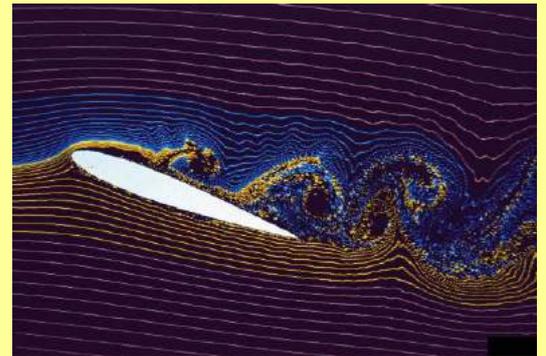
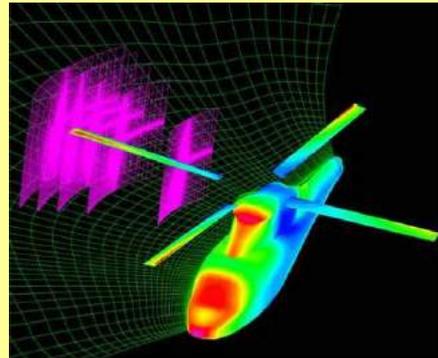


# Aérodynamique et



# mécanique du vol

## Illustrations page de couverture

- *F18 Hornet passant le mur du son*
- *Tourbillon marginal derrière un Cessna d'épandage*
- *F16 X (expérimental). Recherches aérodynamiques de la NASA*
- *Test en soufflerie d'une reproduction du "Flyer" des frères Wright*
- *Modélisation du comportement d'un hélicoptère (image thermique des contraintes)*
- *Modélisation d'écoulement autour d'un profil (ici décrochage à forte incidence)*

## Plan du cours

Plan du cours .....	2
I - Introduction .....	2
II - L'aérodynamique .....	3
III - Aérodynamique de l'aile .....	6
1 - Principales caractéristiques des ailes .....	6
III - Aérodynamique de l'aile .....	8
2 - Forces exercées sur une aile .....	8
III - Aérodynamique de l'aile .....	14
3 - Profil et caractéristiques dynamiques d'une aile .....	14
III - Aérodynamique de l'aile .....	17
4 - La polaire .....	17
IV - Mécanique du vol .....	19
1 - Les axes... le contrôle de la trajectoire .....	19
IV - Mécanique du vol .....	24
2 - Les principales phases du vol .....	24
V - Décollage atterrissage .....	29
VI - Le centrage .....	32
Équilibre de l'avion, stabilité, manœuvrabilité .....	32
VI - L'AEROSTATION .....	35
VII- LE VOL SPATIAL .....	38



Quels sont les paramètres qui peuvent influencer sur le vol ?

- L'âge du pilote est-il à prendre en compte ?
- Et l'air ? Quel est son rôle ? Comment peut-il porter un avion ? Pourquoi ?
- Que sont les forces qui s'exercent sur l'avion ? Et plus particulièrement sur les ailes ...
- Au fait, c'est quoi, une force ?

Nous allons déblayer tout ça !

### Qu'est-ce qu'une force ?

Une force est une action mécanique exercée par un objet A (ou un ensemble d'objets) sur un objet B.

### Une force se traduit par des effets :

- de déformation (toujours ! visible ou non : flexion d'une aile, compression d'un amortisseur,...)
- de modification d'un mouvement (accélération, ralentissement, mise en virage, décrochage...)

### Il y a 2 types de forces : les forces ...

- à distance, qui peuvent être d'origine ...

\* gravitationnelle

- $P = m.g$

\* électrique

- entre des charges + et -, mais ... hors sujet ici !

\* magnétique

- entre des aimants (N et S), ou des aimants et des métaux, ... hors sujet aussi !

\* électronucléaire

- là, on est dans l'atome et on s'égaré grave ! ... hors sujet toujours !!

### - de contact

- là où il y a "contact" (attention : le contact peut ne pas être visible, ex avec l'air).

Si vous avez défini votre "système à étudier" (l'avion par exemple) celui-ci sera en contact avec l'air (en vol) mais aussi parfois avec le sol (atterrissage, décollage).

### Les forces de pression... un cas particulier.

L'air n'agit pas en un point mais sur des surfaces. Son action répartie se traduit par une pression (force par unité de surface  $p = F/S$ ) qui peut varier selon la zone étudiée. On pourra malgré tout, par commodité de représentation, définir une force résultante de l'ensemble de toutes ces forces.

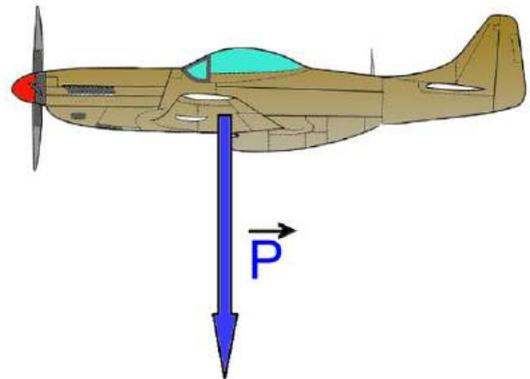
## Représentation d'une force

On représente les forces par un vecteur qui est défini par 4 caractéristiques :

- une direction
- un sens
- une intensité
- un point d'application

### Exemple du poids

- Verticale
  - Vers le bas
  - 45 000 N (\*)
  - Le centre de gravité (\*\*)
- (\*) le vecteur sera représenté à l'échelle afin de le comparer quantitativement aux autres forces.  
(\*\*) ou centre d'inertie



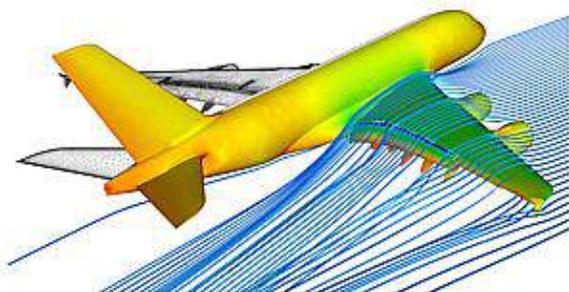
## II - L'aérodynamique



### I. L'aérodynamique... présentation.

L'aérodynamique est une discipline qui considère des objets aux prises avec des écoulements. Comme telle, elle constitue un chapitre de la **mécanique des fluides**.

Que ce fluide soit de l'air, c'est à dire un gaz, ou qu'il soit un liquide, ne change rien à la manière d'aborder les choses, et les lois qui s'appliquent aux fluides gazeux sont les mêmes que celles qui s'appliquent aux fluides liquides.



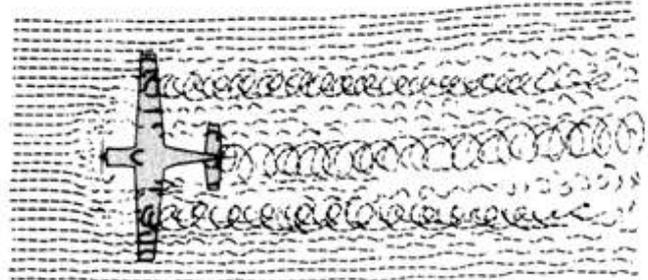
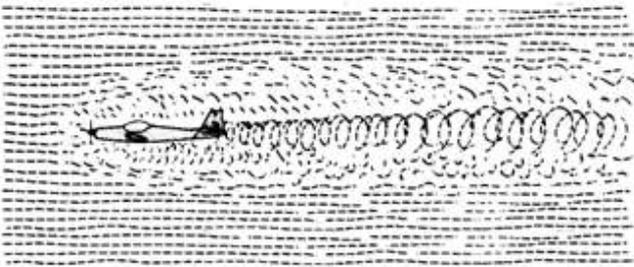
Numerical flow simulation on an Airbus A380. The pressure distribution during flight can be seen on the fuselage and the flow distribution on the right wing. The left wing shows what is known as a "calculation mesh", which serves as basis for the simulation.

