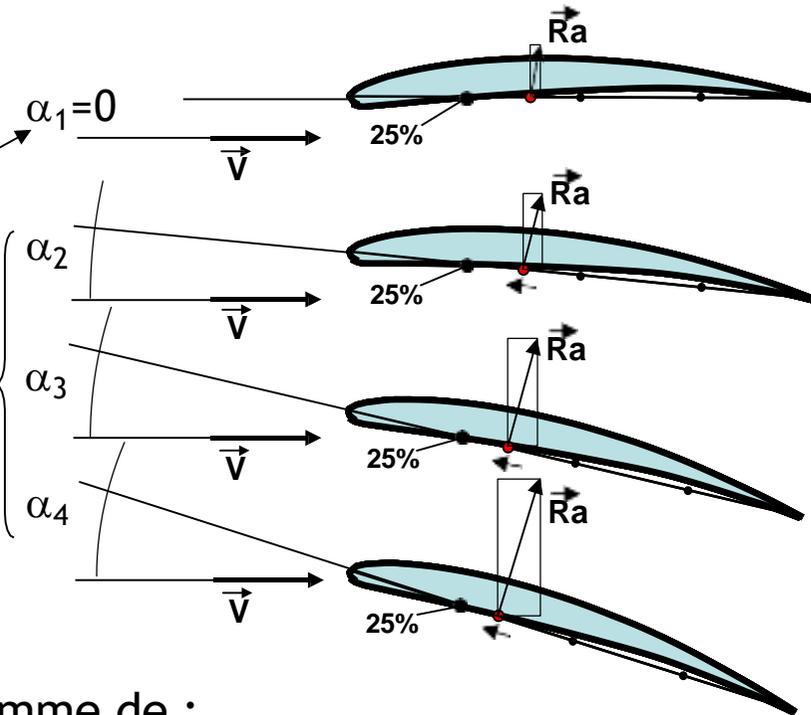
- **ne dépend pas de l'incidence.**
- est toujours très proche du point situé au **premier quart de la corde** (25% de la corde en partant du bord d'attaque).



Position de la portance et de la traînée (2)

2° - Pour les profils **dissymétriques**,
la position du centre de poussée :

- dépend de la **forme** du profil, lorsque l'incidence est nulle.
- **se déplace** en direction du 25% de la corde lorsque l'incidence augmente.



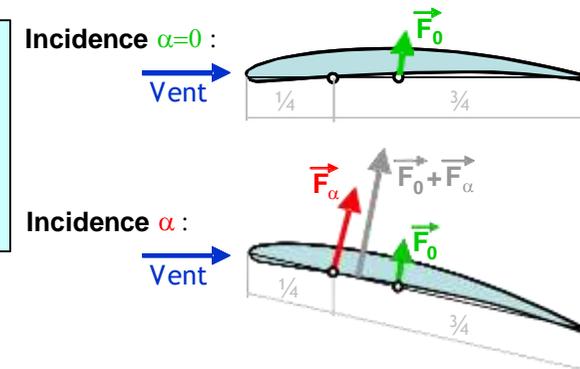
A une incidence quelconque,
tout se passe comme si

la résultante aérodynamique était la somme de :

- + la résultante aérodynamique qui existe déjà à incidence nulle
- une force additionnelle (*due à l'incidence*) appliquée à environ 25% de la corde.

Le point à environ 25% de la corde où s'applique la **variation de force aérodynamique** quand l'incidence varie s'appelle le **foyer du profil**.

Remarque : Pour un profil symétrique, centre de poussée et foyer sont confondus.

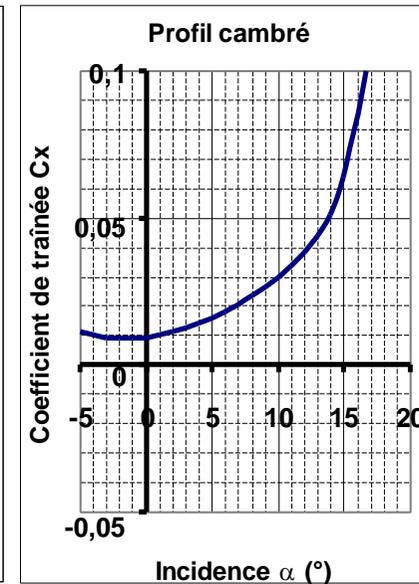
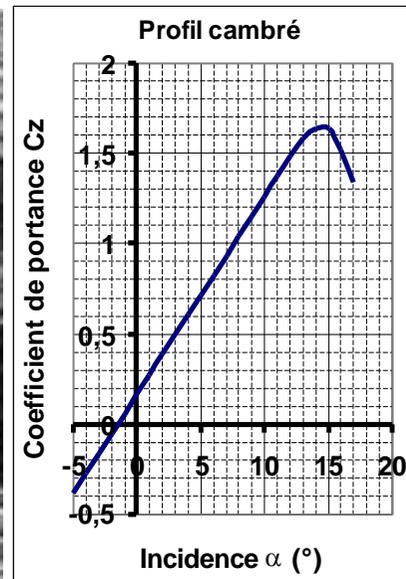
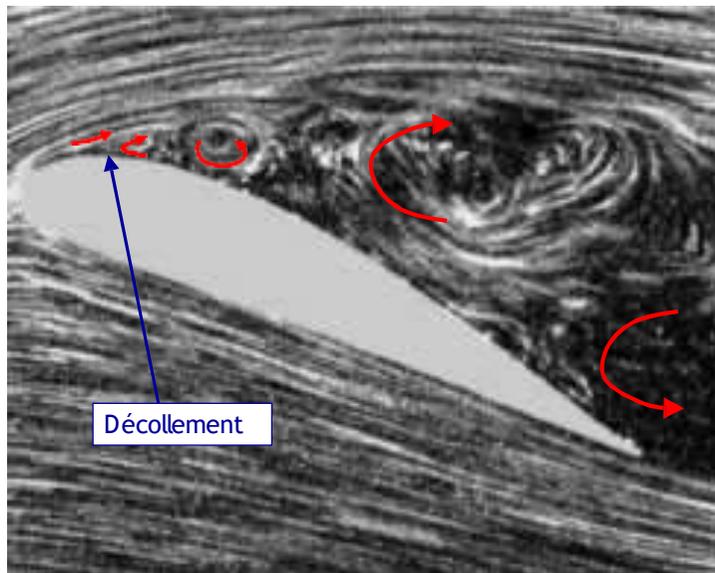


Écoulement à forte incidence (1)

Nous avons vu que la portance augmente lorsque l'incidence augmente. Jusqu'où peut-on augmenter l'incidence pour obtenir plus de portance ?

A partir d'une certaine incidence (proche d'une quinzaine de degrés), l'air ne parvient plus à « coller » à l'extrados. Un **décollement** se produit. En aval du point de décollement, l'écoulement devient très désordonné. Des **tourbillons** s'établissent produisant des **retours vers l'amont**. La **portance diminue brutalement** et la **traînée augmente fortement**.

C'est le **décrochage**.



Écoulement à forte incidence (2)

Vidéo : Décrochage d'un planeur

Voir : <http://www.youtube.com/watch?v=k7zDhdVlacQ>



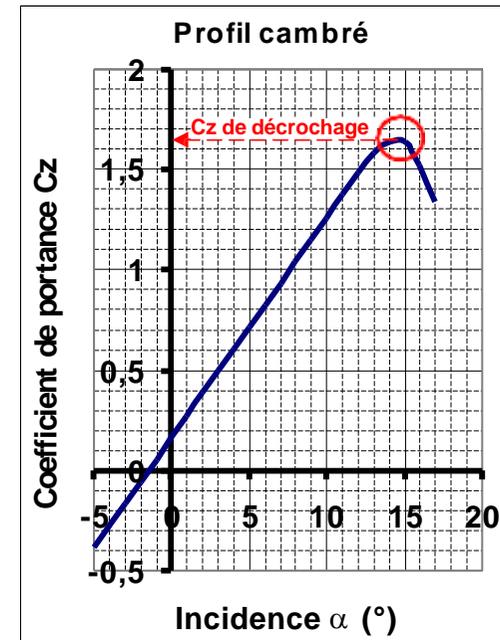
Dispositifs hypersustentateurs (1)

Lors du **décollage** et pendant l'approche qui précède l'**atterrissage**, il est intéressant de **voler lentement** pour **diminuer la longueur de piste** nécessaire.

Comment faire pour **maintenir la portance** alors que la **vitesse** est **réduite**, **sans risquer le décrochage** ?

$F_z = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_z$ → Pour maintenir F_z alors que V diminue, il faut donc **augmenter le C_z de décrochage** et éventuellement la **surface** de l'aile.

Divers **dispositifs mobiles**, placés au **bord d'attaque** et au **bord de fuite** de l'aile, ont été inventés dans ce but. Ils sont rétractés lorsque l'avion vole vite (croisière).



Dispositifs hypersustentateurs (2)

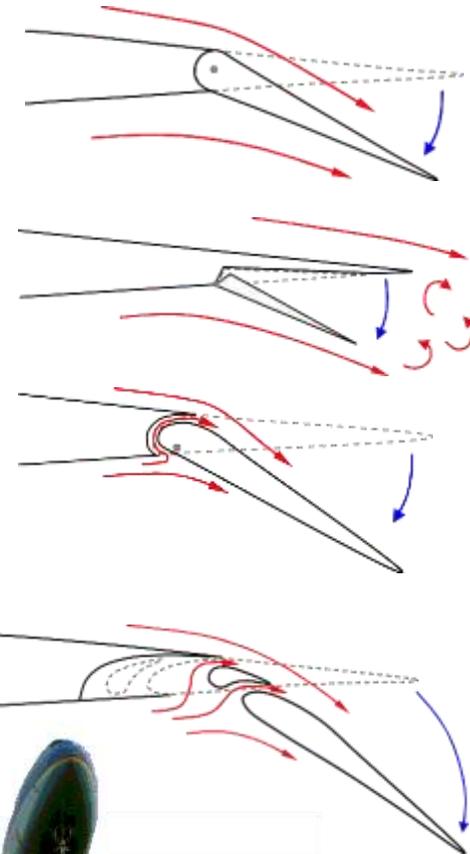
- **Dispositifs de bord de fuite :**

- o **Volets simples** : En braquant le volet vers le bas, on augmente la portance à incidence donnée.

- o **Volets d'intrados** : On obtient le même effet en ne braquant qu'un élément d'intrados, mais la traînée est plus forte.

- o **Volets à fente** : Pour pouvoir augmenter le braquage des volets sans créer de décollement d'air, une fente permet de prélever de l'air à l'intrados pour le souffler tangentiellement sur l'extrados du volet.

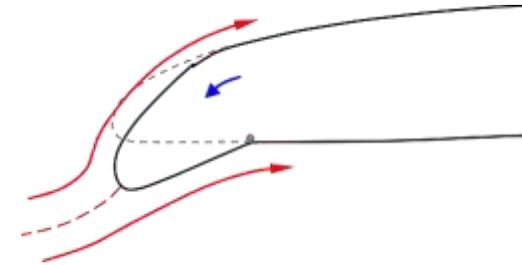
- o **Volets à recul** (*volets Fowler*) : On peut augmenter encore le C_z de décrochage en multipliant les fentes et en donnant au volet un mouvement de recul (augmentation de la surface)



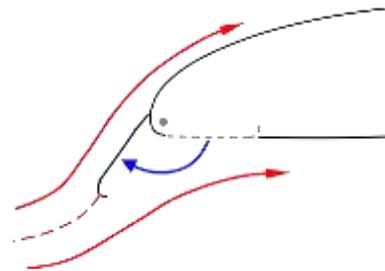
Dispositifs hypersustentateurs (3)

- **Dispositifs de bord d'attaque :**

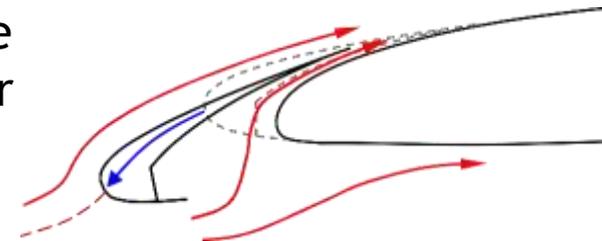
- o **Becs *basculants*** : Aux fortes incidences, l'orientation du bord d'attaque dans le sens de l'écoulement amont permet de réduire la survitesses à l'extrados et de retarder le décollement.



- o **Volets *Kruger*** : On obtient le même effet en déployant devant le profil un petit élément de l'intrados orienté favorablement.

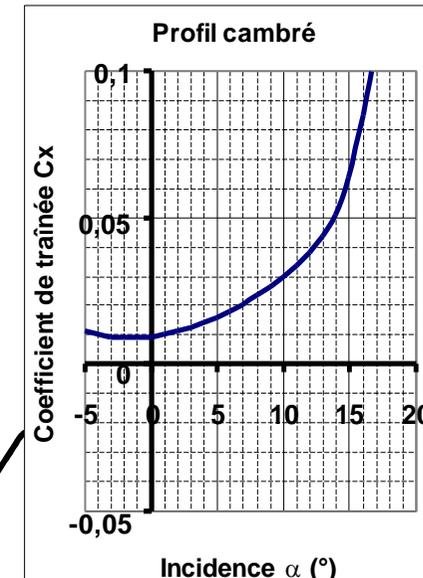
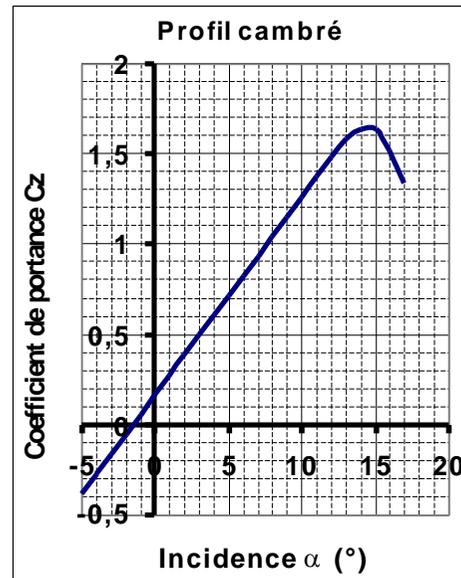


- o **Becs à *fentes*** : Le mouvement du bec mobile dégage une fente permettant de prélever de l'air à l'intrados pour le souffler tangentiellement à l'extrados et retarder ainsi le décollement.



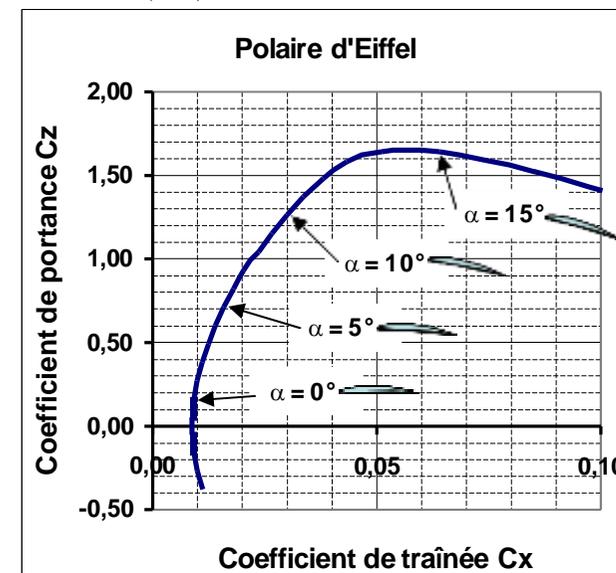
Polaire d'un profil (1)

Nous avons vu comment varie la portance et la traînée lorsqu'on fait varier l'incidence d'un profil :



En combinant ces deux courbes nous pouvons obtenir directement la relation entre la portance et la traînée : c'est la **polaire** du profil (ou polaire d'**Eiffel**).

La polaire d'un profil **résume l'essentiel de ses propriétés aérodynamiques**.



Polaire d'un profil (2)

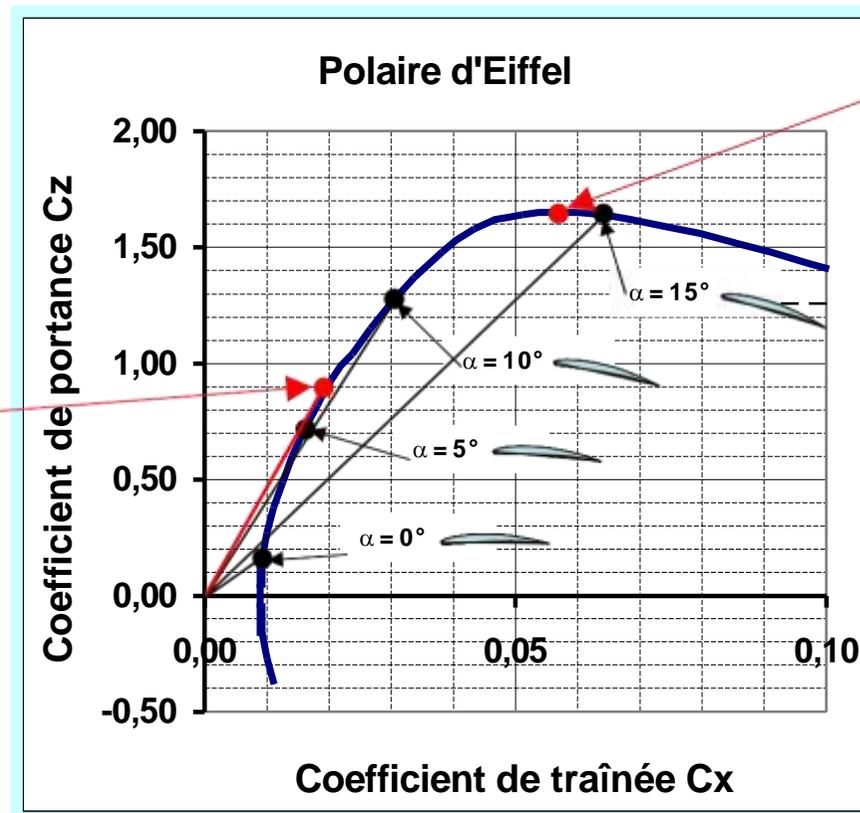
On recherche généralement le **maximum de portance** pour le **minimum de traînée**, c'est-à-dire le rapport C_z/C_x le plus grand possible.

Ce rapport s'appelle la **finesse** ($f = C_z/C_x$) du profil.

Pour obtenir la **meilleure finesse** il faut se placer au **point de tangence***** de la polaire avec la droite passant par l'origine.

(*** Là où la pente de la tangente est maximale, donc là où le rapport C_z/C_x est maximal).

Meilleure finesse



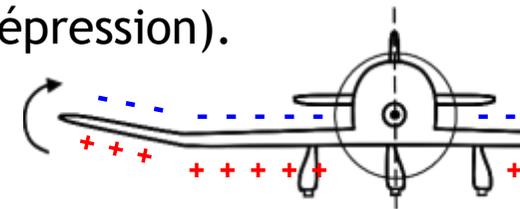
Cz maxi

Écoulement autour d'une aile réelle (1)

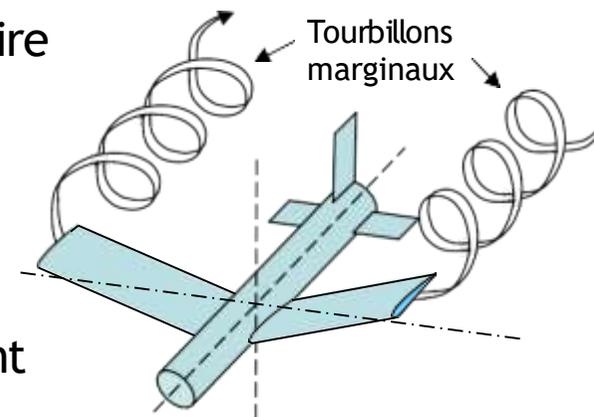
Jusqu'à présent nous avons étudié l'écoulement "2D " autour d'un profil d'aile comme si l'aile avait une envergure infinie (comme si elle n'avait pas de bouts).

En réalité, lorsqu'on s'approche d'un bout de l'aile, l'écoulement est fortement perturbé car il existe une **différence de pression** entre l'intrados (qui est en surpression) et l'extrados (qui est en dépression).

Un flux s'établit de l'intrados vers l'extrados. →



Ce flux contourne l'aile par son extrémité en amorçant un mouvement tourbillonnaire (appelé « **tourbillon marginal** ») qui se prolonge vers l'arrière et se détache de l'aile sous l'effet du vent relatif.



Ces tourbillons, liés à la portance :

- **diminuent la portance** car ils perturbent les extrémités de l'aile,
- **augmentent la traînée**, car ils représentent une dissipation d'énergie.

Remarque : Les tourbillons marginaux d'un gros avion peuvent représenter un réel danger pour un avion plus petit qui viendrait à croiser son sillage.

Écoulement autour d'une aile réelle (2)

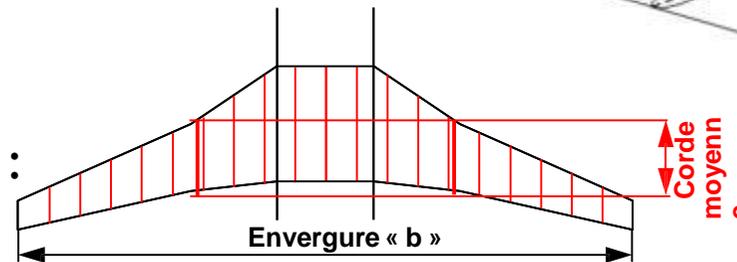
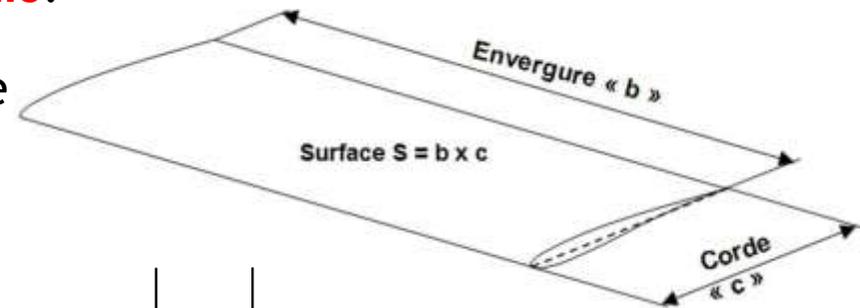
L'augmentation de traînée due aux tourbillons marginaux s'appelle **traînée induite par la portance** (ou « **traînée induite** ») car elle est due à la différence de pression qui crée la portance. Elle **dépend** de **l'allongement de l'aile**.

L'allongement d'une aile rectangulaire est le rapport « envergure / corde » :

Allongement $\lambda = b / c$

Si l'aile n'est pas rectangulaire, l'allongement est le rapport « envergure / corde moyenne » :

Allongement $\lambda = b / c_{moyenne}$



La **traînée induite** d'une aile est **inversement proportionnelle** à son **allongement**.

D'où l'intérêt d'augmenter l'allongement des ailes de planeur pour réduire la traînée induite et augmenter la finesse.

Des « winglets » sont parfois utilisés, aux extrémités de l'aile, pour atténuer les effets du tourbillon marginal et réduire la traînée induite.



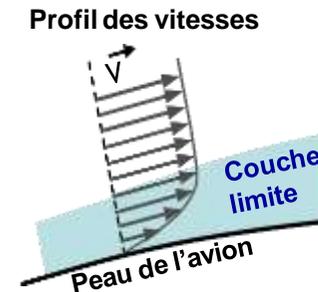
Les diverses formes de traînée (1)

- Traînée induite :

Nous venons de décrire la traînée induite par la portance. Nous allons voir qu'il existe d'autres causes de traînée, indépendantes de la portance (*traînée parasite*).

- Traînée de frottement :

Lorsque l'avion vole, l'air balaie la totalité de sa peau. L'air étant visqueux (faiblement), il est **légèrement freiné** au contact de la peau de l'avion, ce qui occasionne des forces de traînée.

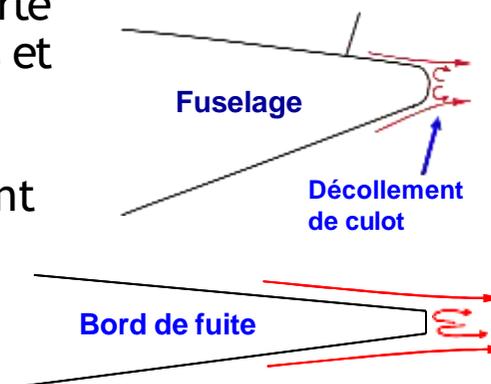


- Traînée de forme :

Nous avons vu que lors du décrochage d'un profil (à forte incidence) des décollements se produisent à l'extrados et que ces décollements sont la cause d'une forte augmentation de la traînée.

De la même manière, si des **décollements** apparaissent sur certaines parties de l'avion, indépendamment de l'incidence, ils seront le siège de forces de traînée.

Par exemple : antennes, trains d'atterrissage, bords de fuite épais, culots, bossages, imperfections, ...etc.



- Traînée d'onde :

Voir planche suivante...

Les diverses formes de traînée (2)

Nombre de **Mach** et **traînée d'onde** :

- Le **son se propage** dans l'air sous la forme d'**ondes de pression** (de petites variations de pression qui se propagent à partir de la source sonore, à l'image des ondes qui se propagent à la surface d'un lac calme lorsqu'on y jette un caillou).



- La vitesse de propagation du son dans l'air dépend de la température, donc de l'altitude (elle varie de **340m/s** au niveau de la mer à **295m/s** à 11000m, en atmosphère standard).

- Lorsqu'un avion se déplace dans l'air, on appelle « **nombre de Mach** » le rapport « **vitesse avion / vitesse du son** ».

*Ex : Un avion vole à Mach 0,85 à 11000m d'altitude, en atmosphère standard :
Il vole donc à $0,85 \times 295 = 251\text{m/s}$ (soit 903km/h).*

- Lorsque, dans un écoulement, la **vitesse locale** atteint **Mach 1** (la vitesse du son), on voit apparaître des **perturbations brutales de pression** qu'on nomme « **ondes de choc** » et qui sont **consommatrices d'énergie**.

- Même si un avion vole à une **vitesse inférieure à la vitesse du son** (par exemple à Mach 0,8 ou Mach 0,9) les survitesses locales peuvent amener l'écoulement à **atteindre Mach 1 en certains points de l'avion** (extrados de l'aile, etc...), occasionnant l'apparition locale d'ondes de choc qui consomment de l'énergie et augmentent la traînée de l'avion.

Ce supplément de traînée s'appelle « **traînée d'onde** ».

3- MECANIQUE DU VOL

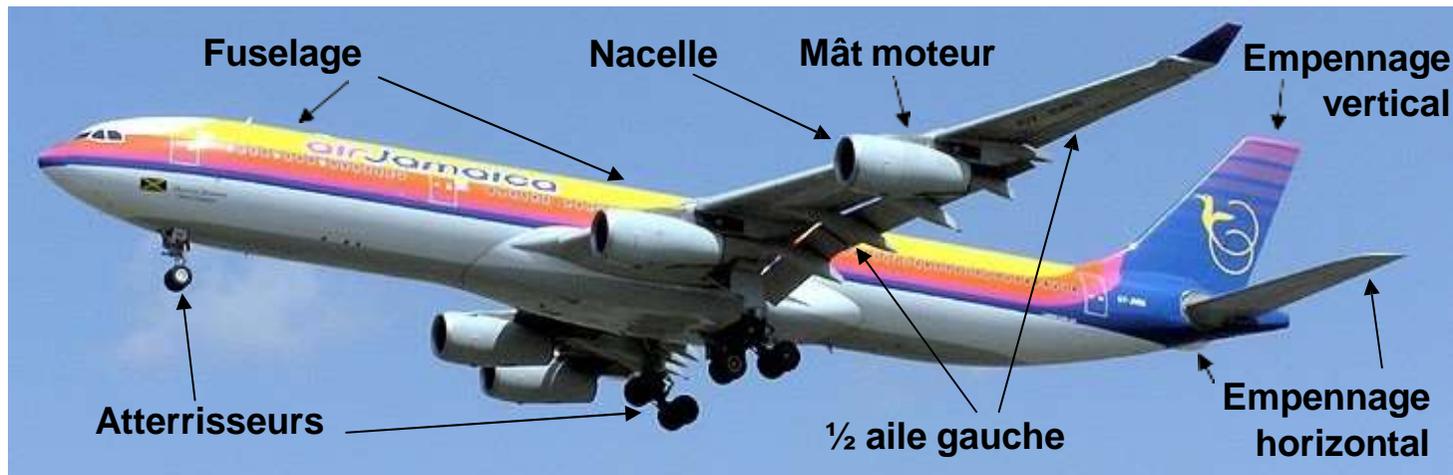


Constitution de la cellule d'un avion

L'avion se compose de la **cellule**, du(ou des) **moteur(s)** et des **équipements**.

Dans la cellule on distingue habituellement :

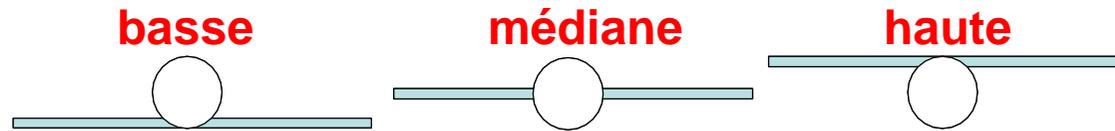
- l'**aile** (souvent appelée voilure)
- l'**empennage horizontal**
- l'**empennage vertical** (appelé dérive)
- les atterrisseurs
- le fuselage
- les capots moteur (ou nacelles et mâts moteurs).



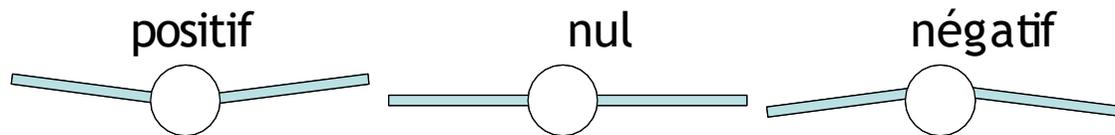
Nous allons nous intéresser plus particulièrement aux trois premiers éléments qui sont conçus pour pouvoir développer une portance et qui sont pourvus de surfaces mobiles.

La voilure (1)

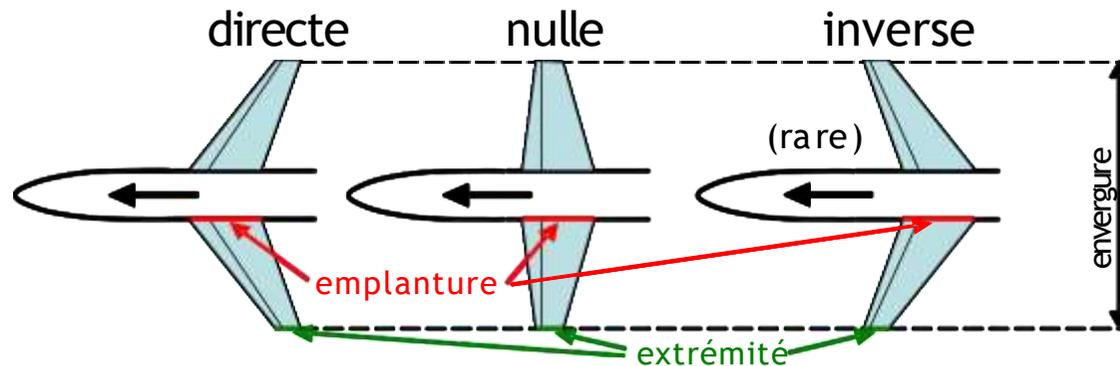
Suivant sa position elle est dite :



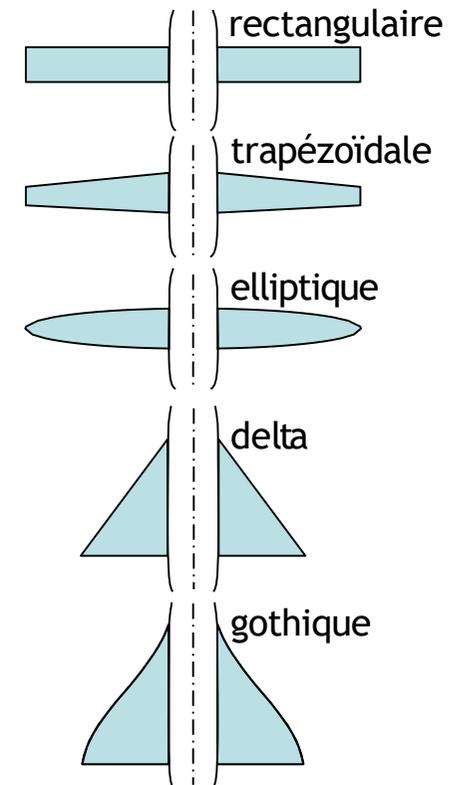
Son **dièdre** peut être :



Sa **flèche** peut être :

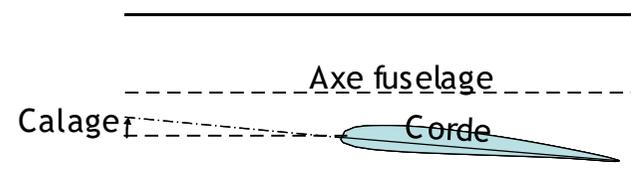


Elle peut être :



Son **effilement** est le rapport « corde d'emplanture / corde d'extrémité »

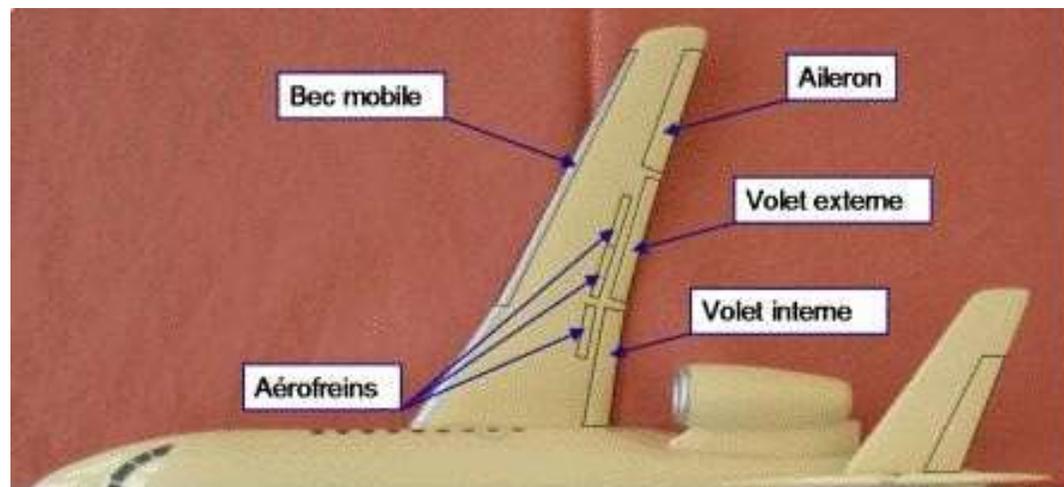
L'angle de **calage** d'un profil est l'angle entre sa corde et une droite de référence (en général, l'axe du fuselage).



La voilure (2)

Elle comporte des éléments mobiles. Les plus classiques sont :

- 2 gouvernes de **gauchissement** (appelés **ailerons**) placées près des extrémités.
- des **volets**, situés entre l'emplanture de l'aile et les ailerons.
- éventuellement des **aérofreins** (plaques pivotantes situées fréquemment à l'extrados).
- éventuellement des **becs mobiles**.
- dans certains cas, des plaques pivotantes (appelées **spoilers**) situées à l'extrados, participent au pilotage en gauchissement.

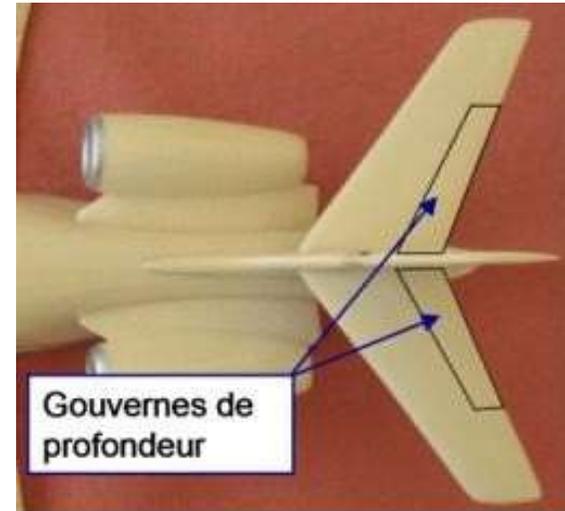


• *Nota : il existe bien d'autres types de surfaces mobiles (élevons, flaperons, etc...).*

Les empennages (1)

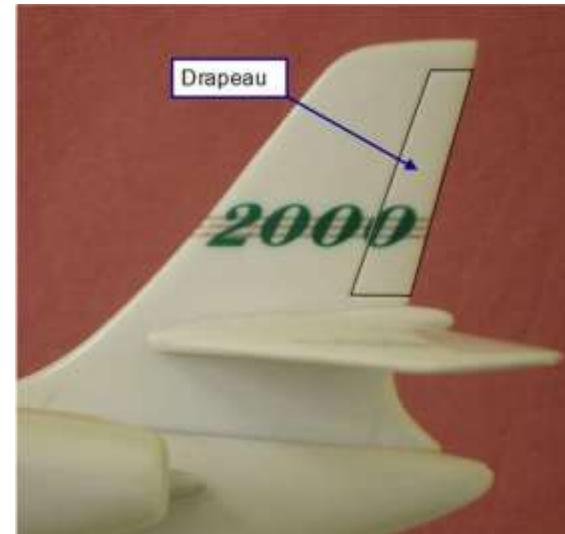
Empennage **horizontal** :

- En général placé en arrière de la voilure. Lorsqu'il est placé en avant on parle de formule « canard ».
- On retrouve les mêmes notions de dièdre, de flèche, d'allongement, d'effilement et de calage que pour la voilure.
- Il peut être **fixe** ou à **calage réglable en vol**. Il comporte les **gouvernes de profondeur** (sauf s'il est monobloc mobile).



Empennage **vertical** (ou dérive) :

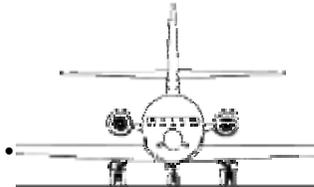
- En général unique et placée à l'arrière, dans le plan de symétrie (ou proche du plan de symétrie).
- On retrouve, pour la dérive, les notions de flèche, d'allongement et d'effilement.
- Elle comporte la (ou les) **gouverne(s) de direction** parfois appelée(s) drapeau(x).



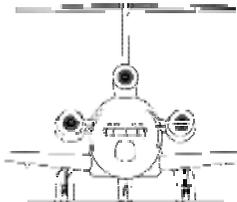
Les empennages (2)

Plusieurs dispositions d'empennages sont possibles, par exemple :

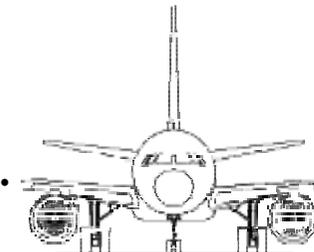
- empennages **en croix**.....



- empennages **en T**.....



- empennages « **classiques** »



- double dérive.....

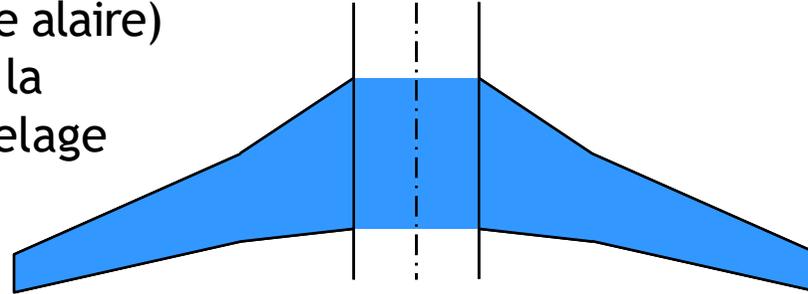


- empennage en V (ou papillon).....



Surface de référence et charge ailaire

La **surface de référence** (ou surface ailaire) d'un avion est égale à la surface de la voilure, en comptant la partie du fuselage qui se trouve au droit de la voilure.



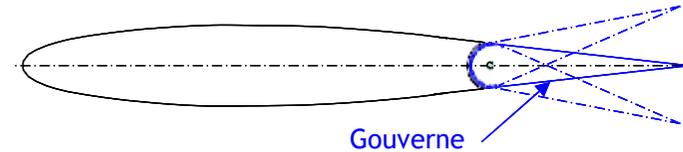
La **charge ailaire** d'un avion est égale au rapport $\frac{\text{Poids total de l'avion}}{\text{Surface ailaire}}$

Nota : Les coefficients aérodynamiques de l'avion complet sont exprimés en utilisant cette surface de référence.

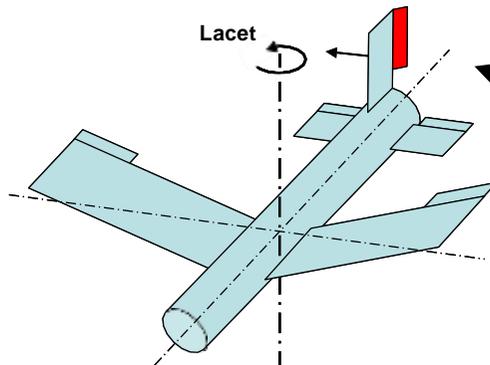
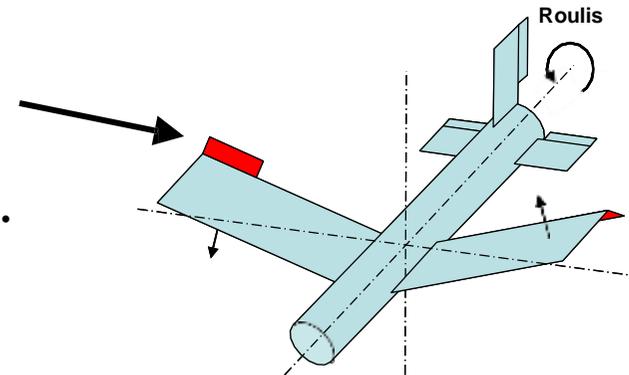
Exemple : $Portance_{avion} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S_{référence} \cdot C_{z_{avion}}$

Action des gouvernes

Les gouvernes sont des **surfaces mobiles** dont le **braquage modifie la portance** de l'élément porteur auquel elles appartiennent.

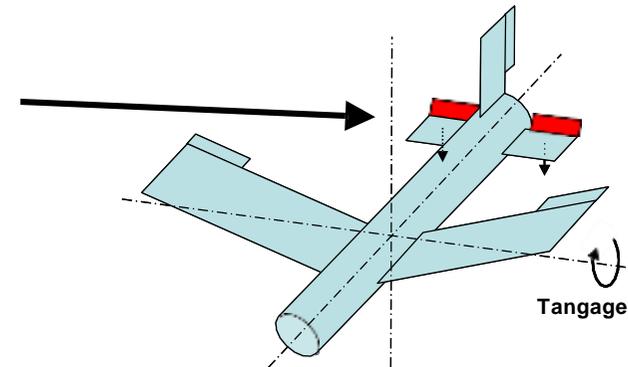


- Le braquage des **ailerons** commandé par un **mouvement latéral du manche pilote** entraîne une rotation autour de l'**axe de roulis**.

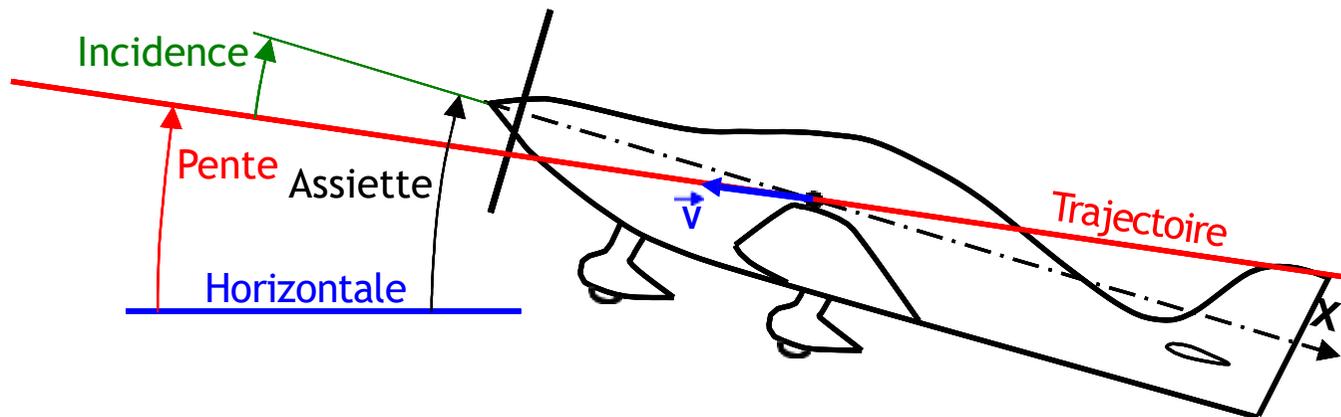


- Le braquage du **drapeau** commandé par un **mouvement du palonnier** (action des pieds du pilote) entraîne une rotation autour de l'**axe de lacet**.

- Le braquage des **gouvernes de profondeur** commandé par un **mouvement longitudinal du manche pilote** entraîne une rotation autour de l'**axe de tangage**.



Pente, incidence & assiette



- **Pente** : C'est l'angle entre le vecteur vitesse (qui est tangent à la trajectoire) et l'horizontale.

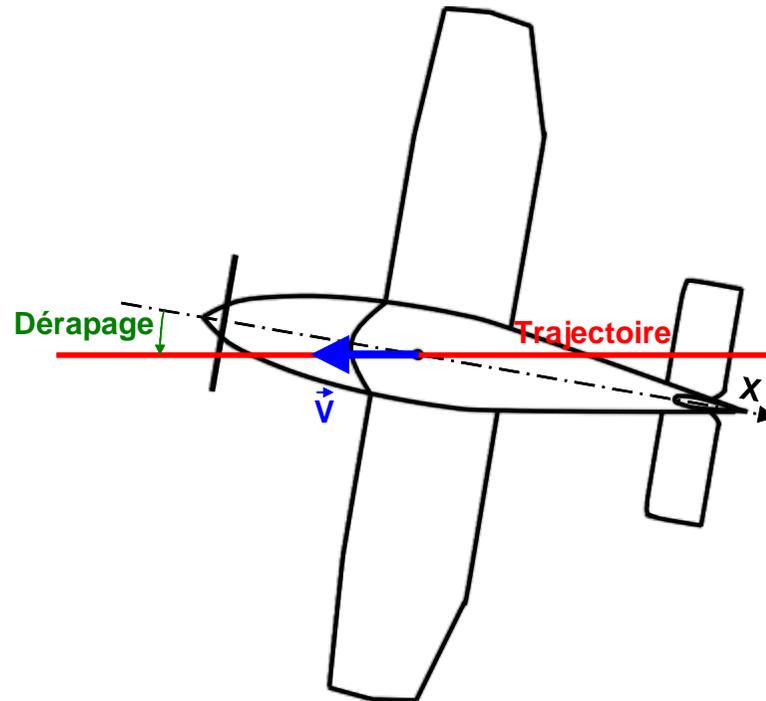
- **Incidence avion** : C'est l'angle entre l'axe X de référence avion et le vecteur vitesse (qui est tangent à la trajectoire).

Remarque : Chaque profil de l'aile peut avoir son propre calage par rapport l'axe X de référence avion, et donc sa propre incidence.

- **Assiette longitudinale avion** : C'est l'angle entre l'axe X de référence avion et l'horizontale.

$$\text{Assiette} = \text{Pente} + \text{Incidence}$$

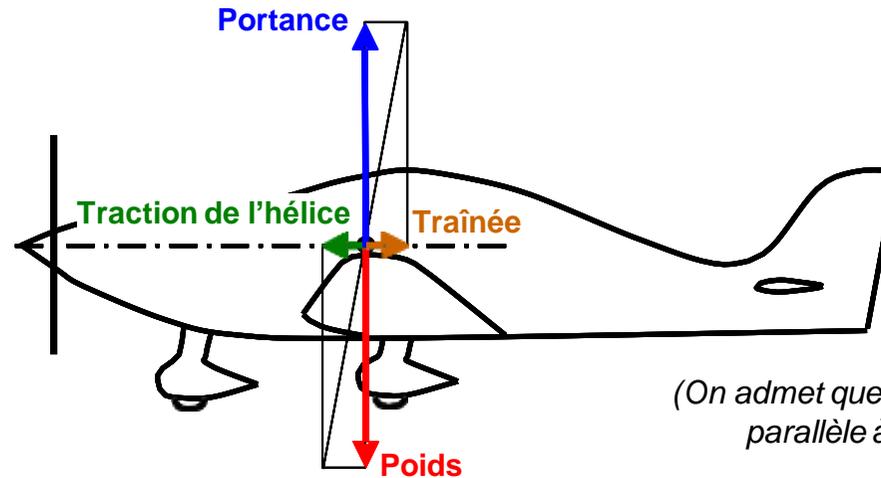
Dérapiage



Il arrive que l'avion vole de façon dissymétrique
(*par exemple, avion multi-moteur avec un moteur en panne*).
L'avion vole « en crabe ».

L'angle entre le vecteur vitesse (qui est tangent à la trajectoire) et l'axe de symétrie de l'avion s'appelle le **dérapiage**.

Vol horizontal rectiligne uniforme



(On admet que la traction de l'hélice est parallèle à la direction du vol)

- La **traction** de l'hélice (ou la poussée des réacteurs) **équilibre** la **traînée**.
- La **portance** **équilibre** le **poids**.

donc : $\frac{\text{Poids}}{\text{Traction}} = \frac{\text{Portance}}{\text{Traînée}} = \text{Finesse}$ $\text{Traction} = \text{Poids} / \text{finesse}$

Pour limiter le besoin de force propulsive Il faut voler à l'incidence donnant la finesse maxi.

$$\text{Poids} = \text{Portance} = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_z$$

A altitude donnée (ρ fixé), il faut augmenter le C_z (en augmentant l'incidence) si on veut voler moins vite.

L'incidence varie en **sens inverse** de la **vitesse**

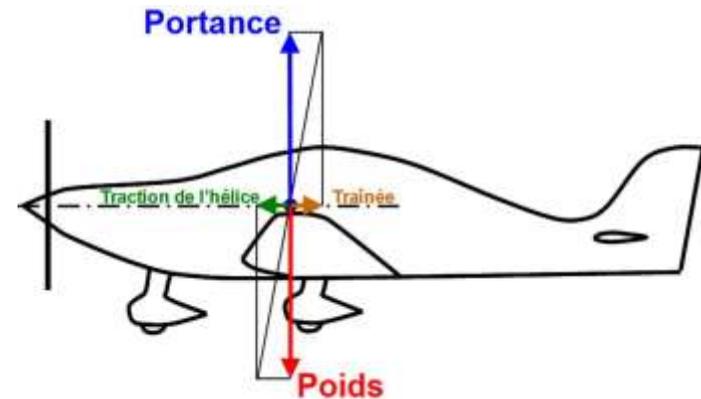
La **vitesse minimale** est donc obtenue pour l'incidence maximale, c'est-à-dire l'incidence de **décrochage**.

Il faut garder une marge par rapport au décrochage.

Notion de facteur de charge (1)

On appelle **facteur de charge** le rapport $n_z = \frac{\text{Portance}}{\text{Poids}}$

Dans le cas du vol horizontal rectiligne uniforme : $n_z = 1$ car Portance = Poids

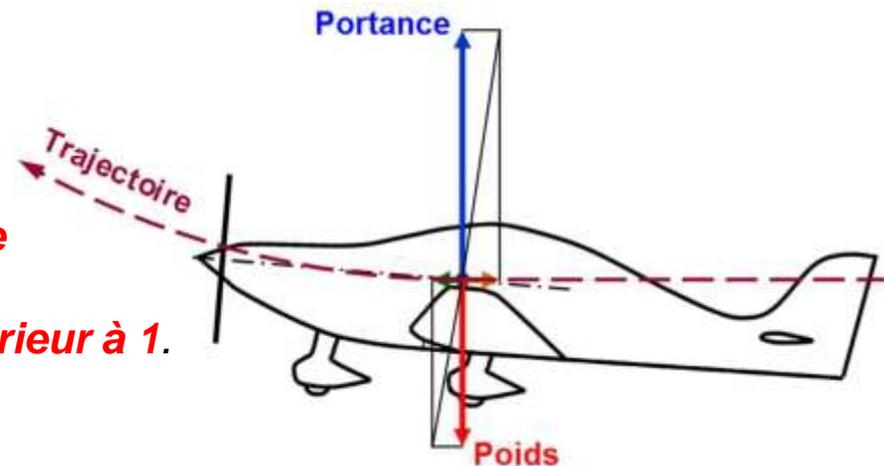


Il n'en est pas de même lors de certaines évolutions.

Exemple de facteur de charge > 1 :

Si le pilote tire le **manche vers l'arrière**, l'avion se **cabre** ce qui entraîne une augmentation de l'angle d'incidence et donc une augmentation de la **portance** qui devient **supérieure au poids**.

Le **facteur de charge** devient donc **supérieur à 1**. L'équilibre du vol horizontal est rompu et la **trajectoire** se **courbe vers le haut**.



Notion de facteur de charge (2)

L'augmentation de la portance (*facteur de charge* > 1) entraîne une augmentation du **chargement en flexion** de l'aile.



Remarque : Un facteur de charge exagéré pourrait même conduire à la rupture de l'aile !

Le facteur de charge est représentatif du **chargement de la structure** sous les efforts de vol.

Pour la structure, tout se passe comme si le **poids** de l'avion (*et de tout ce qui est à bord*) était **multiplié par le facteur de charge**.

Poids apparent = Poids réel x facteur de charge

Par définition

$$\text{Facteur de charge} = \frac{\text{Portance}}{\text{Poids}} = \frac{\text{Poids apparent}}{\text{Poids}}$$

donc portance = poids apparent.

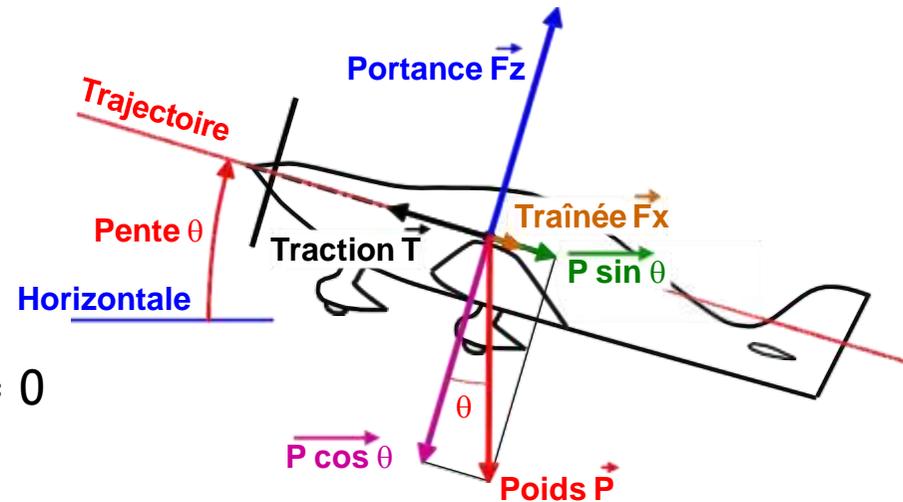
On dit que **En vol, la portance équilibre toujours le poids apparent**

Vol en montée ou descente tractée

Lorsque l'avion est en équilibre sur sa trajectoire (vitesse constante) :

$$\vec{T} + \vec{P} + \vec{F}_z + \vec{F}_x = \vec{0} \quad (1)$$

- Projetée sur la trajectoire, l'égalité (1) s'écrit : $T - P \cdot \sin\theta - F_x = 0$
donc $T = F_x + P \sin\theta$



Quand la **pente augmente**, la **traction doit augmenter** pour maintenir l'équilibre (vitesse constante).

- Perpendiculairement à la trajectoire, l'égalité (1) s'écrit : $F_z - P \cdot \cos\theta = 0$

$$\text{donc } F_z = P \cdot \cos\theta$$

Le facteur de charge (qui est le rapport $\frac{\text{Portance}}{\text{Poids}}$) vaut $n_z = F_z / P = \cos\theta$
il est donc < 1

En **montée** (et en descente) rectiligne le **facteur de charge** est < 1

Vol en descente planée

En vol plané, la **traction** T de l'hélice est **nulle**.
L'avion sera donc en équilibre sur sa trajectoire
(vitesse constante) si :

$$\cancel{\vec{T}} + \vec{P} + \vec{F}_z + \vec{F}_x = \vec{0}, \text{ c'est-à-dire...}$$

si la **résultante aérodynamique** $\vec{R}_a = \vec{F}_z + \vec{F}_x$
est exactement **égale et opposée au poids** \vec{P} .

Il faut donc $\widehat{AOB} = \widehat{COD}$, d'où $\tan \widehat{AOB} = \tan \widehat{COD}$.

Or $\tan \widehat{COD} = \tan \theta = \text{pente de la trajectoire}$

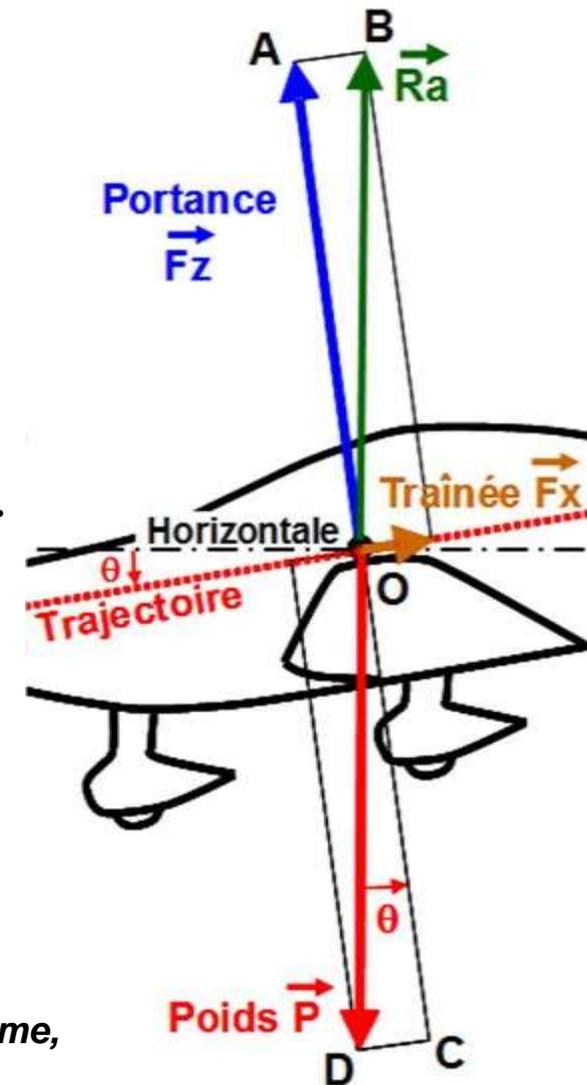
$$\text{et } \tan \widehat{AOB} = \frac{F_x}{F_z} = \frac{1}{\text{ finesse}}$$

La **pente** (descendante) de la trajectoire
est égale à l'**inverse de la finesse**.

Les planeurs ont une grande finesse dans le but
de réduire leur pente de descente en air calme.

*S'il a une finesse de 50, un planeur peut franchir, en air calme,
une distance de 50 km en ne perdant que 1 km d'altitude.*

*Avec une finesse de 10, un avion léger en panne de moteur
peut franchir, en air calme, une distance de 10 km en ne perdant que 1 km d'altitude.*

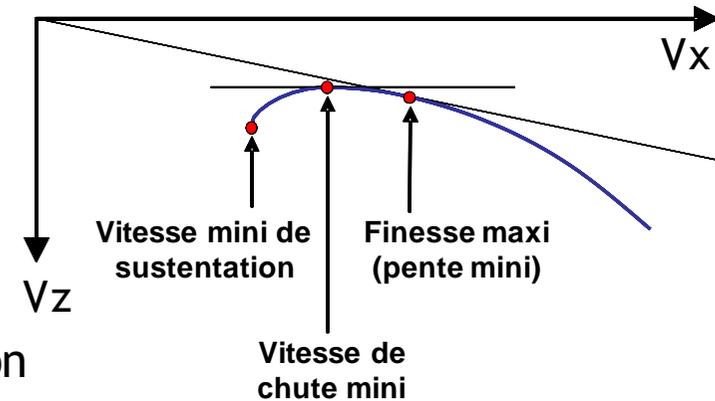


Polaire des vitesses

Pour un planeur, on trace parfois un type de courbe appelée « **polaire des vitesses** ».

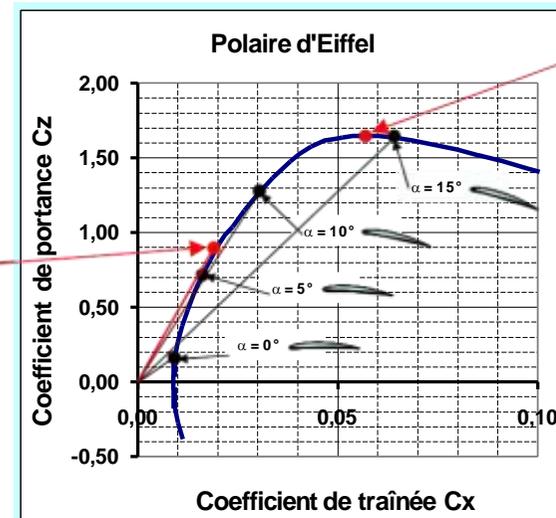
C'est la représentation, de la **vitesse de chute** (V_z) en air calme en fonction de la **vitesse horizontale** (V_x).

C'est aussi une représentation de la **pente de descente** planée en air calme en fonction de la **vitesse adoptée**.



Remarque importante : Ne pas confondre avec la « polaire d'Eiffel » (déjà vue) qui est une représentation de la portance en fonction de la traînée !

Meilleure finesse

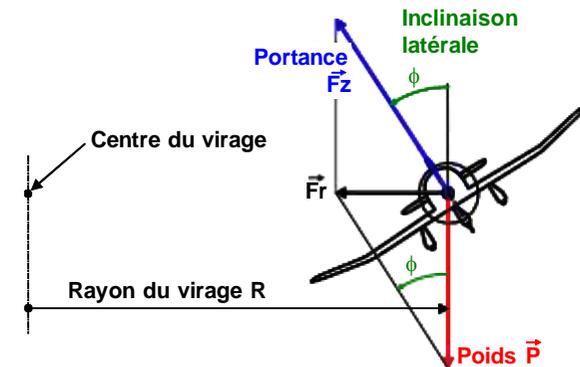


Cz maxi

Vol en virage

Dans le plan perpendiculaire à la trajectoire (plan de la figure), les deux seules forces appliquées à l'avion sont le poids \vec{P} et la portance \vec{F}_z .

Leur **résultante** est une force horizontale dirigée **vers le centre du virage** qui vaut : $F_r = P \cdot \tan \phi$ et qui cause la courbure de la trajectoire.



- * On démontre (loi de la dynamique) que $F_r / P = \tan \phi = \frac{V^2}{R \cdot g}$ ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$ accélération de la pesanteur)

L'**inclinaison latérale** doit être d'autant plus grande que la **vitesse** est grande et que le **virage** est **serré**.

Nota : Pendant le virage, il faut maintenir la gouverne de **direction correctement braquée** vers le centre du virage pour obtenir la **bonne vitesse angulaire de lacet**.

- Si ce braquage est insuffisant l'avion dérape vers le centre du virage. Le virage est dit « **glissé** »
- S'il est surabondant l'avion dérape vers l'extérieur du virage. Le virage est dit « **dérapé** »

Le facteur de charge vaut : $n_z = F_z / P$ (par définition) donc $n_z = 1 / \cos \phi$

Le **facteur de charge** augmente quand l'**inclinaison latérale** augmente

ϕ	0°	30°	45°	60°
n_z	1	1,15	1,41	2

Remarque : En virage, la portance F_z , et donc la traînée F_x , sont plus grandes qu'en vol rectiligne. Donc,

A vitesse fixée, le vol en **virage** exige **plus de force de propulsion** que le vol rectiligne

(* Hors programme BIA)

Equilibre en tangage

En vol, la **portance** équilibre le **poids** (ou le **poids apparent****) de l'avion.
(*si le facteur de charge est différent de 1)

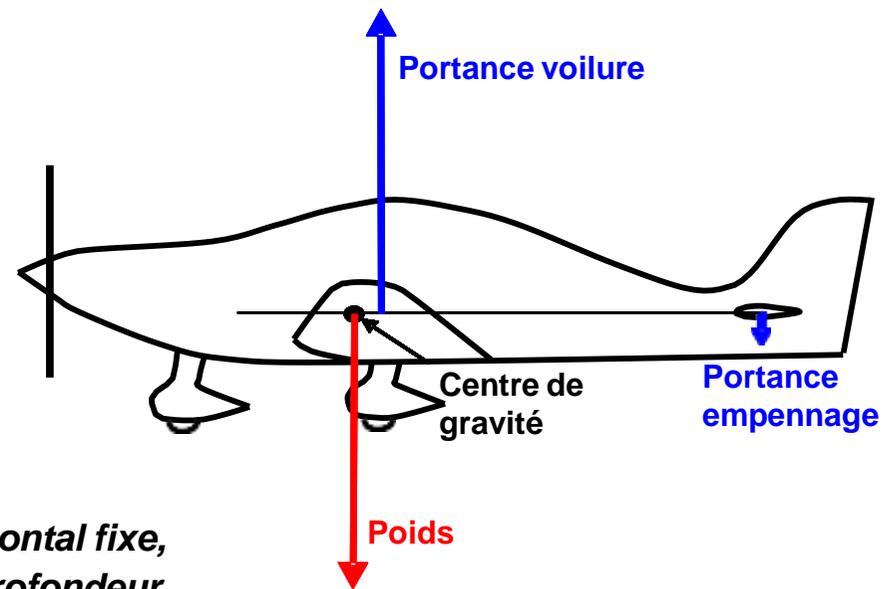
Habituellement, le **centre de gravité** de l'avion est situé en avant de la **portance de la voilure**, et sa position **varie** d'un vol à l'autre (chargement) et même au cours d'un vol (consommation du carburant).

Sans la contribution de l'empennage horizontal il n'y aurait donc pas d'équilibre en tangage possible (l'avion piquerait du nez).

Le pilote réalise cet équilibre en **ajustant** le **calage** de l'**empennage horizontal***** pour doser la portance de celui-ci.

Habituellement, l'**empennage horizontal est « déporteur »** (sa portance est dirigée vers le bas).

***** Sur certains avions à empennage horizontal fixe, on ajuste le braquage des gouvernes de profondeur.**



Compensation des gouvernes (1)

L'action sur les gouvernes s'accompagne d'**efforts à exercer par le pilote**.

Si l'avion est dépourvu de systèmes d'assistance (servocommandes) divers **dispositifs aérodynamiques** permettent de **réduire ces efforts** :

On distingue :

- Les compensateurs de **régime** : Ils sont **commandés par le pilote**.

Ils permettent au pilote de **ne pas avoir à maintenir un effort** sur les commandes pendant les phases de vol stabilisé.

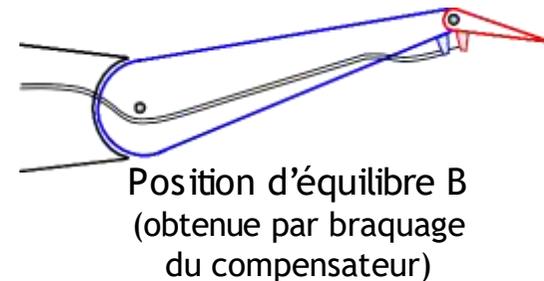
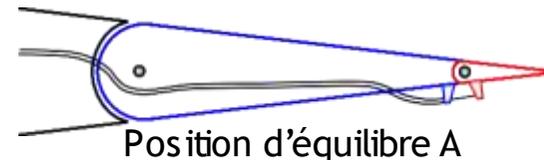
Pour cela, ils **modifient** la position d'**équilibre** d'une gouverne, c'est-à-dire le braquage de la gouverne pour lequel l'**effort à exercer est nul**.

Exemple : « Trim » ou « tab commandé »

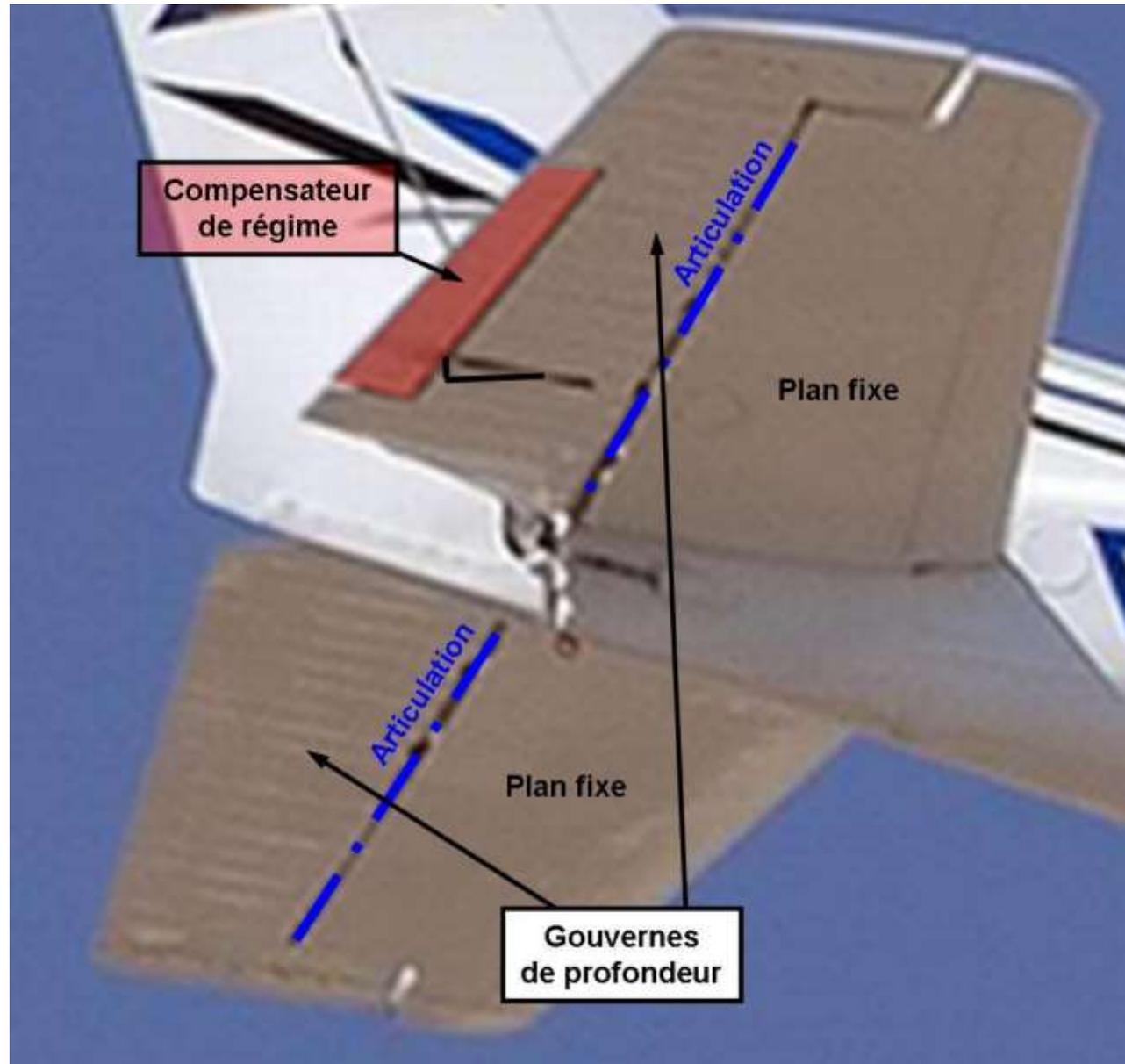
Au bord de fuite de la gouverne, un petit élément est réglable par rapport à la gouverne.

Son braquage par le pilote modifie la position d'équilibre de la gouverne.

Remarque : Sur certains avions c'est le calage de l'ensemble de l'empennage horizontal qui est réglable en vol.



Compensation des gouvernes (2)



Compensation des gouvernes (3)

- Les compensateurs d'évolution : Ils sont **indépendants du pilote**.

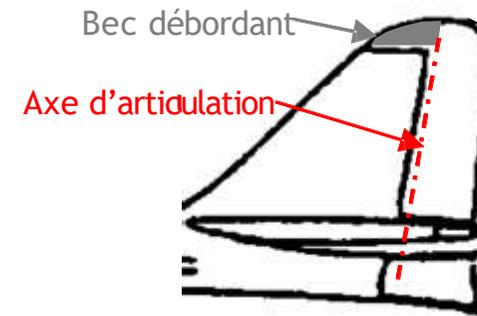
Ils permettent de **réduire les efforts** à exercer sur les commandes lors des **évolutions** commandées par le pilote.

Leur action est proportionnelle au braquage de la gouverne.

Exemples :

- **Bec débordant :**

L'action de l'air sur la partie de la gouverne située en avant de son axe d'articulation aide à son braquage et réduit ainsi l'effort à exercer par le pilote.

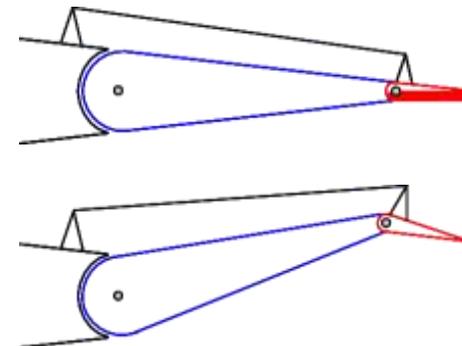


- **Tab automatique :**

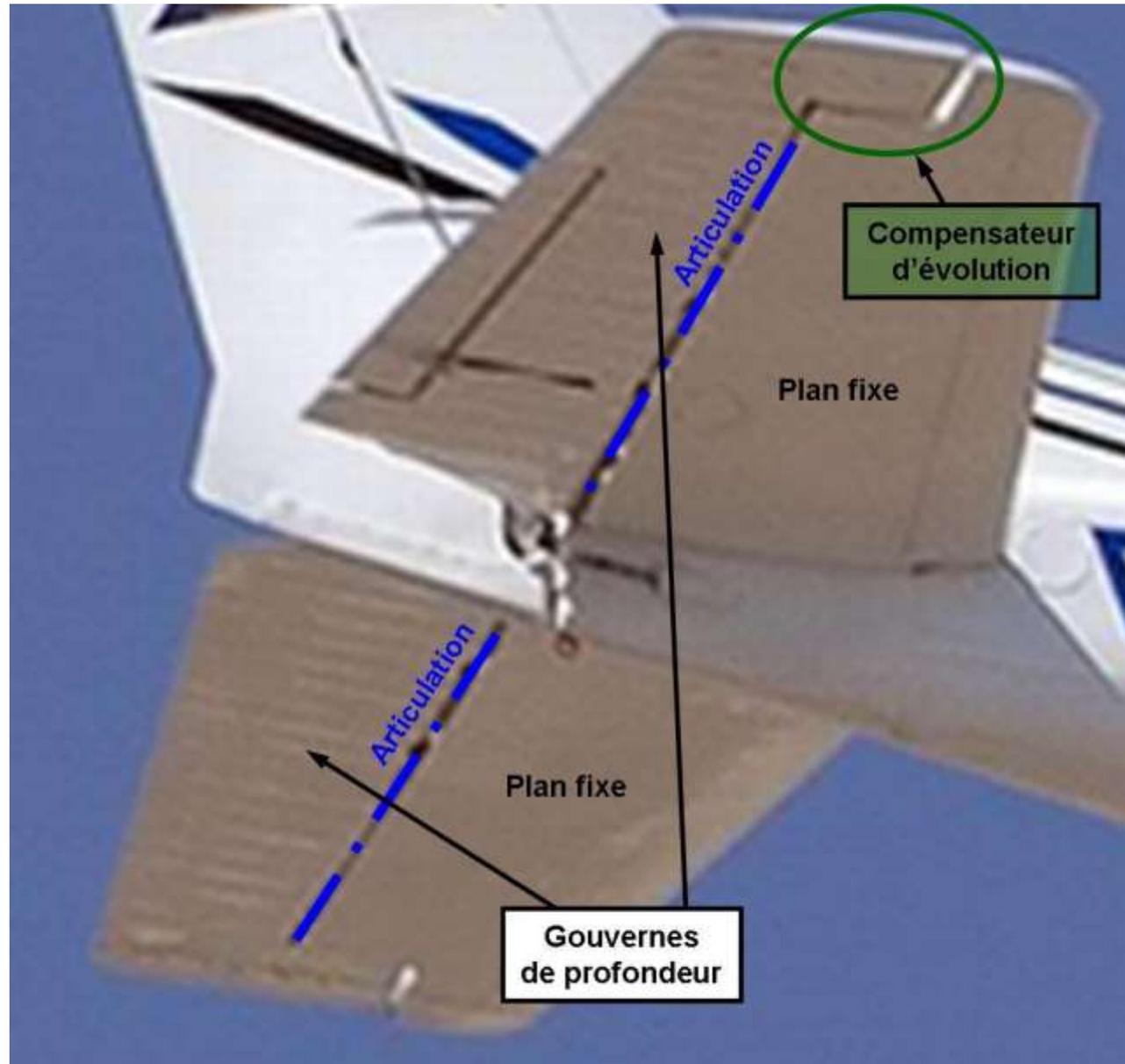
Un petit volet, appelé « tab » est articulé à l'arrière de la gouverne.

Un mécanisme l'oriente automatiquement dans le sens opposé au sens de braquage de la gouverne.

L'action de l'air sur le tab aide au braquage de la gouverne et réduit ainsi l'effort à exercer par le pilote.

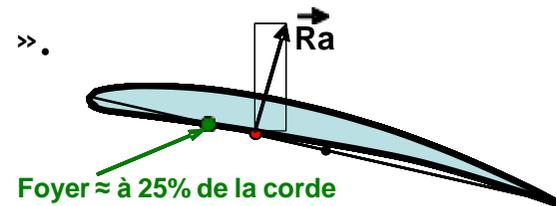


Compensation des gouvernes (4)



Stabilité longitudinale (1)

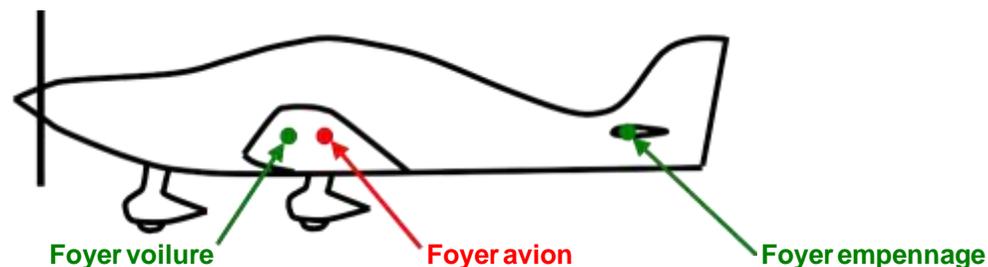
Rappel : Nous avons vu que les **variations de portance** d'un profil aérodynamique lorsque l'**incidence varie** apparaissent en un point appelé « **foyer du profil** ».



Pour un avion complet (avec sa voilure et son empennage horizontal), on définit de la même façon le « **foyer aérodynamique de l'avion** ».

C'est le point où apparaissent les **variations de la portance totale de l'avion** (*principalement voilure et empennage horizontal*) lorsque l'**incidence varie**.

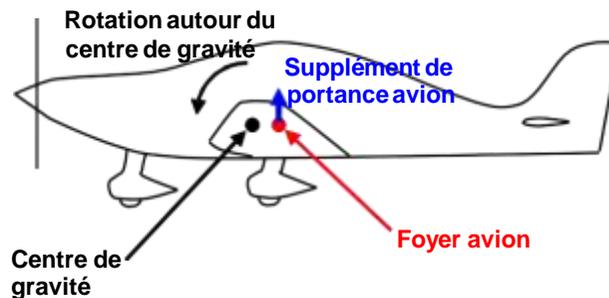
La position du foyer avion est principalement influencée par les positions du foyer de la voilure et du foyer de l'empennage horizontal.



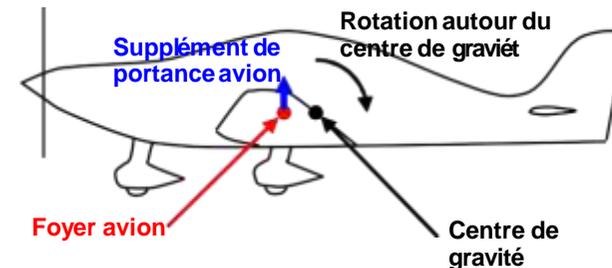
Stabilité longitudinale (2)

Lorsque l'avion est en équilibre, que se passe-t-il si une petite perturbation survient (par exemple une **petite augmentation d'incidence** due à des turbulences) ?

- Si le **foyer** avion est situé en **arrière** du **centre de gravité** de l'avion, l'**augmentation de portance** due à la petite augmentation d'incidence aura tendance à faire pivoter l'avion autour de son centre de gravité dans le sens d'une **diminution d'incidence**. L'avion est donc **stable**.



- Si le **foyer** avion est situé en **avant** du **centre de gravité** de l'avion, l'**augmentation de portance** due à la petite augmentation d'incidence aura tendance à faire pivoter l'avion autour de son centre de gravité dans le sens d'une **augmentation d'incidence**. L'avion est donc **instable**.



Pour qu'un avion soit **stable en tangage**, il faut que son **centre de gravité** soit situé **en avant** de son **foyer aérodynamique**.

Effets secondaires des commandes (1)

Lorsque le pilote agit...

- **uniquement** sur la commande de **gauchissement**, on constate que l'avion réagit en roulis (*effet souhaité*) et **aussi** partiellement en **lacet** (*effet secondaire*).
- **uniquement** sur la commande de **direction**, on constate que l'avion réagit en lacet (*effet souhaité*) et **aussi** partiellement en **roulis** (*effet secondaire*).

Explication :

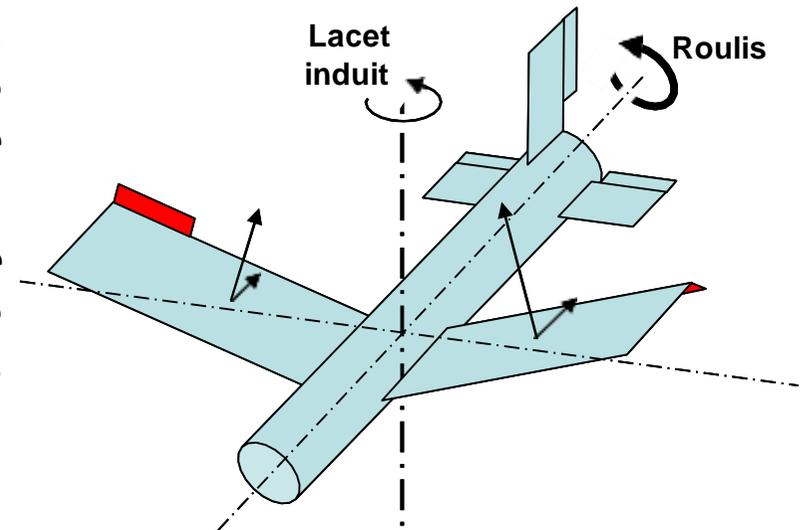
1- Lacet inverse (*lacet induit par le roulis*) :

Lorsqu'on **agit sur les ailerons** dans le but de créer du roulis, on augmente la portance d'une aile et on diminue celle de l'autre.

Ceci crée également une petite dissymétrie de traînée*** qui entraîne un mouvement de **lacet dans le sens opposé** au braquage des ailerons.

Cet effet est d'autant plus sensible que l'allongement de la voilure est grand (planeurs, par exemple).

(***traînée induite par la portance – déjà vu)



Effets secondaires des commandes (2)

2- Roulis induit par le lacet :

Lorsque l'avion subit un **dérapiage** on constate l'apparition d'un mouvement de **roulis** généralement **opposé au dérapage**.

Ce roulis induit est dû à la combinaison de 4 effets :

- l'effet de la position haute de la dérive :

La force aérodynamique F_Y qui apparaît sur la dérive est située au dessus de l'axe de roulis. Cela crée du **roulis opposé au dérapage**.

- l'effet du dièdre de la voilure :

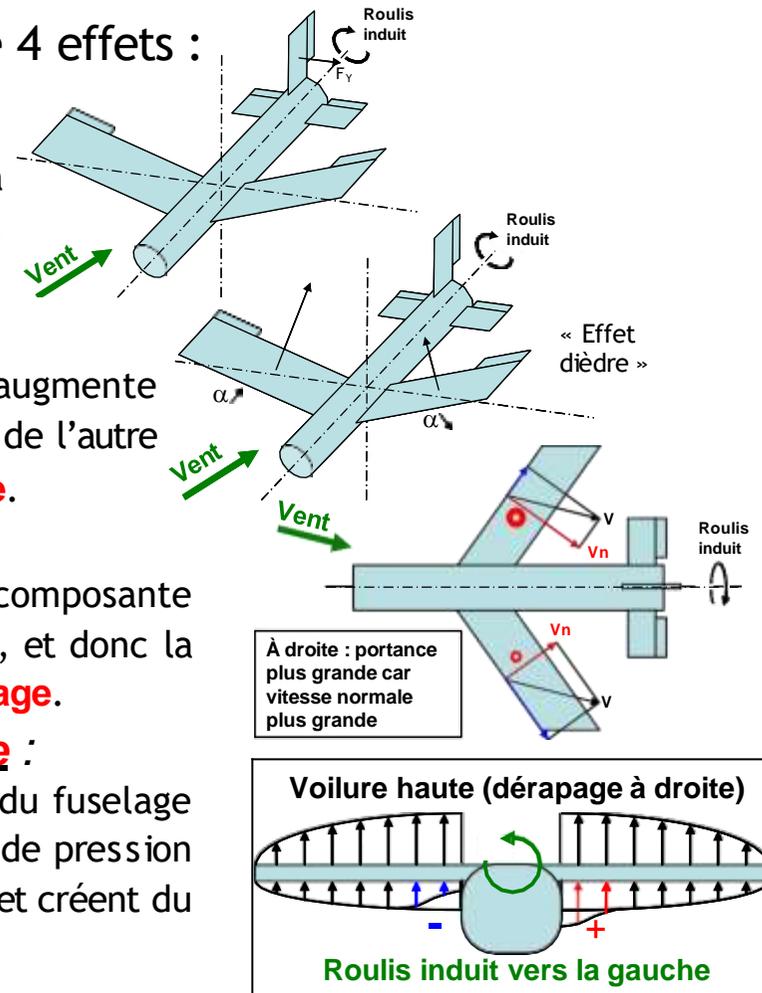
Si le dièdre de la voilure est positif, le dérapage augmente l'incidence de la $\frac{1}{2}$ aile au vent et diminue celle de l'autre $\frac{1}{2}$ aile. Cela crée du **roulis opposé au dérapage**.

- l'effet de la flèche de la voilure :

Sur la $\frac{1}{2}$ aile au vent, le dérapage augmente la composante de la vitesse perpendiculaire au bord d'attaque, et donc la portance. Cela crée du **roulis opposé au dérapage**.

- l'effet de la position en hauteur de la voilure :

Le dérapage crée une surpression sur un côté du fuselage et une dépression sur l'autre. Ces perturbations de pression affectent localement l'intrados (si voilure haute) et créent du **roulis opposé au dérapage**.



Stabilité transversale (1)

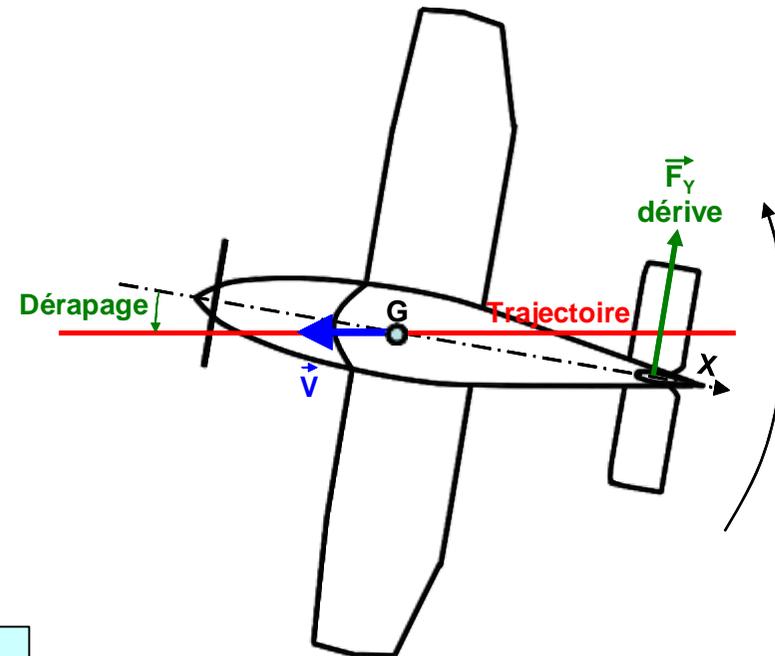
Rôle de l'empennage vertical (**dérive**) :

Lorsque le dérapage de l'avion n'est pas nul, l'écoulement d'air autour de l'avion est **dissymétrique**.

La dérive, attaquée en oblique, crée une **portance latérale** F_y .

Cette portance latérale, qui apparaît loin derrière le centre de gravité G de l'avion, provoque un **mouvement de lacet** qui a tendance à **réduire l'angle de dérapage** (effet girouette).

L'avion est donc **stable en lacet**, grâce (principalement) à sa **dérive**.



Stabilité transversale (2)

Effet de la **flèche** et du **dièdre** de la voilure, ainsi que de sa **position en hauteur** :

Nous avons vu (*roulis induit par le lacet*) que :

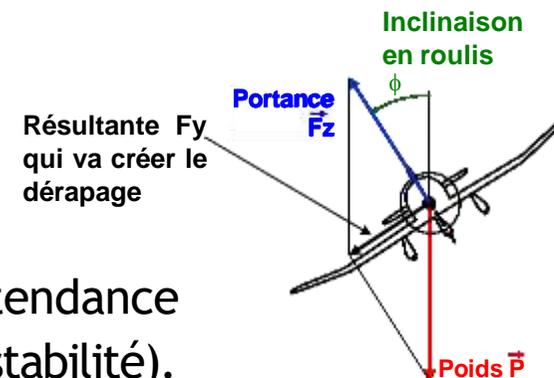
- une voilure à dièdre positif (vers le haut)
- une voilure à flèche positive (vers l'arrière)
- une voilure haute,

donnent, en cas de dérapage, du **roulis induit opposé au dérapage**.

Que se passe-t-il si on **abandonne** l'avion **en ligne droite** (sans rotation de lacet), avec une **inclinaison de roulis** ?

Réponse : On crée un déséquilibre latéral qui fait apparaître un **dérapiage de même sens que le roulis**.

Le **roulis induit par ce dérapage** aura donc tendance à **réduire l'inclinaison** de roulis **initiale** (d'où stabilité).



Explication hors programme BIA

Une voilure à **dièdre positif**, une voilure à **flèche positive**, une **voilure haute** sont des facteurs de **stabilité en roulis**.

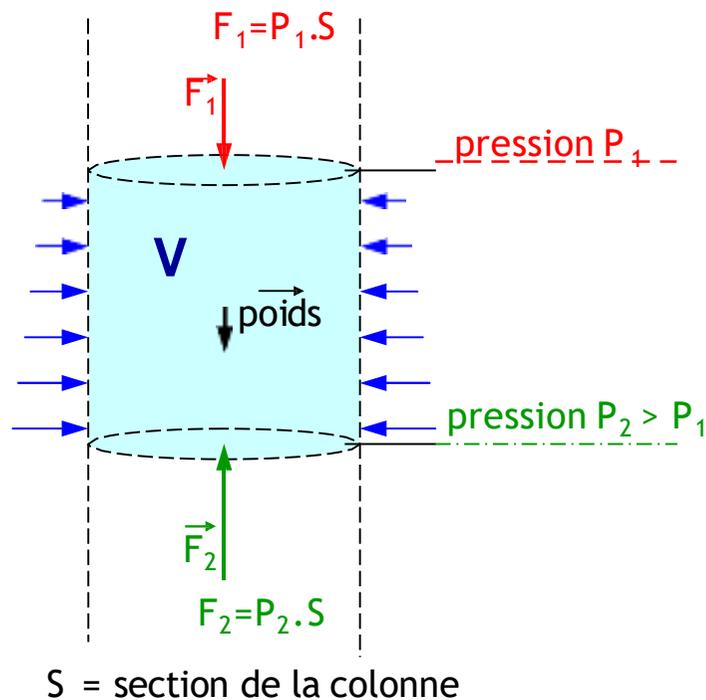
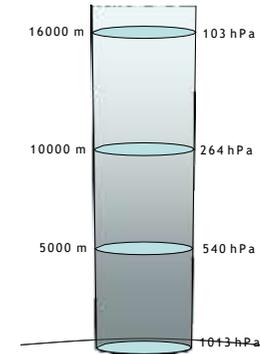
4- PRINCIPES DE L'AEROSTATION



Origine de la poussée d'Archimède

Comment un ballon vole-t-il ?

Rappel : Dans l'atmosphère, la pression à une altitude donnée est due au poids des couches d'atmosphère situées au-dessus de cette altitude.



Au sein d'une atmosphère calme, n'importe quel volume d'air V est en équilibre sous l'effet des forces de pression \vec{F}_1 , \vec{F}_2 et de son poids : La **résultante** $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{\text{poids}}$ **vaut 0**.

Si on remplace le volume d'air V par un volume identique d'un **gaz plus léger**, la **résultante** $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{\text{poids}}$ **n'est plus nulle**.

C'est une **force dirigée vers le haut**.

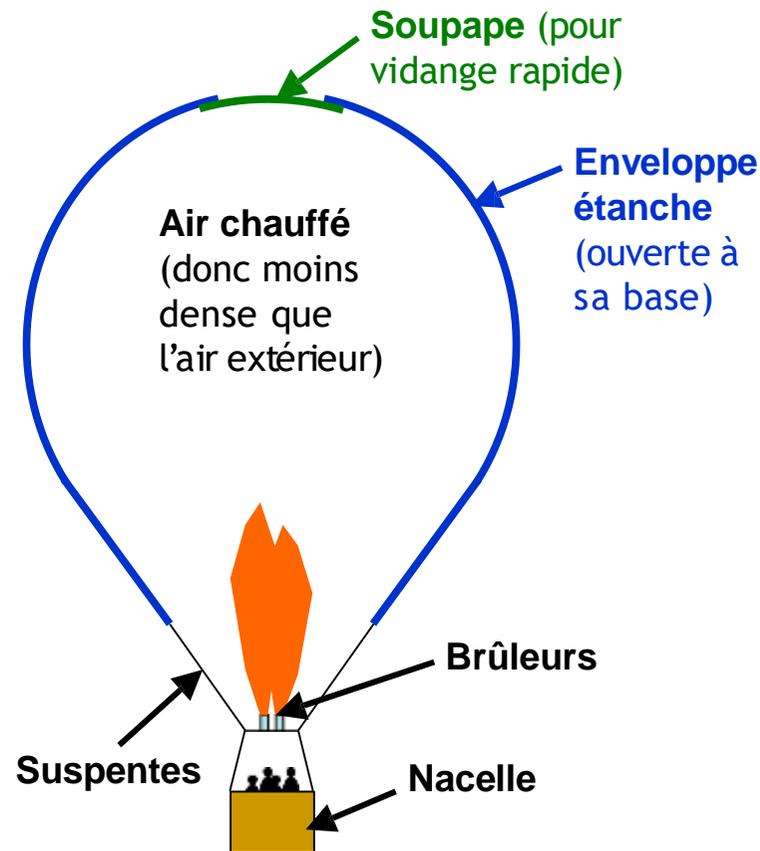
Son intensité est égale à la différence entre

- le poids de l'air déplacé (**poussée d'Archimède**)
- et
- le poids du gaz plus léger qui le remplace

Ballons à air chaud et ballons à gaz (1)

Comment emplir un ballon avec un gaz plus léger que l'air environnant ?

- 1^{ère} solution : Ballon à air chaud (**Montgolfière**)



- Pour **monter**, il faut réchauffer l'air contenu dans l'enveloppe.

- La force ascensionnelle diminue quand le ballon prend de l'altitude (car la diminution de densité de l'air entraîne une diminution de la différence entre la densité de l'air intérieur et celle de l'air extérieur).

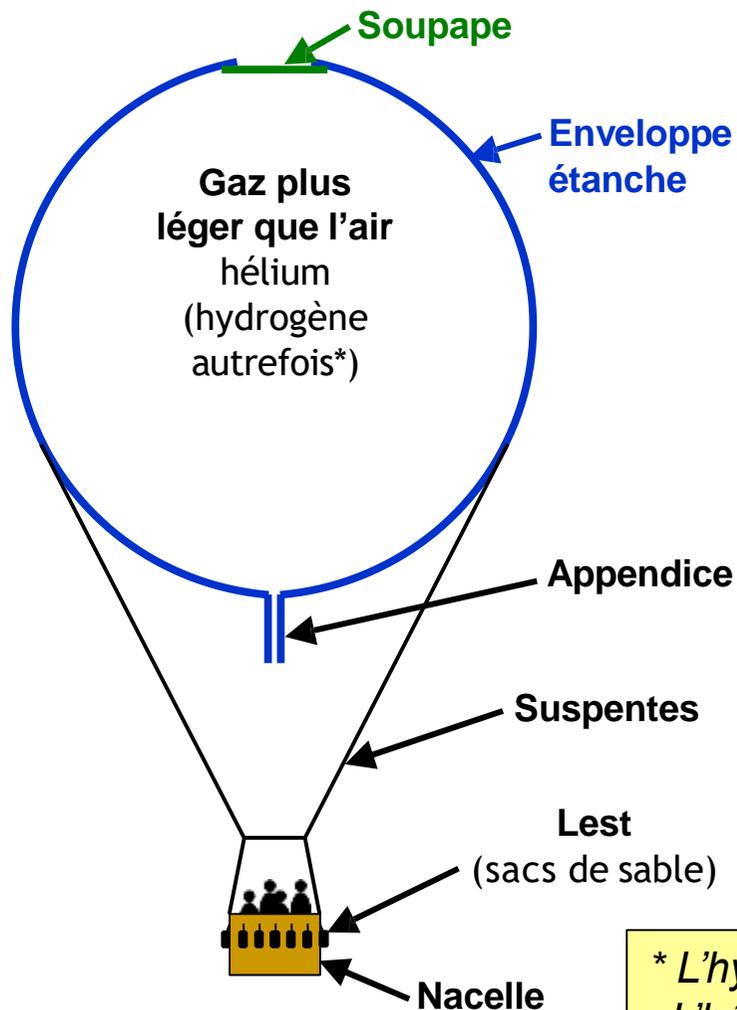
Le ballon atteint un **plafond**.

- Pour **descendre**, il suffit de laisser l'air intérieur se refroidir ou d'ouvrir modérément la soupape.

- Une ouverture totale et rapide de la soupape permet de **plaquer le ballon au sol** immédiatement après l'**atterrissage**.

Ballons à air chaud et ballons à gaz (2)

2^{ème} solution : Ballon à **gaz**



- Pour monter, il faut larguer du lest.

*Remarque : La **montée** entraîne une diminution de pression et donc une **expansion du gaz** contenu dans l'enveloppe.*

- *Si l'enveloppe n'est pas complètement tendue, son volume augmente.*

- *Si l'enveloppe est déjà complètement tendue, le gaz en excès s'évacue par l'appendice.*

- Pour amorcer la **descente**, il faut évacuer du gaz par la soupape.

- Pour **freiner** la descente, il faut **larguer du lest**.

** L'hydrogène est 14 fois plus léger que l'air.
L'hélium seulement 7 fois, mais il est ininflammable.*

Quelques exemples d'aérostats



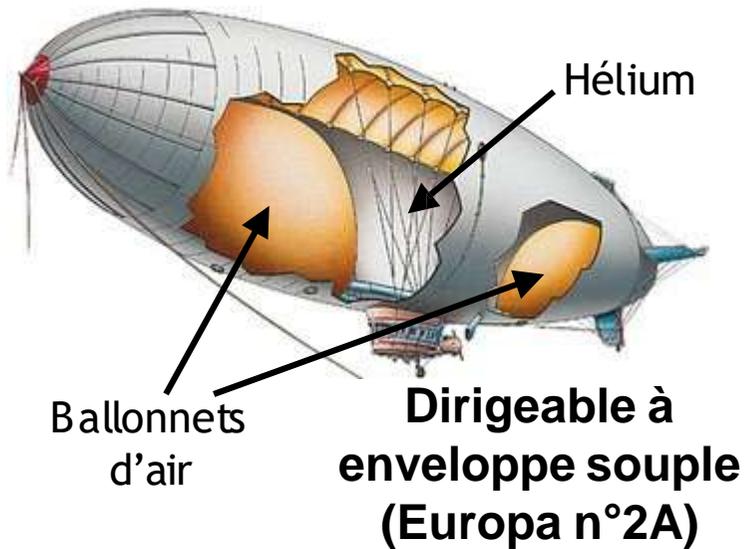
**Ballon à air chaud
(Montgolfière)**



Ballon à gaz



Ballon mixte (Rozière)
Mission polaire Jean-Louis Etienne

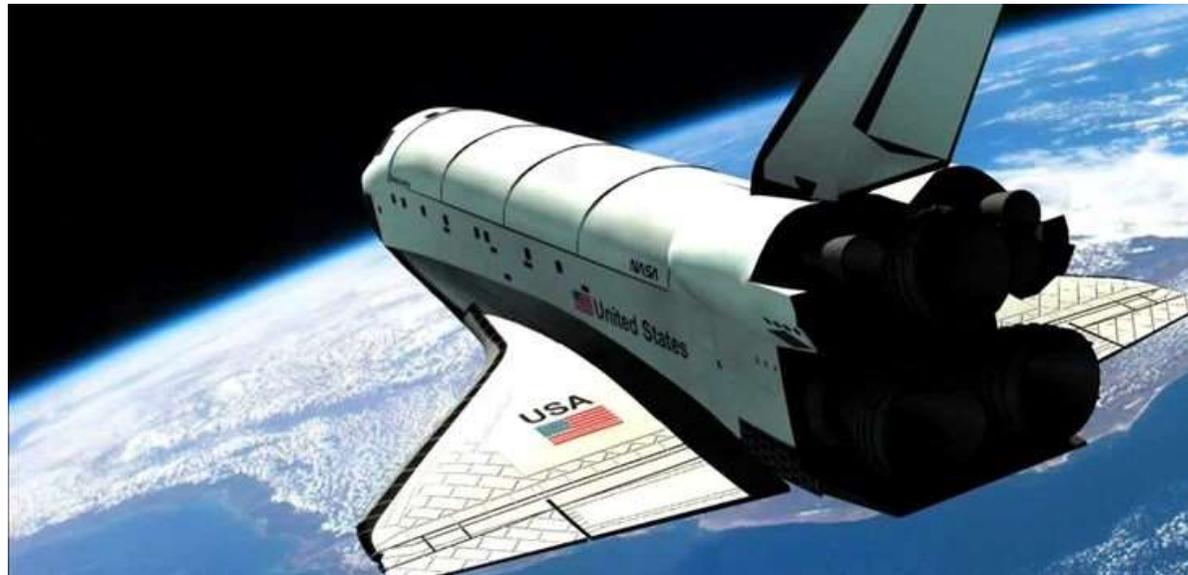


**Dirigeable à
enveloppe souple
(Europa n°2A)**



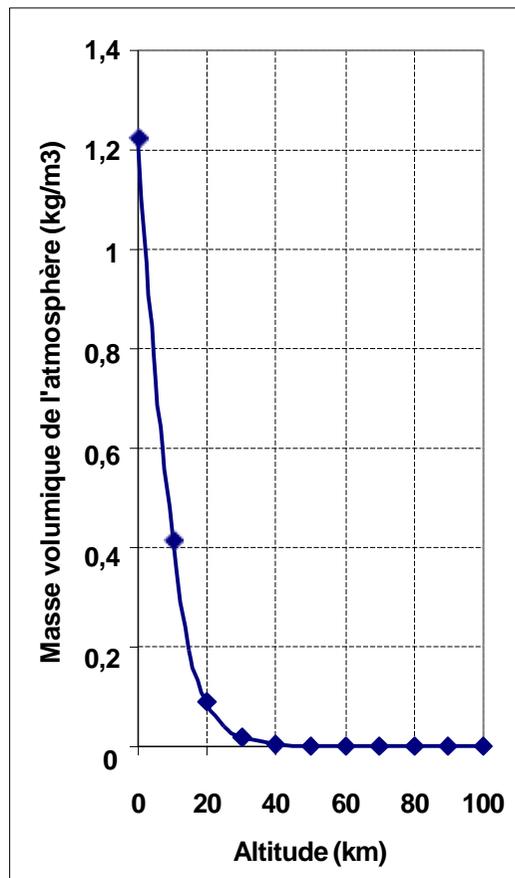
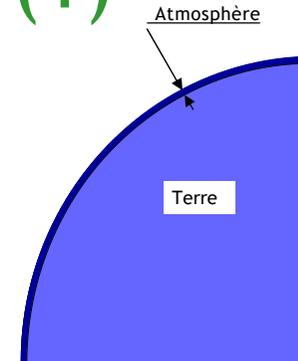
**Dirigeable à enveloppe rigide
(Zeppelin NT)**

5- PRINCIPES DU VOL SPATIAL



Vol hors de l'atmosphère (1)

Rappel : L'atmosphère constitue l'enveloppe gazeuse de la terre. A l'échelle de la terre, c'est une fine couche.



La densité de l'atmosphère diminue quand l'altitude augmente :

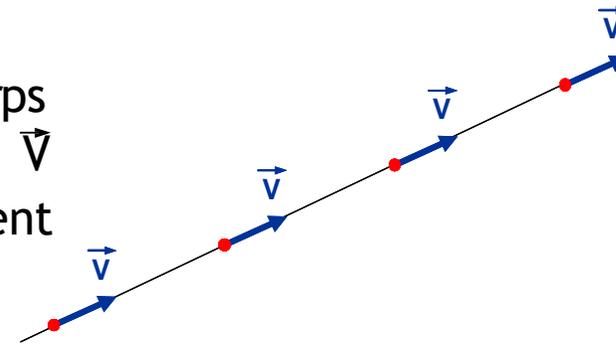
A **100km d'altitude**, la densité de l'atmosphère est \approx **un million de fois plus faible qu'au sol**.

A ces altitudes et au-delà, le déplacement d'un corps n'entraîne **quasiment pas de traînée aérodynamique**.

Le mouvement du corps n'est déterminé que par l'**attraction terrestre** (ou des autres astres) et éventuellement par la **poussée** de son (ses) propulseur(s).

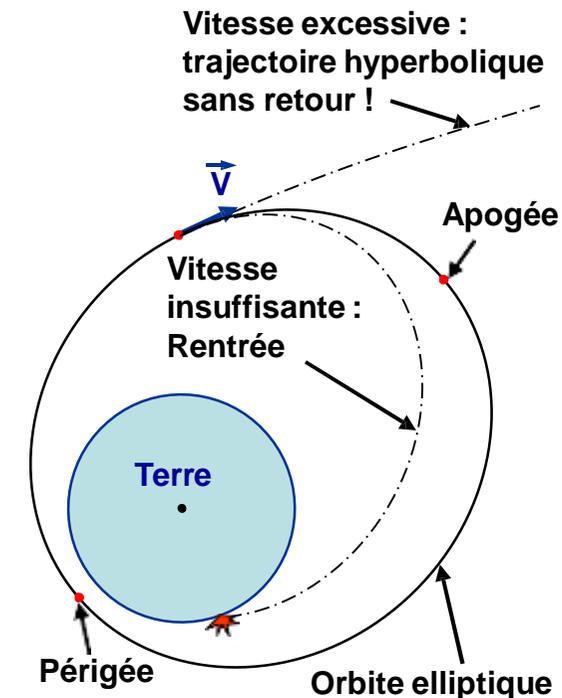
Vol hors de l'atmosphère (2)

Loin de tout autre corps, un corps abandonné avec une vitesse initiale \vec{V} poursuivrait indéfiniment son mouvement en **ligne droite** à la vitesse \vec{V} .



Soumis à la **force d'attraction d'un astre** (la terre, par exemple) le corps verra sa trajectoire se **courber**.

La force d'attraction étant inversement proportionnelle au carré de la distance entre l'astre et le corps (Isaac Newton 1685), on a pu démontrer que la trajectoire du corps est une courbe plane de la famille dite des « coniques » (**ellipse**, parabole ou hyperbole), le centre de l'astre étant un point (appelé « foyer ») appartenant au plan de la courbe.



En orbite basse, la vitesse de satellisation vaut $\approx 8\text{km/s}$

La vitesse de libération (pour quitter la zone d'attraction terrestre) vaut $\approx 11\text{km/s}$

Vol orbital

Géométrie de l'orbite :

Elle ne dépend que de l'orientation et de la valeur de la **vitesse** communiquée **initialement** au satellite.

Temps de révolution (temps mis pour faire un tour complet) :

Il dépend de la dimension de l'orbite elliptique.

- * *Le carré de ce temps est proportionnel au cube du grand axe de l'ellipse (distance apogée – périgée mesurée en ligne droite).*

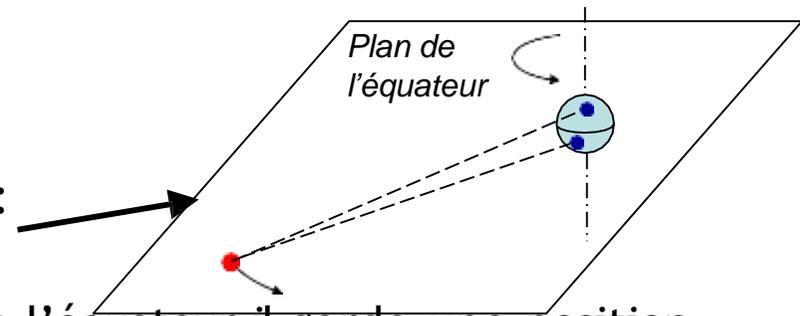
Plus on vole **haut**, plus le **temps de révolution** est **long**.

Quelques exemples d'orbites terrestres :

- Orbite circulaire à $\approx 200\text{km}$ d'altitude :
Temps de révolution = 1h30mn.
- Orbite circulaire à $\approx 36000\text{km}$ d'altitude :
Temps de révolution = 24h.

Si le satellite est placé au dessus de l'équateur il garde une position fixe par rapport à la terre (il tourne en même temps qu'elle).

C'est l'**orbite géostationnaire** (utilisée pour les télécommunications).



(* Hors programme BIA)

Changement d'orbite

Maintien sur orbite :

Sans aucune action d'un propulseur, un satellite **continue à orbiter de façon régulière**.

A long terme, on note cependant une **très lente perte d'altitude**, due à la minuscule traînée aérodynamique qui subsiste (car le satellite vole dans un milieu qui n'est pas tout-à-fait le vide absolu).

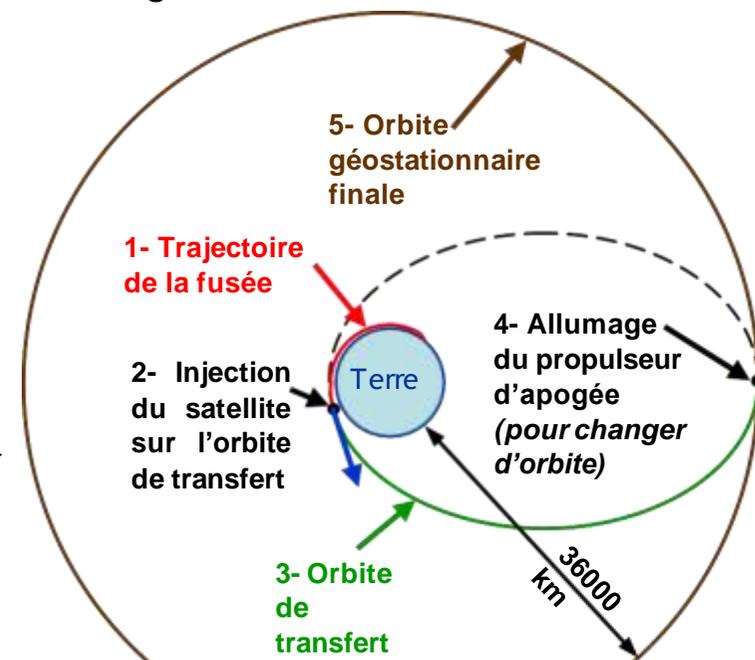
Pour pouvoir repositionner le satellite sur l'orbite souhaitée, il est équipé de **petits propulseurs** qu'on **allume brièvement** de temps en temps.

Lorsque tous les ergols du satellite sont consommés, la **vie du satellite** est terminée (*il ne peut plus se maintenir sur l'orbite souhaitée. Il chute progressivement vers les couches denses de l'atmosphère où il est généralement détruit à cause de l'échauffement*).

Changement d'orbite :

L'**allumage** du propulseur d'un satellite en un **point précis** de son orbite pendant un **temps précis** va modifier sa vitesse et va donc le diriger sur une **nouvelle orbite**.

Exemple : Lancement d'un satellite géostationnaire



Les lanceurs

La **mission du lanceur** est de placer le satellite au **bon instant**, au **bon endroit** et à la **bonne vitesse** pour qu'il continue son mouvement sur la **bonne orbite**.

Le lanceur doit pouvoir fonctionner dans le vide. Il doit donc emporter son **carburant** et son **comburant** qu'on nomme « **ergols** ».

L'efficacité du lanceur est liée au type d'ergol choisi et au rapport

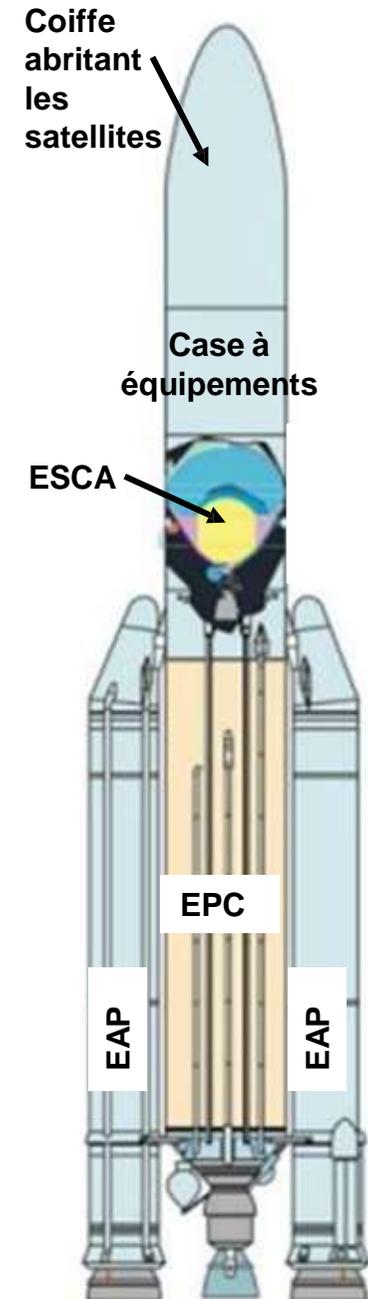
$$\frac{\text{Masse d'ergol}}{\text{Masse totale du lanceur}}$$

Pour cette raison, on construit le lanceur en **plusieurs étages** qui fonctionnent successivement.

Quand un étage a fini de fonctionner on le **largue**, pour ne plus avoir à transporter son poids mort.

*Exemple : Vol Ariane 5 n°194. Masse totale décollage : **775 tonnes***

- *Charge utile : 2 satellites de télécommunication $M \approx$ **8 tonnes***
- *Accélérateurs EAP : Poussée **2x600 tonnes** de $T=6s$ à $T=146s$
Masse fusée après séparation des EAP : **177 tonnes***
- *Etage principal EPC : Poussée **136 tonnes** de $T=3s$ à $T=535s$
Masse fusée après séparation de l'EPC : **28,2 tonnes***
- *Etage supérieur ESCA : Poussée **6,5 tonnes** de $T=535s$ à $T=1482s$*



BIA

HISTOIRE DE L'AIR
ET
DE L'ESPACE - I

De 1783 à 1918

Y. GHERARDI
Edition 1.0
Octobre 2012

Premiers ballons à air chaud

S'élever dans les airs, le vieux rêve de l'humanité, devient réalité en 1783.

Les frères Montgolfier, papetiers dans l'Ardèche, réalisent des enveloppes de tissu et de papier ouvertes à la base, capables de s'envoler lorsqu'elles sont remplies d'air chaud. On les nomme « Montgolfières ».

Le premier vol habité a lieu à Versailles le 19 septembre 1783 avec comme passagers un mouton, un canard et un coq qui atterrissent sains et saufs.

Le 21 novembre 1783 Jean-François Pilâtre de Rozier et le Marquis d'Arlandes font un vol de 9 km au dessus de Paris à bord d'un ballon de 2200m³ chauffé à la paille.



Premiers ballons à gaz

A la même époque...

Le physicien Jacques Charles travaille sur des ballons gonflés à l'hydrogène, gaz 14 fois plus léger que l'air, que l'on sait produire depuis 1766. Ces ballons sont nommés « Charlières ».

Le 1^{er} décembre 1783

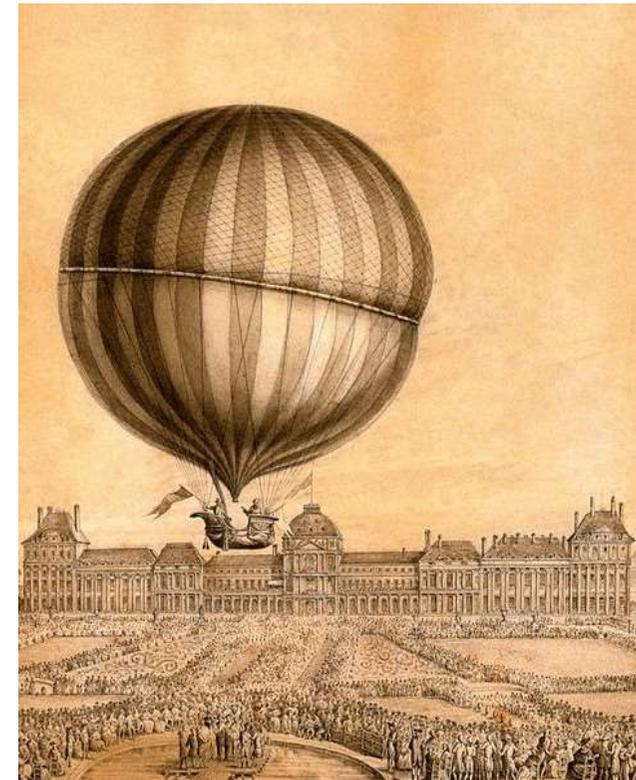
(seulement 10 jours après le vol historique de Pilâtre de Rozier et du marquis d'Arlandes)

il réalise un vol de 36 km

accompagné de Nicolas Robert
à bord d'un ballon de 550m³.

En 1785, Jean-Pierre Blanchard et John Jefries traversent la Manche de Douvres à Calais à bord d'un ballon gonflé à l'hydrogène.

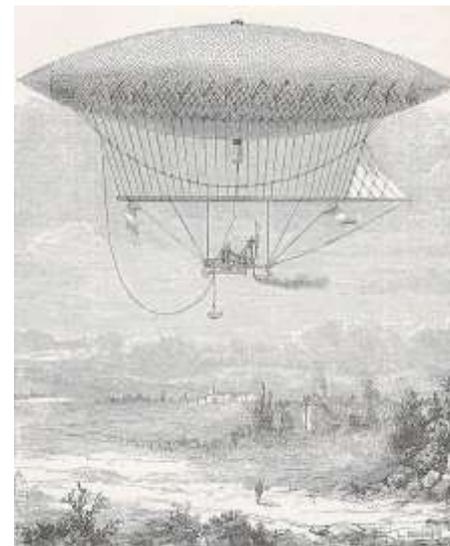
L'hydrogène sera utilisé au XIX^{ème} siècle et jusque dans le courant du XX^{ème} siècle.



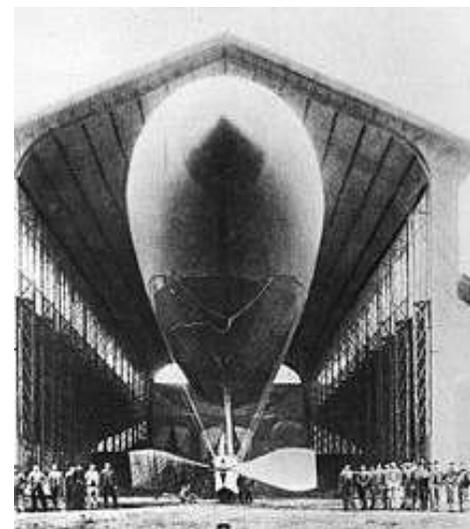
Premiers ballons dirigeables

En 1852, Henri Giffard réalise un ballon allongé
(longueur : 44 mètres)
équipé d'une hélice mue par une machine à vapeur
(puissance : 3cv)
et équipé d'un gouvernail.

Vitesse atteinte : 10 km/h !
Incapable de remonter un vent soutenu,
par manque de puissance.

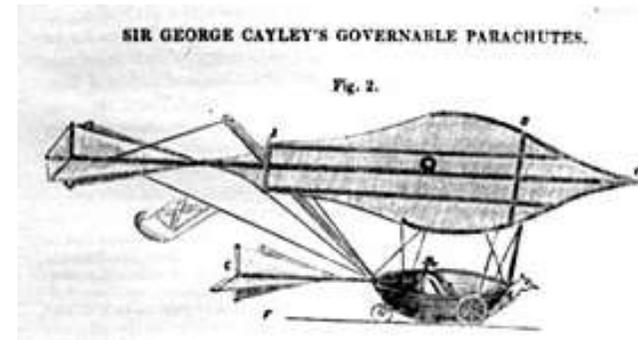


Il faudra attendre Charles Renard en 1884
et son dirigeable « La France »
mu par un moteur électrique de 7cv
pour pouvoir assurer un parcours en circuit fermé.



Premiers vols planés

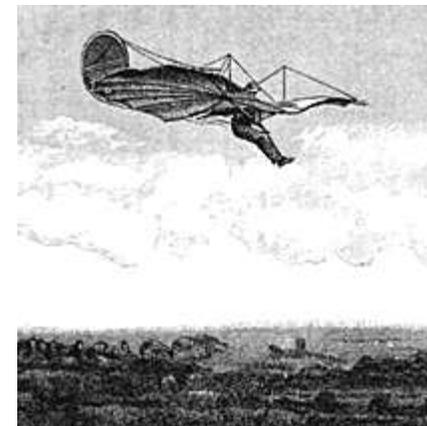
En 1852, L'Anglais George Cayley réussit à faire voler son planeur (dénommé "parachute gouvernable") avec une personne à bord (son cocher).



Jean Le Bris dépose le brevet de la « barque ailée » en 1857 et réussit à faire voler « l'Albatros » en 1868 à partir d'une charrette.



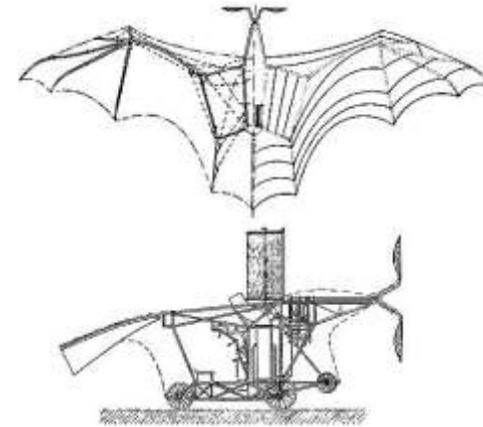
De 1891 à 1896, l'Allemand Otto Lilienthal réalise méthodiquement plus de 2000 vols planés et se tue.



Premiers « plus lourds que l'air » motorisés

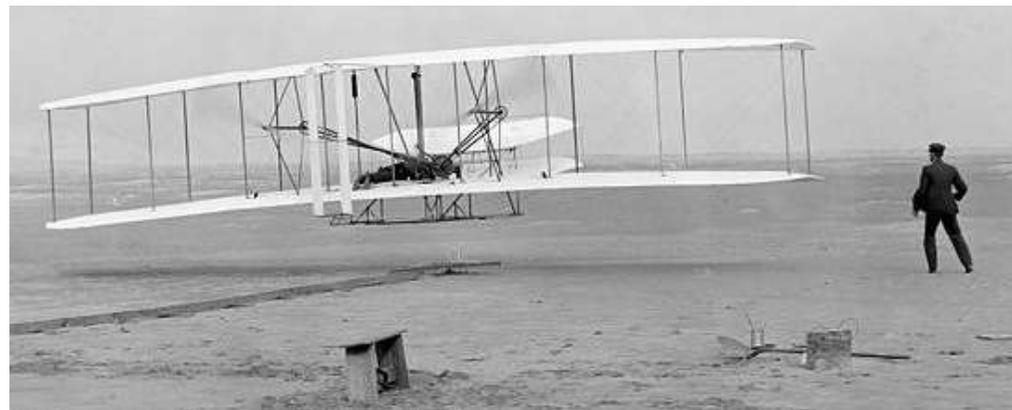
En 1890, Clément Ader réalise le 1er vol d'un avion (à vapeur) : l'Eole (Avion I).

L'avion aurait quitté le sol sur quelques dizaines de mètres, mais était pratiquement incontrôlable en vol.



En s'appuyant sur l'expérience acquise avec plusieurs planeurs et sur les travaux d'Octave Chanute, les frères Wright (USA) réalisent en 1903 le 1^{er} vol contrôlé d'un plus lourd que l'air motorisé : le « Flyer I » mu par un moteur à combustion interne de 12 cv et lancé à partir d'un rail.

Le contrôle de l'avion en vol est assuré par une action sur chacun des trois axes : roulis, tangage et lacet.

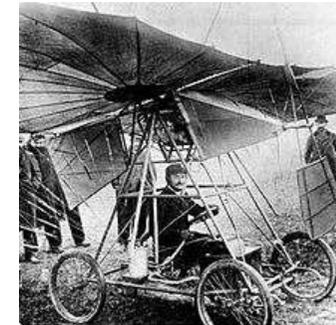


Premiers progrès (1)

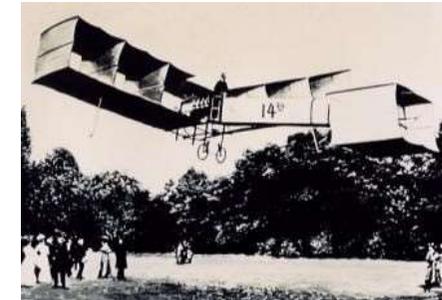
Les frères Wright construisent le « Flyer II » (1904) puis le « Flyer III » (1905) qui gagnent en stabilité et en performance, puis le « Flyer A » (1908) biplace.



Août 1906 : Premier décollage autonome (sans rail de lancement) par le Roumain Traian Vuia qui vole sur 25 mètres à une hauteur de 1 mètre, à Montesson.



Octobre 1906 : le Brésilien Alberto Santos Dumont vole sur 60 mètres à une hauteur de 3 mètres à bord du « 14 bis », à Bagatelle.



Décembre 1906 : Robert Esnault-Pelterie invente le manche à balais, pour commander d'un même geste le roulis et le tangage.

Premiers progrès (2)

3 juillet 1909 : Louis Paulhan bat le record de hauteur : 150 mètres.

25 juillet 1909 : Louis Blériot traverse la Manche aux commandes de son monoplan Blériot XI.



Fin novembre 1909 : Ouverture à Pau de la 1^{ère} école d'aviation au monde. Wilbur Wright en sera le premier instructeur.

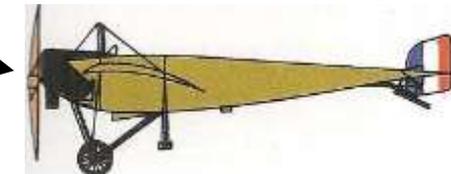
1909 : Premiers meetings aériens organisés à Douai, puis à Reims.

1910 : Henri Fabre fait voler le 1^{er} hydravion, à Martigues.



1913 : Adolphe Pégoud effectue les premiers loopings.

1913 : Roland Garros traverse la Méditerranée sur un Morane type H.

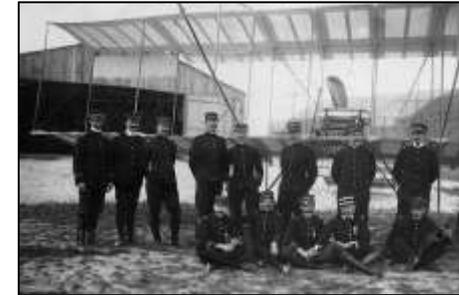


1914 : Elmer Sperry invente le pilote automatique.

La guerre de 1914-1918 (1)

A partir de 1910 (*Création de l'inspection aéronautique Militaire – Général Roques*) on commence :

- à définir les missions (essentiellement d'observation)
- à sélectionner les avions
- à former les pilotes militaires.



Au début du conflit, l'avion est utilisé :

- pour des missions d'observation
- quelques missions de bombardement (très limitées par les capacités d'emport)

L'armement se limite parfois à une arme légère portée par l'observateur.

Puis des mitrailleuses sont installées avec difficulté (avions trop fragiles).

Les premiers systèmes de tir à travers l'hélice fonctionnent mal (synchronisation difficile).

En 1915, Roland Garros perfectionne le tir à travers l'hélice grâce au blindage des pales.

Puis l'Allemand Fokker réussit à maîtriser la synchronisation du tir sur le Fokker E III.



La guerre de 1914-1918 (2)

Les progrès de la motorisation permettent des avions plus lourds et plus performants.

Les avions sont fabriqués en grande série.

A la fin de la guerre, on compte environ :

- 4500 avions français
- 3500 avions britanniques
- 2500 avions allemands

Quelques types d'avions de chasse célèbres :

• France :

Morane-Saulnier L



Nieuport 17



SPAD S.VII



SPAD S.XIII



• Allemagne :

Fokker E.III



Albatros



Fokker Dr I



Fokker D.VII



• Grande Bretagne :

Bristol F.2B Fighter



R.A.F. SE.5



Sopwith Camel



La guerre de 1914-1918 (3)

Quelques types de bombardiers :

• France :

Farman F40



Bréguet XIV



• Allemagne :

Taube



Gotha G. V



• Grande Bretagne :

De Havilland DH. 9



Handley-Page 0/400



La guerre de 1914-1918 (4)

Par comparaison avec la guerre dans les tranchées, le combat aérien est vu comme un combat noble, chevaleresque.

Dans chaque pays, on comptabilise les victoires et on glorifie les pilotes vainqueurs (...qui finissent souvent par être abattus à leur tour). On leur donne le qualificatif d' «As de l'aviation».

En France, on peut citer :

• René Fonck	75 victoires	
• Georges Guynemer	54 victoires	<i>abattu en 1917</i>
• Charles Nungesser	43 victoires	

En Allemagne :

• Manfred Von Richthofen <i>(le Baron Rouge)</i>	80 victoires	<i>abattu en 1918</i>
---	--------------	-----------------------

En Angleterre :

• Edward Mannock	68 victoires	<i>abattu en 1918</i>
------------------	--------------	-----------------------

Au Canada :

• William Bishop	72 victoires	
------------------	--------------	--

BIA

HISTOIRE DE L'AIR
ET
DE L'ESPACE - II

Les avions de 1919 à 1960

Y. GHERARDI
Edition 1.0
Décembre 2012

Les lendemains de la 1^{ère} guerre mondiale

Le retour à la paix pousse pilotes et constructeurs à trouver d'autres débouchés pour l'aviation.

Les pilotes se lancent dans les exhibitions acrobatiques et les tentatives de records.



Les constructeurs établissent les premières lignes aériennes pour transporter le courrier ainsi que des passagers.



Ils utilisent tout d'abord d'anciens appareils militaires, puis créent de nouveaux modèles mieux adaptés.

La conquête de l'Atlantique

Dès 1919, les premières traversées ont lieu d'ouest en est :

- avec escale aux Açores,
- puis directement de Terre Neuve jusqu'en Irlande (Alcock et Brown).

En mai 1927, Nungesser et Coli tentent la traversée de Paris à New York à bord de « l'Oiseau Blanc » et disparaissent.



15 jours plus tard Charles Lindbergh réussit la traversée de New York à Paris en 33 heures, à bord du « Spirit of St Louis ». Il reçoit un accueil triomphal.

En 1929, Assolant, Lefèvre et Loti tentent New York→Paris à bord de « l'Oiseau Canari ». Ils atterrissent en Espagne (1^{er} passager clandestin !)

En 1930, Costes et Bellonte réussissent la traversée de Paris à New York à bord du « Point d'interrogation ».

L'Atlantique Sud est vaincu en 1922 (Traversée Lisbonne - Rio par les Portugais Coutinho et Cabral).

Naissance de l'aviation commerciale (1)

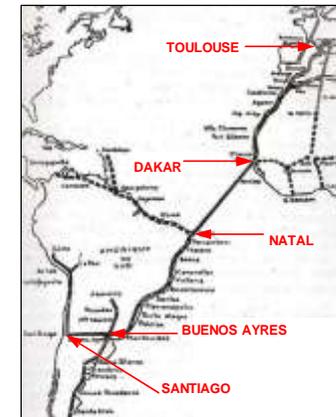
En France, dès 1918-1919, les premières compagnies aériennes sont créées :

- *Compagnie des messageries aériennes (Bréguet / Blériot / Renault / Caudron) :*
 - *Courrier de Paris à Lille, puis passagers de Paris à Londres (sur Bréguet 14).*
- *Société des lignes Latécoère (qui deviendra l'Aéropostale en 1927) :*
 - *Courrier entre Toulouse et Casablanca, puis Dakar (sur Bréguet 14).*
 - *Didier Daurat en est l'animateur enthousiaste.*
 - *Parmi les pilotes : Jean Mermoz, Henri Guillaumet, Antoine de Saint-Exupéry.*

En 1927, Pierre-Georges Latécoère se consacre à la construction de nouveaux modèles d'avions (*Laté 25 et 26*) et cède sa compagnie aérienne qui devient l'Aéropostale.

L'Aéropostale développe les lignes d'Amérique du Sud :

- *Liaison Natal-Rio-Buenos Ayres en 1927.*
- *Liaison Buenos Ayres-Santiago en 1928.*
(franchissement de la Cordillère des Andes)
- *1^{ère} liaison postale aérienne Dakar-Natal en 1930.*



En 1933 plusieurs compagnies aériennes fusionnent pour former Air France qui va développer le réseau en Europe, vers l'Afrique du Nord, l'Afrique équatoriale, le Proche-Orient et l'Extrême-Orient.

Jean Mermoz disparaît dans l'Atlantique Sud en 1936, à bord de l'hydravion « Croix du Sud », lors de sa 24^{ème} traversée.

Naissance de l'aviation commerciale (2)

De nombreuses compagnies aériennes se développent aussi à l'étranger :

- Aux Etats-Unis :

- Dès 1917, une première liaison postale New York - Washington est établie.
- Les lignes se développent rapidement et la première liaison transcontinentale est établie en 1920 (elle fait gagner 22 heures sur le temps d'acheminement du courrier d'une côte à l'autre).
- En 1926, l'apparition du trimoteur Ford favorise le développement du transport de passagers à travers le pays et sur les lignes vers Cuba et le Mexique.



- En Europe :

- En Grande Bretagne, aux Pays-Bas (KLM-1919), en Allemagne (Lufthansa), en Belgique (Sabena 1923) les premières compagnies aériennes commencent à tisser un réseau européen.
- Des lignes à destination des colonies sont ensuite établies :
 - d'Angleterre vers l'Inde en 1929 (7j), l'Afrique centrale en 1931 (10j), l'Afrique du Sud en 1932 (10j), l'Australie en 1935 (12j ½).
 - de Belgique vers le Congo en 1935 (5j ½).



- En Australie :

- Qantas (créée en 1920) développe un réseau intérieur, puis établit des liaisons avec l'Angleterre, en coopération avec Imperial Airways (GB).

L'aviation commerciale en 1939

Les compagnies aériennes ont tissé leur toile autour du globe :
Air France a un réseau de 46500 km.

De nouveaux avions, aux performances sans cesse améliorées sont apparus :
Monoplans tout métal, à train rentrant et hélices à pas variable, tels que :

- Le Boeing 247, en 1933 :
10 passagers - 260 km/h.



- Le Douglas DC3, en 1935 :
21 passagers - 270 km/h.



- Le Bloch MD220, en 1937 :
16 passagers - 300 km/h.



Pour les liaisons intercontinentales, d'immenses dirigeables sont construits (surtout par les Allemands : Zeppelin) pour le transport de passagers.

Un accident spectaculaire (*Le Hindenburg prend feu à l'atterrissage*) sonne le glas des dirigeables à hydrogène, en 1937.

Des hydravions géants (*Dornier, Caproni, Latécoère*) assurent des liaisons transocéaniques.

Trop lents et trop gourmands en carburant, ils sont progressivement abandonnés au profit des avions.



L'aviation militaire en 1939

En Allemagne Hitler arrive au pouvoir en 1933. Il viole le traité de Versailles de 1919 (*qui interdisait l'aviation militaire allemande*) et engage le réarmement :

- *Création de la Luftwaffe (armée de l'air)*
- *Doctrines de la « guerre éclair » et du « bombardement stratégique »*
- *Mise au point de nouveaux avions.*

Les pays vainqueurs de 1918 sont dans l'incapacité de s'y opposer. Ils s'engagent, eux aussi, dans un renforcement de leur armement.

Le régime nazi utilise la guerre civile espagnole (1936-1939) pour tester ses nouveaux armements et techniques de bombardement :

Attaque de Guernica en 1937 par des bombardiers en piqué (Stukas) Junker Ju87.



En 1939, l'Allemagne dispose de 4200 avions opérationnels, le Royaume Uni en compte 3500, la France environ 1200.

La supériorité allemande est surtout due à la bonne organisation et à la préparation de la Luftwaffe.

La 2^{ème} guerre mondiale (1)

La tactique de la «guerre éclair » (blitzkrieg) qui associe avancée rapide des chars et appui aérien est employée par l'Allemagne pour les campagnes de Pologne (1939) et de France (1940).

Les avions allemands les plus célèbres sont :

- le chasseur Messerschmitt Bf109.
- le bombardier en piqué Junker Ju87.



De juillet 1940 à mai 1941, l'Allemagne lance des attaques aériennes massives sur l'Angleterre pour préparer son invasion (bataille d'Angleterre).

La royal Air Force résiste victorieusement grâce au remarquable chasseur Vickers « Spitfire MK1 » et à l'utilisation du radar.



La 2^{ème} guerre mondiale (2)

L'industrie américaine vient en soutien de l'Angleterre.

Attaqués à Pearl Harbor (Hawaï) en décembre 1941 par l'aéronavale Japonaise, les Etats-Unis entrent en guerre à leur tour et développent la production d'avions en grande série, parmi lesquels :

- le bombardier Boeing B17 Flying Fortress
- l'avion d'assaut Douglas A-26 Invader
- le chasseur North American P51 Mustang
- l'avion de transport Douglas C47

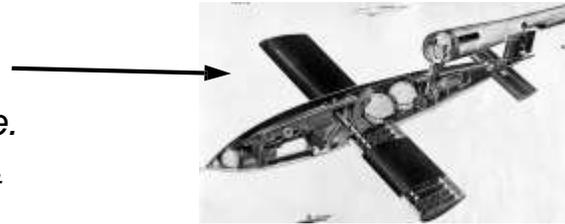


La 2^{ème} guerre mondiale (3)

La guerre stimule les progrès et les innovations aéronautiques :

- Amélioration constante des performances des avions :
 - *Vitesse maximale* : A la fin de la guerre > 700 km/h (Spitfire et Messerschmitt Bf109).
 - *Plafond* : Ces 2 avions dépassent 12000 mètres d'altitude.
 - *Charge utile et rayon d'action* : Les progrès des moteurs et de l'aérodynamique sont poussés par les besoins des bombardiers lourds et des transporteurs de troupes et de matériel.
- Bombes volantes (développées par les Allemands pour attaquer l'Angleterre) :

- *V1 avion sans pilote transportant une forte charge explosive.*



- *V2 fusée transportant une forte charge explosive.*



- Travaux de mise au point de l'avion à réaction :

Allemands et Anglais travaillent, chacun de leur côté, à mettre au point ce nouveau mode de propulsion qui arrivera trop tard pour changer le cours de la guerre.



Ces innovations, développées dans un but belliqueux, portent en germe les progrès spectaculaires que connaîtra l'aviation lorsque la guerre sera finie.

Les lendemains de la 2^{ème} guerre mondiale (1)

De nombreux pays sortent ravagés de la guerre. Les besoins de reconstruction et d'échanges commerciaux sont immenses.

L'infrastructure (aérodromes, usines) et les compétences aéronautiques développées pendant la guerre sont disponibles.

Ces deux raisons vont conduire à un développement spectaculaire du transport aérien qui va devenir une activité économique mature :

- Le Lockheed « Constellation », avion pressurisé à long rayon d'action est mis en service en 1946.
- Les liaisons transatlantiques deviennent quotidiennes.
- Elles nécessitent 16 heures environ et 2 escales.
- Sur le même créneau, Douglas produit le DC6 et Boeing le B377 S stratocruiser.



Les lendemains de la 2^{ème} guerre mondiale (2)

La 2^{ème} guerre mondiale fait place à une période de tension est-ouest : « la guerre froide ». Une compétition s'engage pour les avions de combat.

- Le « mur du son » est une « barrière invisible » difficile à franchir à cause de l'apparition d'ondes de choc à l'approche de la vitesse du son (1060 à 1225 km/h).

Ces ondes de choc occasionnent une forte augmentation de la traînée de l'avion, des vibrations et des instabilités.

Le mur du son est franchi pour la première fois par Chuck Yeager en 1947 à bord du Bell X1, avion à moteur fusée largué par un bombardier B29.



- En France, le premier avion à réaction est le SO 6000 Triton, qui vole en 1946.



En 1953, le mur du son est franchi, en vol horizontal par Constantin Rosanoff sur Dassault Mystère IV.

De 1949 à 1957, René Leduc développe des avions expérimentaux propulsés par statoréacteur.



Dassault développe le Mirage III Mach > 2 ; 1422 avions construits



L'avènement du transport à réaction

Dans les années 50, le Super Constellation et le DC7, ultime perfectionnement des avions à hélice de la décennie précédente permettent enfin des vols transatlantiques sans escale.

Mais ils sont rapidement surpassés par l'arrivée des premiers avions de ligne à réaction :

- Le De Havilland « Comet » est mis en service en 1952 et révolutionne le transport aérien en matière de vitesse et de confort. Il connut 2 accidents tragiques qui permirent de comprendre le phénomène de fatigue de la structure.
- Le Tupolev 104 (en 1956), le Boeing 707 (en 1958), la Caravelle (en 1959) et le DC8 (en 1959) entrent ensuite en service. Le 707 et le DC8 sont transatlantiques (environ 8 heures, sans escale).



BOEING 707



CARAVELLE

BIA

HISTOIRE DE L'AIR
ET
DE L'ESPACE - III

- Les avions de 1960 à nos jours
- Hydravions, planeurs, hélicoptères, parachutes
- L'Espace
- Le secteur aéronautique aujourd'hui

Y. GHERARDI
Edition 2.1
Novembre 2016

L'évolution de l'aviation commerciale depuis 1960 (1)

Un avion d'aujourd'hui diffère peu des premiers avions de ligne à réaction des années 50 en matière de **confort général à bord** ou de **vitesse**^{***}.

(^{***} à l'exception de « l'épisode » Concorde)

Ce qui a énormément changé au cours de ces 50 dernières années c'est :

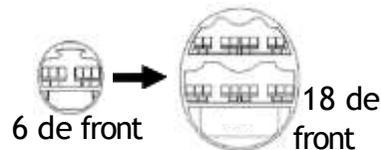
- le prix de revient du passager x kilomètre, grâce à :

- l'augmentation de la **capacité** des avions.

Boeing 707 : jusqu'à 178 passagers



Airbus A380 : jusqu'à 853 passagers



- les énormes **progrès des moteurs**.



Augmentation du taux de dilution et de la température d'entrée turbine



Réduction de la consommation > 30%



- les **progrès aérodynamiques** et l'**allègement des structures**.

- la distance franchissable sans escale (*Boeing 777-200LR > 17000 km*).

L'évolution de l'aviation commerciale depuis 1960 (2)

- la sécurité, grâce à :
 - l'amélioration de l'**interface homme / machine**.



BOEING 707



BOEING 787



- l'exploitation du **retour d'expérience** sur les incidents et accidents.
- l'impact sur l'environnement (bruit externe, émissions polluantes, émissions de CO₂).

Durant cette cinquantaine d'années, le développement du transport aérien a été spectaculaire : plus de **3 milliards de passagers** en 2014 dans le monde.

L'évolution de l'aviation commerciale depuis 1960 (3)

Quelques étapes clé :

- 1969 : 1^{er} vol du **Boeing 747** : 1^{er} avion civil **gros porteur**.



- 1969 : Premier vol du **Concorde** : Avion **supersonique** (Mach 2,02). Succès technique, mais échec commercial. Il sera exploité pendant 27 ans



- 1972 : 1^{er} vol de l'**Airbus A300** : 1^{er} Airbus, 1^{er} **biréacteur gros porteur**.
- 1987 : 1^{er} vol de l'**Airbus A320** : 1^{er} avion civil **à commandes de vol numériques**.
- 2005 : 1^{er} vol de l'**Airbus A380** : Gros porteur **à 2 niveaux intégraux**.
- 2009 : 1^{er} vol du **Boeing 787** : 1^{er} avion civil à **fuselage et voilure en matériaux composites**.



L'évolution des avions militaires depuis 1960 (1)

Après la conquête du domaine supersonique au cours des années 50, l'évolution des avions de combat a ensuite porté principalement sur :

- l'intégration des **progrès technologiques** disponibles.
(sur les moteurs, la cellule, les commandes de vol,...)
- l'évolution des systèmes de navigation et d'armement et de leur gestion par le pilote.
- les communications.



Parmi les innovations les plus marquantes, on peut citer :

- La **géométrie variable**
(changement de la flèche de la voilure en fonction de la vitesse de l'avion.
(Ex : Mirage G8, F14, Tornado).



- La conquête du **haut supersonique**
(exemple : SR71 Mach 3,5 structure à base de titane).



L'évolution des avions militaires depuis 1960 (2)

- Le **décollage vertical** (exemple : Hawker Siddeley Harrier).



- La **furtivité** (exemple : Lockheed Martin F117 - écho radar et signature infrarouge les plus faibles possibles).



- Les **convertibles** (exemple : Boeing-Bell Osprey V-22).



- Les **drones** d'observation et d'attaque



Le développement de l'aviation d'affaires

Pourquoi l'aviation d'affaires ?

- aller **directement** d'un petit aéroport à n'importe quel autre aéroport,
- en **simplifiant les formalités** de sécurité et d'embarquement,
- **sans** respecter un **horaire imposé**,
- avec un **confort** et une **vitesse** au moins égaux à ceux des meilleurs vols réguliers,
- tout en gardant la possibilité de **travailler** à bord et de rester **connecté**.

Apparue au début des années 60, l'**aviation d'affaires à réaction** a connu un essor considérable avec le **développement économique** de grands pays tels que les **Etats-Unis**, puis avec l'avènement de la **mondialisation**.

Les progrès les plus spectaculaires ont touché :

- La distance franchissable sans escale.



1963
Mystère 20
≈ 2000 km



2005
Falcon 7X
= 11000 km



- Le confort et les moyens de connexion



Les « exploits »

- Le **vol musculaire** :

En 1977, Bryan L. Allen remporta le prix Kremer (vol sur circuit en huit) avec le « Condor ».

En 1979, il traversa la Manche avec « l'Albatros ».



- Le **vol autour du monde sans escale** :

En 1986, Dick Rutan et Jeana Yeager bouclent le tour du monde sans escale en 9 jours de vol, à bord du « Voyager ».



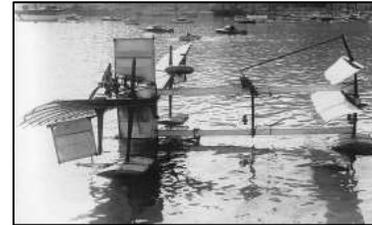
- Le **vol solaire** :

Le « Solar Impulse » de Bertrand Piccard, équipé de panneaux solaires et de batteries est conçu pour voler jour et nuit sans carburant. Il a réalisé un tour du monde en 17 étapes, entre le 9 mars 2015 et le 26 juillet 2016.



Hydravions

En **1910 Henri Fabre** fait voler le 1^{er} hydravion autonome à Martigues.



L'entre-deux-guerres voit le développement d'hydravions de transport de plus en plus gros :

- En France, **Latécoère** construit le Laté 300 (1932 - 11 tonnes à vide) utilisé pour les liaisons postales sur l'Atlantique sud.
- Le Laté 521 (1935 - 37 tonnes, 3200 km) et le Laté 631 (1942 - 75 tonnes, 6000 km) opèrent sur l'Atlantique nord au départ de Biscarrosse, avant et après la guerre.



En 1947, **Howard Hughes** construit le « Spruce Goose » (182 tonnes, 97 mètres d'envergure). Il ne fera qu'un vol ! (voir le film « Aviator » de Martin Scorsese – 2004)



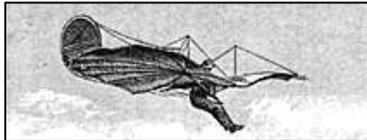
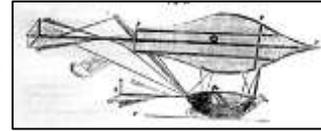
Aujourd'hui on ne construit, principalement, que de **petits hydravions**, bien adaptés à certaines régions maritimes ou lacustres.



Planeurs

Nous avons déjà évoqué :

- les travaux de l'Anglais **George Cayley** (en 1852)



- ceux de l'Allemand **Otto Lilienthal** (de 1891 à 1896)

- ainsi que ceux des **frères Wright** (USA) qui construisirent plusieurs planeurs de 1900 à 1902 avant de se lancer dans l'aventure de l'aviation.



Dans l'entre-deux-guerres, le **traité de Versailles** interdisant aux **Allemands** la construction de machines volantes motorisées, ils développent des planeurs performants et mettent au point l'**exploitation des ascendances**.

Pendant la 2nde guerre mondiale des **planeurs de combat** participent aux opérations (**débarquement en Normandie**).

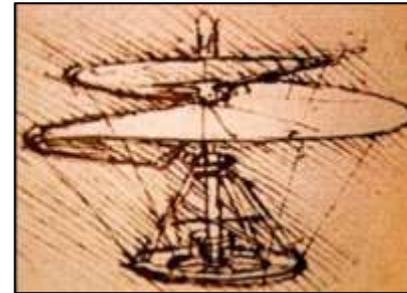


Aujourd'hui le **vol à voile** est un sport répandu dans de nombreux pays. Les planeurs de **compétition**, faisant appel aux meilleurs **matériaux composites**, atteignent des performances remarquables.



Hélicoptères (1)

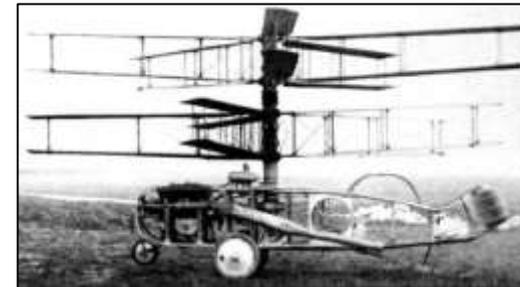
•En 1484, **Léonard de Vinci** dessine un projet de « **vis aérienne** ». On peut y voir l'ancêtre de l'hélicoptère.



•En 1907, l'hélicoptère de **Paul Cornu** à 2 rotors contrarotatifs se soulève de 1,50 mètre !



•En 1924, **Raoul Pescara** invente le **manche à balai pour hélicoptère** et réalise un vol de plus d'1 km à bord du « 21F ». Ce vol comporte des virages.



•En 1936, Le « Gyroplane » de **Louis Bréguet et René Dorand** vole à **120km/h** et à 158m de haut.



Hélicoptères (2)

- En 1939, **Igor Sikorsky** teste le VS-300. Ne comportant qu'un seul rotor principal, cet hélicoptère est équipé d'un **rotor de queue** (Solution utilisée couramment aujourd'hui).



- Après la 2nde guerre mondiale, l'hélicoptère est largement utilisé dans les **conflits de Corée, d'Algérie et du Vietnam**.

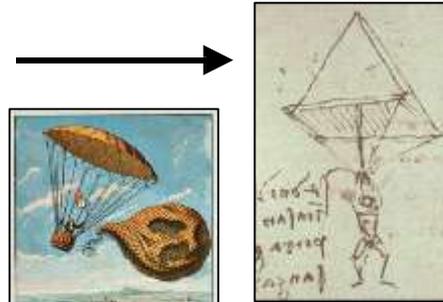


- En 1955, l'**Alouette II** est le premier hélicoptère mu par un **turbomoteur (Turboméca)**, plus léger et plus puissant qu'un moteur à pistons. C'est un progrès décisif.



Parachutes

• On doit à **Léonard de Vinci** ce dessin de parachute

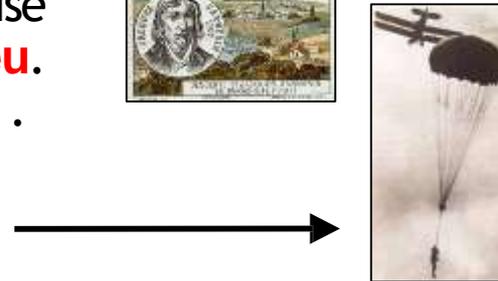


• En **1797**, **Jacques Garnerin** effectue un premier saut en parachute depuis un ballon à 680m au-dessus de Paris.



• Au cours du 19^{ème} siècle, le parachute est utilisé plusieurs fois pour **échapper à un ballon en feu**. A partir de 1885, le **harnais** remplace la nacelle.

• En 1913 Adolphe Pégoud exécute le premier saut en parachute depuis un avion.



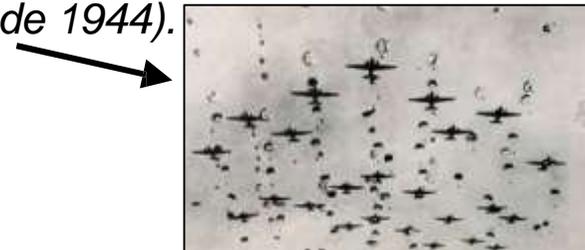
• Au cours de la 1^{ère} guerre mondiale, le parachute est utilisé pour la **sauvegarde** des occupants des **ballons d'observation**, puis des **avions**. En 1918, des **parachutages** de vivres et de munitions sont organisés.

• La 2^{nde} guerre mondiale voit l'utilisation massive du parachute pour :

- des **largages** d'armes et de munitions (*au profit des résistants*).

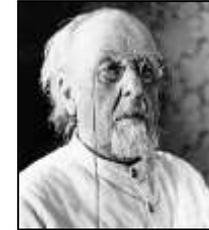
- des **opérations aéroportées** (*débarquement de 1944*).

• Après la 2^{nde} guerre mondiale, le **parachutisme sportif** prend son essor et opte pour le parachute à **voile rectangulaire** à partir de 1980.

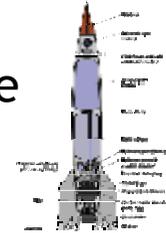


L'Espace (1)

- C'est en 1903 que le Russe **Constantin Tsiolkovski** élabore les premières théories mathématiques du vol spatial.



- En 1942, L'Allemand Von Braun lance la première fusée balistique stratosphérique : le « V2 ».



- Après la 2^{de} guerre mondiale, la « guerre froide » va voir les Etats-Unis et l'Union Soviétique s'affronter dans la conquête spatiale :

- En **1957**, l'Union Soviétique lance le 1^{er} satellite artificiel « **Sputnik 1** » (84kg),

- Suivi en **1958** par le satellite américain « **Explorer 1** ».

- En **1961** **Youri Gagarine** (URSS) effectue le 1^{er} vol orbital humain, à bord d'un vaisseau « Vostok ».



- Suivi en **1962** par l'Américain **John Glenn** →



- **Valentina Terechkova** est la 1^{ère} femme dans l'Espace en 1963. →



L'Espace (2)

- En **1969** les Etats-Unis réussissent à transporter deux hommes sur la lune, **Neil Armstrong** et **Buzz Aldrin**, au cours de la mission **Apollo 11**.



- Entre temps, la France avait réussi à entrer dans le club des nations spatiales en lançant en 1965 son 1^{er} satellite « **Asterix** » grâce à la fusée « **Diamant** ».

- L'exploration du système solaire se poursuit par des **vols non habités**.

On peut citer le 1^{er} **survol de la planète Saturne** en 1979 par la sonde « **Pioneer 11** » lancée 6 ans plus tôt.

- 1979 voit le 1^{er} tir d'une fusée européenne « **Ariane 1** »



L'Espace (3)

- En **1981** la navette spatiale « Columbia » réalise son premier vol dans l'Espace.



- En **1982 Jean-Loup Chrétien** effectue un vol à bord d'un vaisseau spatial soviétique « Soyuz » et devient le premier spationaute français.



- De **1986 à 2001** la **station spatiale russe « MIR »**, (124 tonnes), construite par assemblage de plusieurs modules et placée en orbite basse, accueille de nombreux équipages qui se relaient pour mener diverses **expériences scientifiques**. Elle marque le début de la **coopération spatiale internationale**.



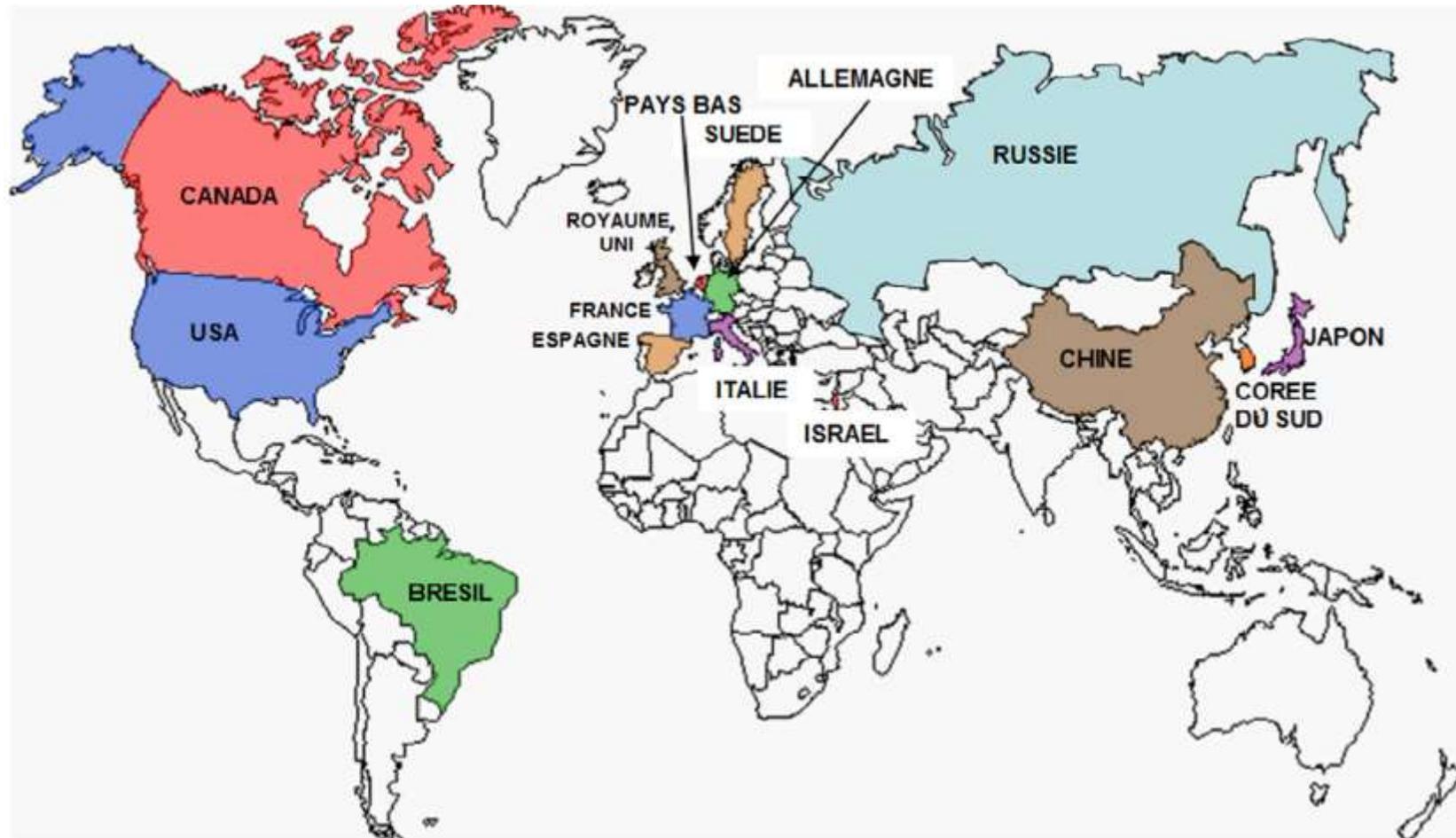
- La **station spatiale internationale** (400 tonnes, 110m x 74m x 30m), construite de **1998 à 2013**, est en activité jusqu'en 2020 ou 2028. Elle est occupée en permanence par 6 personnes.



Le secteur aéronautique aujourd'hui (1)

L'industrie aéronautique et spatiale :

Dans le monde, un nombre réduit de pays possèdent une industrie aéronautique et spatiale de poids :



Le secteur aéronautique aujourd'hui (2)

En France, l'industrie aéronautique et spatiale...

- réalise un chiffre d'affaires annuel consolidé de **39 milliards d'€** (dont 83% à l'export).
- emploie environ **350000 personnes**, dont
 - 25% d'ouvriers,
 - 33% d'employés, techniciens,...
 - 42% de cadres et ingénieurs.
- est en **expansion**



Source : Rapport 2014 – 2015 GIFAS

La France est le 2^{ème} exportateur aéronautique mondial.

Les débouchés de cette industrie sont à la fois **civils** et **militaires**.

Les acteurs principaux sont :

- les **constructeurs d'aéronefs**,
- les **motoristes**,
- les **fabricants de cellules** ou d'éléments de cellule,
- les **fournisseurs d'équipements**.

Cette industrie offre une **très grande diversité de métiers**.

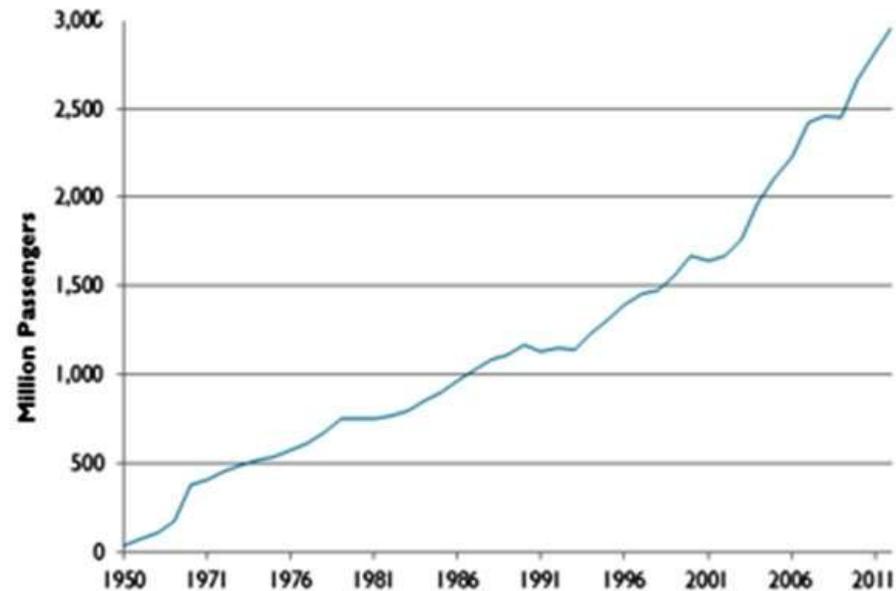
Le secteur aéronautique aujourd'hui (3)

Le transport aérien :

Depuis 70 ans, le **trafic aérien** mondial **double tous les 15 ans**.

Actuellement, la **croissance** du trafic aérien est beaucoup plus forte dans le **sud-est asiatique** qu'en Europe ou en Amérique du nord.

Le transport aérien comprend le transport de **passagers** et le transport de **fret**.



Il est assuré par les compagnies aériennes. Elles offrent un **transport régulier** ou un **transport à la demande (charter)**.

Les compagnies sont souvent regroupées dans des **alliances** (Star Alliance, Sky Team, Oneworld...) qui leur permettent de coopérer et d'améliorer leur efficacité. Elles opèrent généralement à partir d'une base centrale (appelée "**hub**"), depuis laquelle leurs lignes rayonnent.

En France le transport aérien emploie directement près de **100000** personnes et offre un **large éventail de métiers** (sol et navigants).

Le secteur aéronautique aujourd'hui (4)

L'aviation sportive et de loisir :

En France, l'aviation sportive et de loisir est très développée grâce :

- à environ **600 aérodromes** répartis sur le territoire,
- au **poids historique** de cette activité dans le pays,
- à l'existence de **structures efficaces** (aéro-clubs,...) souvent basées sur le bénévolat.

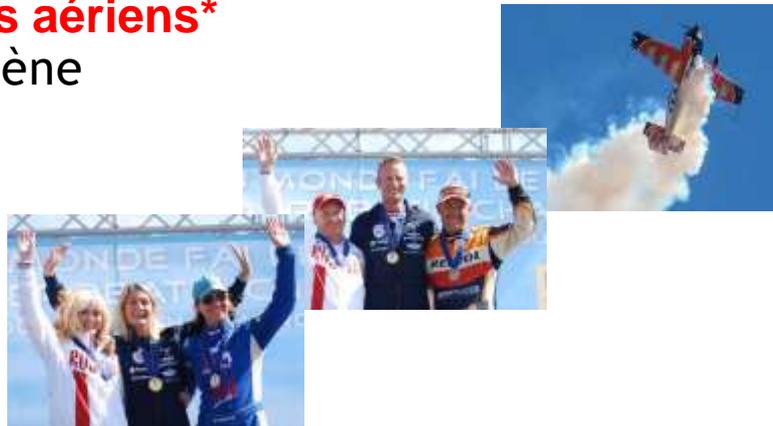
Pour certains, elle constitue une étape vers un **projet professionnel**.

La France est le **2^{ème} pays au monde** en nombre de pilotes privés.

Elle compte plus de la moitié des pilotes privés européens.

Les équipes françaises de **sports aériens*** s'illustrent fréquemment sur la scène internationale.

(* Voltige, pilotage de précision, rallye aérien, vol à voile, vol libre, parachutisme,...).



Le secteur aéronautique aujourd'hui (5)

Les organisations : Elles ont vu le jour pour **définir des règles** et/ou pour **faciliter la collaboration** des acteurs d'un même secteur :

En France :

- la **DGAC** (*Direction Générale de l'Aviation Civile*) : Au nom du gouvernement français, elle assure la **sécurité** et la **sûreté** du transport aérien, rend les services de la **circulation aérienne**, **forme** certains **personnels** de l'aviation civile et participe à la **création du ciel unique européen**.
- le **CNFAS** (*Conseil National de Fédérations Aéronautiques et Sportives*) regroupe l'ensemble des **fédérations** représentatives des clubs (*aéromodélisme, avion, ULM, aérostation, giraviation, parachutisme, planeur, vol libre, vol à voile, constructeurs et collectionneurs,...*).
- Les organisations professionnelles, telles que le **GIFAS** (*Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales*) qui regroupe les **acteurs de l'industrie aérospatiale** (366 sociétés).

En Europe :

- l'**EASA** : Depuis 2003, elle reprend, pour l'**Union Européenne**, une partie des missions précédemment confiées, en France, à la DGAC.

Dans le monde :

- l'**OACI** (*Organisation de l'Aviation Civile Internationale*) : Créée en 1944, elle dépend des **Nations Unies** et élabore des **normes** permettant de standardiser le **transport aérien international** (*partage des fréquences radio, qualification du personnel navigant, circulation aérienne, etc...*)

BIA

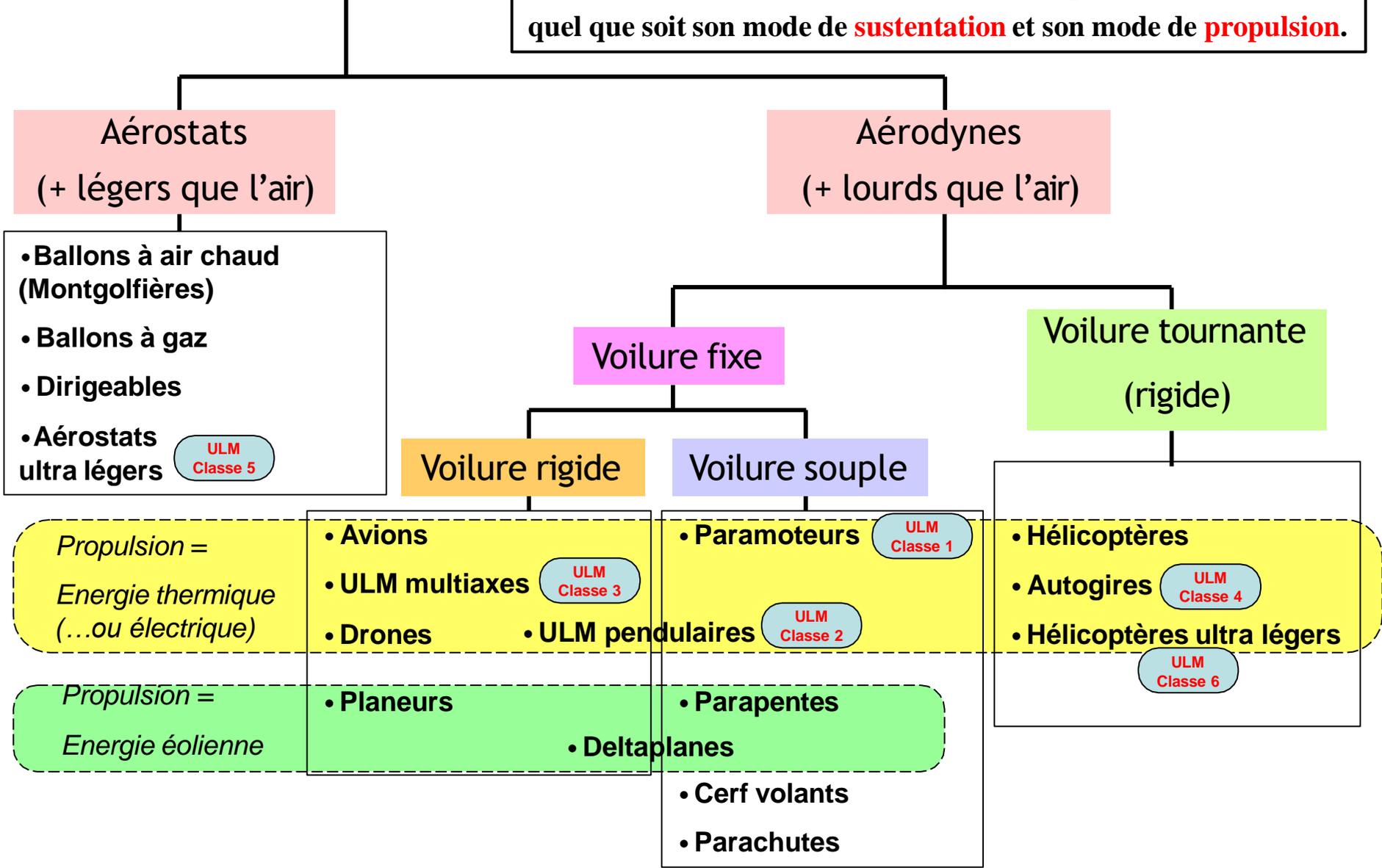
LES AERONEFS

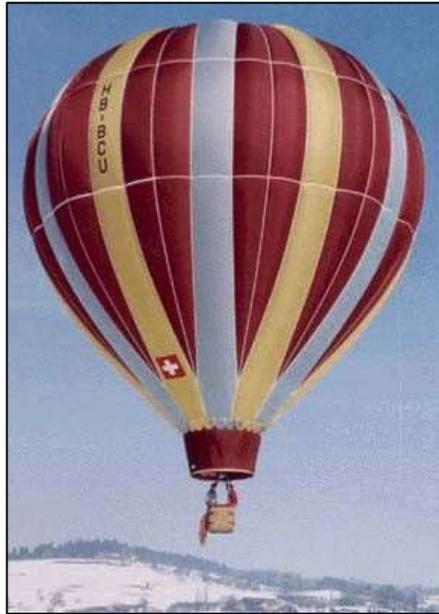
&

LES ENGINES SPATIAUX

LES AERONEFS

Appareil ou machine capable de **s'élever dans l'atmosphère**, de **s'y maintenir**, de **s'y déplacer** et/ou d'effectuer une **descente contrôlée** jusqu'au sol, quel que soit son mode de **sustentation** et son mode de **propulsion**.





Aérostats
(+ légers que l'air)

- Ballons à air chaud (Montgolfières)
- Ballons à gaz
- Dirigeables
- Aérostats ultra légers ULM Classe 5

- Propulsion =*
Energie thermique (...ou électrique)
- Avions
 - ULM multiaxes ULM Classe 3
 - Drones
- Propulsion =*
Energie éolienne
- Planeurs

Voilure rigide

Voilure souple

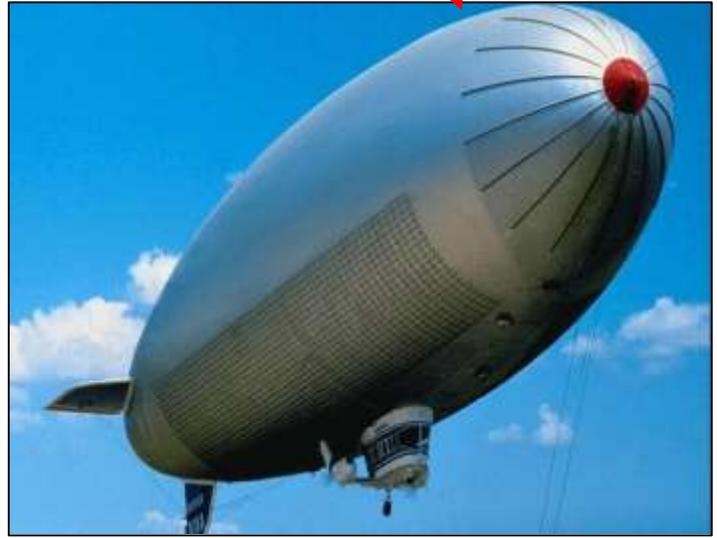
Aérodynes
(+ lourds que l'air)

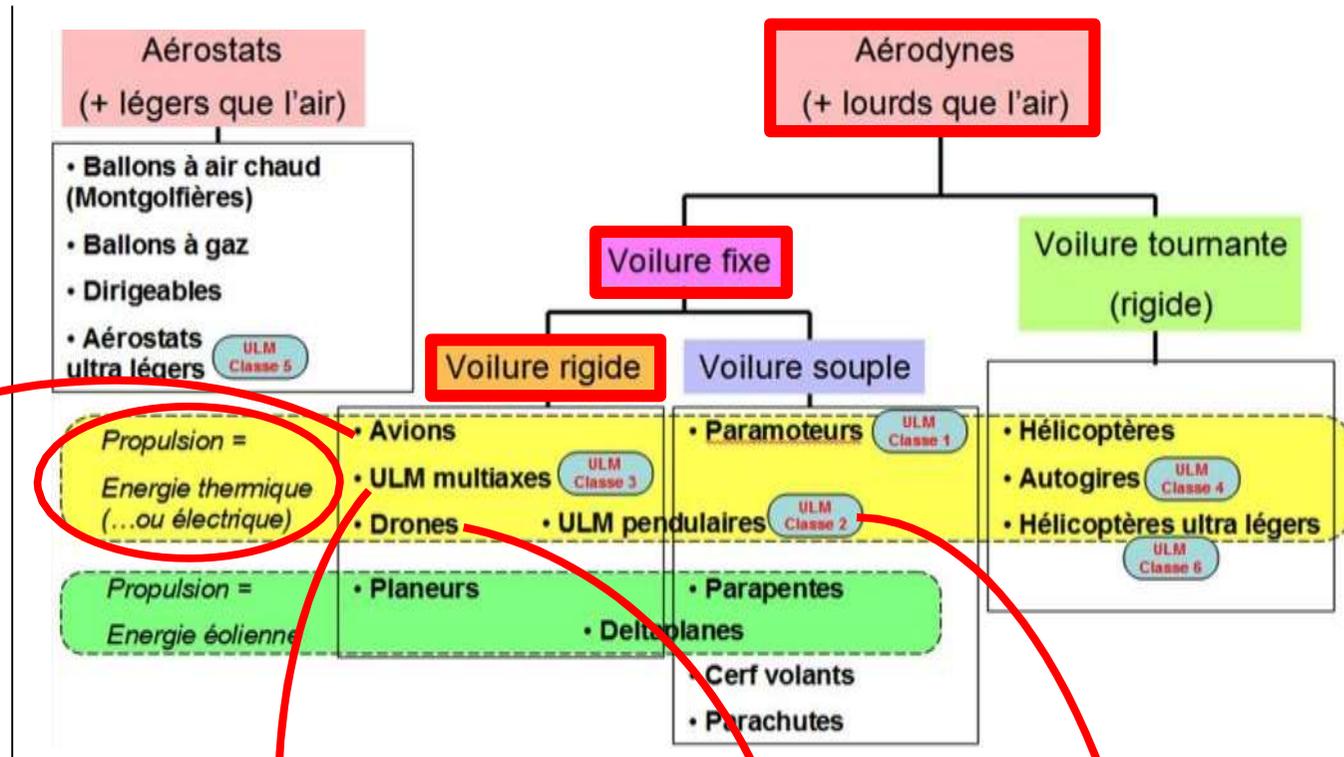
Voilure fixe

Voilure tournante (rigide)

- Paramoteurs ULM Classe 1
- ULM pendulaires ULM Classe 2
- Parapentes
- Deltaplans
- Cerf volants
- Parachutes

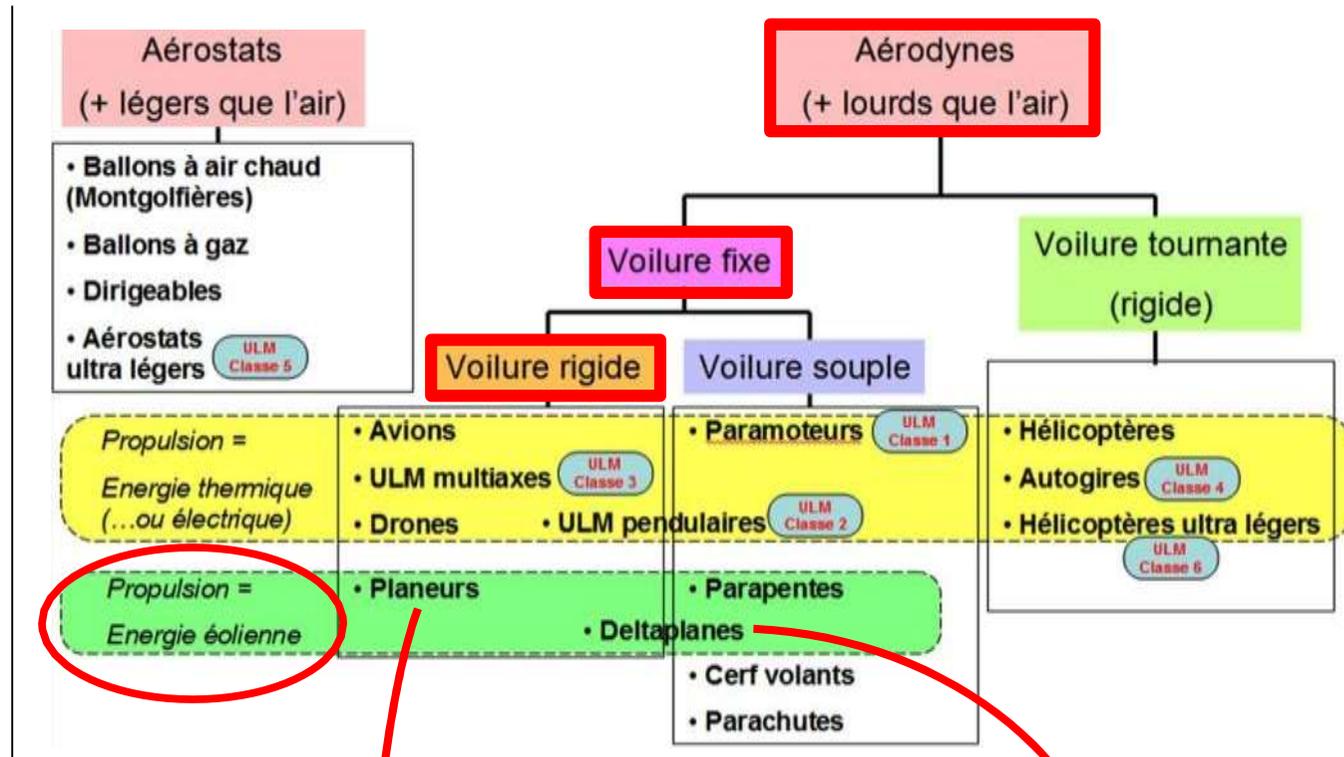
- Hélicoptères
- Autogires ULM Classe 4
- Hélicoptères ultra légers ULM Classe 6

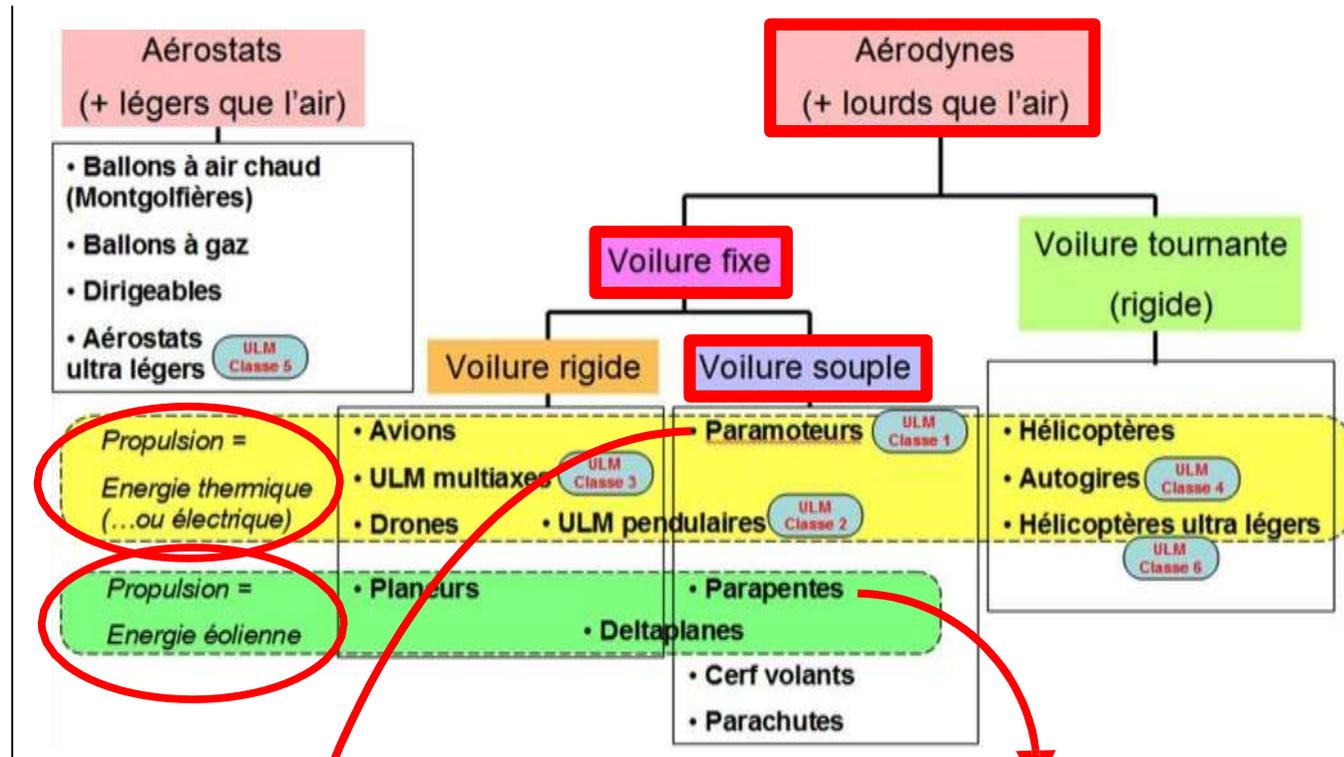


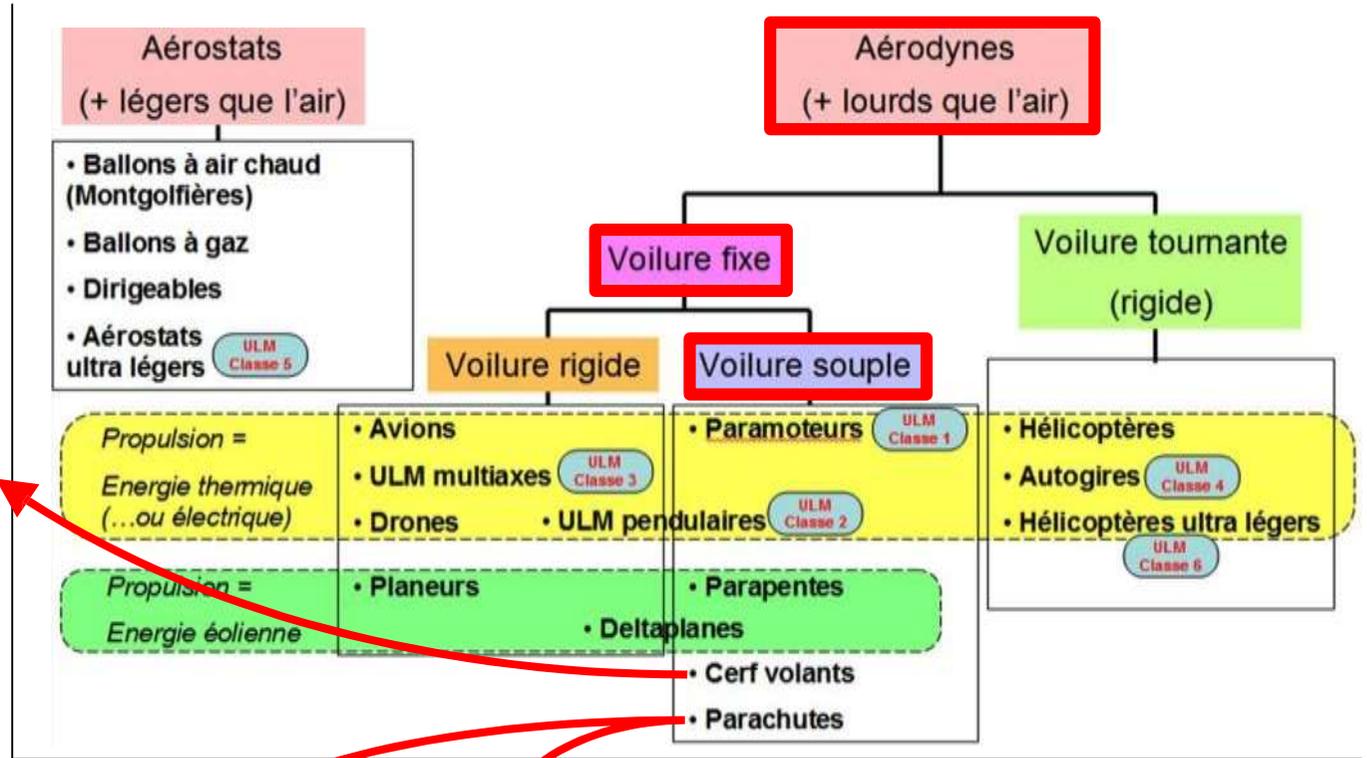


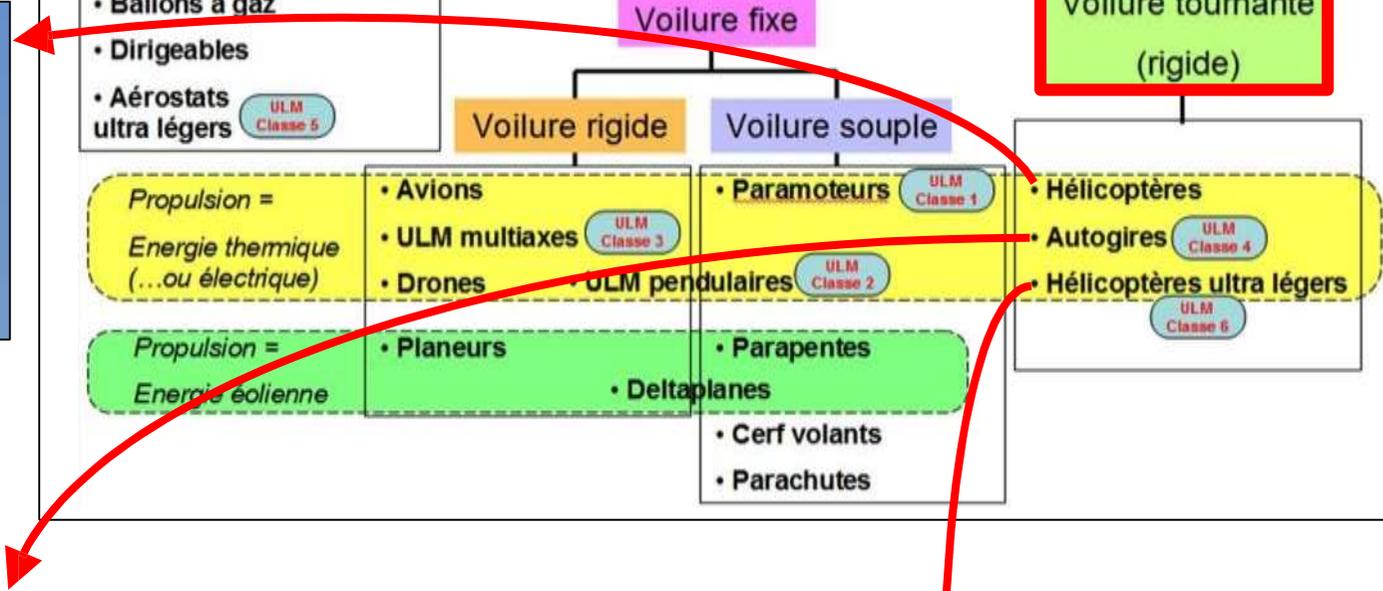
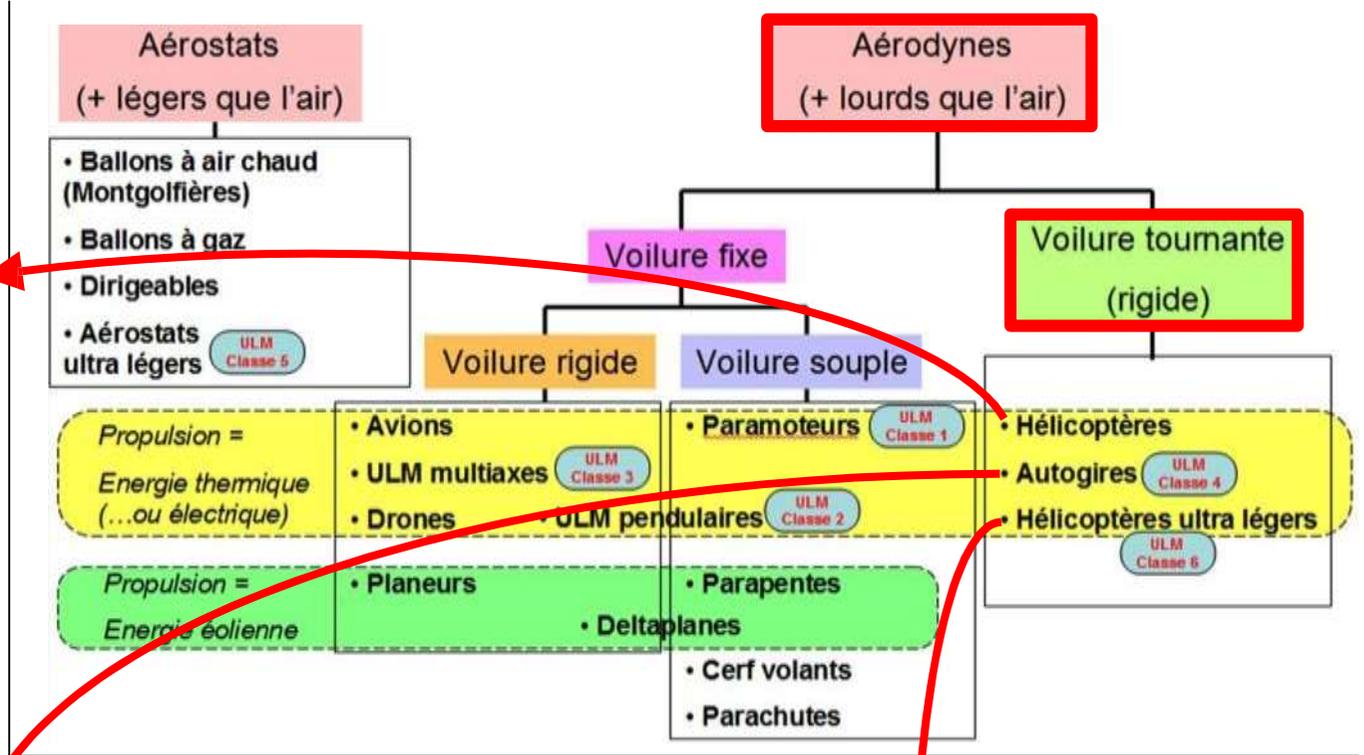
ULM multiaxe, tout à fait comparables à un avion. Certains ont une structure métallique ou composite. Leurs performances avoisinent celles d'un avion.











Les avions (1)

Selon le nombre de voilures, on dira d'un avion qu'il est:

- **Triplan**



- **Biplan**



- **Monoplan**



Les avions (2)

Un avion monoplan pourra être :

- à aile basse



- à aile médiane



- à aile haute



Les avions (3)

Selon le nombre de moteurs dont il est équipé, on dira d'un avion qu'il est :

- monomoteur



- bimoteur



- trimoteur



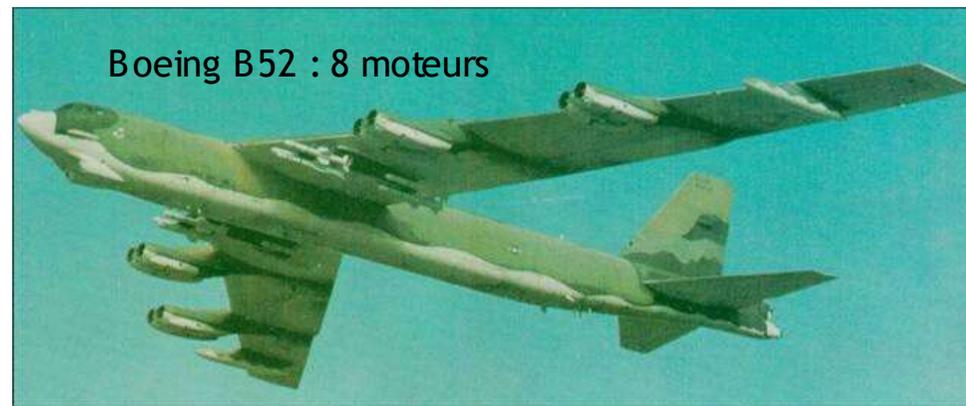
Les avions (4)

... ..

- quadrimoteur



- et plus...



Les avions (5)

Les **propulseurs** des avions peuvent utiliser une **hélice** (bipale, tripale, quadripale etc...) entraînée...

- par un **moteur à pistons** : l'ensemble moteur + hélice s'appelle alors « **groupe moto-propulseur** » (**GMP**).



ou

- par une **turbomachine** : l'ensemble turbomachine + hélice s'appelle alors « **groupe turbo-propulseur** » (**GTP**).



et très bientôt

- par un moteur **électrique**.



Pour ces trois types de propulseurs on parle de **traction** moteur.

Les avions (6)

Ces **propulseurs** peuvent aussi être **dépourvus d'hélice** (*propulsion par réaction directe*). Ce sont les « **turboréacteurs** » (**GTR**).



Dans de rares cas on utilise aussi :

- les « **statoréacteurs** » (**GSR**).



- les « **pulsoréacteurs** » (**GPR**).



Pour ces trois types de propulseurs on parle de **poussée** moteur.

Les avions (7)

Certains avions peuvent décoller ou atterrir...

- **Sur l'eau** : l'**hydravion** fréquente des **hydrobases**. Il peut être...

- caréné en forme de coque de bateau

ou

- être équipé de flotteurs.



Les avions (8)

Certains avions peuvent décoller ou atterrir...

- **Sur la neige** : l'avion est équipé de **skis** et peut se poser en hiver sur des **altisurfaces**, des glaciers, ... Sa base est un **altiport**.



Les avions (9)

Certains avions peuvent décoller ou atterrir...

- **Sur l'herbe ou le bitume** : l'avion est équipé d'un **train d'atterrissage** et opère à partir d'**aérodromes** et/ou d'**aéroports**.



Train rentrant - A380

Train fixe - DR 400



Les avions (10)

On distingue :

- **Les avions à train d'atterrissage classique*** :

l'avion est équipé :

- d'un **atterrisseur principal** habituellement situé sous les ailes.
- d'une **roulette de queue** orientable.

(car les premiers avions étaient équipés ainsi)*



- **Les avions à train d'atterrissage tricycle** :

l'avion est équipé :

- d'un **atterrisseur principal** habituellement situé sous les ailes.
- d'une **roulette de nez** orientable.



Les avions (11)

Certains avions peuvent décoller et atterrir :

- **à la verticale :**

- on dit qu'ils sont **VTOL** (Vertical Take Off and Landing) comme par exemple le Hawker Harrier britannique.



- **sur une distance très courte :**

- on dit qu'ils sont **STOL** (Short Take Off and Landing) comme par exemple le Pilatus Porter.



Les avions (12)

Un avion est certifié dans une ou plusieurs **catégories d'utilisation**, ce qui détermine l'**usage** que l'on peut en faire ainsi que les **limites à ne pas dépasser**, qui varient d'une catégorie à l'autre.

Les quatre catégories existantes sont :

- la catégorie **N** (pour Normale) :
Ecole, voyage.
- la catégorie **U** (pour Utilitaire):
Remorquage de planeurs ou de banderoles, épandage, lutte contre l'incendie...
- la catégorie **A** (pour Acrobatique) :
Voltige aérienne.
- la catégorie **T** (pour Transport):
Usage commercial avec passagers.



LES ENGINES SPATIAUX (1)

Les satellites artificiels :

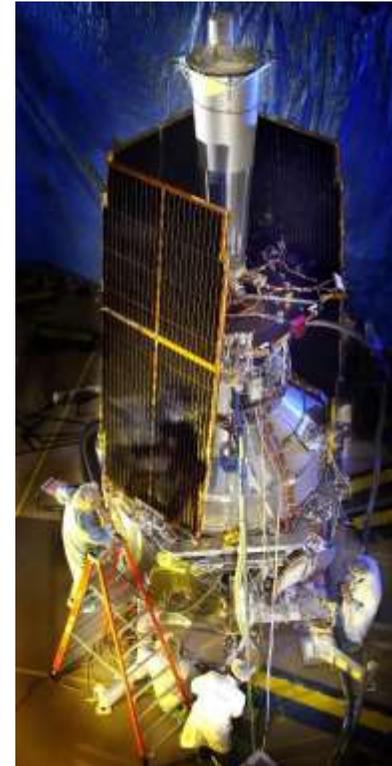
Ce sont des objets **fabriqués par l'Homme** et envoyés dans l'espace pour **graviter** autour de la terre ou d'un astre (autre planète, satellite naturel tel que la lune,...).

En fonction de leur rôle, on peut distinguer :

1- Les satellites **scientifiques** :

- Pour l'étude de la terre (niveau des océans, étude des courants, déplacement des plaques tectoniques, etc...).
- Pour l'étude de la biosphère.
- Pour l'observation de l'espace.
- Pour les expériences scientifiques en apesanteur.

etc...

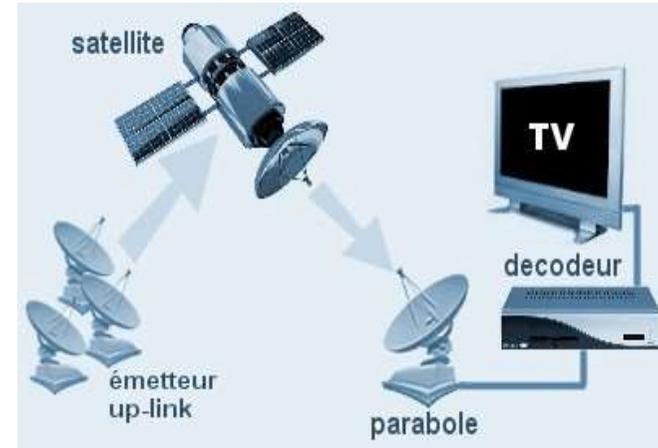


« Gravity Probe B » . Sous licence Domaine public via Wikimedia Commons
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gravity_Probe_B.jpg#/media/File:Gravity_Probe_B.jpg

Les engins spatiaux (2)

2- Les satellites de **télécommunication** :

- Pour transmettre des informations (téléphone, télévision, données,...) d'un point de la terre à un autre.
- Ils sont souvent placés sur une orbite géostationnaire. Leurs antennes peuvent ainsi rester orientées dans une direction fixe.



3- Les satellites d'**observation** :

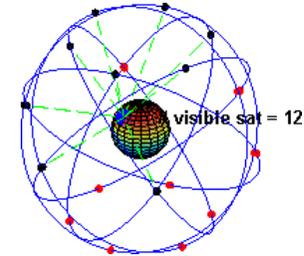
- Pour assurer en permanence des observations météo à l'échelle de la planète.
- Pour la cartographie et la modélisation du terrain en 3D.
- Pour l'agriculture (type et état des cultures)
- Pour l'étude de l'environnement et la climatologie.
- etc...



Les engins spatiaux (3)

4- Les satellites de **localisation** et de **navigation** :

Pour déterminer la position d'un objet à la surface de la terre, dans les airs ou dans l'espace.



Exemple : Le système GPS

- Une trentaine de satellites gravitent à environ 20000km d'altitude et émettent des signaux à des instants précis.
- La position du satellite et l'instant précis du départ du signal sont codés dans le signal.
- Le récepteur GPS note l'instant où il reçoit chaque signal et peut ainsi calculer la distance qui le sépare de chaque satellite.
- Si le récepteur reçoit au moins 4 satellites, il est capable de déterminer sa position.

5- Les satellites **militaires** :

Satellites de télécommunication, d'écoute, de reconnaissance, d'alerte anti-missiles balistiques, d'observation météo, de navigation...

Remarque : Le système GPS est géré par l'armée des Etats-Unis.

Les engins spatiaux (4)

Les fusées spatiales :

Ce sont des véhicules capables de se **déplacer dans l'espace** et d'**y accéder** depuis le sol.

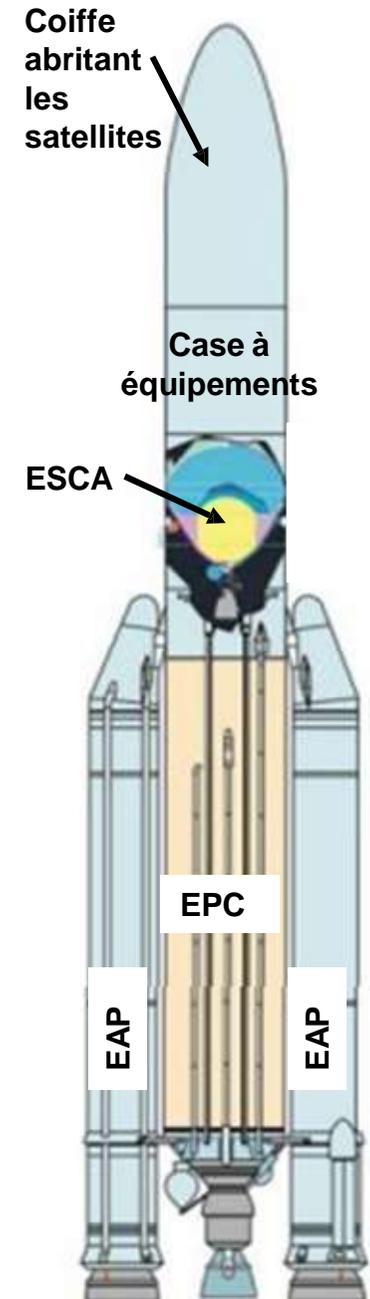
La mission de la fusée est de placer la charge utile au bon instant, au bon endroit et à la bonne vitesse pour qu'elle continue son mouvement sur la bonne orbite.

La fusée doit pouvoir fonctionner dans le vide. Elle doit donc emporter son **carburant** et son **comburant** qu'on nomme « **ergols** ».

L'efficacité de la fusée est liée au type d'ergol choisi et au rapport $\frac{\text{Masse d'ergol}}{\text{Masse totale du lanceur}}$

Pour cette raison, on construit la fusée en **plusieurs étages** qui fonctionnent successivement.

Quand un étage a fini de fonctionner on le **largue**, pour ne plus avoir à transporter son poids mort.



Les engins spatiaux (5)

Les sondes spatiales :

Ce sont des véhicules spatiaux **inhabités** lancés dans le but d'**explorer** un élément du **système solaire**.

Elles quittent l'orbite terrestre et emportent des instruments scientifiques permettant de collecter et transmettre de nombreuses **données**.

Elles peuvent être **placées en orbite** autour des corps célestes à étudier ou **y atterrir**.

Envoyés à **très grande distance** de la terre et du soleil, elles doivent résister à des **conditions très sévères** de température et de rayonnement et consommer **peu d'énergie**.

Elles doivent disposer d'une **grande autonomie** car les signaux radio en provenance du centre de contrôle terrestre peuvent mettre plusieurs dizaines de minutes à leur parvenir.



Les engins spatiaux (6)

Les capsules et navettes spatiales :

Ce sont des véhicules spatiaux **capables de retour sur terre**, permettant ainsi d'envoyer des **Hommes** dans l'espace.

Les **capsules spatiales** sont placées au sommet de la fusée qui est chargée de les mettre en orbite. Au retour, elles sont capables de supporter les très **fortes températures** dues à la rentrée dans les couches denses de l'atmosphère à très grande vitesse, mais ne sont **pas réutilisables**. Leur atterrissage (ou amerrissage) est assuré par des **parachutes**.