Simplement, si le fluide est un liquide on parlera d'hydrodynamique alors que s'il s'agit d'un gaz on parlera d'aérodynamique.

L'aérodynamique est une science expérimentale qui puise ses fondements dans l'expérimentation sur le réel

## II. Les deux types d'écoulements

L'air et l'eau sont tous deux des fluides, mais, contrairement à l'eau, l'air est invisible ce qui rend le vol difficile à comprendre. Quand un bateau avance, on peut voir dans l'eau sa lame d'étrave, son sillage et tous les remous qu'il provoque ; quand un avion vole dans les airs, on dirait que rien ne se passe, et pourtant il se produit une perturbation encore bien plus grande que dans l'eau.

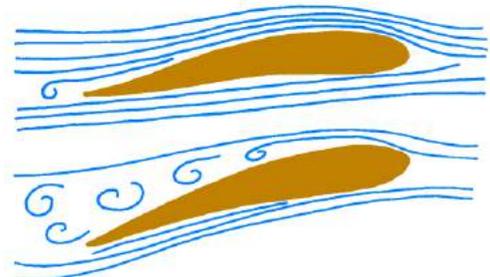


Ce que l'on verrait si l'air était visible

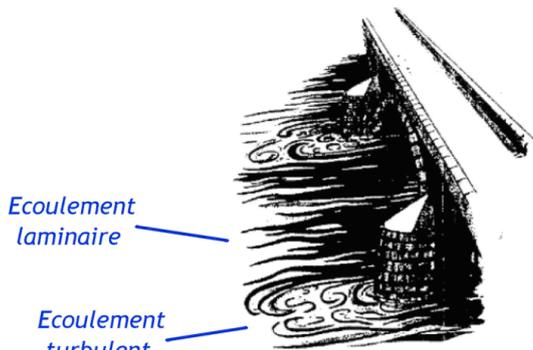
Les deux types d'écoulements :

- **Laminaire**, c'est-à-dire non perturbé (en haut) et
- **Turbulent** (en bas).

**La laminarité est favorable aux bonnes performances aérodynamiques des avions.**



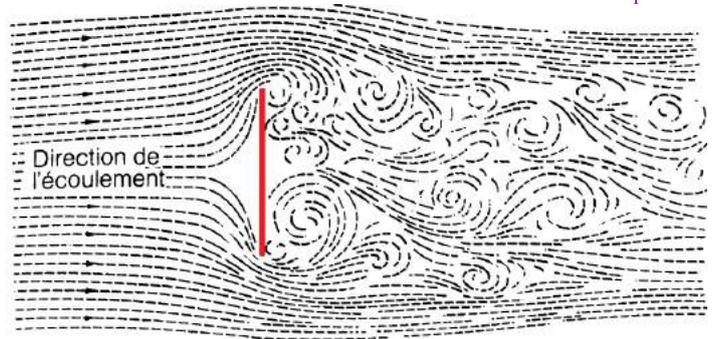
Visualisation d'un écoulement de fluide autour d'un profil.



Écoulement laminaire

Écoulement turbulent

Écoulement de l'eau sous un pont.

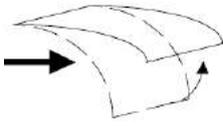
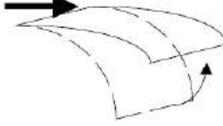
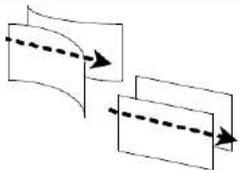


Écoulement de fluide autour d'une plaque.

Avec la pratique, on arrive à développer la faculté de « voir » l'air lorsqu'il s'écoule sur des corps de différentes formes. Cette faculté est aidée en observant l'écoulement de l'air dans lequel on a introduit de la fumée, ou l'écoulement de l'eau (*dont la plupart des propriétés sont identiques à celles de l'air*).

## III. Les actions de l'air en écoulement

Lorsque l'air s'écoule autour d'un objet, ou qu'un objet se déplace dans l'air, des forces aérodynamiques se créent sur l'objet. Pour s'en rendre compte il suffit de réaliser les trois petites expériences décrites ci-dessous avec des demi-feuilles A4 :

<p>En soufflant sous la feuille</p>  <p>Prenez la feuille et maintenez-la à l'horizontale en la pinçant à deux doigts par les extrémités d'une largeur. La feuille plie sous son poids. Soufflez alors en dessous de la feuille.</p>	<p>En soufflant sur la feuille</p>  <p>Répétez la même expérience en soufflant sur le dessus de la feuille de façon à ce que l'air tangente la surface.</p>	 <p>Prenez deux demi feuilles A4 en les tenant par un coin et séparez les de quelques centimètres. Écartez leurs extrémités vers l'extérieur de sorte qu'elles ne se touchent pas. Soufflez entre les deux.</p>
---	--	---

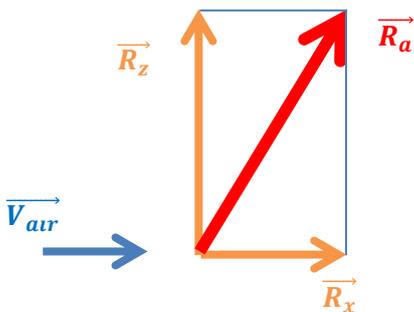
La première expérience met en évidence la capacité de l'air à pousser un obstacle qu'il rencontre par sur une des faces de celui-ci.

La deuxième expérience met en évidence un effet d'aspiration. Lorsque l'air est mis en mouvement sur la surface supérieure de la feuille, il voit sa ( accélération de l'écoulement d'air). La pression de l'autre face étant supérieure, la feuille est alors aspirée vers le haut.

La troisième expérience confirme l'analyse de la seconde : l'air soufflé entre les feuilles étant à une pression plus faible que celui à l'extérieur, les feuilles se rapprochent.

#### IV. Représentation de l'action de l'air

D'une manière générale, en aérodynamique les actions de l'air se décomposent en deux forces :

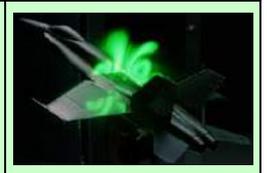


- une force parallèle à la vitesse de l'air et de même sens, la traînée
- une force perpendiculaire à la vitesse de l'air, la portance

La somme vectorielle de ces deux forces constitue des forces aérodynamiques  $\vec{R}_a$

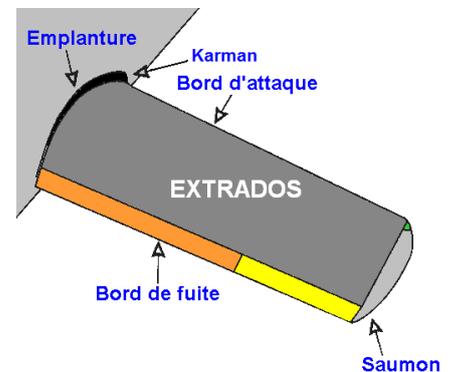
## III - Aérodynamique de l'aile.