Les **navettes spatiales** sont des véhicules **réutilisables** placés en orbite par des propulseurs externes largables (et partiellement réutilisables) et par leurs propres propulseurs. Au retour, elles sont capables de supporter les très **fortes températures** dues à la rentrée et atterrissent comme des **planeurs**.

Capsule Apollo 11



Navette
Endeavour



Les engins spatiaux (7)

Les stations spatiales :

Ce sont des assemblages de **grande dimension** placés en orbite terrestre.

Elles sont conçues pour rester très longtemps en orbite, et permettent d'accueillir à leur bord **des équipages qui se relaient**.

De **1986 à 2001** la **station spatiale russe « MIR »**, (124 tonnes) , construite par assemblage de plusieurs modules et placée en orbite basse, a accueilli de nombreux équipages qui se relayaient pour mener diverses **expériences scientifiques**. Elle a marqué le début de la **coopération spatiale internationale**.



La **station spatiale internationale** (400 tonnes, 110m x 74m x 30m), construite de **1998 à 2013**, est en activité jusqu'en 2020 ou 2028. Elle est occupée en permanence par 6 personnes.





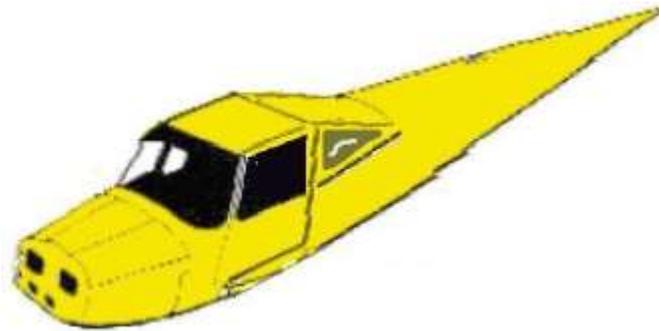
CONNAISSANCE
GÉNÉRALE
DES
AÉRONES

- Dans ce module, vous apprendrez :
 - à **reconnaître** et à **nommer** les éléments constitutifs de l'avion;
 - **découvrirez** l'intérieur de l'appareil et la composition de la planche de bord;
 - **apprendrez** comment les commandes de vol agissent sur les gouvernes pour permettre l'évolution dans les trois dimensions.

Ce support de cours a été réalisé à partir du document conçu et réalisé par Bernard GUYON, Cdb 777 à Air France et instructeur à l'Aéro-club du Béarn, et Stéphane MAYJONADE, instructeur BIA et CAEA.

LES ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DE L'AVION

- Un avion est composé d'un ensemble d'éléments dont certains sont **fixes** et d'autres **mobiles**:
 - les éléments **fixes** constituent la structure de l'appareil que l'on appelle également **cellule**; cette dernière comprend:
 - Le fuselage avec la **cabine** et le **compartiment moteur**.



Certains avions ont un fuselage composé de plusieurs parties séparées les unes des autres. On dit alors que leur fuselage est **bipoutre**.

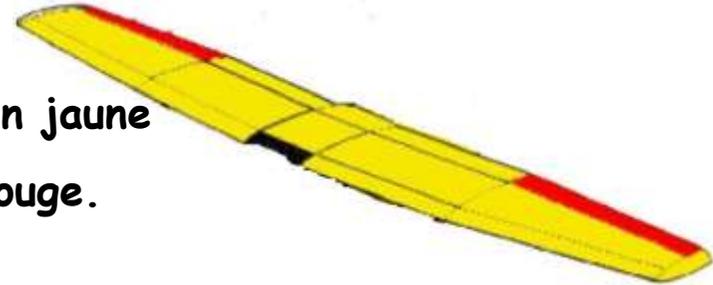
P38 Lightning



LES ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DE L'AVION

- La **voilure** composée de 2 demi-ailerons.

Les parties **fixes** sont en jaune
les parties **mobiles** en rouge.



Dans le cas d'avions à ailes hautes, la voilure est parfois reliée au fuselage par l'intermédiaire de **haubans** qui permettent ainsi de rigidifier la structure.

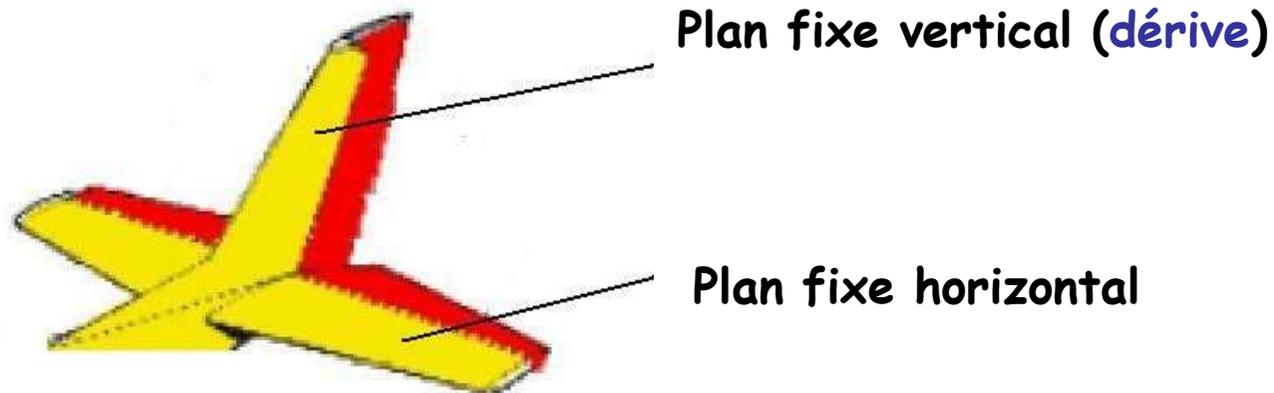


Si la voilure est placée à l'arrière de l'appareil et non à l'avant, on parlera de **formule canard**.



LES ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DE L'AVION

- L'empennage qui comprend 2 plans fixes: le plan fixe horizontal et le plan fixe vertical (en jaune):



- L'empennage est généralement cruciforme (avion de la figure) mais pourra également être en forme de T, de V ou de H (voir photos suivantes).

LES ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DE L'AVION

Un empennage en T



Un empennage en H



Un empennage en V, appelé également **empennage papillon**.



Certains avions ont un empennage horizontal qui n'a pas de partie fixe; toute la surface est mobile et on parle alors d'**empennage monobloc**.

Robin DR400



LES ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DE L'AVION

- Le train d'atterrissage peut être fixe ou escamotable.

Un train fixe tricycle est composé de :

- **jambes de train** incorporant la fonction amortisseur.
- **roues** incorporant un dispositif de freinage sur le train principal.

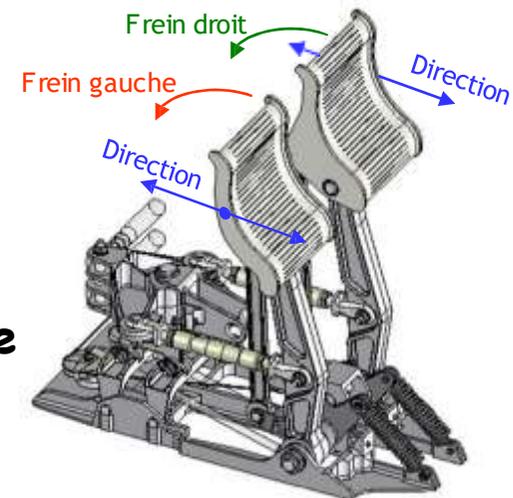
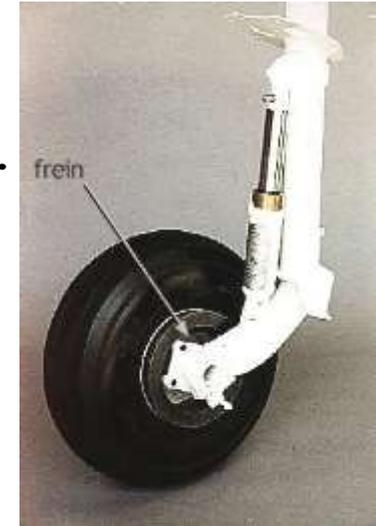
- **carénages** profilés permettant de diminuer la traînée qui ralentit l'avion.

Le freinage peut se faire :

- par l'intermédiaire d'une poignée (freinage symétrique)

ou

- à l'aide de pédales spécifiques ou intégrées aux palonniers dans leur partie haute, permettant une action dissymétrique appelée **freinage différentiel**.



LES ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DE L'AVION

- Le rôle du **train d'atterrissage** est de permettre le roulage au sol mais aussi d'encaisser les chocs au moment de la prise de contact avec la piste. Selon le poids de l'avion, il sera donc composé de plus ou moins de roues. Des roues jumelées par 2 forment ce qu'on appelle un **diabolo** et des roues jumelées par 4 ou plus forment ce qu'on appelle un **boggie**.

Un diabolo



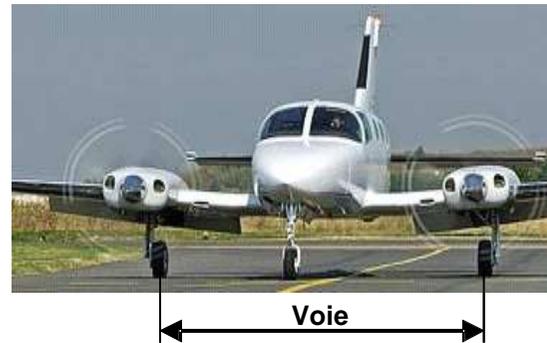
Un boggie

LES ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DE L'AVION

• La **distance** séparant le train principal de la roulette de nez ou de queue s'appelle l'**empattement**.

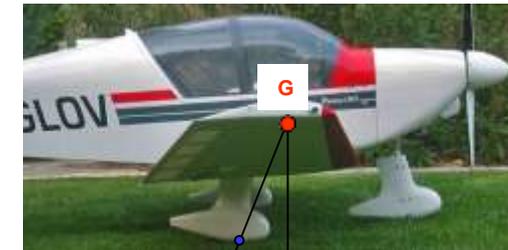


• La **distance** séparant les deux jambes du train principal s'appelle la **voie**.



Plus la voie est étroite et plus l'avion est difficile à contrôler au roulage.

• L'angle formé par la verticale et l'axe du train principal et dont le sommet est le centre de gravité de l'avion s'appelle angle de **garde**.



Il évite la mise en pylône pour un train classique ou le basculement sur la queue pour un train tricycle.



Angle de garde

Angle de garde

LES ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DE L'AVION

• Par rapport à un avion à **train fixe**, un avion à **train rentrant** comprendra en plus:

- des **vérins** pour permettre les manœuvres de montée-descente.

- des **verrous** et **contrefiches** pour assurer le verrouillage en position rentré ou sorti.

- des **parois** mobiles (trappes) permettant son escamotage.



LES ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DE L'AVION

Avantages comparés entre trains tricycle et classique:

Un train tricycle est **plus coûteux, plus lourd et plus encombrant** qu'un train classique.

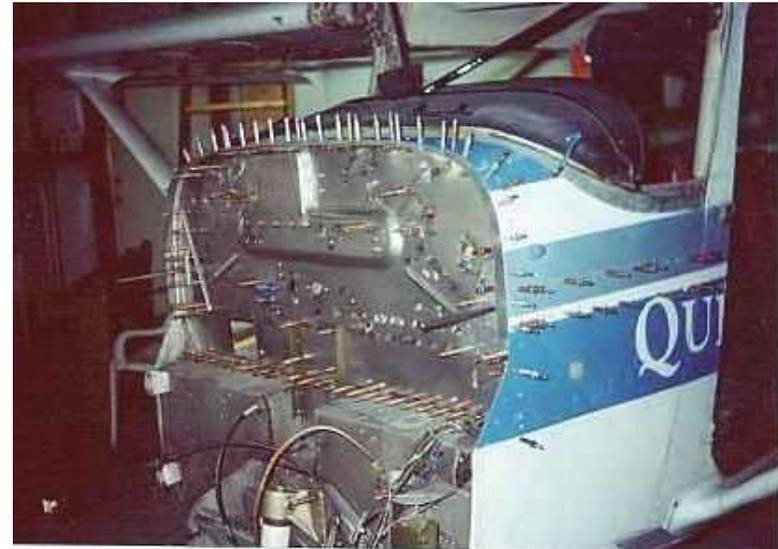
Par contre, le train tricycle présente les avantages suivants:

- meilleure **visibilité au roulage** (le train classique est souvent obligé de slalomer pour voir devant);
- meilleure **stabilité** (moins sensible au vent de travers);
- meilleure **tenue au freinage** avec quasi impossibilité de passage en pylône;
- plus faible influence du **couple de l'hélice** au décollage.

LES ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DE L'AVION

Le compartiment moteur abrite le **groupe motopropulseur** ou **GMP**. Ce dernier:

- est rendu solidaire de la cellule par l'intermédiaire d'un **bâti-moteur**.
- est séparé de la cabine par une **cloison pare-feu**.



LES ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DE L'AVION

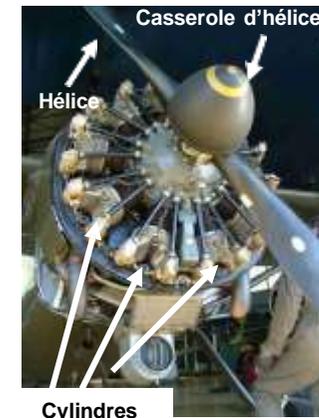
- le **GMP** est constitué d'une hélice, d'un **bloc-moteur** et d'accessoires (système d'allumage, de carburation, de démarrage...).
- le **bloc-moteur** est composé de **cylindres** disposés en **ligne**, en **V**, en **T** ou en **étoile**; l'hélice est entraînée directement ou par l'intermédiaire d'un réducteur.

• le **bloc-moteur** est refroidi généralement par l'**air** prélevé à l'extérieur. Il peut aussi être refroidi par un circuit d'**eau** avec radiateur.

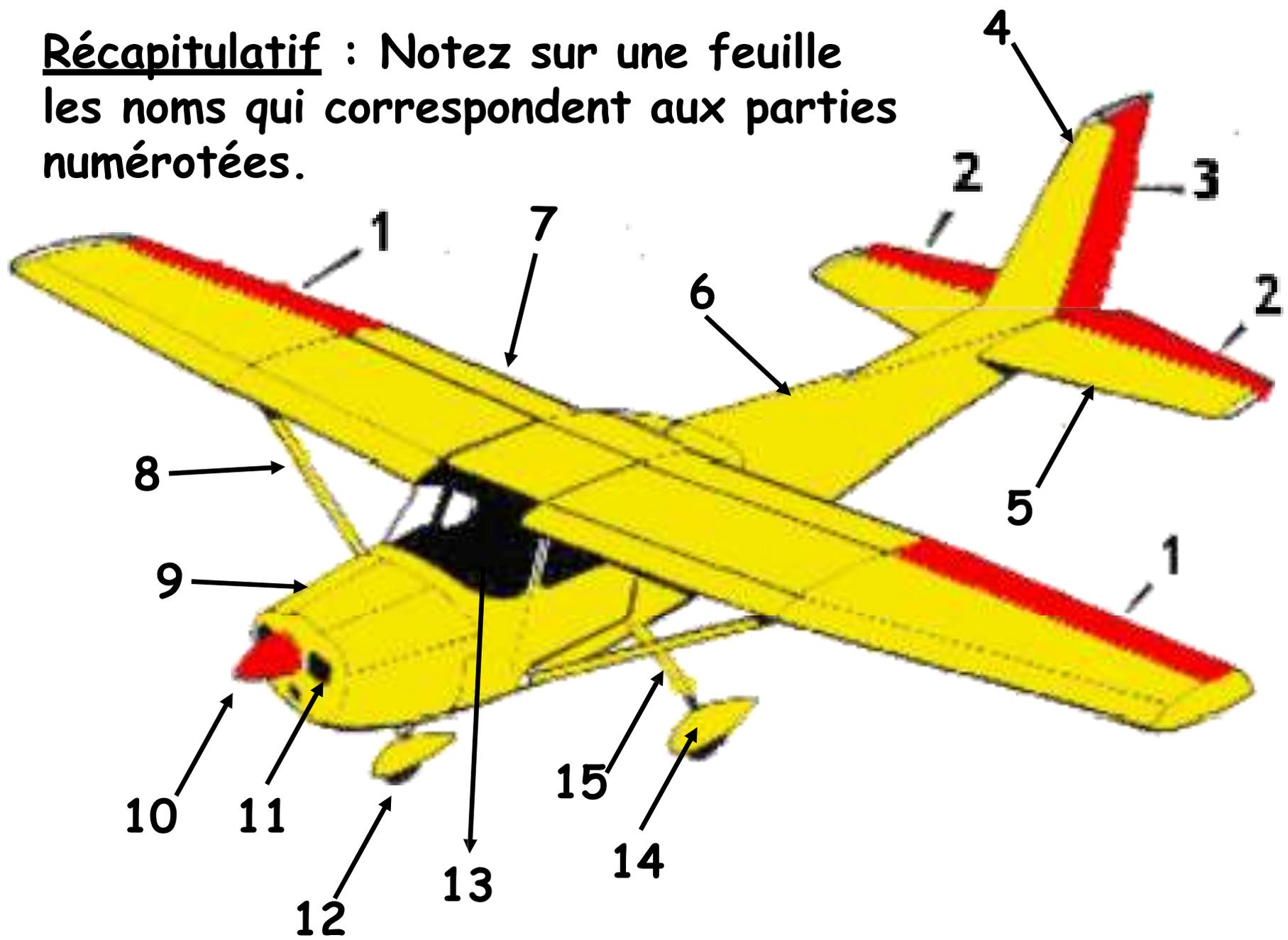
• le **GMP** est de type moteur à **essence** ou moteur **diesel** et utilise l'un des carburants suivants:

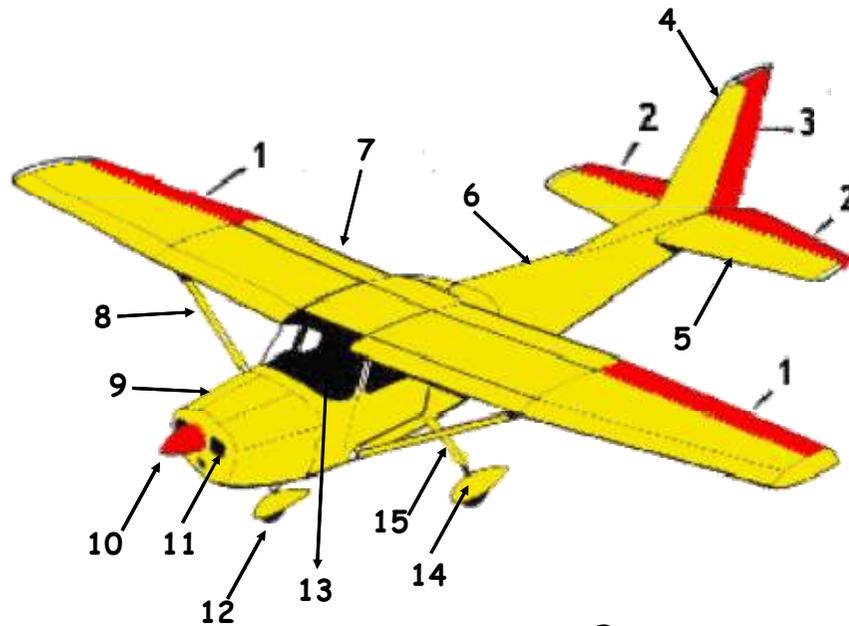
- de l'essence automobile SP 95;
- de l'**essence aviation 100 LL** (pour **Low Lead**) de couleur bleue;
- du **kérosène** appelé également **Jet A1**

• Pendant l'**avitaillement** (*remplissage réservoirs*), l'avion est mis au même potentiel électrique que celui de la pompe à l'aide d'un câble, pour éviter tout risque d'étincelle.



Récapitulatif : Notez sur une feuille les noms qui correspondent aux parties numérotées.





1 - ailerons

2 - gouverne de profondeur

3 - gouverne de direction

4 - dérive ou plan fixe vertical

5 - plan fixe horizontal

6 - fuselage

7- volets hypersustentateurs

8 - hauban

9 - capotage moteur

10- cône d'hélice ou casserole

11 - entrée d'air moteur

12 - roulette de nez

13- habitacle ou cabine

14 - carénage de roue

15 - jambe de train

LES ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DE L'AVION

Les équipements complémentaires

- Feux et phares (feu anticollision, feux de position, phares de roulage et d'atterrissage).



Phares d'atterrissage et de roulage



Feu anticollision



Feux de position

- Antennes permettant d'émettre et de recevoir les signaux radio pour les communications et la navigation.



Antenne VHF



Antenne GPS

- Sondes de pression, de température...



Sonde Pitot



Sonde d'incidence du Rafale

LES ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DE L'AVION

Les équipements complémentaires

- **Sabot ou patin de queue;**



Patin de queue
du Boeing 737

Perche de ravitaillement
en vol du Rafale



- **Perche de ravitaillement en vol (avions militaires).**

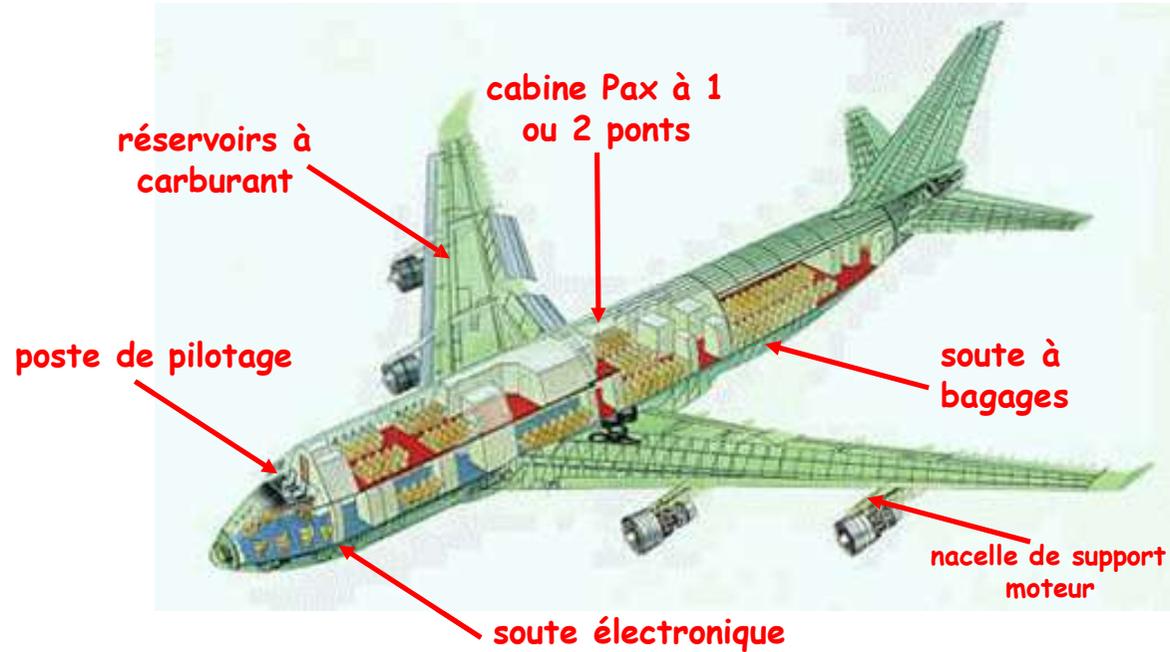
- **Emplacements spécifiques appelés **pods** pour emport de matériel supplémentaire (caméra, armement, matériel de détection...)**



L'INTÉRIEUR DE L'AVION

TERMINOLOGIE

Avion commercial :



Avion de tourisme : Toutes les zones sont contiguës, on parle d'**habitacle** et de **compartiment à bagages**;

Avion de chasse, on utilise principalement le mot **cockpit** pour désigner la zone où est(sont) assis le(les) pilote(s) et/ou le navigateur / gestionnaire du système d'armes;

LE POSTE DE PILOTAGE

Il regroupe:

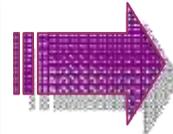
- les **commandes de vol**;
- les **instruments de pilotage**, de **navigation**, les **boîtiers radio**... réunis sur un **tableau de bord**;



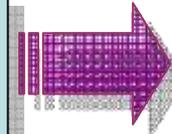
- les **commandes** du ou des **moteurs**;
- des **interrupteurs**, **manettes**, **voyants** ainsi que des **commandes** spécifiques;
- un tableau de **fusibles** et/ou de **disjoncteurs** pour protéger les circuits électriques de bord.

LES COMMANDES DE VOL

Déplacement
COMMANDE
DE VOL



Déplacement
GOUVERNE



Évolution sur
un axe principal
(effet primaire) +
sur un 2ème axe
(effet secondaire)

Chaque pilote dispose de :

- un **palonnier** actionné à l'aide des pieds.
- un **manche à balai**, un volant ou un minimanche actionné à la main.



Manche à balai



Volant du Concorde

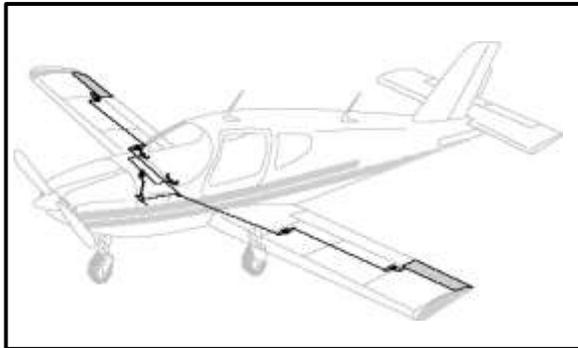


Minimanche Airbus

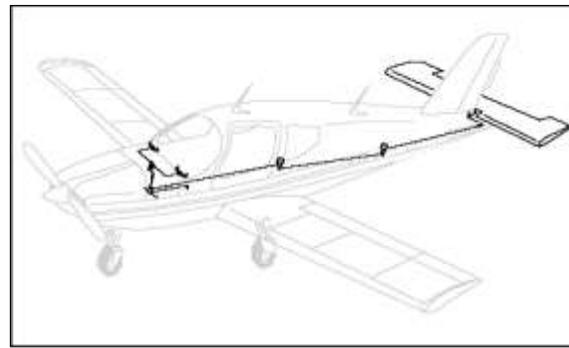
Un avion comportant des commandes de vol (et des commandes moteur) actionnables depuis les 2 sièges pilote est dit à « **double commande** ».

LES COMMANDES DE VOL

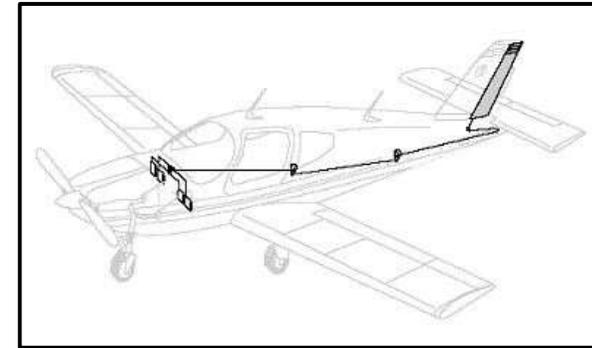
• Des **câbles**, par l'intermédiaire de guignols, de **poulies** et de **renvois**, agissent sur les gouvernes.



Gauchissement
(action sur les ailerons)



Profondeur
(action sur les gouvernes de profondeur)



Direction
(action sur la gouverne de direction)

• Sur les avions plus gros, afin de limiter les efforts à fournir pour déplacer les gouvernes, des **servocommandes hydrauliques** sont intercalées entre les câbles de commandes et les gouvernes.

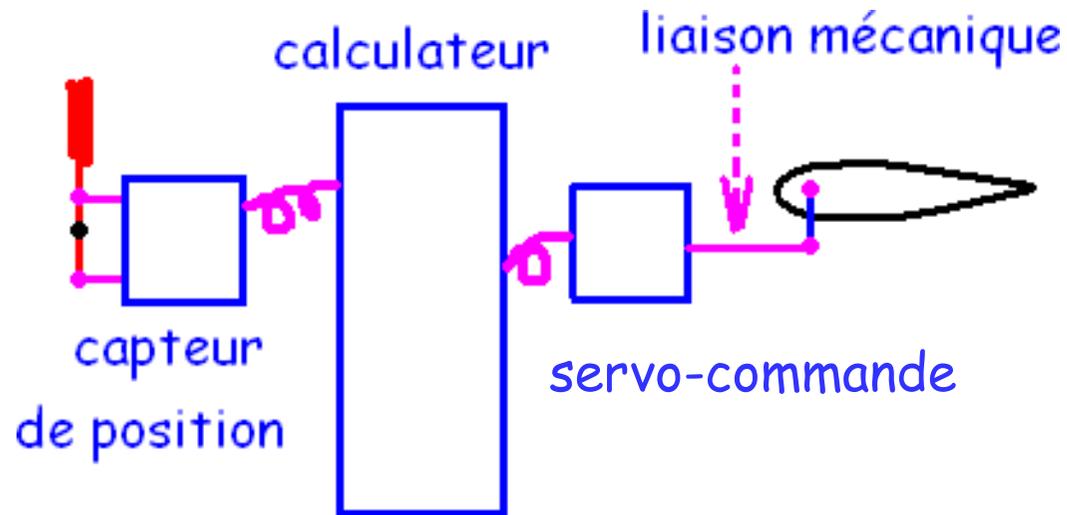
Une force de quelques Newtons exercée en entrée de la servocommande permet d'exercer en sortie plusieurs milliers de Newtons

Système de compensation musculaire

Un système de "compensation musculaire" réintroduit un effort à produire pour déplacer la gouverne, en fonction de la vitesse avion.

LES COMMANDES DE VOL

Sur certains avions modernes, les câbles de commandes sont remplacés par des **liaisons numériques** entre la position du manche demandée par le pilote et une servocommande qui positionne la gouverne en fonction de la demande. Pour des raisons de sécurité, on installe **plusieurs liaisons en parallèle**.



Le calculateur traite les informations en provenance de la position du manche, de la position initiale de la gouverne, de la vitesse avion, son incidence, etc...

Les logiciels installés sur les calculateurs peuvent assurer des fonctions de **protection** ou de **stabilisation** :

Indépendamment du pilote, ils peuvent envoyer des ordres aux gouvernes de façon à augmenter la stabilité de l'avion ou à limiter l'incidence, le facteur de charge, l'inclinaison latérale, la vitesse, etc...

Le tableau de bord

Notions d'ergonomie



Le tableau de bord

Notions d'ergonomie



La partie gauche du tableau central regroupe les **instruments de pilotage** et de navigation.

La partie droite du tableau central regroupe les **récepteurs radio**, **radionav**, **gps** ainsi que l'**horamètre**.

Le tableau de bord

Notions d'ergonomie



L'auvent supérieur pilote regroupe:

- des **témoins** indicateurs de fonctionnement,
- la commande de la **balise de détresse**,
- les **rhéostats d'éclairage** de la planche de bord,
- les interrupteurs de **feux et phares**.



La partie basse du tableau de bord regroupe les instruments et commandes relatives au **fonctionnement du moteur** et des circuits qui lui sont associés.

Le tableau de bord

Notions d'ergonomie

La console centrale située entre les deux sièges accueille les commandes d'équipements complémentaires comme le **frein de parc**, le levier de manœuvre des **volets** ou du **compensateur**, le **sélecteur de réservoir**...



Le tableau de bord

Instruments de pilotage



Le compas magnétique (permet le réglage du conservateur de cap)

L'horizon artificiel (attitude de l'avion)

L'altimètre

L'anémomètre (indicateur de vitesse)

L'afficheur VOR/_ILS (radionavigation)

T basique

L'indicateur de virage

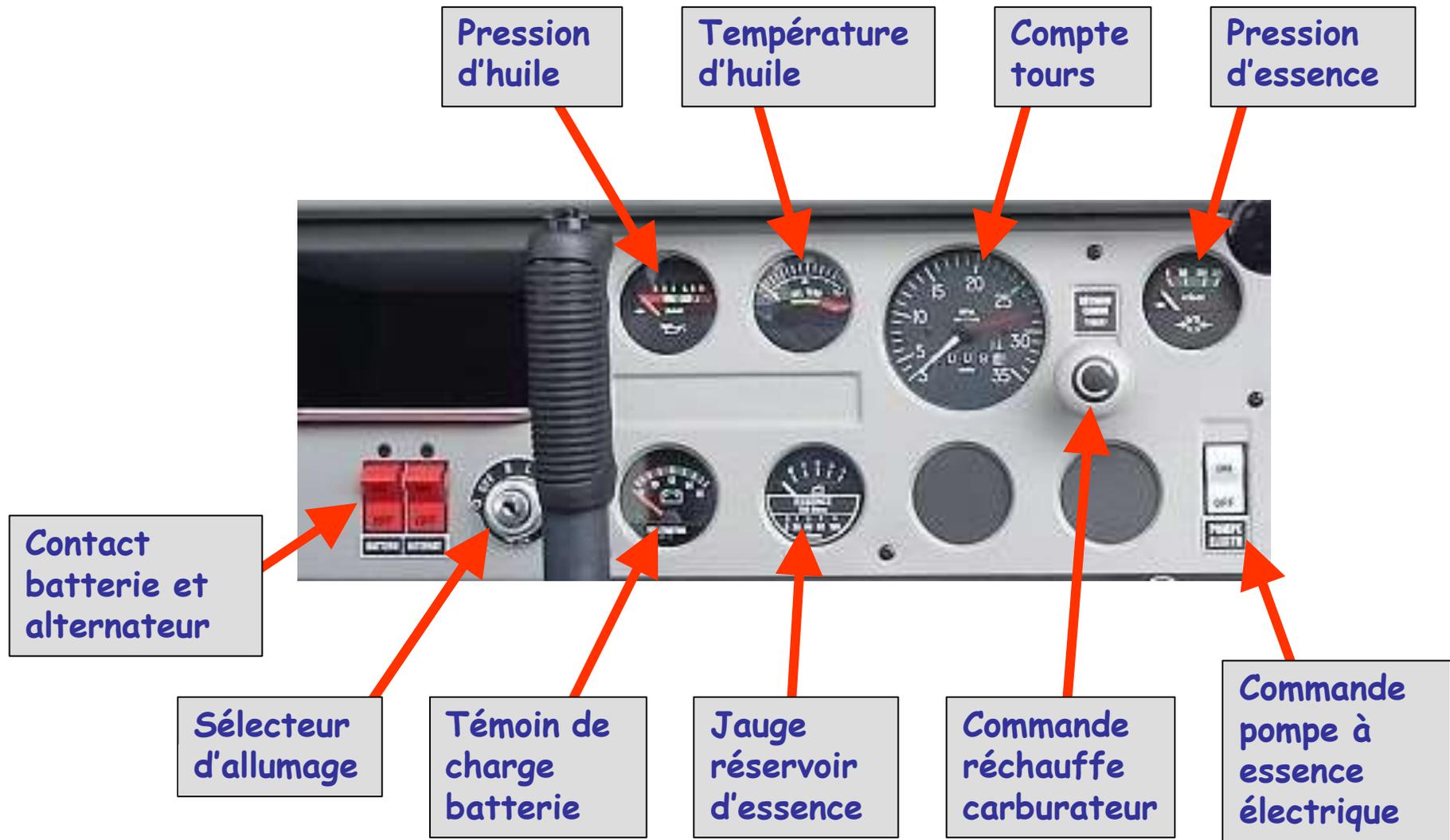
La bille (symétrie du vol)

Le conservateur de cap

Le variomètre (taux de montée / descente)

Le tableau de bord

Instruments moteur





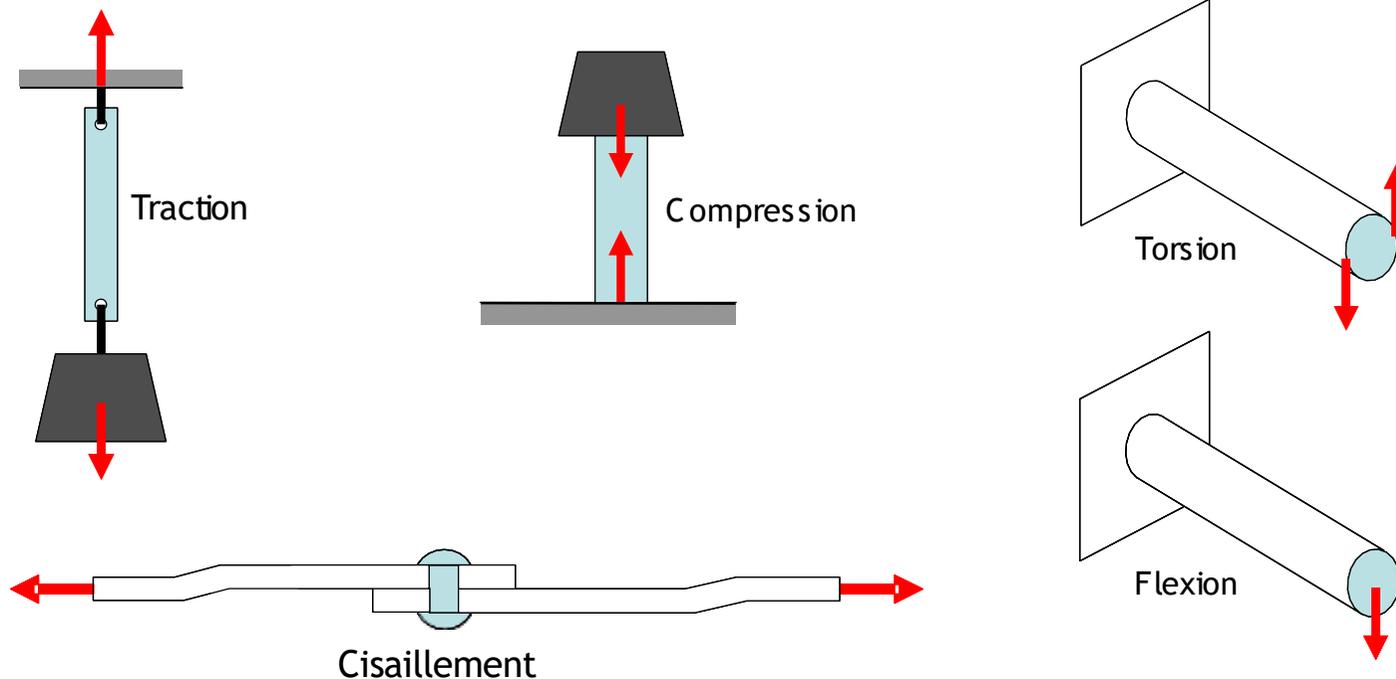
BIA

TECHNOLOGIE
CELLULE

03AV2

FORCES ET CONTRAINTES

Les différentes contraintes* ou sollicitations auxquelles un élément de cellule d'avion peut être soumis sont :



ou combinaison des contraintes précédentes (ex : flexion/torsion)

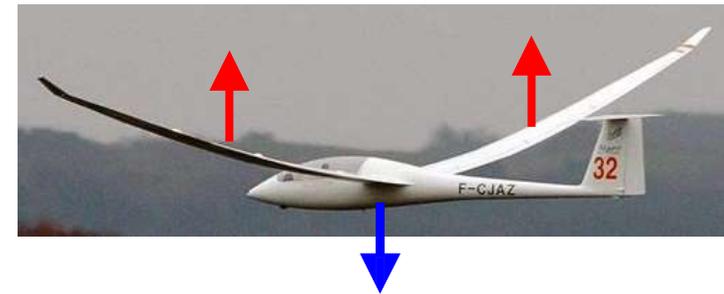
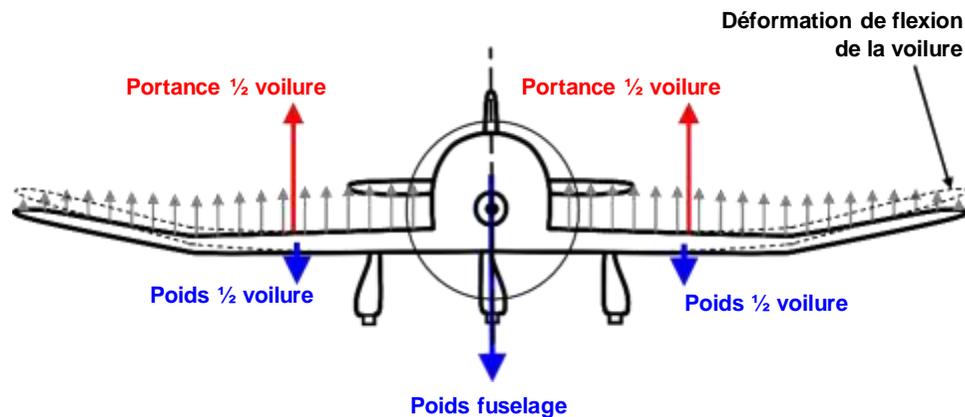
$$* \text{ Contrainte } (\sigma) = \frac{\text{Force (F) exercée sur un élément}}{\text{Section (S) de l'élément considéré}} = \frac{F}{S}$$

FORCES ET CONTRAINTES

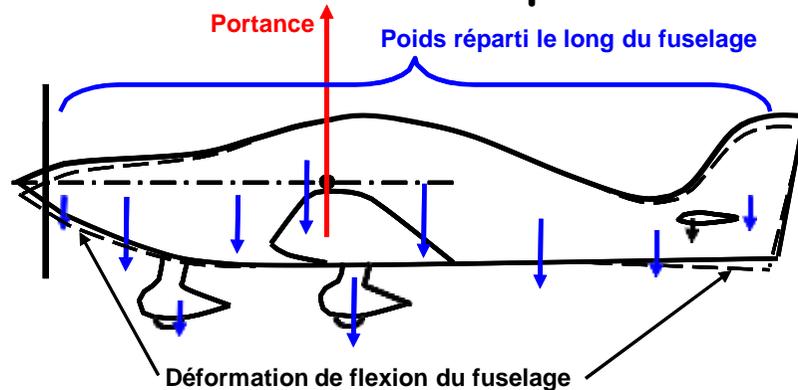
La cellule d'un avion est soumise à diverses sollicitations mécaniques :

• En vol :

• L'aile est soumise à des charges de flexion (et parfois de torsion) liées au facteur de charge.



• Il en est de même pour le fuselage :

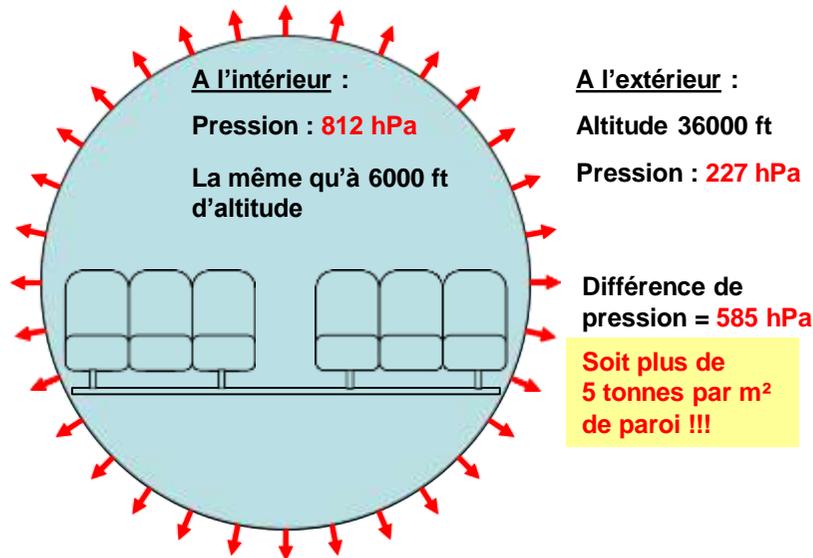


Le poids du fuselage est réparti tout le long du fuselage, en avant et en arrière de la voilure où apparaît la portance chargée d'équilibrer ce poids.

Le fuselage subit donc, lui aussi, un chargement de flexion.

FORCES ET CONTRAINTES

- Si le **fuselage** est **pressurisé**, sa paroi doit résister à la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur. Comme l'enveloppe d'un ballon gonflé elle est mise en tension. Elle subit donc des contraintes de **traction**.



- Les **propulseurs** exercent sur la cellule des forces de **traction** (hélices) ou de **poussée** (turboréacteurs).
- Au sol, le **train d'atterrissage** subit les efforts venus du sol (*au parking, pendant le roulage ou lors de l'impact à l'atterrissage*) et les introduit dans le reste de la cellule.

FORCES ET CONTRAINTES

Chaque partie de la cellule est donc soumise à des **contraintes diverses** au cours des différentes **phases du vol**.

Le constructeur doit **démontrer** (*par calcul et par essai*) que chaque partie de la cellule peut **résister à l'ensemble des contraintes envisageables** dans la vie de l'avion.

Le **manuel de vol** de l'avion, rédigé par le constructeur, précise les **limitations** qui sont **imposées au pilote** :

- **facteur de charge à ne pas dépasser** (= *facteur de charge limite **)
- **limitation de la masse et de la position du centre de gravité**
- **vitesse limites pour chaque configuration de l'avion**
- **etc...**

** les facteurs de charge limites sont imposés par la réglementation, en fonction du type d'avion et de sa masse.*

La cellule doit **résister aux charges limites sans déformation permanente**. Elle doit aussi **résister à 150% des charges limites (= charges extrêmes) sans rupture**.

LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

Suivant la nature des matériaux utilisés, on distingue 3 types de construction :

A . La construction bois et toile :

Les bois sont principalement l'**acajou**, le **frêne**, l'**épicéa** et le **sapin**.

Bois plein ou de **contre-plaqué** (plusieurs couches d'épaisseur et de nature variable collées ensemble).



Les différents éléments composant l'ossature sont collés entre eux.

Une **toile** (lin, coton, dacron) recouvre l'ossature.

Un **enduit** va ensuite tendre la toile et une **peinture** sera appliquée, donnant un fini très rigide.

La construction bois et toile est utilisée jusqu'à 300 km/h. Au delà, le revêtement est en bois uniquement.

LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

B . La construction métallique :

Utilise principalement des alliages à base d'aluminium (en particulier un alliage contenant 4% de cuivre appelé « duralumin »).



La mise en œuvre et l'usinage des profils et tôles peut se faire à grande échelle donc avec des coûts moindres d'où le développement de ce type de construction.

LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

C . La construction utilisant les composites :

A base de fibres de verre ou de carbone et de résine synthétique formant un ensemble très résistant et léger.

Les pièces sont moulées et présentent un rapport résistance / poids au moins égal voire supérieur à celui du métal.



Panneau de fuselage A350XWB



Nappage d'un panneau de fuselage A350XWB à l'aide d'une machine de placement de fibre à commande numérique

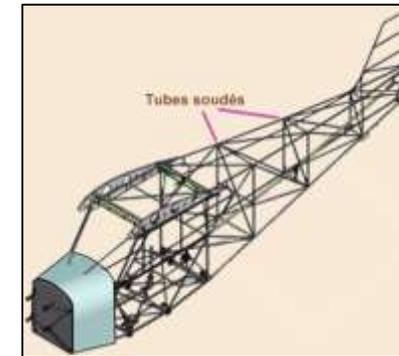
PRINCIPES CONSTRUCTIFS

Fuselage :

- **Structure en treillis ou tubes soudés :**

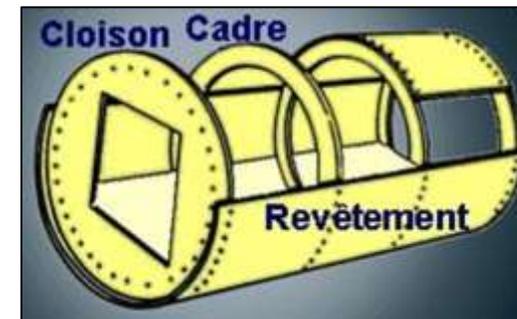
Dans ce cas, le revêtement du fuselage ne participe pas à la tenue mécanique d'ensemble.

Il ne sert qu'à reporter les charges locales de pression sur les éléments du treillis.



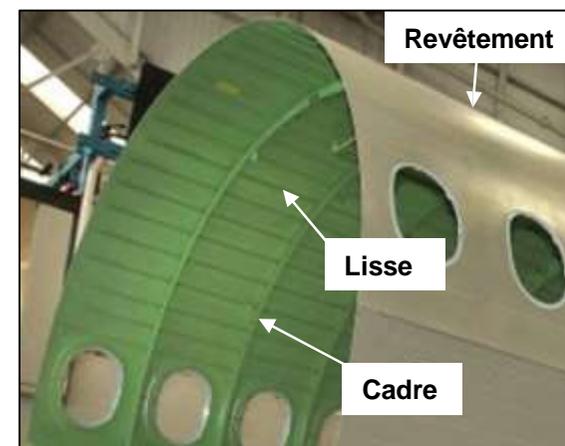
- **Structure monocoque :**

Le revêtement est dit « travaillant » car il participe à la tenue mécanique d'ensemble.



- **Structure semi-monocoque :**

Le revêtement « travaillant » peut être aminci car il est stabilisé par des raidisseurs longitudinaux appelés « lisses ».



PRINCIPES CONSTRUCTIFS

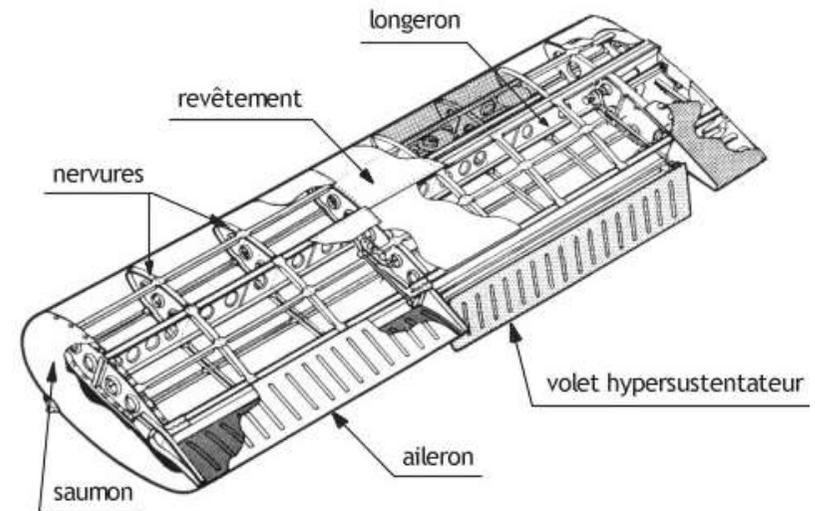
Caisson de voilure :

- **Avec revêtement « non travaillant » :**

*Les charges de flexion sont tenues par un (ou plusieurs) longeron(s).
Des nervures, perpendiculaires au longeron assurent la forme du profil.*

- **Avec revêtement « travaillant » :**

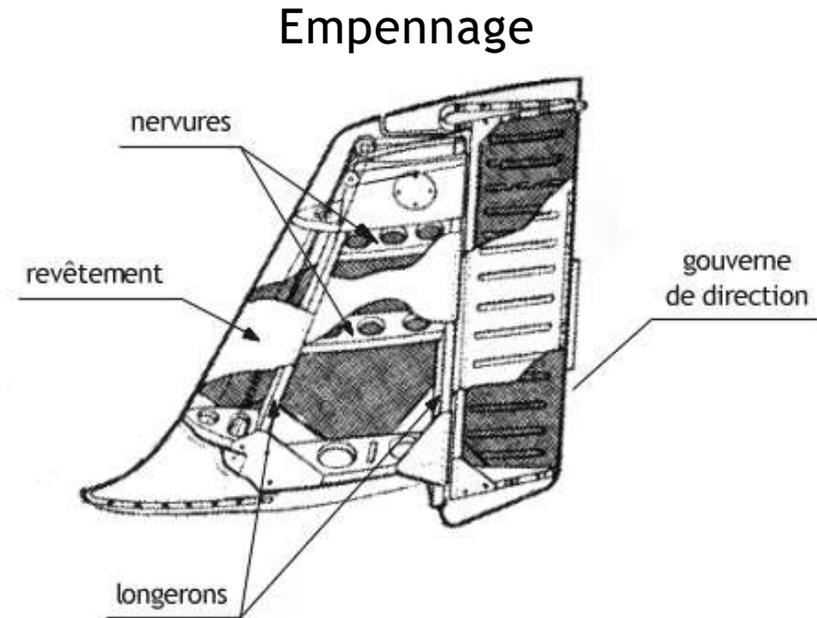
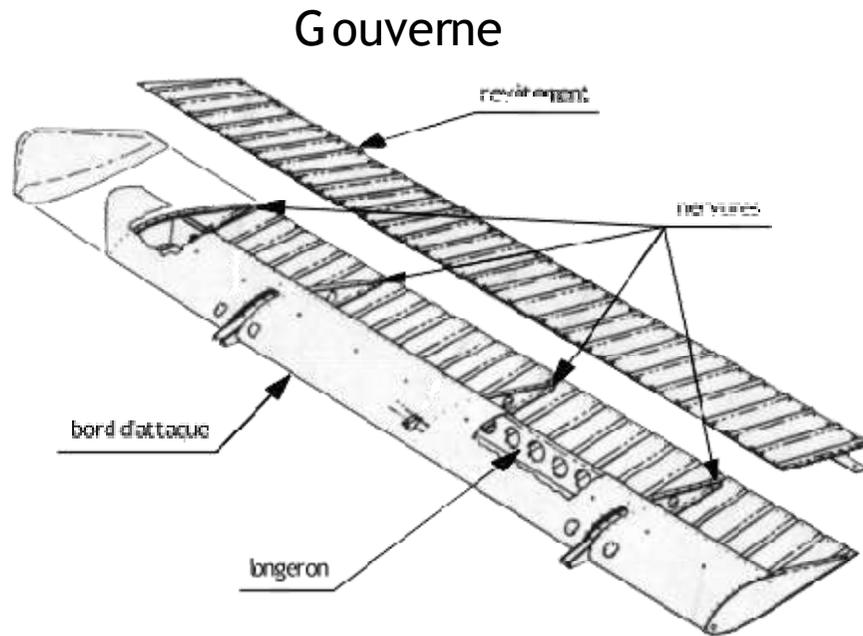
Les panneaux de revêtement intrados et extrados participent à la tenue des charges de flexion car ils sont stabilisés par des raidisseurs.



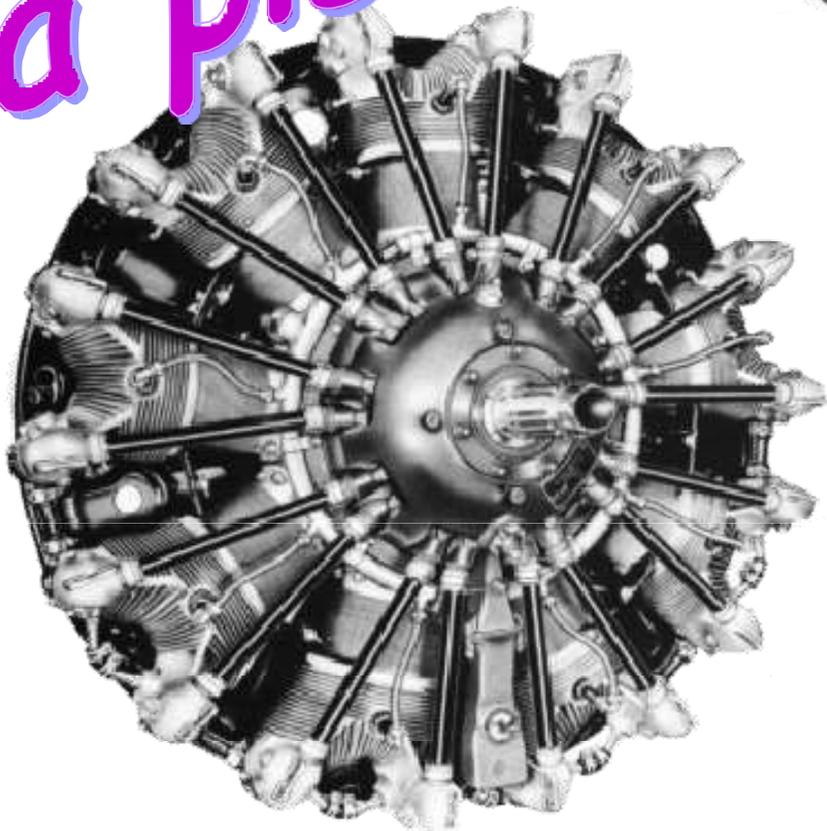
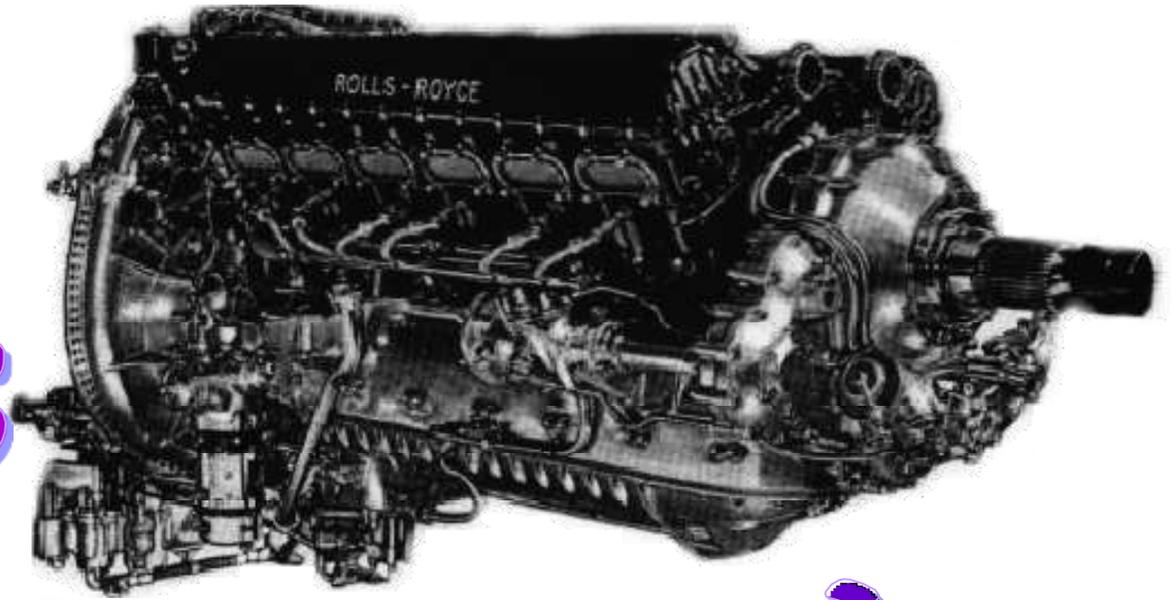
PRINCIPES CONSTRUCTIFS

Empennages et gouvernes :

• On retrouve les mêmes principes que pour le caisson de voilure :

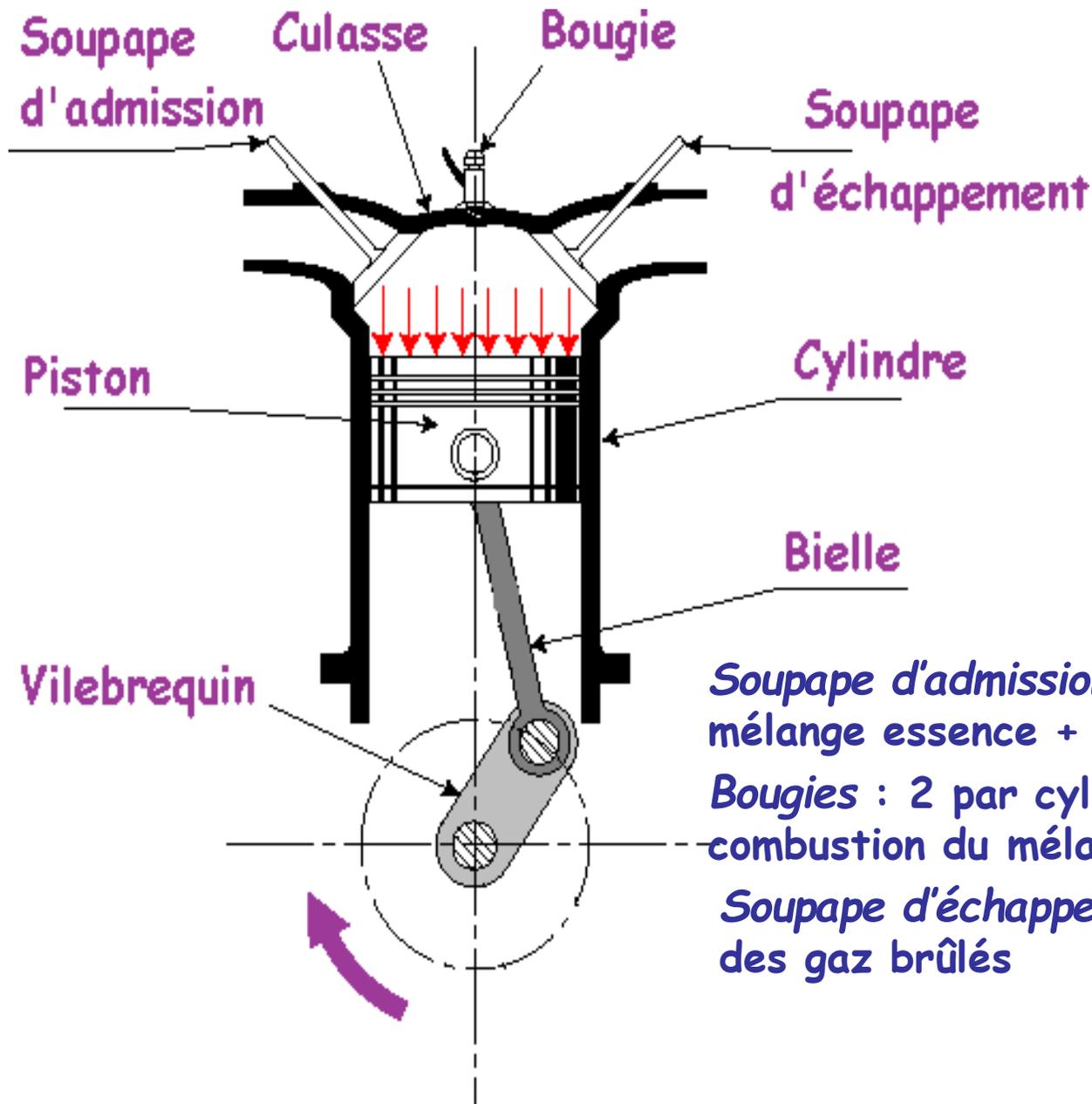


Moteur
à pistons



Cycle à
quatre
temps

Éléments fondamentaux d'un moteur à pistons



Cylindre : contenant dans lequel s'effectue la combustion et le mouvement alternatif
Piston transforme énergie dégagée par la combustion en mouvement alternatif

Bielle : transforme mouvement alternatif en mouvement de rotation
Vilebrequin : entraîné en rotation.

Soupape d'admission : permet arrivée du mélange essence + air

Bougies : 2 par cylindre (déclenchent la combustion du mélange)

Soupape d'échappement : permet évacuation des gaz brûlés

LA COMBUSTION

Conditions:

- Mélange entre essence et oxygène contenu dans l'air
- Rapport compris entre 4,6% et 18% d'essence dans la masse d'air (l'idéal se situe à 7%)
- Température adéquate



CARBURATION



ALLUMAGE



.....la **CARBURATION** est:

le procédé de production du mélange
inflammable air-essence

L'ALLUMAGE

Dans chaque cylindre, une impulsion électrique envoyée à la bougie au moment propice déclenche la combustion du mélange.

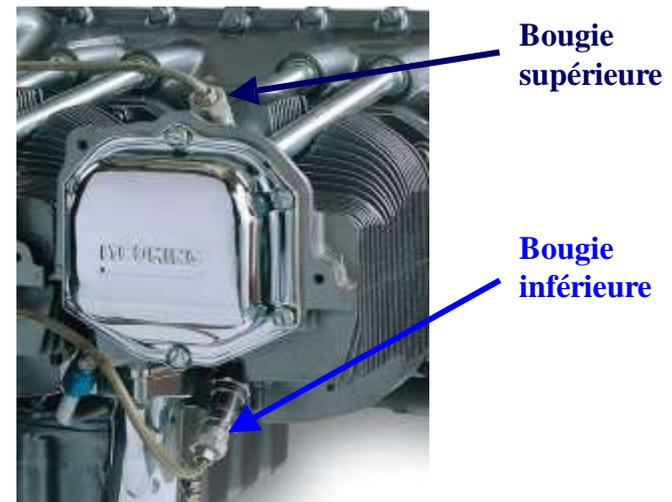
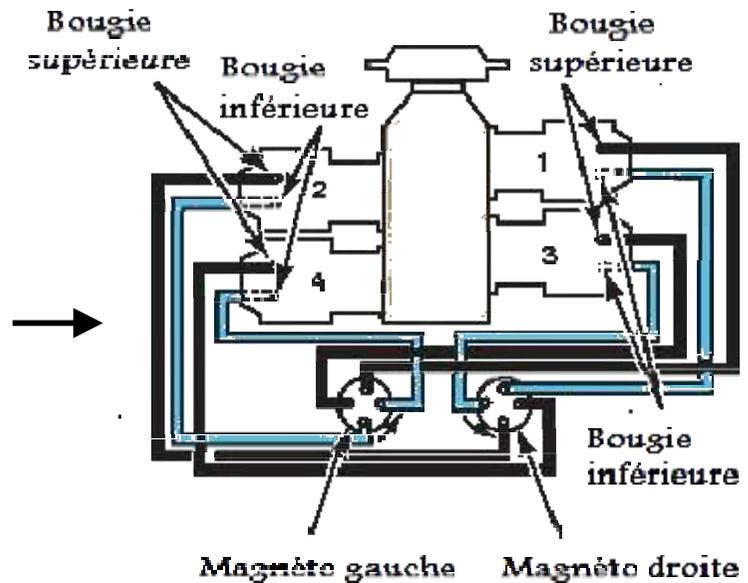
Pour plus de sécurité :

-l'alimentation électrique des bougies est indépendante du circuit électrique général de l'avion. Elle est assurée par 2 générateurs électriques, appelés « magnétos », entraînés directement par le moteur.

-chaque cylindre comporte 2 bougies alimentées chacune par une magnéto différente.

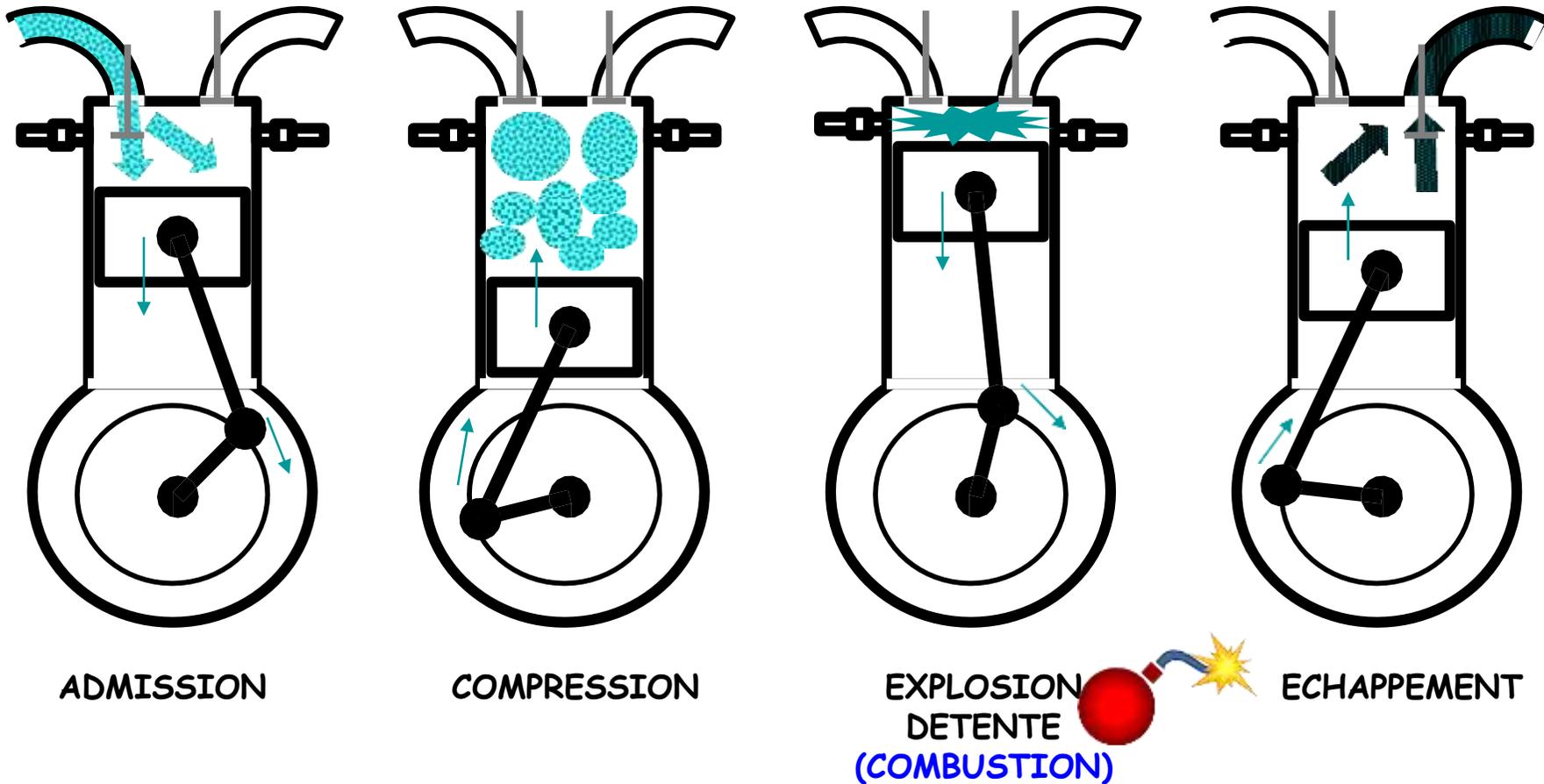
- avant chaque vol, on teste chacun des 2 circuits d'allumage en coupant successivement l'un et l'autre.

Sélecteur de magnétos sur la planche de bord



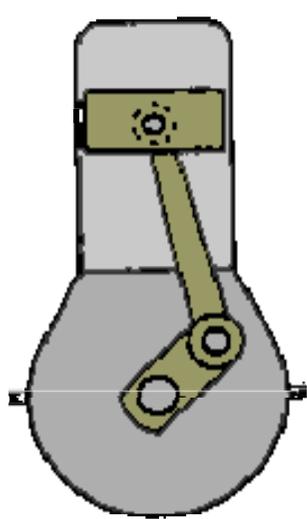
LE MOTEUR A PISTON - cycle 4 temps

A tout moment du fonctionnement moteur, un cylindre quelconque est dans l'un des temps du cycle.
Chacun des cylindres étant dans un temps différent.

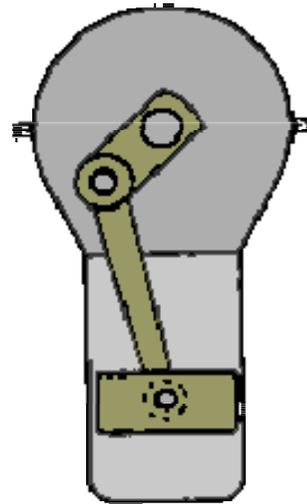


LE MOTEUR A PISTON

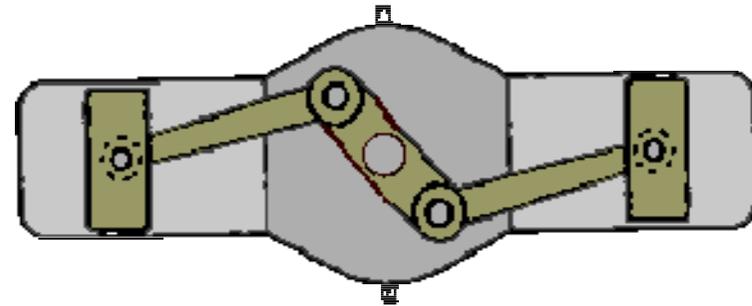
Types de moteurs existant ou ayant existé :



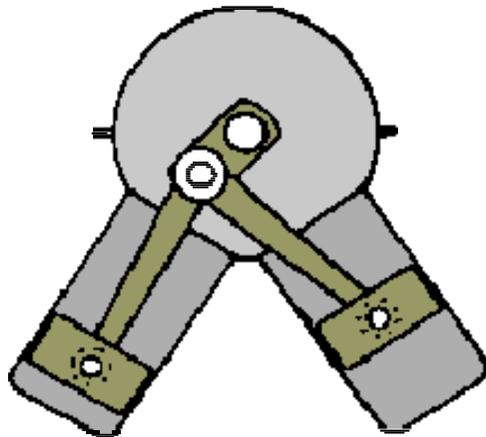
en ligne



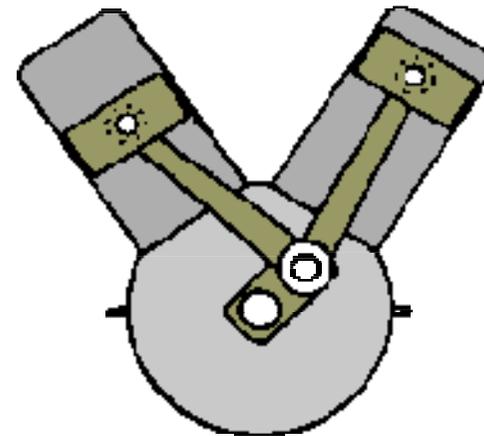
en ligne inversée



à plat et opposés



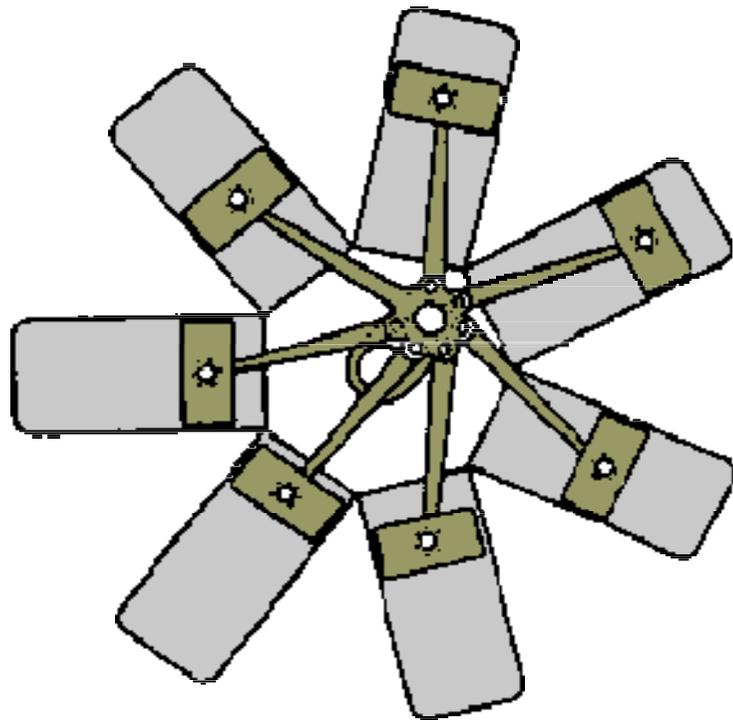
en "V" inversé



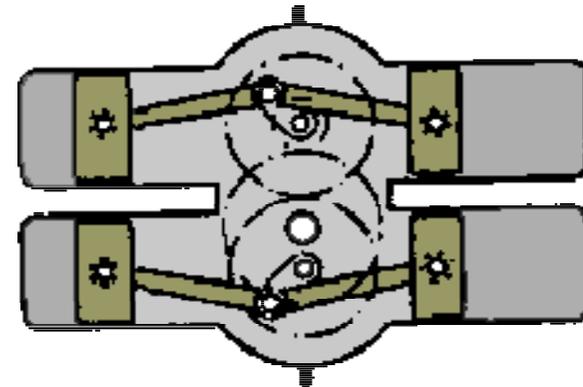
en Vé ou "V"

LE MOTEUR A PISTON

Types de moteurs existant ou ayant existé :



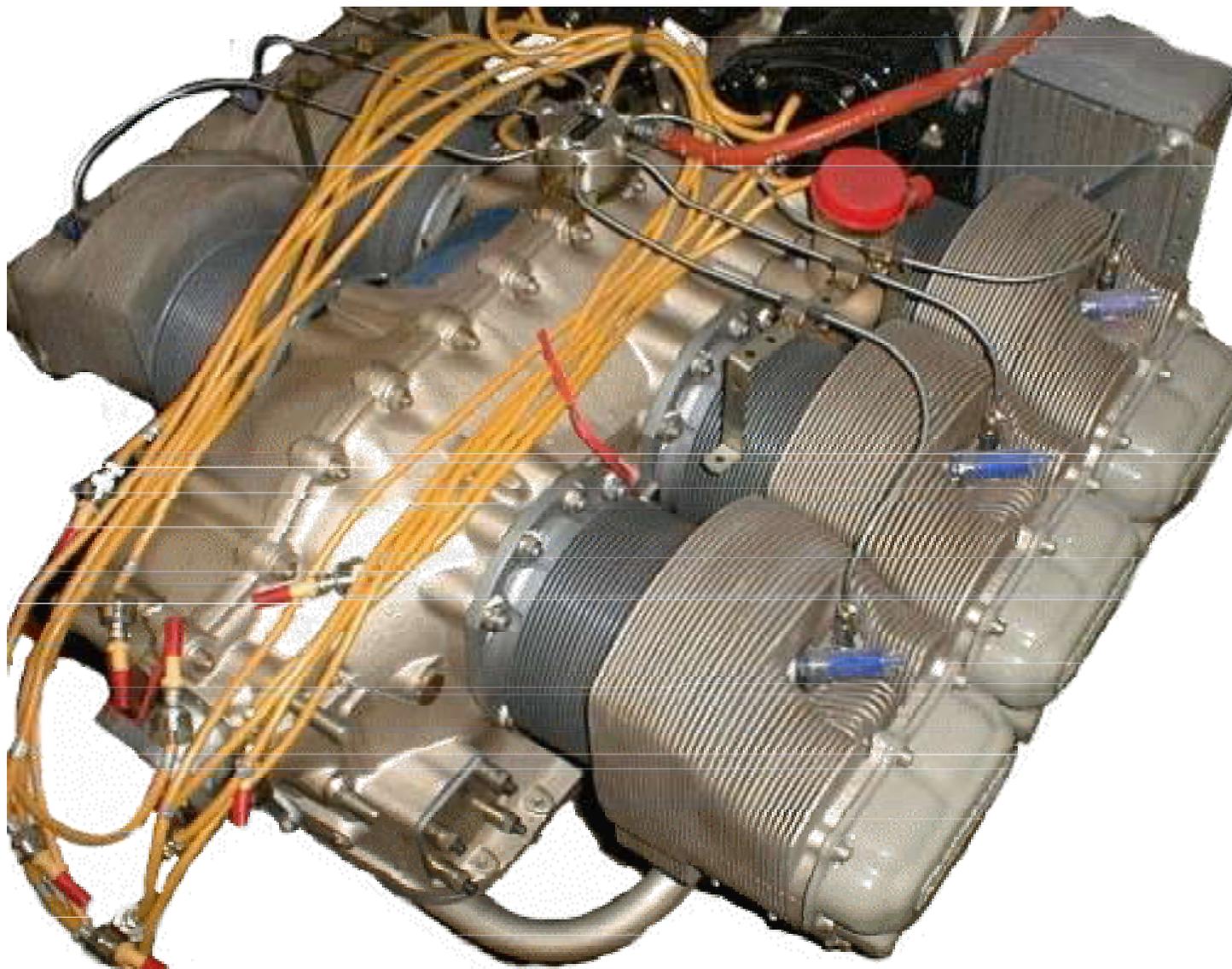
en étoile à une rangée



en "H" à plat

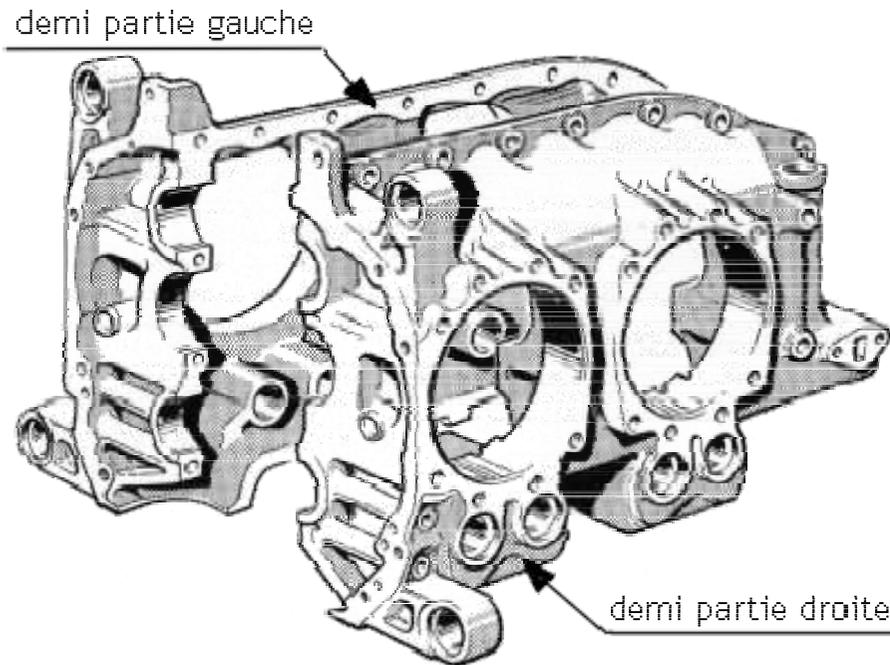
LE MOTEUR A PISTON

Exemple : 6 cylindres à plat

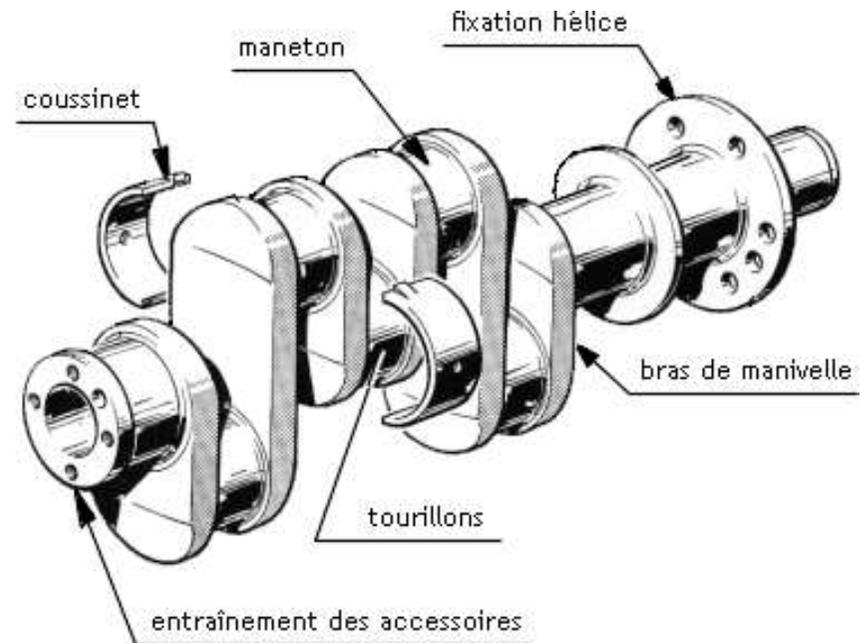


LE MOTEUR A PISTON

Quelques éléments constitutifs du moteur :



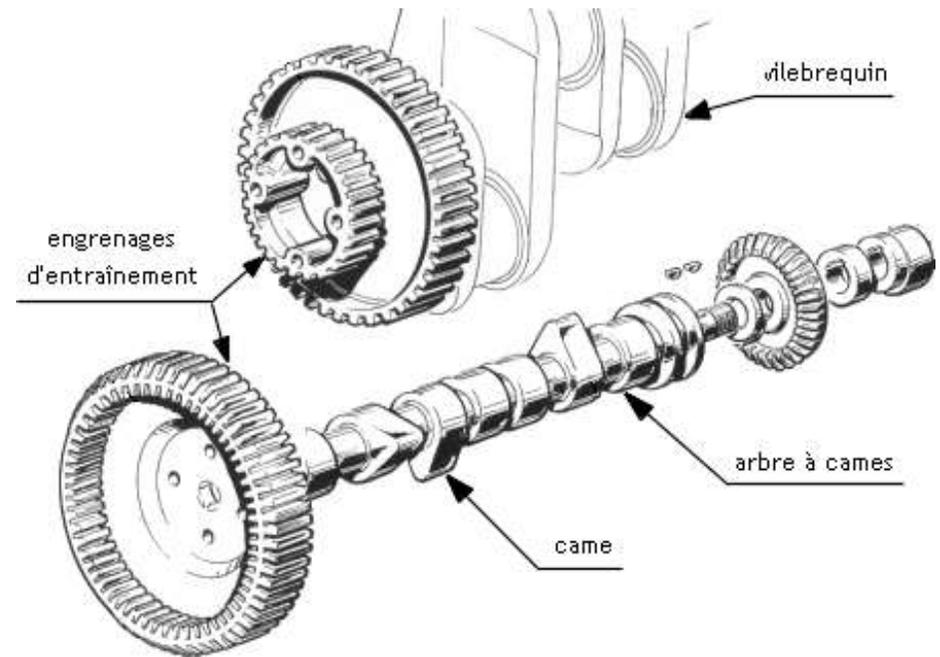
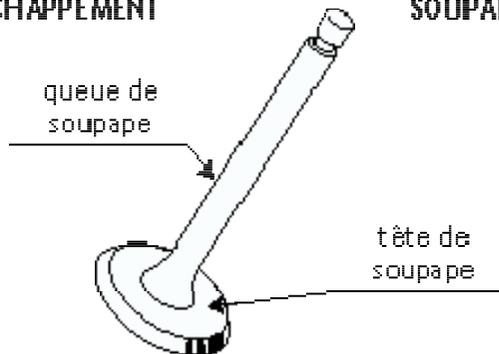
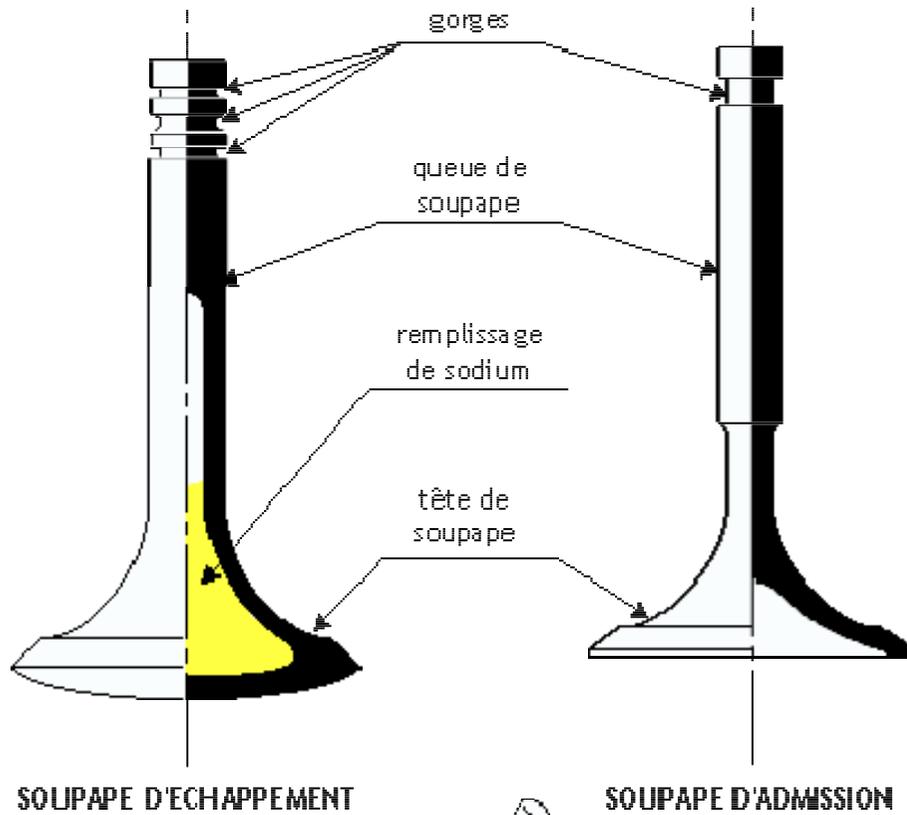
Carter

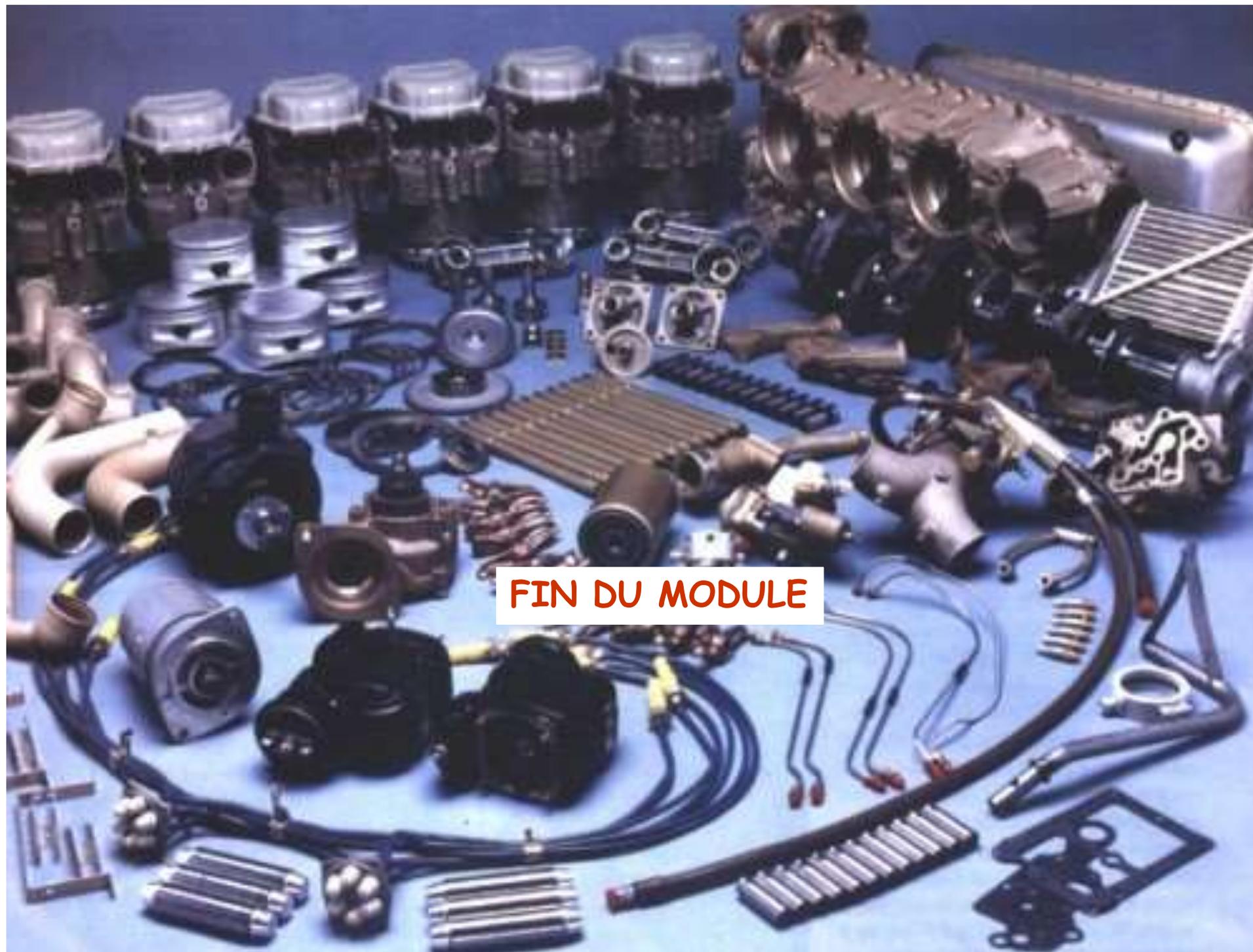


Villebrequin

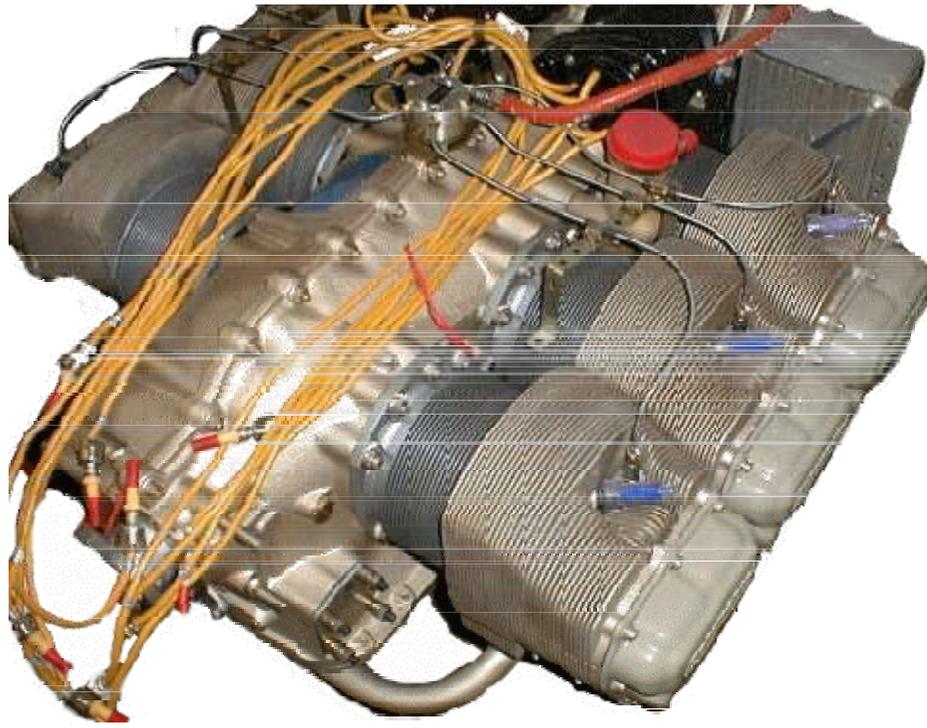
LE MOTEUR A PISTON

Quelques éléments constitutifs du moteur :





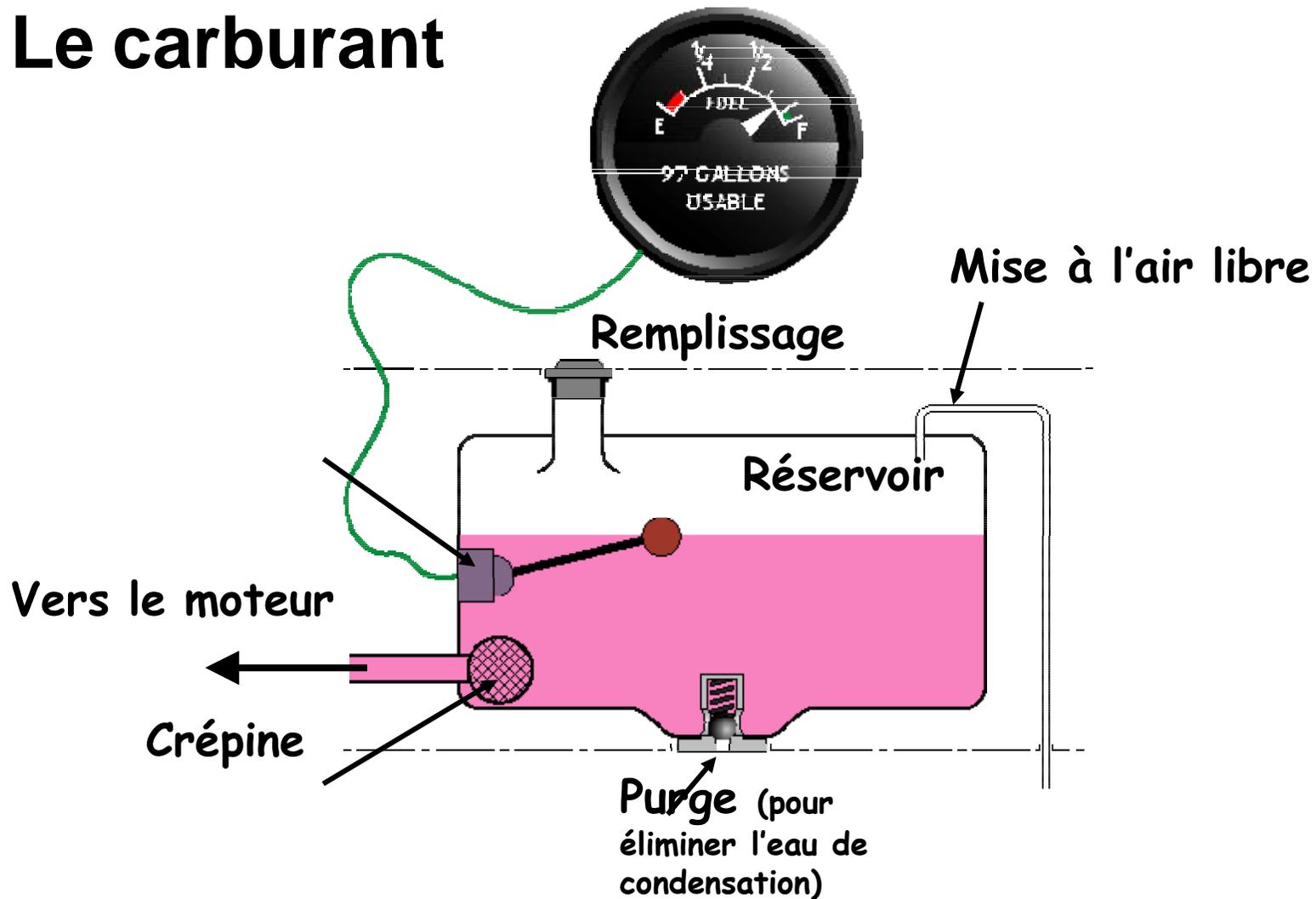
FIN DU MODULE



Carburant et carburation

04D-V3

Le carburant



L'air dans un réservoir peut être très humide, la vapeur d'eau se condense sur les parois et par gravité se dépose en fond du réservoir.

*Effectuer systématiquement les **purges** avant le premier vol de la journée.*

Le carburant

Point éclair et point de feu :

Lorsqu'on essaie d'enflammer du carburant à l'air libre :

- à partir d'une certaine température la combustion est possible, mais elle ne peut s'entretenir seule : c'est le « **point éclair** »

- à partir d'une autre température, la combustion peut s'entretenir toute seule : c'est le « **point de feu** ».

	<i>Essence 100LL</i>	<i>Kérosène Jet A1</i>
<i>Point éclair</i>	<i>entre -20°C et -5°C</i>	<i>supérieur à 38°C</i>
<i>Point de feu</i>	<i>entre 0°C et +30°C</i>	

Aux températures habituelles, on peut donc être au point de feu de l'essence.

- Durant les avitaillements, relier électriquement l'avion à la terre pour éviter toute étincelle (utiliser la **tresse de mise à la terre**),

- **Fermer impérativement les bouchons** de réservoirs après remplissage.

Indice d'octane et pouvoir antidétonant :

En fin de compression, le mélange air essence risque de **détoner***, même sans étincelle, si la compression est trop forte (*détonations = explosions violentes **pouvant endommager le moteur**, si elles sont répétées).

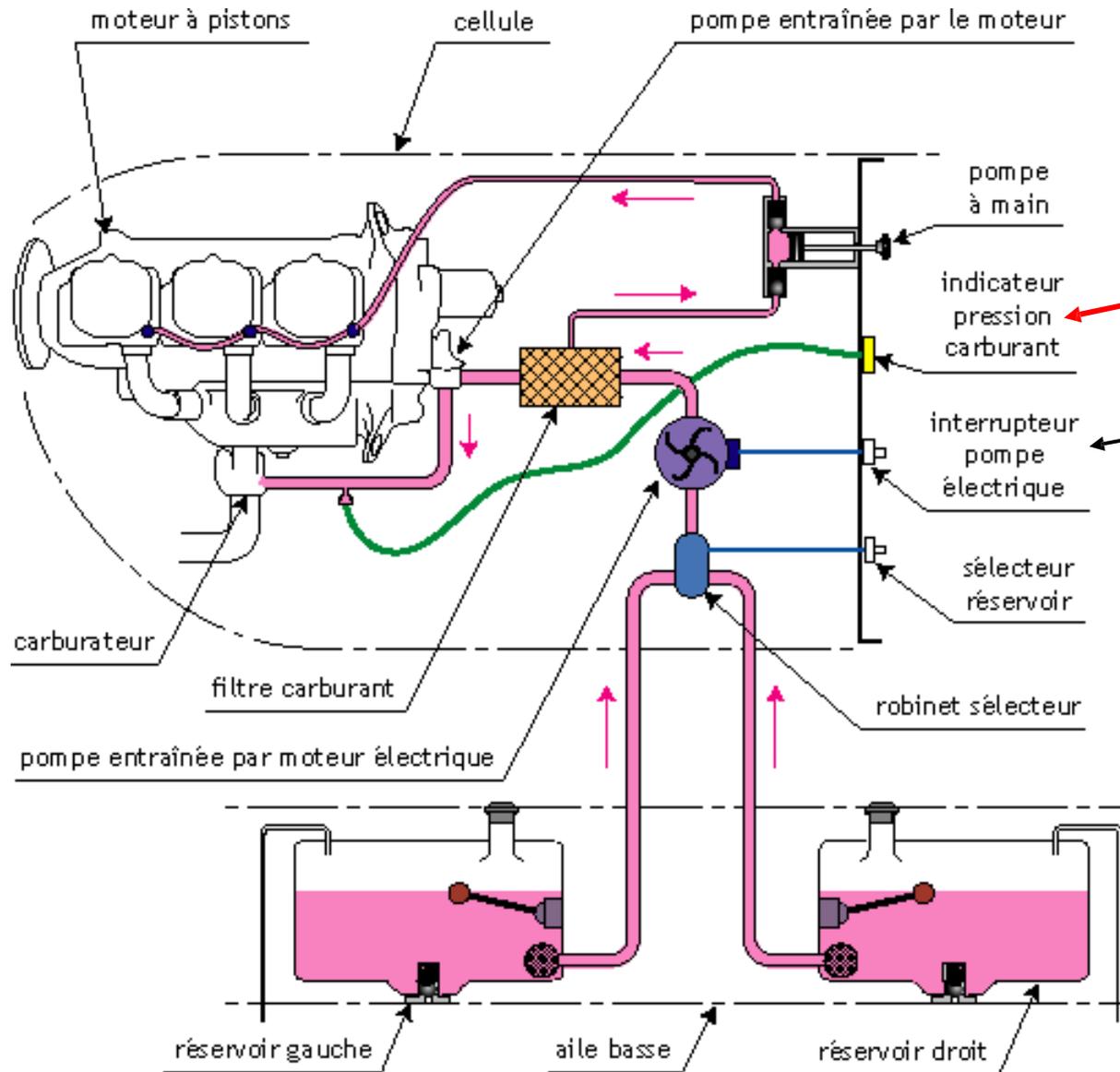
Le carburant doit être adapté au taux de compression du moteur.

On caractérise le **pouvoir antidétonant** d'un carburant par son "**indice d'octane**".

- *indice 80 / 87* *couleur rose*
- ***indice 100 LL*** ***couleur bleue*** ←
- *indice 100 / 130* *couleur verte*

Le carburant

Circuit carburant (avion à ailes basses) :



Présence d'une **pompe électrique** qui :

-envoie un "flot" d'essence qui peut **chasser la bulle de vapeur** formée,

-augmente la pression dans la canalisation, ce qui a pour effet de **diminuer le risque d'ébullition**.

La carburation

C'est le dispositif de réalisation du **mélange air – essence**.

La combustion du mélange ne peut avoir lieu que si la **proportion d'essence dans l'air** est comprise **entre 4,6% et 18%**.

Le **fonctionnement idéal** est obtenu pour une **proportion d'environ 7%**.

Deux types de dispositifs peuvent être utilisés pour réaliser le mélange :

- Le **carbureteur** → par dépression (encore très fréquent sur les avions légers),

ou

- Les **injecteurs** → par injection.

Dans les 2 cas, le mélange est réalisé par **pulvérisation de fines gouttelettes d'essence dans l'air**.



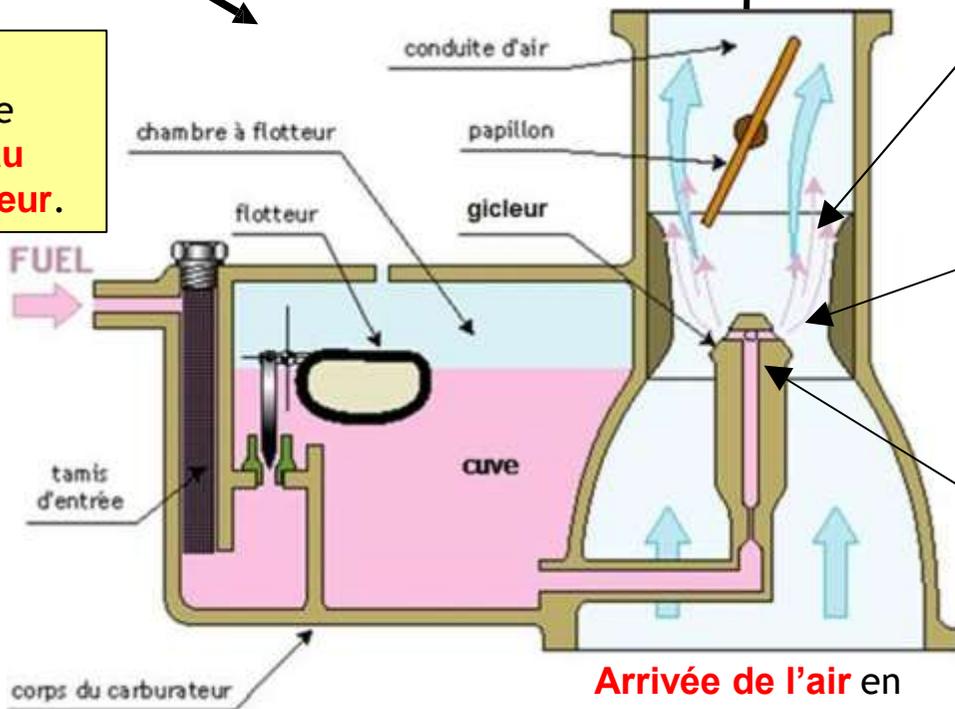
Le carburateur



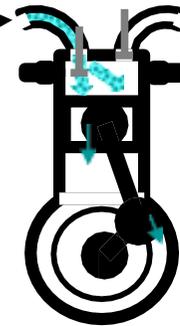
Carburateur

A - La cuve se remplit d'essence jusqu'à un **niveau** limité par le **flotteur**.

Arrivée du carburant



C - Dès que le **moteur** tourne, il **aspire** l'air extérieur à travers le conduit du carburateur.



E - Les **gouttelettes** de carburant sont **pulvérisées** dans l'air provenant de l'extérieur (via un filtre).

D - Le rétrécissement du conduit (Venturi) crée une accélération de l'air et une **dépression** qui **aspire le carburant**.

B - Le **gicleur** est alimenté par le carburant en provenance de la cuve.

Arrivée de l'air en provenance du filtre

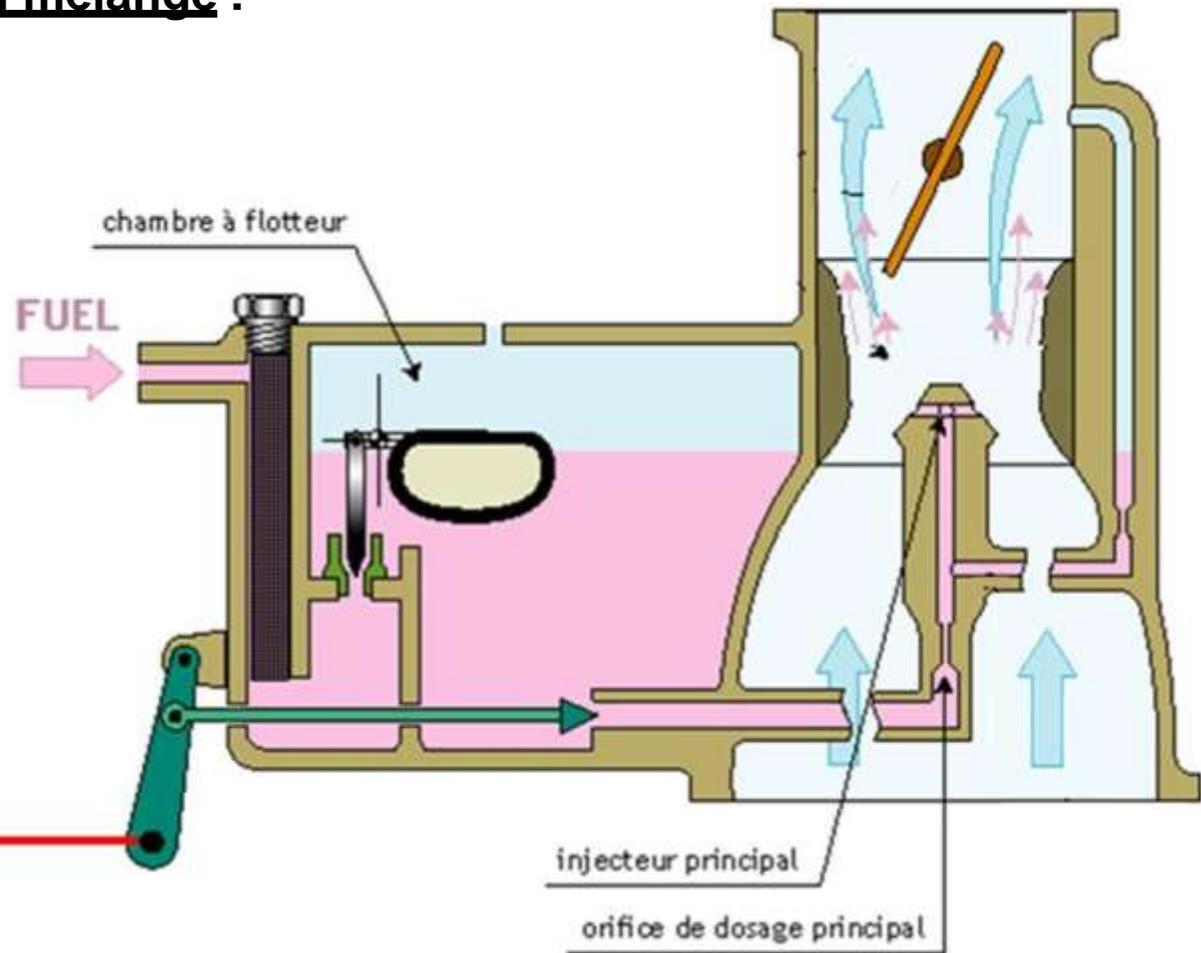
Le carburateur

Réglage de la richesse du mélange :

En altitude, **l'air étant moins dense**, il faut **réduire le débit du carburant** pour éviter que le mélange soit trop riche en carburant.

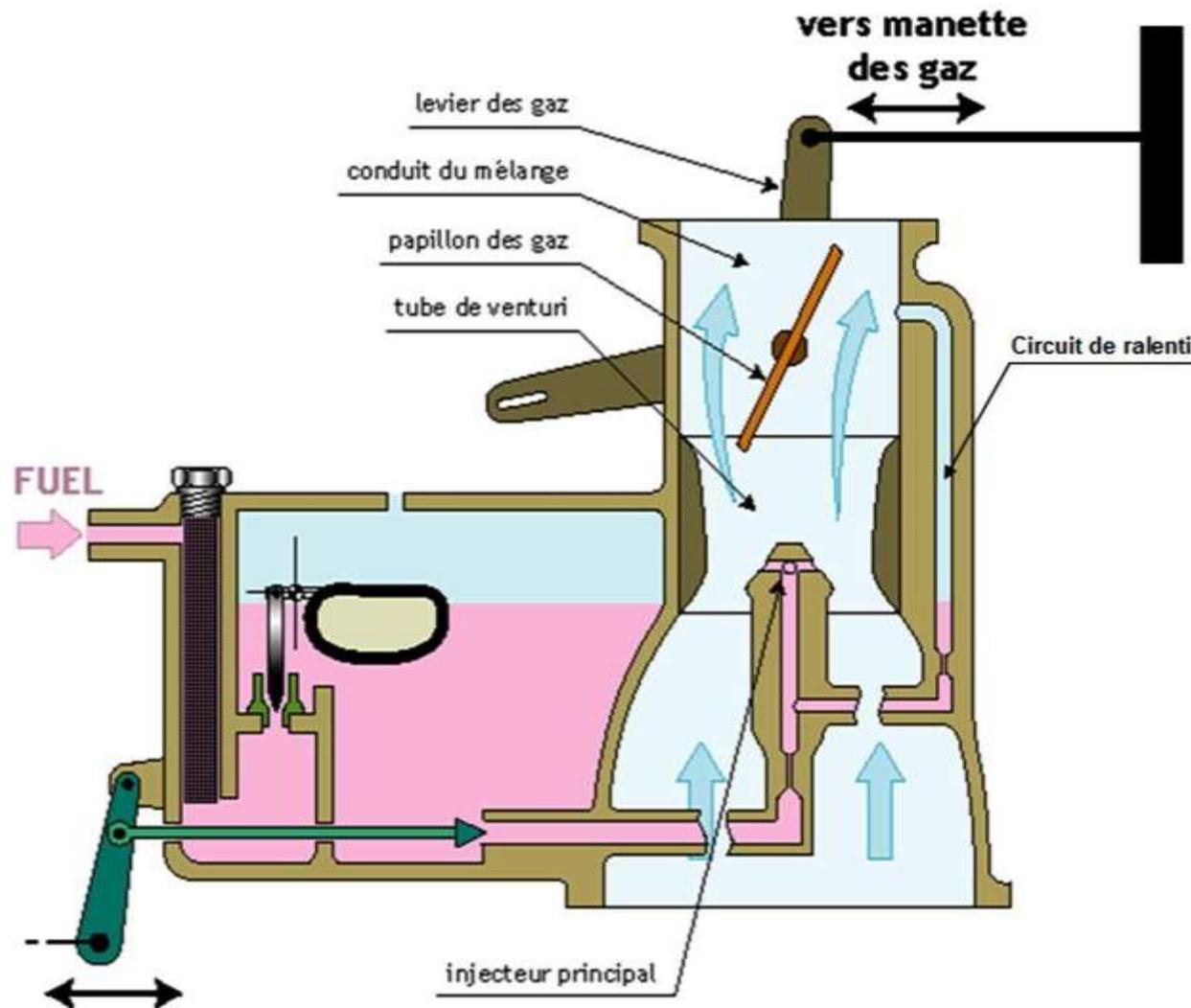
Le dosage de la quantité de carburant envoyé au gicleur s'effectue grâce à la **commande de mélange**.

Elle permet d'**ajuster la proportion d'essence dans l'air** (richesse du mélange) en fonction de **l'altitude**.



Le carburateur

Réglage de la puissance délivrée par le moteur :



La manette des gaz permet de **faire varier la pression du mélange** carburant-air entrant dans les cylindres.

Elle agit directement sur la **quantité de mélange** envoyée au cylindres et donc sur la **puissance moteur**.

La manette des gaz est aussi appelée **manette de puissance**.

Le givrage du carburateur

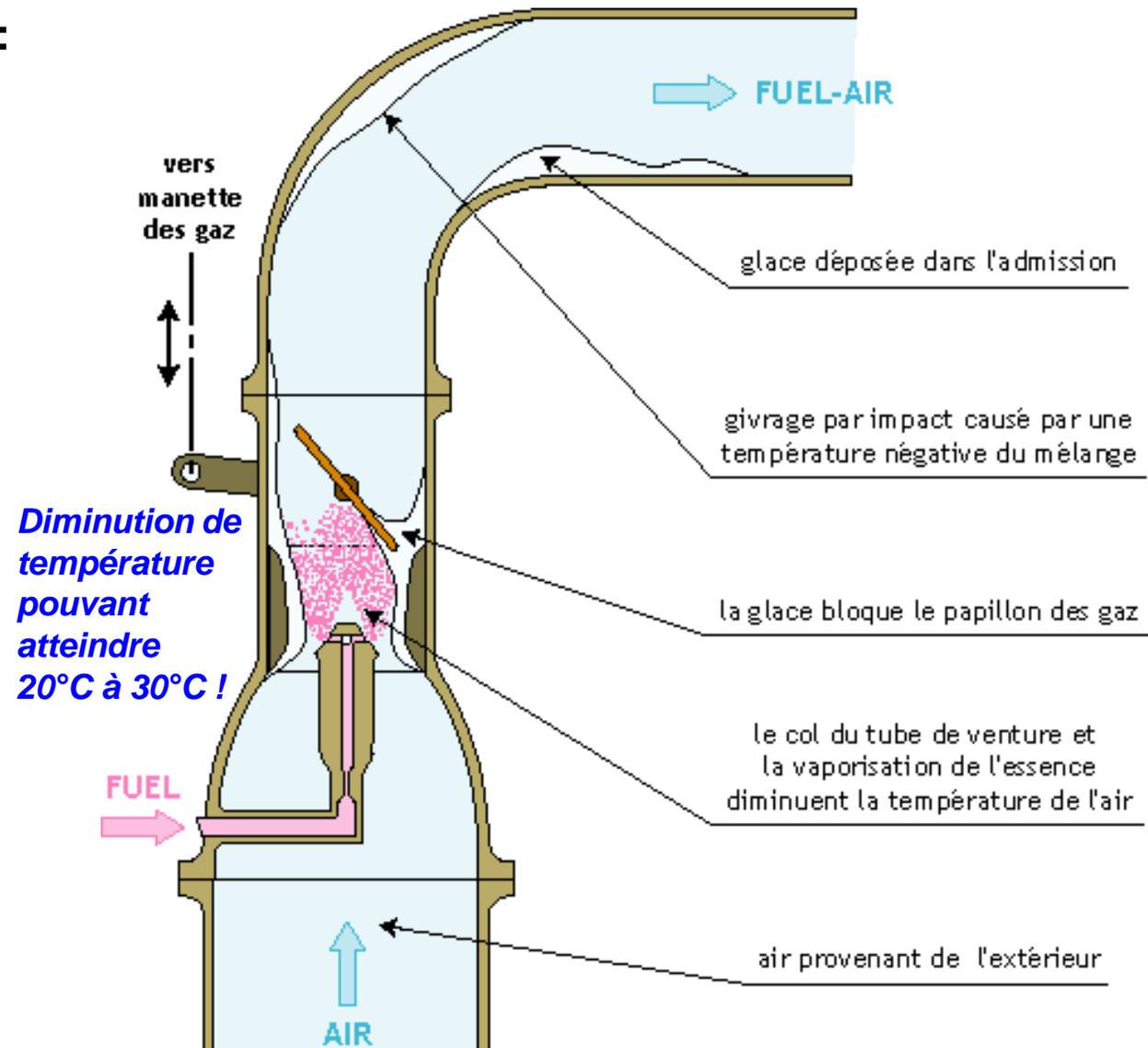
Les risques de givrage :

la **dépression** au niveau du **col du venturi** et au niveau du **papillon des gaz** provoque une **diminution de température**.

La **vaporisation des gouttelettes d'essence** provoque, elle aussi, une **diminution de température**.

Ces 2 causes peuvent entraîner la **formation de givre**.

Le **risque de givrage** est d'autant plus fort que **l'air est humide** et que le papillon des gaz est fermé (**puissance moteur réduite**).



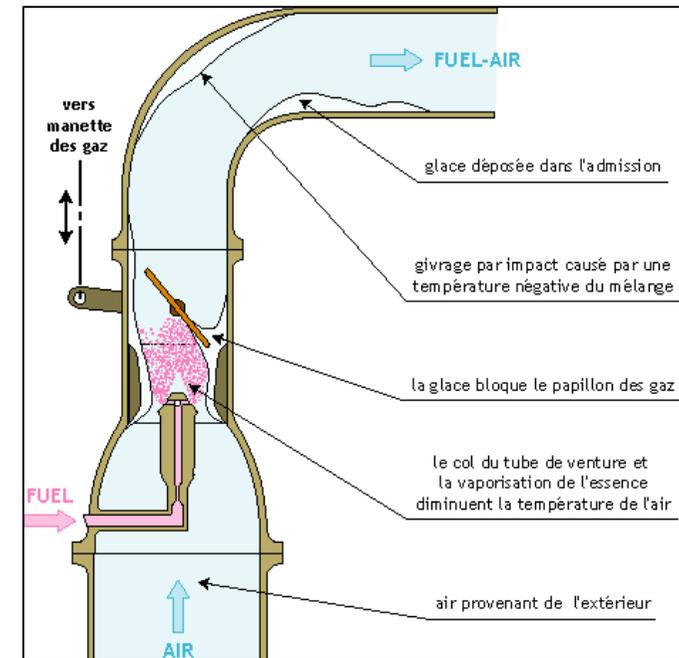
Le givrage du carburateur

Les symptômes du givrage carburateur :

- **Diminution** plus ou moins brutale de la **puissance** pouvant aller jusqu'à l'**arrêt du moteur**.
- Risque de **blocage** de la **commande de puissance**.
- Si l'**hélice** est à **pas fixe** :
Diminution du **régime moteur**.
S'il diminue sans raison : DANGER



- Si l'**hélice** est à **pas variable** :
Le régulateur de l'hélice maintient le régime. Il faut surveiller la **pression d'admission des cylindres**.
Si elle diminue sans raison : DANGER



Conditions propices au givrage carburateur :

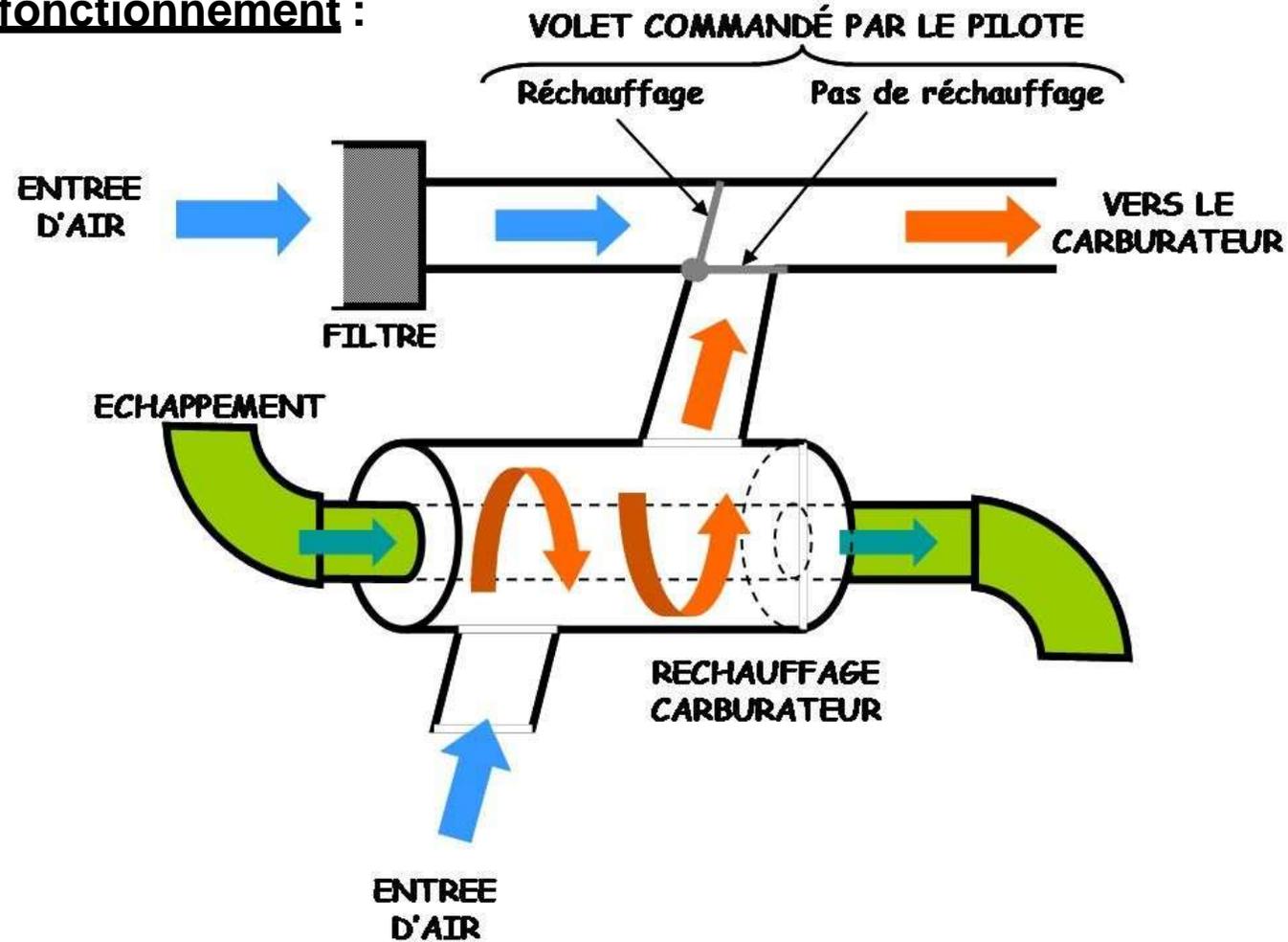
- température extérieure entre **-5°** et **+20°C**
- atmosphère **humide**
- **puissance** moteur **réduite**.

Le réchauffage du carburateur

Moyens pour éviter le givrage du carburateur :

Réchauffage de l'air admis dans le carburateur.

Principe de fonctionnement :



Le réchauffage du carburateur

Remarques sur l'utilisation du réchauffage du carburateur :

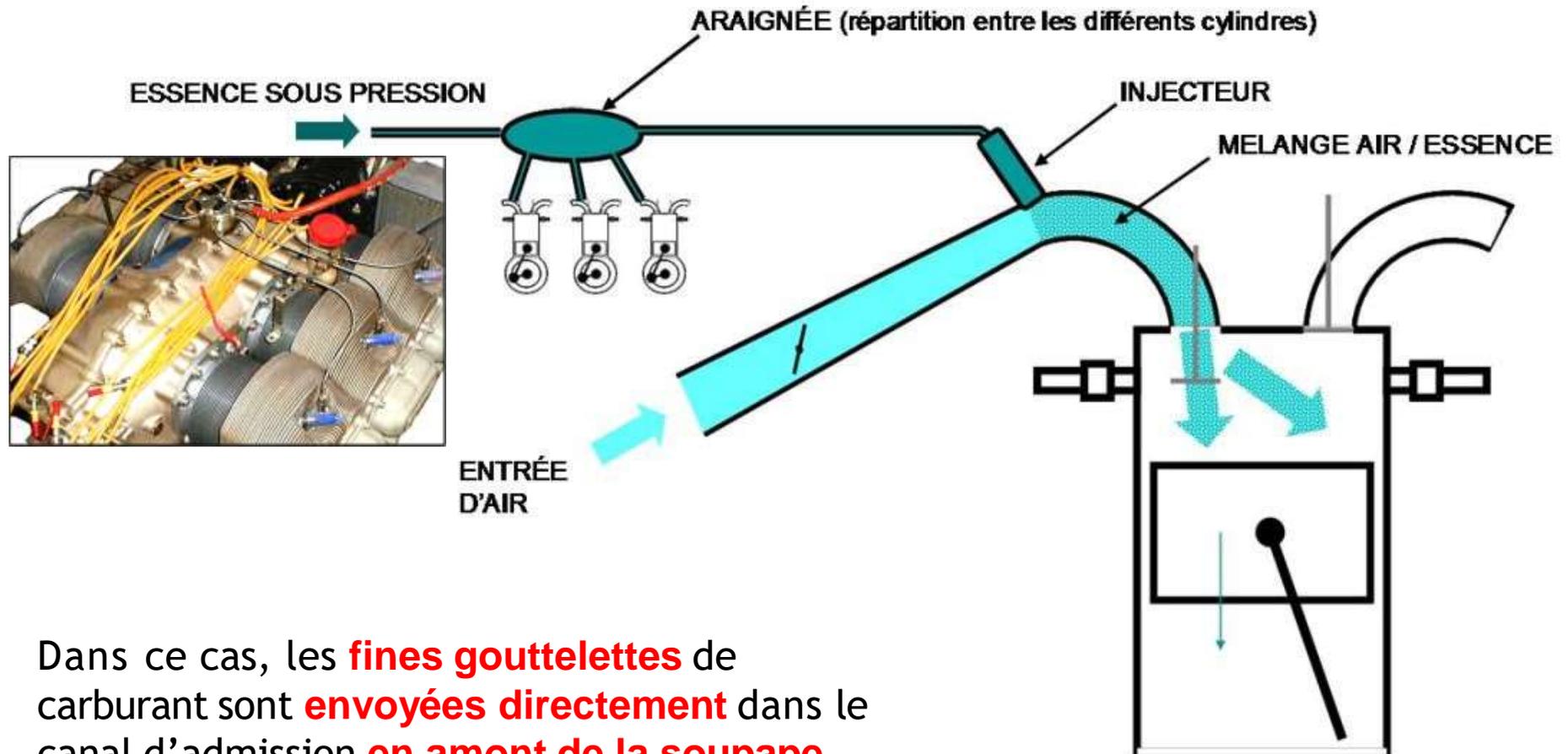
- Le réchauffage du carburateur entraîne une **perte de puissance** (car l'air chaud étant moins dense, le moteur est moins bien alimenté et on s'écarte du mélange idéal). **Ne pas l'utiliser au décollage.**
- **L'air** admis par le moteur **n'est plus filtré. Risque d'ingestion** de corps étrangers éventuellement abrasifs. **Ne pas l'utiliser au sol**, sauf brièvement pendant les essais moteur.
- Le réchauffage du carburateur doit être **utilisé de manière préventive**. Il n'est pas prévu pour dégivrer un carburateur déjà givré.
- Il doit être **utilisé en "tout ou rien" :**
 - en descente et en approche, avant la **réduction des gaz**,
 - en croisière si les **conditions** sont **propices***** et si les signes avant-coureurs apparaissent (**baisse** inexplicquée du **régime moteur** ou de la **pression d'admission**).

***Certains avions sont équipés d'un indicateur de température du carburateur.

Plage jaune : Risque de givrage



L'injection



Dans ce cas, les **fines gouttelettes** de carburant sont **envoyées directement** dans le canal d'admission **en amont de la soupape** .

Il n'y a pas de dépression au niveau de l'injecteur, donc **moins de risque de givrage** .



04E-V3

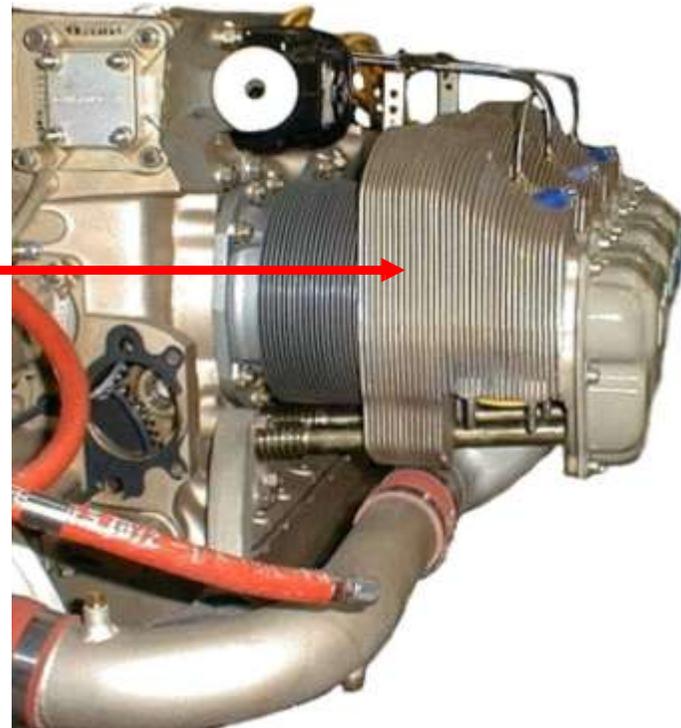
REFROIDISSEMENT MOTEUR

Une grande partie de l'**énergie thermique** apportée par la combustion du carburant n'est pas transformée en énergie mécanique.

Pour **éviter une surchauffe du moteur**, cette énergie doit être **évacuée** par **refroidissement du moteur**.

La grande majorité des moteurs d'avions sont **refroidis par air** pour diminuer le poids et éviter les problèmes techniques éventuels (fuites, pompes cassées ...).

Les cylindres et culasses sont pourvus d'**ailettes** refroidies par de l'**air canalisé** par des **défecteurs** et le **capotage moteur**.



REFROIDISSEMENT MOTEUR

Précautions d'utilisation moteur :

- **roulage** : mauvaise ventilation due à une vitesse faible.
- **montées prolongées** (fortes puissance et vitesses faibles).
- **descentes moteur tout réduit** (refroidissement excessif et contraintes thermiques).

Certains appareils sont équipés de **volets de capot**, commandés du cockpit, permettant de **réguler la circulation d'air** autour des cylindres.

Certains appareils sont également équipés d'**indicateurs de température cylindres**.

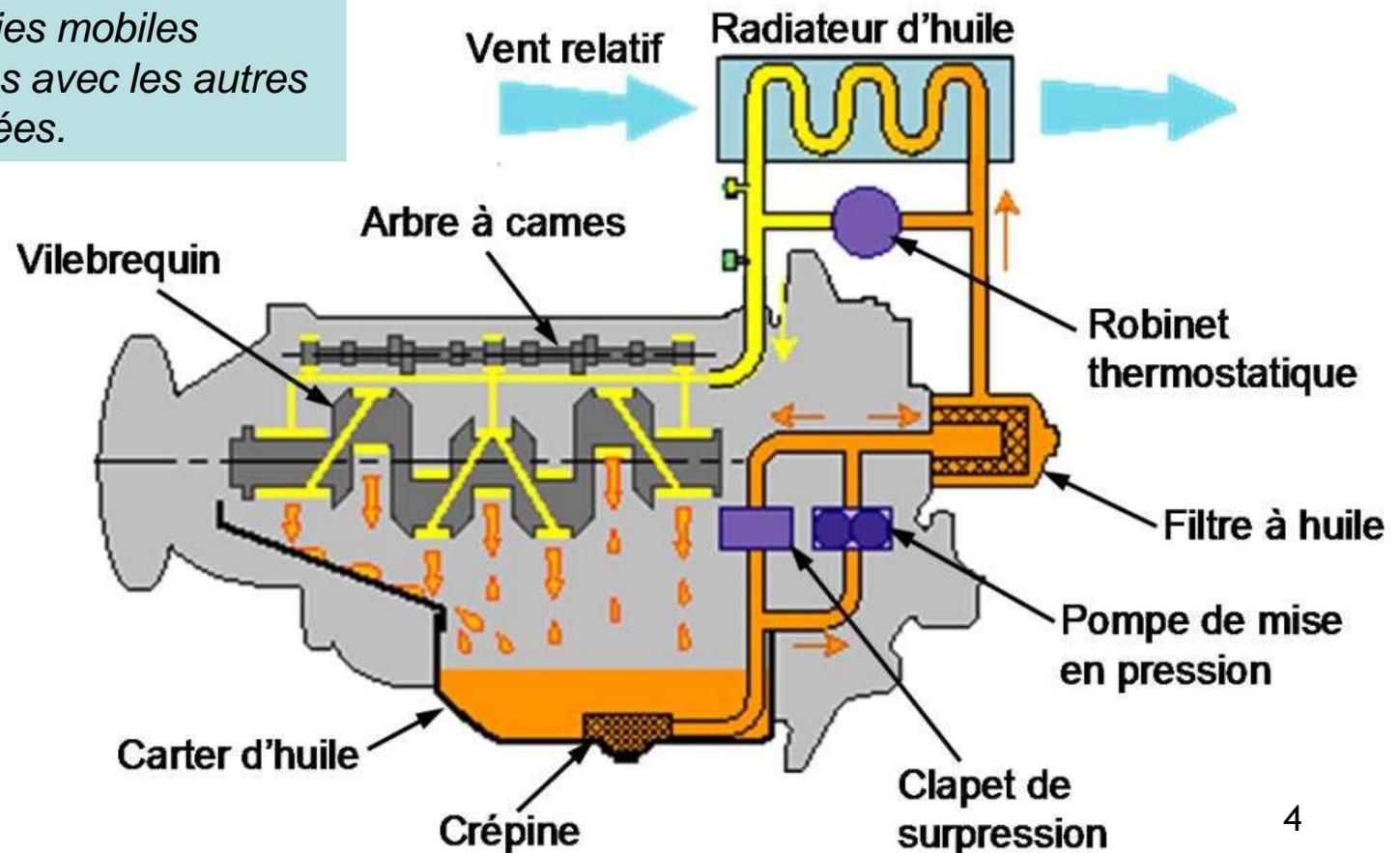
LUBRIFICATION MOTEUR

La **pompe** entraînée par le moteur met en pression (à travers un **filtre**) l'huile provenant du **carter d'huile**. Le **clapet de surpression** limite la pression en sortie de la pompe.

Après circulation à travers le **radiateur d'huile** et dans les **parties à lubrifier*****, l'huile est récupérée en partie basse du bloc moteur, dans le **carter d'huile**.

*** Toutes les parties mobiles en contact les unes avec les autres doivent être lubrifiées.

Nota : Dans certains moteurs **l'huile** n'est pas stockée dans le carter, mais **transférée vers un réservoir séparé**.



LUBRIFICATION MOTEUR

2 catégories d'huiles sont utilisées :

- **Minérales** : obtenues par distillation fractionnée du pétrole.
 - . Généralement utilisées pour le **rodage moteur**.
 - . Caractérisées par leur neutralité chimique et leur point éclair élevé.
- **Dispersantes** : élaborées à partir d'huiles minérales auxquelles sont ajoutés des **additifs**. (leurs résidus de combustion ne sont que de fines particules qui n'adhèrent pas aux pièces métalliques du moteur)
 - . Gardent une faible viscosité aux basses températures
 - . Les **additifs** augmentent la **plage d'utilisation en température**, améliorent la **lubrification**, et facilitent le **démarrage à froid** ...

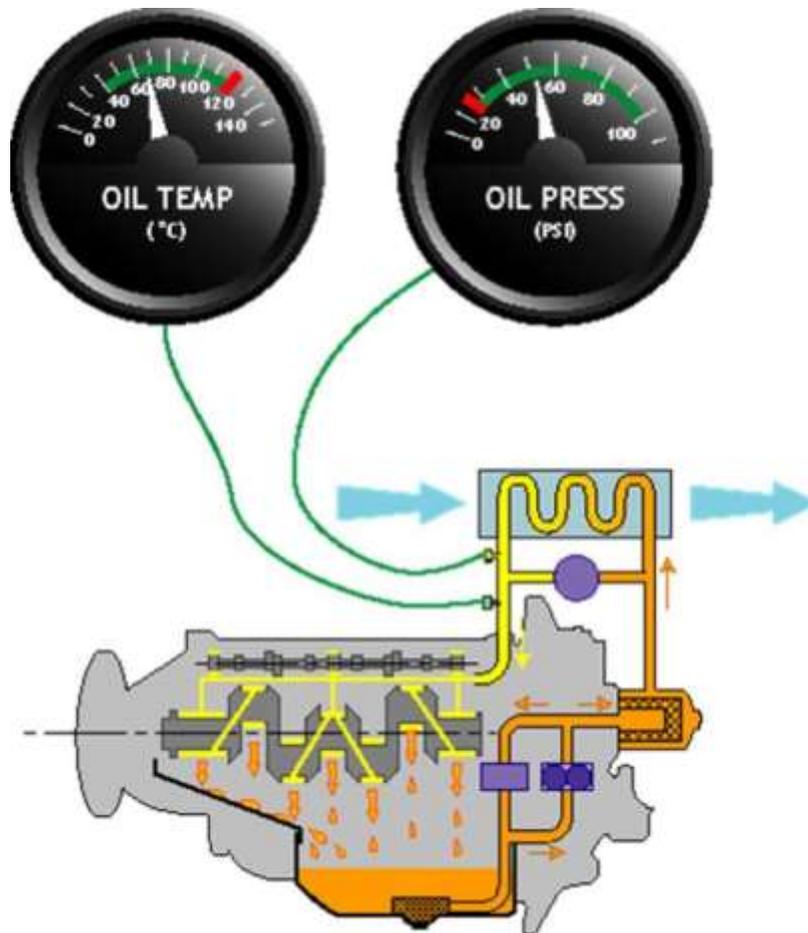
Grade = indice caractéristique de la **viscosité**.

Augmente si la température de la saison augmente.

Utiliser l'huile préconisée par le Manuel de vol ou le responsable technique.

LUBRIFICATION MOTEUR

- Avant tout vol : Vérifier le **niveau** d'huile.
- En vol : Le **suivi** de la **pression** et de la **température** de l'huile peut permettre d'anticiper des problèmes moteur à venir.



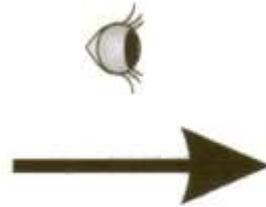
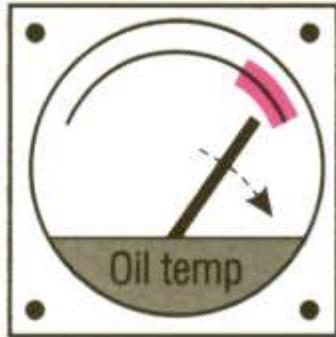
En montée prolongée : Il est normal que la **température** d'huile **augmente**.

En croisière : Une **augmentation de température** accompagnée d'une **diminution de pression** est à surveiller. (cas de fuite !)

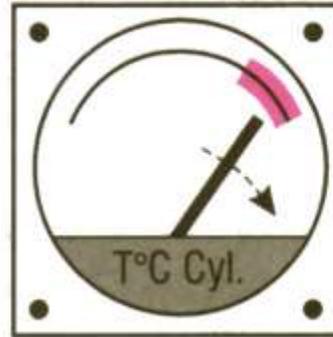
LUBRIFICATION MOTEUR

Anomalies de fonctionnement :

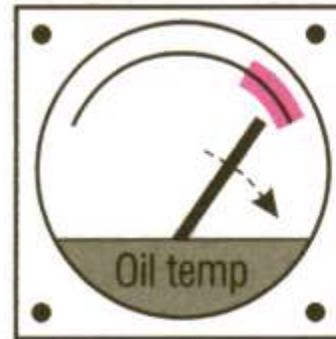
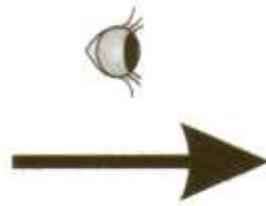
Température d'huile



Température cylindre



Interruption du vol



Interruption du vol

Pression d'huile

Température d'huile

Toujours essayer de **confirmer** le problème à l'aide de **2 instruments** de contrôle moteur.

Les hélices



Photo Guillaume Paumier

04F-V3

ACTION D'UNE HELICE ET REACTION

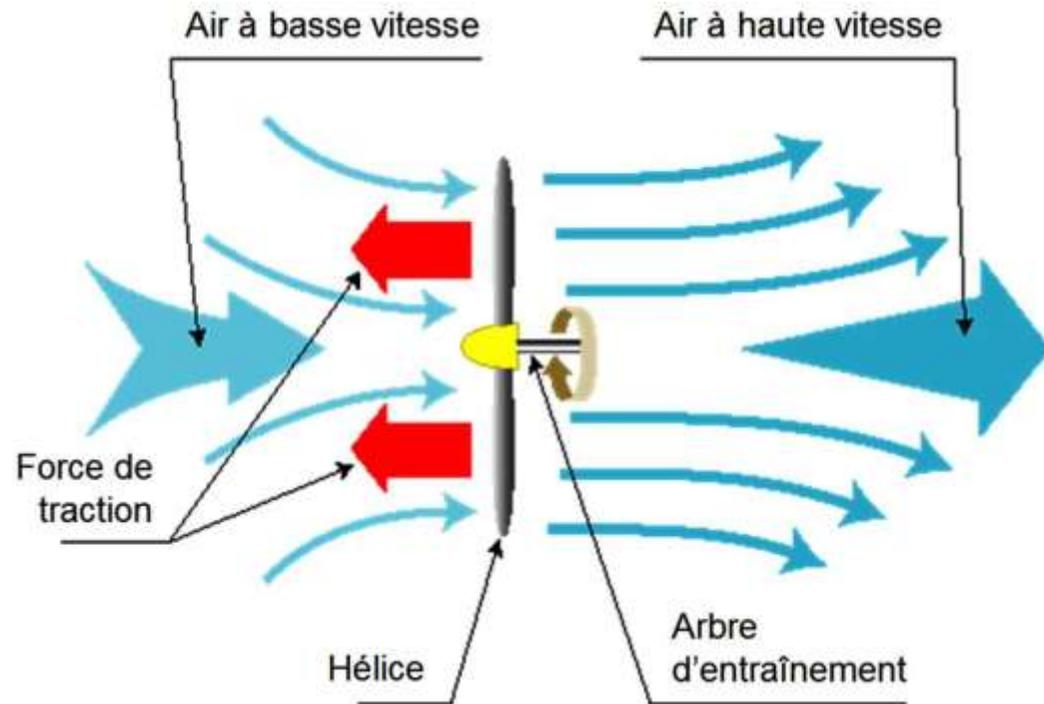
En vol, l'**hélice** reçoit l'air venant de l'avant à une certaine vitesse (la vitesse de l'avion).

Son **rôle** est de **rejeter l'air vers l'arrière** en lui communiquant une **augmentation de vitesse**.

Pour communiquer à l'air cette augmentation de vitesse, l'hélice doit lui appliquer **une force dirigée vers l'arrière** (l'hélice "**pousse**" l'air vers l'arrière).

Par réaction, l'air applique à l'hélice **une force dirigée vers l'avant**.

C'est la « **traction** ».



HELICE TRACTIVE OU PROPULSIVE

Que l'hélice soit **tractive**
(placée à l'avant)...



...ou **propulsive**
(placée à l'arrière)...



Le principe est le même :
"Pousser " l'air vers l'arrière pour obtenir une **réaction vers l'avant**.

NOMBRE DE PALES D'UNE HELICE

Hélice bipale



Hélice quintupale



Hélice tripale



Hélice hexapale



Hélice quadripale



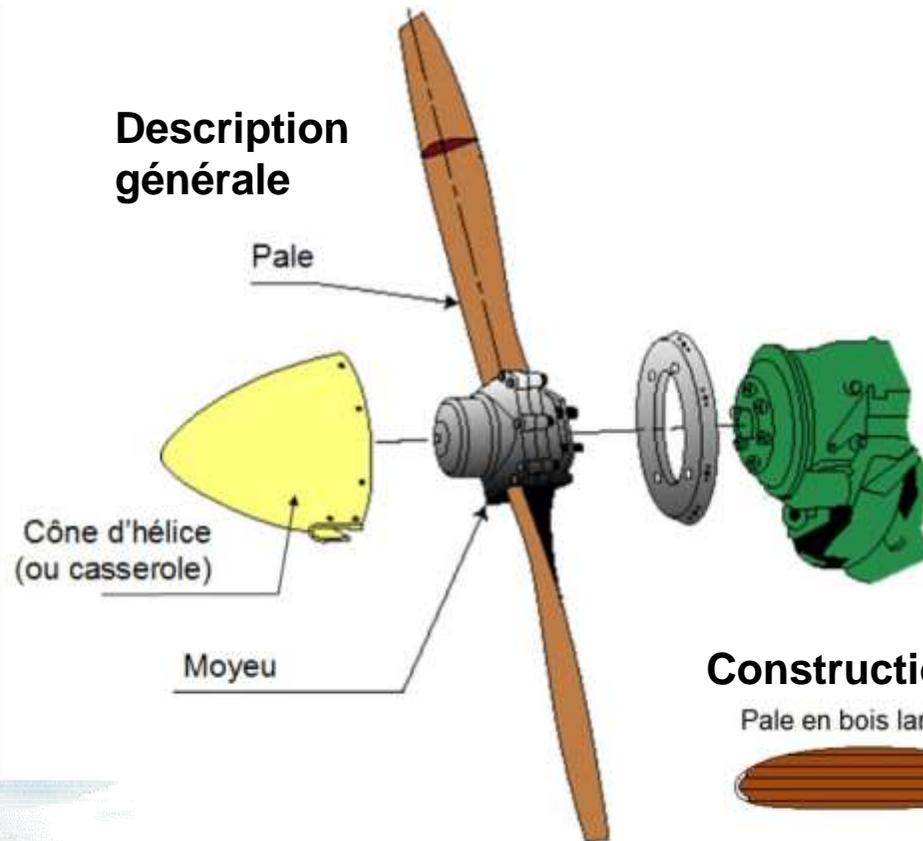
Hélice octopale



Augmenter le nombre de pales permet de **réduire l'encombrement** de l'hélice et la vitesse en bout de pale à puissance égale.

DESCRIPTION

Description générale



Construction des pales

Pale en bois lamellé collé



Pale en alliage léger



Pale en acier avec remplissage mousse



Pale en matériaux composites



FONCTIONNEMENT D'UNE HELICE

Chaque **pale** se comporte **comme une aile**, constituée de **profils aérodynamiques**.

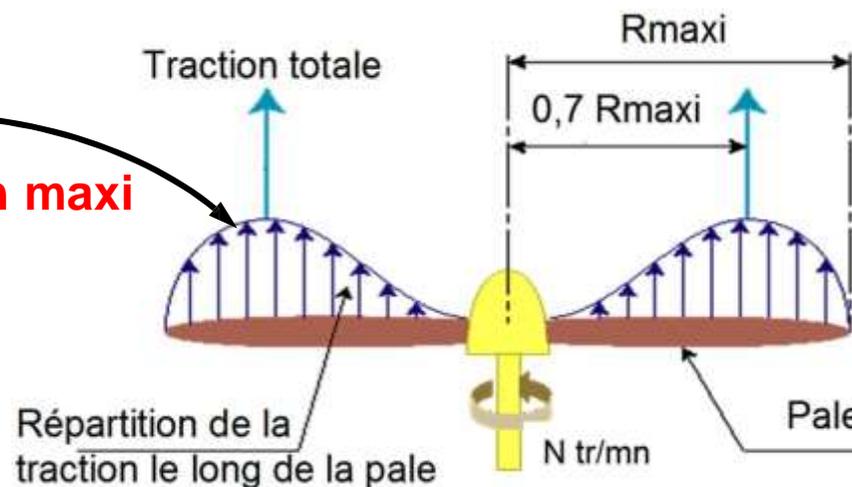
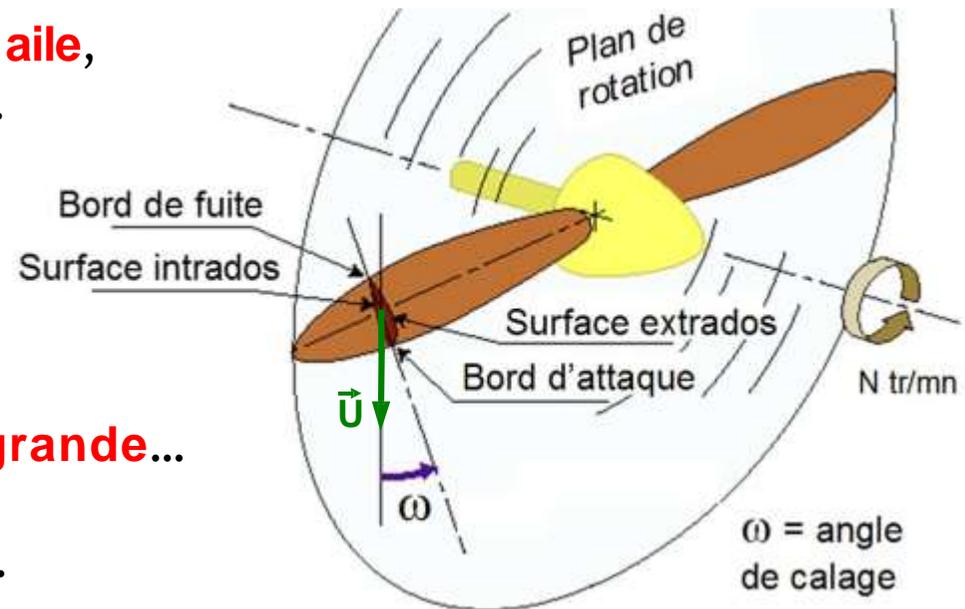
La **rotation de l'hélice** communique à tous ces profils une **vitesse** de déplacement.

Plus le profil est **éloigné du moyeu**, plus sa **vitesse U** de déplacement est **grande...**
...et plus les **forces aérodynamiques** (liées au carré de la vitesse) sont **grandes**.

Toutefois, en **extrémité de pale** on trouve, comme à l'extrémité d'une aile, un tourbillon marginal entraînant une **diminution des forces aérodynamiques**.

La **répartition de la traction** le long des pales a donc le profil suivant

Le rayon correspondant à **$0,7 \times$ rayon maxi** est appelé "**rayon de référence**".
C'est là que se produit l'essentiel de la traction.

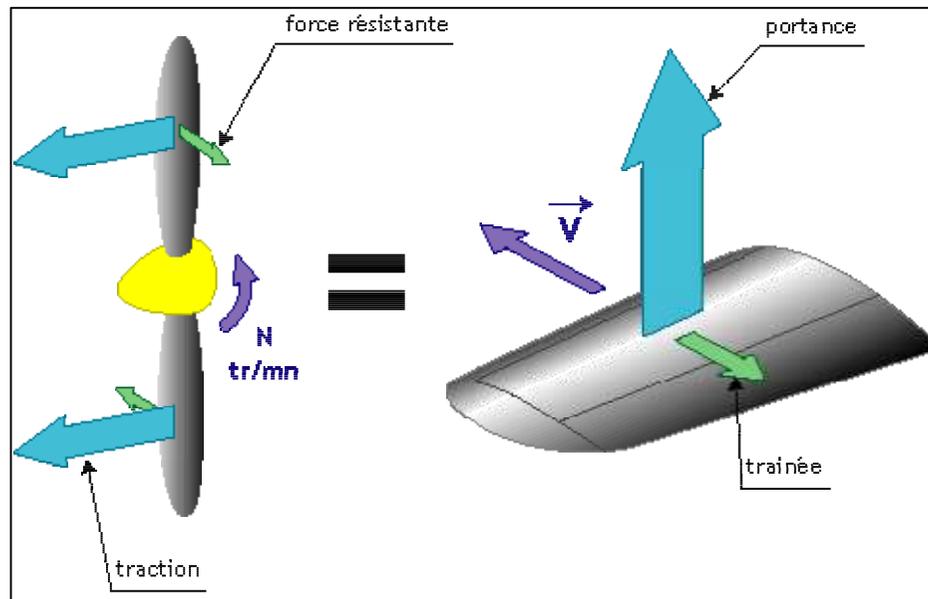
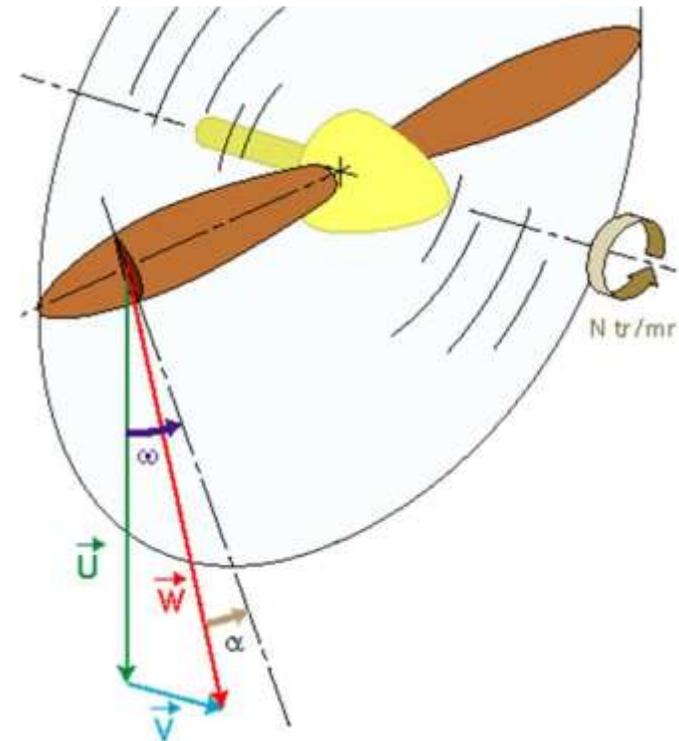


FONCTIONNEMENT D'UNE HELICE

Pour chaque profil aérodynamique, la vitesse \vec{U} due à la rotation de l'hélice se combine avec la vitesse \vec{V} d'avancement de l'avion.

La **vitesse** de déplacement **du profil par rapport à l'air** environnant est donc la résultante $\vec{W} = \vec{U} + \vec{V}$.

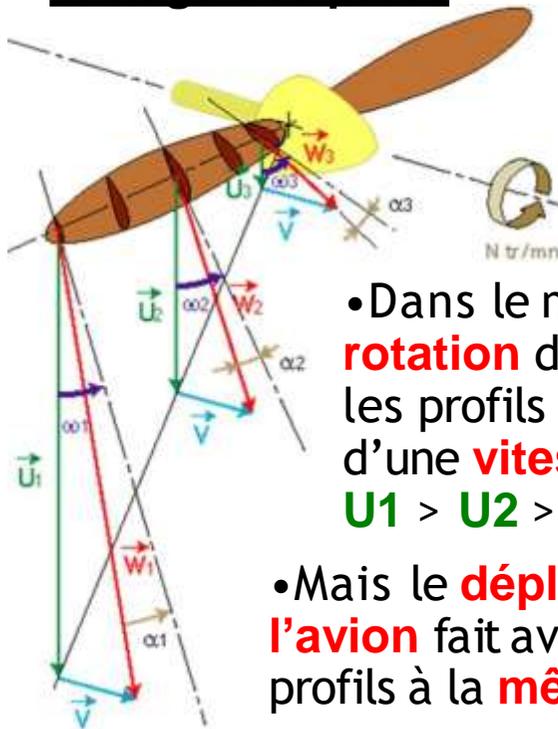
La corde du profil fait un **angle α** avec la vitesse \vec{W} . C'est l'angle d'**incidence**. **Cet angle détermine** la portance du profil et donc **la traction de l'hélice**.



La pale d'hélice se comporte comme une aile d'avion

GEOMETRIE D'UNE HELICE

• Vrillage des pales :



• Dans le mouvement de **rotation** de l'hélice, tous les profils sont animés d'une **vitesse différente** $U1 > U2 > U3$.

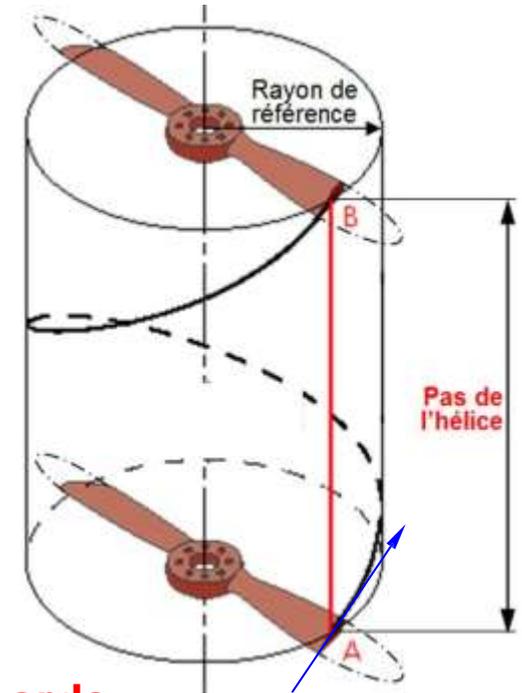
• Mais le **déplacement de l'avion** fait avancer tous les profils à la **même vitesse** V .

La vitesse résultante \vec{W} (*vitesse du profil par rapport à l'air environnant*) a une **direction différente** pour chaque profil.

Il faut vriller la pale pour que l'angle α d'incidence de chaque profil soit optimal (*celui qui donne la meilleure portance*).

• Pas de l'hélice :

Communiquons à l'hélice un **mouvement hélicoïdal** (*rotation et translation simultanées*) tel que les **profils** situés au niveau du rayon de **référence** se déplacent **dans la direction de leur corde**.



Lorsque l'hélice a fait **un tour complet**, elle s'est translaturée d'une longueur que l'on nomme « **pas de l'hélice** » (*ou « pas géométrique de l'hélice »*).

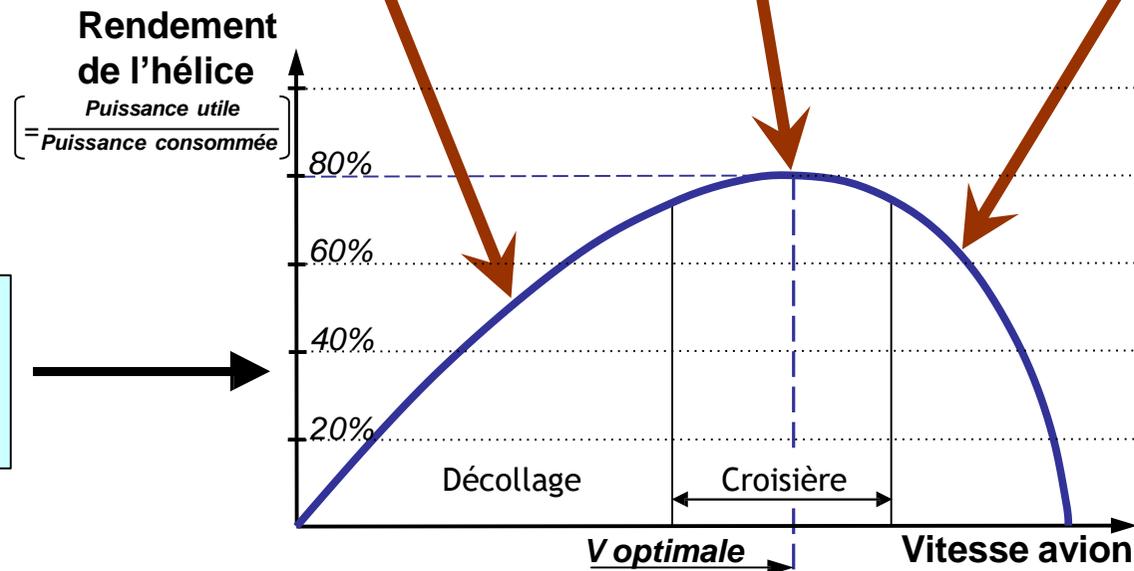
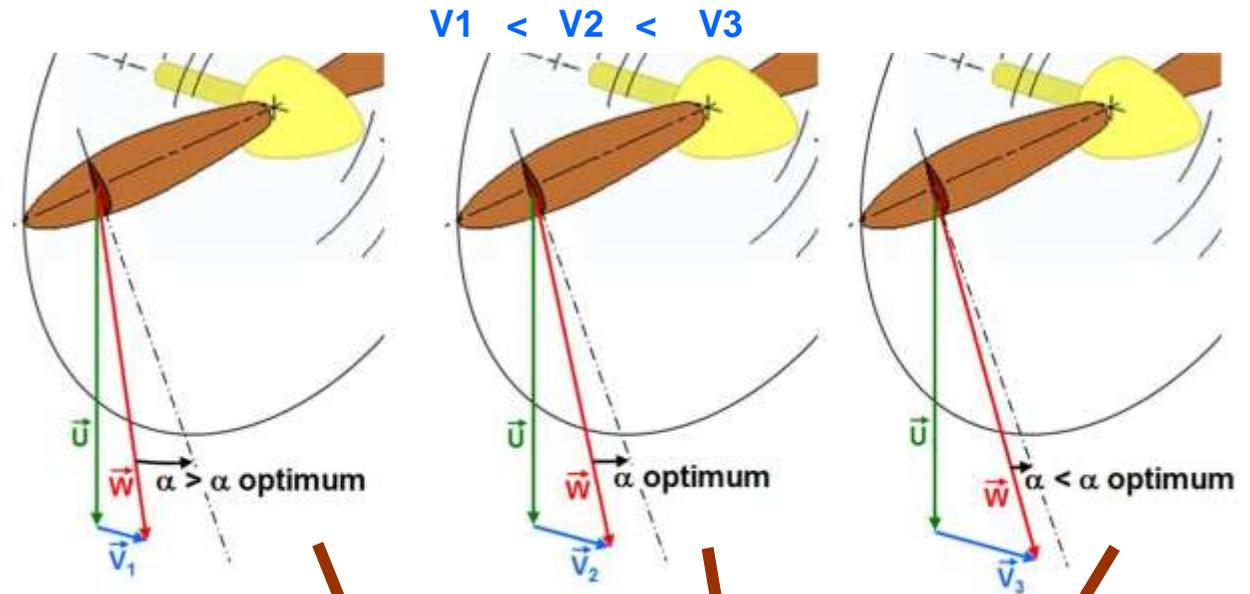
EFFICACITE D'UNE HELICE A PAS FIXE

En vol, maintenons la **vitesse de rotation** de l'hélice **constante** et faisons **varier** la **vitesse de l'avion**...

L'orientation de la vitesse résultante \vec{W} change et l'angle α d'incidence des profils de la pale varie.

Comme pour une aile d'avion, il existe un angle d'incidence **α optimum**.

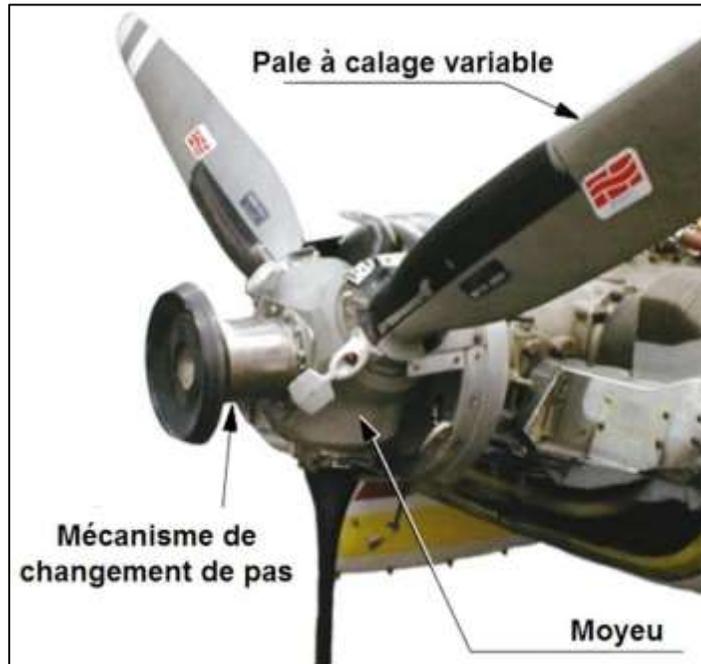
L'efficacité de l'hélice **dépend** donc de la **vitesse** de l'avion.



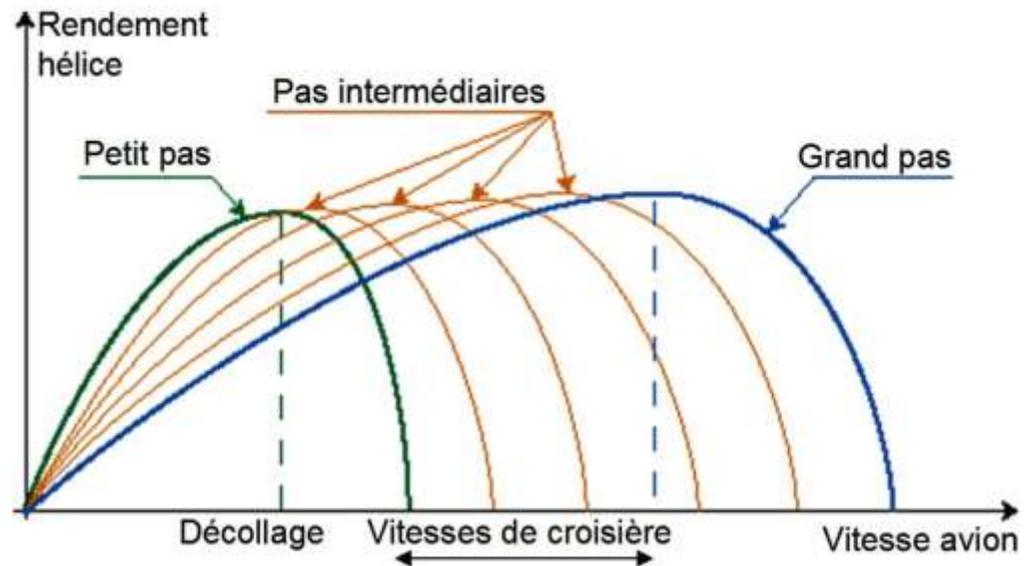
HELICES A PAS VARIABLE

(On dit aussi « hélice à calage variable »)

Sur ce type d'hélices, un mécanisme permet de faire pivoter les pales de façon à **modifier** leur angle de **calage** et donc le **pas** de l'hélice.



On peut ainsi **adapter le pas** de l'hélice à **chaque phase** du vol pour obtenir le **meilleur rendement**.



Se souvenir...

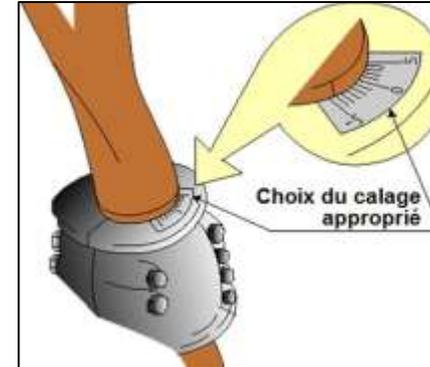
Petite vitesse → Petit pas

Grande vitesse → Grand pas

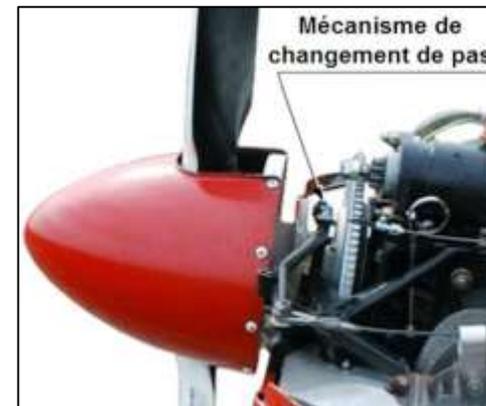
HELICES A PAS VARIABLE

Selon le type d'hélice à pas variable, le **changement de pas** peut être...

- uniquement possible au **sol**, hélice **immobile** : Dans ce cas, le calage des pales est choisi en fonction des besoins du prochain vol (*petit pas pour privilégier les performances de décollage ; grand pas pour privilégier les performances en croisière*).



- possible au **sol** et en **vol**, hélice **tournant** : Commandé **directement** par le pilote.



- possible au **sol** et en **vol**, hélice **tournant** : Commandé par un **automatisme** qui agit sur le calage des pales pour **maintenir** la **vitesse de rotation** à la valeur demandée par le pilote.

Hélices « **Constant speed** » voir planche suivante...

FONCTIONNEMENT DES HELICES « CONSTANT SPEED »

Le pilote **choisit la vitesse de rotation** de l'hélice (et du moteur) en positionnant la manette hélice (manette **bleue**).



Le système **compare**, en permanence, la **vitesse de rotation** de l'hélice avec la **consigne** donnée par le pilote.

- Si la vitesse de rotation est **inférieure à la consigne**, le système **réduit** automatiquement **le pas de l'hélice**, pour faciliter la travail du moteur qui peut ainsi **rétablir sa vitesse de rotation**.
- Si la vitesse de rotation est **supérieure à la consigne**, le système **augmente** automatiquement **le pas de l'hélice**, pour augmenter la charge du moteur qui va ainsi **rétablir sa vitesse de rotation**.

Le pilote contrôle :

- La **vitesse de rotation** avec la manette **bleue**.
- La **puissance** délivrée par le moteur avec la manette de gaz (*contrôle de la **pression d'admission***).

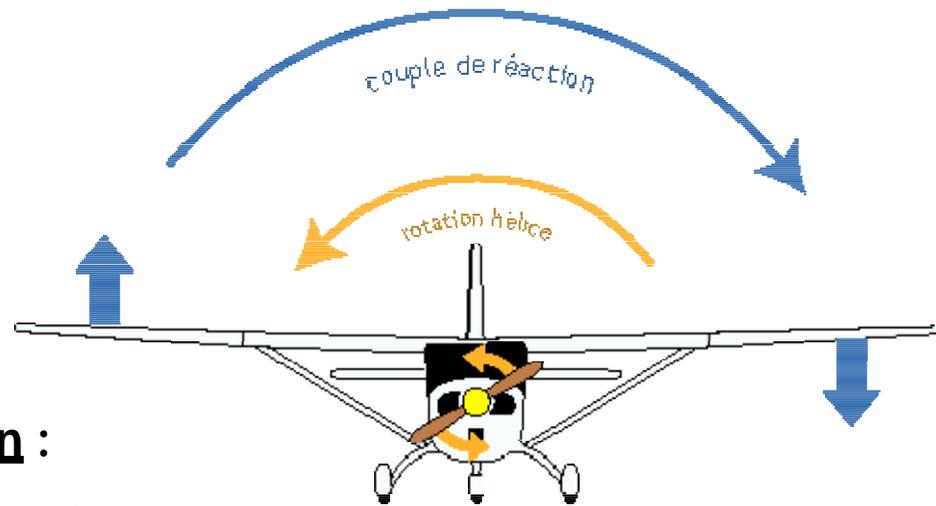


LES EFFETS MOTEUR (dus à la rotation de l'hélice)

1- Le couple de réaction :

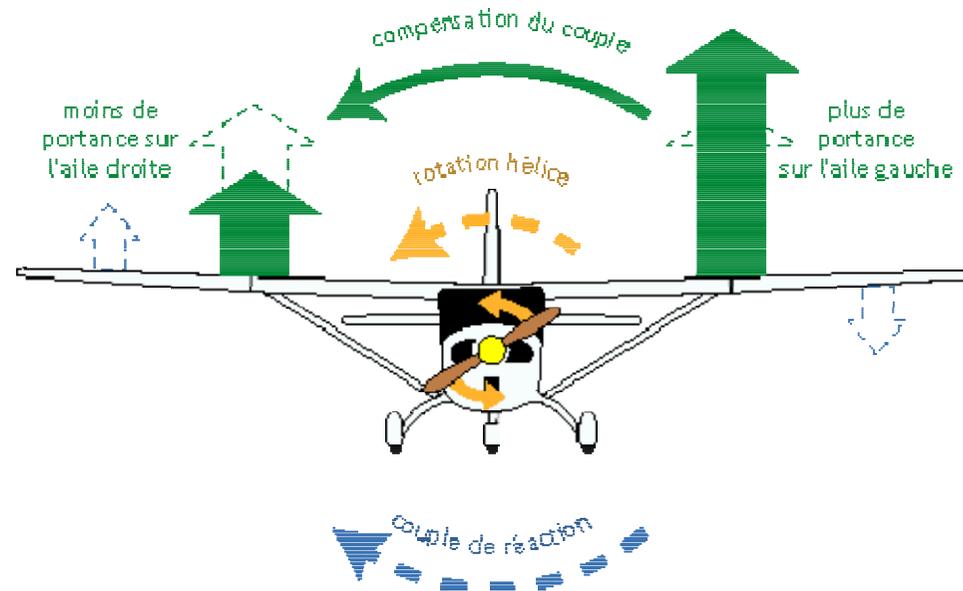
L'avion, par l'intermédiaire du moteur, fait tourner l'hélice dans un sens.

Par **réaction**, l'hélice a tendance à faire tourner l'avion **dans l'autre sens**.



Compensation du couple de réaction :

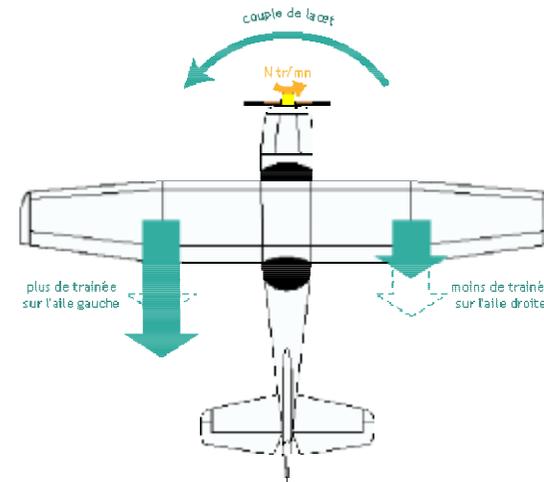
Un **compensateur** placé sur un **aileron** est un moyen de **contrer** le couple de réaction.



LES EFFETS MOTEUR (dus à la rotation de l'hélice)

2- Le couple de lacet :

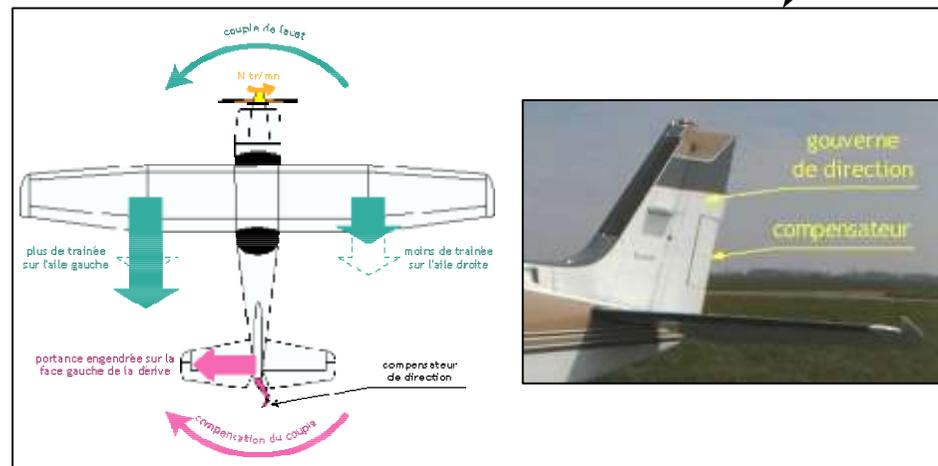
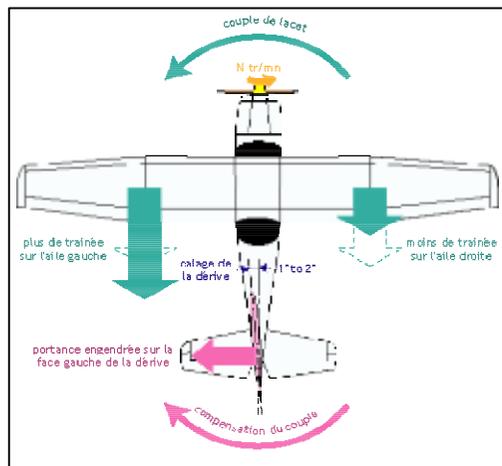
La **différence de portance** entre les 2 demi-ailes (voir planche précédente) crée une **différence de traînée**, qui a tendance à faire tourner l'avion autour de l'axe de **lacet**.



Compensation du couple de lacet :

Un **compensateur** placé sur la **gouverne de direction** est un moyen de **contrer** le couple de lacet.

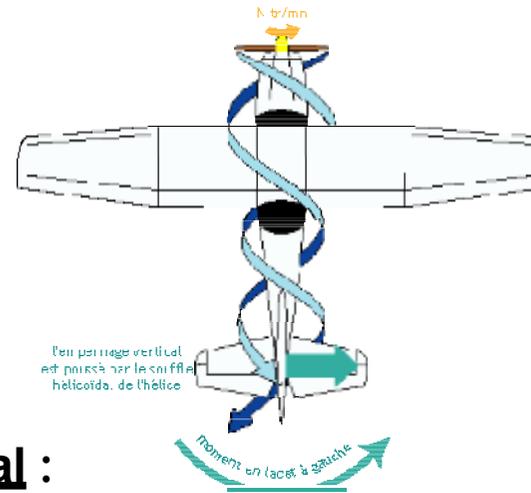
Parfois le constructeur donne un **petit angle** à la **dérive** par rapport au plan de symétrie de l'avion.



LES EFFETS MOTEUR (dus à la rotation de l'hélice)

3- Le souffle hélicoïdal :

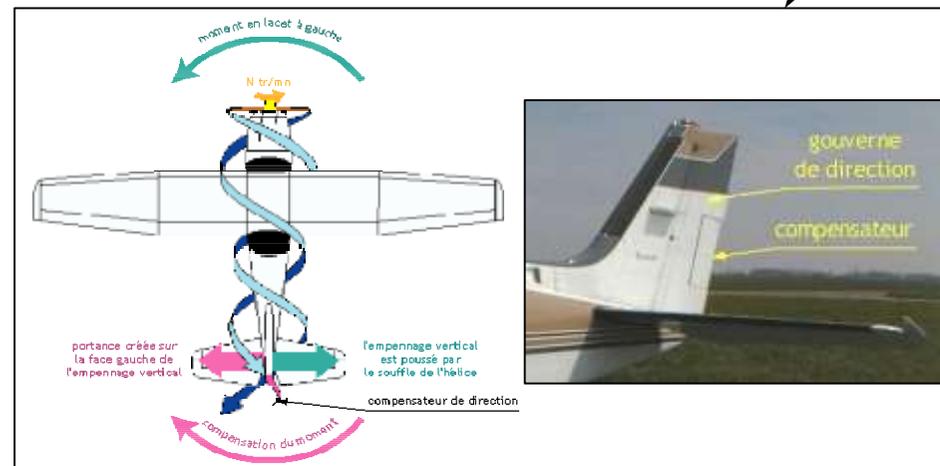
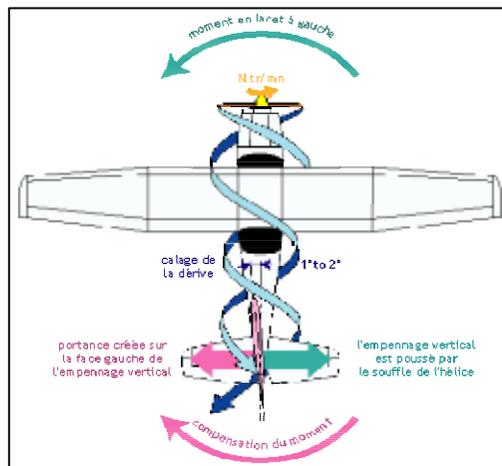
Le **souffle hélicoïdal** de l'hélice vient attaquer la **dérive** de façon **dissymétrique**, ce qui a tendance à faire tourner l'avion autour de l'axe de **lacet**.



Compensation de l'effet du souffle hélicoïdal :

Un **compensateur** placé sur la **gouverne de direction** est un moyen de **contrer** l'effet du souffle hélicoïdal.

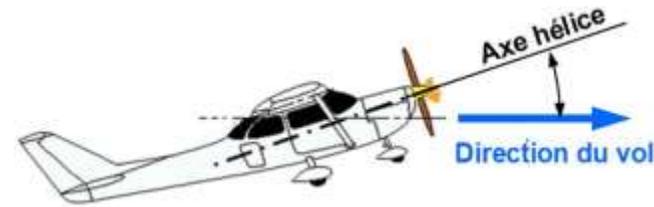
Parfois le constructeur donne un **petit angle** à la **dérive** par rapport au plan de symétrie de l'avion.



LES EFFETS MOTEUR (dus à la rotation de l'hélice)

4- La traction dissymétrique de l'hélice :

A forte incidence (**vol lent**), l'axe de l'hélice est **oblique** par rapport à la direction du vol.



Cette obliquité entraîne une **dissymétrie** de **traction** de l'hélice.

Explication*** : Du fait de cette obliquité, le vecteur vitesse (dû à la seule rotation de l'hélice) de la pale descendante (\vec{U}_d) **bascule** vers l'**avant** alors que celui (\vec{U}_m) de la pale montante **bascule** vers l'**arrière**. L'angle \vec{U}_d, \vec{V} devient **obtus**, et l'angle \vec{U}_m, \vec{V} **aigu**.

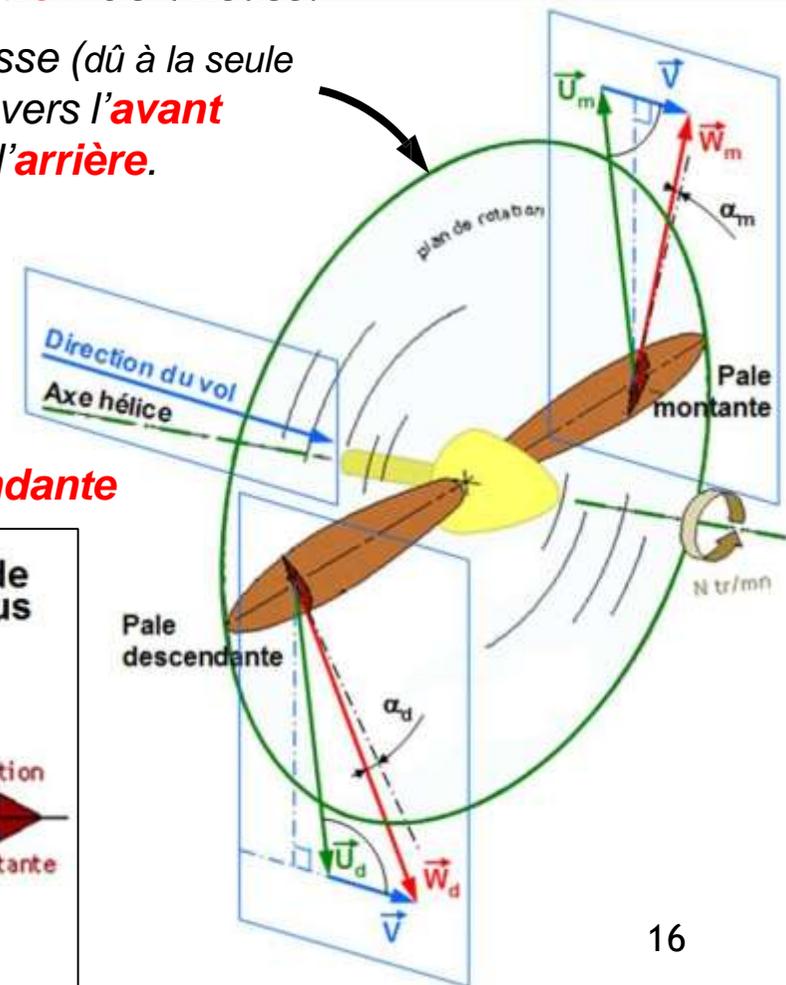
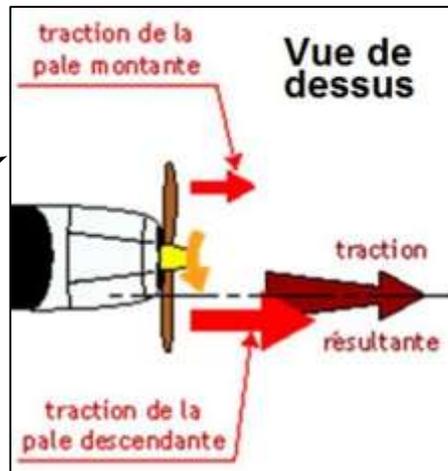
En conséquence :

- La **vitesse** par rapport à l'air (\vec{W}_d) d'un profil de la pale **descendante** devient **supérieure** à celle (\vec{W}_m) du même profil de la pale **montante**.

- L'angle d'**incidence** (α_d) d'un profil de la pale **descendante** devient **supérieur** à celui (α_m) du même profil de la pale **montante**.

Ces **2 raisons** entraînent...

Une **traction** de la pale **descendante supérieure** à celle de la pale **montante**



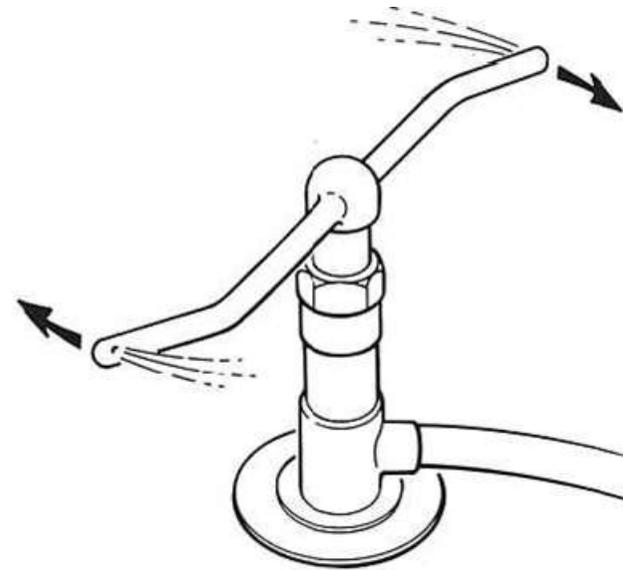
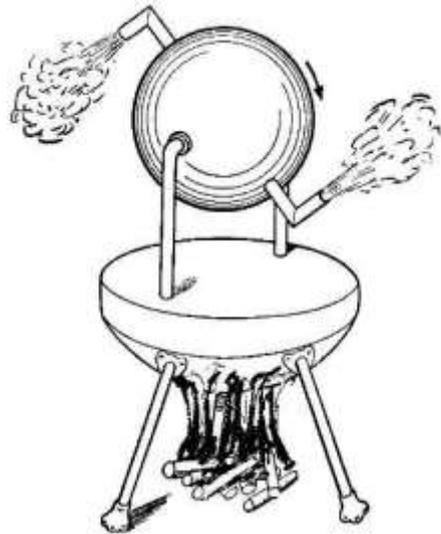
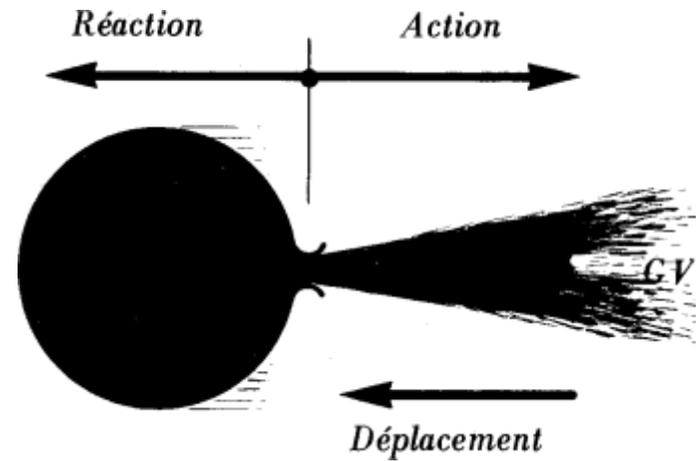
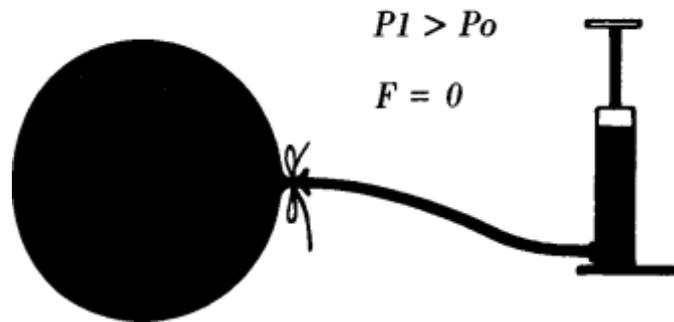
***Nota : Explication donnée pour information. Elle n'est pas à connaître pour le BIA.

Propulsion par réaction & Turbomachines

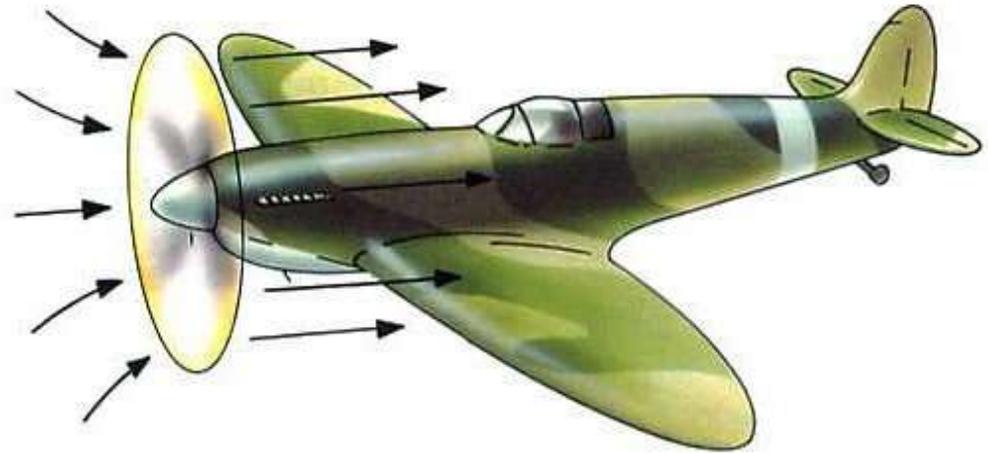


Le principe de la réaction

PROPULSION PAR REACTION

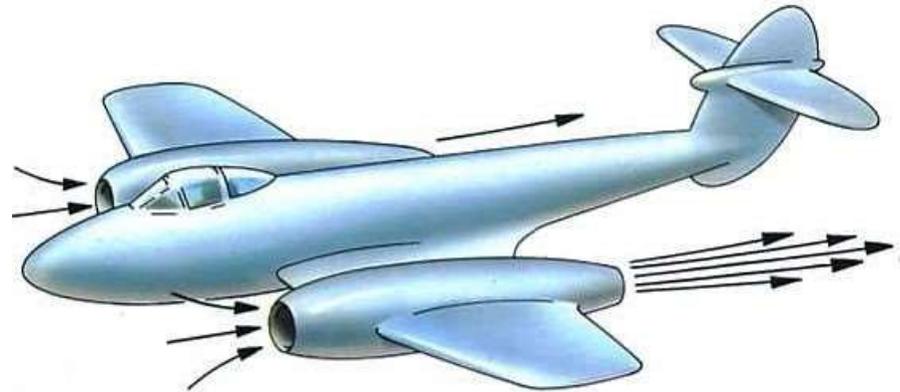


La poussée



Grand débit et faible accélération

$$\mathbf{F} = \mathbf{D} (\mathbf{V}_e - \mathbf{V}_o)$$



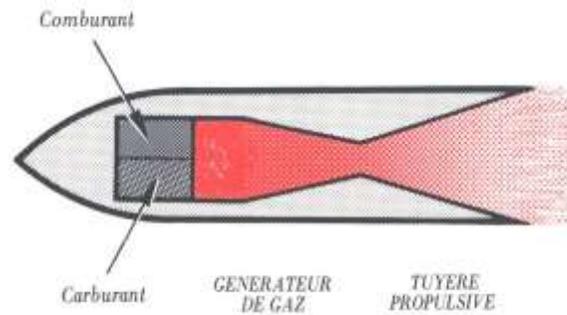
Petit débit et forte accélération

Le moteur fusée

PROPULSEUR A REACTION DIRECTE (fournissant de l'énergie cinétique : poussée)

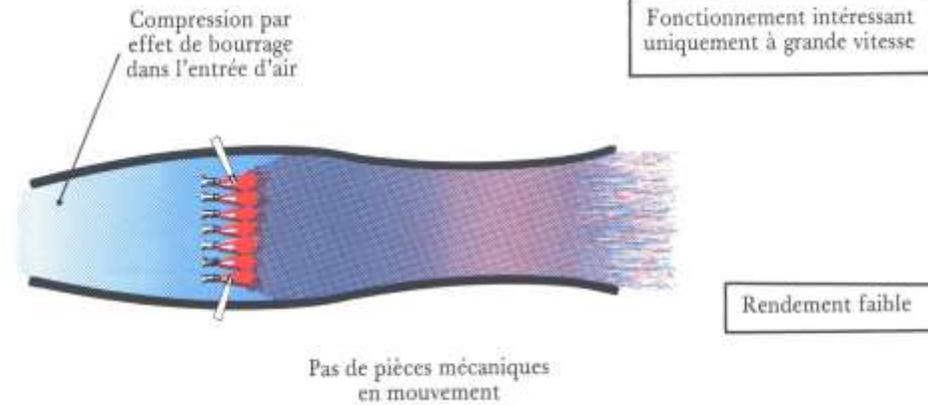
- La fusée

La fusée qui n'utilise pas l'air comme comburant peut fonctionner dans le «vide».



Le stato-réacteur

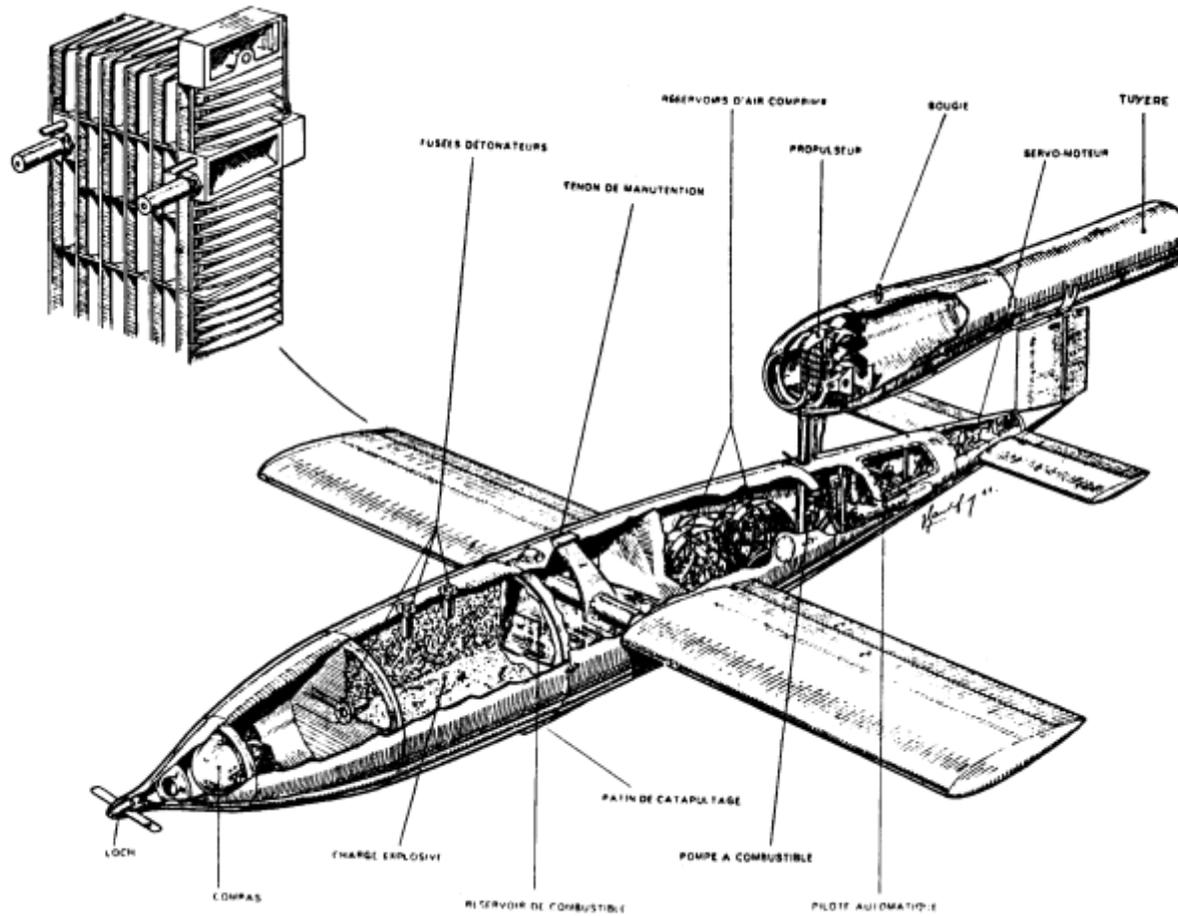
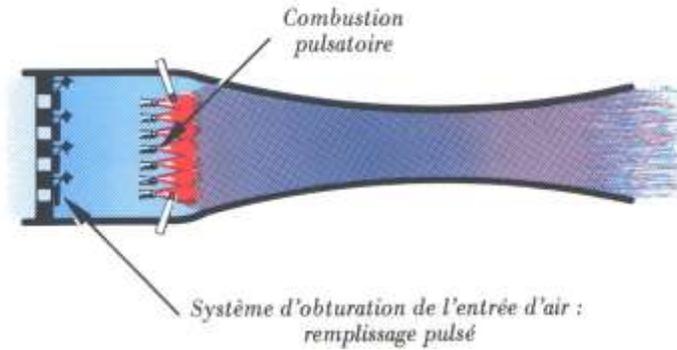
● Le stato-réacteur



Le pulso-réacteur

● Le pulso-réacteur

Principe identique
au stato-réacteur



J.C. 17 318

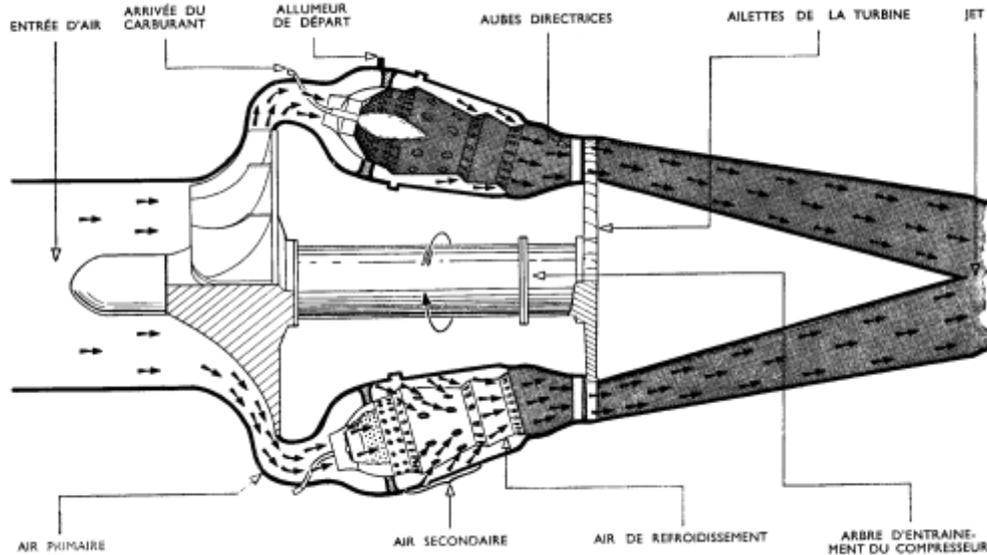
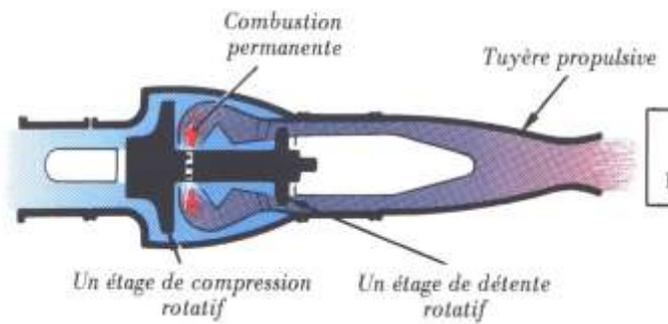
Bombe volante allemande "V1".