### 1 - Principales caractéristiques des ailes



#### I. Les différentes parties de l'aile

- : Bord avant de l'aile.
- : Bord arrière de l'aile.
- : Extrémité de l'aile reliée au fuselage. L'écoulement de l'air à cet endroit peut être optimisé par un carénage appelé : le **karman**.
- : Extrémité libre de l'aile
- : Surface supérieure de l'aile, comprise entre le bord d'attaque et le bord de fuite.
- : Surface inférieure de l'aile, comprise entre le bord d'attaque et le bord de fuite..



#### II. Caractéristiques géométriques d'une l'aile

La géométrie d'une aile se définit en fonction de plusieurs éléments:

- : par définition la distance entre les deux extrémités de l'aile.



*L'envergure ⇒*

- (ou surface d'aile) est la surface de la projection horizontale du contour des ailes. Cela correspond à la totalité de la voilure, y compris celle qui traverse le fuselage :

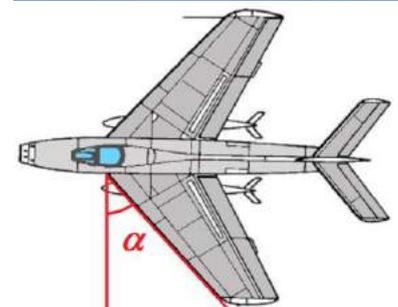


*Surface alaire ⇒*

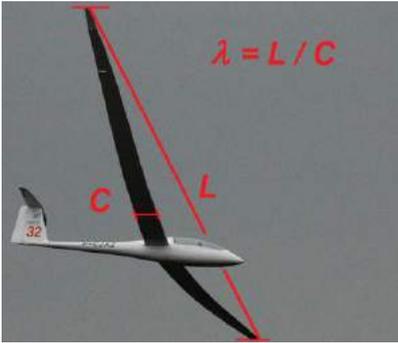


- : angle formé par la perpendiculaire de l'axe longitudinal de l'avion et le bord d'attaque de l'aile; elle peut être positive, négative ou neutre.

*Flèche (définition simplifiée BIA – simple compréhension) ⇒*



- La  $C_x$  est le rapport **Portance/Surface alaire**. (est exprimée en newtons par mètre carré ( $N.m^{-2}$ )) Elle est aussi égale au rapport : **Poids de l'avion/Surface alaire** si la portance est égale au poids de l'avion comme dans le cas du vol horizontal .

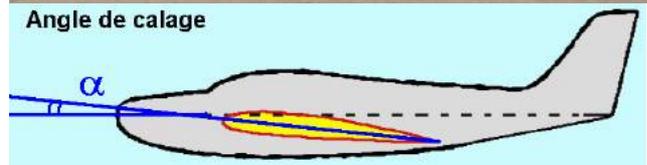


- $\lambda$  : en aérodynamique, l'allongement  $\lambda$  d'une aile se calcule en divisant le carré de l'envergure par la surface des ailes  $\lambda = \frac{L^2}{S}$  . Plus simplement c'est aussi le rapport de l'envergure par la longueur de la corde moyenne :  $\lambda = \frac{L}{C}$  même si la corde moyenne est parfois difficile à définir (Spitfire Concorde...).

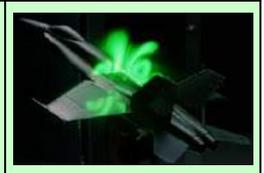
- Le  $\alpha$  : c'est l'angle formé par le plan des ailes et le plan horizontal; il peut être positif (comme sur ce DR 400 d'aéroclub), nul (chasseurs et avions d'acrobatie) ou négatif (certains chasseurs ou gros porteurs).



- $\theta$  : c'est l'angle entre la corde du profil d'emplanture et l'axe longitudinal de référence du fuselage, généralement horizontal à la vitesse de croisière.



- C'est un angle **figé par CONSTRUCTION**. Il est indépendant de l'orientation de l'appareil. En vol de croisière stabilisé, l'angle de calage est égal à l'angle d'incidence.
- Angle à ne pas confondre avec l'angle d'incidence.



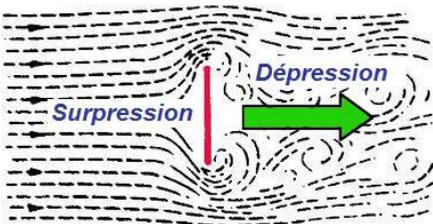
### I. Action de l'air sur une plaque. Résultante aérodynamique.

#### Vent relatif et résultante aérodynamique.

Si une surface plane est placée perpendiculairement à l'écoulement elle subit des forces dues à la pression exercée par l'air coté "au vent" et une aspiration (plus exactement une dépression), se traduisant elle aussi une force, cotée "sous le vent".

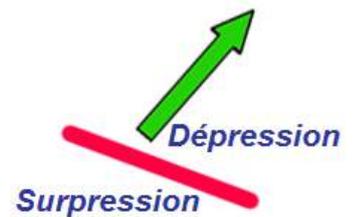
L'écoulement de l'air par rapport à la plaque génère ce que l'on appelle un "vent relatif".

Si nous inclinons cette plaque par rapport à l'écoulement, donc par rapport au vent relatif, la surpression et la dépression subsistent mais l'ensemble de forces générées change d'orientation...



Dans l'illustration proposée la plaque est poussée vers le haut et vers l'arrière.

Comme son nom l'indique, la **résultante aérodynamique** ( $\vec{R}$ ), rassemble en un seul vecteur l'ensemble des actions de l'air sur le profil en mouvement.



Pour un objet volant (avion) cette force permet la **sustentation dans l'air**...

**Manip** : ces effets peuvent facilement être mis en œuvre dans une voiture en mouvement (⚠) simplement en sortant la main et en changeant son inclinaison.

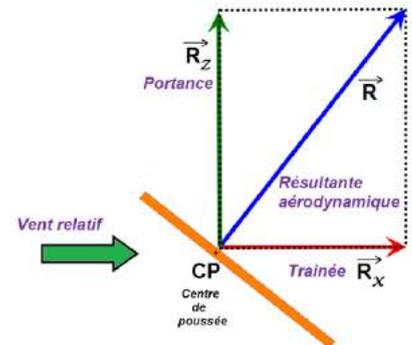
### II. Portance et traînée

#### Trainée et portance à partir d'une plaque...

Pour aider à la compréhension, le vecteur force ( $\vec{R}$ ) représentant la **résultante aérodynamique** peut être décomposée en deux ... une partie UTILE pour un objet volant : la **portance** ( $R_z$ ) perpendiculaire à l'écoulement et un mal nécessaire... : la **traînée** ( $R_x$ ) parallèle à l'écoulement.

$$\vec{R} = \vec{R}_z + \vec{R}_x$$

**Portance** et **traînée** sont respectivement positionnées perpendiculairement et parallèlement au vent relatif (schéma).



Ces forces, qui sont en réalité réparties sur toute la surface, peuvent se ramener vers un point d'application unique appelé le **centre de poussée** (CP).