Bombe volante V1

Le turbo-réacteur

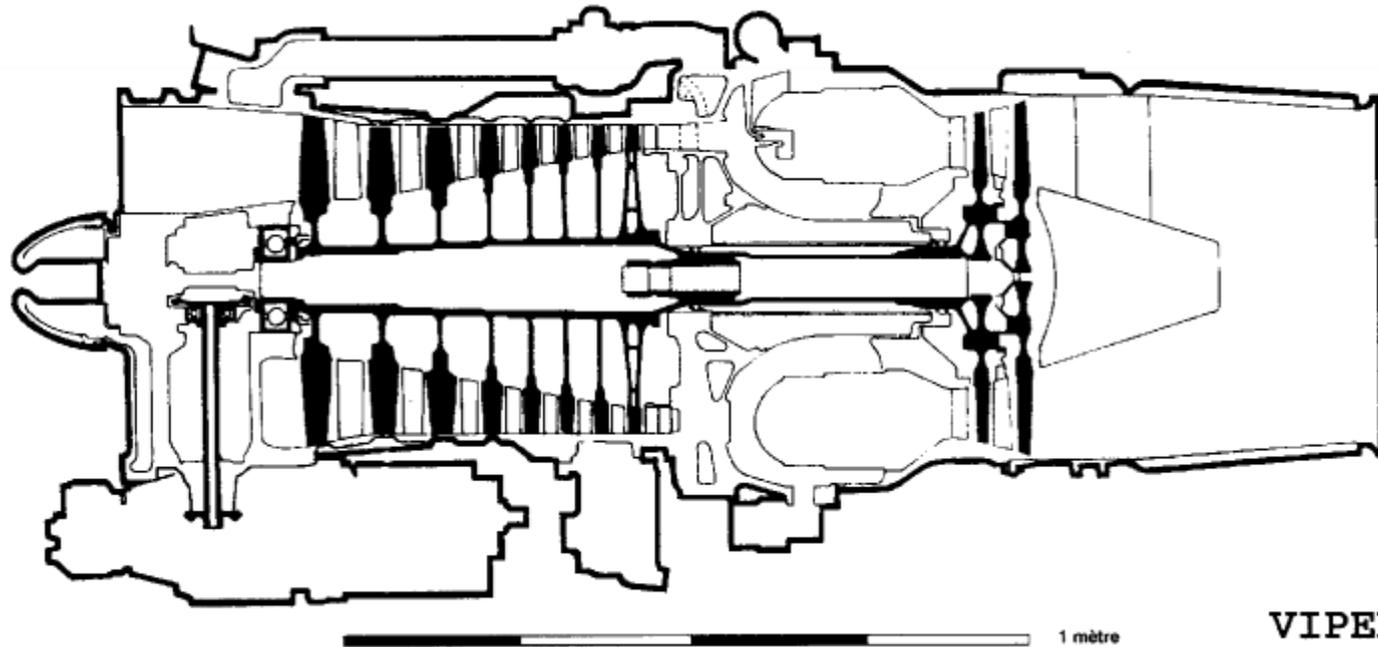
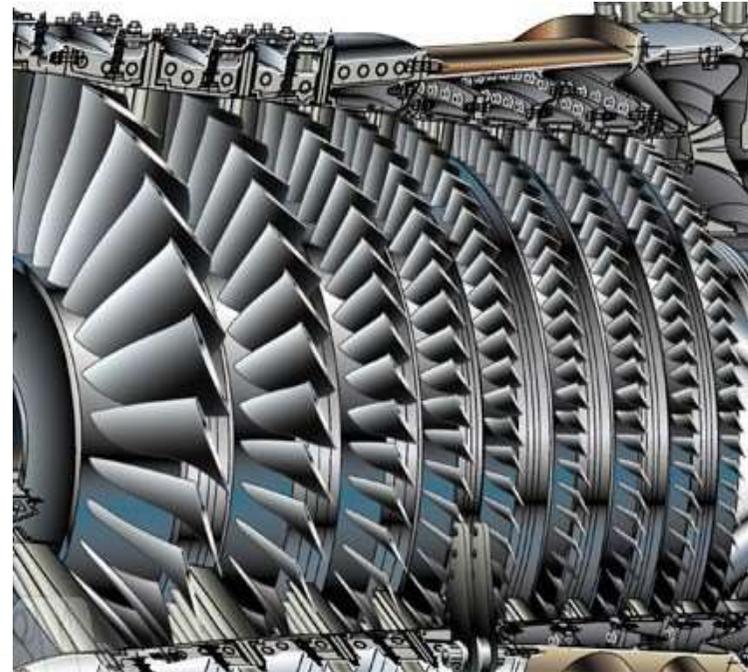
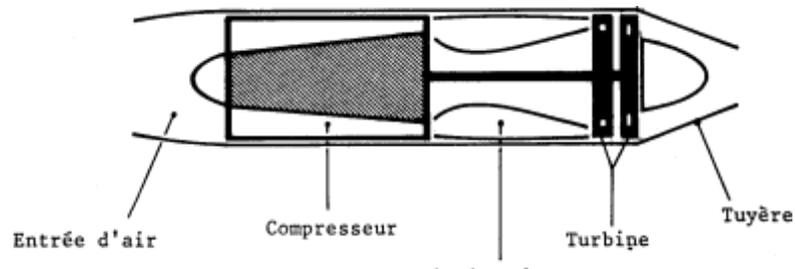
Simple flux
Simple corps

● Le turbo-réacteur



Le turbo-réacteur

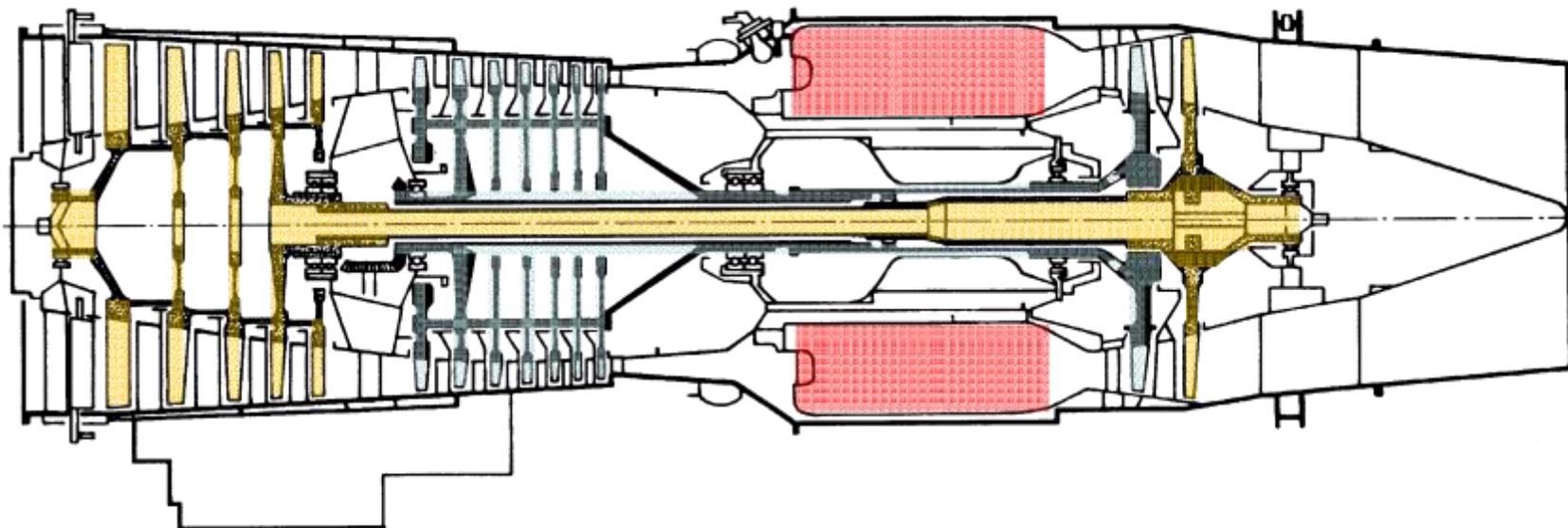
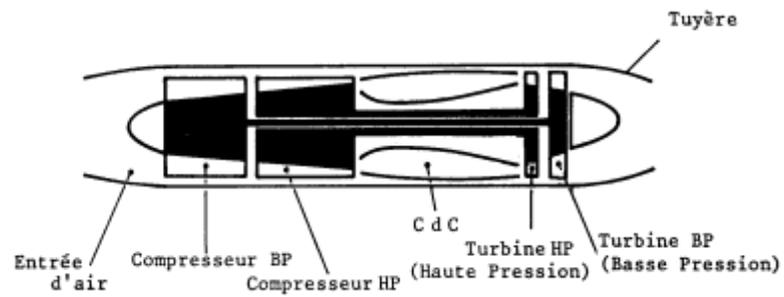
Simple flux
Simple corps



VIPER

Le turbo-réacteur

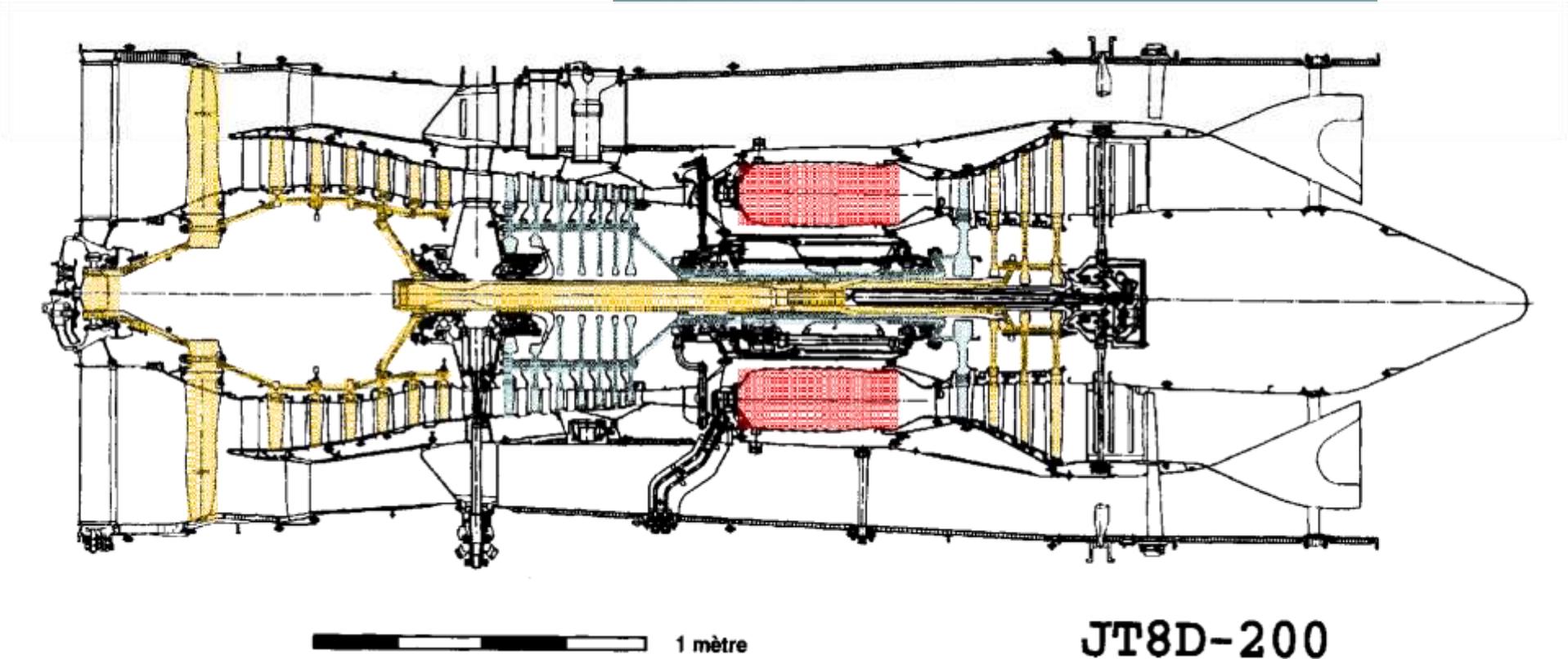
Simple flux
Double corps



Le turbo-réacteur

Double flux
Double corps

Boeing 727

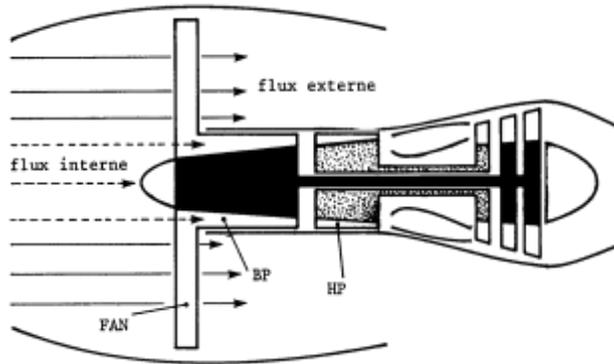


Le turbo-réacteur

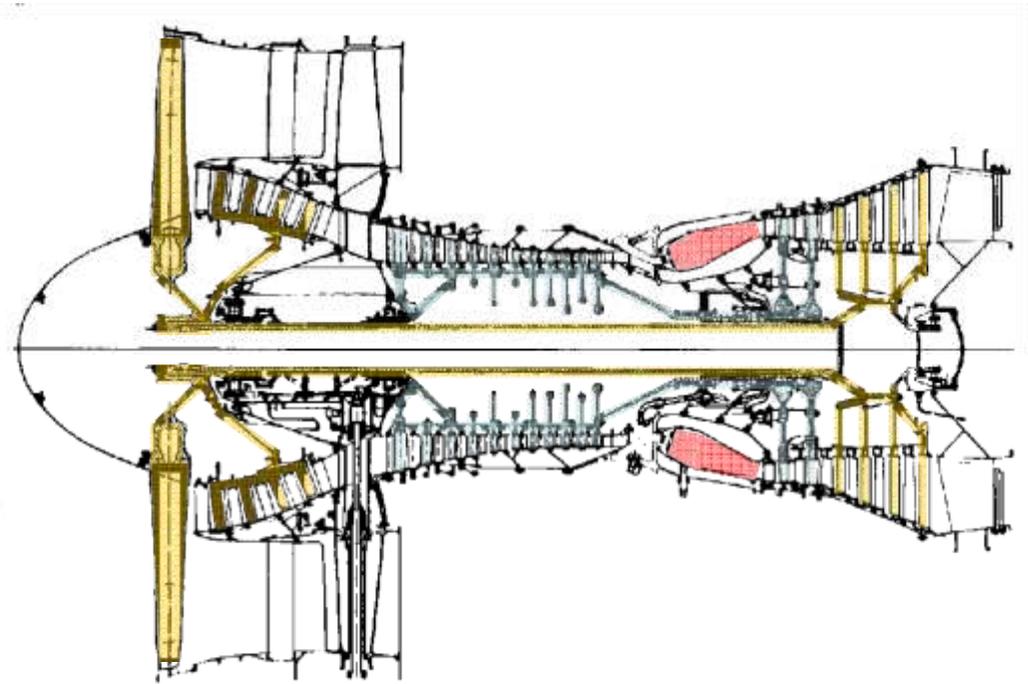
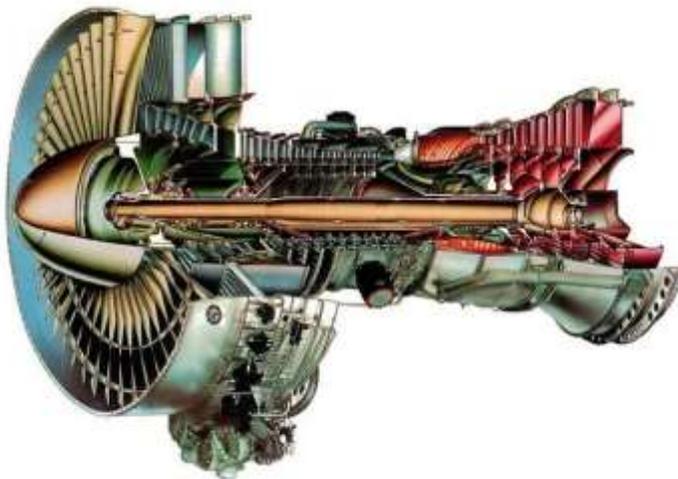
Double flux
Double corps
Grand débit



Boeing 747

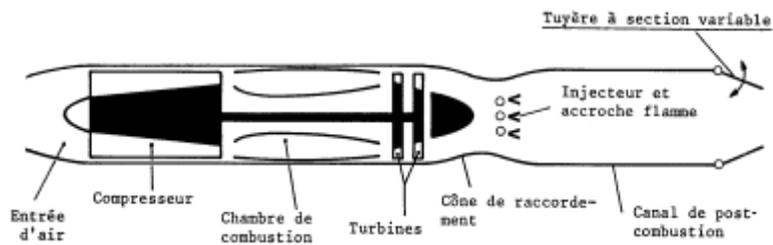


JT9D-20 TURBOFAN ENGINE

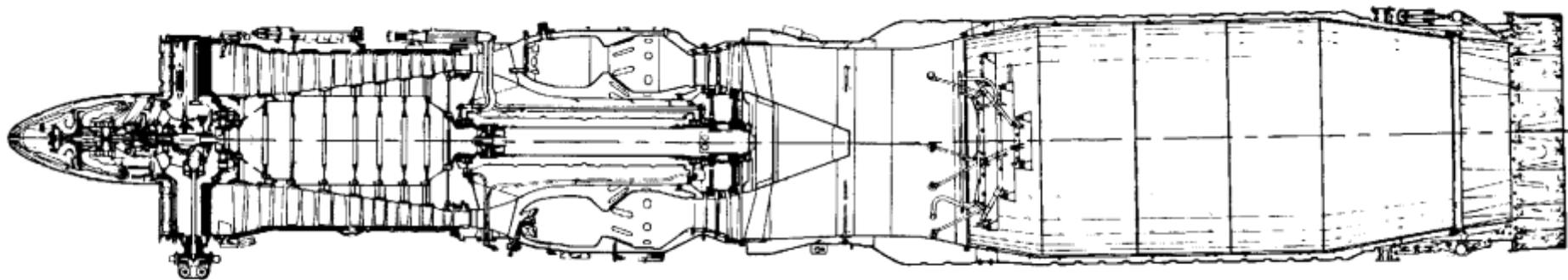


Le turbo-réacteur

Simple flux
Simple corps
avec post-combustion



Mirage F1

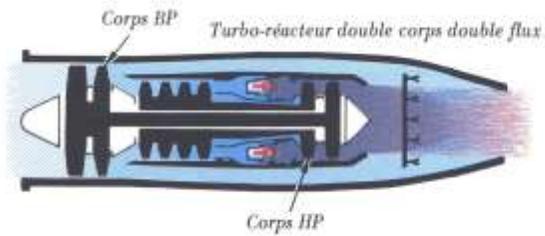


1 mètre

ATAR 9K50

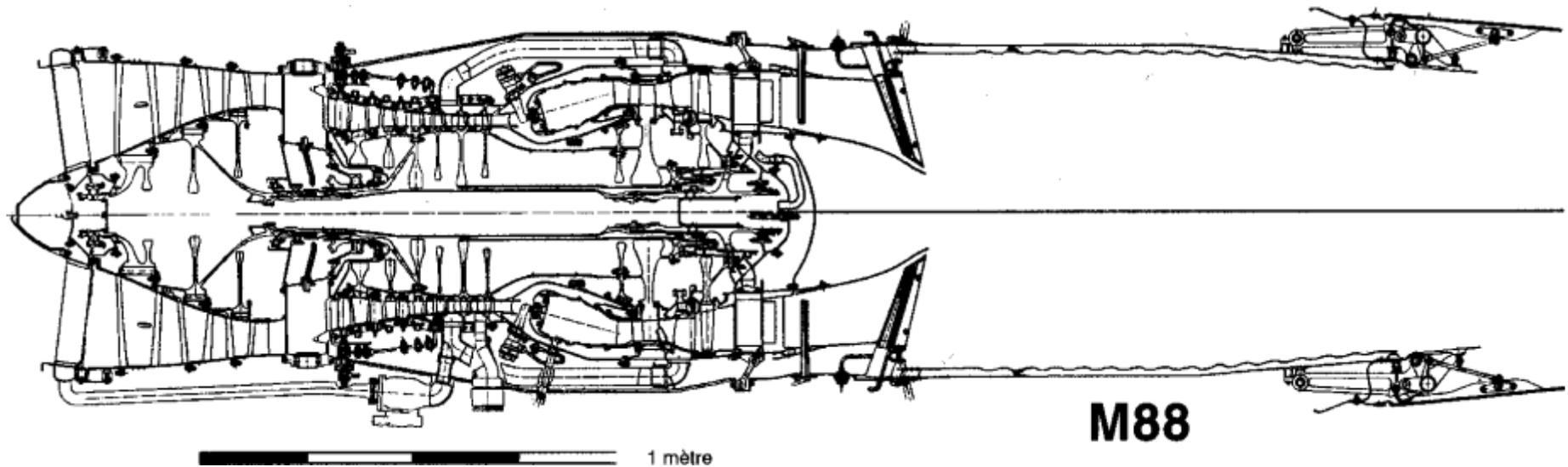
Le turbo-réacteur

Double flux
Double corps
avec post-combustion



- . Diminution de poids
- . Diminution de longueur.
- . Bonne adaptation compresseur-turbine.

Il existe aussi des triple-corps

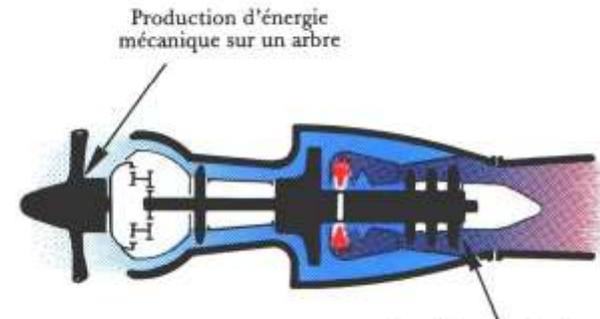


Le turbo-propulseur

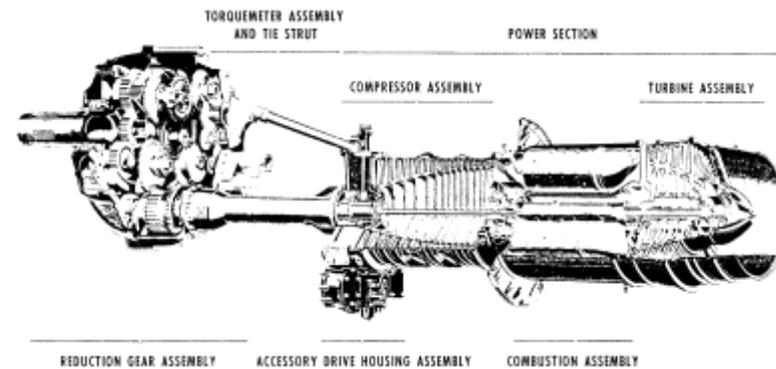
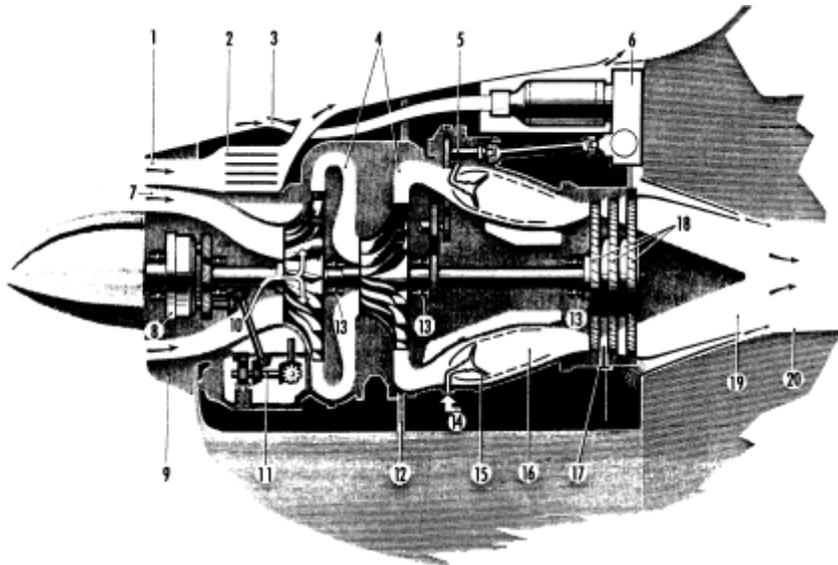
à turbine liée



● Turbo-propulseur



GTP turbine liée La turbine entraîne le compresseur et aussi l'hélice par l'intermédiaire d'un réducteur



Le turbo-propulseur

à turbine libre

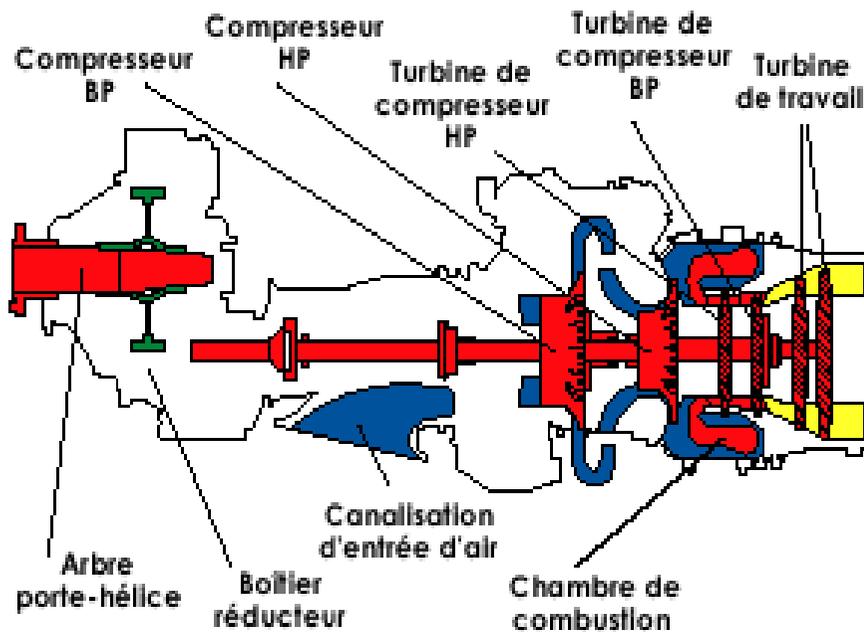
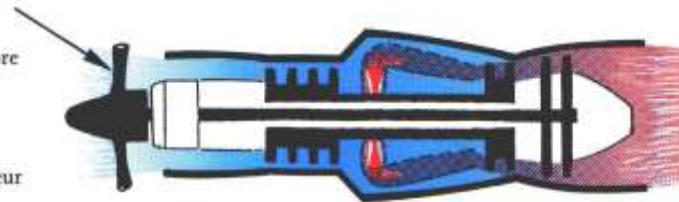
• Turbo-propulseur turbine libre

La prise de mouvement à l'avant impose un arbre co-axial ...

... ou plus rarement, un arbre de transmission extérieur

... ou une prise arrière moteur «retourné»

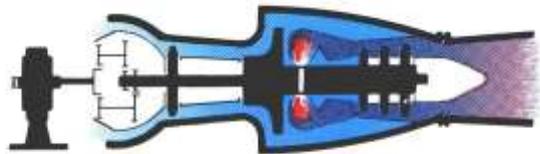
Même principe, mais l'hélice est entraînée par sa propre turbine



Le turbo-moteur à turbine liée

- Turbo-moteur

- Rotor hélicoptère
- Génératrice de courant électrique.

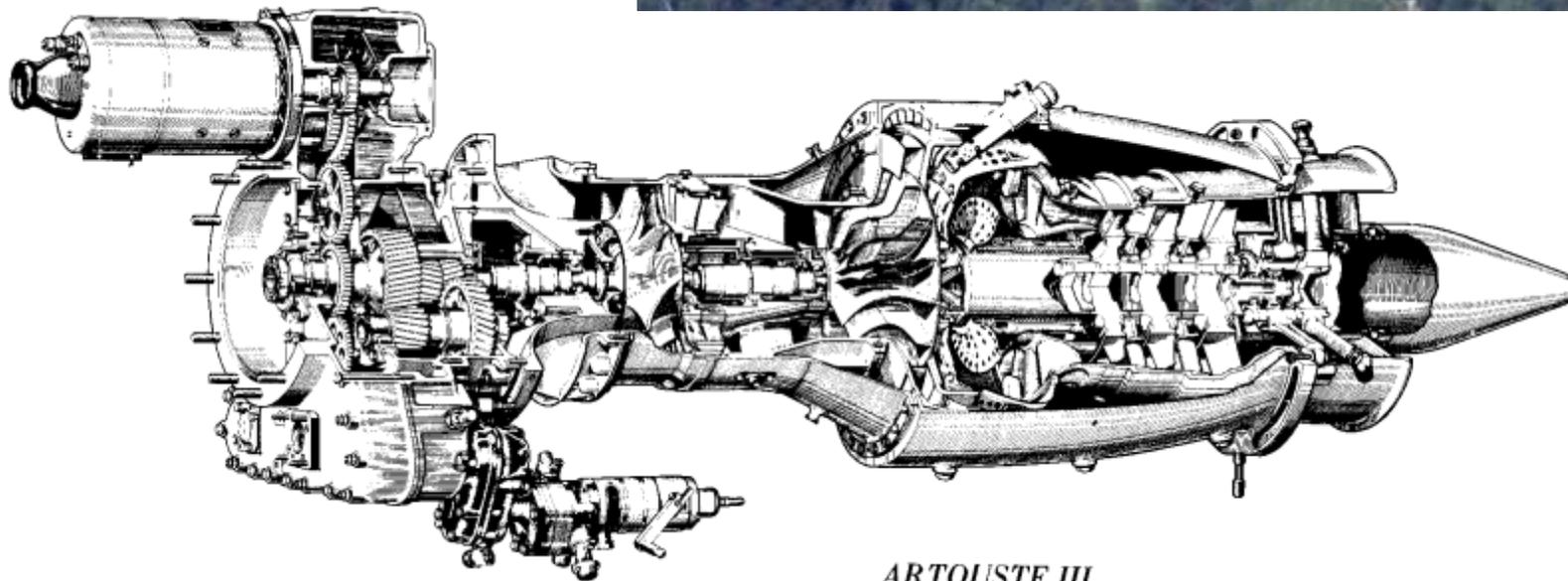


- Pompe hydraulique

*Turbo-moteur turbine liée
(ou à un arbre)*



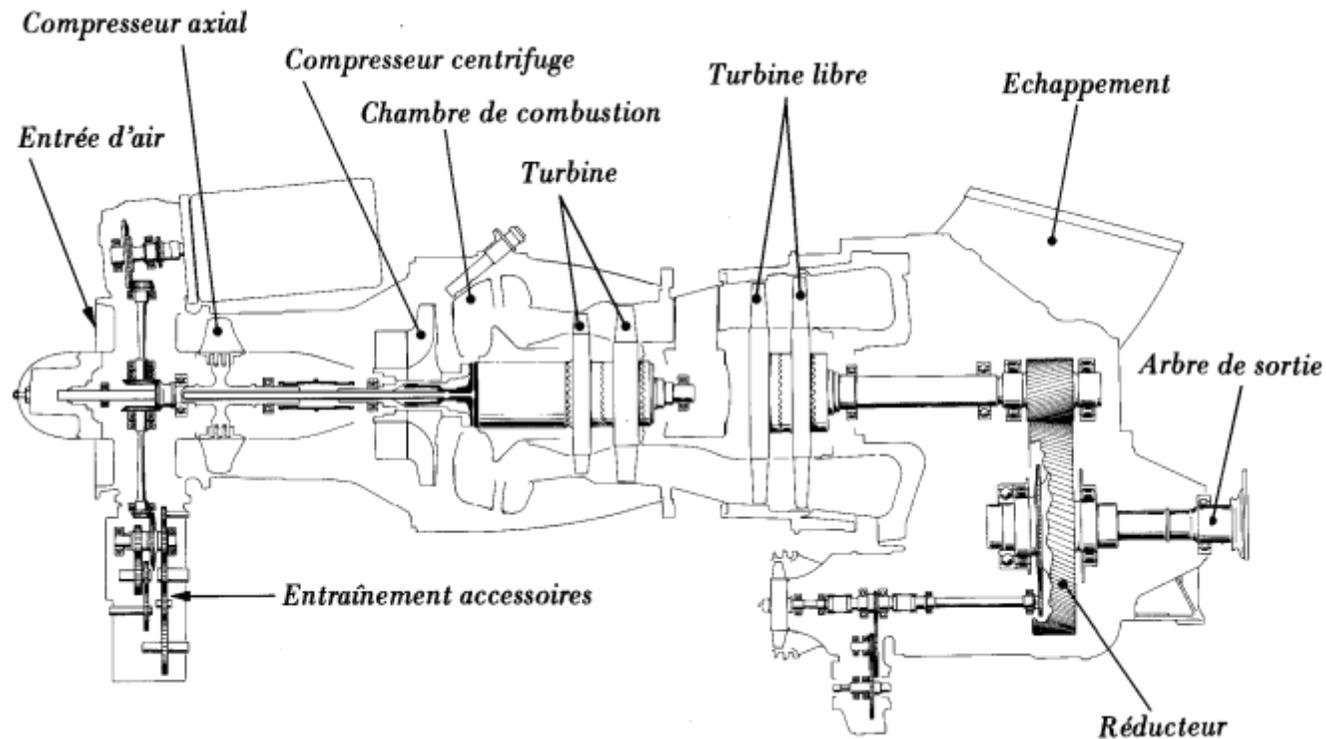
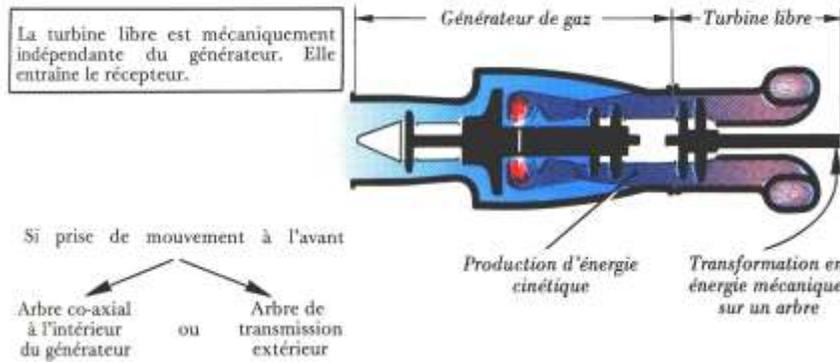
Alouette III



ARTOUSTE III

Le turbo-moteur à turbine libre

● Turbo-moteur turbine libre



CLASSIFICATION DES PROPULSEURS

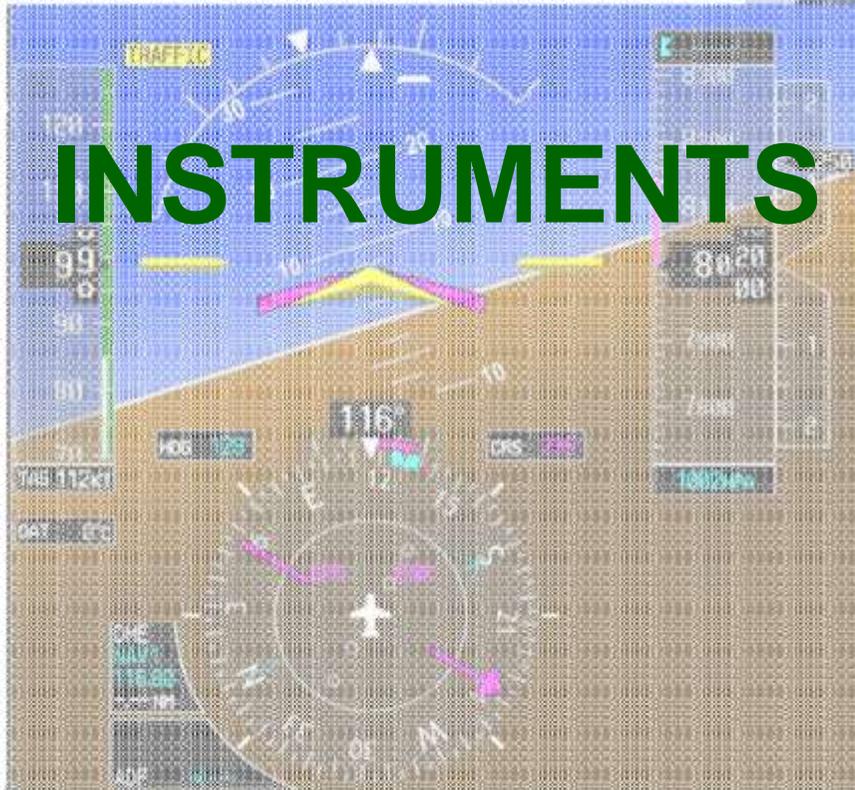
PROPULSEURS A REACTION DIRECTE **(sans hélice)**

- **Fusée**
- **Stato-réacteur**
- **Pulso-réacteur**
- **Turbo-réacteur (GTR)**
simple ou double flux
simple ou double corps
(avec ou sans PC)

PROPULSEURS A REACTION INDIRECTE (avec hélice ou rotor)

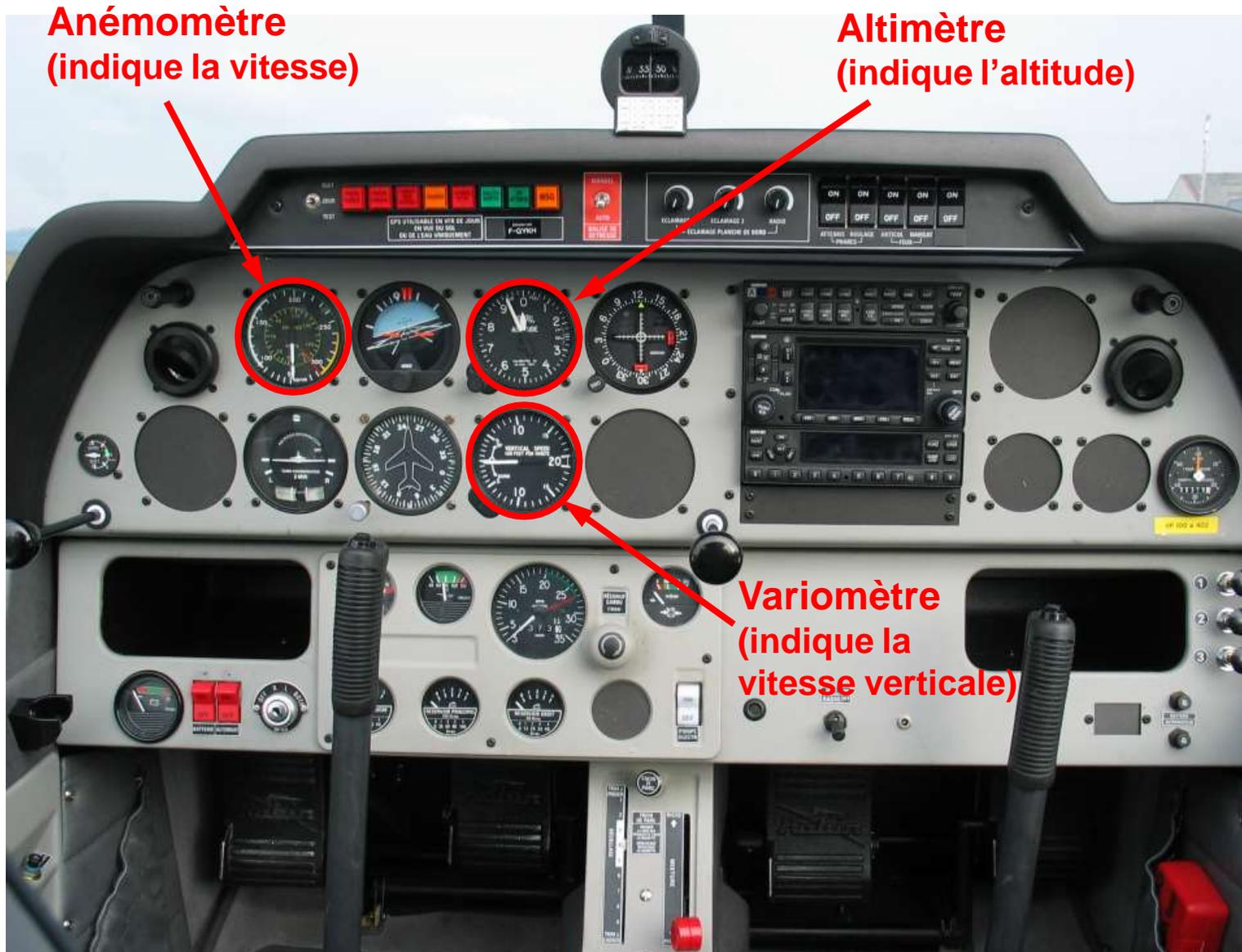
- **Moto-propulseur (GMP)**
(petits avions)
- **Turbo-propulseur (GTP)**
à turbine liée ou libre
(avions moyens et gros)
- **Turbo-moteur (GTM)**
à turbine liée ou libre
(hélicoptères)

INSTRUMENTS DE PILOTAGE

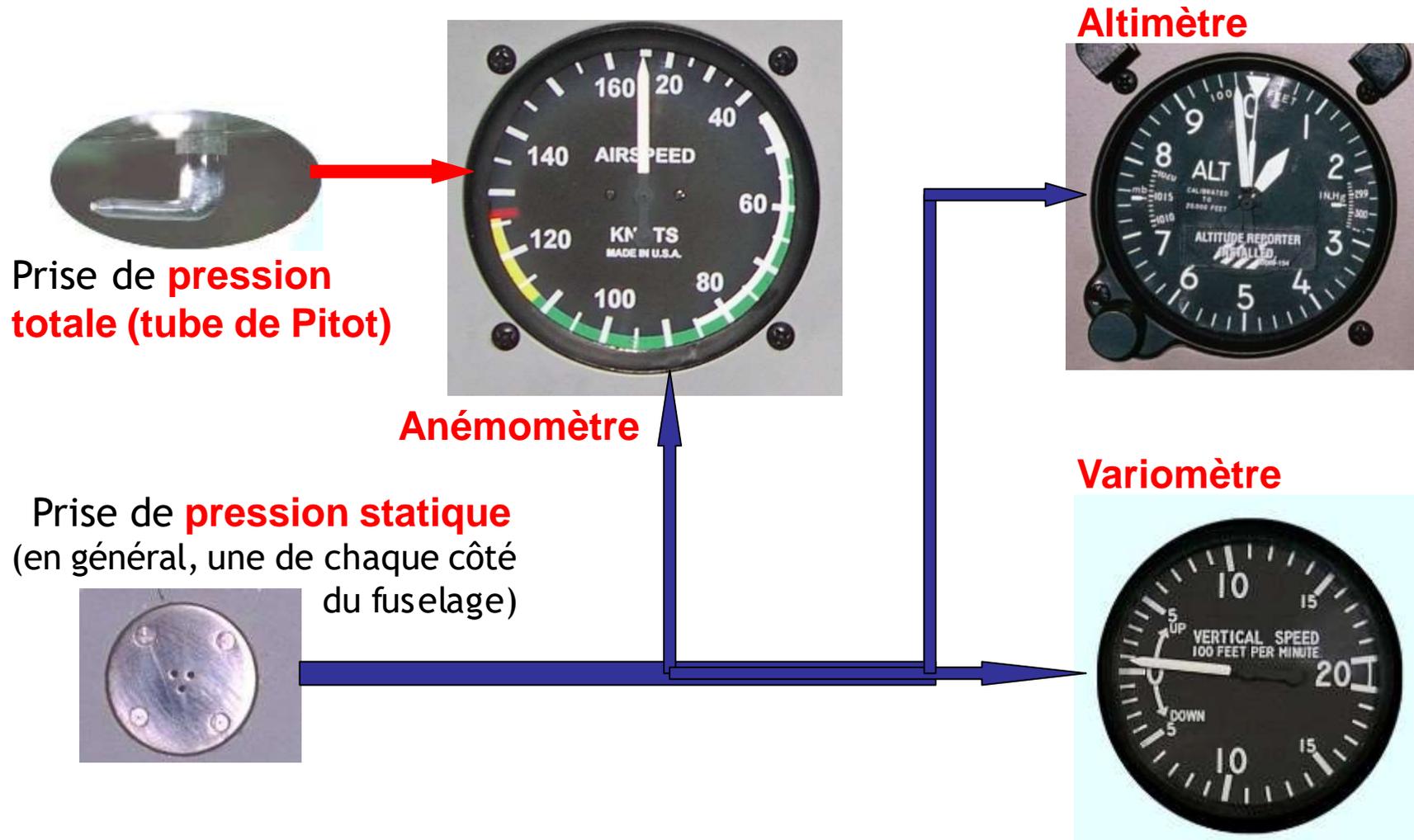


05A&C-V2

1- INSTRUMENTS PNEUMATIQUES



Circuit pneumatique



- L'**anémomètre** compare **pression totale** et **pression statique**.
- L'**altimètre** et le **variomètre** n'utilisent que la **pression statique**.

Anémomètre

Il traduit en **vitesse** l'écart entre la **pression totale** (issue du tube de Pitot) et la **pression statique** qui règne à l'altitude de vol (issue des prises statiques).

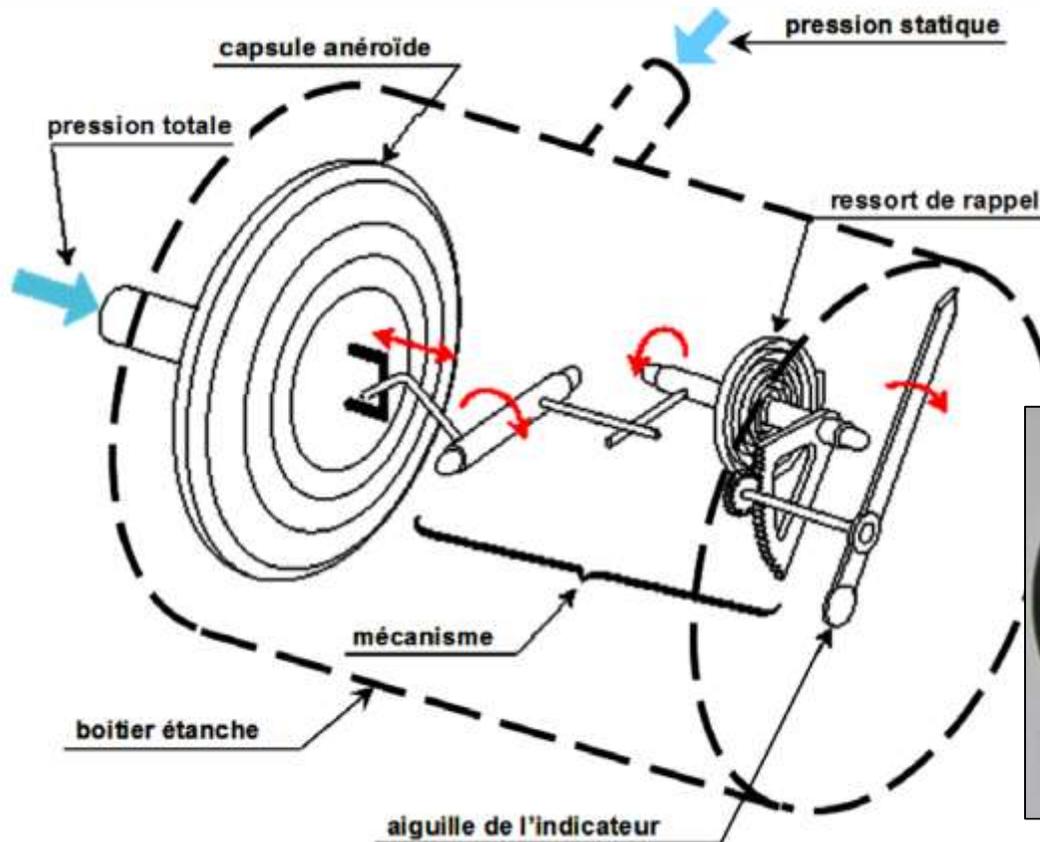
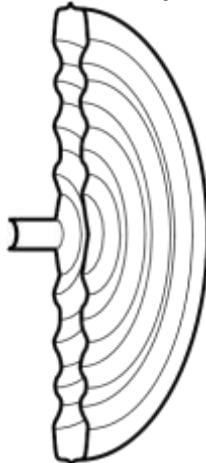
Application de la loi de Bernoulli : $P_t - P_s = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$

Le capteur est une **capsule « anéroïde »** (capsule métallique étanche déformable)

- reliée au tube de Pitot,
- et enfermée dans un boîtier étanche relié aux prises de pression statique.



Vue en coupe



Les déformations de la capsule dépendent de la différence $P_{totale} - P_{statique}$. Le mécanisme amplifie ces déformations et les transmet à l'aiguille.



Anémomètre



Problème ?

L'**indication de l'anémomètre dépend** de
 $P \text{ totale} - P \text{ statique} = \frac{1}{2}\rho V^2$
donc de ρ , c'est-à-dire **de l'altitude**.

L'anémomètre ne peut donc donner la
vitesse vraie qu'au niveau de la mer.

Ce n'est pas grave, au contraire :

Ce qui compte pour piloter c'est $\frac{1}{2}\rho V^2$...

... car la portance et la traînée dépendent, elles aussi, de $\frac{1}{2}\rho V^2$.

$(F_z = \frac{1}{2}\rho V^2 \cdot S \cdot C_z ; F_x = \frac{1}{2}\rho V^2 \cdot S \cdot C_x)$

Pour une même masse de l'avion, le **décrochage** en vol horizontal se produira donc toujours pour la **même indication de l'anémomètre**, quelle que soit l'altitude.

Cette indication s'appelle la « **vitesse indiquée** ».

Anémomètre

Plages d'utilisation liées à l'avion :



Trait rouge : ne pas dépasser !
(risque de **déformation permanente**,
de **rupture**, d'**instabilité**)

Arc blanc : plage
d'utilisation **volets sortis**

Arc vert : utilisation **normale**

Arc jaune : ne pas utiliser en **atmosphère turbulente** (risque pour la cellule)

Anémomètre



Limite basse arc blanc : vitesse de décrochage tous volets sortis

Limite basse arc vert : vitesse de décrochage en lisse

Limite haute arc blanc : vitesse maxi avec volets sortis

Anémomètre

L'anémomètre est étalonné pour le niveau de la mer

- C'est à dire pour :
- l'altitude **0**,
 - une température de **+15°C**
 - une pression de **1013,25 hPa**

Lorsque l'avion s'élève en altitude, les conditions changent, il faut donc apporter des **corrections**, si on cherche la **vitesse vraie** :



Pour une **même vitesse indiquée** :

- si la température augmente → **la vitesse vraie augmente** de :
≈ + 1% par 6°C d'écart par rapport à la **température standard**.
- si l'altitude augmente → **la vitesse vraie augmente** de :
≈ + 1% par 600 ft d'altitude.

Exemple : Vol à 6000ft (=1829m) d'altitude, en atmosphère standard ($t^{\circ} \approx +3^{\circ}\text{C}$), sans vent. Si l'anémomètre indique 200km/h, vous volez en réalité à $\approx 220\text{km/h}$.

Unités utilisées :

- le **nœud** (kt) (de l'anglais knot) = 1 mille nautique (Nm) par heure (soit 1,852 km/h).
- le **kilomètre par heure** (km/h).

Altimètre

Il traduit une **pression** (issue des prises statiques) en **écart d'altitude** par rapport à un **niveau de référence**.

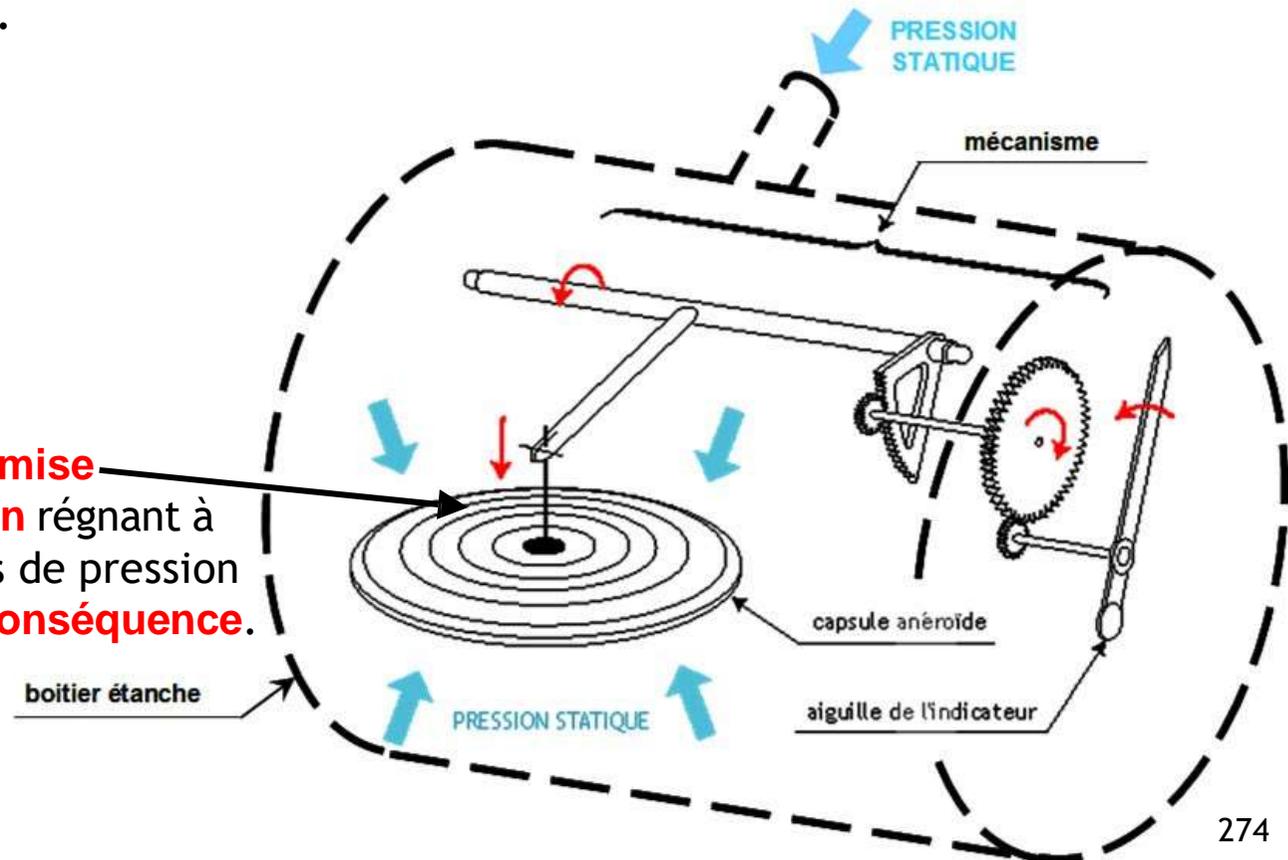
Application de la relation « pression ↔ altitude » de l'atmosphère standard.

Le capteur est une **capsule « anéroïde »** (capsule étanche déformable)

- complètement fermée
- et enfermée dans un boîtier étanche relié aux prises de pression statique.



La capsule anéroïde est **soumise extérieurement à la pression** régnant à l'altitude de vol (via les prises de pression statique) et **se déforme en conséquence**.

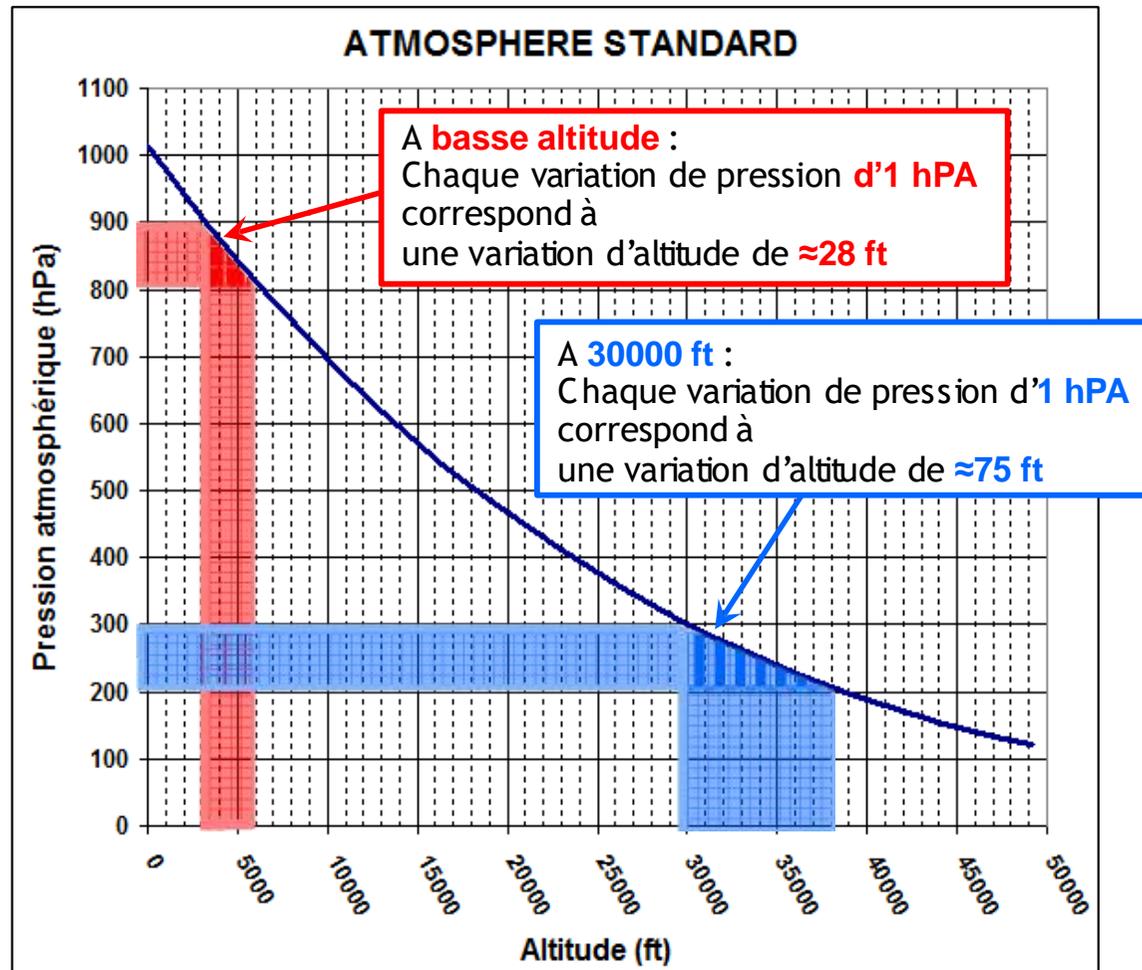


Altimètre

Unités utilisées :

- le **mètre** (m)
- le **pied** (ft) (foot) = 30,48 cm. C'est l'**unité utilisée dans une grande partie du monde.**

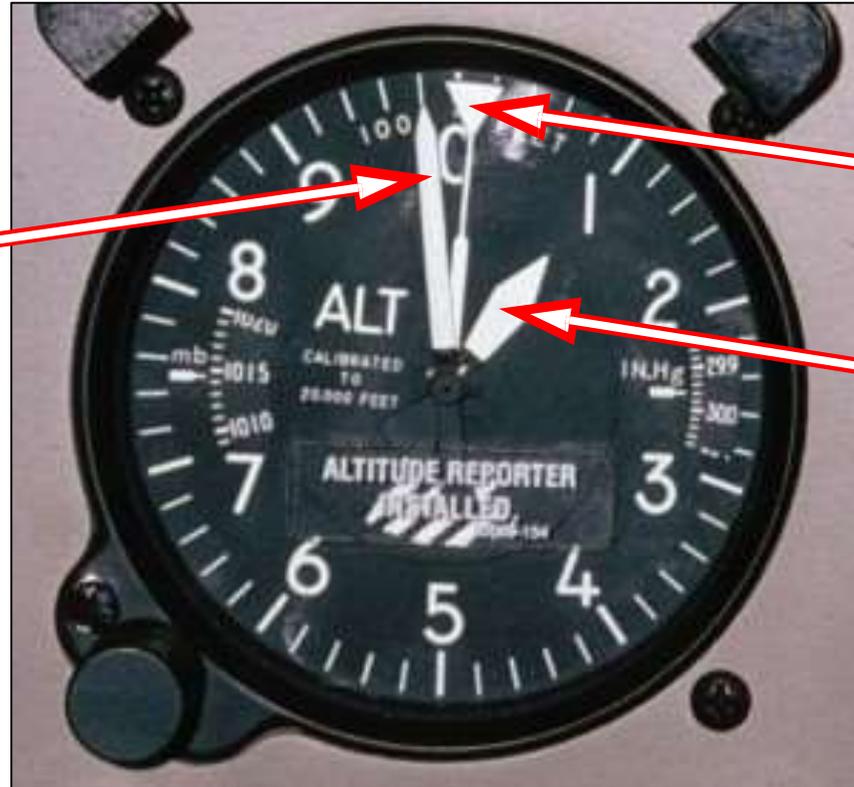
Variation de la pression en fonction de l'altitude :



Altimètre

Lecture :

Grande aiguille :
X 100 ft



Aiguille fine :
X 10000 ft

Petite aiguille :
X 1000 ft

Dans ce cas, nous lisons : 980 ft

L'altimètre est étalonné suivant l'atmosphère standard.

Si l'atmosphère est très différente de l'atmosphère standard, l'altitude réelle est notablement différente de celle indiquée :

Se souvenir : plus froid → plus bas et plus chaud → plus haut

Altimètre

Problème ?

D'un **jour** à l'autre, d'un **lieu** à l'autre, la **pression** atmosphérique **varie**.
Comment mesurer correctement une altitude ?

Solution : On ne mesure que des **différences d'altitude**.

L'altimètre est muni d'un **bouton de calage** qui permet de **déplacer les aiguilles** pour qu'elles indiquent **0** quand la pression atmosphérique vaut une valeur choisie (**pression de référence**) qui peut être différente de 1013,25 hPa.

Fenêtre affichant la **pression de référence**

Bouton de calage
(permettant de choisir la pression de référence)

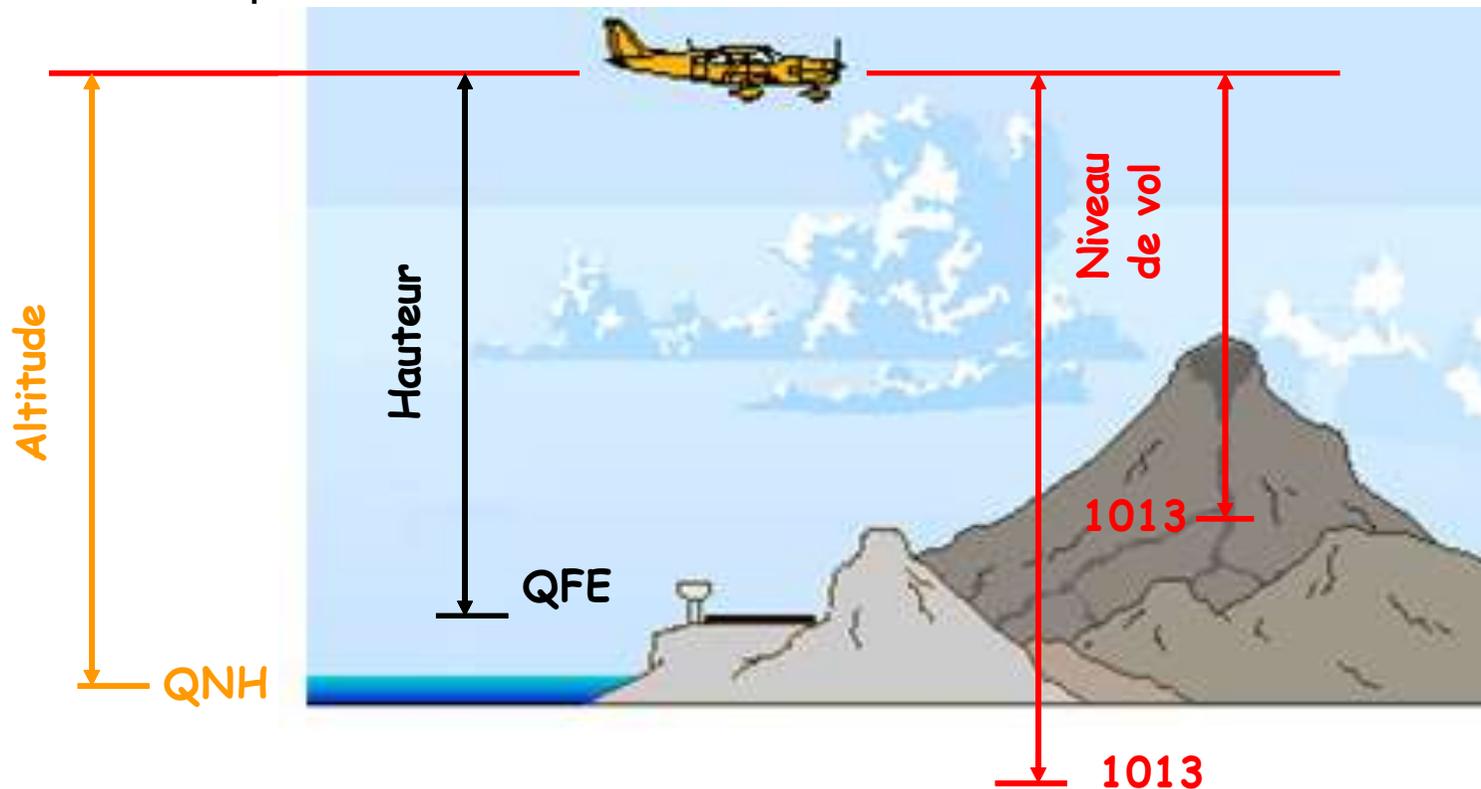


Lorsque la **pression atmosphérique** sera égale à la **pression de référence choisie**, les aiguilles de l'altimètre indiqueront **0**.

Altimètre

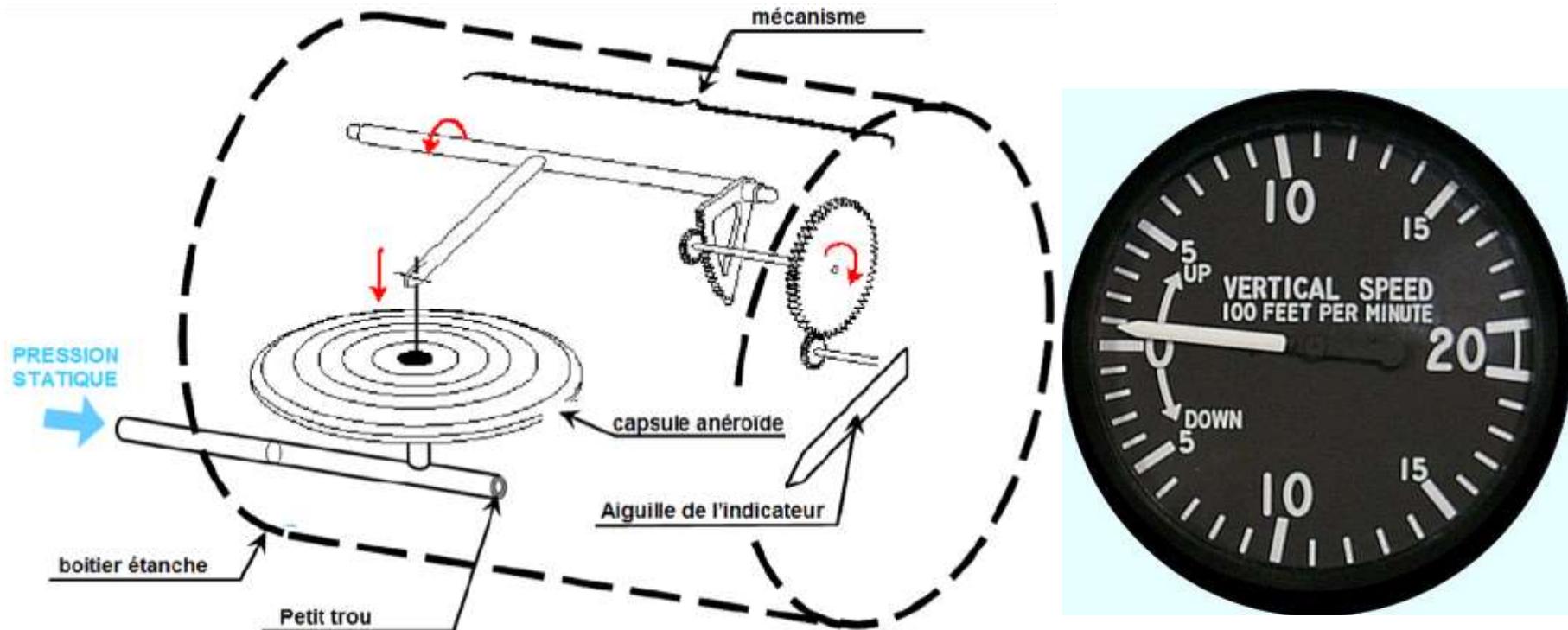
Il existe 3 façons de **caler un altimètre** (les 2 premières sont les plus utilisées) :

- **Calage QNH** : La pression de référence est la pression **au niveau de la mer*****. L'altimètre indique alors l'**altitude** (hauteur au dessus du niveau de la mer).
(***sur les terres, le QNH est déterminé à partir de la pression au sol et de l'altitude du sol).
- **Calage standard** : On prend **1013 hPa** comme pression de référence. L'altimètre indique alors le « **niveau de vol** ».
- **Calage QFE** : La pression de référence est la pression **au niveau d'un aéroport**. L'altimètre indique alors la **hauteur** au dessus de l'aéroport.



Variomètre

Il traduit en **taux de montée/descente** une **variation de pression statique** liée à la montée/descente de l'avion.



En **vol horizontal**, la pression est la même à l'intérieur et à l'extérieur de la capsule.

Lorsque l'altitude varie, la **variation** de pression statique est **transmise** :

- **immédiatement** à l'intérieur de la capsule anéroïde,
- **avec quelques secondes de retard** à l'extérieur de la capsule (le temps que le boîtier se gonfle ou se dégonfle à travers le petit trou).

La capsule se déforme en fonction de cette différence de pression.

Variomètre

Unités utilisées :

- le **mètre par seconde** (m/s)
- le **pied par minute** (ft/mn).

Exemples de lecture de taux de montée ou de descente :

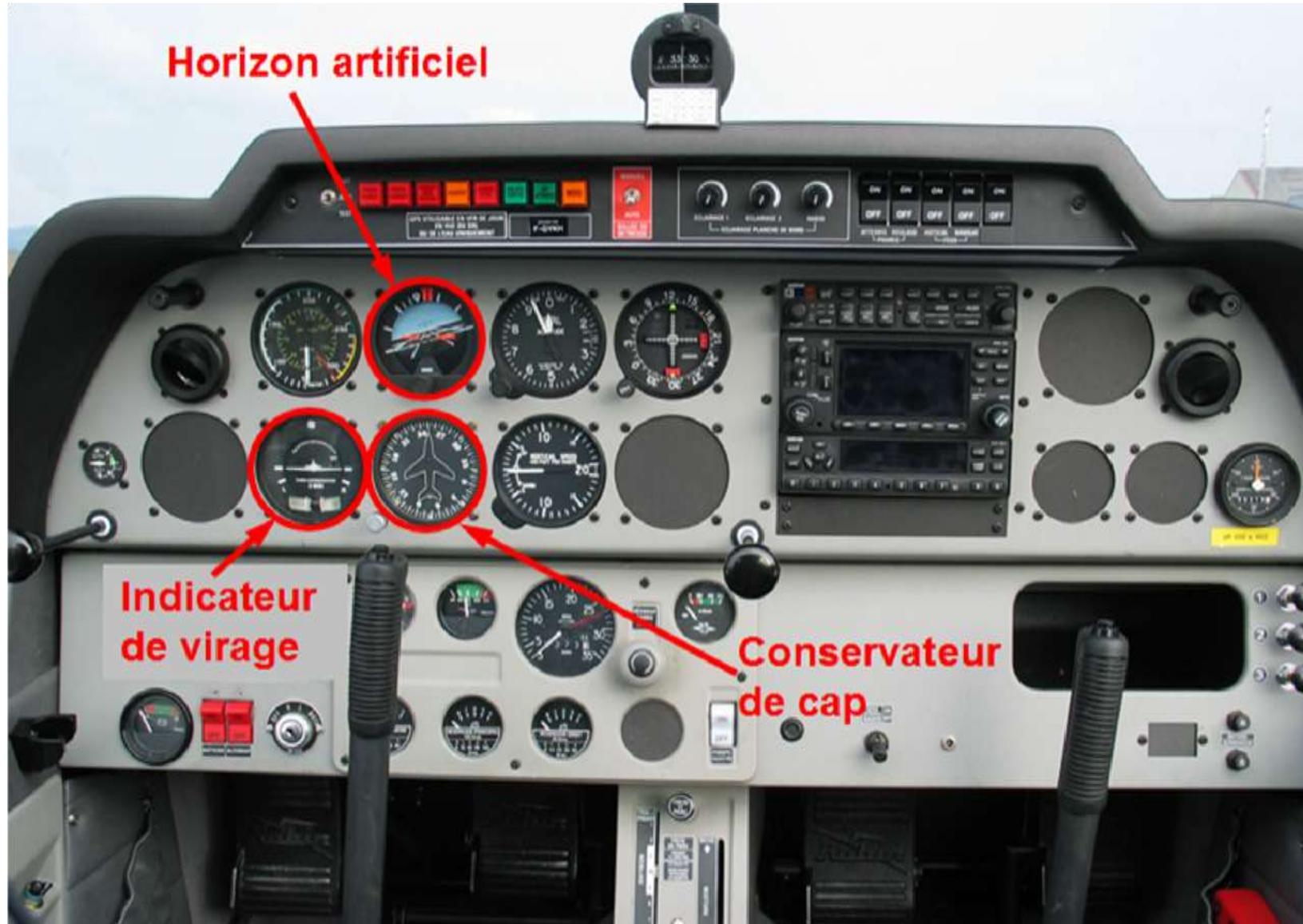
- En descente à 1350 ft/mn....



- En montée à 200 ft/mn.....



2 - INSTRUMENTS GYROSCOPIQUES



Comment s'orienter sans visibilité extérieure ?

En condition de **vol à vue**, l'observation des **repères extérieurs** permet au pilote de **s'orienter** et de maîtriser l'**attitude** de son avion.

Comment faire **en l'absence de visibilité extérieure** ?

Il faut utiliser un dispositif capable de **conserver une orientation fixe dans l'espace**.

Vous avez tous joué à la **toupie**...



...**Lancée à pleine vitesse de rotation** sur elle-même, une toupie **conserve une orientation fixe dans l'espace**. Elle ne bascule pas.

La toupie est un exemple de ce qu'on appelle plus généralement un « **gyroscope** ».

Le gyroscope

Principe : solide de révolution animé d'un mouvement de **rotation rapide** autour de son axe de symétrie.

La **fixité d'un gyroscope** illustre sa **stabilité** lorsqu'il **tourne**.

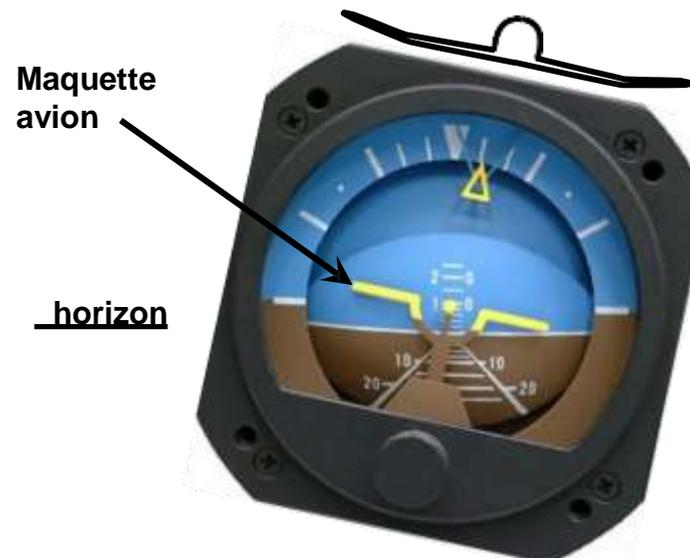
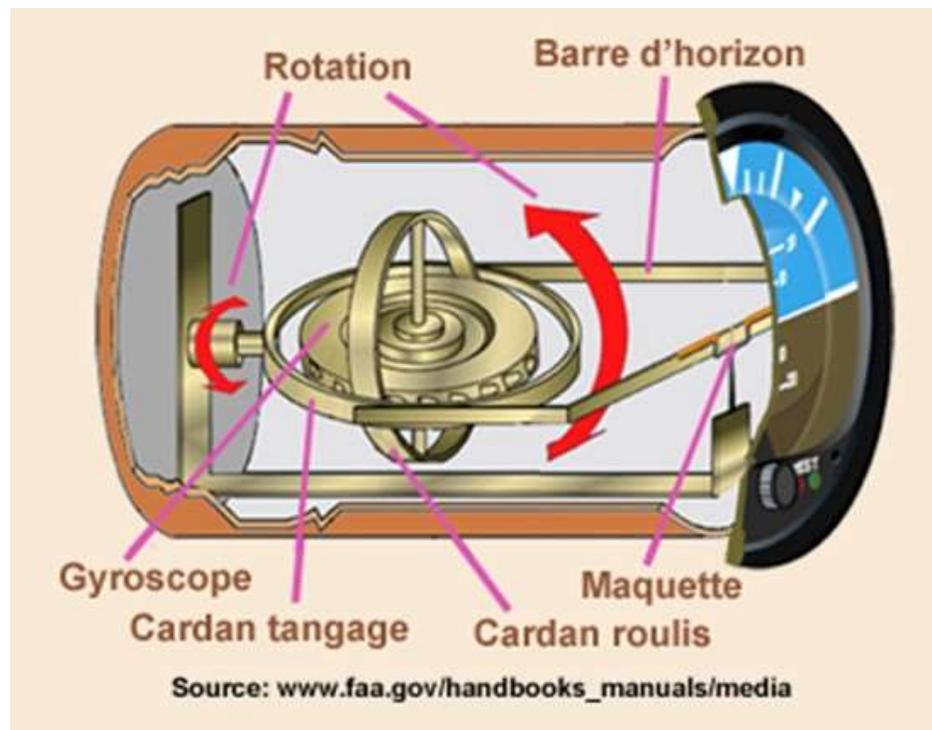


Si aucune force n'est appliquée perpendiculairement à l'axe de rotation d'un gyroscope, celui-ci **conservera son orientation par rapport à l'espace absolu** : orientation **fixe par rapport aux étoiles**, indépendamment de la rotation de la terre.

La propriété de fixité des gyroscopes permet de les utiliser comme des **plateformes de référence stables**, à bord des avions.

L'horizon artificiel

Il permet au pilote de connaître l'**attitude** de l'aéronef en **tangage** et en **roulis**, même si la visibilité extérieure est nulle.



Avion cabré à 10° et incliné à 10° en roulis à droite

L'instrument est équipé d'un **gyroscopie à axe verticale** qui **conserve son orientation verticale** quels que soient les mouvements de l'aéronef.

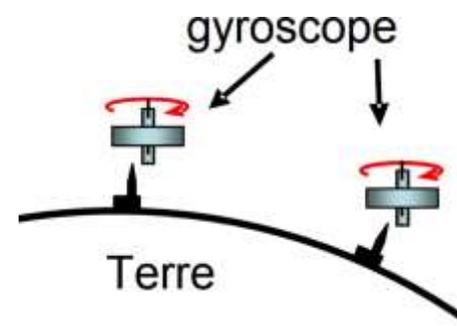
Sur la façade de l'instrument, l'**attitude** de l'aéronef en **tangage** et en **roulis** est représentée par rapport à une **image de l'horizon**.

L'horizon artificiel

Problème :

Sans précaution particulière,

- lors du **déplacement de l'aéronef** à la surface de la terre, le gyroscope conserverait une orientation fixe par rapport aux étoiles. Il **s'inclinerait** donc par rapport à la verticale locale.



- à cause de la **rotation de la terre**, le gyroscope **s'inclinerait** lentement pour conserver son orientation par rapport aux étoiles.
- les **imperfections mécaniques** (frottements,...) pourraient **perturber** l'orientation du gyroscope.

Solution :

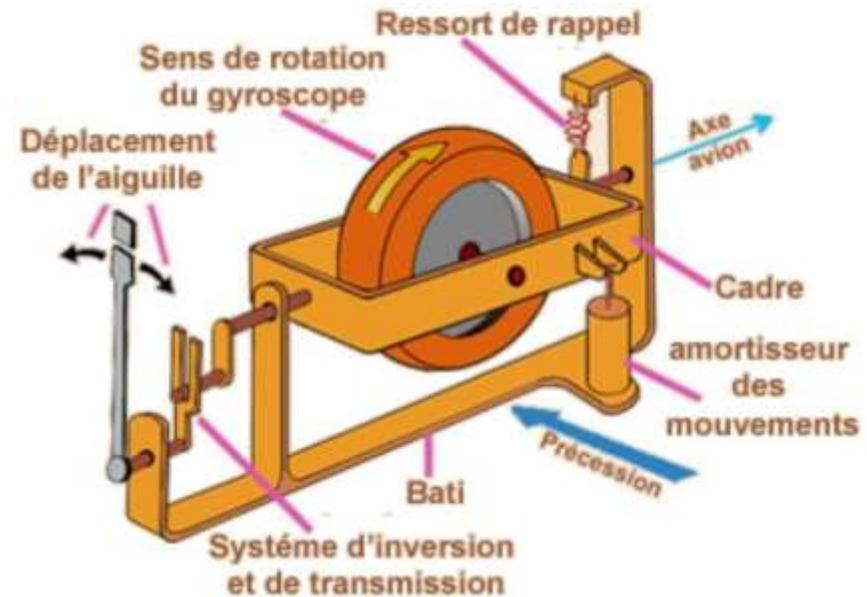
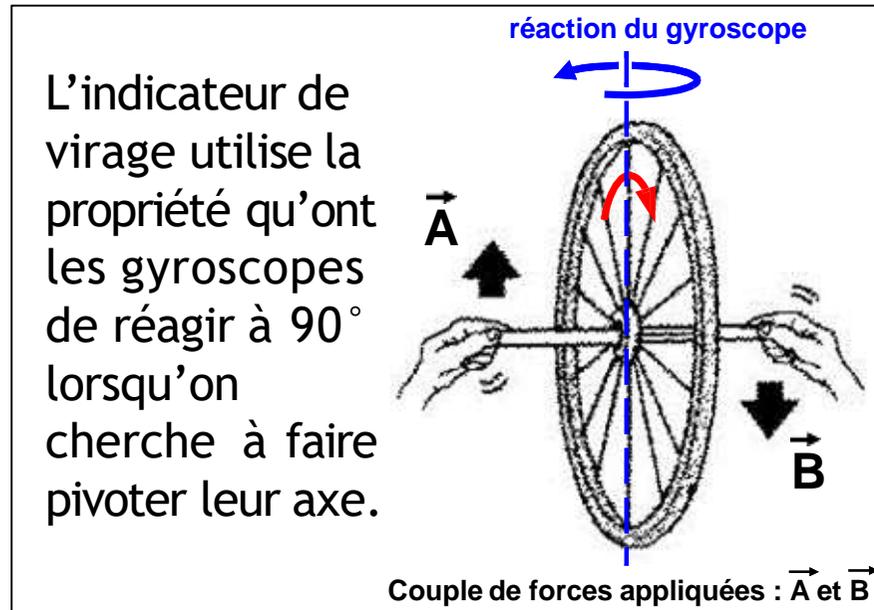
Un **dispositif sensible à la pesanteur** recale l'axe du gyroscope sur la verticale en le redressant lentement lorsqu'un écart apparaît.

Résultat :

L'utilisation de l'horizon artificiel ne requiert **aucune action de recalage** de la part du pilote.

L'indicateur de virage

Il permet d'indiquer le **sens** et le **taux de virage** (mouvement de **lacet**).



L'indicateur de virage est équipé d'un **gyroscope à axe horizontal (transversal)**. Tout **mouvement de lacet** se traduit par un **basculement du gyroscope autour de l'axe longitudinal** de l'aéronef entraînant un **déplacement de l'aiguille**.

Ce basculement est limité par un ressort de rappel.

Plus le taux de virage*** est grand, plus l'aiguille se déplace.

(*** Le taux de virage s'exprime en degrés / minute)

L'indicateur de virage

La façade de l'instrument peut se présenter sous l'une de ces deux formes :

Une **aiguille verticale** qui s'incline du côté du virage

ou

Une **maquette d'avion** qui s'incline du côté du virage



Dans les 2 cas, l'instrument indique un **taux de virage en lacet**. Il est **insensible au roulis !!!**

Lorsque l'aiguille (ou la maquette avion) est maintenue en face du **repère blanc**, le taux de virage est de $180^\circ / \text{mn}$ (c'est le **taux « standard »** : 360° en 2 minutes).

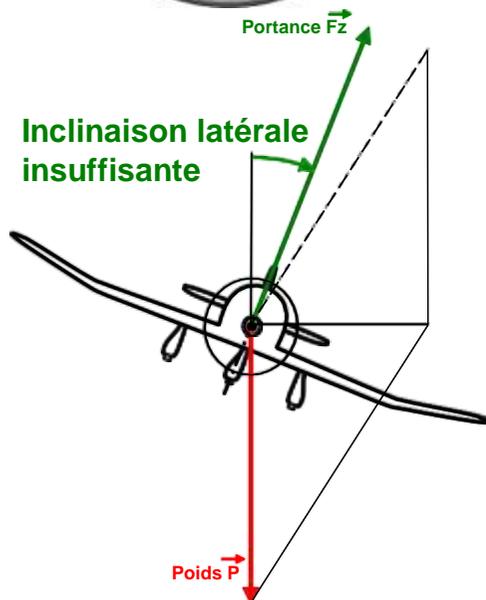
Très généralement, l'instrument comporte, en partie basse de sa façade, la **bille indicatrice de symétrie du vol** :

Cette **bille** circule dans un **tube en verre incurvé** et baigne dans un liquide amortisseur. Elle est soumise aux forces issues des **accélérations subies par l'aéronef dans le plan transversal**.

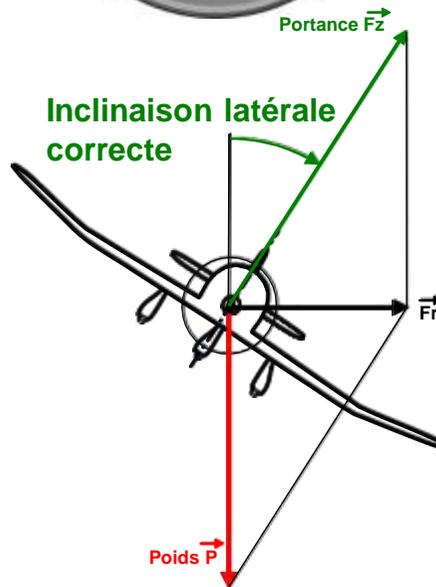
L'indicateur de virage

Exemples d'indication :
Virage au taux standard

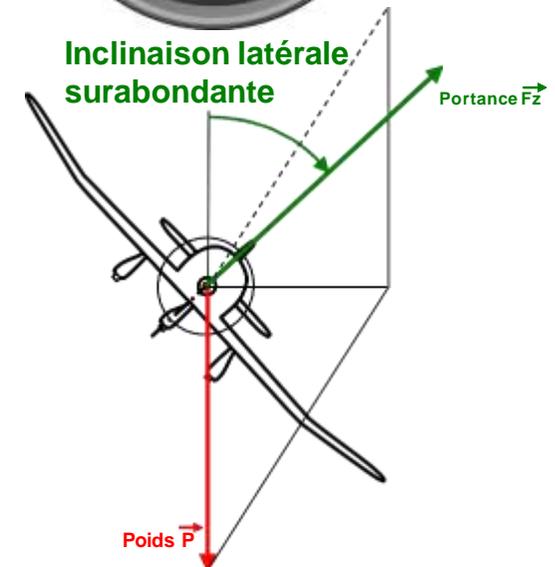
Virage dérapé



Virage correct

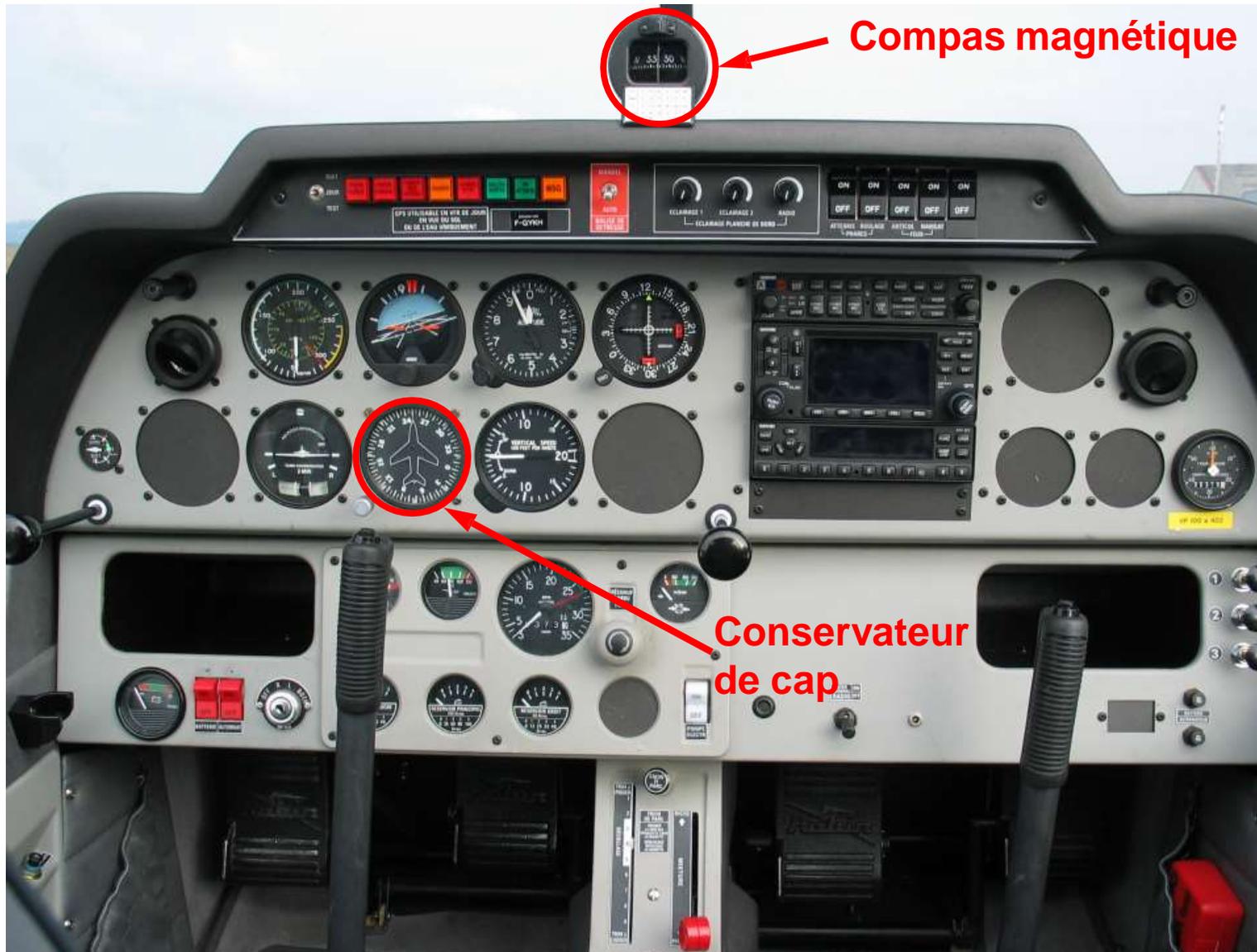


Virage glissé



Le conservateur de cap et le compas magnétique

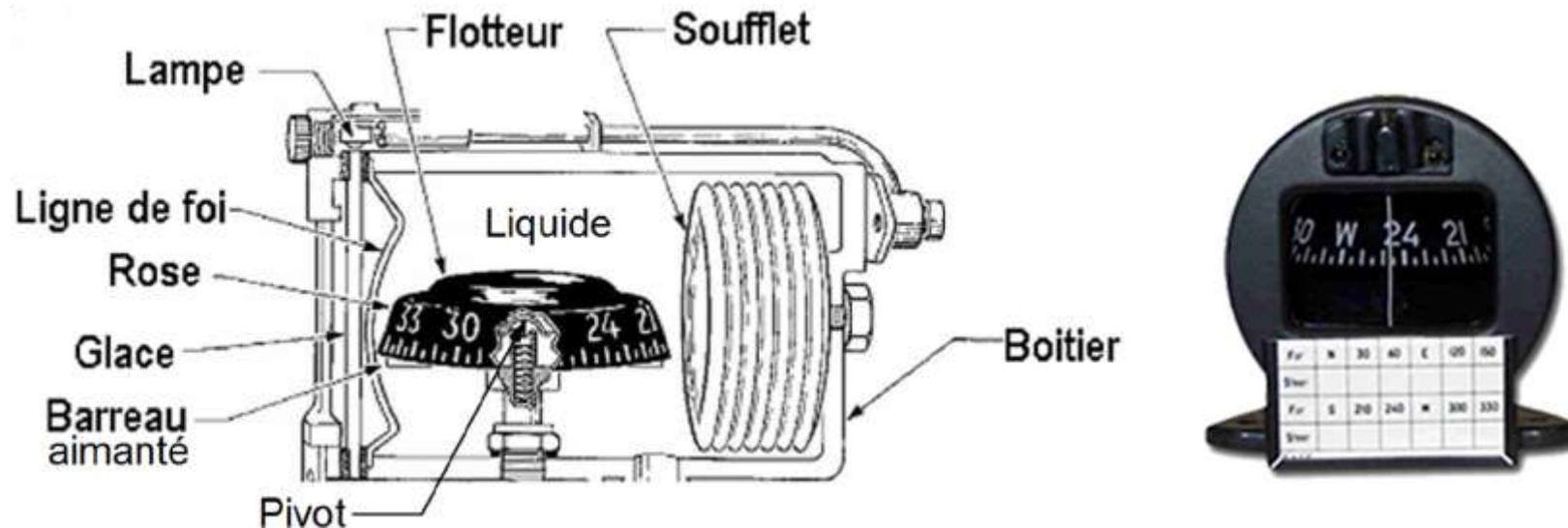
Le **conservateur de cap** et le **compas magnétique** se complètent pour indiquer le **cap** (la direction vers laquelle est orienté l'aéronef).



Le compas magnétique

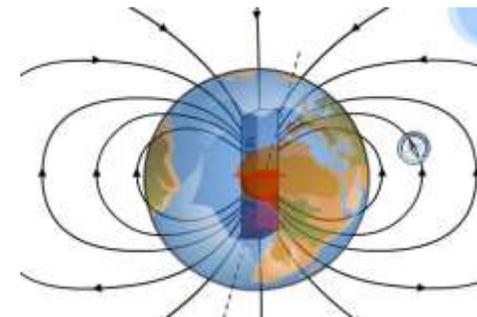
Le **compas** est constitué d'un organe mobile portant un **barreau aimanté**, qui s'oriente suivant le **champ magnétique terrestre**.

Cet organe appelé également **rose des caps** est **gradué de 0 à 360 degrés** et peut défiler devant un index fixe appelé « **ligne de foi** ».



La **terre** est un **gigantesque aimant**.

En tout point de sa surface, la **rose des caps** du compas **s'oriente** suivant les **lignes du champ magnétique terrestre**.



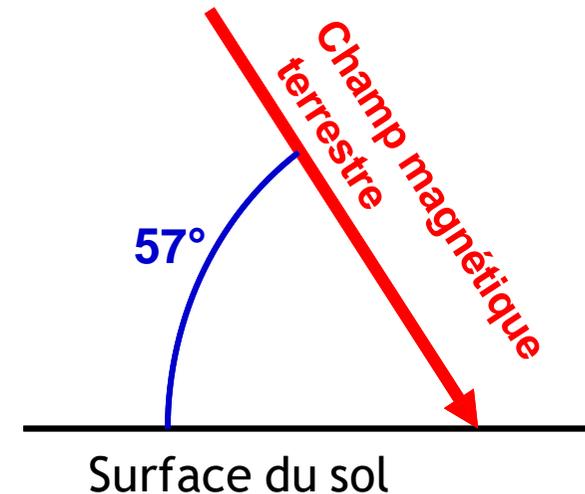
Le compas magnétique

Problème :

- Lorsque le vol est **turbulent**, la rose des cap est assez **instable** et la **lecture** du cap est **difficile**.
- En général, les **lignes du champ magnétique terrestre** ne sont **pas horizontales** (à Paris, elles font un angle de **57° par rapport à l'horizontale**).

Lorsque l'**inclinaison latérale** de l'avion est **forte** (par exemple pendant un virage), l'**indication** du compas est **faussée**, voire complètement **erronée**.

Domage ! Pendant un virage, le pilote a besoin de surveiller son cap.



Solution :

Lorsque l'**inclinaison latérale** est **nulle** et qu'il n'y a **pas de turbulence**, en profiter pour **recopier** le cap indiqué par le compas magnétique sur un instrument gyroscopique (le **conservateur de cap**).

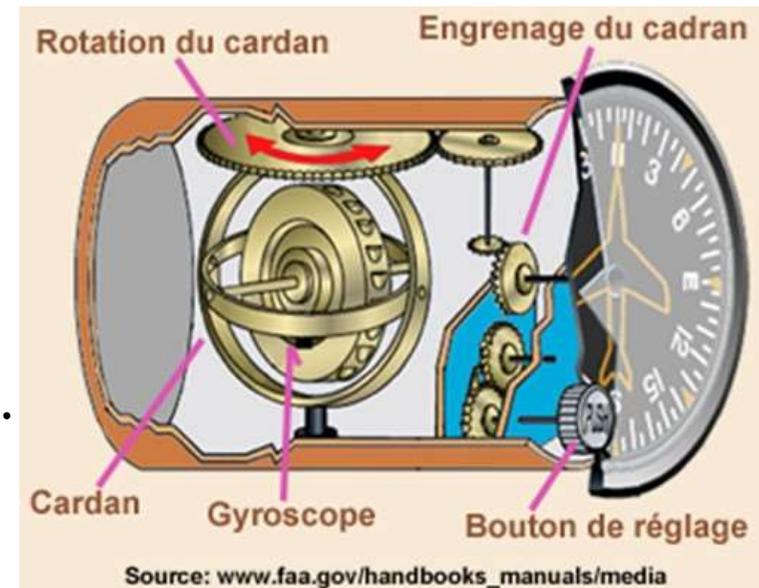
Cet instrument pourra ensuite être utilisé en **vol turbulent** et pendant les **virages**.

Le conservateur de cap

Le **conservateur de cap** (ou directionnel) est équipé d'un **gyroscope à axe horizontal** qui garde son orientation lors des manœuvres de l'aéronef.

Des engrenages transmettent les **mouvements relatifs** du gyroscope par rapport au boîtier à un **disque gradué** placé sur la façade de l'instrument.

Grâce au **bouton de réglage**, le cap affiché peut être **recalé**, à tout moment, sur la valeur du cap indiquée par le compas magnétique.



Ensuite, la **stabilité du gyroscope** permettra un **affichage stable et précis du cap**, quelles que soient les évolutions de l'aéronef.

Régulièrement, le pilote devra cependant **recaler** le conservateur de cap sur la valeur indiquée par le compas magnétique, car la **rotation de la terre**, le **déplacement de l'aéronef** et les **imperfections mécaniques** du gyroscope entraînent une **lente dérive** de son orientation.

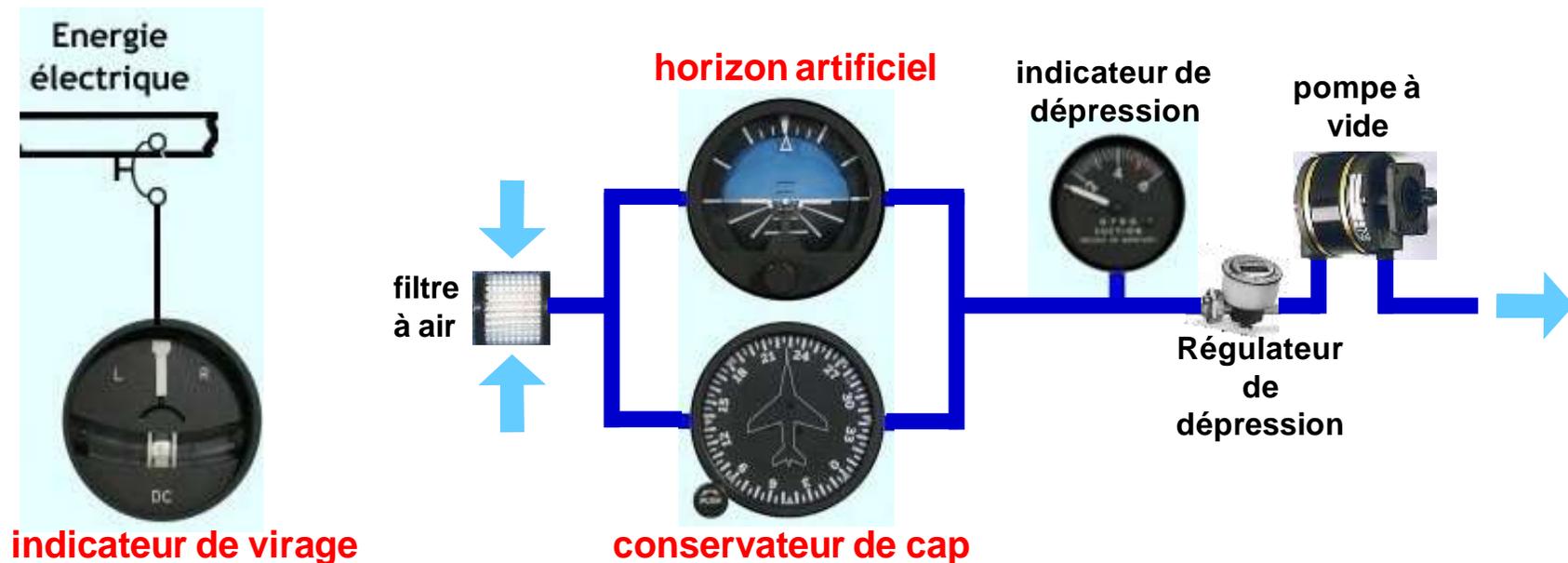
Entraînement des gyroscopes

A bord d'un aéronef, la **mise en rotation** de chaque gyroscope peut être assurée :

- par un **moteur électrique**,
- ou par une turbine à air alimentée par la dépression créée par une petite **pompe à vide** entraînée directement par le moteur de l'aéronef.

Dans un souci de sécurité :

- l'**indicateur de virage** est entraîné **électriquement**.
- l'**horizon artificiel** et le **conservateur de cap** sont entraînés grâce à la **pompe à vide**.



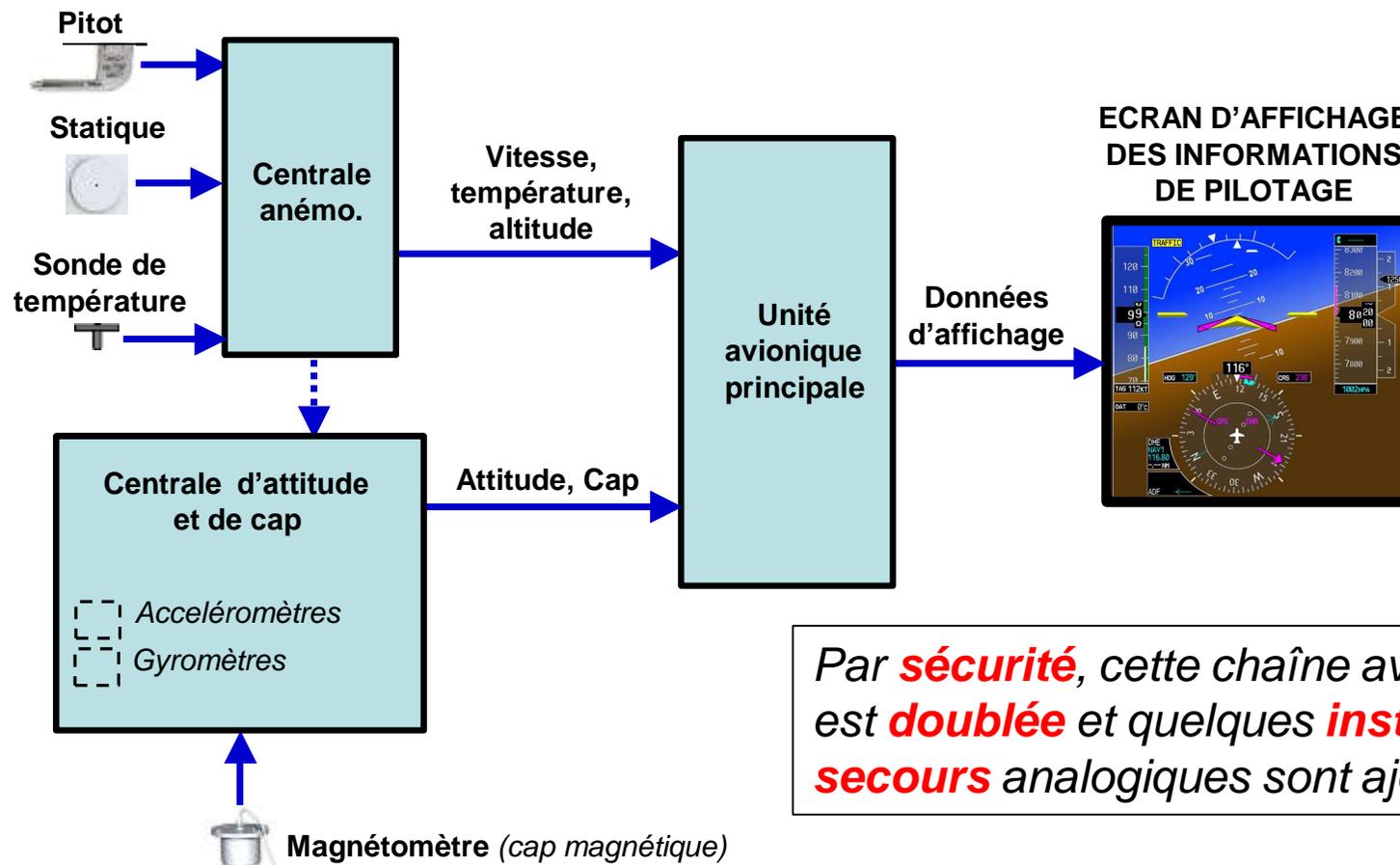
3 - LES EFIS (*Electronic Flight Instrument System*)



Les EFIS

A partir des années 1980 on a vu apparaître, sur certains avions, l'affichage des **informations de pilotage** à l'aide d'**écrans**.

Ces informations sont générées par un ordinateur (**unité avionique principale**) à partir des données numériques transmises par les différents **capteurs** (pression totale, pression statique, cap magnétique, attitude,...)