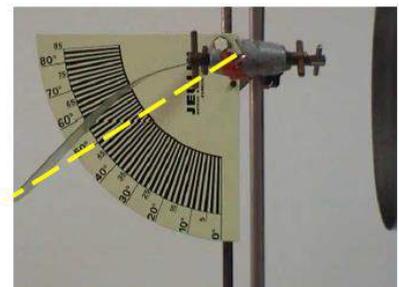
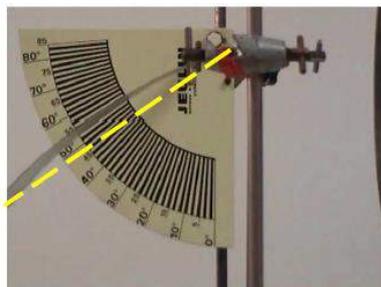
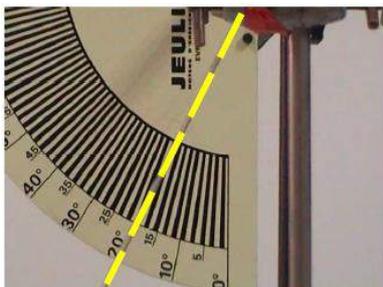
Pour une aile d'avion, la position du **centre de poussée** (CP) dépend du profil et de son orientation par rapport au vent relatif.

En outre, ce point se déplace en fonction de l'**angle d'incidence**.

### III. Étude de la Portance

#### Influence de la forme du profil

La manipulation ci-dessous permet d'observer l'écoulement de l'air sur une plaque plane et deux plaques incurvées.

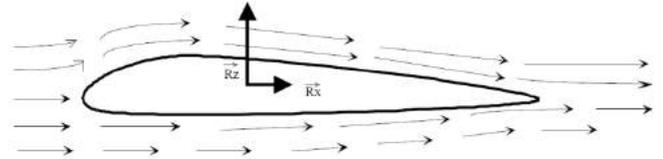


Les trois plaques sont placées dans l'écoulement d'air produit par une soufflerie. Les profils sont suspendus par un axe horizontal autour duquel ils peuvent pivoter librement.

On remarque que la plaque plane s'incline d'environ 20° par rapport à la verticale. Cette inclinaison résulte essentiellement de la déviation créée par le ralentissement de l'air sous la plaque.

Sur les plaques incurvées, on remarque que l'inclinaison augmente avec la cambrure du profil. La forme des plaques permet à l'air qui passe au-dessus de la plaque de se dévier vers le bas. Sa pression est plus élevée que celle de l'air qui passe en dessous. Il en résulte une force de pression verticale du profil.

L'écoulement de l'air autour des profils aérodynamiques est plus accéléré sur la surface (extrados) que sur la surface (intrados). Il en résulte une force de pression verticale orientée vers le haut (la portance). De même la pression sur l'avant du profil est plus élevée que celle sur l'arrière du profil. Il en résulte une force de pression vers l'arrière (la traînée).

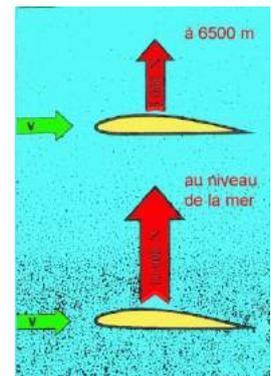
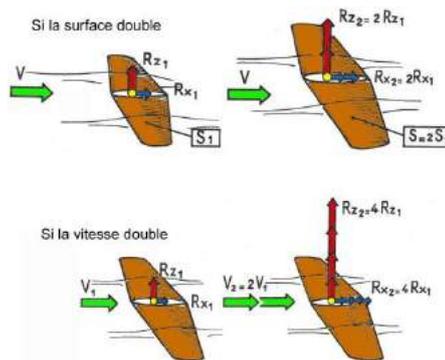


### Influence de la surface et de la vitesse

La portance d'un avion dépend de sa vitesse. Pour s'en rendre compte il suffit de penser au décollage. Afin d'obtenir une portance suffisante pour décoller, l'avion doit atteindre une vitesse minimale de sustentation.

Les études en soufflerie montrent que la portance ( $R_z$ ) est proportionnelle à la surface alaire ( $S$ ), qu'elle est proportionnelle au carré de la vitesse ( $V^2$ ) et qu'elle dépend (proportionnalité aussi) de la masse volumique de l'air ( $\rho$ ).

*On rappelle que la masse volumique (ou la densité) de l'air diminue avec l'altitude.*



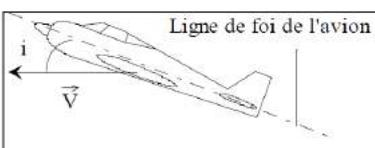
### Expérience en soufflerie :



On remarque que la masse  $m$  diminue lorsque la vitesse augmente. On en déduit que la portance est proportionnelle à la vitesse au carré.

### Influence de l'angle d'incidence

L'angle d'incidence est l'angle formé par la corde de l'aile et la direction de l'écoulement de l'air. Cet angle est d'une grande importance car il influence beaucoup sur la portance des ailes de l'appareil.

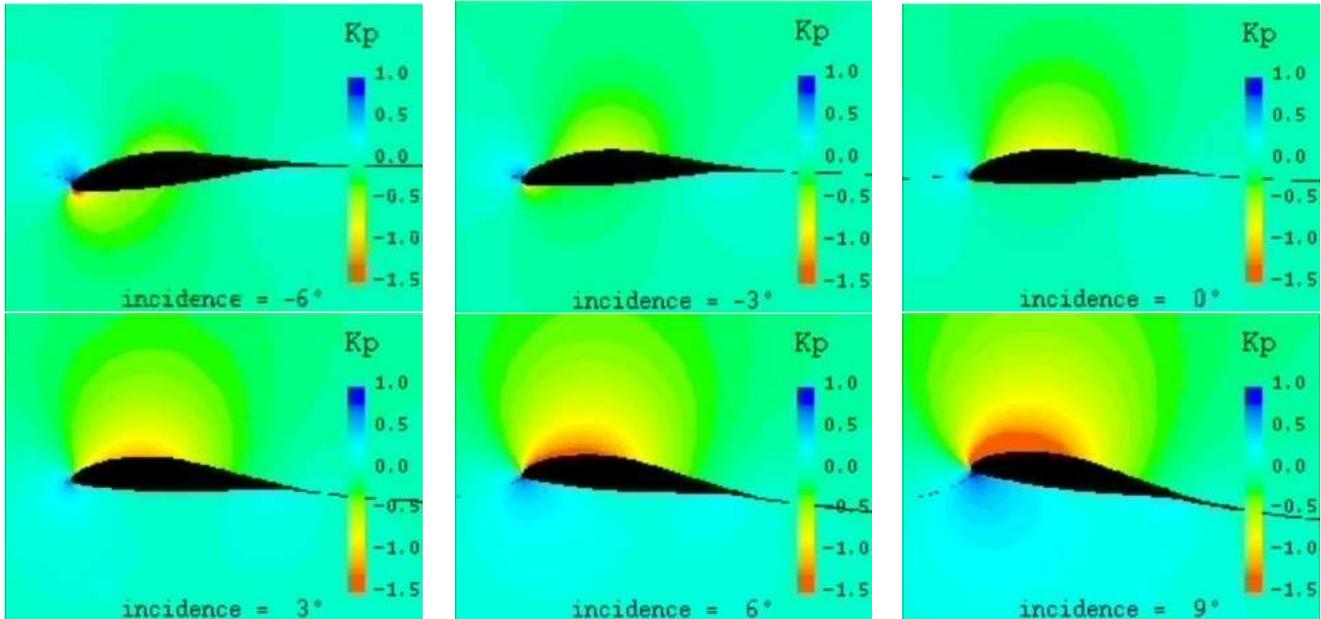
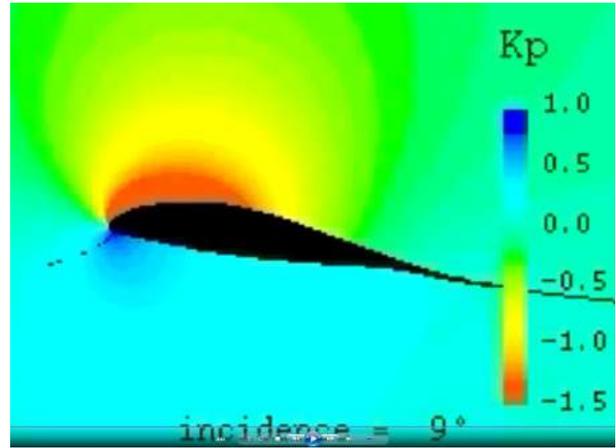


L'étude de l'évolution de la portance en fonction de l'incidence est primordiale dans la conception des avions. Pour voler en palier à une vitesse donnée la portance de l'avion doit compenser son poids. La vitesse étant fixée, l'incidence de vol se trouve également fixée. Pour un vol économique et confortable, il faut que l'incidence soit faible pour la vitesse de croisière.

L'image est issue d'un petit film : [portance.mov](#) dans lequel les couleurs permettent d'apprécier les pressions.

ICI, pour une incidence de 9° on observe :

- Une dépression importante (1500 kPa) sur le tiers avant de l'extrados
- Une forte surpression (1000 kPa) localisée au voisinage du bord d'attaque
- La séquence d'images ci-dessous montre les variations de pression pour des incidences de -6 à +9° par pas de 3°



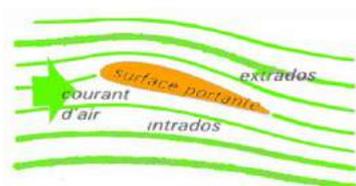
La simulation ci-dessus montre que pour une vitesse donnée, la portance

On constate qu'une incidence négative engendre une portance négative.

***DANGER :*** Si l'incidence dépasse une certaine valeur, la portance n'augmente plus mais chute très fortement :

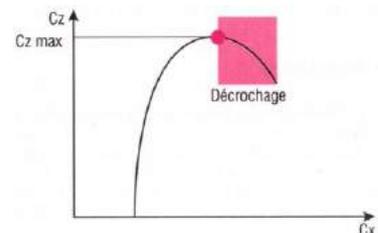
### Le phénomène de décrochage :

En vol normal, l'écoulement de l'air est laminaire sur les deux faces de l'aile, intrados et extrados. Les filets d'air collent au profil de celle-ci, et cela génère de la portance.



Le **coefficient de portance  $C_z$**  (et donc la portance) de l'aile augmente lorsque l'**angle d'incidence** augmente. Cependant, indépendamment de la vitesse de l'avion,  **$C_z$**  connaît un maximum, atteint pour un certain angle d'incidence (15 à 18° selon les profils).

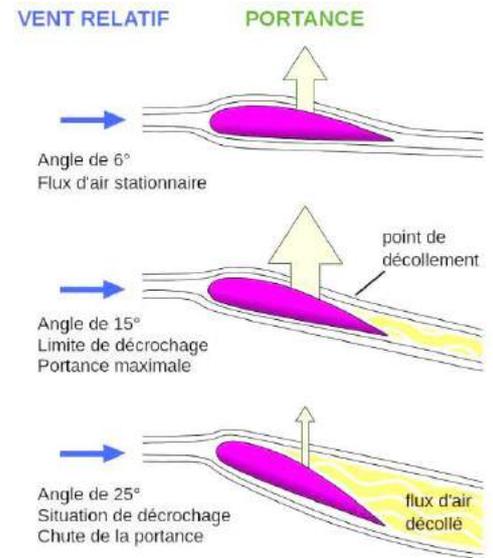
En effet, à partir de cette valeur, les filets d'air décollent de l'extrados et cela provoque une diminution franche de la portance.



Ainsi, au-delà de cet angle maximal d'incidence, la portance ne peut plus compenser le poids de l'avion, la condition essentielle du vol n'est plus remplie : l'aile (ou l'avion) décroche.



Cette situation arrive par exemple lorsque la vitesse diminue en deçà d'une certaine limite. Le pilote doit, pour maintenir la portance constante, compenser la diminution de vitesse en agissant sur un des autres paramètres pilotés : l'incidence. Il augmente donc l'incidence. Lorsque celle-ci dépasse l'incidence de portance maximale, le décrochage se produit : l'avion « s'enfonce ».



## IV. Étude de la traînée

### Quelques définitions

La **traînée** est la résistance rencontrée par un corps qui passe à travers un fluide.

Le **maître couple** (ou surface frontale) d'un objet est la surface qu'il présente au fluide. Autrement dit, c'est la surface projetée suivant la trajectoire du fluide sur un plan perpendiculaire à cette trajectoire.

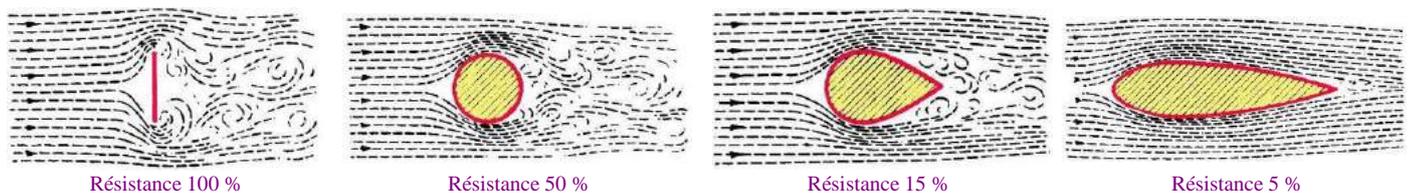
Un **corps fuselé** est un corps dont la forme particulière permet de réduire au minimum les remous et les mouvements tourbillonnaires. Il possède une bonne pénétration dans les fluides.

Les résultats des expériences en souffleries ont montré qu'il était possible de diviser en deux parties la traînée :

- 
- 

### La traînée de forme

Elle est liée à la forme du profil. Les différents profils engendrent des écoulements différents. Il se forme alors des tourbillons et les filets de l'écoulement ne sont plus lisses. La résistance, presque entièrement attribuable à la formation de tourbillons, est très grande.



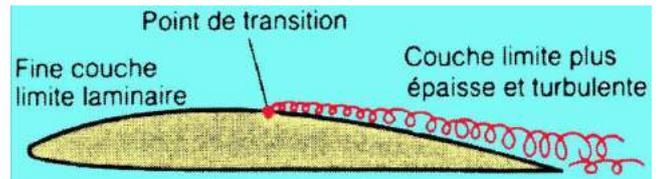
L'expérience ci-dessus montre que le profil en forme de goutte à la traînée la plus faible. Ceci explique que l'on a cherché pendant longtemps à s'en rapprocher pour les aéronefs.