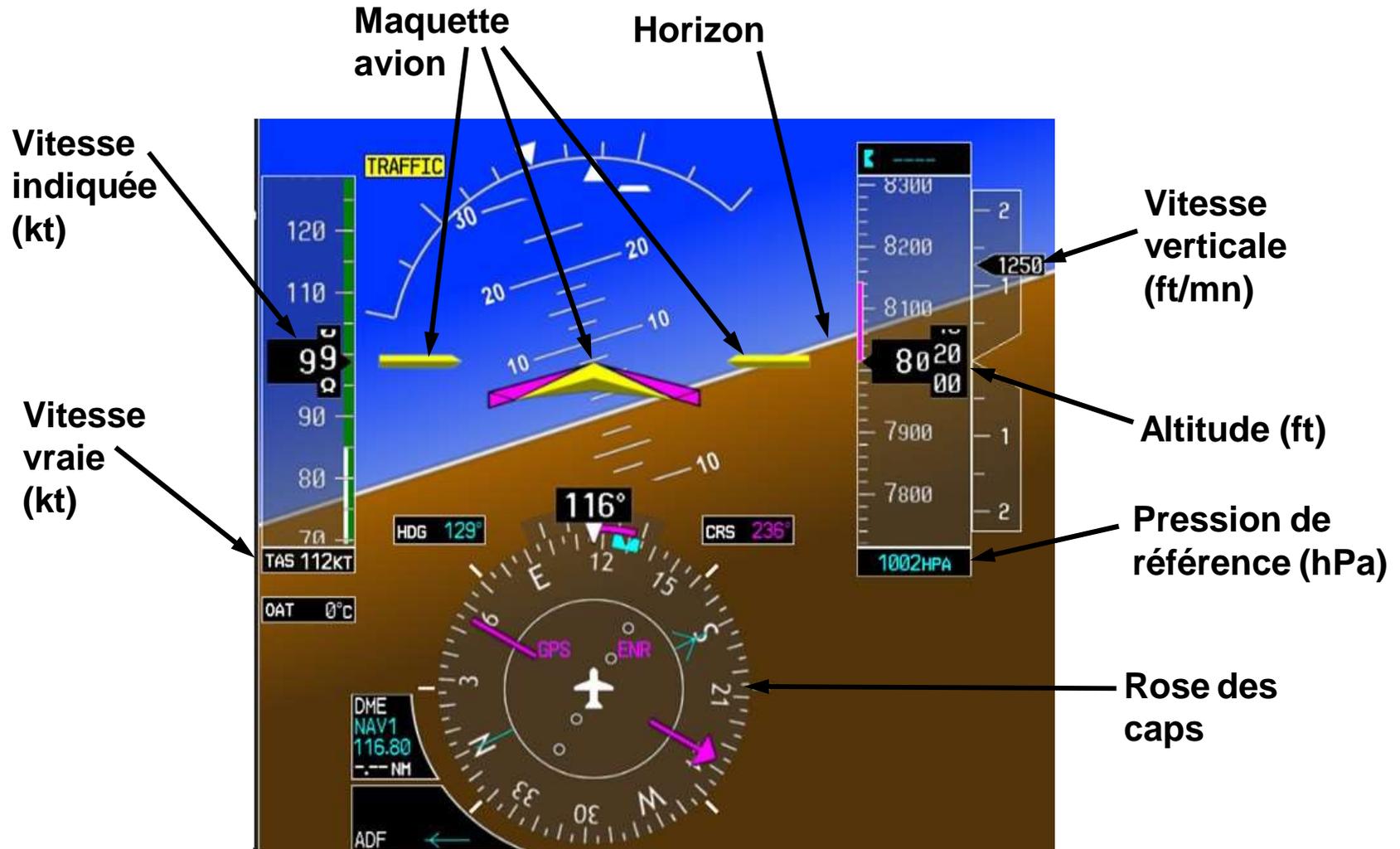


Par **sécurité**, cette chaîne avionique est **doublée** et quelques **instruments secours analogiques** sont ajoutés !

Les EFIS

On retrouve le "**T basique**" des instruments traditionnels :

Vitesse à gauche, horizon au centre, altitude à droite et caps en bas.



Les EFIS

L'utilisation de calculateurs et d'écrans pour l'affichage des informations de pilotage ouvre de nombreuses possibilités nouvelles. Par exemple :

- **Affichage de la vitesse vraie**, calculée à partir de la vitesse indiquée, de la pression atmosphérique et de la température.
- **Plages de couleur et repères** de l'indicateur de vitesse **adaptés** en fonction de la masse avion (si elle est renseignée par le pilote).

Le système peut aussi intégrer les **informations de navigation** (GPS, autres moyens de radionavigation, centrales à inertie,...) et les afficher sous forme de carte et/ou en surimpression sur la rose des caps.

Par comparaison entre les informations de pilotage et les informations de navigation, le système peut calculer la **vitesse** et la **direction** du **vent**.

En résumé : Les EFIS doivent permettre d'**alléger la charge de travail du pilote** en lui présentant des informations plus complètes et plus synthétiques.



NAVIGATION



La navigation et les cartes

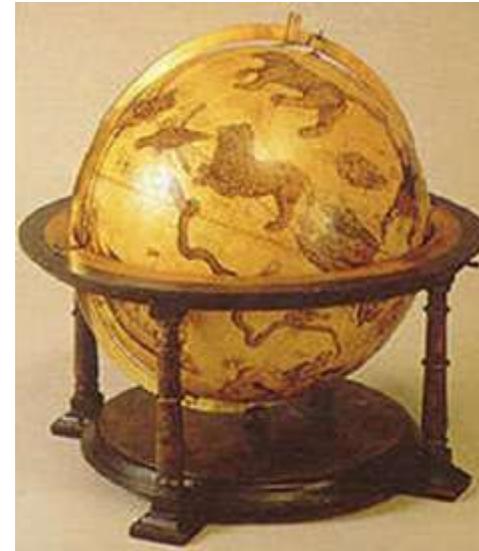
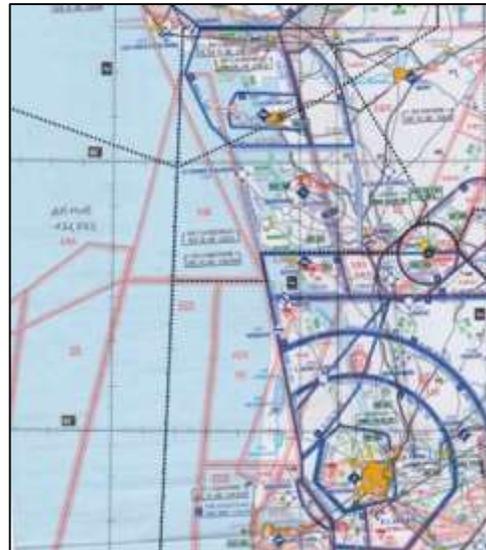
Naviguer, c'est être capable de rejoindre un **point choisi** à partir d'un **point connu**, en suivant un **itinéraire choisi**.

Plusieurs méthodes peuvent être adoptées pour garantir une navigation sûre :

- L'**estime** (*en cheminant à partir d'un point connu, à une vitesse connue, dans une direction connue, pendant un temps déterminé*),
- Le **cheminement** (*en suivant des repères naturels ou artificiels : fleuves, routes, voies ferrées, trait de côte,...*) et l'**erreur systématique**,
- La **radionavigation** (*en se positionnant par rapport à des émetteurs radioélectriques dont la position est connue*) et la **navigation inertielle**.

Dans tous les cas, nous aurons besoin d'une **carte**.

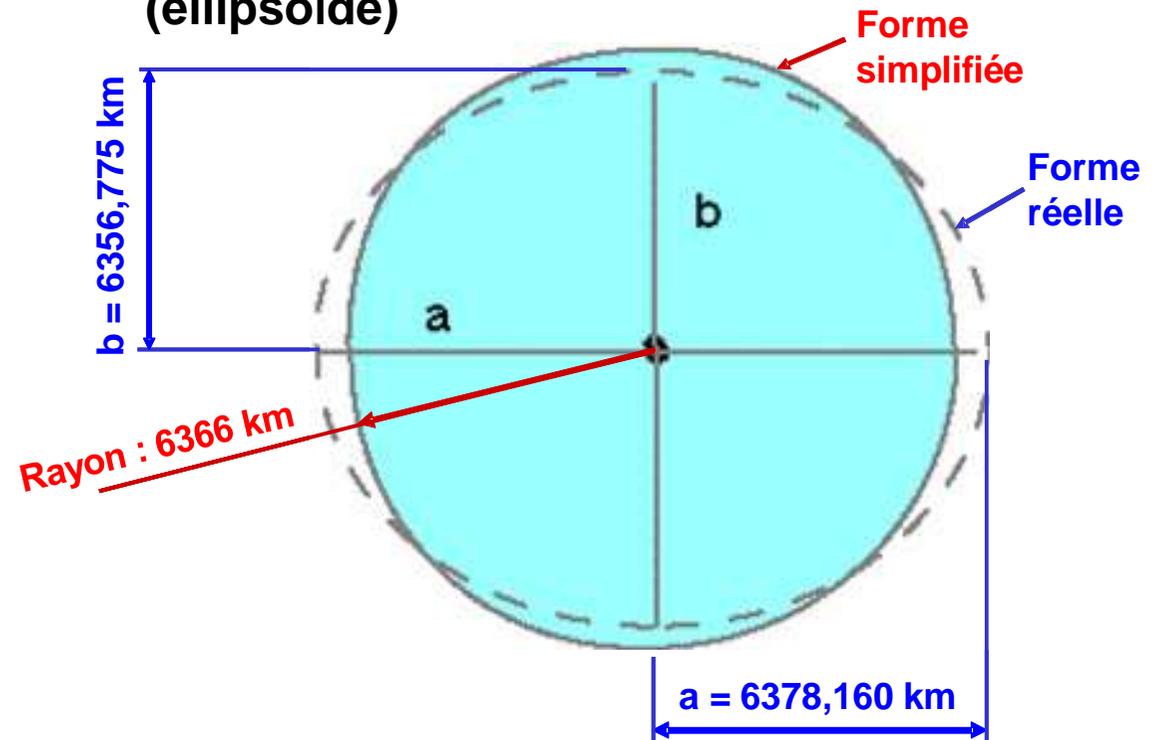
Une **carte**, c'est une **représentation plane** d'une partie plus ou moins grande de la **sphère terrestre**.



Le globe terrestre



Forme réelle du globe terrestre
(ellipsoïde)



On assimile le globe terrestre à une **sphère** de **40000 km** de circonférence (au niveau moyen des mers).

C'est-à-dire de $4000 \sqrt{2\pi} = \mathbf{6366 \text{ km}}$ de rayon.

Unités aéronautiques

La circonférence de la Terre (360°) étant de 40000 km,
chaque degré d'arc terrestre mesure $40000 / 360 = 111,111$ km.

Sachant que le degré d'angle se divise en 60 minutes d'angle (60' d'angle),
chaque minute d'arc terrestre mesure donc $111,111 / 60 = 1,852$ km.

C'est la définition du **mille nautique** (NM : Nautical Mile),
unité habituellement utilisée pour la navigation maritime et aérienne.

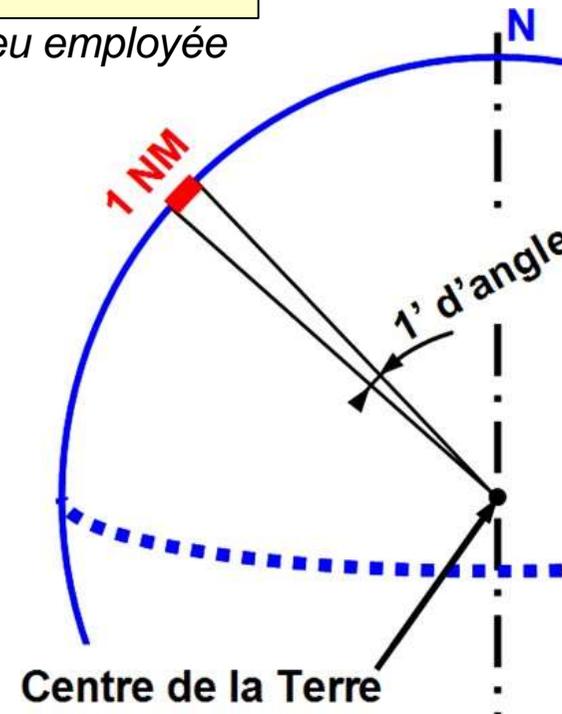
1 mille nautique (NM) = 1,852 km \leftrightarrow 1' (minute) d'arc terrestre

Ne pas confondre avec une autre unité de distance très peu employée en aéronautique : le Statute Mile (SM) : 1 SM = 1,609 km.

L'unité de **vitesse** est le **nœud** (kt : knot)

1kt = 1 NM par heure

Exemple : Un avion qui a une vitesse de 100 kt parcourt 100 NM en 1 heure, ce qui correspond à 185,2 km/h.



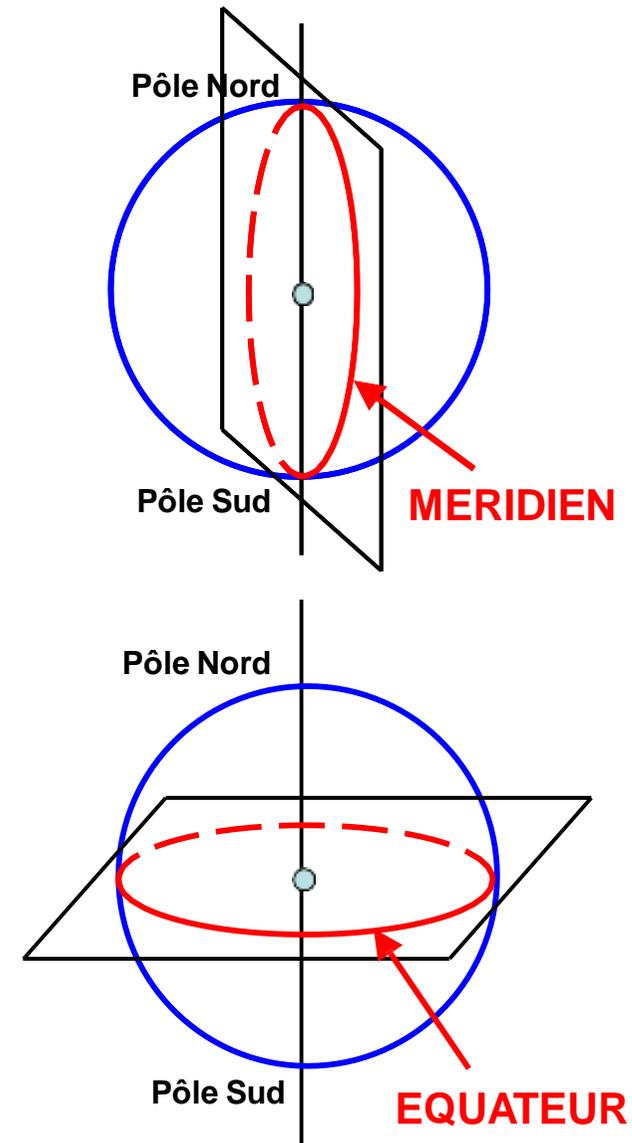
Petits et grands cercles terrestres (1)

Grands cercles :

L'intersection de la sphère terrestre et d'un plan passant par l'axe des pôles détermine 2 arcs de grand cercle appelés **méridiens**.

*Il y a une infinité de plans passant par les pôles et donc **une infinité de méridiens**.*

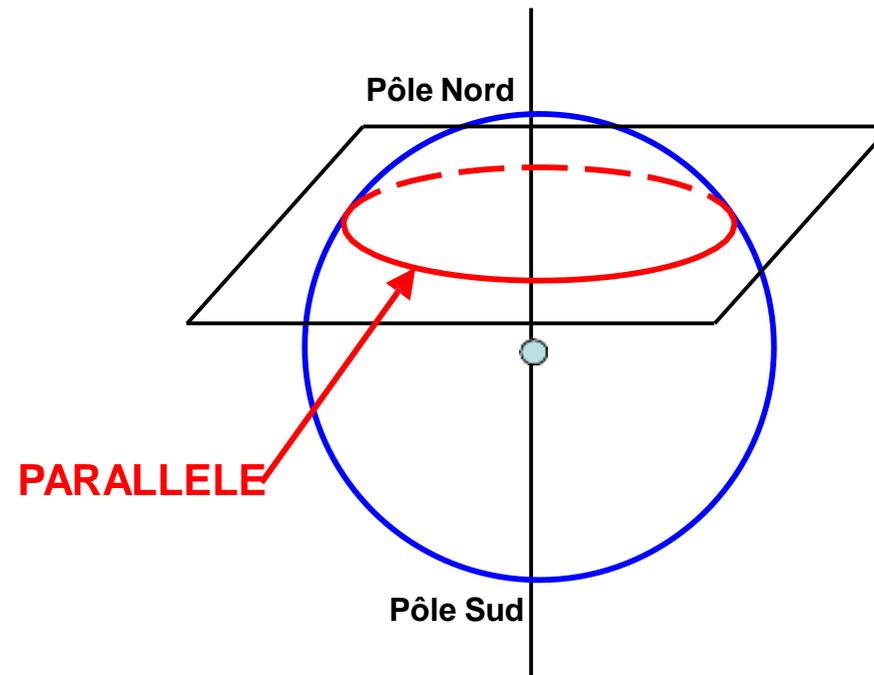
Le plan passant par le centre de la Terre et perpendiculaire à l'axe des pôles détermine un grand cercle appelé **l'équateur**.



Petits et grands cercles terrestres (2)

Petits cercles :

L'intersection de la sphère et d'un plan perpendiculaire à l'axe des pôles et ne passant pas par le centre de la Terre détermine un petit cercle appelé **parallèle**.



Petits et grands cercles terrestres (3)

Les méridiens sont comptés à partir d'un méridien origine : celui de **Greenwich** en Angleterre.

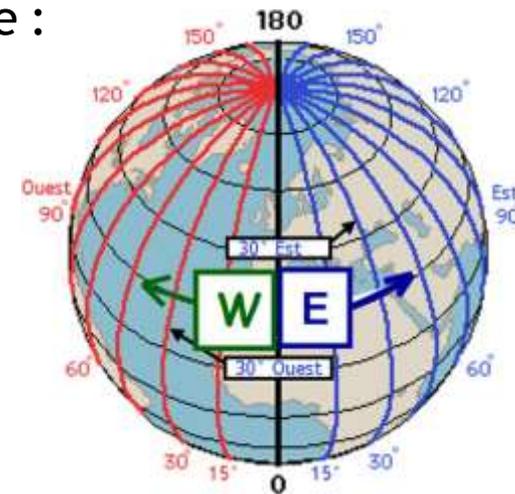
Vers l'EST de 0 à 180°

et

vers l'OUEST de 0 à 180°.

Cette valeur angulaire est appelée la **longitude**.

Nous dirons que la longitude est **Est** ou **Ouest**.



Les parallèles sont comptés à partir d'un parallèle origine : l'**équateur**.

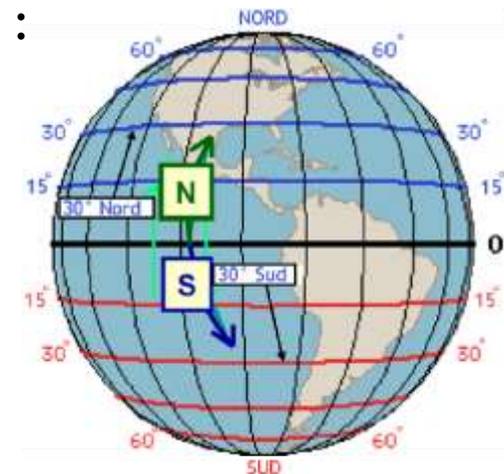
Vers le NORD de 0 à 90°

et

vers le SUD de 0 à 90°.

Cette valeur angulaire est appelée la **latitude**.

Nous dirons que la latitude est **Nord** ou **Sud**.



Coordonnées géographiques

Chaque point de la Terre peut donc être défini par :

Sa **latitude**, mesurée sur son méridien.

= angle au centre de la Terre compté :

- *Nord* : Depuis l'équateur vers le pôle Nord.
- *Sud* : Depuis l'équateur vers le pôle Sud.

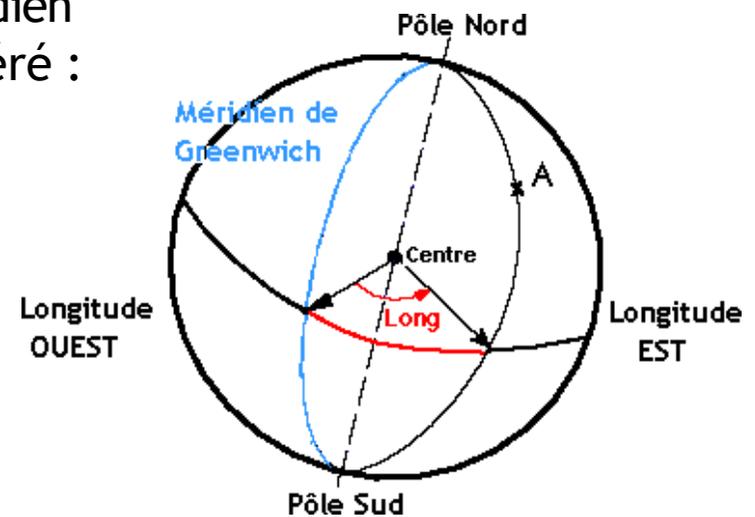
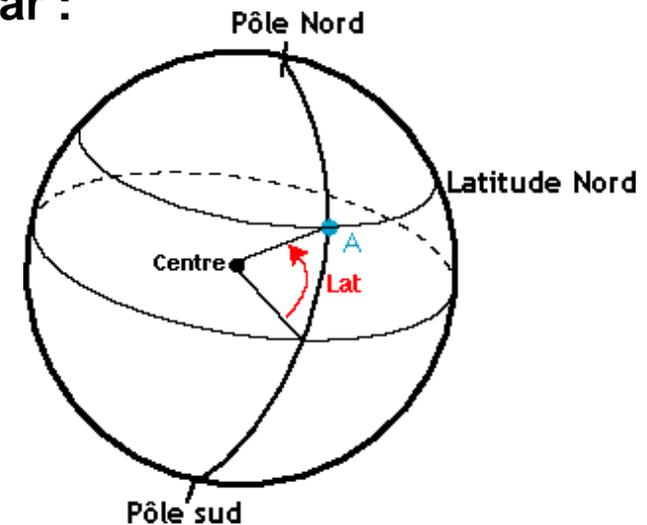
et

Sa **longitude**.

= angle au centre de la Terre, entre le méridien de Greenwich et le méridien du lieu considéré :

- *Ouest* : Depuis le méridien de Greenwich vers l'ouest.
- *Est* : Depuis le méridien de Greenwich vers l'est.

Exemple : Coordonnées du Lycée Sud-Médoc = $44^{\circ}54'30''$ Nord – $0^{\circ}42'30''$ Ouest.



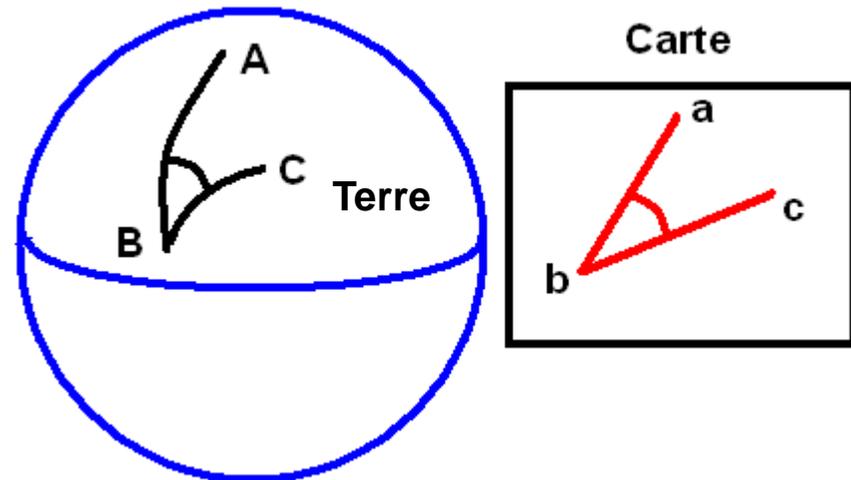
Propriétés des cartes

Une **carte plane** est obtenue par **projection** d'une zone du globe terrestre sur une **surface développable** que l'on pourra **mettre à plat**.

Cette projection entraîne obligatoirement une certaine **déformation**.

Pour choisir la **méthode de projection** on s'attache à ce que, sur la carte obtenue, tous les **angles** soient **identiques** aux **angles correspondants sur le globe terrestre**.

On dit alors que la projection est « **conforme** ».



Cependant, il est **impossible** d'obtenir strictement la même échelle en tout point de la carte. On essaie de **minimiser** ces **variations d'échelle**.

Les **principales projections** utilisées sont :

- La projection de **Mercator**,
- La projection de **Lambert**.

Echelle d'une carte

$$\text{Echelle} = \frac{\text{distance sur la carte}}{\text{distance sur la Terre}}$$

Carte **1 / 500.000** :
1 cm sur la carte représente 500.000 cm sur la Terre
soit **5 km sur la Terre**

Carte **1 / 1.000.000** :
1 cm sur la carte représente 1.000.000 cm sur la Terre
soit **10 km sur la Terre**

Exercice :

Sur une carte au 1/500.000, vous mesurez la distance entre 2 aérodromes et vous trouvez 15 cm.

Quelle est la distance entre ces 2 points en km et en NM ?

Echelle au 1/ 500.000 ==> 1 cm représente 500.000 cm soit 5 km

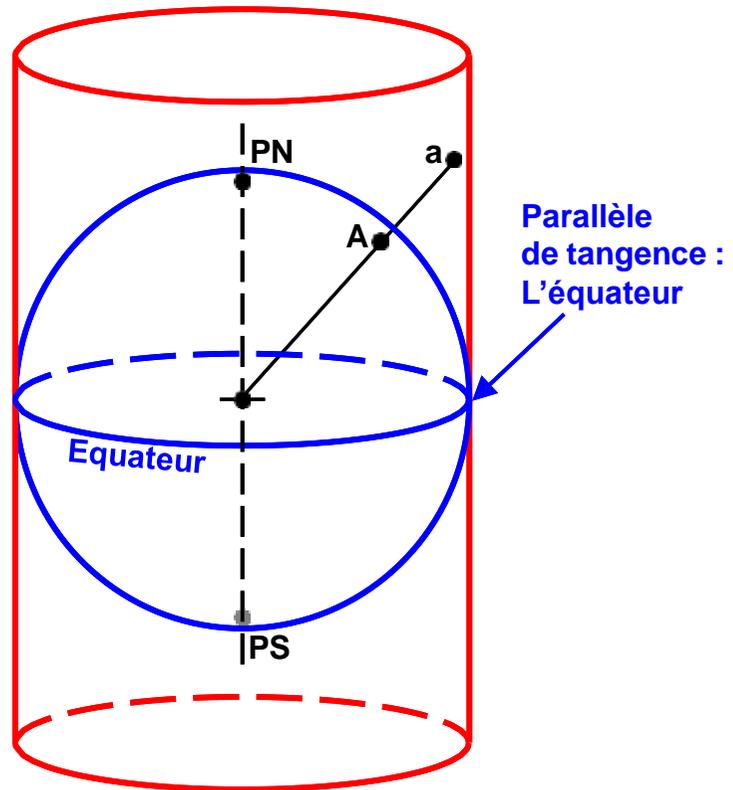
Comme la distance mesurée est de 15 cm sur la carte,

Sur la Terre, la distance est de : 5 x 15 = 75 km

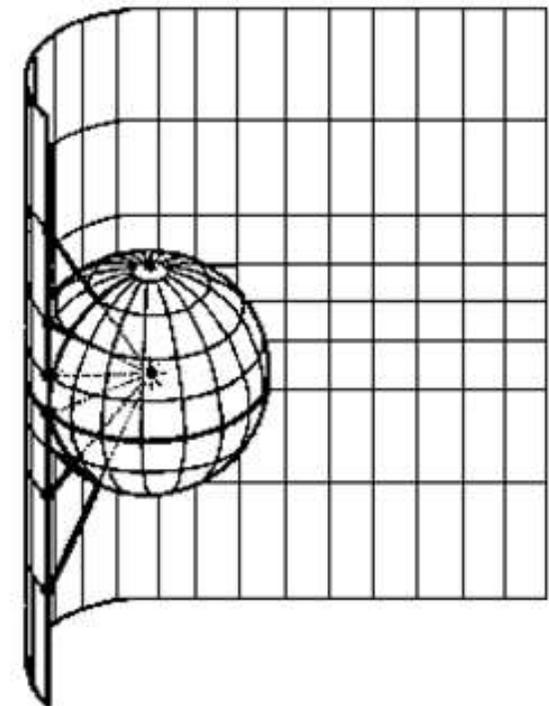
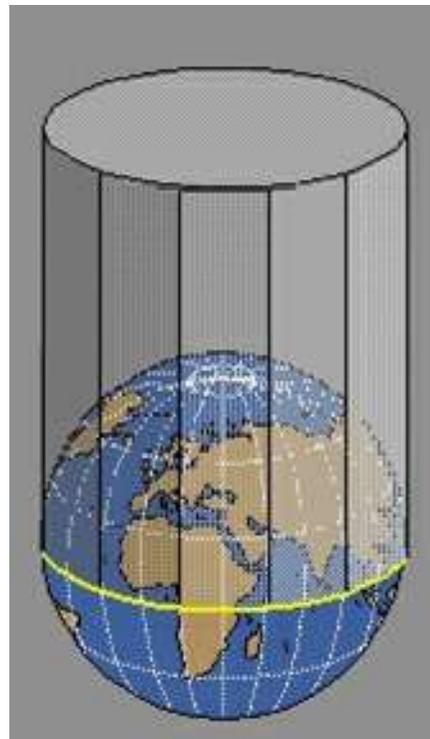
Soit en Nm : 75 / 1,852 ≈ 40,5 Nm

Projection de Mercator (1512–1594) (1)

Projection **depuis le centre de la Terre** sur un **cylindre tangent à la Terre** le long de l'équateur.



Ensuite, la carte est **déroulée** . . .



Projection de Mercator (1512–1594) (2)

... et nous obtenons :



Propriétés :

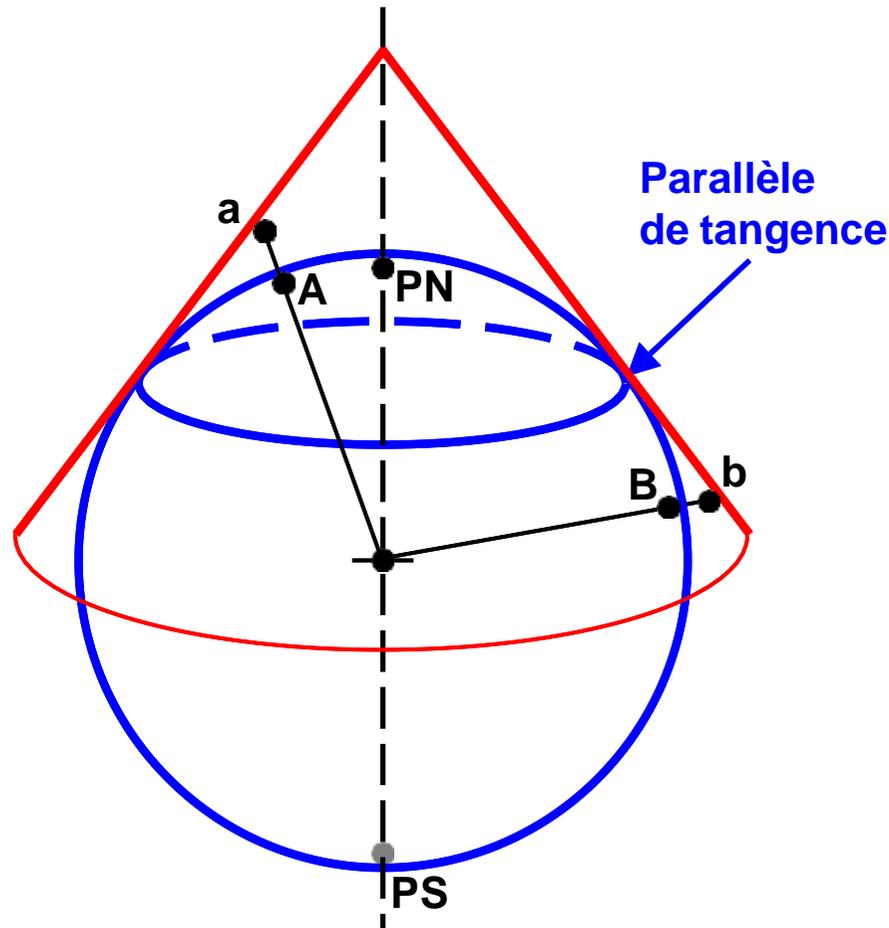
- ☺ **Conforme** (les angles sont conservés).
- ☹ **Échelle quasi-constante** près de l'**équateur**, mais **très variable ailleurs**.
- ☺ Les **méridiens** sont des **droites parallèles**.
- ☺ Les **parallèles** et **méridiens** sont **perpendiculaires entre eux**.
- ☹ Les **pôles ne peuvent pas être représentés**.

Projection de Lambert (1728-1777) (1)

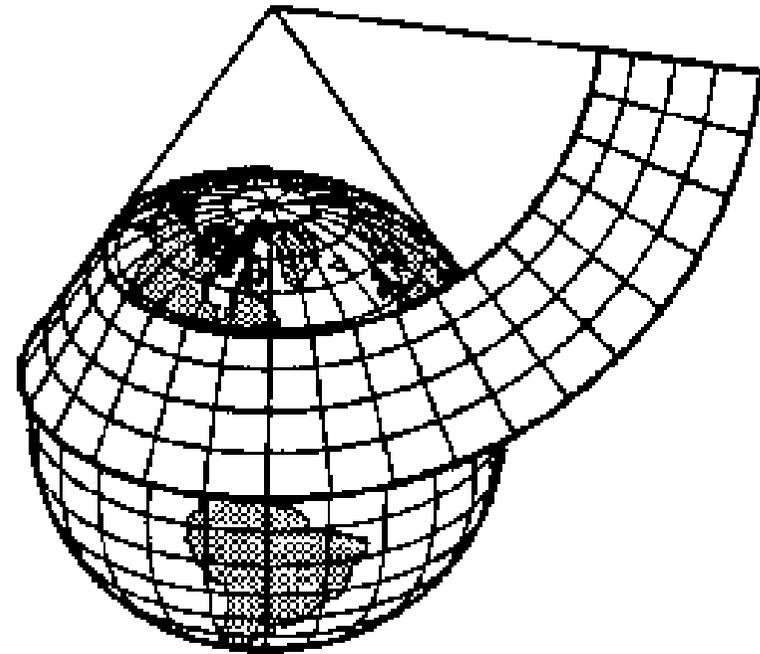
Pour les régions éloignées de l'équateur, un **cône** est utilisé :

- son sommet est aligné avec l'axe des pôles
- il est tangent à la sphère le long d'un parallèle.

La projection se fait **depuis le centre de la Terre** sur le **cône**.

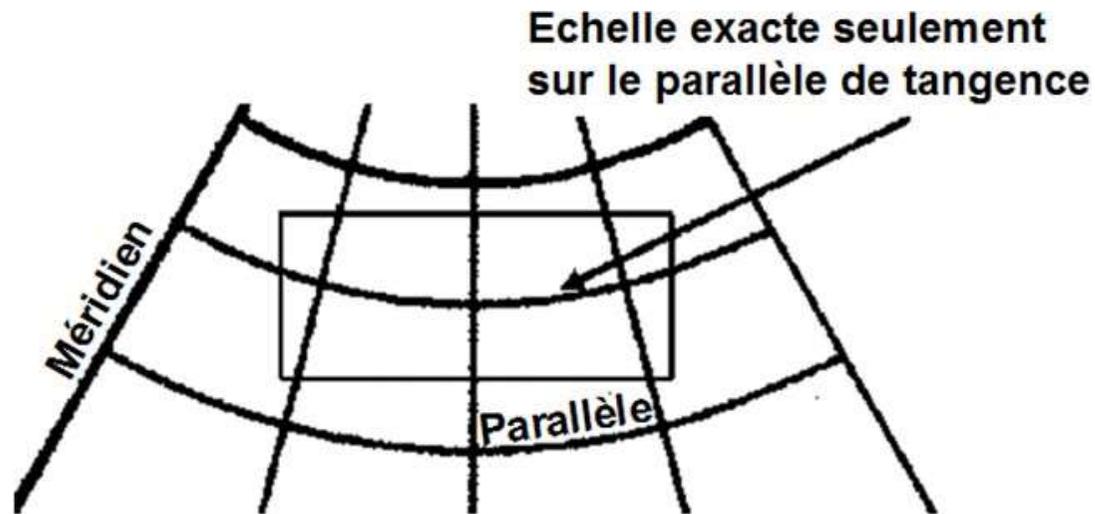


Ensuite le cône est **développé**...



Projection de Lambert (1728-1777) (2)

... et nous obtenons :

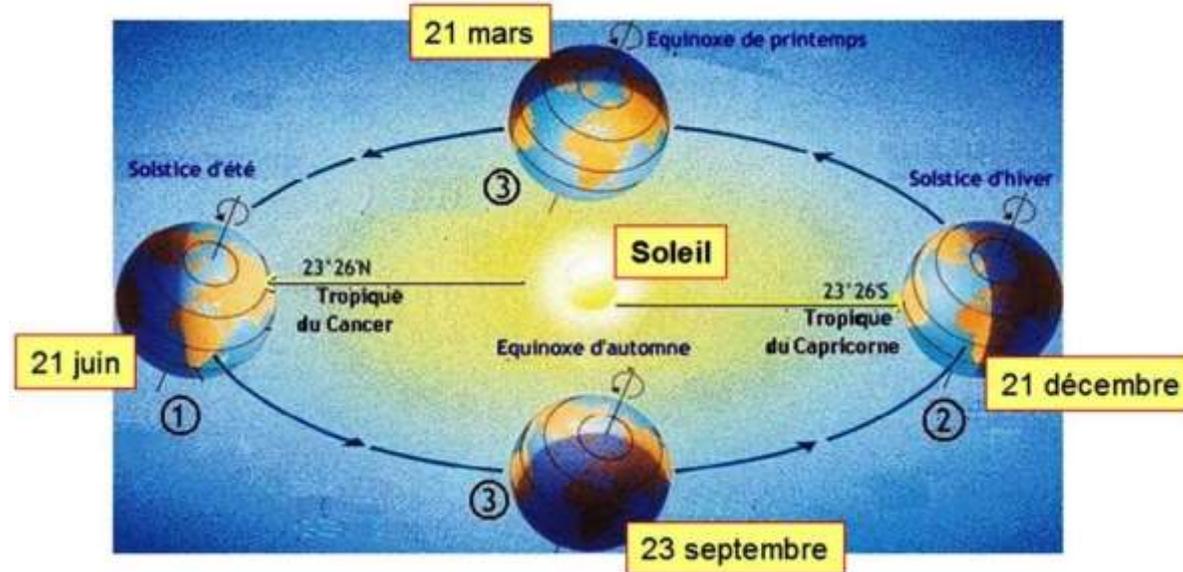


Propriétés :

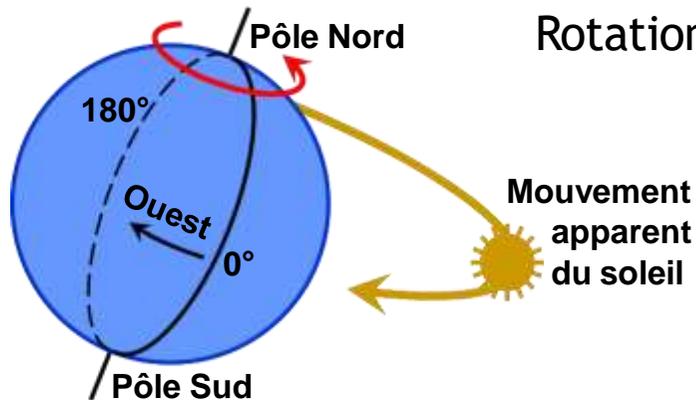
- ☺ **Conforme** (les angles sont conservés).
- ☺ **Échelle quasi-constante** près du **parallèle de tangence**.
- ☹ Les **méridiens** sont des **droites concourantes**.
- ☹ Les **parallèles** sont des **arcs de cercles**.
- ☺ Les **méridiens** et **parallèles** sont **perpendiculaires entre eux**.

La mesure du temps (1)

Au cours d'**une année**, la Terre tourne autour du soleil suivant une trajectoire elliptique (assez proche d'un cercle) dont le soleil est l'un des foyers.



D'autre part, la Terre effectue un tour complet sur elle-même **chaque jour**.



Rotation de 360° en 24h00 (par rapport à la direction du soleil)

Soit : $360 / 24 = 15^\circ / \text{heure}$

Chaque heure, la Terre tourne de **15°**

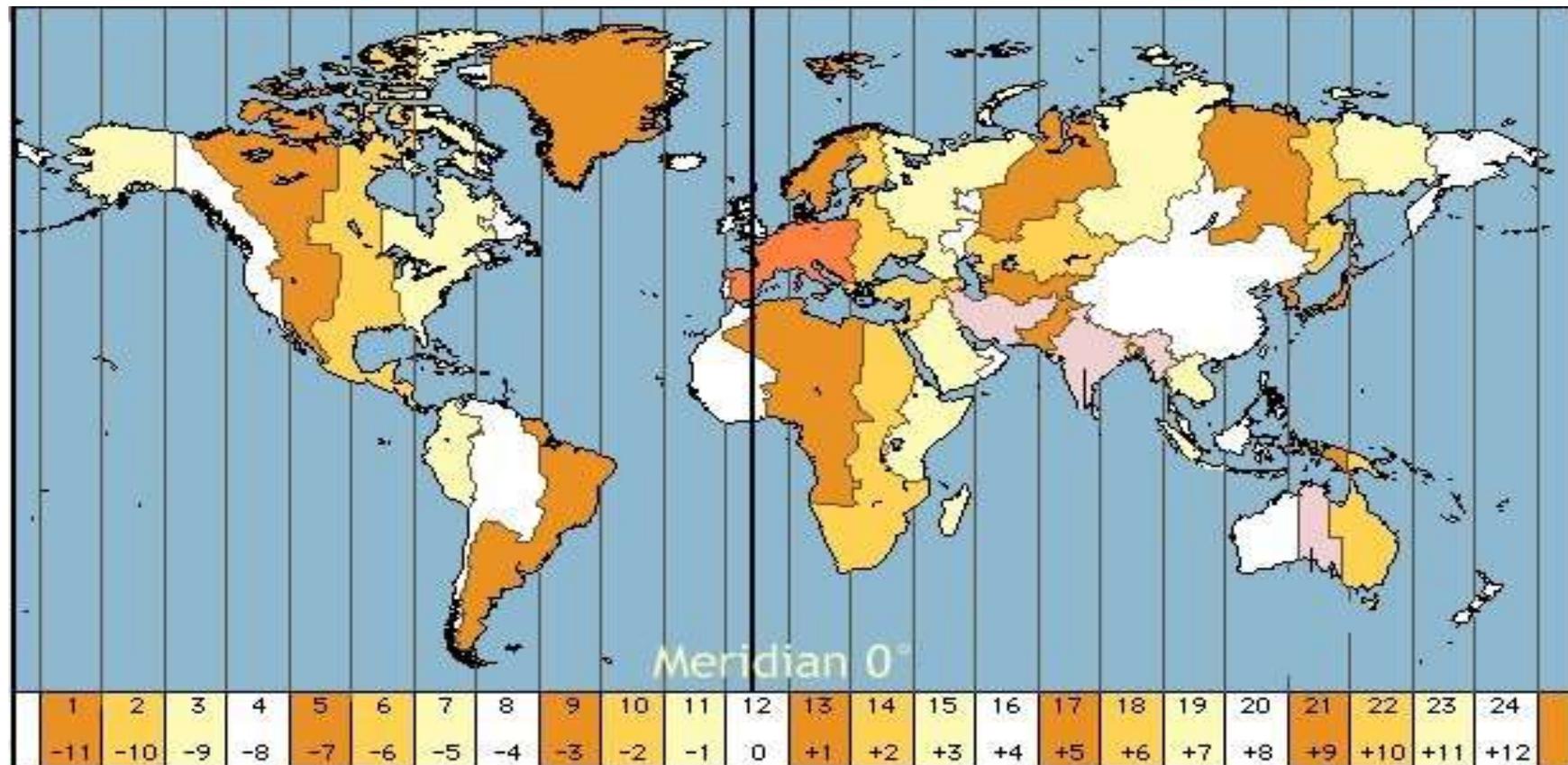
Soit, pour $1^\circ : 60 / 15 = 4 \text{ mn}$

1° de rotation en 4 mn

La mesure du temps (2)

Localement, il est **midi** lorsque le soleil est au **zénith** (verticale du méridien d'observation).

Afin que l'heure soit la même à l'intérieur d'un même pays, la Terre a été divisée en **24 fuseaux horaires** de **15°** de longitude chacun.



La mesure du temps (3)

A l'**intérieur d'un même fuseau horaire** l'heure locale est **la même partout**, mais le soleil ne passe pas au zénith partout en même temps.

Le **soleil** se **lève** ou se **couche** donc à des **heures différentes** suivant la **longitude du lieu considéré**.

- *Le soleil se lève plus tôt à Strasbourg qu'à Brest.*
- *Il se couche plus tard à Brest qu'à Strasbourg.*

Pour régler le mouvement des avions, une heure **valable en tout point du globe** a été adoptée (pas de changement de réglage de la montre de bord quand on change de fuseau horaire !).

C'est l'heure "**UTC**" ou "**GMT**" : heure de Greenwich.

Il est 12h00 GMT ou 12h00 UTC lorsque le soleil est au zénith du méridien de Greenwich, et il est 12h00 pour **tous les avions dans le monde**.

L'**heure locale** est fixée par les **autorités des pays concernés**.

En France métropolitaine :

- Hiver : Heure locale = UTC + 1h.
- Été : Heure locale = UTC + 2h.

Notion de **nuit aéronautique** :

En France métropolitaine, elle commence **30 mn après** le coucher du soleil, et finit **30 mn avant** le lever du soleil.

La mesure du temps (4)

Exercices :

1- La différence d'heure de coucher du soleil sur deux aérodromes séparés de $7^{\circ}30'$ en longitude est :

- | | |
|-------------------------------|----------|
| a) 1 heure | b) 15 mn |
| c) il n'y a pas de différence | d) 30 mn |

Rappel : 1° de rotation en 4 mn

$$7^{\circ}30' = 7,5^{\circ}$$

$$\text{donc } 7,5 \times 4 = 30 \text{ mn} \rightarrow \text{réponse d}$$

2- Vous volez à bord d'un avion de Paris vers Brest (Bretagne). Le soleil se couchera à Brest :

- | | |
|-------------------------------|-----------------------------|
| a) plus tôt qu'à Paris | b) plus tard qu'à Paris |
| c) à la même heure qu'à Paris | d) cela dépend de la saison |

Brest étant à l'ouest de Paris, le soleil se couchera plus tard \rightarrow réponse b

La navigation à l'estime (1)

C'est la **méthode** de navigation **basique**.

A partir d'un point connu, elle consiste à déterminer le **cap à prendre** pour rejoindre un autre point ainsi que le **temps nécessaire** pour rejoindre ce point.

De point en point elle permet d'assurer un **cheminement précis** depuis le point de **départ** jusqu'à **destination**.

Pour cela, nous utiliserons une carte pour :

- déterminer **l'orientation de la route** directe entre 2 points,
- mesurer la **distance** entre ces 2 points,
- puis calculer le **temps nécessaire** pour parcourir cette distance (en supposant qu'il n'y ait **pas de vent**).

Ensuite, nous prendrons en compte **l'influence du vent** sur le **cap** à prendre et sur le **temps** de parcours.

Puis nous tiendrons compte de l'écart entre le **nord magnétique** et le **nord vrai** (= **déclinaison magnétique**) pour déterminer le **cap magnétique à suivre**.

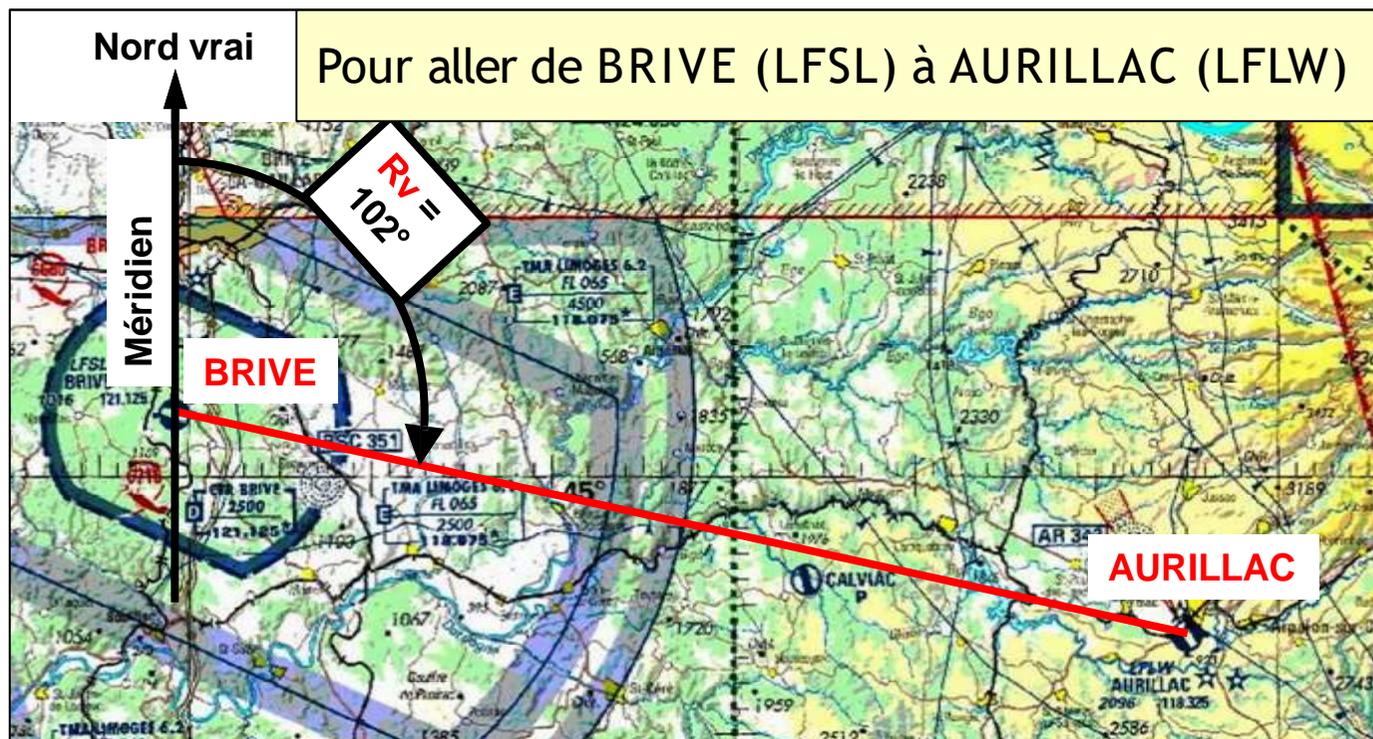
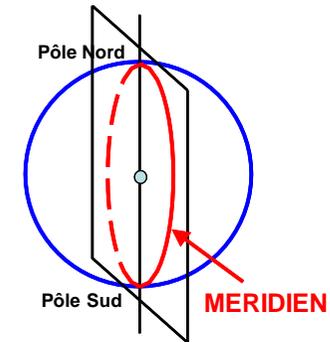
Enfin, nous corrigerons les petites erreurs (= **déviations**) du compas magnétique.

La navigation à l'estime (2)

1- Orientation de la route à suivre :

Quelle que soit la carte utilisée, la direction du **nord** est toujours donnée par le **méridien** du lieu considéré.

Toutes les mesures d'angle se feront par rapport au **méridien local**, dans le **sens horaire**.

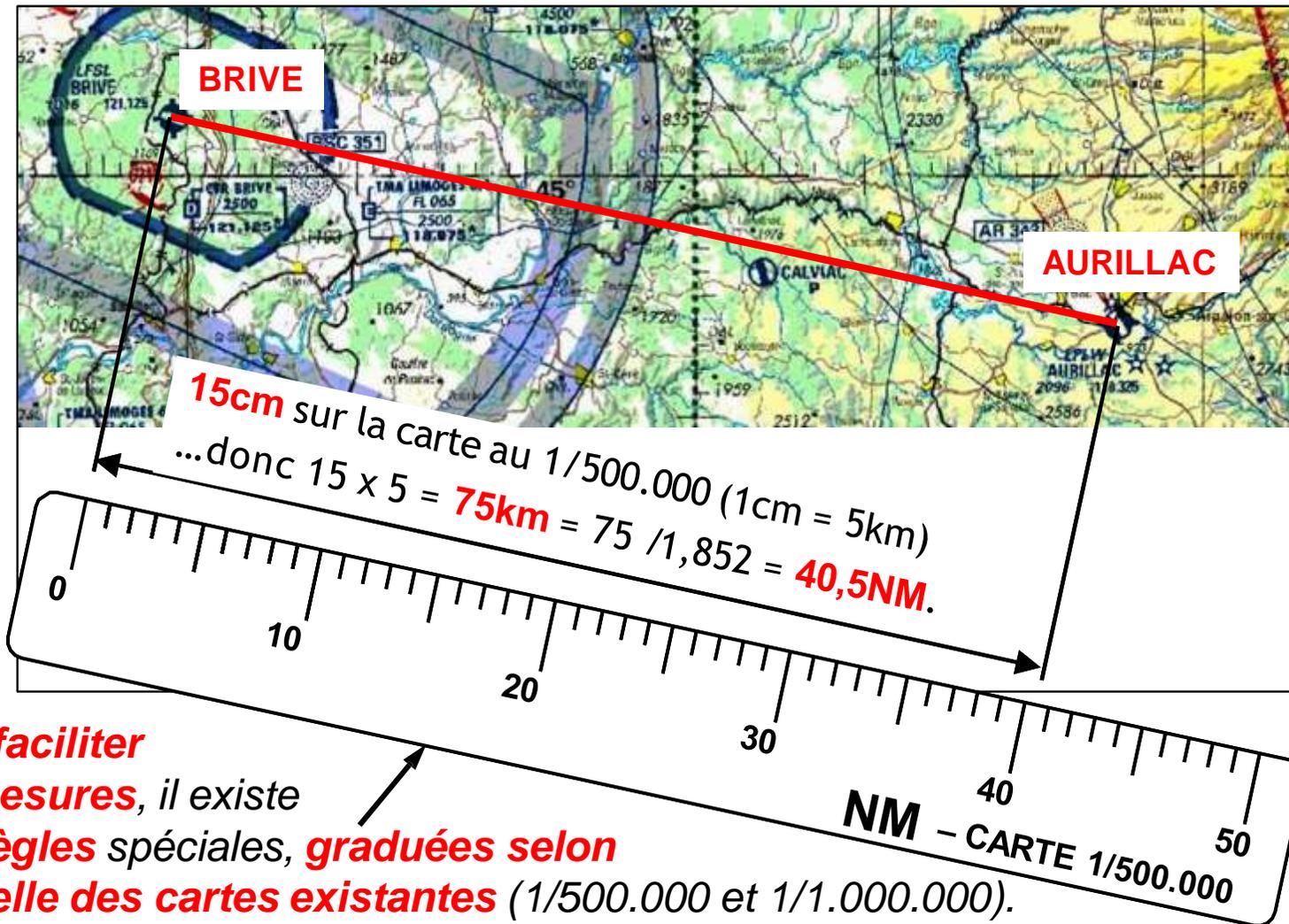


Rv : L'angle entre le **méridien local** et la **route à suivre** est appelé « **Route vraie** » .

La navigation à l'estime (3)

2- Distance à parcourir :

Pour connaître la distance à parcourir, il suffit de **mesurer la distance** sur la carte et de **diviser par l'échelle**.



Pour **faciliter les mesures**, il existe des **règles spéciales, graduées selon l'échelle des cartes existantes** (1/500.000 et 1/1.000.000).

La navigation à l'estime (4)

3- Calcul du temps sans vent :

$$\text{Temps de vol sans vent (en heures)} = \frac{\text{Distance à parcourir (en NM)}}{\text{Vitesse propre de l'avion (en kt)}}$$

$$\text{Ce qu'on peut écrire : } T \text{ (h)} = \frac{D \text{ (NM)}}{V_p \text{ (kt)}}$$

Pour avoir le temps en minutes, il faut multiplier par 60,

$$\text{soit : } T \text{ (mn)} = T \text{ (h)} \times 60 = D \text{ (NM)} \times \frac{60}{V_p \text{ (kt)}} \quad (1)$$

On appelle « Facteur de Base » : $F_b = \frac{60}{V_p \text{ (kt)}}$ *C'est le nombre de minutes nécessaires pour parcourir 1 NM*

L'égalité (1) peut alors s'écrire : $T \text{ (mn)} = D \text{ (NM)} \times F_b$

La navigation à l'estime (5)

$$Fb = \frac{60}{Vp \text{ (kt)}}$$

$$T \text{ (mn)} = D \text{ (NM)} \times Fb$$

Exemple :

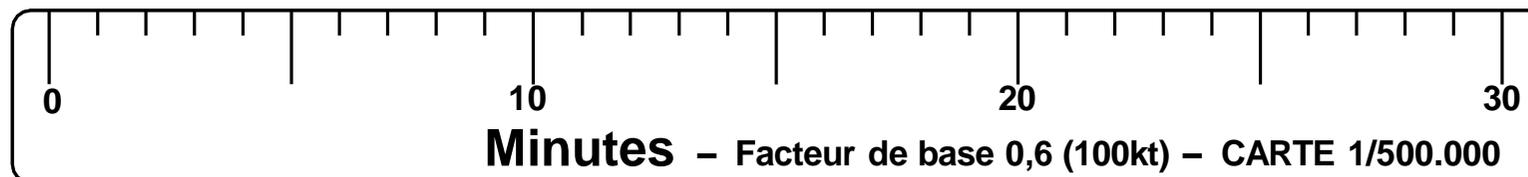
DR 400 : Vitesse de croisière $\approx 100 \text{ kt}$

soit un facteur de base : $Fb = 60 / 100 = 0.6 \text{ mn/NM}$

Si $D = 40 \text{ NM} \rightarrow T = 40 \times 0.6 = 24 \text{ mn}$

Si $D = 25 \text{ NM} \rightarrow T = 25 \times 0.6 = 15 \text{ mn}$

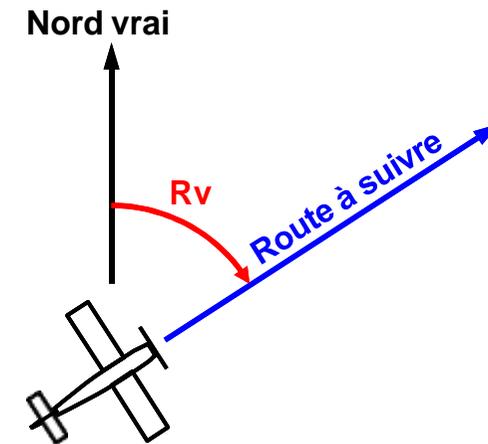
La **règle** créée pour mesurer les distances peut être **graduée directement en temps de vol** à partir du moment où l'on connaît la **vitesse de l'aéronef** et donc son **facteur de base**.



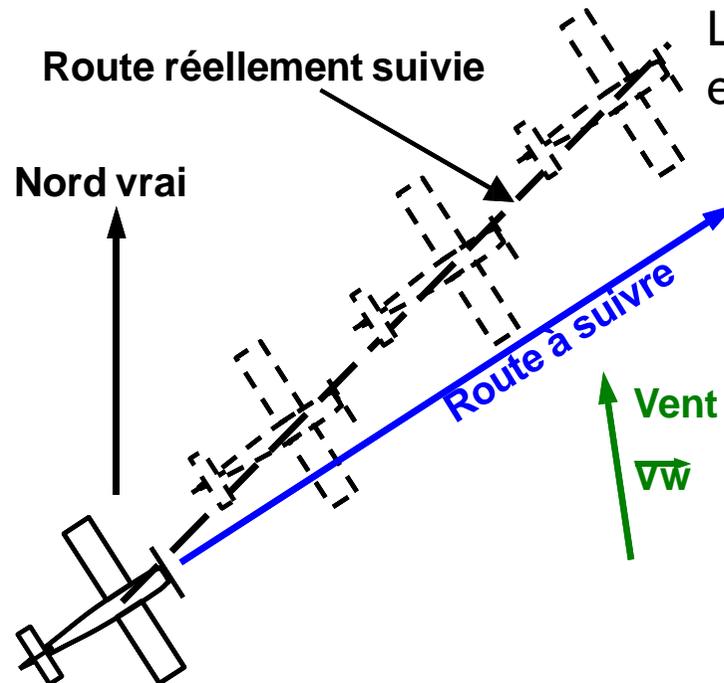
La navigation à l'estime (6)

4- Effet du vent :

Sans vent, ayant calculé la **route vraie R_v** à suivre, il suffit de **maintenir l'avion** orienté dans la **direction de cette route** pour parvenir au point choisi.



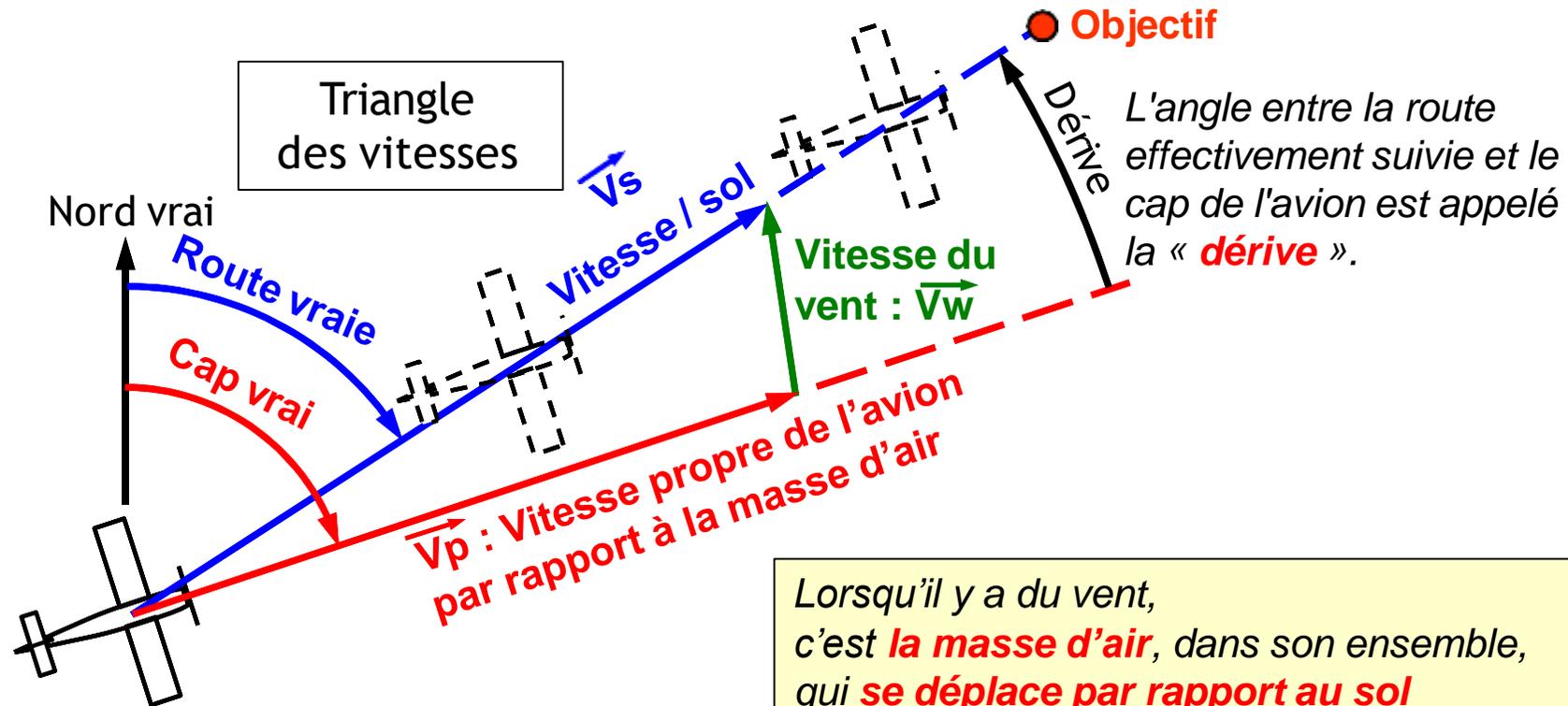
Cependant **sous l'action du vent**, il en va tout autrement !



Le vent chasse l'avion en dehors de la route visée.

La navigation à l'estime (7)

Pour parvenir à l'endroit souhaité, il faut donc viser une direction (le « **cap** ») différente de la route à suivre.



L'angle entre la route effectivement suivie et le cap de l'avion est appelé la « **dérive** ».

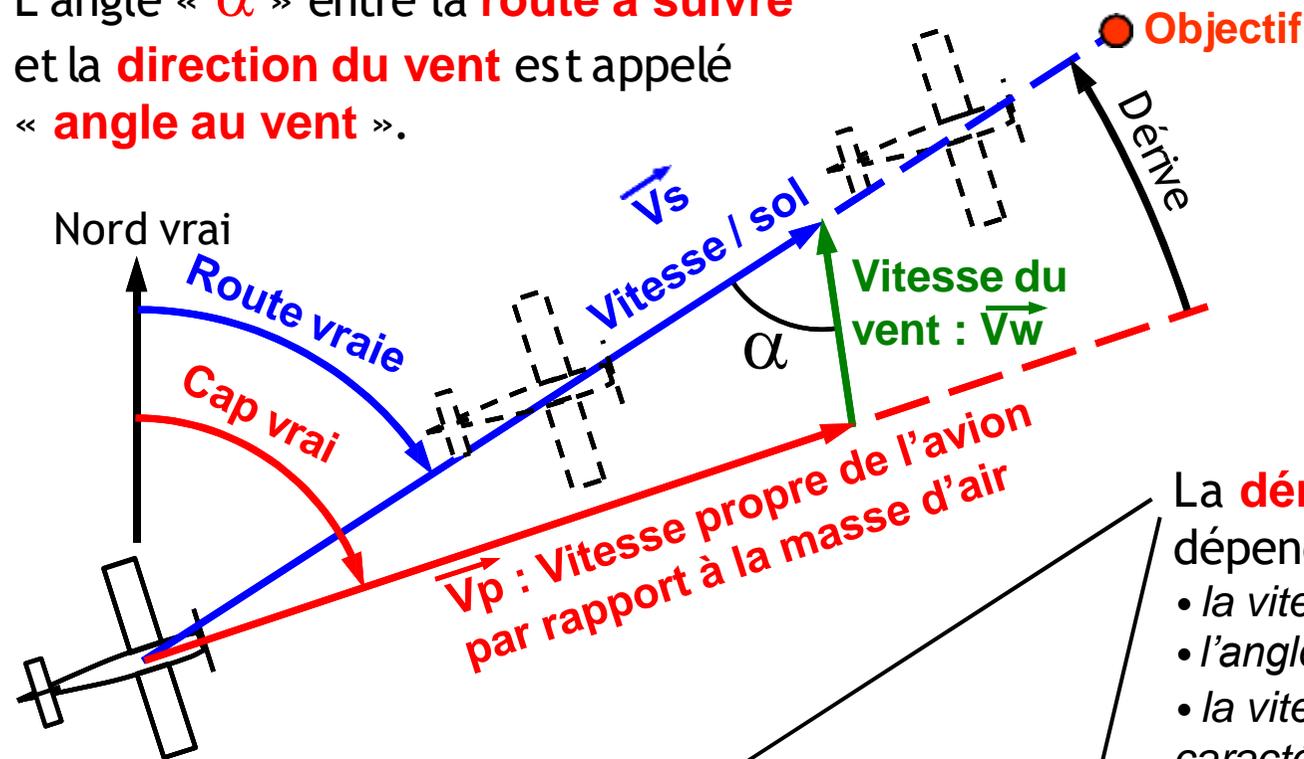
Lorsqu'il y a du vent, c'est **la masse d'air**, dans son ensemble, qui **se déplace par rapport au sol** à la vitesse \vec{V}_w .

L'avion se déplaçant avec sa vitesse propre \vec{V}_p au sein de cette **masse d'air**, aura une **vitesse résultante par rapport au sol** qui sera la résultante $\vec{V}_p + \vec{V}_w$.

La navigation à l'estime (8)

Calcul de la dérive et de la vitesse sol :

L'angle « α » entre la **route à suivre** et la **direction du vent** est appelé « **angle au vent** ».



Formules de calcul :

$$\text{Dérive } \delta (^{\circ}) = \underbrace{Vw \text{ (kt)} \times Fb \text{ (mn/NM)}} \times \sin \alpha$$

*Ceci représente la dérive maximale.
Celle qu'on aurait si le vent était
perpendiculaire à la route.*

$$\text{Vitesse sol } Vs = Vp \pm Vw \times \cos \alpha$$

*Signe + si le vent vient de l'arrière,
Signe - s'il vient de l'avant.*

La **dérive** et la **vitesse sol** dépendent de :

- la vitesse du vent **Vw**
- l'angle au vent « α »
- la vitesse propre de l'avion **Vp** caractérisée par son facteur de base **Fb**.

La navigation à l'estime (9)

Exemple :

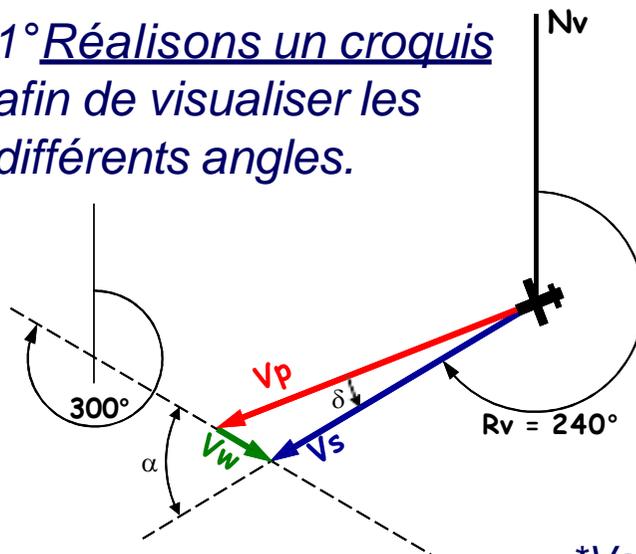
Soit à parcourir la distance de **45 Nm** orientée suivant la route vraie **$Rv = 240^\circ$** avec un avion dont la vitesse propre est **$Vp = 100$ kt** et un vent du **$300^\circ/20$ kt**.

*NB : Lorsqu'on donne la direction du vent, il s'agit toujours de la direction **d'où il vient** (ici du 300°).*

$$\text{Dérive } \delta (^\circ) = \mathbf{Vw} \text{ (kt)} \times \mathbf{Fb} \text{ (mn/NM)} \times \sin \alpha$$

$$\text{Vitesse sol } \mathbf{Vs} = \mathbf{Vp} \pm \mathbf{Vw} \times \cos \alpha$$

1° Réalisons un croquis afin de visualiser les différents angles.



2° Calculons :

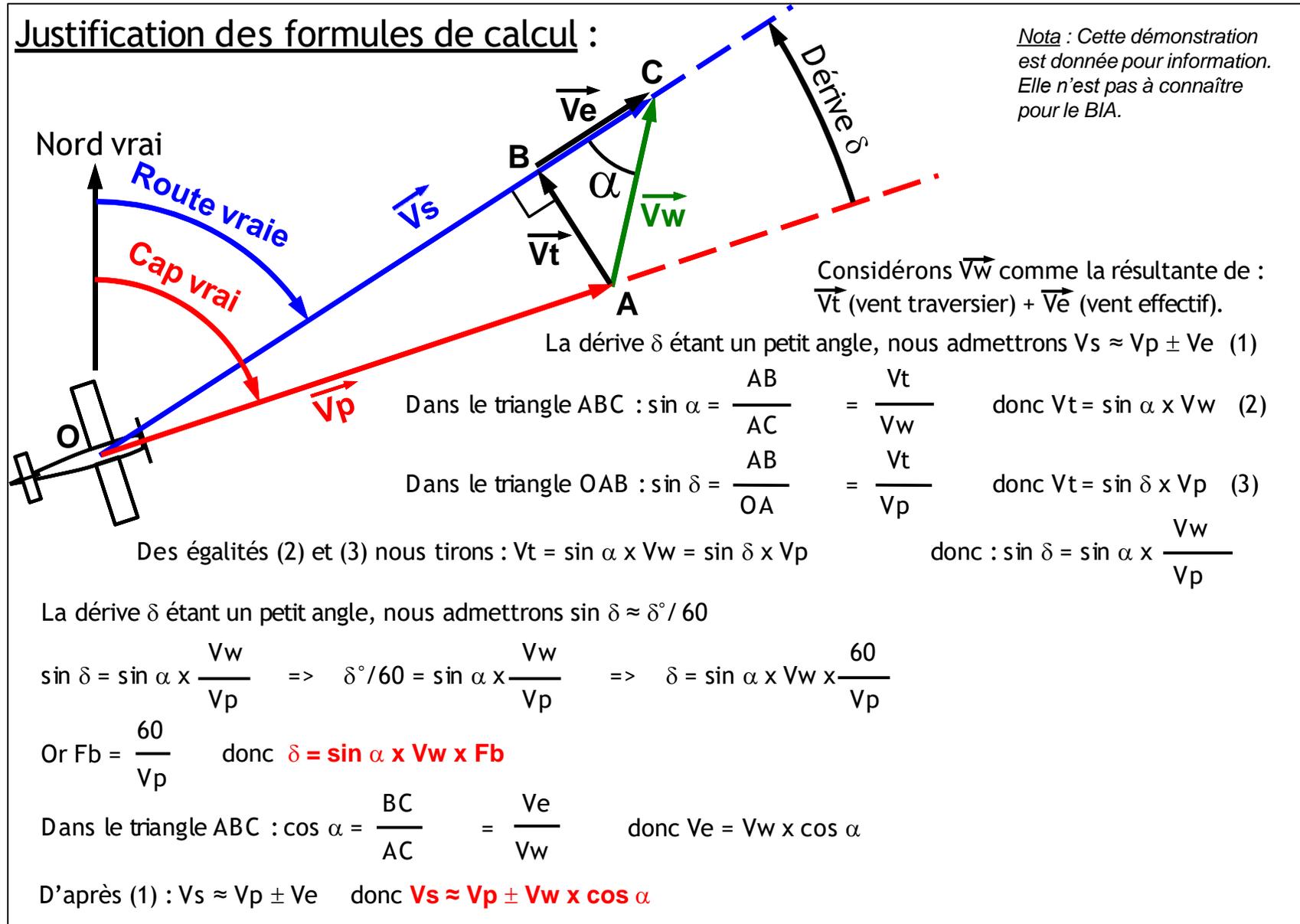
- Angle au vent $\alpha = 300^\circ - 240^\circ = 60^\circ$
- Facteur de base $Fb = 60/100 = 0,6$ mn/NM
- Dérive $\delta \approx 20 \times 0,6 \times 0,8^* \approx 10^\circ$
- Vitesse sol $Vs \approx 100 - 20 \times 0,5^* \approx 90$ kt
- Facteur de base corrigé = $60 / 90 = 0,666$
- **Cap à prendre** = $240 + 10 = 250^\circ$
- **Temps de parcours** = $45 \times 0,666 = 30$ mn

*Valeurs approximatives pour calcul mental

Angle au vent (α)	Axe $\pm 20^\circ$	30°	45°	60°	Travers $\pm 20^\circ$
Sin α	0	0,5	0,7	0,8	1
Cos α	1	0,8	0,7	0,5	0

La navigation à l'estime (10)

Justification des formules de calcul :



La navigation à l'estime (11)

5- La déclinaison magnétique :

Les **lignes du champ magnétique terrestre** ne sont **pas** strictement **alignées** avec les **méridiens**, car les pôles magnétiques ne sont pas confondus avec les pôles géographiques).

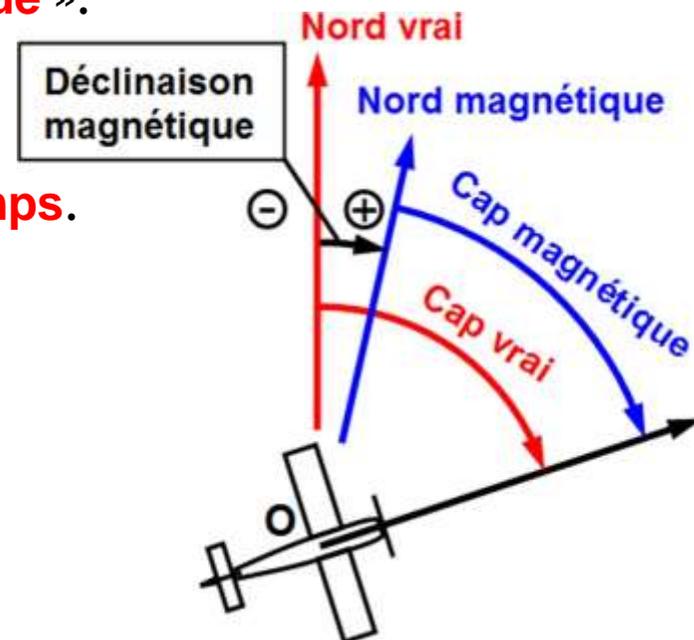
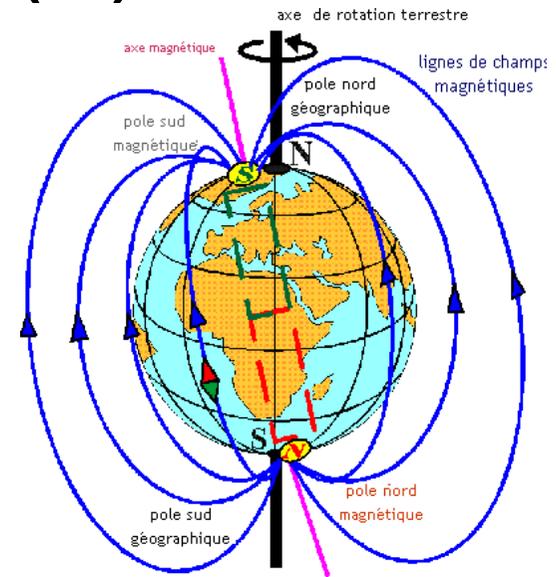
En **chaque point** de la Terre, la direction du **nord magnétique** fait un **angle** généralement non nul avec la direction du **nord vrai**.

Cet angle est appelé « **déclinaison magnétique** ».

La **déclinaison magnétique varie d'un point à un autre**.

Elle **varie** aussi, **lentement**, en fonction du **temps**.
(à Bordeaux, elle a changé de 6° en 40 ans).

Elle est comptée **positivement** lorsque le **nord magnétique** est à **droite** du nord vrai, et **négativement** s'il est à **gauche**.



La navigation à l'estime (12)

Rappel : Pour se diriger, le pilote dispose :

- d'un **compas magnétique**
- et d'un **conservateur de cap** recalé à l'aide du compas magnétique.



Les caps affichés à bord sont donc des **caps magnétiques**.

Après avoir déterminé (comme vu précédemment) le **cap vrai** à suivre, il faudra traduire ce résultat en **cap magnétique** :

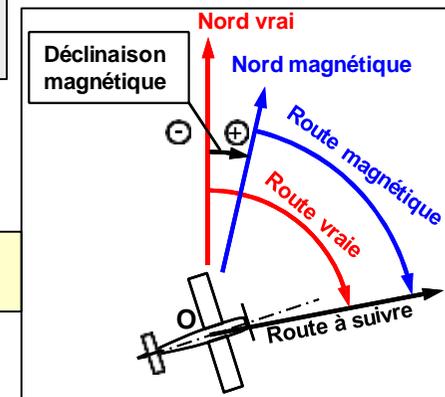
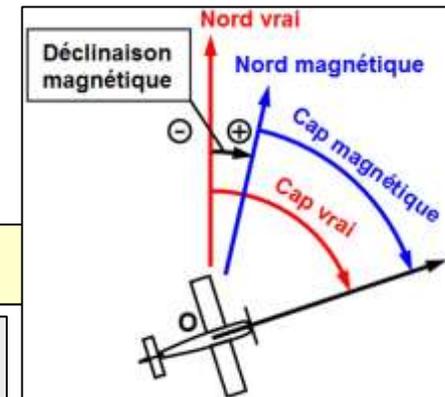
$$\text{Cap magnétique} = \text{Cap vrai} - \text{déclinaison magnétique}$$

Nota : La déclinaison magnétique en France continentale est actuellement très proche de 0°. On peut donc confondre cap magnétique et cap vrai.

Mais elle est, par exemple, de 12°Est à Los Angeles et de 13°Ouest à New York !

De même, on peut définir la route magnétique :

$$\text{Route magnétique} = \text{Route vraie} - \text{déclinaison magnétique}$$



La navigation à l'estime (13)

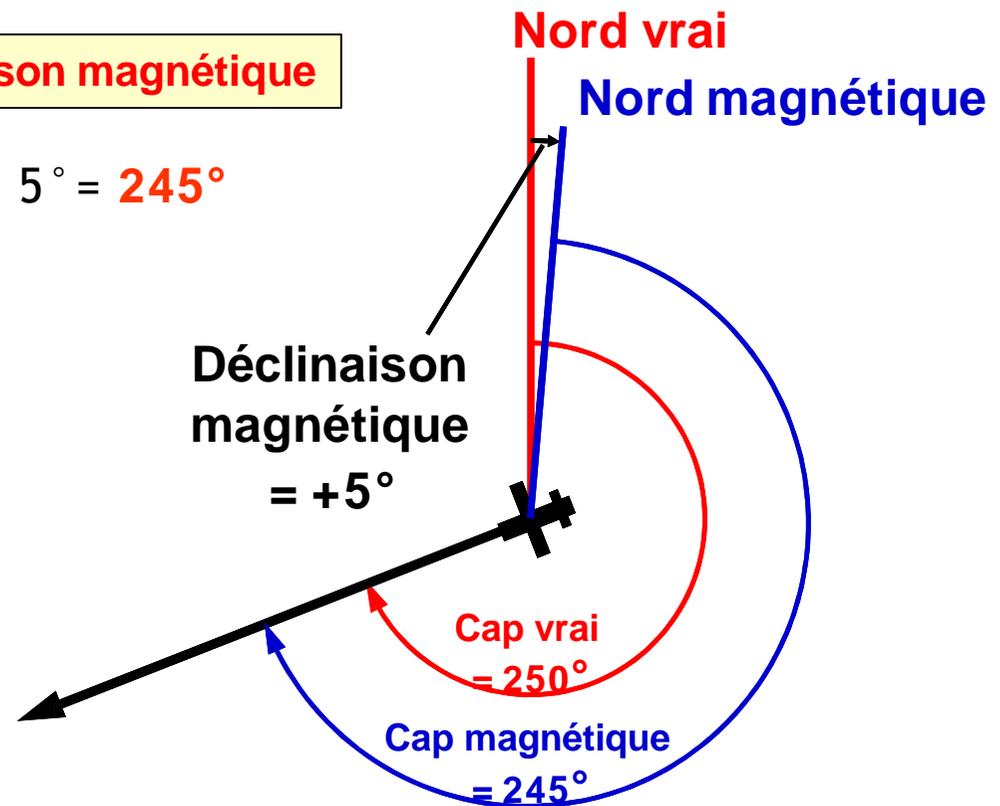
Exemple :

Reprenons l'exemple précédent :

- Le cap vrai à prendre est **Cv = 250°**
- Supposons que la déclinaison magnétique locale soit **Dm = +5°**

Cap magnétique = Cap vrai - déclinaison magnétique

Cap magnétique à prendre = 250° - 5° = 245°



La navigation à l'estime (14)

6- La déviation du compas :

Le compas magnétique **n'est pas** un instrument **parfait**. Il est **perturbé** par certaines **masses métalliques** de l'aéronef et par les **champs magnétiques parasites** dus au fonctionnement de certains équipements de bord.

Le compas magnétique incorpore un dispositif qui permet de supprimer une partie des erreurs par une opération de réglage appelée « **compensation** ».

Malgré cette compensation, **il subsiste de petits écarts** appelés « **déviaton du compas** » entre les indications du compas et la valeur exacte du cap magnétique.

La valeur de la déviation est mentionnée dans un « **tableau de régulation** » ou « tableau des déviations résiduelles », **en fonction du cap magnétique**.

(Ce tableau est placé sur le compas après l'opération de compensation).



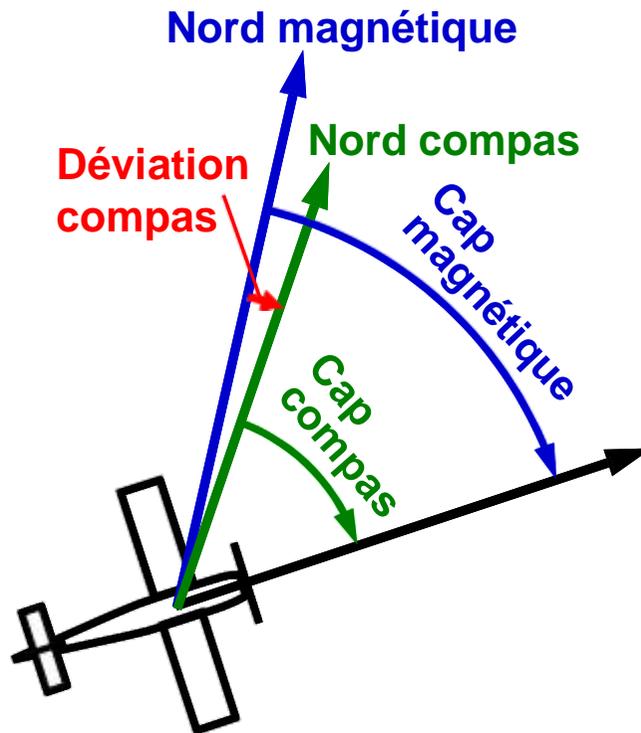
Cap magnétique

For	N	30	60	E	120	150
Steer	0	-2	-2	3	-1	-1
For	S	210	240	W	300	330
Steer	+1	+3	+2	+1	+2	+2

Correction à appliquer

La navigation à l'estime (15)

Pour tenir compte de la déviation du compas, il faudra donc suivre un « **cap compas** » (*cap indiqué par le compas*) légèrement différent du cap magnétique visé.



La déviation est comptée positivement lorsque le nord compas est à droite du nord magnétique.

$$\text{Cap compas} = \text{Cap magnétique} - \text{déviation du compas}$$

La navigation à l'estime (16)

Exemple :

Reprenons l'exemple précédent :

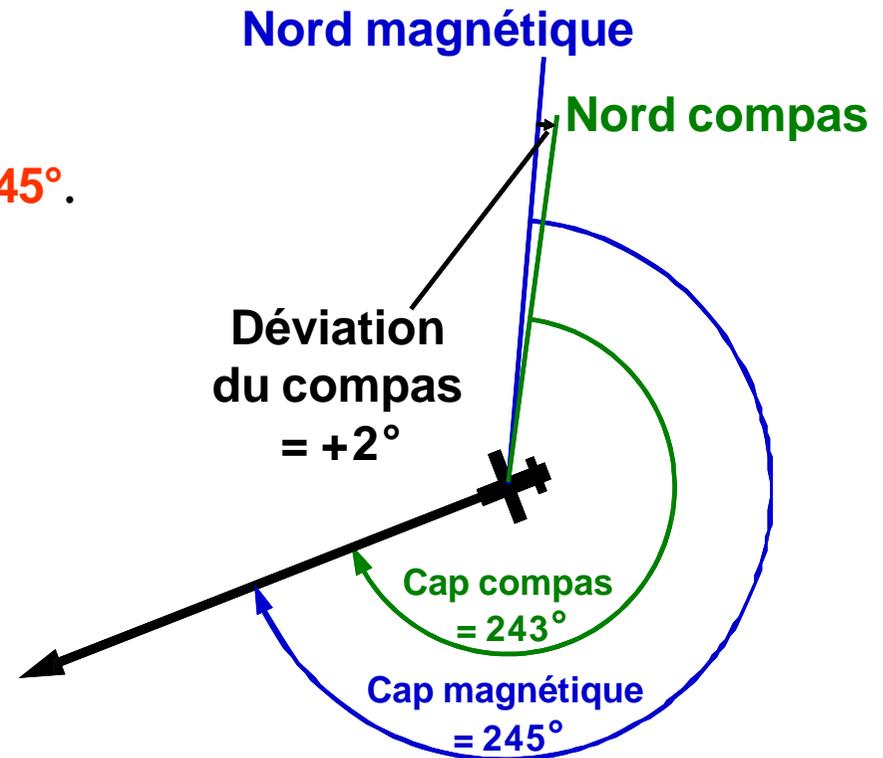
- Le cap magnétique à prendre est **Cm = 245°**.
- Supposons que le tableau de régulation affiché sur le compas soit le suivant :

Cm	N	30	60	E	120	150
d	0	-2	-2	3	-1	-1
Cm	S	210	240	W	300	330
d	+1	+3	+2	+1	+2	+2

Pour le cap magnétique le plus proche de 245°, la déviation du compas est **d = +2°**.

Cap compas = Cap magnétique - déviation du compas

Cap compas à prendre = $245^\circ - 2^\circ = 243^\circ$



La navigation par cheminement

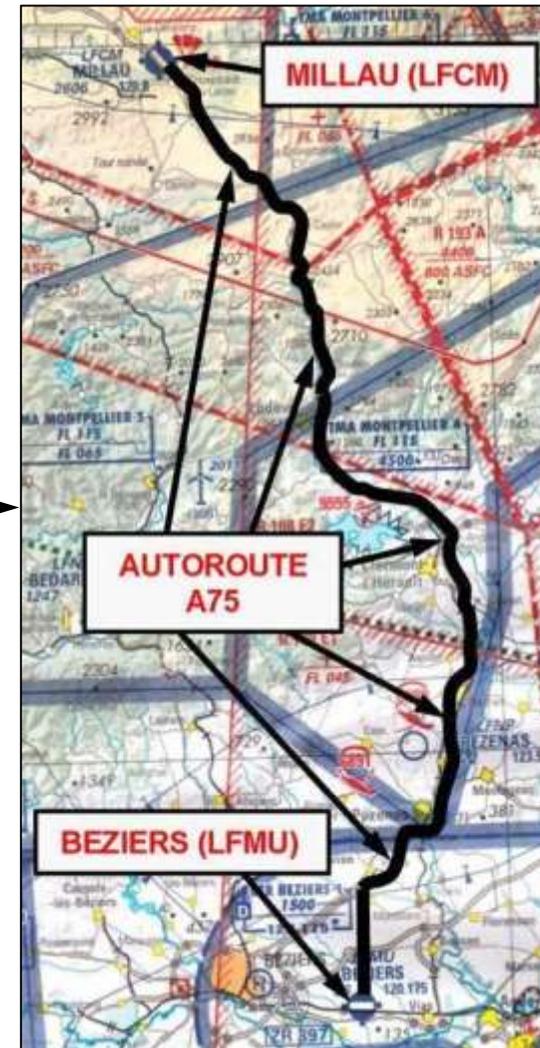
Dans certains cas, la navigation par **cheminement** peut être préférée à la navigation à l'estime (*en particulier, lorsque les **conditions météo** sont **dégradées** et que la **configuration géographique** s'y prête*).

Elle consiste à suivre un **axe naturel ou artificiel** facilement identifiable (*cours d'eau, voie ferrée, route importante ou autoroute, rivage, vallée, ligne à haute tension en zone boisée...*).

Exemple :

Pour aller de Béziers (LFMU) à Millau (LFCM) on peut **suivre l'autoroute A75** qu'il est facile de rejoindre au départ de Béziers et qui passe à proximité de l'aérodrome de Millau.

Cette solution peut être préférable lorsque un **plafond nuageux bas** ou une **visibilité dégradée** risquent de rendre **difficile l'identification** des **points de repère intermédiaires** d'une navigation à l'estime.



L'erreur systématique

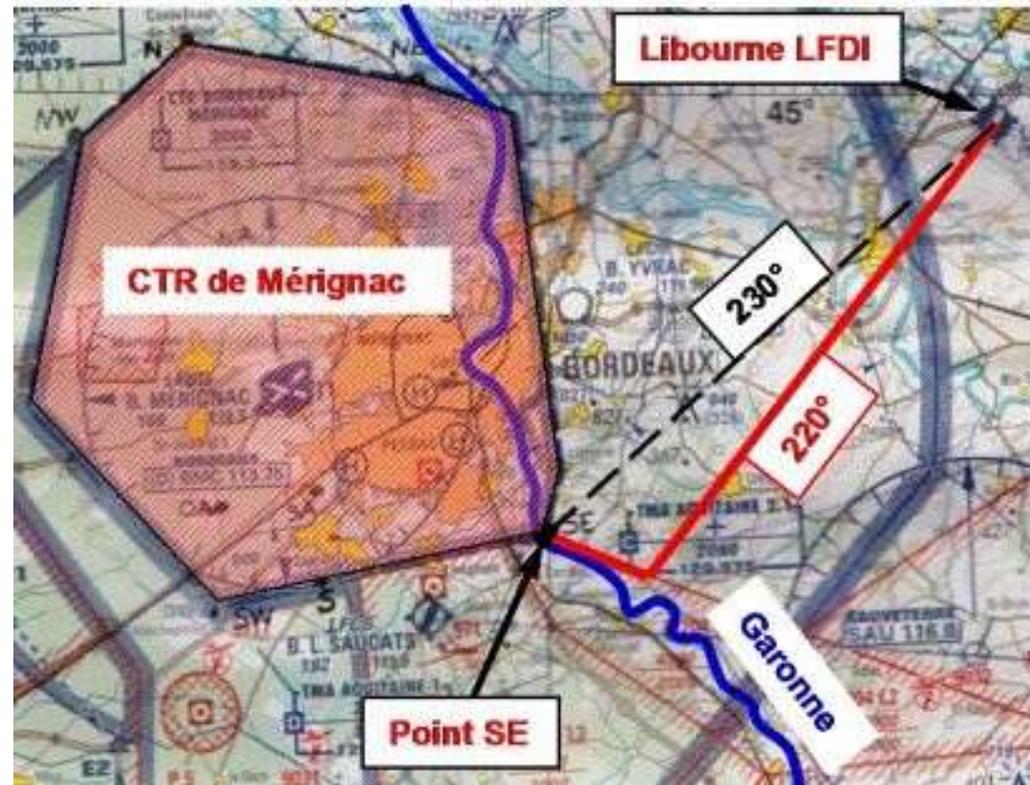
C'est une variante de la navigation par cheminement.

Elle consiste à **choisir** une **route** volontairement **différente de la route directe**, dans le but de **parvenir à un axe** naturel ou artificiel **facilement identifiable** qui nous **conduira** ensuite, sans difficulté, **à destination**.

Elle permet de garantir que **l'on ne passera pas à côté** de l'aérodrome de destination **sans le voir**, suite à une navigation imprécise.

Exemple :

Pour aller de Libourne au point d'entrée S E de Mérignac sans risquer de pénétrer dans la CTR de Mérignac, il peut être utile de **ne pas suivre la route directe (230°)**, mais de suivre **la route 220° jusqu'à la Garonne**, puis de suivre la **Garonne jusqu'au point SE**.



Choix des repères au sol

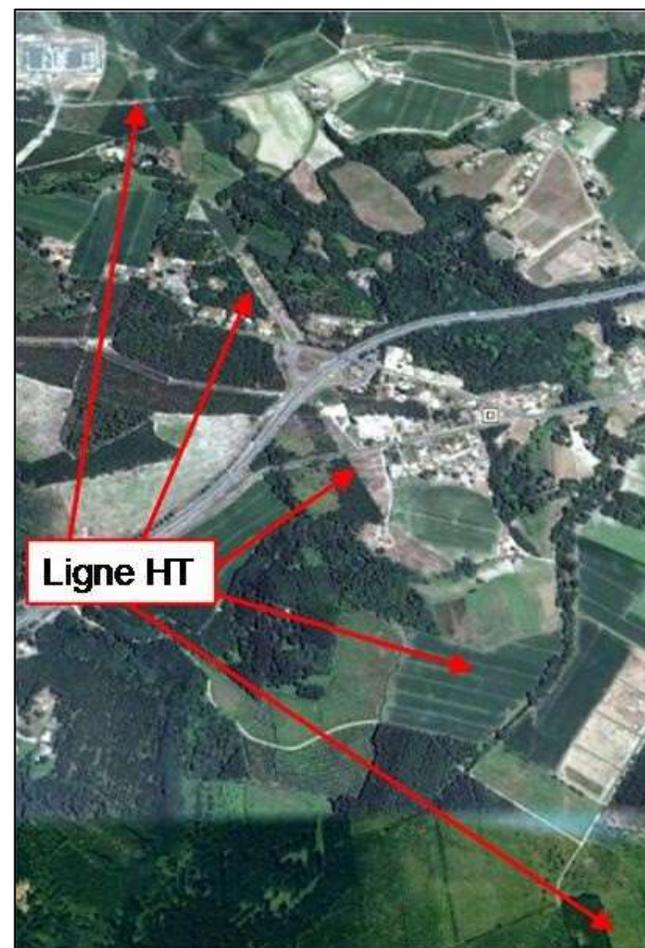
Pour la navigation à l'**estime** ou par **cheminement**, l'observation de **repères au sol** est **indispensable**.

Pour la **radionavigation**, cette observation, lorsqu'elle est possible permet d'assurer une **vérification**.

En fonction de l'**altitude de vol** et de la **nature du terrain** survolé, certains repères sont plus ou moins faciles à identifier :

Il faut préférer :

- En zone forestière : Les lignes à haute tension et les grandes routes (*les petites routes et les voies ferrées sont souvent dissimulées*).
- En zone agricole : les voies ferrées et les grandes villes (*les lignes à haute tension se distinguent mal et les villages se ressemblent presque tous*).



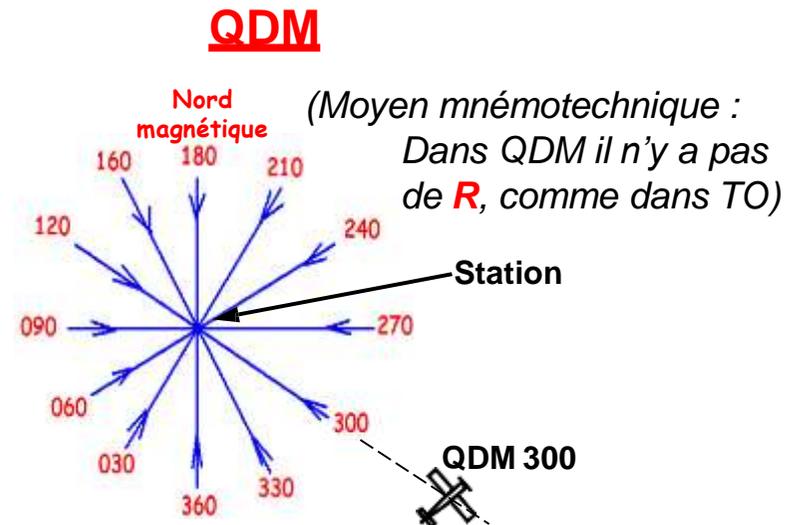
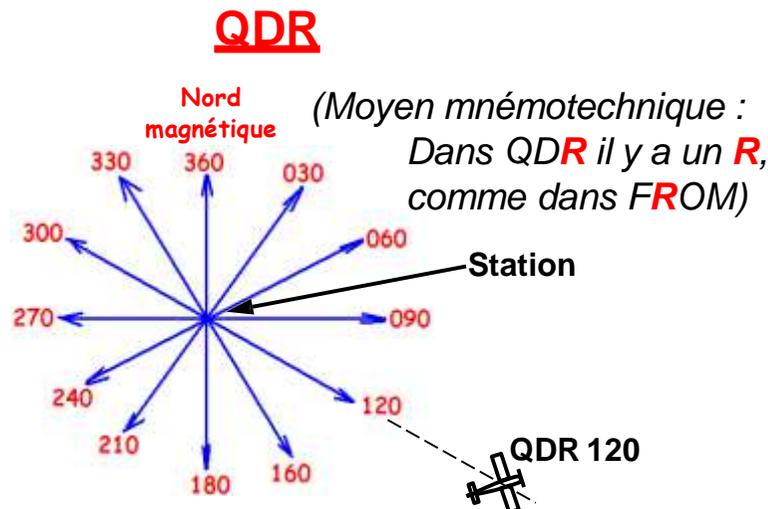
La radionavigation

La radionavigation utilise des **signaux radioélectriques** émis à partir de stations installées au **sol** ou à partir de **satellites**, pour déterminer la position d'un aéronef **indépendamment des conditions de visibilité**.

Dans certains cas le système nécessite aussi l'émission de signaux par l'aéronef.

Les signaux émis par une station installée au sol permettent à l'aéronef de déterminer sa **position par rapport à cette station**. A cet effet, on parle de :

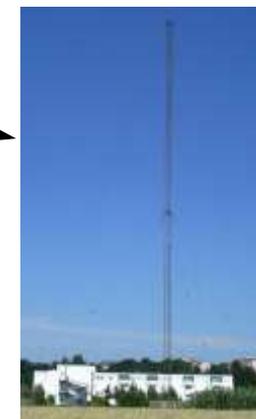
- "**QDM**" pour désigner la route que devrait suivre l'aéronef pour **rejoindre** directement la station.
- "**QDR**" pour désigner la direction dans laquelle la station "voit " l'aéronef (*la route à suivre pour **tourner le dos** à la station*).



Le radiocompas ou ADF (1)

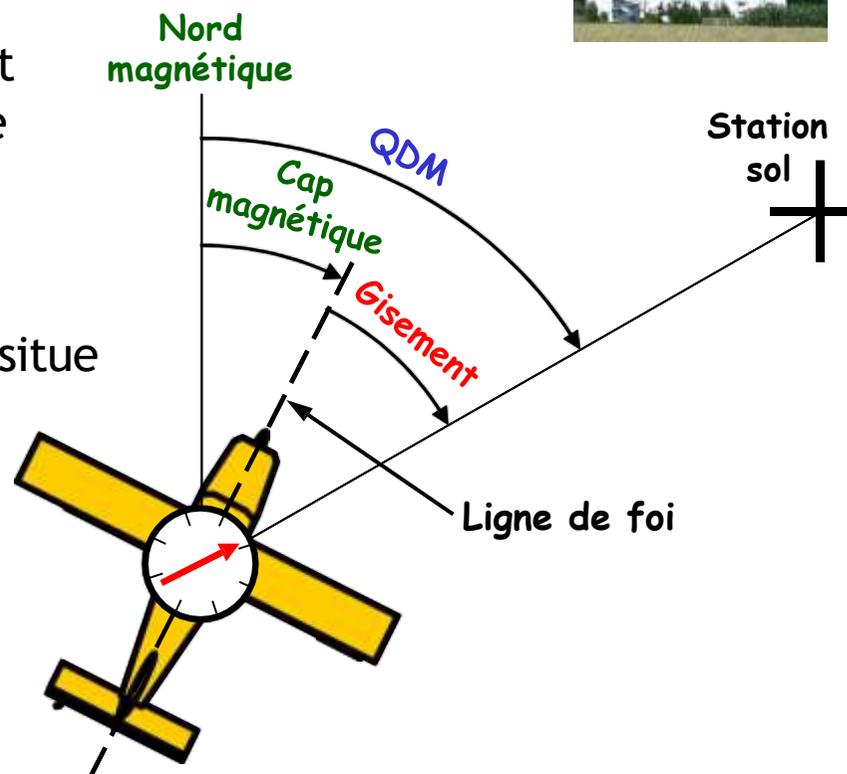
Apparu dès les années 1920, l'ADF (Automatic Direction Finder) comprend :

- Une **station sol** qui émet un **signal** radioélectrique **identique dans toutes les directions** (fréquence 200 à 1750 kHz). L'émission comporte l'indicatif morse de la station.
- Un **récepteur à bord de l'aéronef**, réglé par le pilote sur la fréquence de la station et capable de déterminer la **direction d'où provient le signal**.
- Un **indicateur**, placé devant le pilote, dont l'aiguille montre la **direction** dans laquelle se situe la station **par rapport à l'axe de symétrie de l'aéronef** (ligne de foi).



L'angle entre la **direction** dans laquelle se situe la **station** et la **ligne de foi** de l'aéronef s'appelle le **gisement**.

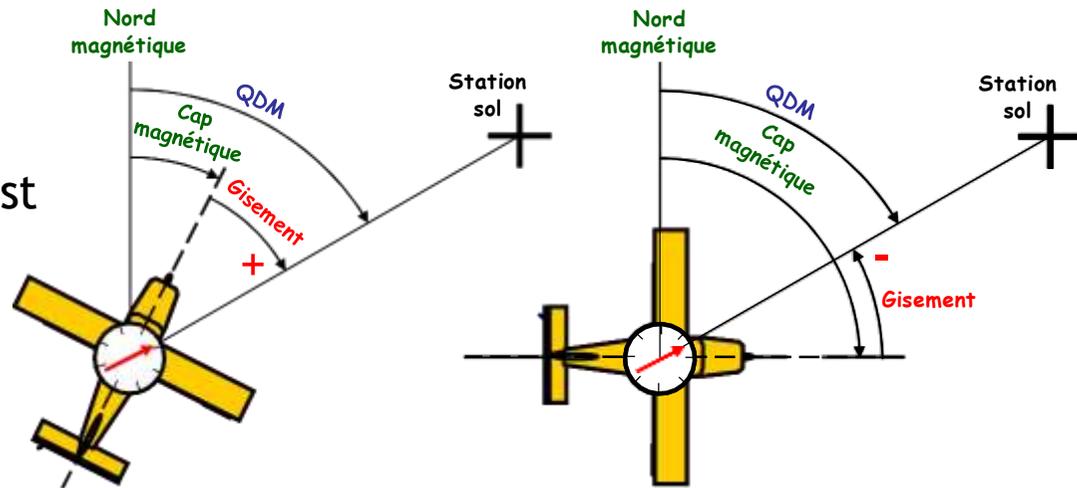
$$\text{QDM} = \text{Cap magnétique} + \text{Gisement}$$



Le radiocompas ou ADF (2)

Remarque importante :

Pour une position donnée, le **gisement** indiqué par l'ADF est **fonction du cap de l'aéronef**.



Exemple de récepteur ADF :



Exemples d'indicateurs :

Indicateur ADF **de base**



A l'aide du petit bouton, le **pilote** est chargé d'**orienter** correctement la **rose des caps** en fonction du cap suivi.

RMI (Radio Magnetic Indicator)



La **rose des caps** est automatiquement orientée en fonction du cap magnétique suivi.

HSI (Horizontal situation Indicator)



La **rose des caps** est celle du **conservateur de cap** (gyroscoptic).

Le radiocompas ou ADF (3)

Représentation sur les cartes :



On distingue :

- le NDB (Non Directional Beacon) :
Portée 50 NM, utilisé en navigation
(indicatif à 3 lettres).
- le Locator :
Portée 25 NM, utilisé en approche
(indicatif à 2 lettres).

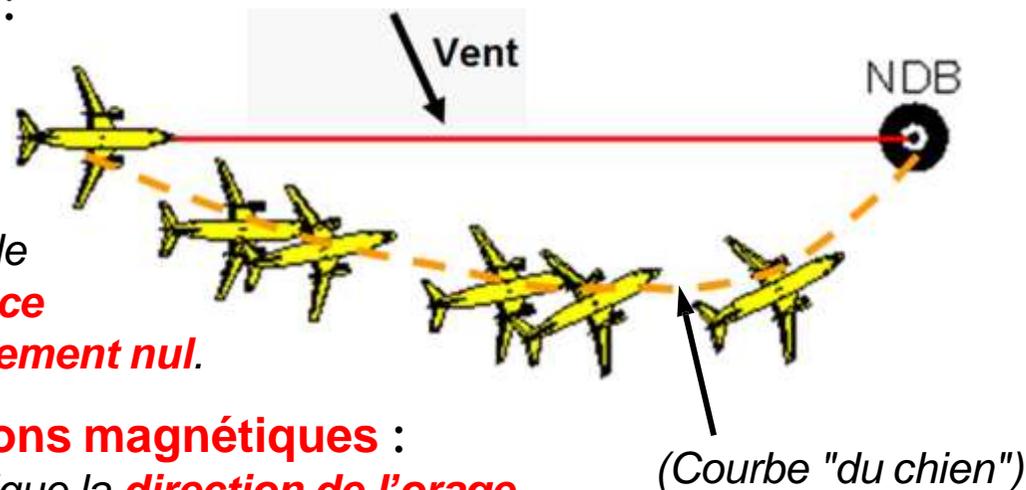
Inconvénients du radiocompas :

- Il ne garantit **pas** le suivi d'une **route directe** :

*En cas de vent de travers, l'aéronef suit une **courbe** si le pilote **corrige en permanence** de façon à conserver un **gisement nul**.*

- Il est sensible aux **perturbations magnétiques** :
*En cas d'orage, l'aiguille indique la **direction de l'orage**.*

- Il est sensible à l'**effet de relief** :
Distorsion de la direction du signal reçu.



Le VOR (1)

Apparu à la fin des années 1940, le VOR (VHF Omnidirectional Range) vise à éliminer les inconvénients de l'ADF.

Il comprend :

- Une **station sol** qui émet **2 signaux** radioélectriques VHF **superposés** (fréquence 108 à 117,95 MHz) :
 - un signal **directionnel tournant*** (*comme le faisceau d'un phare de marine*).
 - un signal **pulsé**, identique dans toutes les directions (*comme un feu à éclats placé sur un bâtiment*).

Le signal pulsé est à son maximum chaque fois que le signal tournant est dirigé vers le nord magnétique.

L'émission comporte l'indicatif morse de la station.



(*) *signal tournant à 30 tours par seconde.*

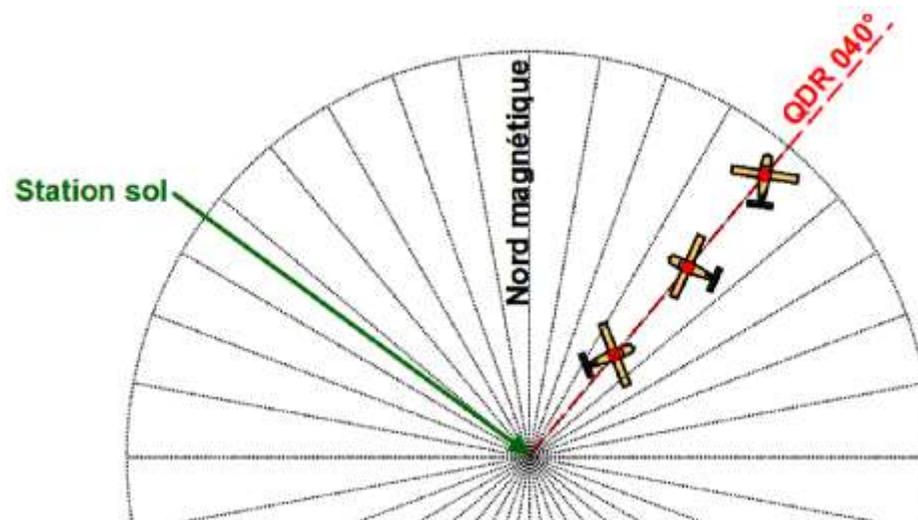
- Un **récepteur à bord de l'aéronef**, réglé par le pilote sur la fréquence de la station qui **mesure le décalage entre les 2 signaux reçus** et en déduit directement le **QDR de l'avion**.
- Un **indicateur**, placé devant le pilote.

Le VOR (2)

Remarque importante :

Tous les avions situés sur la **même radiale** partant de la station reçoivent les **mêmes signaux**.

Quel que soit leur cap, leur récepteur VOR indique le **même QDR**.



Représentation sur les cartes :

- Indicatif et fréquence
- Rose des QDR (orientée suivant le nord magnétique).



Exemple de récepteur VOR :

(Souvent couplé avec un récepteur VHF de radiocommunication)



Le VOR (3)

Principe de l'indicateur VOR :

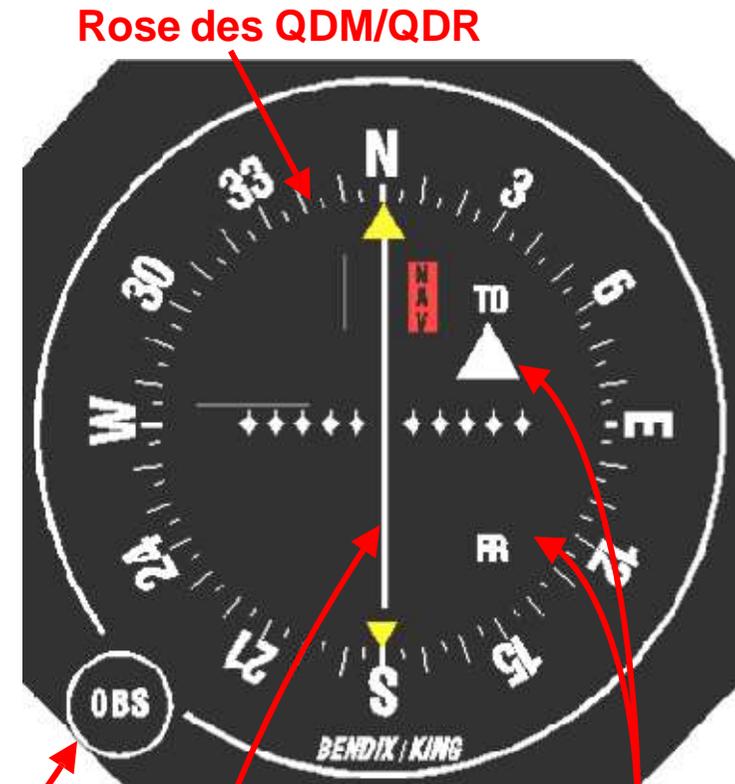
Le VOR est principalement utilisé pour suivre une route **vers la station** ou **venant de la station**.

• Pour suivre une route **venant de la station** :
Le pilote **affiche le QDR** de cette route en faisant tourner la rose des QDM/QDR.
Puis il **suit les indications de l'aiguille**.

• Pour suivre une route **vers la station** :
Le pilote **affiche le QDM** de cette route en faisant tourner la rose des QDM/QDR.
Puis il **suit les indications de l'aiguille**.

La déviation de l'aiguille indique l'écart par rapport à la route choisie, et le sens dans lequel il faut corriger.

OBS : Omni Bearing Selector
(rotation de la rose – sélection QDM/QDR)



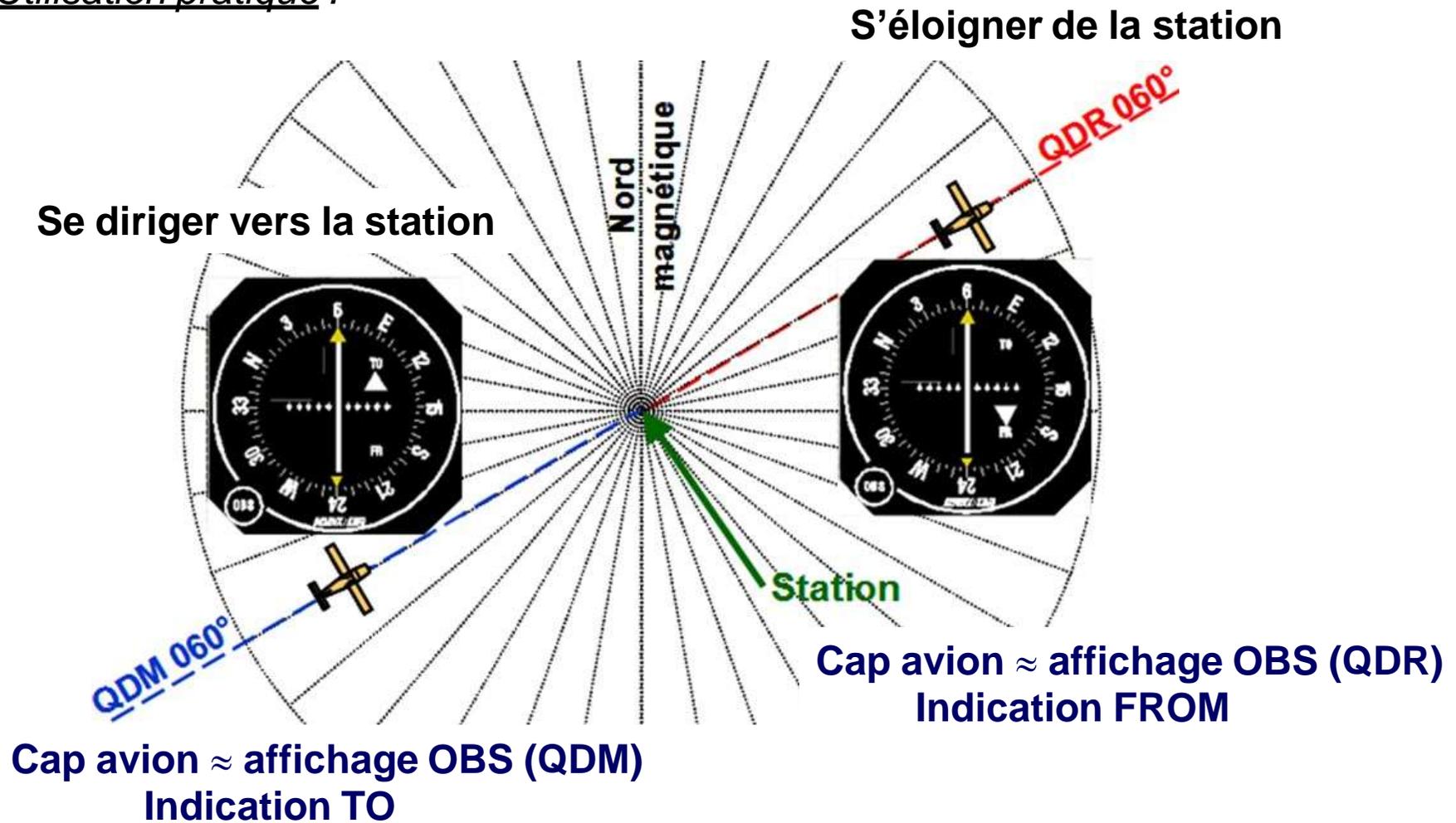
Rose des QDM/QDR

Indicateur TO/FROM
TO = QDM
FROM = QDR

Aiguille de déviation
(déviation maxi $\pm 10^\circ$)

Le VOR (4)

Utilisation pratique :

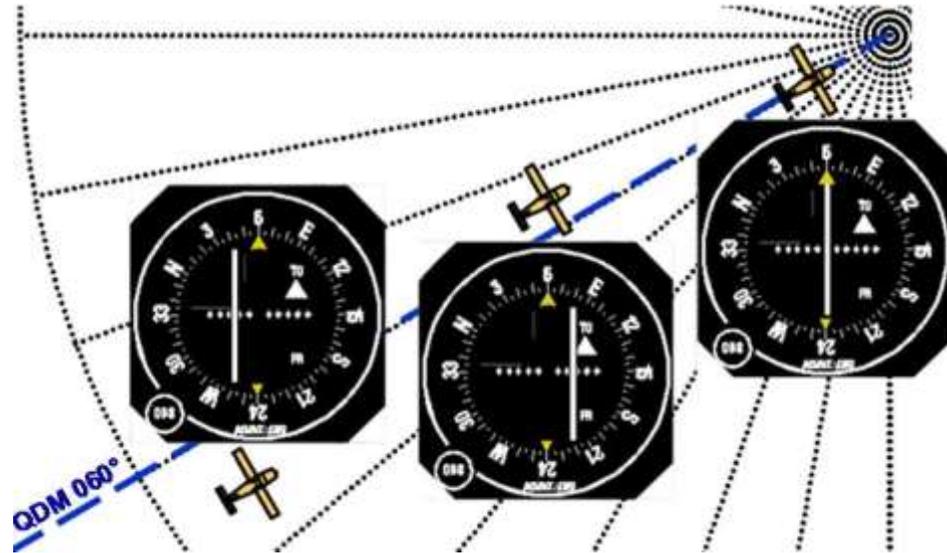


Le VOR (5)

Utilisation pratique :

Si l'avion s'écarte de sa route, le sens de déplacement de **l'aiguille indique le sens dans lequel il faut corriger**.

La **déviatiion complète** de l'aiguille correspond à un **écart de 10°**.

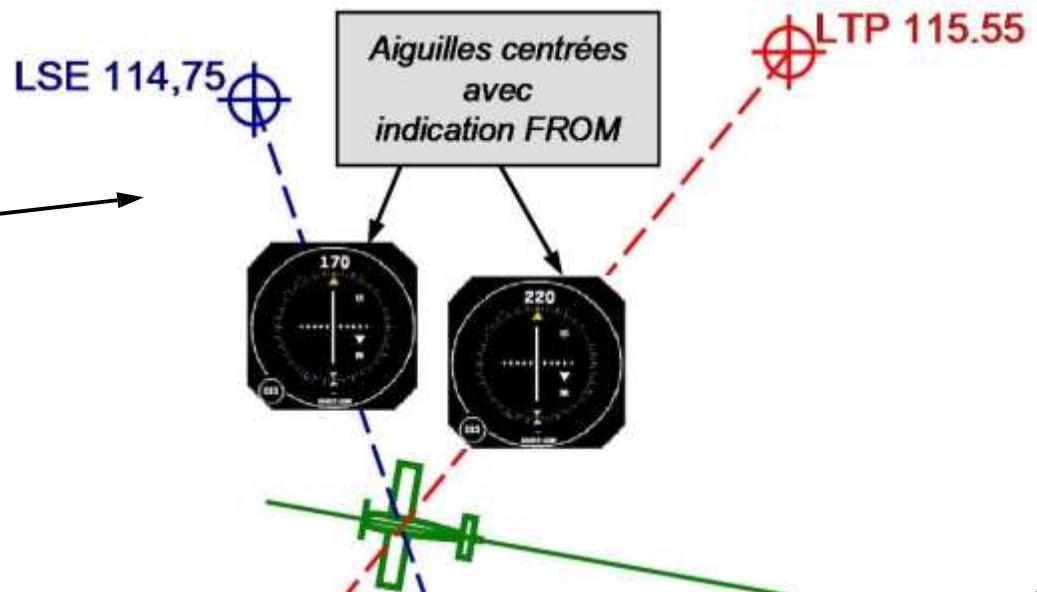


A l'aide de **2 stations VOR**, le pilote peut **déterminer** sa **position**.

Exemple :

L'avion se trouve à l'intersection

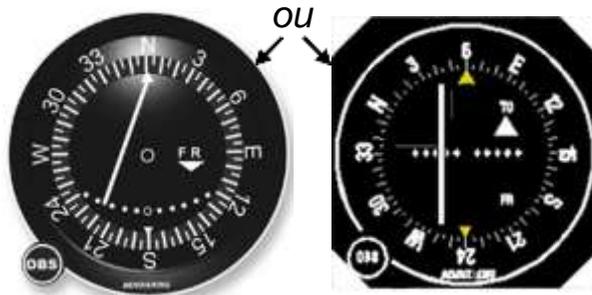
- du QDR 170° du VOR LSE
- et
- du QDR 220° du VOR LTP



Le VOR (6)

Exemples d'indicateurs VOR :

Indicateur VOR **de base**



Route à suivre = 360°

Route à suivre = 060°

A l'aide du petit bouton, **le pilote** fait tourner la rose des "caps" pour **afficher la route à suivre** en face de l'index supérieur.

HSI (Horizontal situation Indicator)

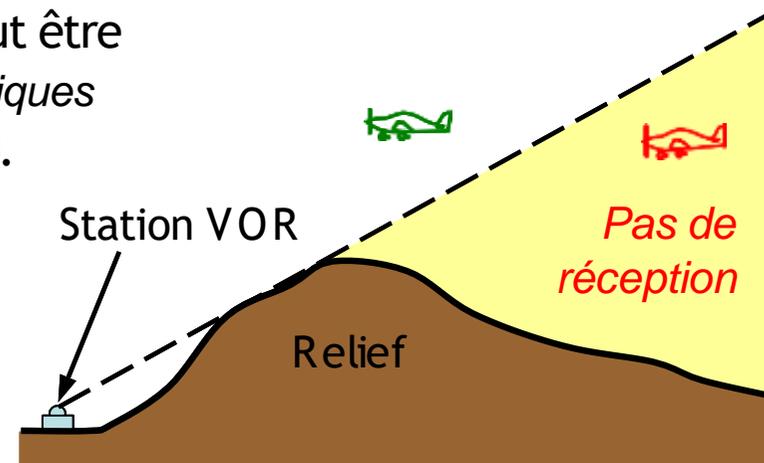
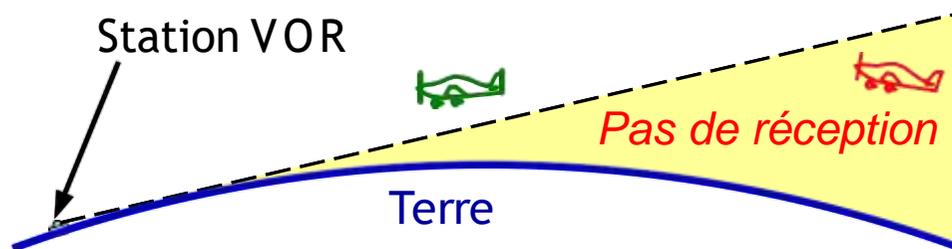


Route à suivre = 205°

La **rose des caps** est celle du **conservateur de cap**. A l'aide du petit bouton, **le pilote** oriente la flèche sur **la route à suivre** puis suit les déviations de la barre par rapport à la flèche.

Avantages et inconvénients du VOR :

- L'indication est **stable**, **précise** et **insensible aux perturbations magnétiques**, mais
- La **réception** est **fonction de l'altitude** et peut être **masquée par le relief**, car les signaux radioélectriques du VOR se propagent en ligne droite (portée visuelle).

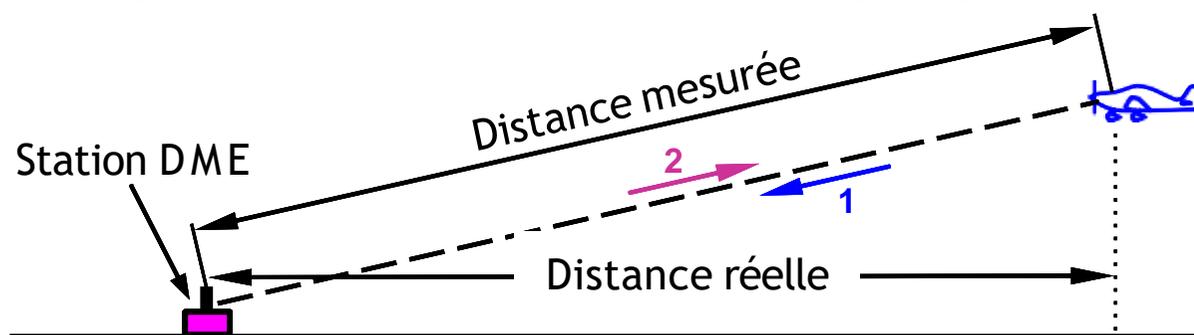


Le DME (1)

Le VOR seul ne donne pas la distance qui sépare l'aéronef de la station.
Un DME* (**Distance Measuring Equipment**) est associé à certaines stations VOR pour permettre cette mesure de distance. *(invention du DME : fin des années 1940)*

Le DME comprend :

- Un **émetteur** à bord de l'aéronef qui **envoie des impulsions d'interrogation** UHF (962 à 1213 MHz) à la station sol choisie.
- Une **station sol** qui **répond** à ces impulsions.
- Un **récepteur** à bord de l'aéronef qui calcule le **temps de parcours aller-retour** des impulsions et en déduit la **distance** qui sépare l'aéronef de la station.



Attention : Le DME mesure la **distance oblique** aéronef / station.

L'**erreur** augmente quand l'avion se rapproche de la station.

Par analyse de l'évolution de la distance, le système calcule aussi :

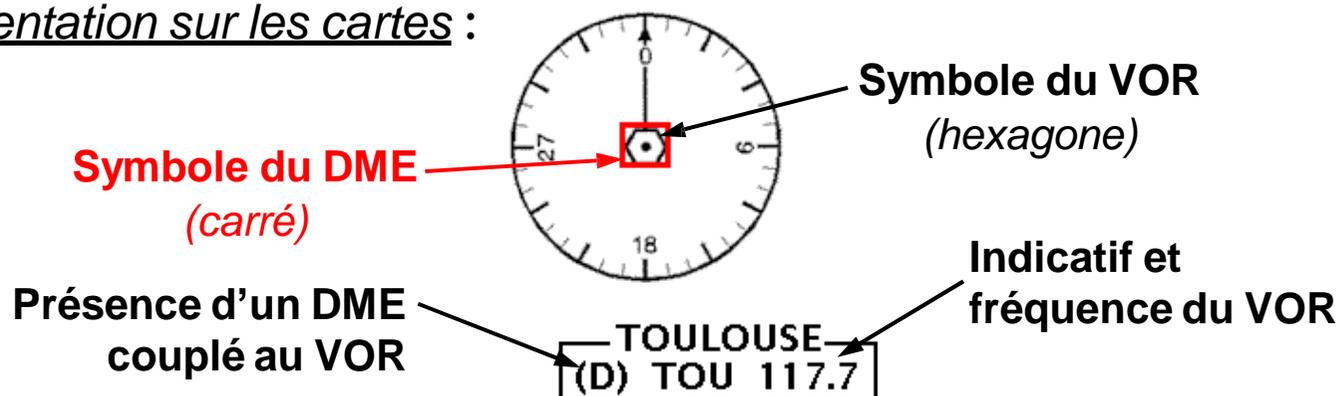
- la **vitesse de rapprochement** (ou d'éloignement) par rapport à la station.
- le **temps** nécessaire **pour atteindre la station**.

Le DME (2)

Exemple d'émetteur / récepteur DME de bord :



Représentation sur les cartes :



Caractéristiques :

- **Précision** de l'ordre de **0,2 NM**.
- **Portée visuelle** (comme pour le VOR).
- L'émetteur ne peut être **interrogé simultanément** que **par un nombre limité d'aéronefs** (inférieur à 200).

L'ILS (Instrument landing system) (1)

L'ILS permet une **approche finale stabilisée** et un **guidage vers le seuil de piste**.

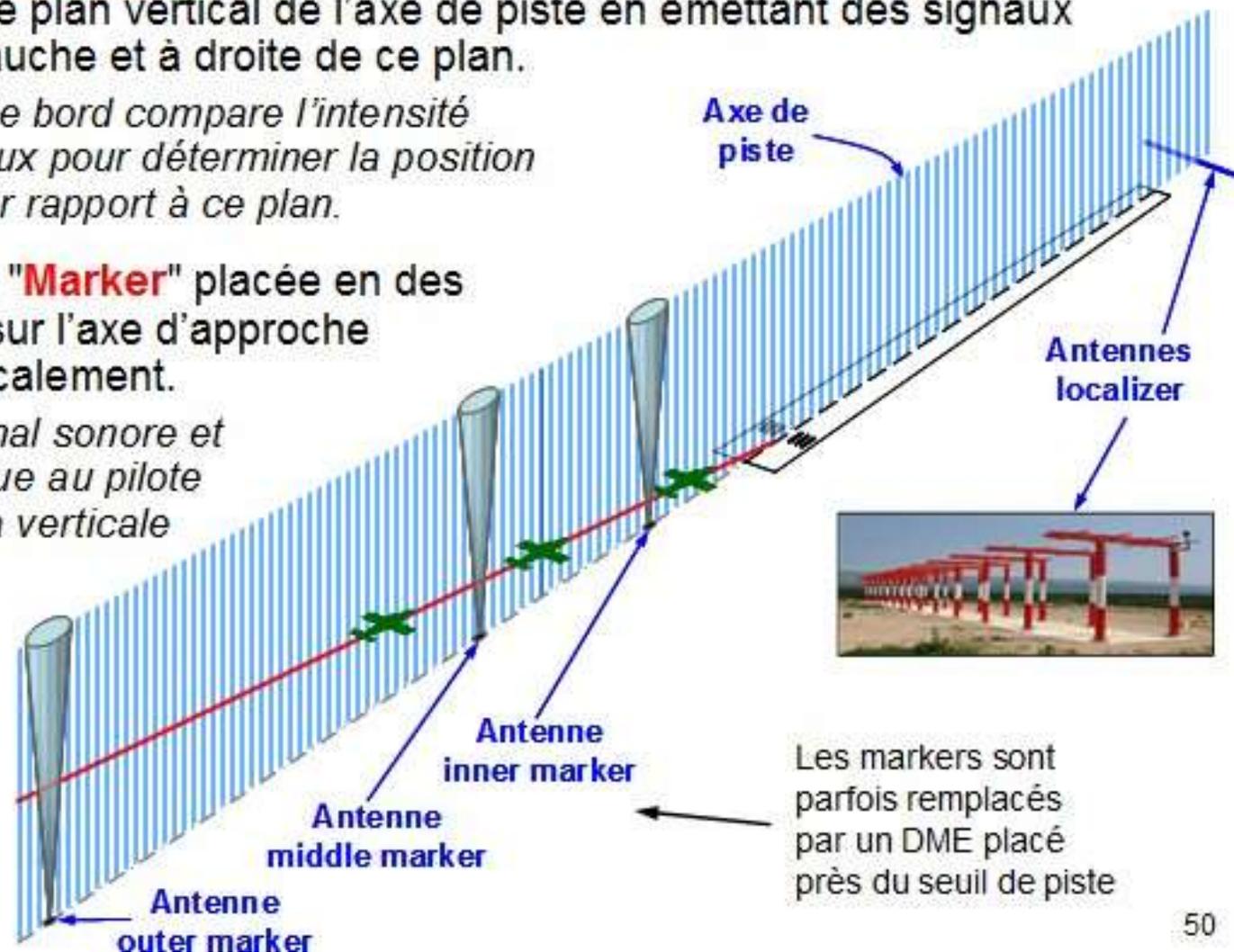
1- Guidage sur l'axe de piste :

- Des antennes "**Localizer**" placées au-delà de l'extrémité de la piste matérialisent le plan vertical de l'axe de piste en émettant des signaux différents à gauche et à droite de ce plan.

Le récepteur de bord compare l'intensité de ces 2 signaux pour déterminer la position de l'aéronef par rapport à ce plan.

- Des antennes "**Marker**" placées en des points précis sur l'axe d'approche émettent verticalement.

A bord, un signal sonore et lumineux indique au pilote le passage à la verticale de chacun de ces points.

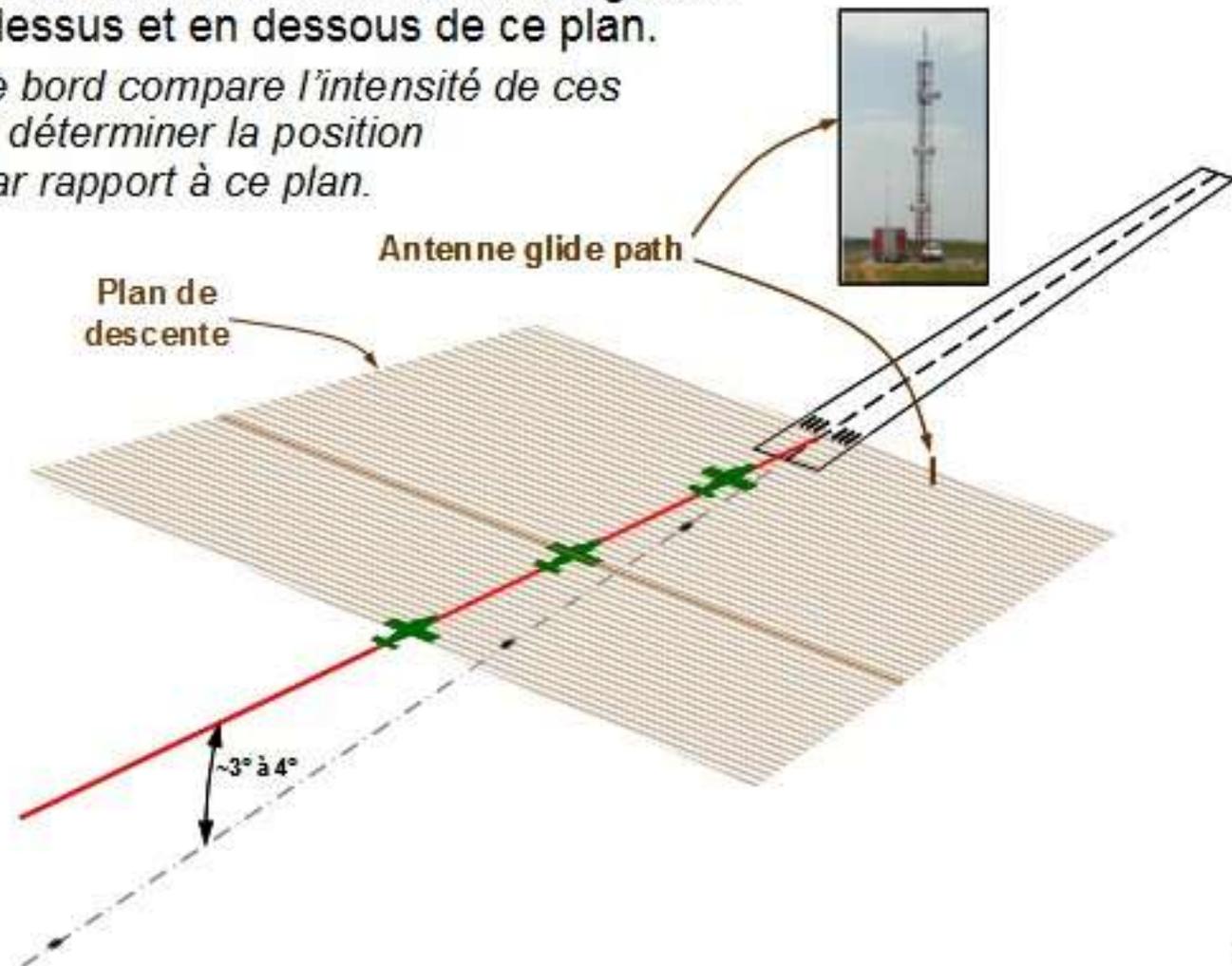


L'ILS (Instrument landing system) (2)

2- Guidage sur le plan de descente :

- L'antenne "**Glide path**", sur le côté de la piste près du seuil, matérialise le plan idéal de descente en émettant des signaux différents au-dessus et en dessous de ce plan.

Le récepteur de bord compare l'intensité de ces 2 signaux pour déterminer la position de l'aéronef par rapport à ce plan.



L'ILS (Instrument landing system) (3)

Utilisation de l'ILS :

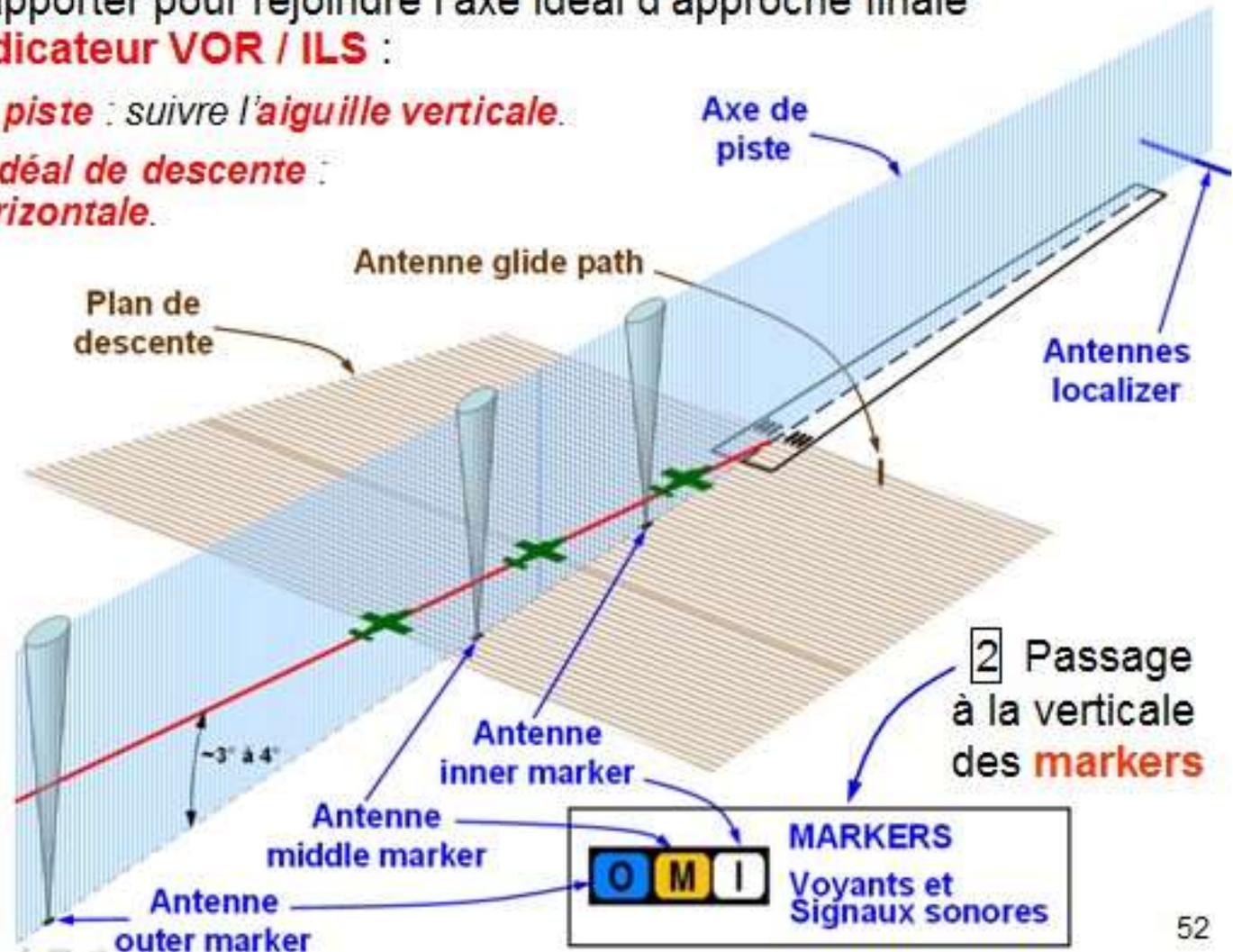
Le pilote sélectionne la fréquence de l'ILS (108 à 111.975 MHz) sur le récepteur VOR / ILS.

1 Les corrections à apporter pour rejoindre l'axe idéal d'approche finale sont affichées sur l'**indicateur VOR / ILS** :

- Pour rejoindre l'**axe de piste** : suivre l'**aiguille verticale**.
- Pour rejoindre le **plan idéal de descente** : Suivre l'**aiguille horizontale**.



Indicateur VOR / ILS



Le RADAR (1)

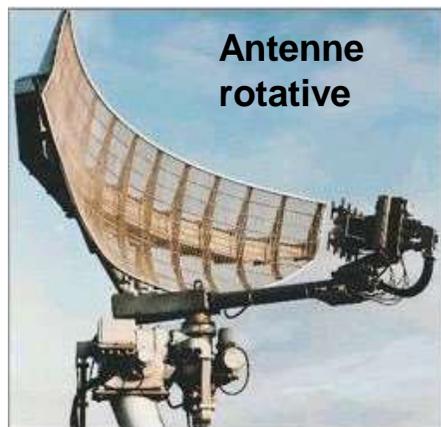
Parmi les multiples usages actuels du **RADAR** (RAdio Detection And Ranging), inventé en **Grande Bretagne** dès la **fin des années 1930**, on peut citer les applications à la **navigation aérienne**.

Radar primaire :

Il utilise le principe général du radar :

- **Réflexion** sur un objet d'une **impulsion radioélectrique émise** par le radar dans une direction identifiée,
- **Réception** de l'**écho** dû à cette réflexion.
- Mesure du **temps de parcours aller-retour** de l'impulsion.
- **Calcul** de la **distance** du radar à l'objet et **affichage** de la position de l'objet sur un écran.

*Nota : Le **radar primaire** ne permet **pas d'identifier** l'objet.*



Ecran radar



Le RADAR (2)

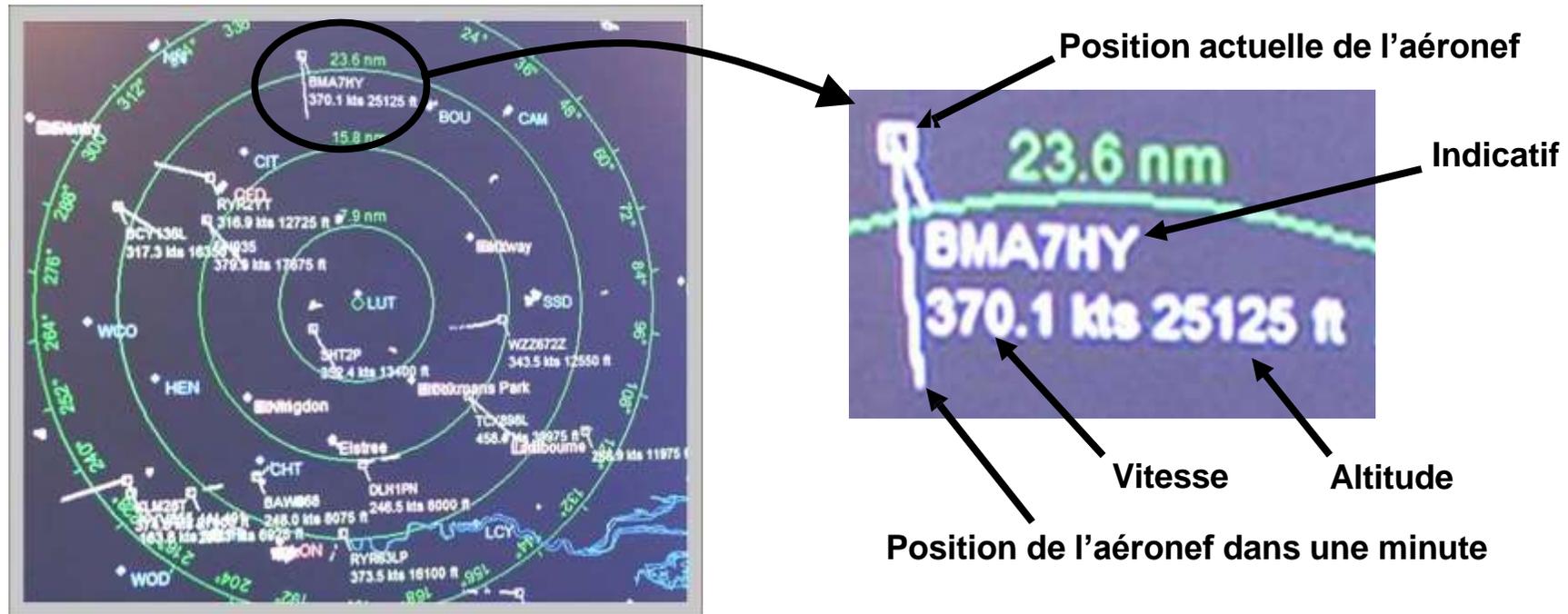
Radar secondaire (radar de surveillance) :

Le radar envoie une **interrogation** à l'aéronef.

L'aéronef, s'il est équipé d'un **transpondeur**, fournit une **réponse** qui contient :

- l'**identification** de l'aéronef,
- des **informations complémentaires** telles que l'**altitude** de l'aéronef, etc...

Toutes ces informations sont affichées sur l'écran du radar sous forme d'une **étiquette** placée à côté du point représentant la position de l'aéronef.



Le transpondeur

C'est l'équipement de bord chargé de **répondre au radar** de surveillance.



Le pilote affiche sur son transpondeur, un **code à 4 chiffres** donné par le contrôleur aérien.

Le transpondeur transmet vers le radar l'**identification** de l'aéronef et certaines **informations**.

Le transpondeur transmet automatiquement le **niveau de vol réel** (si le pilote a enclenché le mode "ALT").

Certains codes ont un usage particulier :

7700 : Détresse

7600 : Panne radio

7500 : Intervention illicite à bord

7000 : Vol VFR sans code spécifique assigné

En France, le **transpondeur** est **obligatoire** à bord des aéronefs volant dans les espaces **A, C** et **D** ainsi que dans **certaines zones** et sur **certains itinéraires** publiés.

La navigation satellitaire

À partir de 1990, le système **GPS** a été mis en place par l'armée des Etats-Unis. Il utilise des balises émettrices installés sur **une trentaine de satellites**.

La **réception** des signaux d'**au moins 4 satellites** permet au récepteur GPS d'un aéronef de déterminer sa distance par rapport à chacun d'eux, puis sa position en **longitude** et **latitude**.

Une **base de données** installée dans le récepteur GPS permet d'afficher différentes **cartes** aéronautiques de la région survolée ainsi que certaines **informations** aéronautiques.



Le pilote peut définir et afficher le tracé de la **route à suivre**. Les données de navigation sont affichées (*orientation de la route à suivre, vitesse, distance et temps de parcours pour chaque segment de la navigation, heure estimée d'arrivée, etc...*).

Sur les aéronefs équipés d'**EFIS** (*Electronic Flight Instrument System*), les données de navigation issues du GPS sont **intégrées aux écrans principaux**.

D'autres systèmes de navigation satellitaire sont en cours de développement.
Exemple : **GALILEO** (Union Européenne).

La navigation inertielle

Une **centrale inertielle** est un instrument qui dispose de **capteurs** capables de **mesurer** les **accélérations** et les **vitesse de rotation** selon les trois axes de l'espace.

A partir de ces mesures, la centrale inertielle est capable de **déterminer** avec précision le **mouvement de l'aéronef** et sa **position**, sans **aucune aide extérieure** et sans émettre **aucun signal radioélectrique** (*ceci est particulièrement intéressant pour assurer la **discrétion** de certains vols militaires*).

Avant le vol, il est toutefois nécessaire de renseigner avec précision la centrale sur la **position** et l'**orientation de l'aéronef**.

Cette opération réalisée lorsque l'aéronef est immobile sur le parking s'appelle l'**alignement de la centrale**.

Pour un maximum de **précision**, les centrales inertielles utilisées en aviation commerciale sont, en général, **recalées** au cours du vol par les données issues du GPS ou d'autres moyens de radionavigation.



Exemple de panneau de commande des centrales inertielles d'un avion de ligne

REGLEMENTATION SECURITE

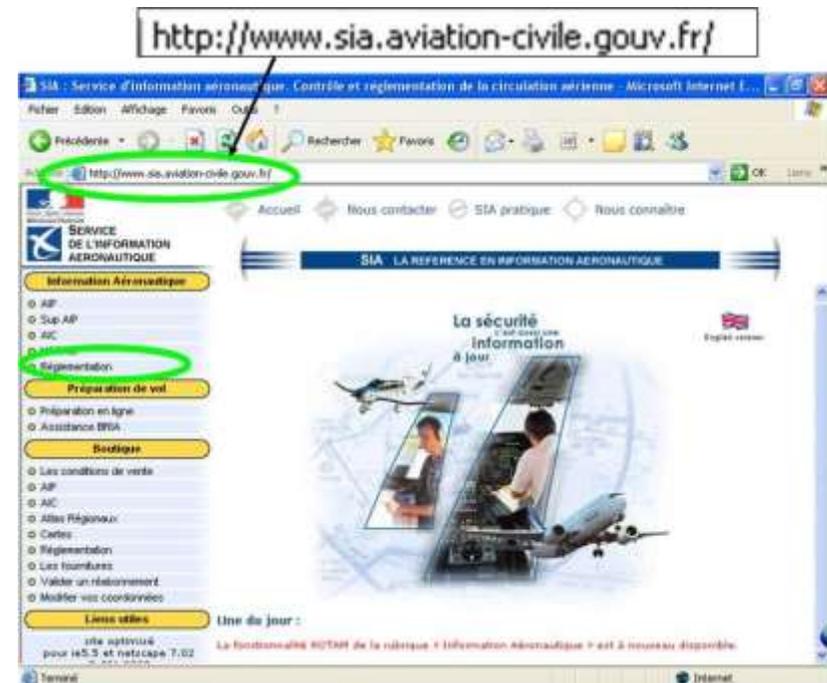


4.1

NOV 2016

Textes Réglementaires

- Réglementation de la Circulation Aérienne :
 - Depuis le 04/12/2014, application des règles européennes S.E.R.A.
 - Part A (ex RDA France) : **Règles de l'Air**
 - Part B (ex SCA France) : **Services de la circulation aérienne**
 - Part C (ex RCA3 France) : Procédures pour les organismes de circulation aérienne
 - Depuis le 25/08/2016, Part-NCO (Opérations non commerciales, avions simples)
 - RCA4 : Compatibilité des circulations aériennes militaire et générale
- Réglementation du Transport Aérien :
 - RTA 1 : Navigabilité des aéronefs
 - RTA 2 : Utilisation des aéronefs
- Réglementation du Personnel Navigant :
 - FCL 1 : **Licences des personnels navigants** (avions)
 - FCL 2 : Licences des personnels navigants (hélicoptères)
 - FCL3 : Aptitude physique et mentale des personnels navigants



Circulation aérienne

- Analogie avec la circulation routière.
- C'est l'ensemble des mouvements des aéronefs.
- Dès qu'un **aéronef** se met **en mouvement par ses propres moyens**, il s'inscrit dans la circulation aérienne (au sol et en vol).
- Les règles de circulation sont définies dans les règles européennes SERA (analogie avec le code de la route...).

VFR ou IFR ?

- **VFR** = Vol conduit selon les règles du vol à vue (Visual Flight Rules).
- **IFR** = Vol conduit selon les règles du vol aux instruments (Instrument Flight Rules).
- Le vol VFR impose des conditions Météo **VMC** (Visual Meteorological Conditions).
- Lorsque les conditions Météo sont $<$ VMC, on est en condition **IMC** (Instrument Meteorological Conditions). Seul le vol IFR est alors possible. Pour effectuer un vol IFR il faut que le pilote soit qualifié pour et que l'avion soit équipé pour.

Responsabilité pour l'application des règles de l'Air

- Le pilote **commandant de bord**, qu'il tienne ou non les commandes, est **responsable** de l'application des **règles de l'air** à la conduite de son aéronef.

- Il ne peut déroger à ces règles que s'il le juge absolument nécessaire pour des motifs de sécurité.

Actions préliminaires au vol (1)

- Avant d'entreprendre un vol, le pilote commandant de bord doit prendre connaissance de tous les **renseignements disponibles** utiles à la bonne exécution du vol projeté.
- Il doit s'assurer du **fonctionnement satisfaisant de son appareil** et des équipements nécessaires à la bonne exécution de ce vol.
- Il doit s'assurer que le vol est réalisable par l'**équipage**, dans le respect de la **réglementation**.
- Pour les vols hors du circuit d'un aérodrome et pour tous les vols IFR, l'action préliminaire au vol doit comprendre l'étude attentive des **bulletins et prévisions météorologiques** disponibles les plus récents.
- Le commandant de bord doit s'assurer avant tout vol que les quantités de **carburant**, de **lubrifiant** et autres **produits consommables** lui permettent d'effectuer le vol prévu avec une marge acceptable de sécurité.

Actions préliminaires au vol (2)

Renseignements disponibles :

- Les **NOTAMs** (Notice to Airmen) sont des avis donnant, en temps utile, des **renseignements essentiels à l'exécution des vols**.
- Ils sont consultables sur « **olivia.aviation-civile.gouv.fr** » et font partie des **éléments à vérifier** avant d'entreprendre un vol.
- Ils informent sur l'établissement, l'état ou la modification, d'une installation, d'un service, d'une procédure aéronautique ou d'un danger pour la navigation aérienne.

Exemple de NOTAM
LFFA-A0146/06 Q)LFBB/QOBCE/IV/ M/ A/000/999/4323N00025W005 A) LFBB PAU PYRENEES B) 200601131630 C) 200603122359 E) GRUE ERIGEE RDL 136/4.2NM AD LFBB PSN : 431946N 0002054W ,CENTRE HOSPITALIER PAU HAUT: 29M ALT AU SOMMET : 244 M BALISAGE: JOUR ET NUIT.

Actions préliminaires au vol (3)

Vérification de l'aéronef :

Un vol ne peut être entrepris que si le commandant de bord s'est préalablement assuré qu'il est **réalisable par l'aéronef**, dans le respect de la **réglementation**.

Un aéronef doit être **utilisé conformément aux conditions définies** par son **manuel de vol** (en particulier, les limitations).

Certains **documents, à jour**, doivent être présents à bord, tels que :

- Manuel de vol : *C'est le "mode d'emploi" de l'aéronef, rédigé par le constructeur.*
- Certificat de navigabilité *** : *Il atteste que l'aéronef est conforme à une définition approuvée et que son suivi et son entretien sont effectués en conformité avec les exigences réglementaires.*
- Certificat d'immatriculation***.
- Carnet de route de l'aéronef*** : *Pour chaque vol, il enregistre la date, l'heure, le trajet, le nom du commandant de bord, les éventuelles anomalies.*

(***) peuvent être absents pour un vol local.

Une **visite prévol** doit être effectuée conformément au manuel de vol rédigé par le constructeur.

Actions préliminaires au vol (4)

Vérification de l'aéronef :

Un aéronef est **inapte au vol** si :

- l'aéronef a été **utilisé dans des conditions non conformes** à celles définies par son document de navigabilité et les documents associés et n'a **pas** fait l'objet de **vérifications appropriées**.
- l'aéronef a subi une **modification** ou une **réparation non approuvée**.
- l'aéronef **n'a pas été entretenu** conformément aux dispositions réglementaires.
- à la suite d'un incident ou accident, l'aéronef **n'a pas été remis en état** conformément aux dispositions réglementaires.
- à la suite d'une opération d'entretien, l'aéronef **n'a pas été approuvé pour remise en service** (A.P.R.S.) suivant les dispositions réglementaires.

Nota : Le **suivi de l'entretien** de l'aéronef est consigné dans :

- Le **livret d'aéronef**.
- Le **livret moteur**.
- La **fiche hélice**.

Ces documents, **maintenus à jour** par l'organisme chargé de l'entretien, ne sont jamais à bord de l'aéronef (*ils sont ainsi sauvegardés en cas d'accident*).

Actions préliminaires au vol (5)

Aptitude de l'équipage :

- Les **brevets** attestent du niveau des compétences acquises. Leur validité est **permanente**.
- Une **licence** à jour est exigée pour exercer une fonction à bord. La validité d'une licence est **limitée dans le temps**. Sa prorogation est **subordonnée au maintien des compétences**.
- Des **qualifications de classe ou de type** d'aéronefs sont exigées des pilotes pour exercer leurs fonctions à bord des **aéronefs de la classe ou du type désignés** dans la limite des licences qu'ils détiennent. Il existe également des **qualifications liées à la nature du vol** (*atterrissage en montagne, vol de nuit, vol aux instruments, ...*).
- La validité d'une licence est déterminée par la **validité des qualifications** qu'elle contient et du **certificat médical**.
- Tout titulaire d'une licence ou d'une qualification ne peut en exercer les privilèges que s'il **maintient ses compétences** en remplissant les conditions relatives à cette licence ou à cette qualification (notion d'**expérience récente**).

Actions préliminaires au vol (6)

CATEGORIE	QUALIFICATIONS DE CLASSE	QUALIFICATIONS DIVERSES
AVION	Classe (SEP) monomoteur à pistons avec mention « T » pour terrestre	<p>VFR : _____</p> <p>_____</p> <p>IR : _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Qualifications de type suivant spécifications :</p> <ul style="list-style-type: none"> - du document de navigabilité avion - variantes et niveaux technologiques avion - équipage minimal de conduite - qualités de vol de l'avion <p>Autres: vol de nuit, vol en montagne, voltige, instructeur, remorquage, largage, épandage.....</p>
	Classe hydravions monomoteurs à pistons	
	Classe monomoteurs à turbopropulseur terrestre	
	Classe hydravions monomoteurs à turbopropulseur	
	Classe avions multimoteurs à pistons	
	Classe hydravions multimoteurs à pistons	
	Classe (TMG) moto-planeurs à dispositifs d'envol incorporé	
U.L.M.	Multiaxes	<ul style="list-style-type: none"> - Autorisation d'emport d'un passager - Radio Téléphonie - Qualifications d'instructeur
	Pendulaire	
	Parachutes motorisés	
	Autogire	
	aérostat	

Actions préliminaires au vol (7)

Bulletins et prévisions météo :

Le pilote doit **disposer de toutes les informations météo disponibles** concernant le vol prévu.

Pour les vols hors du voisinage du terrain de départ, un **plan d'action de repli** doit être prévu pour le cas où le vol ne pourrait pas se dérouler comme prévu à cause de la météo.

Divers moyens sont à la disposition du pilote pour analyser la situation météo avant le vol :

- Les **messages d'observation et de prévision**^{***}.
- Les **cartes de prévision**^{***}.
- La consultation d'un **prévisionniste** spécialisé en météo aéronautique.

(^{***}) Accessibles sur « **aviation.meteo.fr** »

(Voir le cours sur la météo)

Actions préliminaires au vol (8)

Emport de carburant et lubrifiant :

Ces quantités ne peuvent être inférieures à celles nécessaires pour :

- **atteindre la destination prévue** compte tenu des plus récentes prévisions **météo** (vent contraire, phénomène météo à contourner, etc...), du **régime** et de l'**altitude** de vol prévus.
- et **poursuivre le vol** au régime de croisière économique :
 - en vol **V.F.R. de jour** pendant **30 minutes**.
 - en vol **I.F.R. et V.F.R. de nuit**, pendant **45 minutes**.

Dans le cas particulier d'un vol **V.F.R. de jour** qui reste **au voisinage de l'aérodrome de départ**, les quantités embarquées doivent permettre au minimum de voler **10 minutes de plus que la durée prévue**.

*Nota : Ce sont des « **minima réglementaires** ». La **prudence** et le **bon sens** conduisent, en général, à embarquer davantage de carburant !!!*

Actions préliminaires au vol (9)

Plan de vol :

En **VFR**, il n'est **pas obligatoire** de déposer un plan de vol, sauf :

- si le vol comporte un **franchissement de frontière**
- si le vol comporte le survol de **régions inhospitalières**
- si le vol comporte un **survol maritime**^{***} (*à une distance des côtes ne permettant pas le retour sur la terre ferme en cas de panne moteur*).
- en **VFR de nuit**, si le vol n'est pas un vol local.

En VFR, le dépôt d'un **plan de vol** est toujours **possible**, si le commandant de bord le souhaite.

Un plan de vol fournit des renseignements sur :

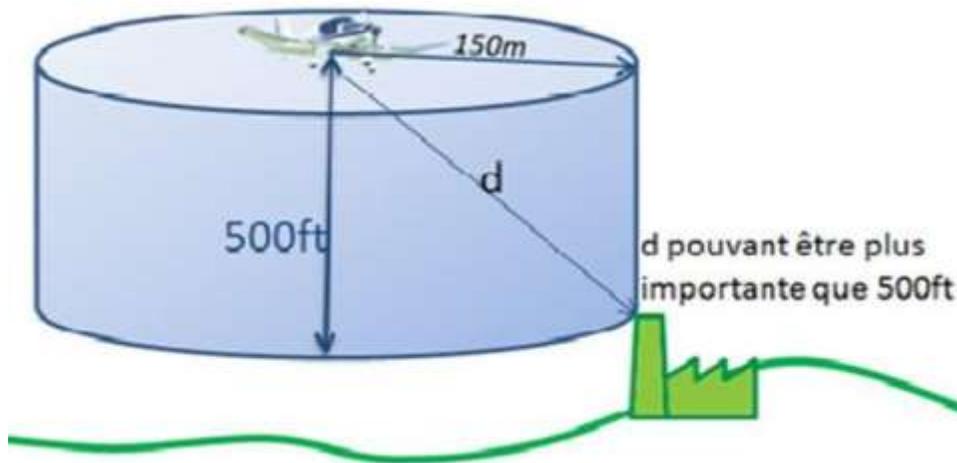
- *l'avion*
- *le type de vol*
- *la route prévue, la vitesse, les niveaux*
- *les aérodromes de départ, de destination et de dégagement*
- *l'autonomie*
- *le nombre de personnes à bord*
- *l'équipement de secours et de survie*

(^{***}) Par ailleurs, un **survol maritime** à moins de 50NM des côtes impose l'emport d'un **gilet de sauvetage** par personne.

Au-delà de 50NM, le commandant de bord doit déterminer si l'emport de canots de sauvetage, d'équipements de survie et de subsistance est nécessaire.

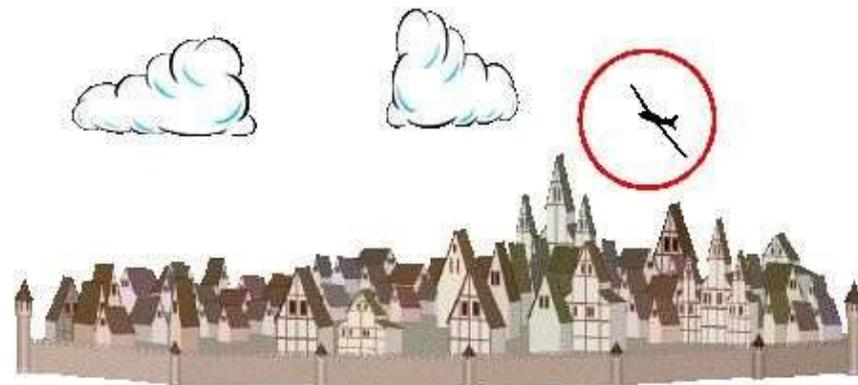
Hauteur minimale de survol (1)

- **150 m (500 ft) au dessus** de tout **obstacle** situé dans un **rayon de 150m**.



Sauf planeurs lorsqu'ils pratiquent le vol de pente (sous réserve de n'entraîner aucun risque pour les personnes et les biens).

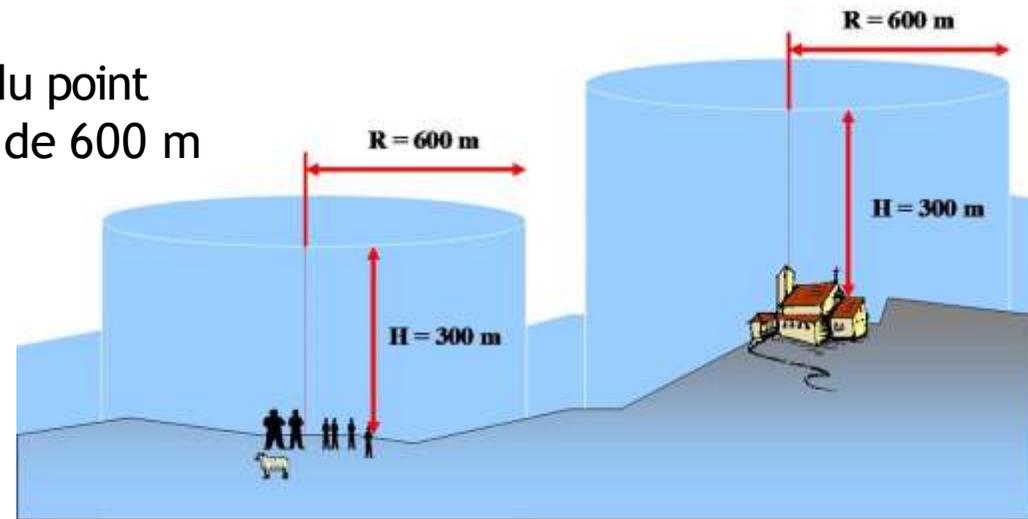
- Lors du survol des villes, la hauteur doit rester **suffisante** pour atteindre, **en cas d'urgence**, une **zone atterrissable**, sans risque pour les personnes et les biens.



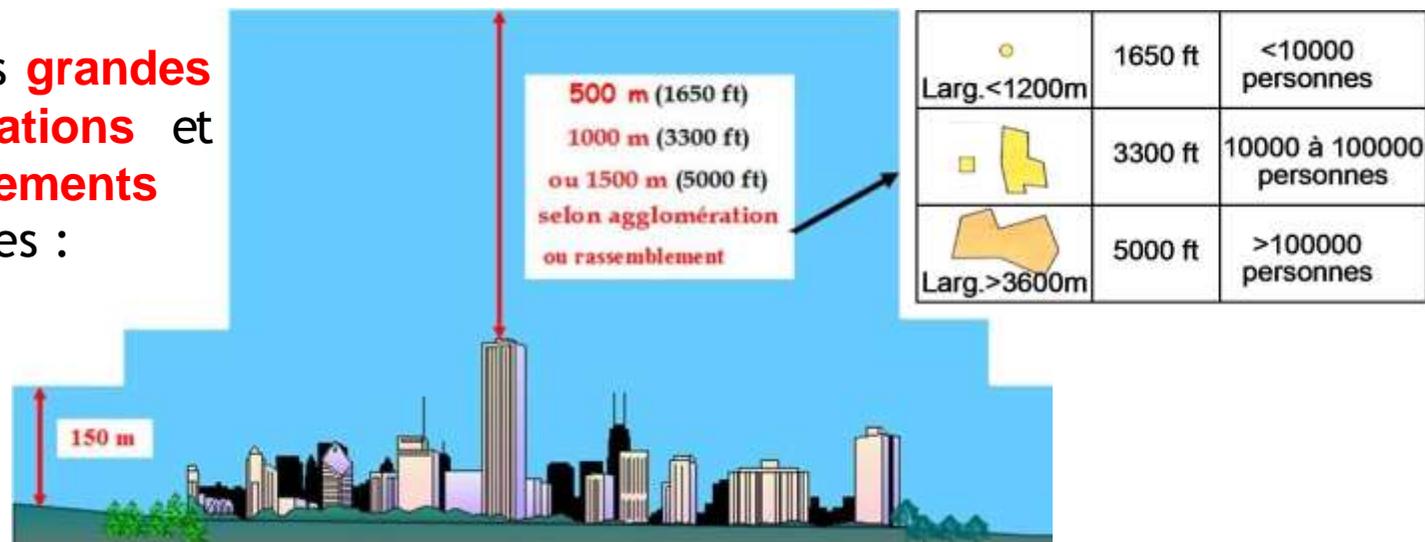
Hauteur minimale de survol (2)

- Le survol des **agglomérations** ou **rassemblements** de personnes doit s'effectuer au minimum à :

300 m (1000 ft) de hauteur du point le plus élevé dans un rayon de 600 m autour de l'aéronef.



- Survol des **grandes agglomérations** et **rassemblements** de personnes :

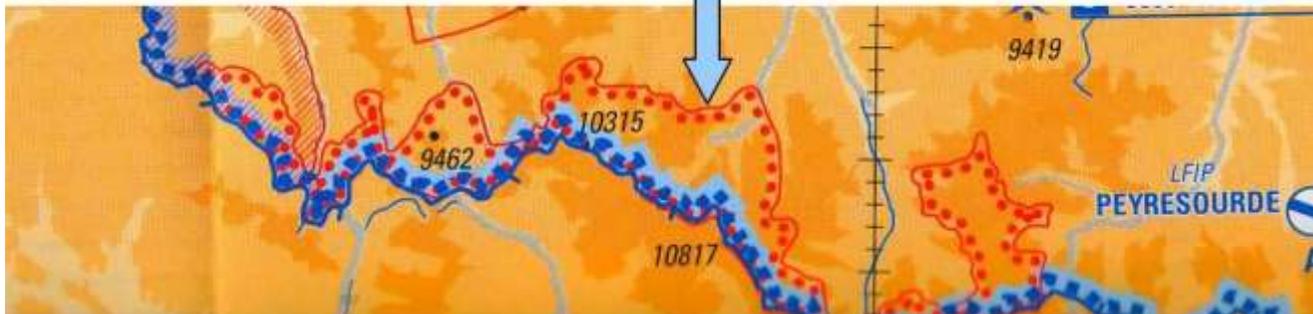


Hauteur minimale de survol (3)

- Marque distinctive sur hôpitaux, ou tout autre établissement ou exploitation afin d'en interdire le survol :
 $H \geq 300$ m (1000 ft)



- Parcs nationaux et réserves naturelles :
 $H \geq 300$ m (1000 ft)

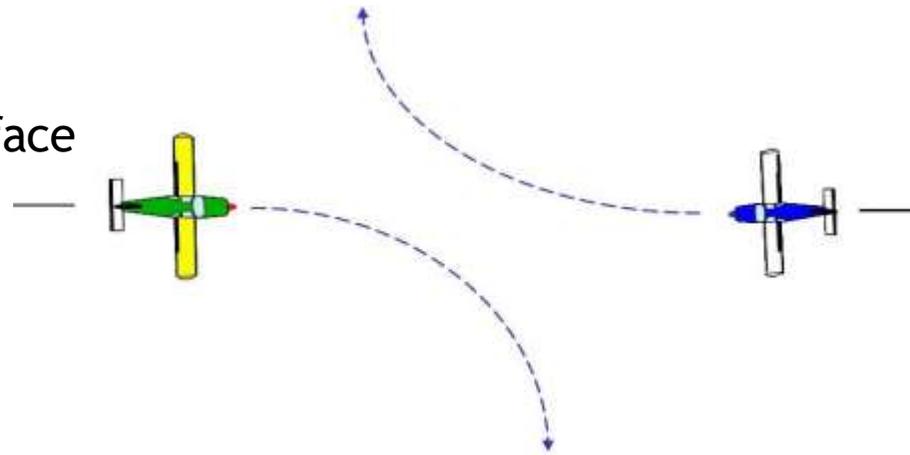


Prévention des collisions – Règles de priorité (1)

- La **vigilance visuelle** ne doit pas être relâchée à bord des aéronefs en vol ou en évolution au sol.

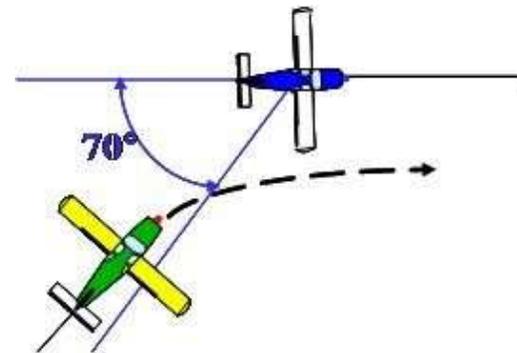
- Règles de priorité :

- Aéronefs se rapprochant de face
 - S'écarter à droite.



- Aéronefs se dépassant :

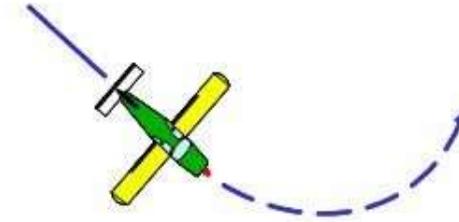
- l'aéronef dépassé est prioritaire.
- l'aéronef dépassant doit obliquer vers la droite pour s'écarter de la trajectoire du premier.
- un aéronef est considéré comme dépassant lorsque sa trajectoire fait un angle de moins de 70° par l'arrière.



Prévention des collisions – Règles de priorité (2)

- Ordre de **priorité décroissante** :

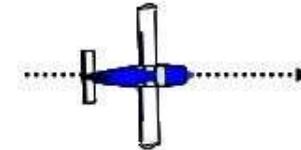
- ballons
- planeurs
- dirigeables
- aérodynes moto propulsées



- Les aéronefs

- remorquant d'autres aéronefs ou objets
- en opération de ravitaillement
- volant en formation (+ 2)

ont priorité sur les aéronefs moto propulsés.

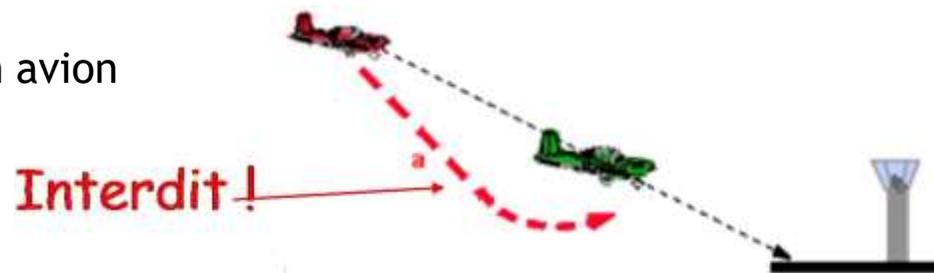


Sinon **l'aéronef qui aperçoit l'autre à sa droite s'en écarte.**

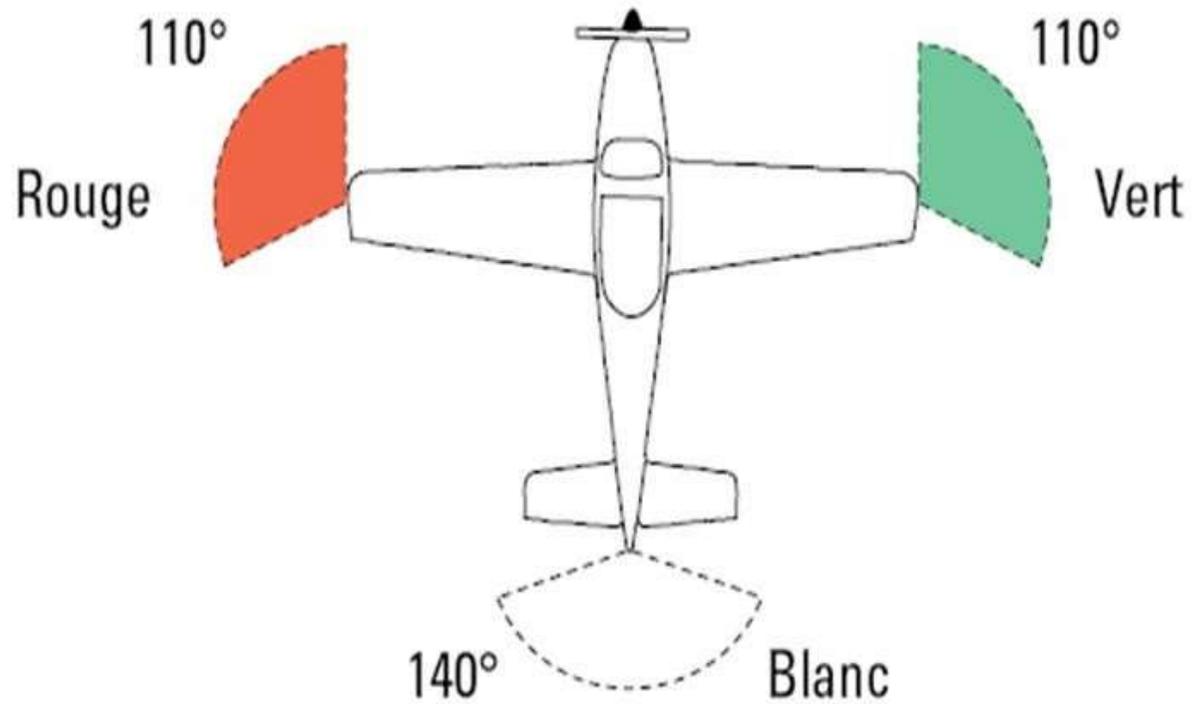
- **Priorité** à l'aéronef en **approche finale** ou à l'**atterrissage** sur tout autre aéronef en vol ou manœuvrant au sol.

- Si deux aéronefs se rapprochent d'un aéroport pour atterrir celui dont **l'altitude est la plus basse** est **prioritaire**, mais :

- on ne peut se placer devant un avion en approche finale.
- Priorité aux planeurs et aux atterrissages d'urgence



Feux réglementaires des aéronefs



Position d'un aéronef dans le plan vertical (1)

- **Hauteur :**

- Above Ground Level AGL
- Above Aerodrome Level AAL (QFE)
- Above Surface ASFC

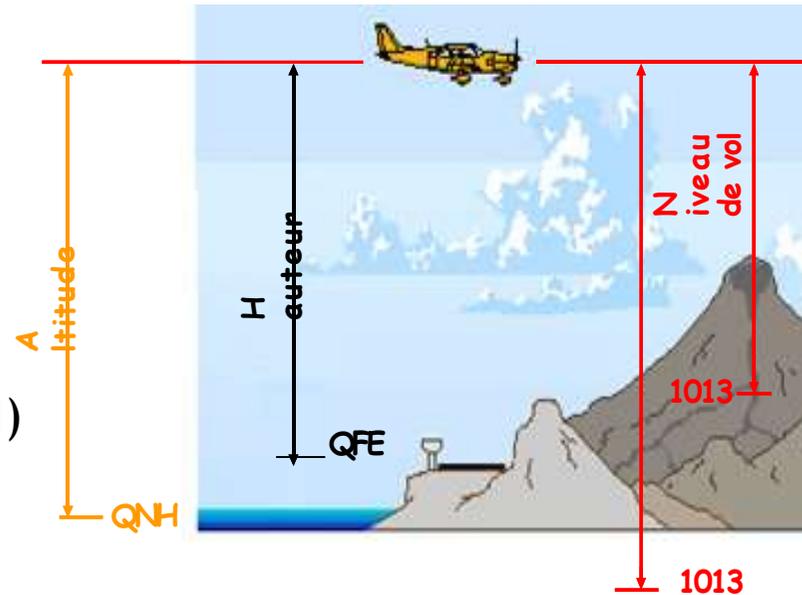
- **Altitude :**

- Above Mean Sea Level AMSL (QNH)

- **Niveau de vol :**

- Flight Level FL
= hauteur au dessus du niveau où règne une pression de 1013 hPa (pression standard) exprimée en centaines de pieds.

Exemple FL45 = 4500 ft au dessus du niveau où règne une pression de 1013 hPa.



Unité utilisée dans une grande partie du monde : le pied (ft)

Conversion mètre ↔ pied : **1 ft ≈ 0,30 m**

Nota : Dans les basses couches, la pression atmosphérique diminue de **1hPa tous les 28 ft** environ.

Position d'un aéronef dans le plan vertical (2)

- **Choix du niveau de vol en fonction de la route magnétique suivie :**

Pour réduire les risques de collision en croisière, les avions adoptent un niveau de vol en fonction de la route magnétique suivie et du type de vol.

		Route magnétique	
		de 000° à 179°	de 180° à 359°
VoIs IFR	Niveaux impairs : FL30, FL50, FL70,...	Niveaux pairs : FL40, FL60, FL80,...	
VoIs VFR	Niveaux impairs + 5 : FL35, FL55, FL75,...	Niveaux pairs + 5 : FL45, FL65, FL85,...	

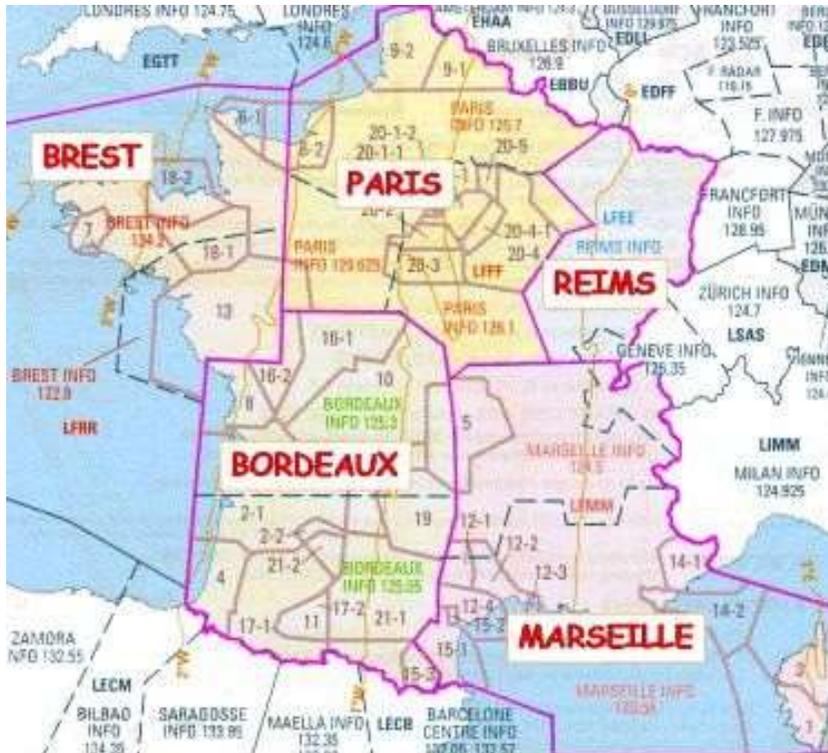
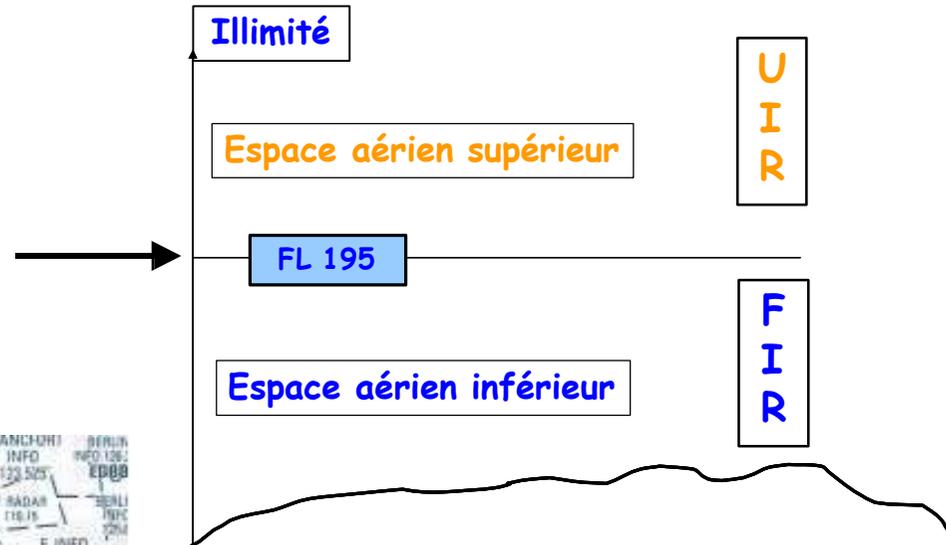
Pour se souvenir :

Impair = **I**talie (donc vers l'est) ; **P**air = **P**ortugal (donc vers l'ouest).

Division de l'Espace aérien (1)

On distingue :

- L'espace aérien **inférieur** : jusqu'au niveau 195 (19500 ft).
- L'espace aérien **supérieur** : au dessus du niveau 195.



L'espace inférieur est divisé en **FIR** (Flight Information Regions).

En France métropolitaine il y a 5 FIR.

Division de l'Espace aérien (2)

Espaces aériens contrôlés :

Ce sont des portions de FIR ou d'UIR à l'intérieur desquelles **le service du contrôle est assuré** au profit des vols contrôlés.

(entre IFR et parfois entre IFR et VFR ou entre VFR).

Pour caractériser le niveau de service rendu à l'intérieur de ces espaces contrôlés, on définit **7 classes d'espace de A à G** (5 seulement en France où B et F n'existent pas).

L'accès à un espace de classe A à D n'est possible qu'après accord (appelé « clairance ») de l'organisme en charge du contrôle de cet espace.

Il existe 3 types de service rendu :

- le service du **contrôle** (pour empêcher les collisions et accélérer le trafic).
- le service d'**information** (pour fournir les renseignements utiles à la sécurité et l'efficacité des vols).
- le service d'**alerte**.

Division de l'Espace aérien (3)

Services rendus :

	Classe	Régime de vol autorisé	Séparation	Information de trafic
Clairance nécessaire ↑ ↓	A	IFR seulement	IFR/IFR	
	B	Inexistant en France	-----	-----
	C	IFR et VFR	IFR / IFR IFR / VFR IFR / VFR de nuit	VFR / VFR VFR de nuit / VFR de nuit
	D	IFR et VFR	IFR / IFR IFR / VFR spécial	IFR / VFR VFR / VFR IFR / VFR de nuit VFR de nuit / VFR de nuit VFR spécial / VFR spécial
	E	IFR et VFR		IFR / VFR (autant que possible) IFR / VFR de nuit VFR de nuit / VFR de nuit
	F	Inexistant en France	-----	-----
	G	IFR et VFR	Information de vol	

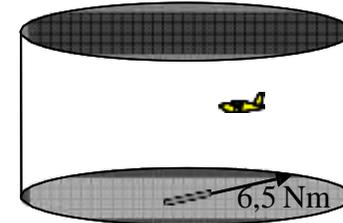
Les Espaces de classe G sont des espaces non contrôlés. Ils occupent la totalité de l'espace qui n'est pas de classe A à F.

Division de l'Espace aérien (4)

Types d'espaces contrôlés :

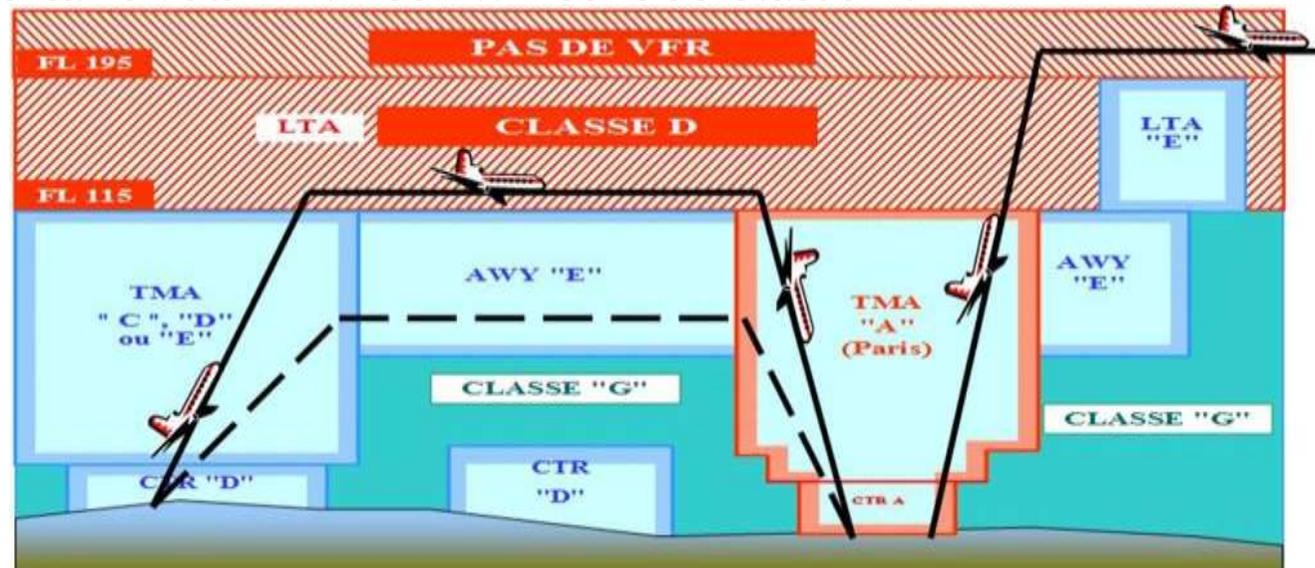
Les types d'espaces contrôlés les plus fréquents sont la CTR, la TMA et l'AWY.

- La CTR (Control Traffic Region) est un volume qui descend jusqu'au sol, autour d'un ou plusieurs aéroports. En France, les CTR sont de classe D (ou A : Paris).



- La TMA (Terminal Control Area) surplombe en général une CTR et s'étend au-delà. En France, les TMA sont de classe E, D ou C (ou A : Paris).
- Les AWY (AirWays = voies aériennes) sont des couloirs destinés à protéger les trajectoires de certains vols IFR. Les AWY sont de classe E.

Coupe
verticale



Zones réglementées (1)

Indépendamment du découpage de l'espace aérien en espaces de classes différentes, il existe des **zones à statut particulier** liées à des activités pouvant présenter certains **dangers** :

- **Zones « P » (Prohibited) :**

Pénétration interdite, sauf autorisation exceptionnelle préalable.

<p>Identification – Nom Nature de l'activité</p> <p><i>Identification – Name Type of activity</i></p>	<p>Plafond Plancher FL, ft</p> <p><i>Upper limit Lower limit</i></p>	<p>Horaires D'activation</p> <p><i>Hours</i></p>	<p>Organisme gestionnaire Conditions de pénétration Observations</p> <p><i>Operating authority Penetrating conditions Remarks</i></p>
<p>LF – P 23 PARIS</p>	<p><u>6600 AMSL</u> <u>SFC</u></p>	<p>H24</p>	<p>Pénétration interdite H24. Dérogations exceptionnelles délivrées aux ACFT civils, après accord de la Préfecture de Police de PARIS, par le District I.D.F.</p>

Consulter les « Compléments aux cartes aéronautiques » édités par le SIA.

Zones réglementées (2)

- **Zones « D » (Dangerous) :**

Pénétration non soumise à restriction, mais danger pour les aéronefs.

Identification – Nom Nature de l'activité <i>Identification – Name Type of activity</i>	Plafond Plancher FL, ft <i>Upper limit Lower limit</i>	Horaires D'activation <i>Hours</i>	Organisme gestionnaire Conditions de pénétration Observations <i>Operating authority Penetrating conditions Remarks</i>
LF – D 18 B Région Maritime militaire BREST Vols d'entraînement et exercices aériens	<u>FL 195</u> SFC	Activable H24	CCMAR ATLANTIQUE ARMOR 124,725
LF – D 18 D Région Maritime militaire BREST Tirs Air:Air, Mer/Mer, Air/Mer, Mer/Air	Par Notam	Activable par Notam	CCMAR ATLANTIQUE ARMOR 124,725
LF – D 59 MAZERES Pyrotechnie	<u>1 000 ASFC</u> SFC	LUN-VEN sauf JF : H24	

Consulter les « Compléments aux cartes aéronautiques » édités par le SIA.

Zones réglementées (3)

- **Zones « R » (Restricted) :**

Pénétration soumise à certaines restrictions.

Identification – Nom Nature de l'activité	Plafond Plancher FL, ft	Horaires D'activation	Organisme gestionnaire Conditions de pénétration Observations
<i>Identification – Name Type of activity</i>	<i>Upper limit Lower limit</i>	<i>Hours</i>	<i>Operating authority Penetrating conditions Remarks</i>
LF – R 9 A BOURGES Tirs Sol/Sol Destruction d'explosifs	<u>1700 AMSL</u> SFC	H24	Contournement obligatoire
LF – R 37 A SAINT-GAUDENS Entraînement VSV	<u>FL 095</u> 4 000 AMSL	LUN-VEN sauf JF	Activité connue de TOULOUSE Information 121.25 IFR/VFR : sur autorisation de TOULOUSE APP 129.3
LF – R 61 MEDOC Vols d'essais	<u>3 000 ASFC</u> SFC	LUN-VEN sauf JF : 0700-1600 HIV : + 1 HR	Activité connue de BORDEAUX ACC/FIC 125.05 Sur autorisation de BORDEAUX Essais 122.9. L'info donnée est valable pour une durée de 1 HR après la demande

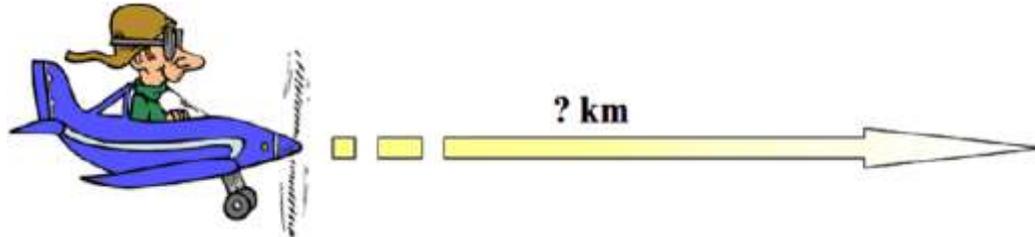
Consulter les « Compléments aux cartes aéronautiques » édités par le SIA.

Conditions météorologiques de vol à vue (1)

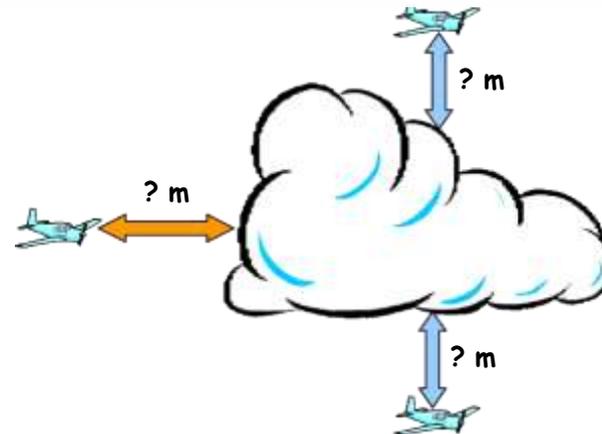
Pour pratiquer le vol à vue (VFR) il faut que les conditions météorologiques soient suffisamment bonnes : Conditions **VMC**.

Ce qui compte c'est :

- la **visibilité horizontale**.



- la **distance par rapport aux nuages**.
(distance horizontale et verticale)



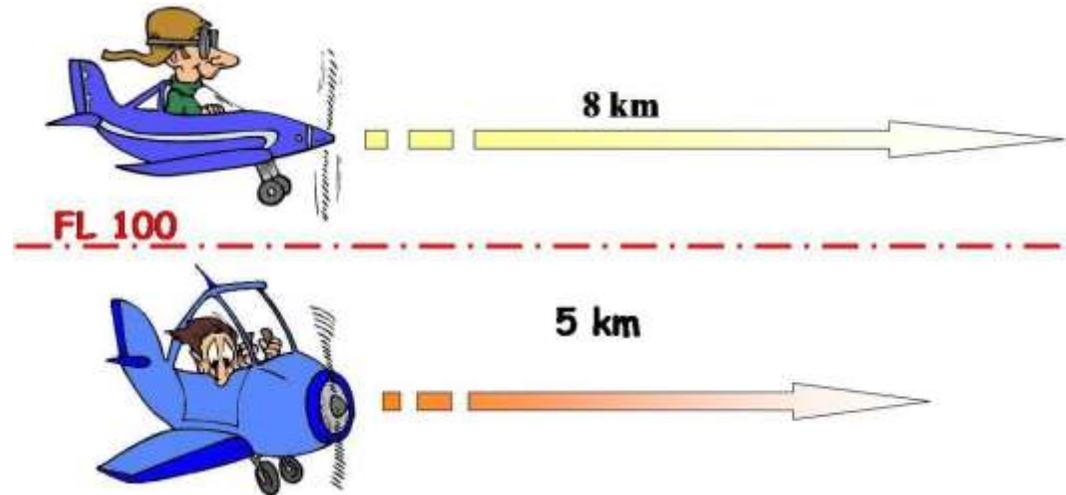
Les valeurs exigées dépendent de :

- la **classe** d'espace aérien (contrôlé ou non) dans laquelle on se trouve.
- l'**altitude** ou le **niveau de vol**.

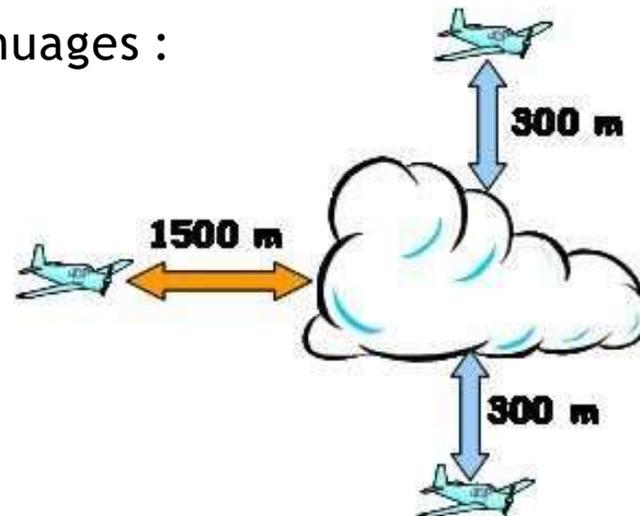
Conditions météorologiques de vol à vue (2)

En espace contrôlé

- Visibilité horizontale :

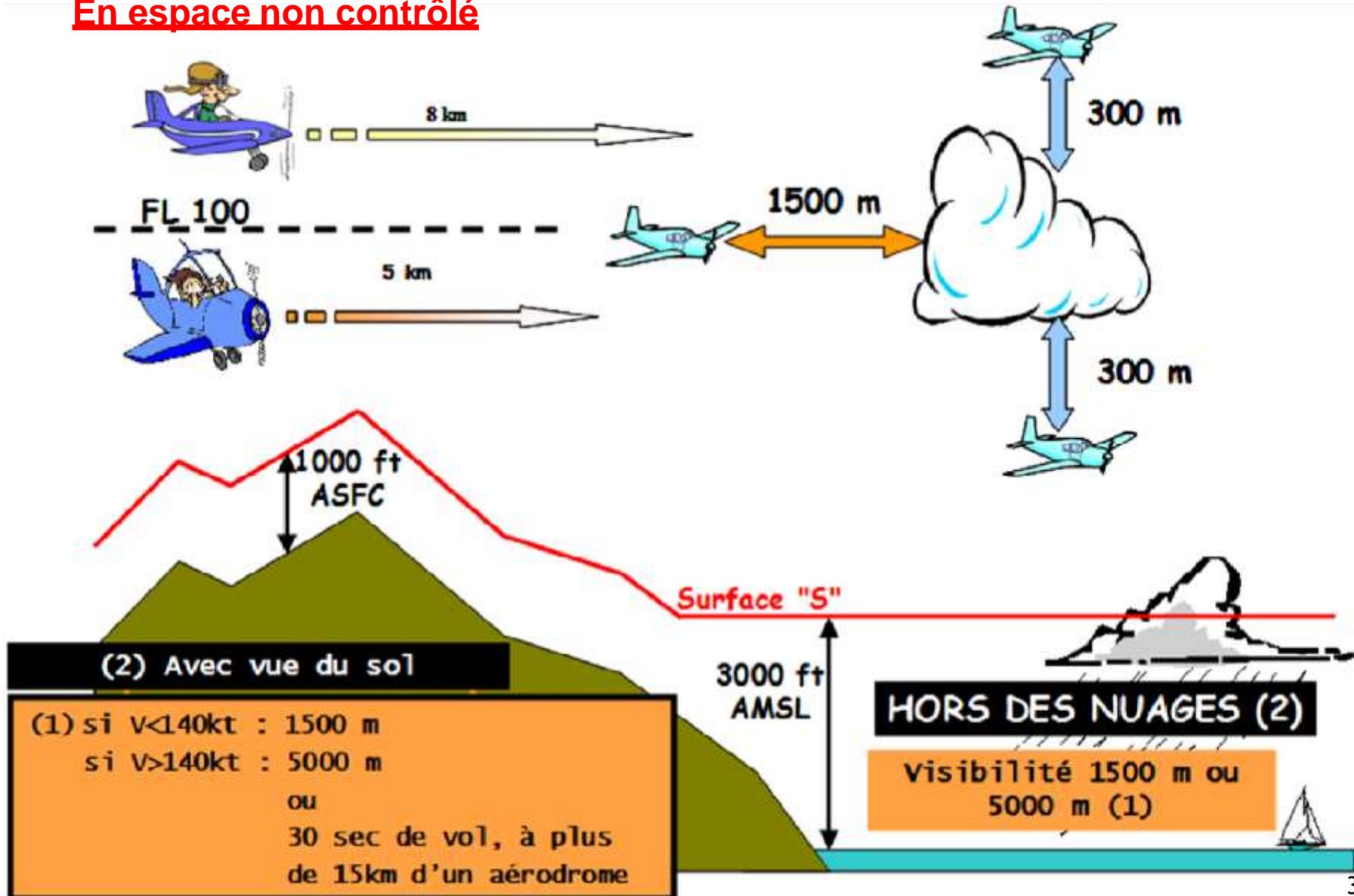


- Distances par rapport aux nuages :



Conditions météorologiques de vol à vue (3)

En espace non contrôlé



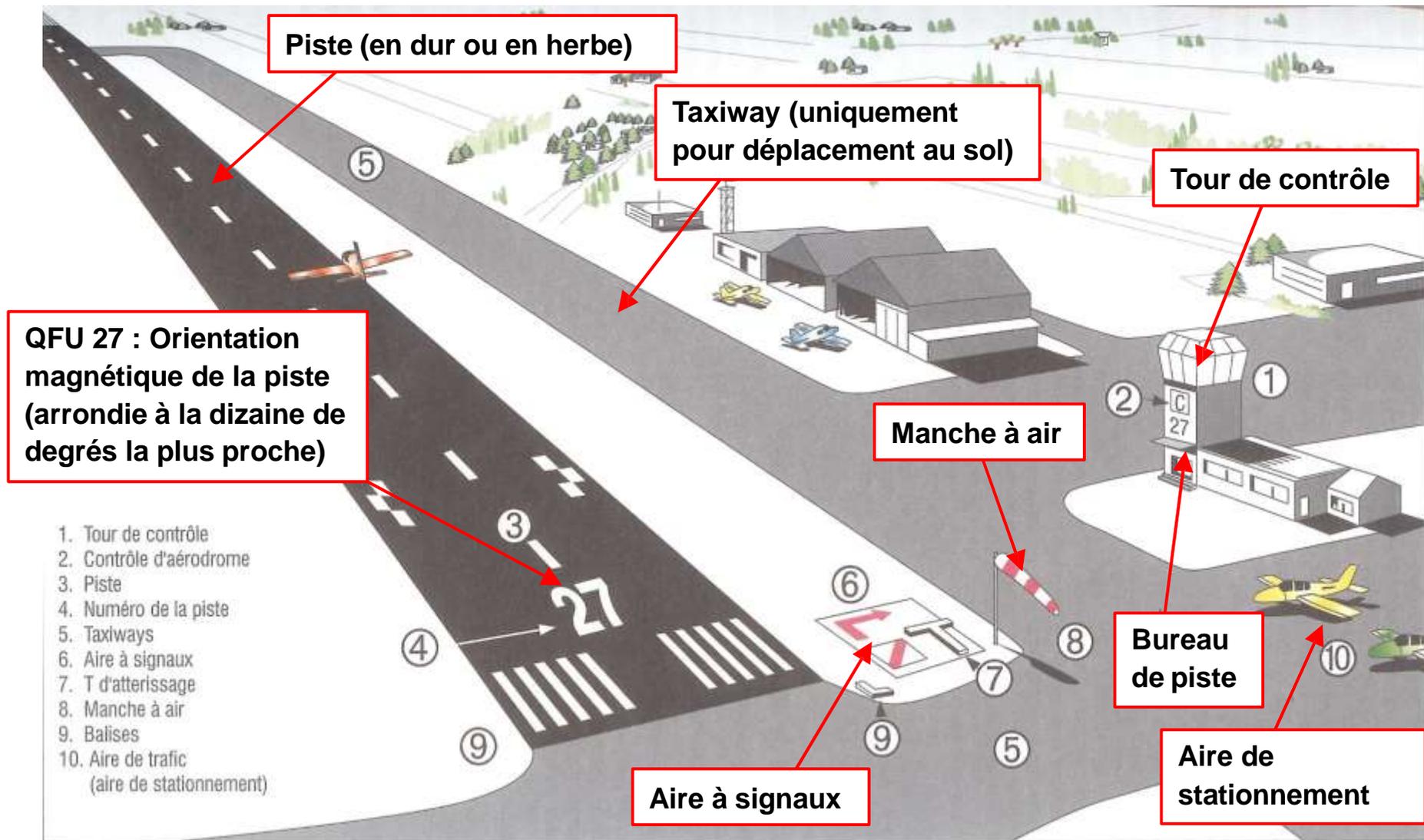
VFR Spécial

Dans une **zone contrôlée**, si les conditions météo sont insuffisantes, il est possible de demander une **clairance « VFR Spécial »**.