### En conclusion,

Il est essentiel que la traînée de forme soit réduite au minimum sur toutes les parties de l'avion qui sont exposées à l'air. On ne peut y parvenir qu'en leur donnant une forme telle que l'écoulement de l'air autour d'elles soit le plus lisse possible, c'est-à-dire une forme fuselée.

## La traînée de frottement ou traînée de sillage

Elle provient de la résistance à l'écoulement de l'air sur une paroi. Elle est liée au décollement des filets d'air sur l'arrière du profil. Plus les filets se décollent et plus la traînée de sillage est importante. Elle est influencée par la vitesse et l'incidence de vol de l'avion.



## La traînée induite

Elle est due à la

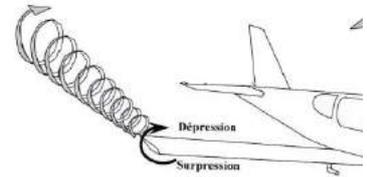
l'extrados. En effet, l'air de l'intrados qui est celui de l'extrados à tendance à

saumons d'aile. Cela crée des tourbillons que l'on appelle

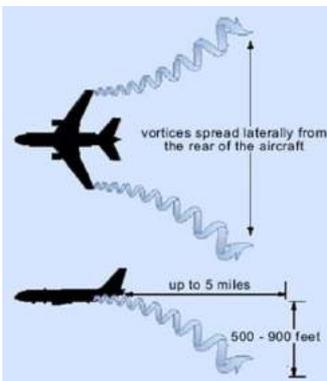
entre l'intrados et

par rapport à

vers le dessus au niveau des



Ces tourbillons s'élargissent au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'appareil.



L'avion laisse donc derrière lui deux tourbillons qui engendrent des perturbations d'autant plus importantes que l'avion est de grande taille. Ceux-ci peuvent s'avérer très dangereux lorsqu'on passe dans le sillage d'un autre appareil, notamment en phase de décollage ou d'atterrissage. C'est la raison pour laquelle lorsque deux avions se suivent dans les phases de décollage ou d'approche sur un aéroport, ils doivent s'espacer en fonction de leurs poids respectifs (car le poids est représentatif de la taille de l'avion et donc de la puissance des tourbillons marginaux qu'il engendre).



## Influence de la vitesse :

Les expérimentations en soufflerie montrent que pour un profil donné,

## Influence de l'incidence :

De la même manière, on met en évidence que

Contrairement à la portance, elle augmente sans cesse avec l'incidence.

Il en résulte que dans les phases à grande incidence, la traînée importante peut nécessiter de maintenir une puissance importante au moteur. D'autre part en cas de nécessité d'accélérer (remise de gaz à l'atterrissage) il est important de prévoir une phase initiale d'accélération assez lente. Ceci n'est réellement sensible que sur les avions rapides ou sur les avions lourdement chargés (incidence assez importante en approche).

Il est parfois préférable de pousser le manche en avant afin de diminuer rapidement l'incidence pour accélérer plus vite et obtenir plus rapidement une portance permettant de remonter.

## Influence de l'allongement :

L'expérience montre que plus l'allongement de l'aile est

, moins la traînée

est importante.

En fait l'allongement influence la traînée induite dans des proportions importantes.

La recherche d'une traînée minimale et d'une portance optimale passe parfois par des ailes de grand allongement.

C'est le cas pour

et pour



Toutefois les ailes de grand allongement entraînent une plus grande inertie de l'avion au gauchissement et donc une agilité moins bonne.

**La présence de Winglets permet de diminuer la traînée induite de façon significative.**



### Expression de la portance $R_z$ et de la traînée $R_x$ .

Les deux composantes qui nous intéressent (**portance** ( $R_z$ ) et **traînée** ( $R_x$ )) dépendent du fluide ( $\rho$ ), de la vitesse ( $V$ ), de la surface alaire ( $S$ ) et des performances aérodynamiques ( $C_x$  et  $C_z$ ).

En vol rectiligne horizontal stabilisé on obtient les expressions suivantes :

$$R_z = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot C_z \quad \text{et} \quad R_x = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot C_x$$

- $\rho$  est la masse volumique de l'air (exprimée en  $\text{kg/m}^3$ ). Quand la température augmente,  $\rho$  diminue. De ce fait l'air "porte moins" quand il fait chaud. La masse volumique de l'air diminue aussi avec l'altitude, donc la portance diminue avec l'altitude.

*A l'inverse, la traînée diminue avec l'altitude et la chaleur.*

- $S$  est la surface alaire de l'avion (exprimée en  $\text{m}^2$ )
- $V$  est la vitesse du vent relatif (exprimée en  $\text{m.s}^{-1}$ ), c'est-à-dire la vitesse de l'avion par rapport à l'air (et non par rapport au sol).
- $C_x$  et  $C_z$  sont des coefficients (sans dimension) qui sont spécifiques à un avion et à sa voilure pour un angle d'incidence considéré. Ils sont en général déterminés expérimentalement dans une soufflerie.

$C_x$  est le **coefficient de traînée** et  $C_z$  est le **coefficient de portance**.

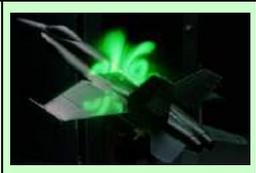
La portance et la traînée se créent sur chaque partie d'aile. Pour simplifier leurs représentations on les ramène en un point d'application unique appelé

Lors de différentes phases du vol il se déplace sur l'aile en fonction de la vitesse et de l'incidence.

Plus ses déplacements sont importants et plus l'avion sera délicat à piloter.

Les variations de la portance sont quant à elles appliquées en un autre point que l'on appelle

. Il se situe entre le quart (25%) et le tiers (33%) de la corde en partant du bord d'attaque.



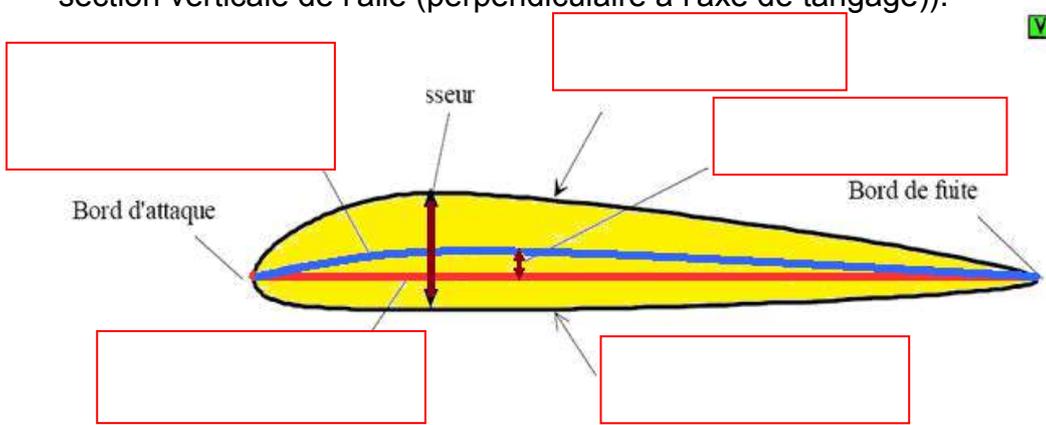
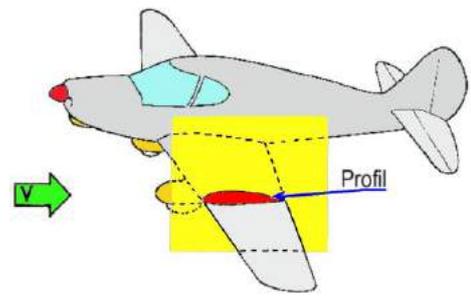
**I. Caractéristiques géométriques d'un profil d'aile**

**Rappels**

Le **bord d'attaque** est le point le plus en avant sur le profil ; le **bord de fuite** est la partie arrière (dans le sens de la marche) et amincie du profil optimisée pour diminuer la traînée aérodynamique ; l'**extrados** correspond au dessus de l'aile et l'**intrados** au dessous.