Il faut, cependant, que les conditions météo soient au moins :

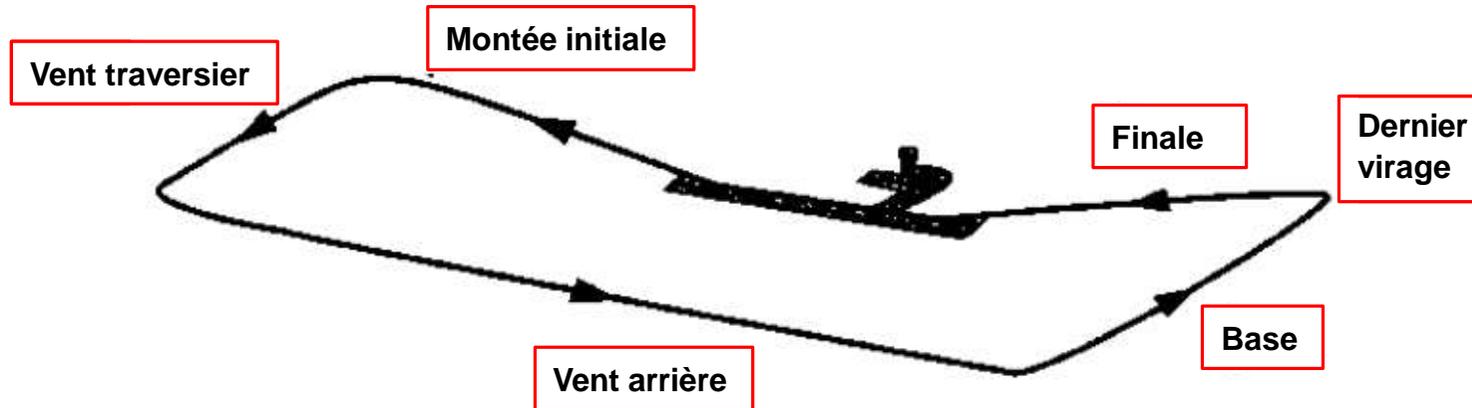
- Visibilité horizontale : 1500 m ou 30 secondes de vol.
- Hors des nuages, avec la vue du sol.
- Base des nuages permettant de respecter les hauteurs minimales de survol.

L'aérodrome (1)



L'aérodrome (2)

Le tour de piste



C'est un **circuit généralement rectangulaire** que doivent suivre les avions qui se trouvent aux abords de l'aérodrome.

Le circuit « **standard** » se fait à 1000ft QFE (au-dessus de l'aérodrome), en tournant à gauche (on dit « **circuit à main gauche** »).

Des dispositions différentes peuvent être données (hauteur différente, circuit à main droite,...).

Pour atterrir, les avions doivent **s'intégrer** dans le tour de piste au niveau de la branche "**vent arrière**", en cédant la priorité à ceux qui sont déjà dans le circuit.

L'aérodrome (3)

Les signaux au sol



Interdiction d'atterrir



Précautions spéciales à l'atterrissage



Zone impropre aux manœuvres d'aéronef



Atterrissage et décollage interdit en dehors des pistes
roulage interdit en dehors des voies de circulation



Atterrissage et décollage interdit en dehors des pistes
roulage autorisé en dehors des voies de circulation



Vols de planeurs en cours



Tour de piste à « main droite »

L'aérodrome (4)

Les signaux lumineux

Ils permettent au contrôle d'aérodrome de communiquer avec l'avion en cas de panne radio.

	Avion en vol	Avion au sol
Feu vert continu	Vous êtes autorisé à atterrir	Vous êtes autorisé à décoller
Eclats verts	Revenez pour atterrir	Vous êtes autorisé à circuler
Feu rouge continu	Cédez le passage à un autre aéronef	Arrêtez
Eclats rouges	Aérodrome dangereux, n'atterrissez pas	Dégagez l'aire d'atterrissage en service
Eclats blancs	Atterrissez immédiatement et dégagez l'aire d'atterrissage en service	Retournez à votre point de départ sur l'aérodrome
Artifice rouge	Quelles que soient les instructions antérieures, n'atterrissez pas	

Le pilote accuse réception :

- De jour : - en battant des ailes s'il est en vol.
- en remuant les ailerons ou la gouverne de direction, s'il est au sol.
- De nuit, en éteignant et allumant 2 fois les phares d'atterrissage ou, à défaut, les feux de position.

Communications (1)

Un aéronef évoluant en **VFR** doit être muni de **l'équipement de radiocommunication** permettant une liaison bilatérale permanente avec les organismes au sol désignés :

- lorsqu'il effectue un **vol contrôlé**.
- lorsqu'il évolue dans des **portions d'espace aérien** ou sur des **itinéraires** portés à la connaissance des usagers par la voie de l'information aéronautique.
- lorsqu'il utilise **certains aérodromes** portés à la connaissance des usagers par la voie de l'information aéronautique.
- lorsqu'il **quitte la vue du sol ou de l'eau**.

Communications (2)

Un **aéronef en vol contrôlé** doit établir une **communication bilatérale directe** avec l'organisme intéressé du contrôle de la circulation aérienne et garder une **écoute permanente** sur la fréquence radio appropriée.

Les communications doivent respecter une certaine forme (**phraséologie**).

Les consignes doivent toujours être **collationnées** par le pilote (répétées pour vérifier qu'elles ont été correctement reçues).

En cas d'**interruption des communications**, l'avion doit se conformer aux **procédures prévues** dans la documentation (cartes VAC), afficher le code transpondeur **7600** et veiller aux éventuelles clairances qu'il pourrait recevoir par **signaux visuels**.

La fréquence **121,5** MHz est réservée aux **appels d'urgence**.

Les lettres s'épellent :

A	alfa
B	bravo
C	charlie
D	delta
E	echo
F	foxtrot
G	golf
H	hotel
I	india
J	juliett
K	kilo
L	lima
M	mike

N	november
O	oscar
P	papa
Q	quebec
R	romeo
S	sierra
T	tango
U	uniform
V	victor
W	whiskey
X	x-ray
Y	yankee
Z	zulu

Communications (3)

Différents types d'aérodromes :

- Aérodromes non contrôlés : Les avions munis d'une radio pratiquent **l'auto information** (c'est-à-dire qu'ils émettent des messages donnant leur position et leurs intentions, sur la fréquence de l'aérodrome ou, à défaut, sur 123,5) et appliquent les règles de priorité.

L'intégration dans le tour de piste se fait après passage à la verticale du terrain pour **observation de la manche à air et de l'aire à signaux**.

Nota : certains de ces aérodromes sont réservés aux avions munis de radio.

- Aérodromes avec service AFIS (Aerodrome Flight Information Service) : Le service AFIS assure **l'information de vol**, mais il n'est pas tenu d'assurer la séparation ni l'information de trafic. Les avions communiquent avec le service AFIS sur la fréquence de l'aérodrome et restent responsables de leur sécurité.

- Aérodromes contrôlés : Le contrôleur assure **l'information de trafic et/ou la séparation des aéronefs**. Les avions suivent les instructions du contrôleur.

Accidentologie - Facteurs humains (1)

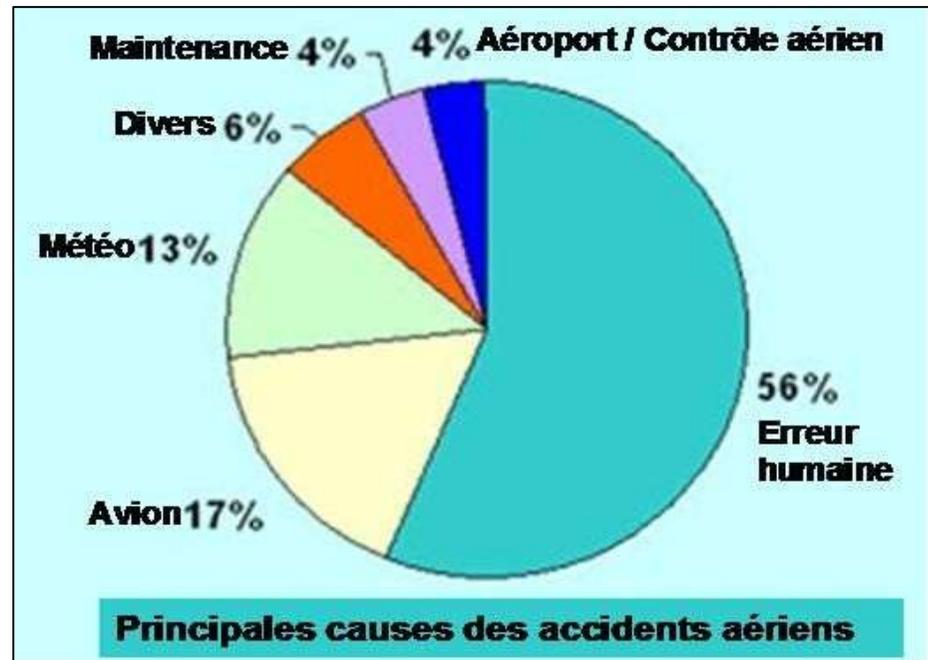
Le **développement spectaculaire** de l'aviation commerciale (*nombre de passagers multiplié par 10 en 45 ans*)

s'est accompagné d'une **baisse du nombre de victimes** d'accidents.

Dans le même temps, la part des **accidents dus au matériel** a énormément **diminué**.

A tel point qu'aujourd'hui, la **première cause** d'accidents est constituée par les **erreurs humaines**.

On comprend tout l'intérêt qu'il y a à prendre en compte les **facteurs humains**.



Accidentologie - Facteurs humains (2)

L'être humain surpasse la meilleure machine sur bien des points. Cependant,

- il est incapable de réaliser une tâche complexe sans courir le risque de commettre des **erreurs**.
- Il est contraint par ses **limites physiologiques** et sa capacité d'**analyse** et de **raisonnement**.

La sécurité des vols passe donc par :

- la **prise en compte du risque d'erreur humaine** à tous les stades (*conception et fabrication du matériel, définition des procédures, maintenance et utilisation du matériel, ...*).
« **Si une erreur est possible, elle se réalisera un jour !** »
- la connaissance des limites **physiologiques** et **mentales** de l'être humain.
 - diminution des **capacités** de l'être humain en fonction des **conditions de vol** (voire, risque d'incapacité totale).
 - difficulté à réaliser **plus d'une tâche à la fois**.
 - limitation de la **charge de travail** supportable.

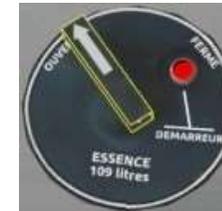
Accidentologie - Facteurs humains (3)

Culture de la sécurité :

Plutôt que de nier l'existence des **erreurs** humaines, il faut :

- concevoir le matériel pour qu'il **élimine** au maximum les **sources d'erreur**.

Exemple : Le bouton du démarreur n'est accessible que si le sélecteur d'arrivée d'essence est en position « Ouvert ».



- définir des **procédures précises** dans tous les domaines (conception, fabrication, maintenance, utilisation du matériel) et s'assurer qu'elles sont appliquées.

Exemple : Extrait de la procédure avant démarrage d'un avion léger.

Avant mise en route	
Horamètre.....	Noté
Frein de parc.....	Serré
Disjoncteurs.....	Enclenchés
Batterie.....	ON
Alternateur.....	OFF
Jauge(s) essence.....	quantité+autonomie
Robinet d'essence.....	Ouvert
Trim*.....	Neutre
Sièges.....	Réglés, Verrouillés
Ceintures et harnais.....	Réglés, ouverts
Volets G/D.....	Vérifiés/rentrés
Commandes (débattement+sens).....	Libres
Verrière.....	Déverrouillée
Mixture.....	Plein riche
Pompe électrique.....	Marche/ON
Réchauffe carbu.....	Froid (poussée)
Radio.....	OFF
Transpondeur.....	OFF
Balise de détresse.....	AUTO
Test voyants.....	Tous allumés
Altimètre.....	Réglé
Anti-collision.....	ON

Toutes ces précautions sont le fruit du **retour d'expérience** (accidents et incidents).

*Exemple : Chaque **accident** fait l'objet (en plus de l'enquête judiciaire) d'une **analyse technique** dont le but est de **révéler** ses **causes** et de proposer des **solutions pour éviter qu'il se reproduise**.*

Accidentologie - Facteurs humains (4)

Limites physiologiques de l'être humain, effets physiologiques du vol :

1 *Effets dus à la **diminution de pression** atmosphérique avec l'altitude :*

- **Hypoxie** d'altitude ou anoxémie : La raréfaction de l'oxygène en altitude peut conduire à une **réduction des capacités** cérébrales et à une **perte de conscience**.

Le vol sans pressurisation ou apport d'oxygène est interdit (pilotes et passagers) au dessus de 13000ft. Entre 10000 et 13000ft, le vol doit être limité à 30mn.

- **Aéroembolisme** : Sous l'effet d'une rapide diminution de pression, l'azote dissout dans le sang forme des microbulles qui peuvent **obstruer la circulation sanguine** et entraîner des troubles.

- **Barotraumatismes** : Le tympan isole l'oreille interne de l'extérieur. Les variations de pression extérieure sont transmises à l'oreille interne par les trompes d'Eustache reliées au nez. Si le nez est bouché (rhume), le **tympan** subit une forte différence de pression lors des montées en altitude et peut devenir douloureux, voire **se rompre**.

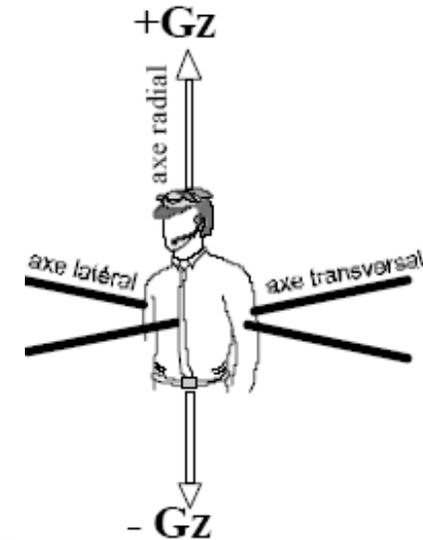
Accidentologie - Facteurs humains (5)

Limites physiologiques de l'être humain, effets physiologiques du vol :

2 Effets des **accélérations** :

- Les **accélérations vers le haut** (facteur de charge positif) poussent le sang vers le bas du corps et réduisent la pression artérielle au niveau du cerveau. Elles peuvent conduire à la perte momentanée de la vision (**voile noir**) et à une **perte de connaissance**.

- Les **accélérations vers le bas** (facteur de charge négatif) ont l'effet inverse. Elles entraînent une surpression artérielle au niveau de la tête qui peut être **douloureuse** et conduire à **l'éclatement de petits vaisseaux** sanguins.



Des **combinaisons anti-g** permettent de **réduire** les effets des **accélérations vers le haut** en **comprimant les parties basses du corps** en fonction du facteur de charge pour en **chasser le sang**.

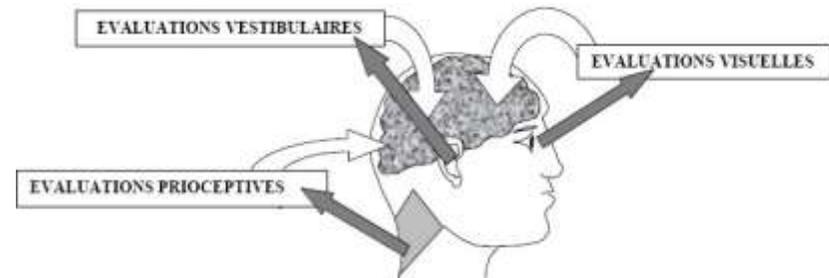


Accidentologie - Facteurs humains (6)

Limites physiologiques de l'être humain, effets physiologiques du vol :

3 *Equilibre et orientation spatiale* :

L'être humain utilise différentes sources d'information pour évaluer son orientation et ses mouvements et pour assurer son équilibre.



- Evaluations **visuelles**.
- Evaluations **vestibulaires** : L'oreille interne comporte un capteur (le vestibule) capable d'évaluer les accélérations linéaires et angulaires subies par la tête. Ce capteur est imparfait (seuil de sensibilité,...).
- Evaluations **proprioceptives** : Les muscles, les tendons, la peau,... sont sensibles aux pressions et aux étirements dus à la pesanteur et aux accélérations.

Il arrive que ces différentes sources donnent des **indications contradictoires**.

En vol sans visibilité, seul un entraînement rigoureux permet au pilote de se concentrer sur les indications des instruments de bord et de **faire abstraction des sensations physiques trompeuses**.

Accidentologie - Facteurs humains (7)

Capacité d'analyse et de raisonnement :

Pour piloter, il faut se faire une **représentation correcte de la situation** et **actualiser** en permanence cette représentation.

En fonction de cette représentation, il faut **agir** à des instants imposés.

Pour **comprendre la situation**, le pilote **interprète ce qu'il perçoit** et le **compare** en permanence avec **ce qu'il s'attend à percevoir**. De ce fait, il a tendance à **filtrer** ce qu'il perçoit (*et **risque** parfois d'**occulter** certaines informations sur lesquelles il ne se concentre pas*).

Pour **agir**, le pilote peut utiliser :

- ses **connaissances** et son **raisonnement logique**,
- une application de **règles simples** et de **schémas**.

Dans le premier cas, **l'action est lente** et **accapare beaucoup de ressources intellectuelles**. Le risque d'erreur est important.

Dans le second cas, **l'action est rapide** et permet de **garder une grande disponibilité intellectuelle** pour traiter d'autres sujets. Mais pour garder en mémoire ces règles et schémas, il faut **entretenir une pratique régulière**.

L'application de ces **schémas** sera d'autant plus **rapide** et **facile** que l'on aura soigneusement **anticipé la prochaine phase de vol** (*exemple : préparation mentale du décollage*).

Accidentologie - Facteurs humains (8)

Prise de décision :

C'est une des tâches essentielles du pilote. Elle consiste à **choisir** entre **plusieurs solutions** disponibles, après **analyse de la situation** et **comparaison** de ces solutions et de leurs **conséquences** prévisibles.

Le jugement du pilote peut être altéré par :

- sa tendance à **sous-estimer** certains **risques** causée par l'**obstination** à rejoindre la **destination prévue**.
- sa préférence pour une **solution déjà pratiquée**, même si elle est **inadaptée** à la situation présente.
- sa tendance à se laisser **influencer** par le milieu (passagers, autres pilotes,...).

Accidentologie - Facteurs humains (9)

Gestion des ressources mentales :

Il faut être conscient que les ressources mentales du pilote peuvent rapidement devenir inadaptées à sa charge de travail, surtout si elles sont diminuées par :

- La **fatigue** : Elle se manifeste par des **difficultés de concentration** et/ou une sensation physique de **lourdeur**. Elle apparaît en fonction de la **durée** et de la **difficulté du vol**.

- Le **manque de sommeil** : Entreprendre ou devoir poursuivre un vol en situation de manque de sommeil conduit à une **baisse de vigilance** et à une **réduction des performances intellectuelles**.

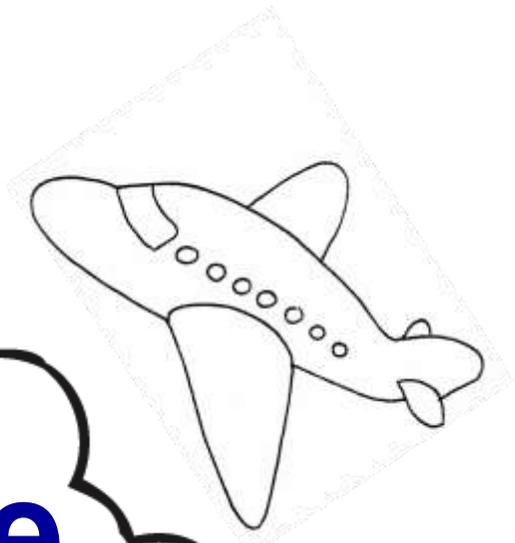
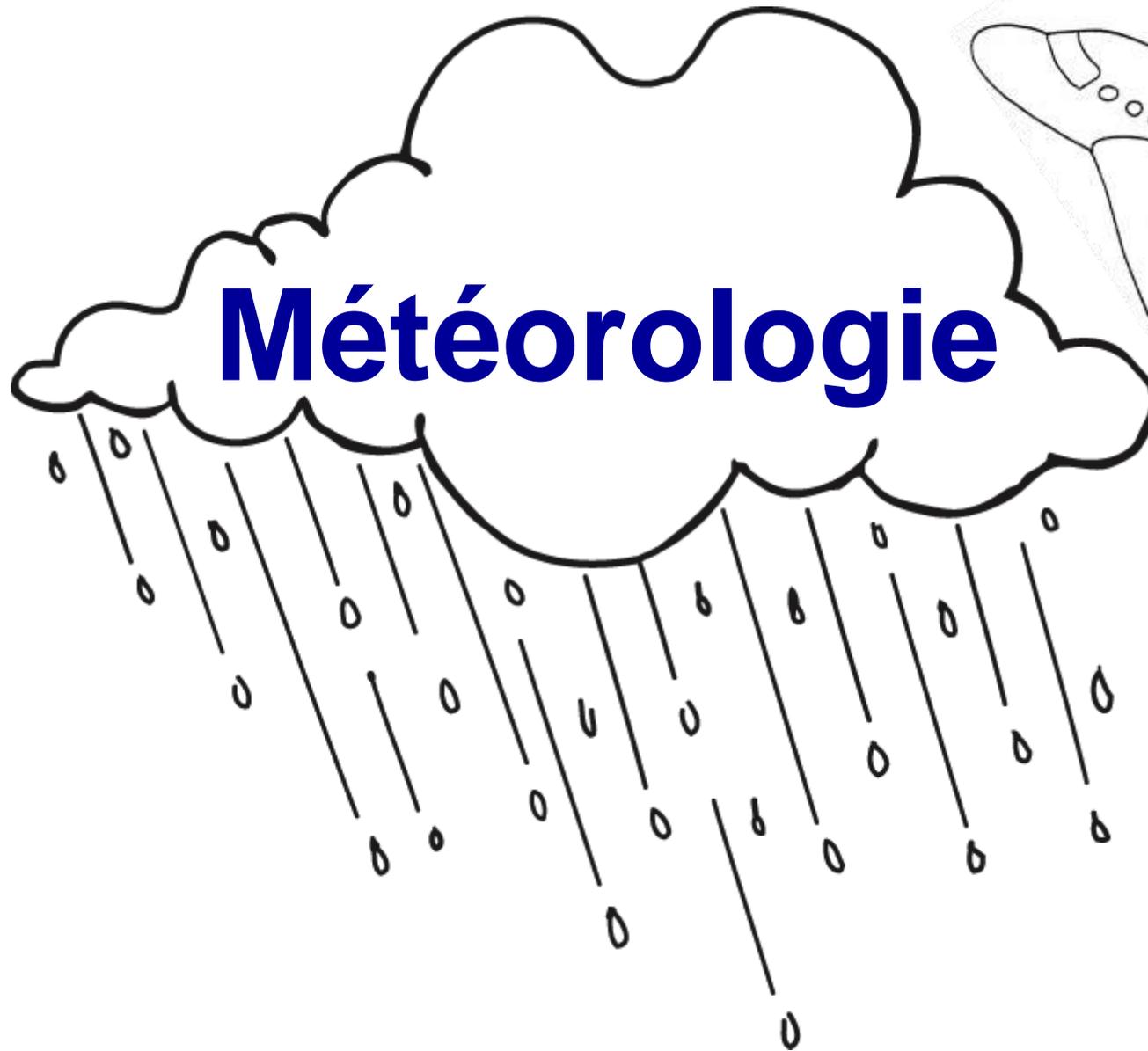
- Le **stress** : C'est une réaction naturelle face à une **situation perçue** comme une **agression** ou un **facteur de risque**.

Dans un premier temps, il permet de mobiliser certaines ressources physiologiques et mentales.

Mais rapidement, il entraîne une **régression dangereuse** des capacités de **réflexion** et de la **mémorisation** des règles et schémas connus.

Tous les **individus** n'ont pas la même réaction au stress.

Dans les 3 cas, une bonne **hygiène de vie** et une **préparation méticuleuse** des vols sont des atouts essentiels.



L'atmosphère terrestre

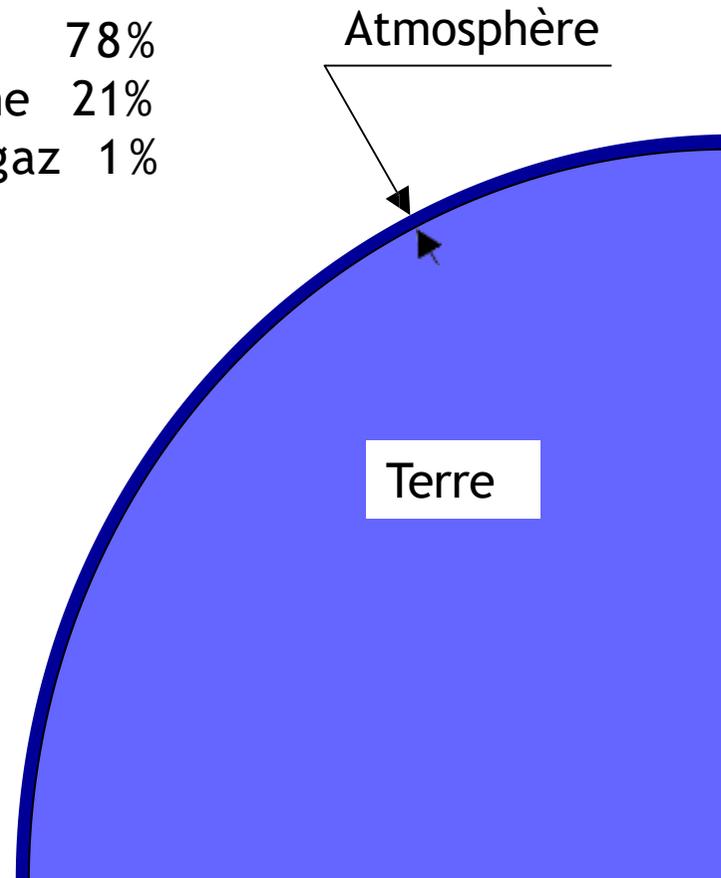
L'atmosphère constitue l'enveloppe gazeuse de la terre.

Elle est retenue par l'attraction terrestre.

Elle est composée :

- d'**air** (essentiellement)

{	azote	78%
	oxygène	21%
	autres gaz	1%
- de **vapeur d'eau**
- d'**eau atmosphérique** (nuages)
- de poussières



Pression atmosphérique

L'air est **pesant**.

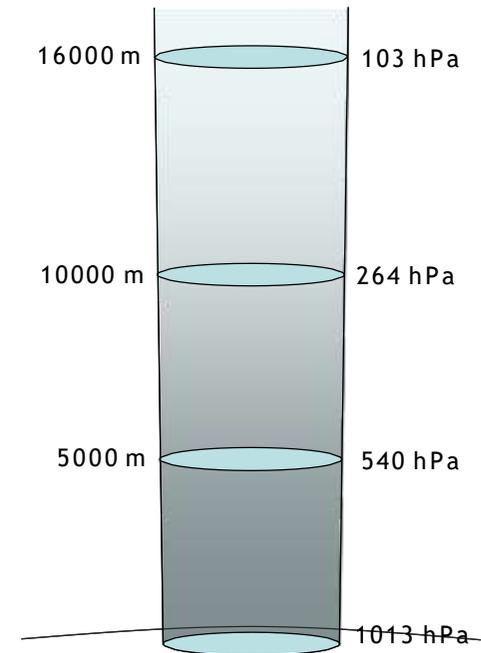
La **pression** exercée par l'air atmosphérique sur la surface terrestre représente le **poids de la colonne d'air** ayant pour base une unité de surface.

La **pression atmosphérique diminue** lorsque l'**altitude augmente** (*car elle représente le poids de la colonne d'air située au dessus de cette altitude*).

• **90%** de la masse de l'atmosphère est située **en dessous de 16 km**.

• **99,9%** de la masse de l'atmosphère est située **en dessous de 50 km**.

Dans les basses couches, la pression atmosphérique **diminue d'environ 1hPa (hectopascal) tous les 28ft (soit 8,5m)**.



Température de l'atmosphère

Quand on s'élève au dessus du sol, la température de l'atmosphère évolue.

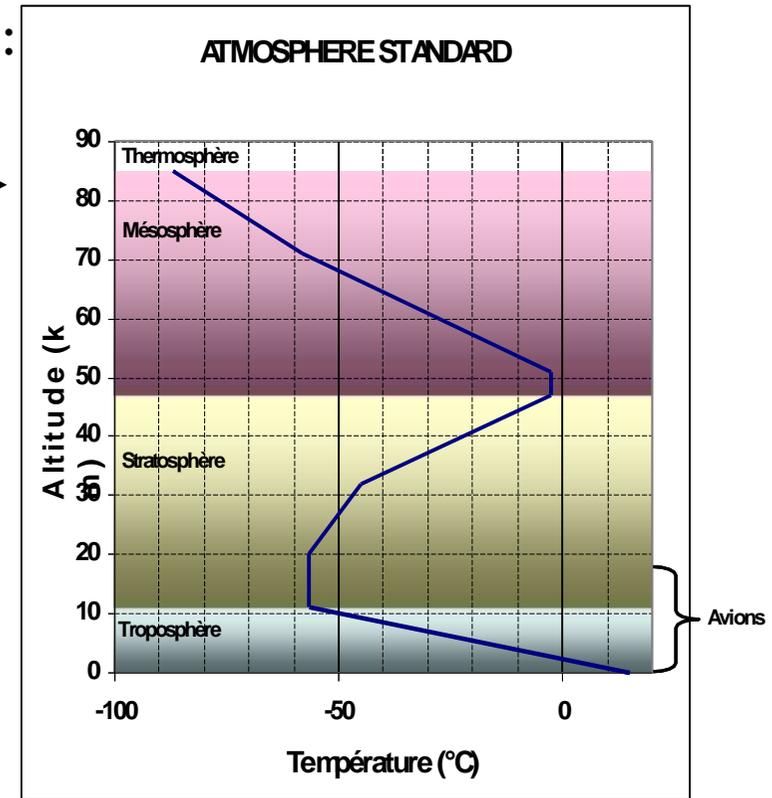
Dans l'**atmosphère « standard »** (moyenne) :

- elle diminue de 0 à 11km d'altitude,
- puis reste constante jusqu'à 20km,
- puis augmente jusqu'à 47km,
- pour diminuer, ensuite.

La couche de **0 à 11km** s'appelle la « **troposphère** ». La température y **décroit de 6,5°C par km** (soit $\approx -2^\circ\text{C}$ tous les 1000ft).

On dit que le « **gradient thermique** » est de $-6,5^\circ\text{C}/\text{km}$ (ou $-2^\circ\text{C}/1000\text{ft}$).

Au-dessus, on entre dans la **stratosphère**. (température **constante jusqu'à 20km**).



La surface de séparation entre ces deux couches s'appelle la **tropopause** ».

Près de l'**équateur** la tropopause est plus haute ($\approx 16\text{km}$) et plus froide (-70°C).
Près des **pôles** elle est plus basse ($\approx 8\text{km}$) et moins froide (-40°C).

Humidité de l'atmosphère (1)

L'**eau** contenue dans l'atmosphère peut se présenter sous 2 formes :

- **visible** :
 - **fines gouttelettes** liquides en suspension dans l'air (nuages, brouillard).
 - **gouttes de pluie** (qui tombent).
 - sous forme **solide** : grêle, neige,...
- **invisible** :
 - une certaine quantité d'eau à l'état gazeux (**vapeur d'eau**), peut être contenue dans l'atmosphère.

La **quantité maximale** de **vapeur d'eau** que peut contenir un certain volume d'air dépend de sa **température**.

Température (°C)	-5	0	5	10	15	20	25	30
Teneur maxi en vapeur d'eau (g/m ³)	3,2	4,8	6,8	9,4	12,9	17,0	23,0	30,0

Si on **refroidit de l'air humide** en dessous d'une certaine température, des **gouttelettes d'eau liquide** apparaissent (c'est la « **condensation** »), car l'air ne peut plus contenir toute l'eau sous forme de vapeur (on dit qu'il est **saturé**).

Cette température, à laquelle apparaissent les premières gouttelettes d'eau liquide est appelée « **point de rosée** ».

Humidité de l'atmosphère (2)

Plus l'**écart** entre la **température de l'air** et la température à laquelle des gouttelettes apparaîtraient si on le refroidissait (**point de rosée**) est **faible**, plus l'air est proche de la **saturation** (risque de brouillard).

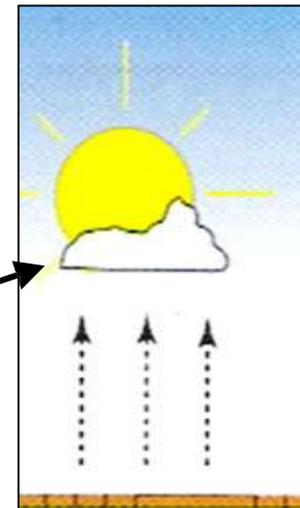
On peut mesurer cet écart à l'aide d'un « **psychromètre** » (*appareil composé de 2 thermomètres, l'un classique, et l'autre maintenu humide et balayé par l'air*).

On appelle « **degré hygrométrique** » le rapport
$$\frac{\text{masse de vapeur d'eau dans l'air}}{\text{masse de vapeur d'eau qu'il pourrait contenir à cette température}}$$
 (degré hygrométrique = 100% si l'air est saturé)

Lorsque de l'**air humide s'élève** dans l'atmosphère, sa pression diminue (car la pression atmosphérique diminue).

Comme tous les gaz, l'**air se refroidit** lorsqu'on diminue sa pression.

A une certaine altitude (*en dessous d'une certaine température*), des gouttelettes d'eau liquide apparaissent : Des **nuages se forment**.



Stabilité de l'atmosphère

Il arrive fréquemment que le gradient thermique de la troposphère soit **différent de $6,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$** (valeur pour l'atmosphère standard).

Plus le **gradient thermique** est **fort**, plus **l'atmosphère est instable**.
En effet, si une masse d'air commence à s'élever, elle se refroidit parce que sa pression diminue.

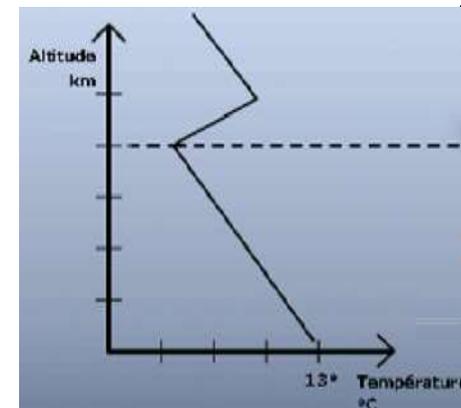
Si l'atmosphère qui l'entoure se refroidit plus vite qu'elle (gradient thermique fort) elle continuera à s'élever, car elle sera plus chaude, donc plus légère que l'air environnant.

En pratique, si le gradient thermique est **$>10^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ($3^{\circ}/1000\text{ft}$)**, l'atmosphère est **instable** : les nuages ont tendance à se **développer verticalement**.

Au contraire, si le gradient thermique est plus faible, les nuages ne pourront pas se développer verticalement.

Il arrive parfois que localement (dans une couche), la température augmente avec l'altitude (le gradient thermique s'inverse).

C'est une **couche d'inversion**. Elle bloque complètement le développement vertical des nuages et la montée des fumées et autres pollutions.



Mesures dans l'atmosphère terrestre

Les **relevés météorologiques** permettent de caractériser une situation et de l'analyser en vue d'établir des prévisions. Ils se font :

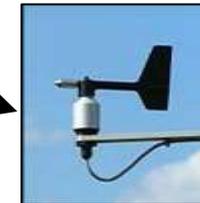
- près du sol
- en altitude



On peut mesurer (*entre autres*) :

- la **pression atmosphérique**, avec un **baromètre**
- la **température**, avec un **thermomètre**
- la **direction du vent**, avec une **girouette**
- la **vitesse du vent**, avec un **anémomètre**
- l'**humidité de l'air**, avec un **psychromètre** ou un **hygromètre**.

Certains hygromètres sont des **hygromètres à cheveu** :
Ils utilisent la propriété qu'ont les cheveux de s'allonger lorsque l'humidité de l'air augmente.



Unités de mesure

- L'unité de pression est le Pascal (Pa) = 1 Newton /m² (C'est tout petit).
On utilise l'hectopascal (hPa) (*Pression Std au niveau de la mer = 1013 hPa*).

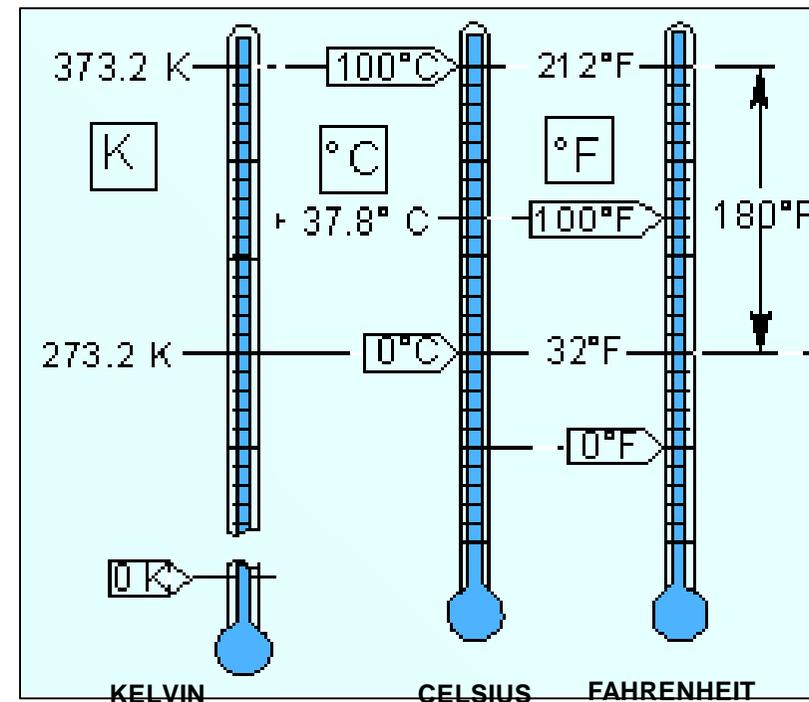
- L'unité de température est le **degré Celsius (°C)**.

On donne habituellement deux températures :

- la température de l'air
- le point de rosée

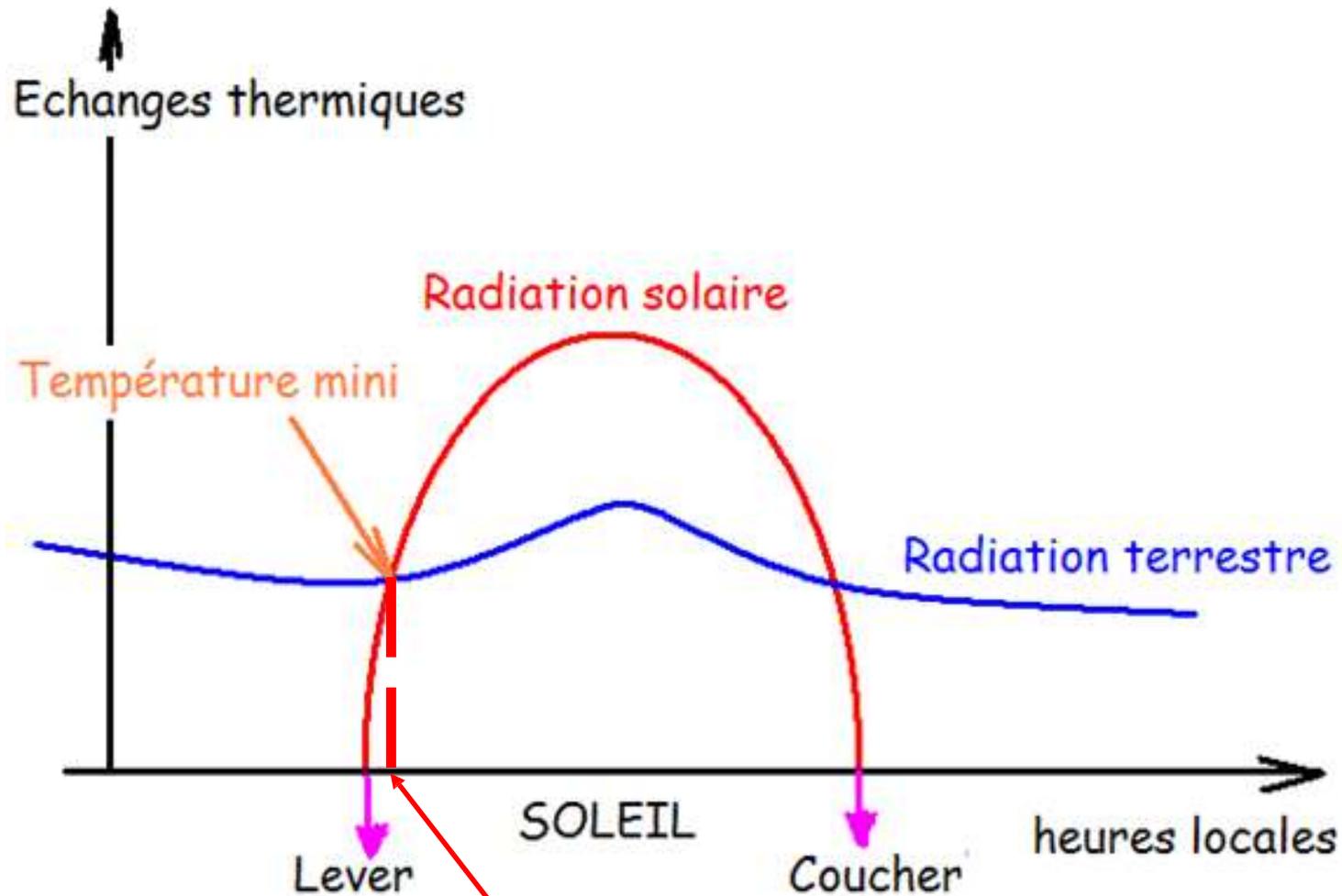
On utilise quelques fois :

- le degré **Fahrenheit**
(unité anglo-saxonne)
- le degré **Kelvin**
(température absolue)



- La vitesse du vent se mesure en **Nœuds (kt)**.

Variation journalière de la température



Mini de température 30 mn à 1h00 après lever du soleil

→ Risque de brouillard

Variation de la pression suivant les régions et dans le temps

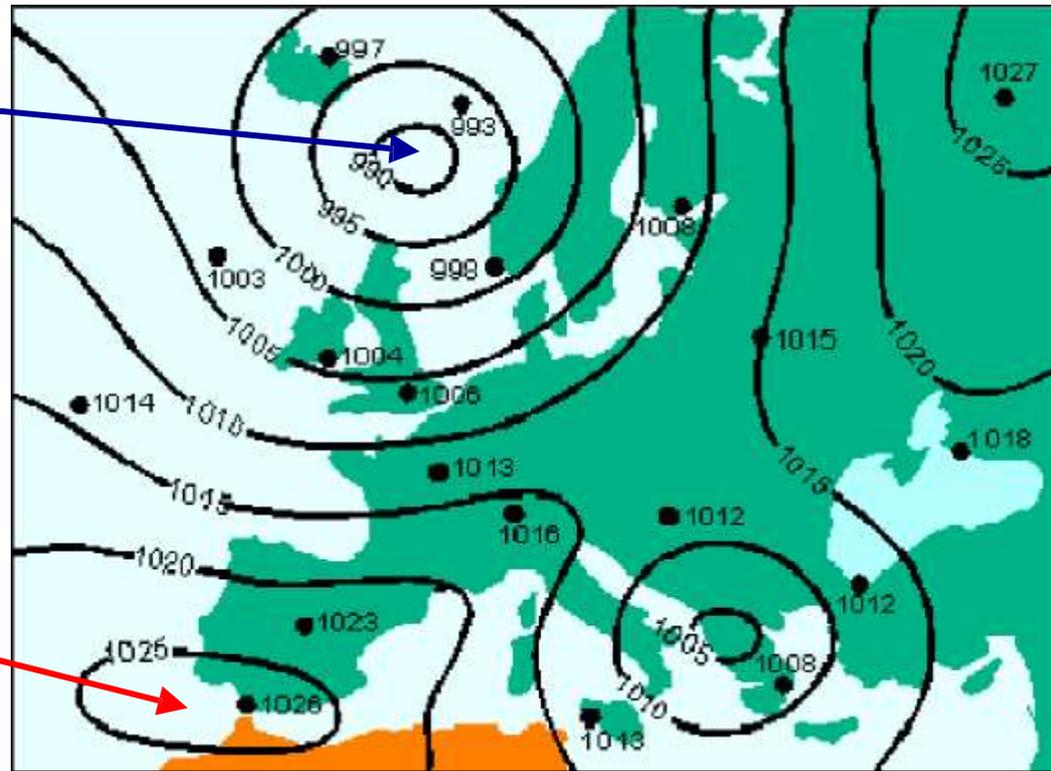
On peut porter sur une carte les valeurs de la pression atmosphérique ramenées au niveau de la mer (**QNH**), à un instant donné.

Des courbes appelées **isobares** relient les points ayant la même pression.

Des isobares fermées concentriques entourent les zones de faible pression (**dépressions**) et les zones de forte pression (**anticyclones**).

Dépression
D (ou L)
« creux » de pression

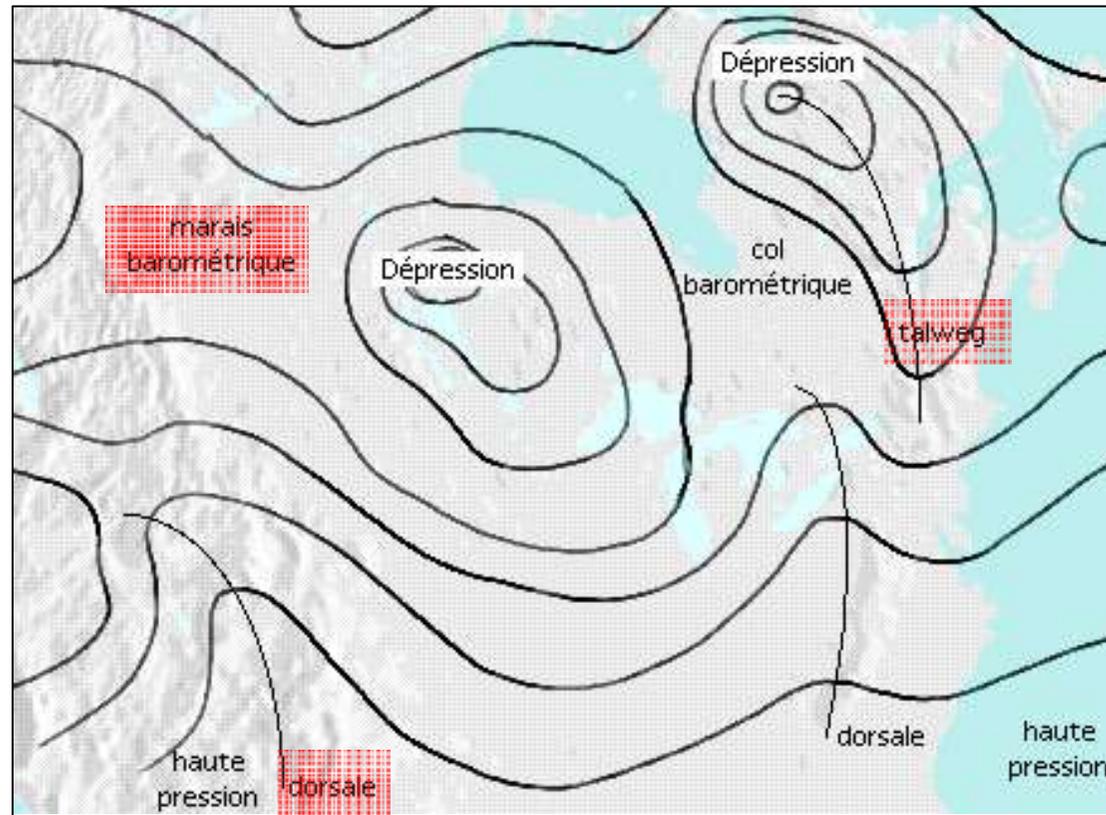
Anticyclone
A (ou H)
« bosse » de pression



Champ de pression

Par analogie avec une carte en relief, on parle de :

- **Dorsale** : pour une « crête » de hautes pressions prolongeant un anticyclone.
- **Talweg** : pour un « creux » de pressions en forme de vallée, prolongeant une dépression.
- **Marais barométrique**, pour une zone étendue où la pression varie peu.



Vents et champ de pression (1)

Si la terre ne tournait pas, les vents s'écouleraient en ligne droite depuis les hautes pressions (anticyclones) vers les dépressions.

Mais la terre est un immense gyroscope. Des **forces gyroscopiques** s'appliquent à tout ce qui se déplace à sa surface.

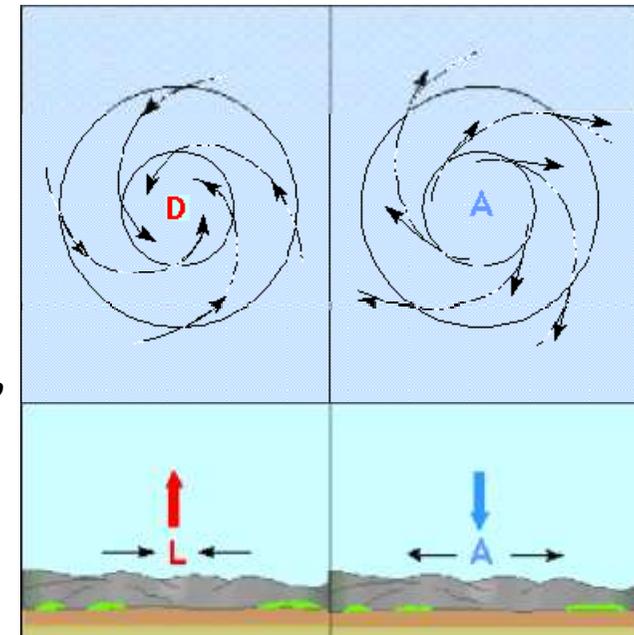
Ces forces (*appelées forces de **Coriolis***), même très faibles, suffisent à dévier les vents :

- vers la droite dans l'hémisphère nord,
- vers la gauche, dans l'hémisphère sud.

Le résultat est que, dans l'**hémisphère nord**, les vents s'enroulent :

- autour des **anticyclones**, dans le sens **horaire**,
- autour des **dépressions**, dans le sens **antihoraire**.

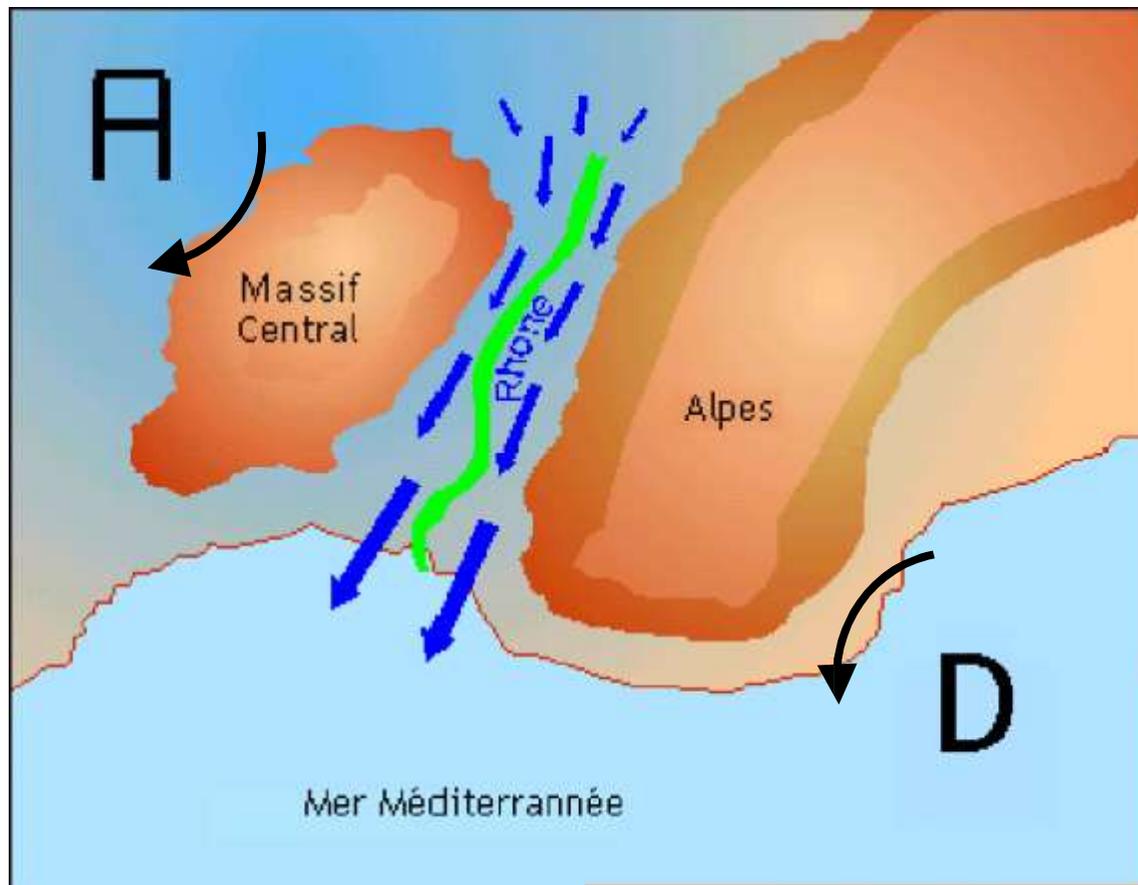
Le phénomène disparaît dans les régions équatoriales et s'inverse dans l'hémisphère sud.



Vents et champ de pression (2)

Exemple : Le Mistral.

Il souffle dans la vallée du Rhône lorsqu'un anticyclone est positionné sur le Massif Central et une dépression sur le golfe de Gênes.



Circulation atmosphérique globale (1)

Les **régions équatoriales** reçoivent **plus de chaleur** solaire que les régions polaires (car les **rayons solaires** y frappent le sol beaucoup **plus verticalement**).

Au-dessus du sol surchauffé, l'**air équatorial** s'échauffe et **s'élève** par convection (l'air chaud plus léger s'élève), créant une **dépression** au sol et un appel d'air en provenance des régions voisines (tropiques).

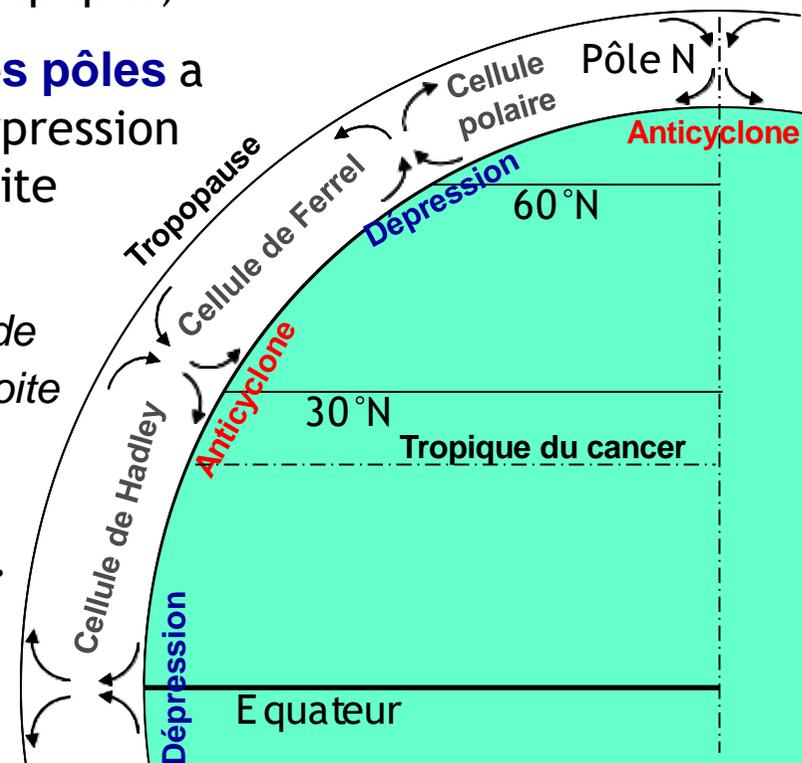


A l'inverse, **l'air refroidi au dessus des pôles** a tendance à **descendre**, créant une surpression au sol (**anticyclone**). Il s'échappe ensuite vers les régions voisines.

Du fait de la rotation de la terre (*forces de Coriolis*) les vents sont déviés (*vers la droite dans l'hémisphère nord*) et ne relient pas directement le pôle et l'équateur.

On constate que **3 cellules** se forment.

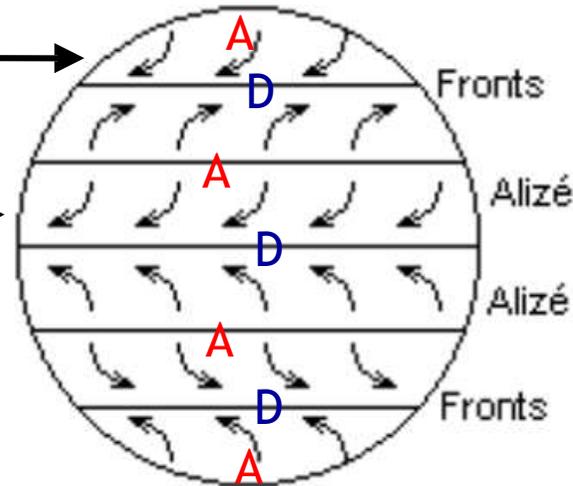
Des **dépressions** apparaissent vers **60°** de latitude et des **anticyclones** vers **30°**.



Circulation atmosphérique globale (2)

Les vents sont déviés vers la droite (*hémisphère nord*) ou vers la gauche (*hémisphère sud*). La circulation des vents qui en résulte au **niveau du sol** est la suivante :

- dans les **zones polaires**, les vents soufflent généralement **de l'est**.
- de même, **entre les tropiques** ils soufflent généralement **de l'est**. Ce sont des vents très réguliers appelés « **alizés** » (zone de convergence intertropicale).
- entre les deux zones, ils soufflent plutôt **de l'ouest** (vents d'ouest).

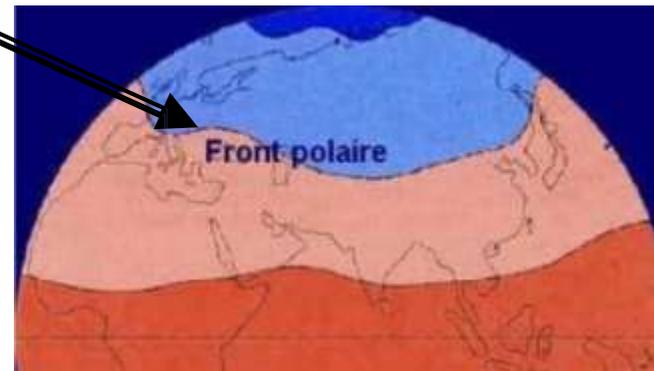


La frontière entre l'air polaire et l'air tropical s'appelle le « **front polaire** ». Ce front **ondule** et **fluctue**.

Pour nos régions, ces fluctuations accompagnent le déplacement :

- de la **dépression d'Islande**, et
- de l'**anticyclone des Açores**.

Elles sont la cause principale de la variabilité du temps.

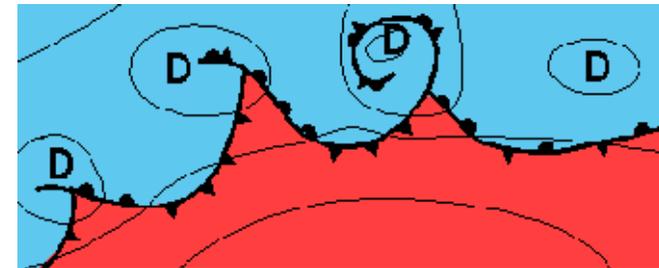


Les perturbations (1)

Les masses d'air polaire et tropical qui se rencontrent **ne se mélangent pas**.

Sous l'effet des forces de Coriolis, chaque **ondulation du front polaire** s'accroît et conduit à un mouvement circulaire avec **creusement d'une dépression**.

Dans ce mouvement, le front entre les deux masses d'air se déplace :



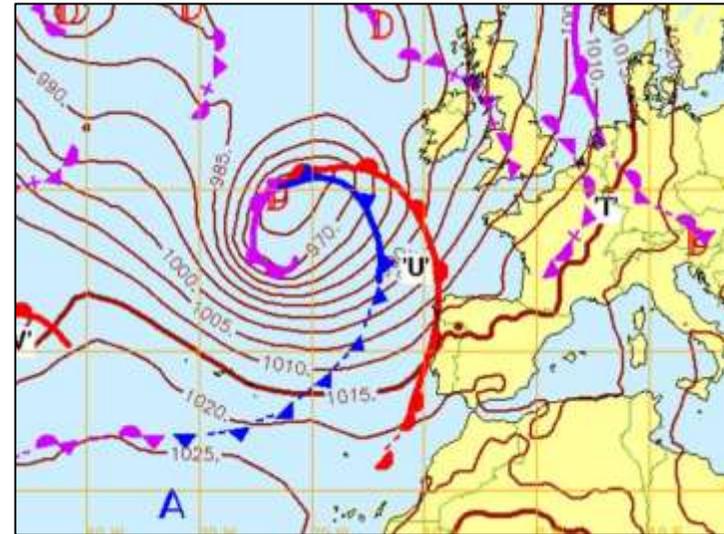
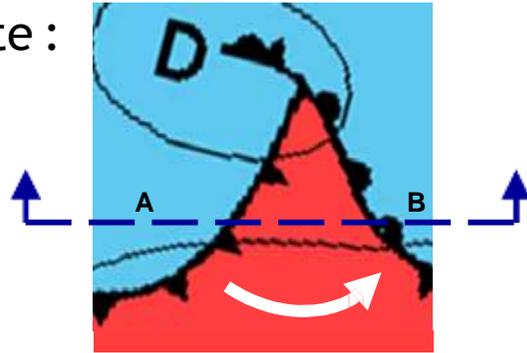
2- en arrière, l'air froid avance en direction de l'air chaud. Etant plus lourd, il soulève l'air chaud. C'est le **front froid**.



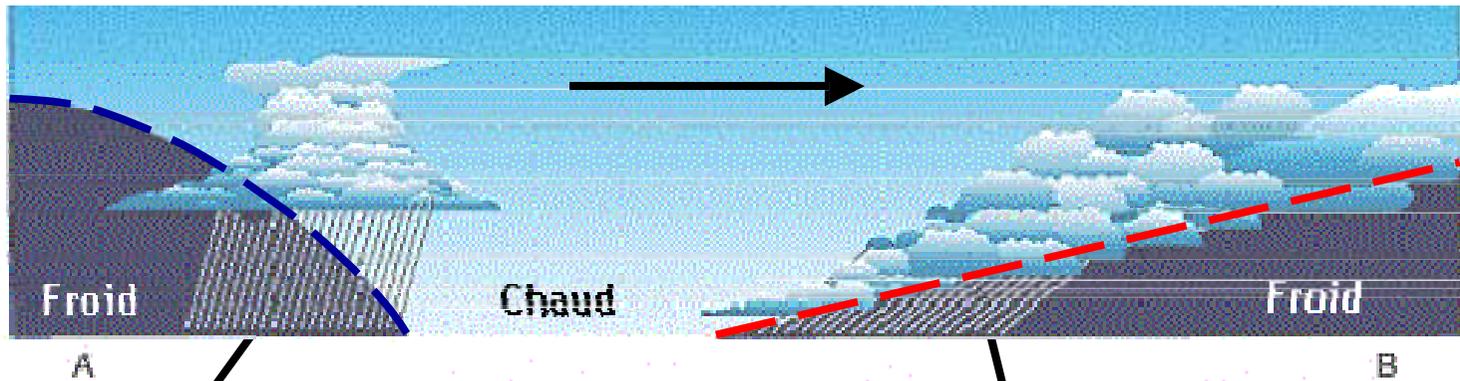
1- à l'avant de l'ondulation, l'air chaud avance en direction de l'air froid. Etant plus léger, il surmonte l'air froid. C'est le **front chaud**.

Les perturbations (2)

Carte :



Vue en coupe :

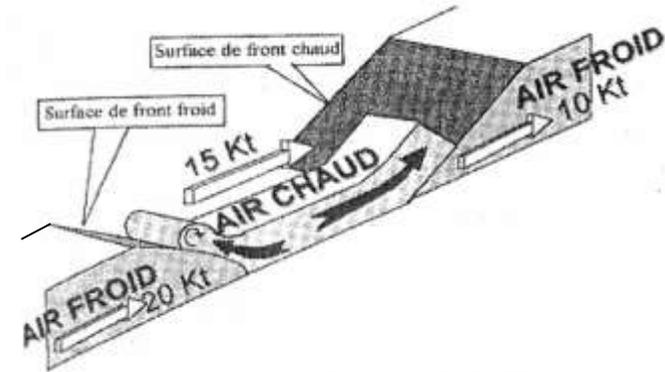


Front froid : L'air chaud est soulevé par l'air froid qui avance. Formation de nuages.

Front chaud : L'air chaud avance au dessus de l'air froid, en s'élevant. Formation de nuages.

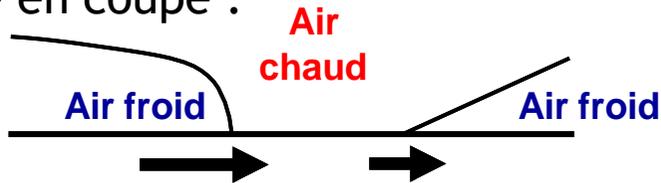
Les perturbations (3)

La masse d'air froid postérieure se déplaçant plus vite que la masse d'air froid antérieure, le **front froid** finit par **rattraper** le **front chaud**.

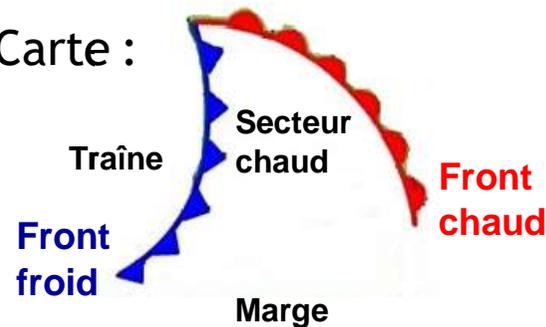


Il y a « **occlusion** » : la masse d'air chaud ne descend plus jusqu'au sol.

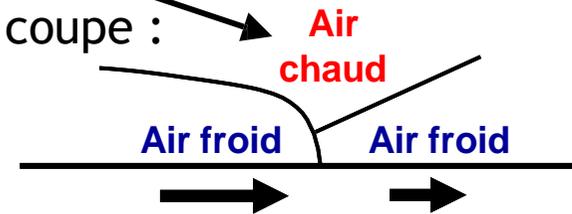
Vue en coupe :



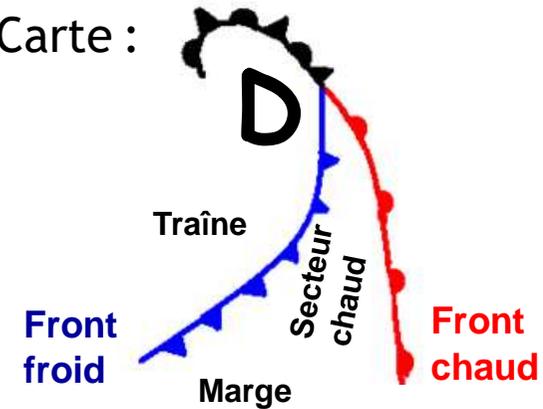
Carte :



Vue en coupe :

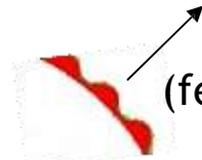


Carte :

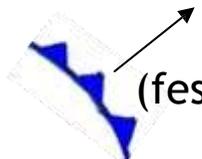


Représentation symbolique des fronts et vents

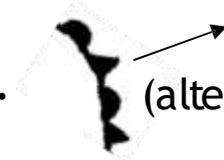
• **Fronts chauds** : (festons ronds)



• **Fronts froids** : (festons pointus)



• **Occlusions** : ... (alternance de festons ronds et pointus)



• **Vents** : Représentés par une flèche

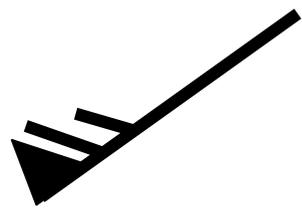
• Sens de la flèche = Direction où va le vent

• Valeur des ailettes de la flèche :

• 5 kt :

• 10 kt :

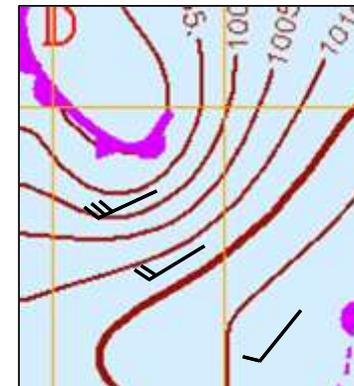
• 50 kt :



Exemple : Vent du 240° 65kt

Remarque : On désigne toujours le vent par la direction **d'où il vient**.

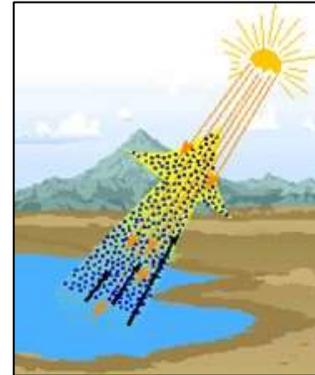
Plus les **isobares** sont **resserrées**, plus le **vent** est **fort** (car le moteur du vent, c'est la différence de pression).



Les nuages (1)

Les nuages se forment de deux façons :

- **apport de vapeur d'eau** (évaporation de l'eau en provenance d'un lac ou de la mer).

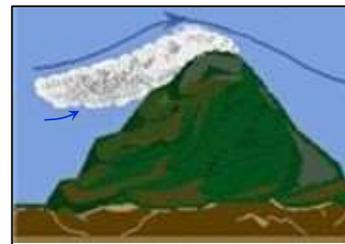


- **refroidissement** :

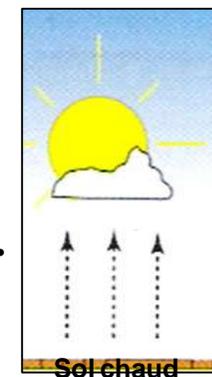
- rayonnement (ex : brouillard).
La nuit, le sol perd de la chaleur par rayonnement. Les couches d'air les plus basses se refroidissent.



- soulèvement par le relief.



- soulèvement convectif (cumulus)
*Remarque : plus le sol est chaud, plus les **turbulences** sont fortes au sein de l'air ascendant.*



Les nuages (2)

Les nuages sont caractérisés par :

- Leur **altitude** (haute altitude - moyenne altitude - basse altitude)^{***}.

**** Remarque : Certains nuages occupent les 3 altitudes (cumulonimbus, nimbostratus).*

- La **stabilité** ou l'**instabilité** de la masse d'air :
 - air stable → nuages type « **stratus** »,
 - air instable → nuages type « **cumulus** ».

Brume et brouillard :

- La **brume** est caractérisée par une **visibilité comprise entre 1 et 5 km**.
- Le **brouillard** est caractérisé par une **visibilité < 1 km**.

Les nuages (3)

Nuages de **haute** altitude (> 20000 ft) :

- **Cirrus (Ci) :**

Filaments de faible épaisseur en "**virgules**", souvent à l'avant-garde d'une perturbation.



- **Cirro-cumulus (Cc) :**

Couches de nuages blancs composées de petits éléments.
On parle d'un **ciel "moutonné"** .



- **Cirro-stratus (Cs) :**

Filaments de faible épaisseur en "**voiles**" formant "**halo**".



Les nuages (4)

Nuages de moyenne altitude (entre 6000 ft et 20000 ft) :

- **Alto cumulus (Ac) :**

- Stables: nappes ou couches grises avec des éléments en forme de **galets**.
- Instables: bourgeonnements en flocons, annonceurs d'orage.



- **Altostratus (As) :**

Couches de nuages gris en **nappes stables continues**.
Givrage et turbulence modérée.



Les nuages (5)

Nuages de **basse** altitude (< 6000 ft) :

Stratocumulus (Sc) :

Nuages de turbulence en **bancs** ou individualisés, blancs ou gris. Turbulence modérée, givrage faible à modéré.



Stratus (St) :

Couches nuageuses **stables**, grises très étalées. Visibilité réduite. Givrage léger.



Cumulus (Cu) :

Importants nuages aux contours très délimités, souvent en "**chou-fleur**".
Faciles à éviter, très turbulents.
Courants ascendant sous le nuage, descendant autour.
Evoluent parfois vers le Cb via le TCu.



Les nuages (6)

Nuages des **3 étages** :

Nimbostratus (Ns) :

Nuages à développement **vertical et horizontal** à base sombre, générateur de pluies continues ou de neige. Visibilité réduite, givrage fort.



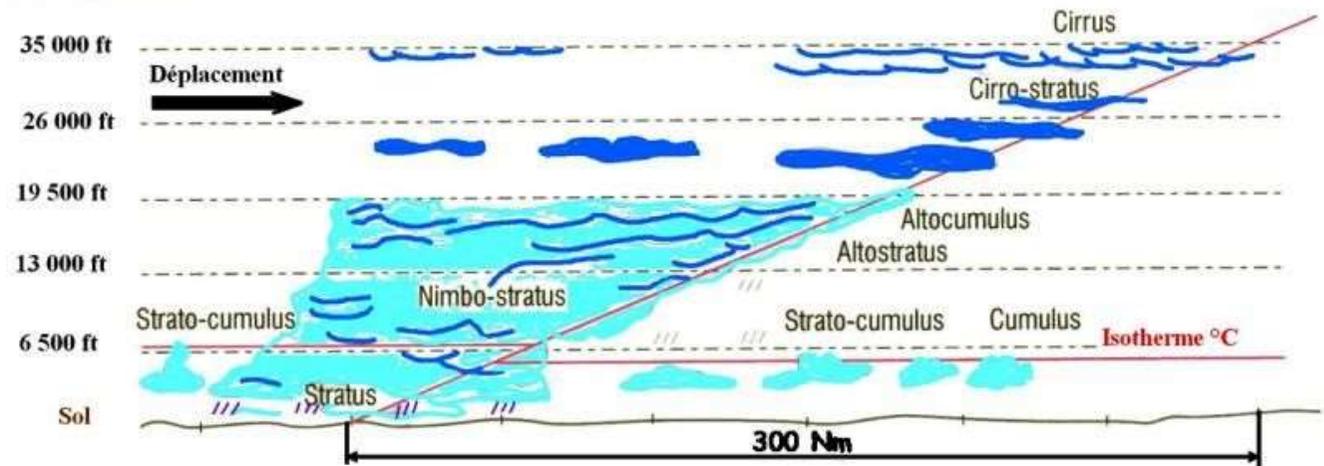
Cumulonimbus (Cb) :

Importants nuages à fort développement vertical (jusqu'à 15 km parfois). Souvent en forme d'**enclume**. Très dangereux: turbulence sévère, pluie, neige, grêle, orage. cisaillement de vent aux abords. **A éviter.**

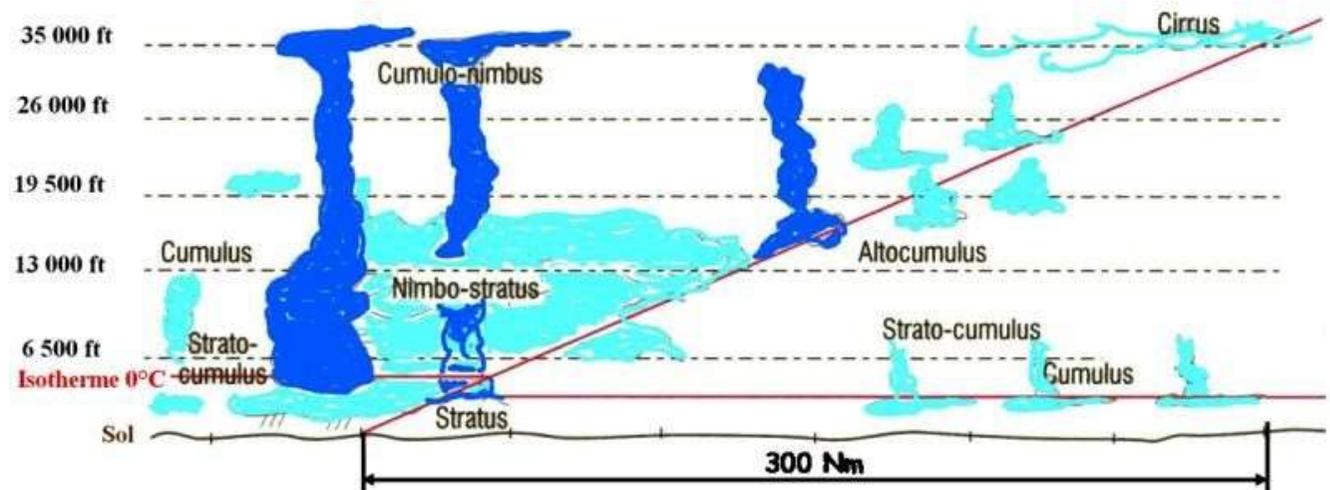


Les nuages (7)

Nuages typiques d'un **front chaud stable** :

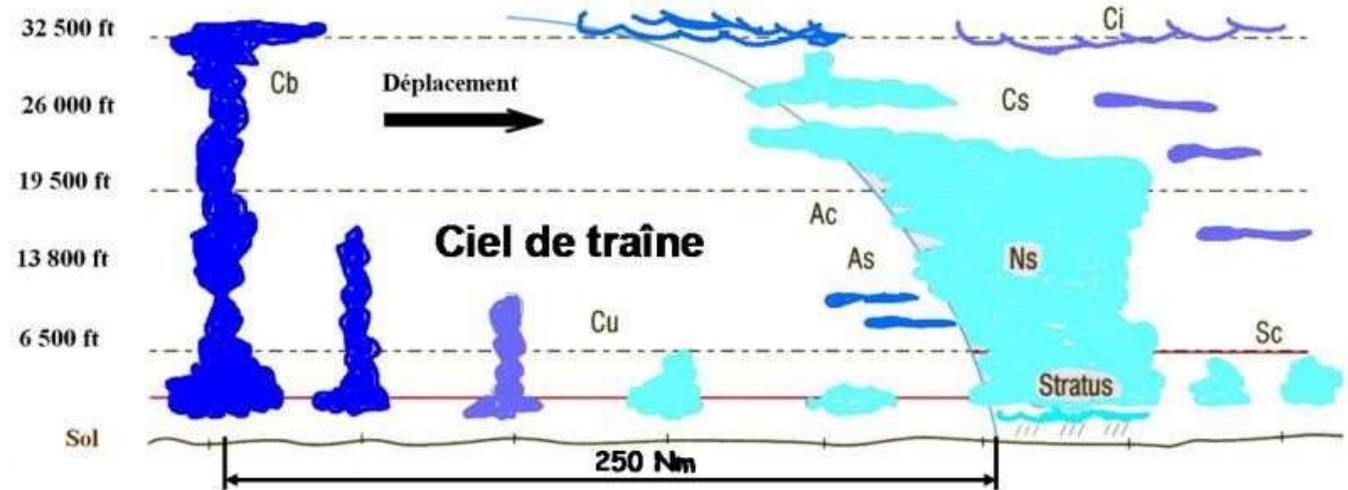


Nuages typiques d'un **front chaud instable** :

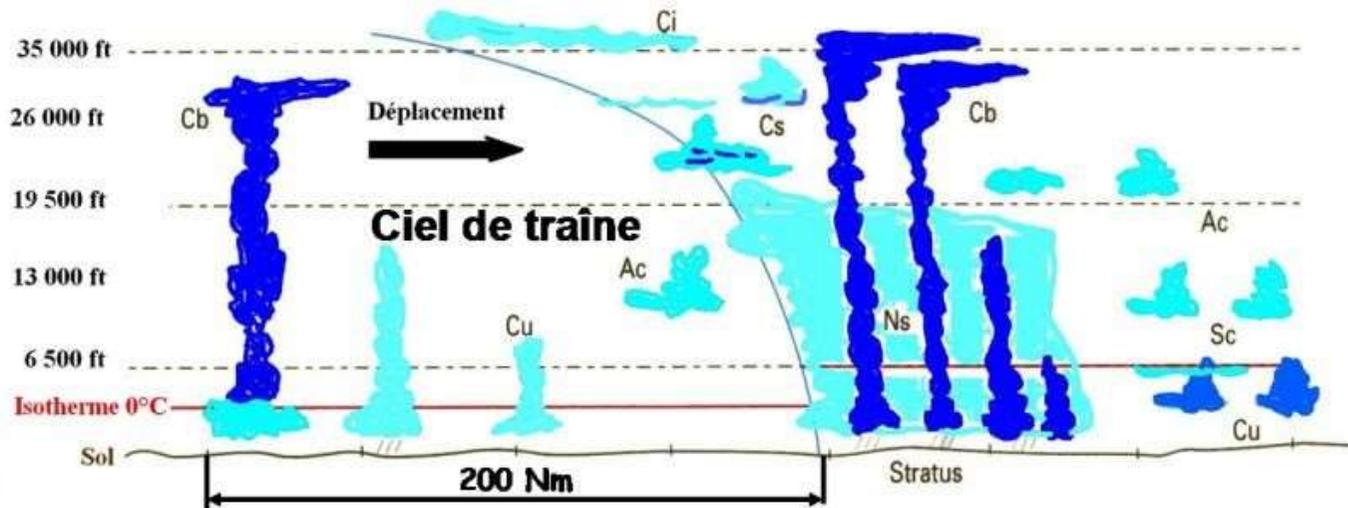


Les nuages (8)

Nuages typiques d'un **front froid stable** :



Nuages typiques d'un **front froid instable** :



Brise de mer / brise de terre

• Brise de mer :

Le jour, le sol devient plus chaud que la mer.

Une ascendance se forme au dessus du sol.

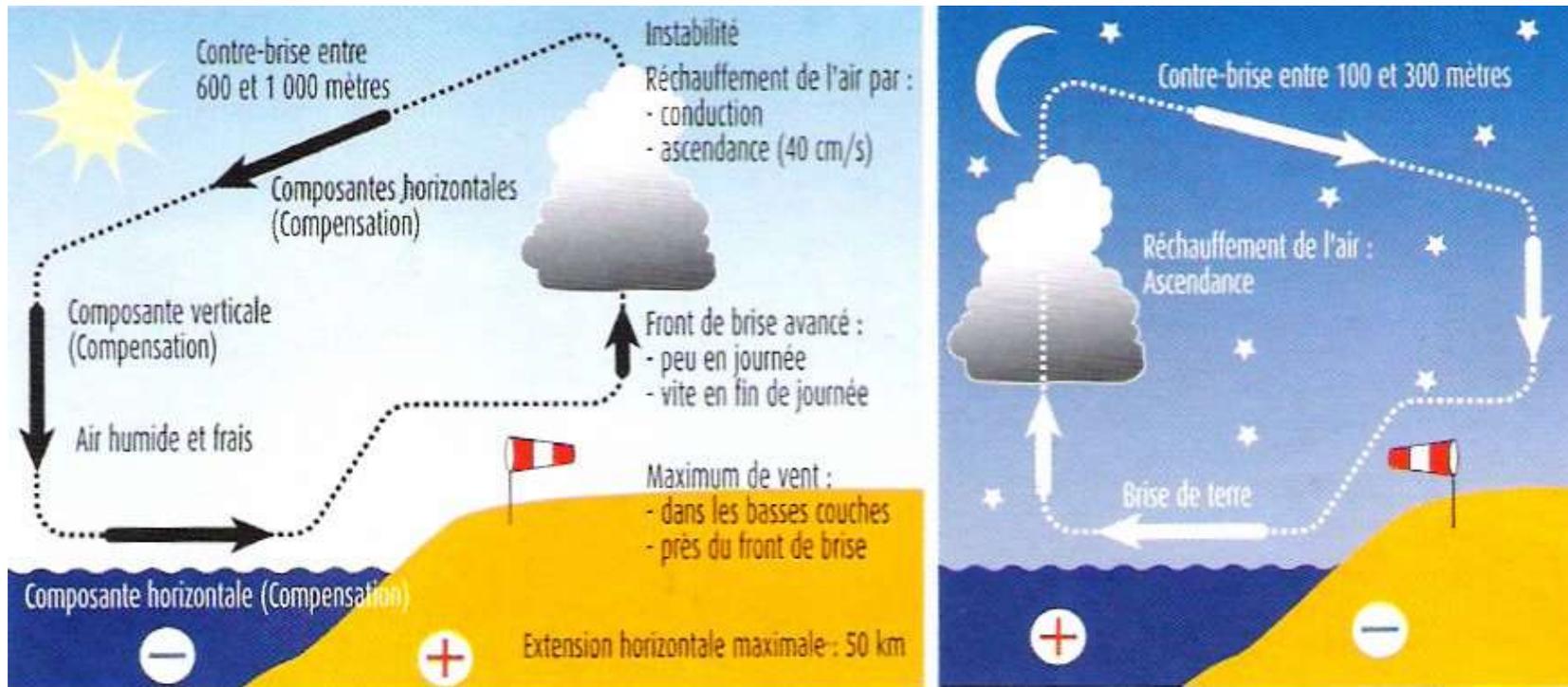
La brise souffle de la mer vers la terre

• Brise de terre :

La nuit, le sol se refroidit plus vite que la mer.

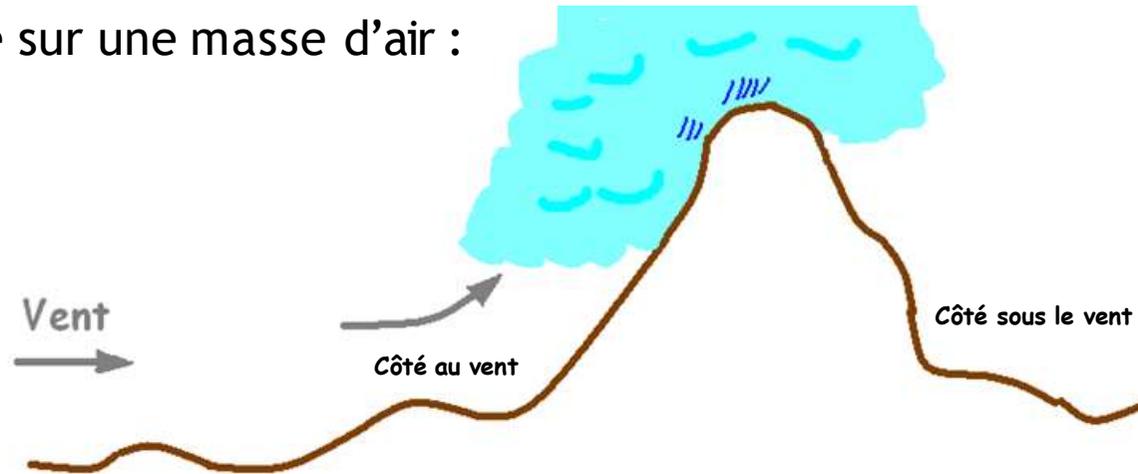
Une ascendance se forme au dessus de la mer.

La brise souffle de la terre vers la mer.



Effet de foehn

Effet d'un obstacle sur une masse d'air :



Sur le **versant au vent**, l'air humide s'élève et se refroidit. Des nuages, puis des **précipitations** apparaissent sur ce versant. L'air **se débarrasse d'une partie de son humidité**.

Sur le **versant sous le vent**, l'air descend et se réchauffe. Il devient de plus en plus **sec et chaud**.

Exemple : Lorsque le mauvais temps sur les Pyrénées vient d'Espagne, une partie du Sud-ouest de la France bénéficie d'un temps sec et relativement chaud.

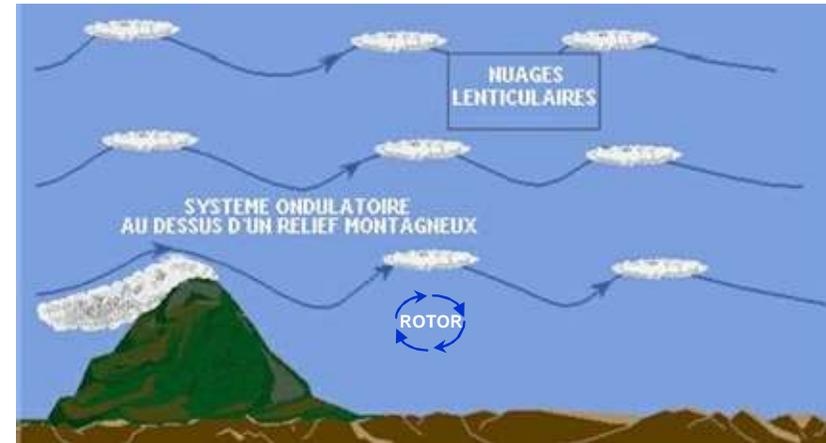
Action du relief sur le vent

La présence du **relief** entraîne des perturbations sur le vent, loin après le passage du relief.

L'écoulement en altitude subit des **ondulations**.

Des nuages **lenticulaires** (en forme de lentille) peuvent apparaître en haut des ondulations.

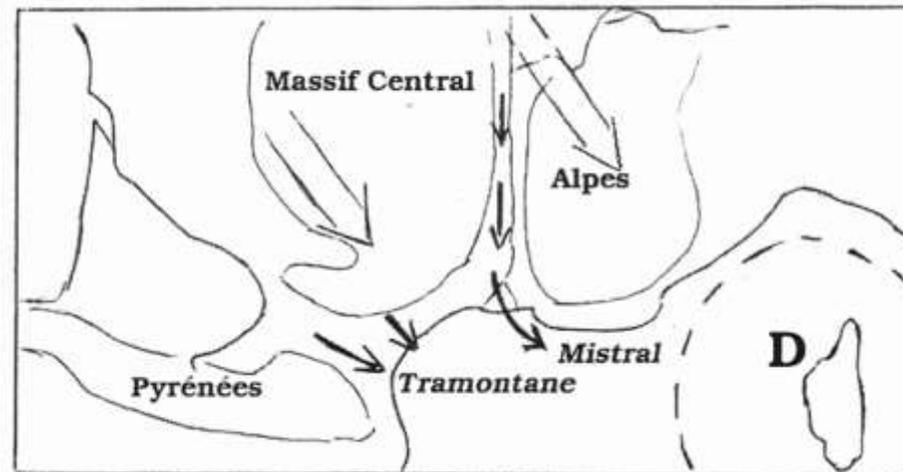
A basse altitude, les perturbations entraînent des **turbulences** et peuvent prendre la forme de « **rotors** » (très turbulents) avec inversion locale de la direction des vents.



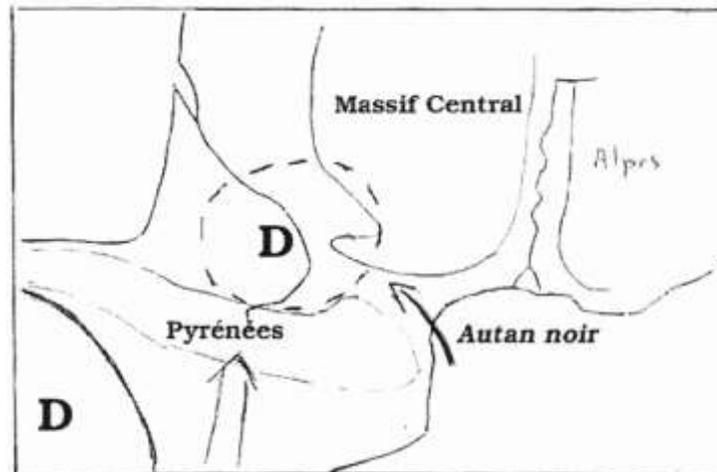
Les vents régionaux en France

Ce sont des vents liés à la configuration locale (relief, vallées) et à une situation météorologique particulière.

- **Mistral et Tramontane :**

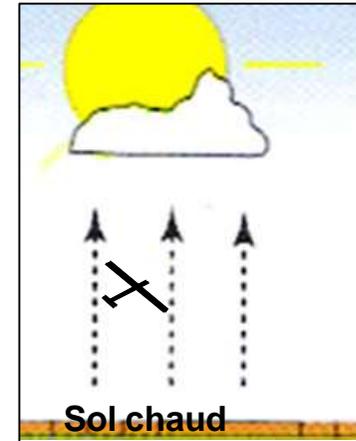


- **Autan noir :**

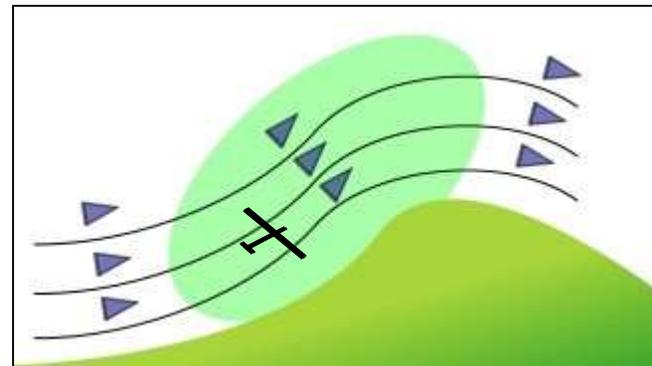


Les conditions favorables au vol à voile

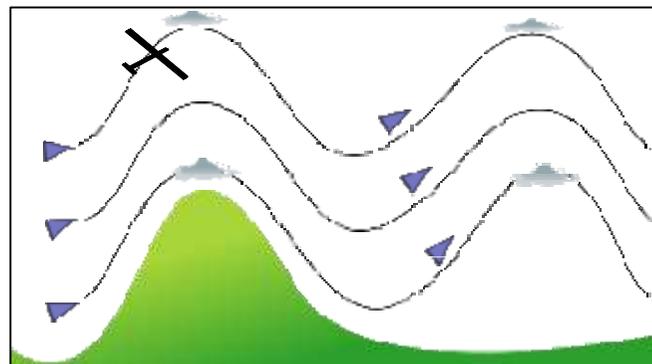
- **Ascendances thermiques** (convection) :



- **Vol de pente :**



- **Vol d'onde :**

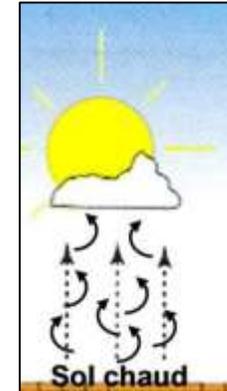


Les phénomènes dangereux (1)

1- Les turbulences :

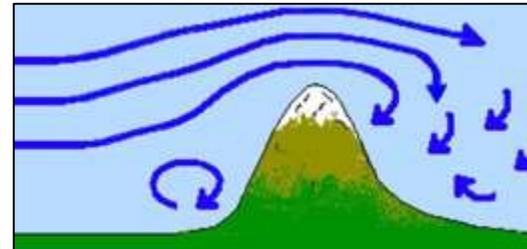
- **Turbulences thermiques** :

Dues à l'échauffement du sol, elles rendent le vol **inconfortable** et peuvent conduire à **réduire la vitesse** pour éviter d'endommager la cellule de l'aéronef.
(**plage jaune** de l'anémomètre **interdite**)



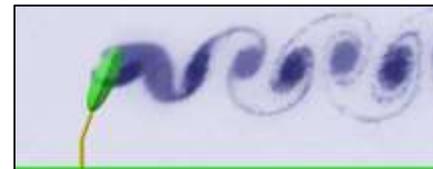
- **Turbulences dynamiques ou de relief** :

Lorsqu'il y a du vent l'écoulement d'air, en passant sur un **relief**, devient **tourbillonnaire** et peut générer des **courants rabattants très dangereux**.



Même en l'absence de grand relief, la turbulence dynamique peut exister, en fonction de la **rugosité du sol**.

(forêts, terrain accidenté, ...).

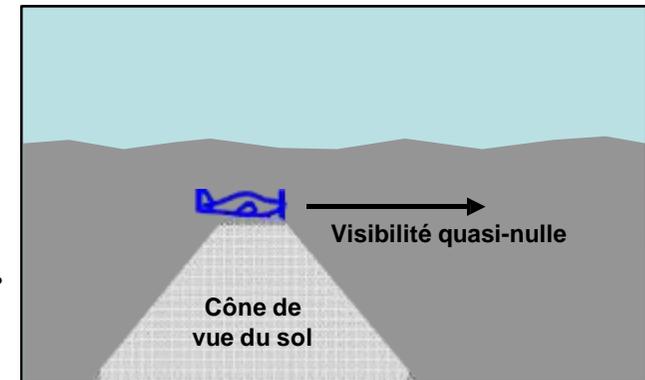


Les phénomènes dangereux (2)

2- Les précipitations :

- La **pluie** peut réduire fortement la visibilité.
 - *s'il s'agit d'une averse dans un ciel de traîne, il est facile de la contourner.*
 - *dans un front actif, il n'en est pas de même.*
- La **neige**, quand elle est très faible, réduit la visibilité à 2 ou 3km. Une **averse de neige** peut la réduire à **quelques mètres**.

3- La brume (visibilité comprise entre 1 et 5km) : Elle est constituée de **poussières** ou de **fines gouttelettes d'eau** en suspension dans l'air. La zone de visibilité est limitée à un **cône** restreint.



4- Le brouillard (visibilité inférieure à 1km) : Il peut se former :

- par **rayonnement** : refroidissement du sol pendant la nuit, en présence d'air humide.
- par **advection** : arrivée d'une masse d'air chaud et humide sur un sol froid.

Les phénomènes dangereux (3)

5- Les orages : Ils sont associés au **cumulonimbus**.

- Sous un cumulonimbus le **vent** est **extrêmement irrégulier**. Les variations du vent en direction et en vitesse représentent un **danger majeur** (en particulier lors des phases de décollage et d'atterrissage).

- De **fortes turbulences** peuvent être rencontrées aux alentours du cumulonimbus (*jusqu'à plusieurs kilomètres*).

- La **pluie** peut être très violente et **réduire la visibilité** à quelques centaines de mètres. De la **neige** peut également être rencontrée.

- La **grêle** peut endommager fortement les aéronefs.



- La **foudre** est une décharge électrique qui peut frapper un avion en vol. Un **puissant courant électrique** parcourt alors l'avion. Moyennant certaines **précautions***, les **dommages** restent **limités**.

(*Protection des **articulations** par des **tresses métalliques**, protection des peaux en **matériaux composites** par un fin **grillage métallique** en surface et par des dispositifs de **continuité électrique**, **blindage des câblages**, etc...).



Les phénomènes dangereux (4)

6- Le givrage : Dans certaines conditions, de **l'eau liquide** présente dans l'atmosphère peut **se transformer en glace** au contact de la **surface extérieure d'un aéronef**. Cette glace peut s'accumuler rapidement sur les parties les plus exposées (**bords d'attaque, pointe avant, pare-brise, tube de Pitot, sondes de pression et de température, pales d'hélice, lèvres d'entrée d'air des turboréacteurs, etc...**).

L'accumulation de glace a 2 effets dangereux :

- Une **déformation des profils** aérodynamique entraînant une **forte dégradation des performances** de l'aéronef.
- Un **alourdissement** de l'aéronef.

Certains aéronefs sont protégés par des dispositifs de **dégivrage** ou d'**antigivrage** des parties exposées :

- Réchauffage **électrique** ou à **air chaud**,
- Ecoulement d'**alcool**,
- **Boudins gonflants** pour briser la glace,...

Les aéronefs non protégés doivent **impérativement éviter les conditions givrantes**.



L'information météo pour l'aéronautique (1)

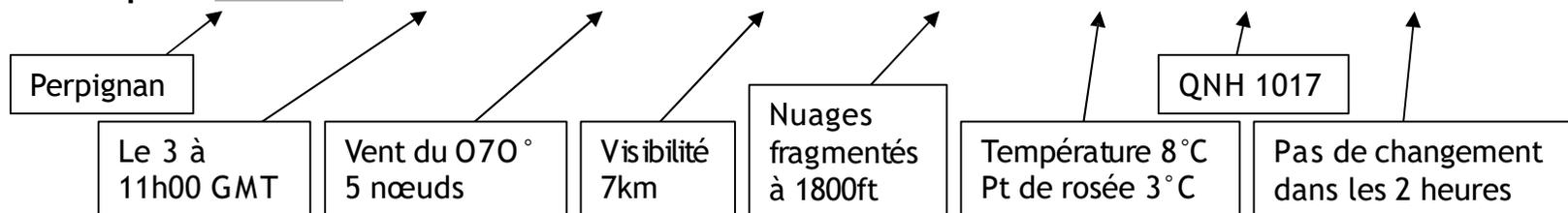
Rappel : Pour les vols hors du circuit d'un aérodrome et pour tous les vols IFR, l'action préliminaire au vol doit comprendre l'étude attentive des **bulletins et prévisions météorologiques** disponibles les plus récents.

Divers **moyens** sont à la disposition du pilote pour analyser la situation météo avant le vol. Les plus courants sont :

- Les messages **d'observation METAR** (*METeorological Aerodrome Report*). Ils donnent :

- le code OACI de l'aérodrome d'observation
- la date et l'heure d'observation
- le vent
- la visibilité horizontale
- les nuages
- la température et le point de rosée
- des remarques éventuelles.

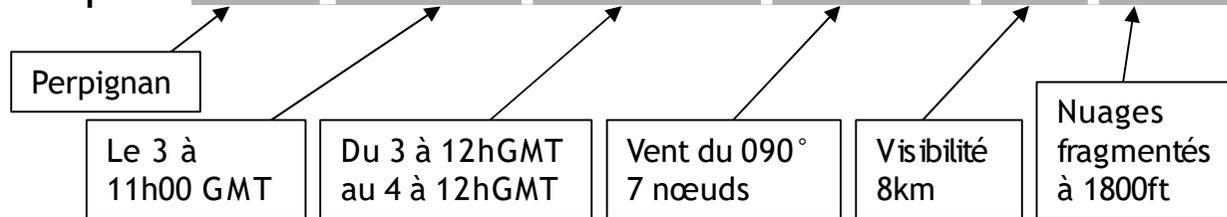
Exemple : **LFMP 031100Z 07005KT 7000 BKN018 08/03 Q1017 NOSIG =**



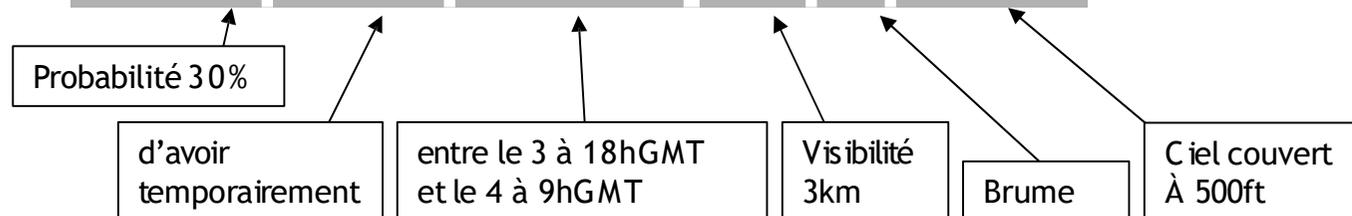
L'information météo pour l'aéronautique (2)

- Les messages de **prévision TAF** (*Terminal Aerodrome Forecast*). Ils donnent la prévision pour une période donnée (6 heures ou 24 heures), pour un aéroport donné.

Exemple : **LFMP 031100Z 0312/0412 09007KT 8000 BKN018**



PROB30 TEMPO 0318/0409 3000 BR OVC005



BECMG 0410/0412 12015G25KT =