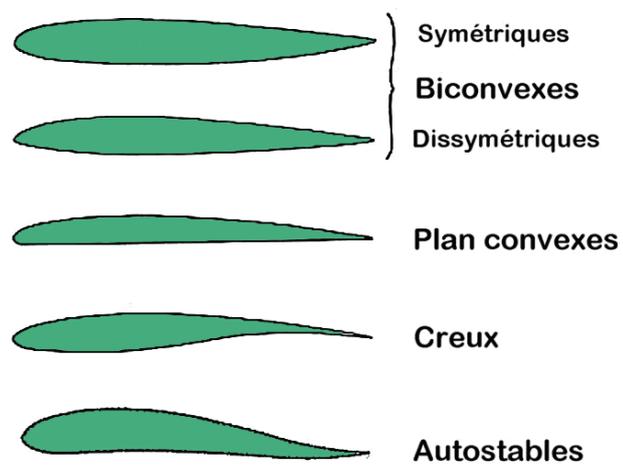
**Autres définitions à connaître**

- **Profil de l'aile** : contour géométrique obtenu par une section verticale de l'aile (perpendiculaire à l'axe de tangage).



- **Corde ou corde de référence** : segment, parallèle à l'axe de roulis (ou à l'axe longitudinal de l'avion) qui joint le bord d'attaque au bord de fuite. Sa longueur varie le long de l'aile.
- **Profondeur** : longueur de la corde de référence.
- **Ligne moyenne ou corde moyenne** : ligne située à égale distance de l'extrados et intrados.
- L'**épaisseur** maximale d'un profil d'aile se situe vers le tiers avant. Mais l'indication intéressante est l'épaisseur relative.

- **Épaisseur relative** : c'est le rapport, exprimé en pourcentage, entre l'épaisseur maximale du profil et de la corde.  $Ep\% = \text{épaisseur} / \text{profondeur (corde)}$
- **Profil** : vue en coupe de l'aile, on en distingue quatre types :



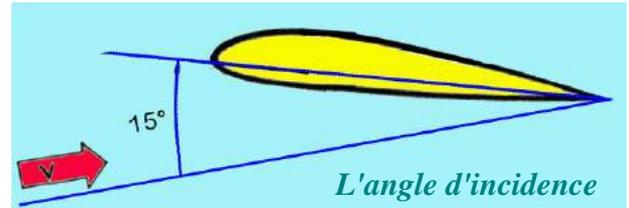
- **Biconvexe** (symétrique ou non)  
Avions ou planeurs de voltige
- **Plan convexe**
- **Creux** : Planeurs
- **Autostable** : ailes volantes

Ils ici sont classés du moins stable vers le plus stable.

- **Flèche ou cambrure** : distance entre la corde et la ligne moyenne mesurée perpendiculairement à la corde. La cambrure varie du bord d'attaque au bord de fuite le long d'un profil dissymétrique et est nulle pour un profil symétrique.

## II. Caractéristiques dynamique d'une d'aile.

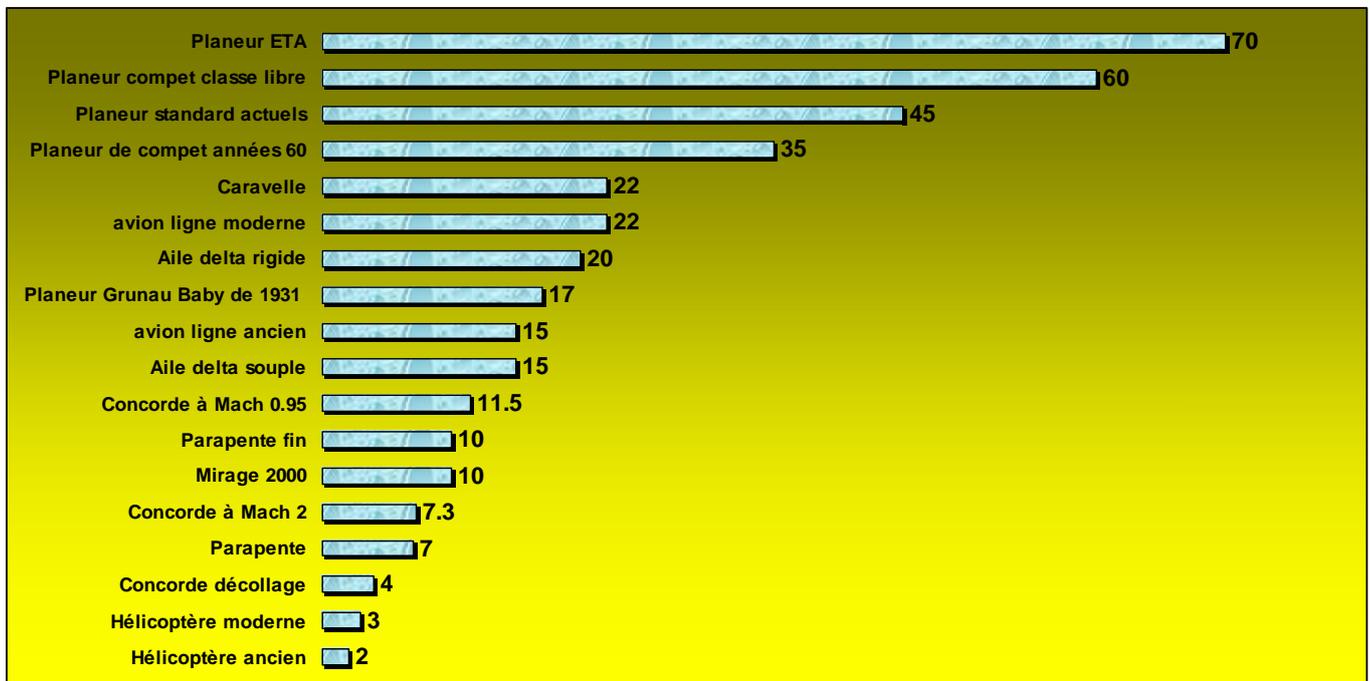
- **L'angle d'incidence** : par définition...C'est l'angle entre et



(Cet angle varie au cours du vol il ne faut pas le confondre avec l'angle de calage figé par construction)

- La  **finesse**  d'un avion est définie comme le rapport entre C'est aussi le rapport de la vitesse horizontale sur la vitesse de chute ( $V / V_z$ ). C'est aussi le rapport entre la

*La finesse maximale ne dépend pas du poids mais du coefficient de portance et donc de l'incidence de l'aile. La vitesse de finesse maximale augmente avec le poids pour un même avion.*



- Comparaison **finesse / allongement**. *La finesse d'une aile augmente avec son allongement. Les planeurs ont des voilures à fort allongement (de 20 à 25) et des finesses max de 50 à 60, les avions classiques de 6 à 12 pour une finesse de 20 et les avions rapides à faible allongement (de 3 à 5) ont une finesse de 10 environ.*

### Les multiples expressions de la finesse

L'expression peut se rencontrer sous les différentes formes suivantes :

$$f = \frac{R_z}{R_x} = \frac{C_z}{C_x} = \frac{1}{\tan(\alpha)} = \frac{V_x}{V_z} = \frac{D}{h} \quad \text{et encore :}$$

Comme, en vol horizontal stabilisé  $R_x = T$  et  $R_z = P$  on a aussi  $f = \frac{P}{T}$

### III. Quelques anecdotes : accident/plané/finesse

Lorsqu'un avion se transforme en planeur (la plupart du temps c'est involontaire) la finesse prend une grande importance. Le pilotage aussi car la recherche de la finesse maximum est délicate en situation de stress maximum (perte des moteurs).

- Vol plané "volontaire" d'une Caravelle d'Air France

Un vol technique et spectaculaire a été réalisé le 15 mars 1959 à bord de la Caravelle de type 1 (F-BHRA). Il consistait à relier Paris à Dijon (265 km à vol d'oiseau) en vol plané et a démontré les qualités de vol de cet avion et plus particulièrement sa finesse.

Arrivée à la verticale de Paris à 13 200 m et à la vitesse de 360 Kts (665 km/h) cet avion arrive à la verticale du terrain de Dijon à l'altitude de 1600 m, soit Paris-Dijon en 46 mn (vitesse moyenne de 346 km/h).

Avec une finesse de 22 (*distance parcourue/hauteur*), la Caravelle se hisse au niveau des planeurs de haute performance d'après-guerre (1939).

Ce vol promotionnel fut très remarqué dans le milieu aéronautique.



- Le vol 236 Air Transat plane jusqu'au Açores.

Le 24 août 2001 un vol de la compagnie canadienne Air Transat entre Toronto et Lisbonne est assuré par un Airbus A330. Suite à une alarme de panne hydraulique l'équipage va effectuer des transferts de carburants qui vont se solder par une panne de kérosène. L'avion se retrouve en vol plané au-dessus de l'océan Atlantique avec 306 personnes à bord.

Le pilote a réussi à poser l'appareil, sur une piste d'atterrissage aux Açores avec les deux moteurs arrêtés et après un vol plané d'environ 20 minutes.



- L'Airbus du vol 1549 d'US Airways amerri sur l'Hudson

Avant de se transformer en hydravion, l'Airbus 320 souffrant d'une indigestion de pâté d'oies sauvages a « tout simplement » plané. Combien de temps ? Quelle distance a-t-il parcouru ? Comment le pilote a-t-il pu contrôler son appareil ?

Les données sont difficiles à trouver, mais il semblerait qu'un Airbus 320 ait une finesse de l'ordre de 15 à 20, le tout nouveau A-380 arriverait à 25 et l'A-330 à près de 30. Ce sont donc des planeurs tout à fait honorables, mais très rapides.

En tombant en panne à environ 1000 m d'altitude, l'Airbus du vol 1549 pouvait donc parcourir environ 20 km à la vitesse de 400 km/h, soit environ 3 minutes de vol. C'est court, mais ça permet de consacrer quelques secondes à la prise de décision, puis de se préparer à « se vacher » le moins mal possible.

Mais encore faut-il pouvoir piloter l'engin. Dans un planeur, de petits câbles actionnent les gouvernes, mais dans un Airbus ce sont des circuits hydrauliques à commande électrique. Sans



moteurs, plus de pression d'huile, plus de génératrice, plus de cette énergie vitale dans les avions modernes.

Heureusement, il y a le **RAT**. Le « **Ram Air Turbine** » est une éolienne d'environ 80 cm de diamètre qui sort automatiquement d'un logement en cas de panne d'énergie et fournit les quelques kilowatts nécessaires pendant la descente en vol plané.

L'hélice entraîne directement une pompe hydraulique sur les Airbus, où l'huile fait tourner ensuite une génératrice électrique. Sur les Boeing c'est l'inverse : le RAT produit de l'électricité qui alimente le groupe hydraulique.



### III - Aérodynamique de l'aile.

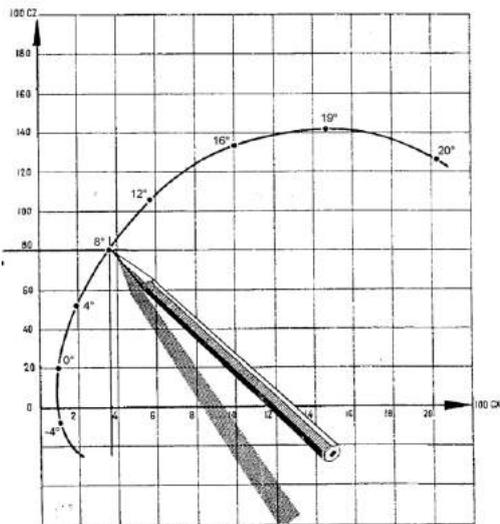
#### 4 - La polaire.



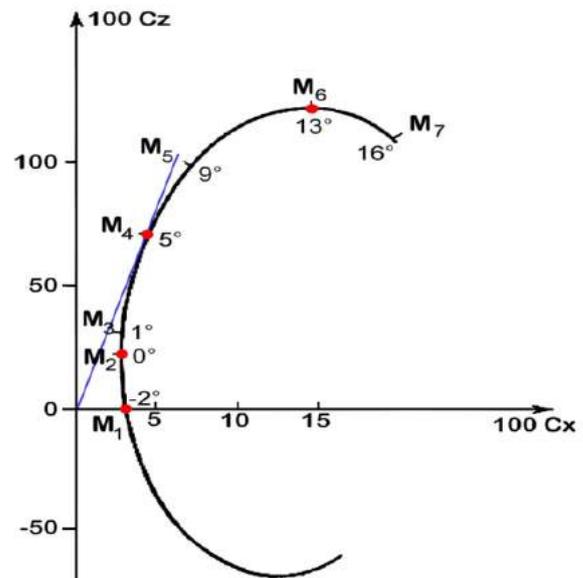
#### I. Qu'est ce que "la polaire" ?

La **polaire d'une aile** est une courbe tracée point par point qui fait correspondre les coefficients de traînée et de portance déterminés expérimentalement pour différents **angles d'incidence**.

Cette courbe permet de déterminer aisément les caractéristiques d'un profil et de choisir sans surprise le plus adapté entre plusieurs modèles.



L'extrapolation des points permet un tracé de la courbe



Les points remarquables - (Attention ce n'est pas la même polaire qu'à côté)

En pratique on utilise deux types de polaires :

- la polaire de type EIFFEL ( que l'on doit à Gustave Eiffel): elle représente  $C_z$  en fonction de  $C_x$ . ( En pratique on trace la courbe en multipliant les coefficients par 100 en raison de leur faible valeur).

- la polaire des vitesses : elle représente  $V_z$ ( vitesse verticale) en fonction de  $V_x$  (vitesse horizontale) dans le cas d'un vol plané. Elle est surtout utile pour la conception des ailes de planeurs ou de parapentes.

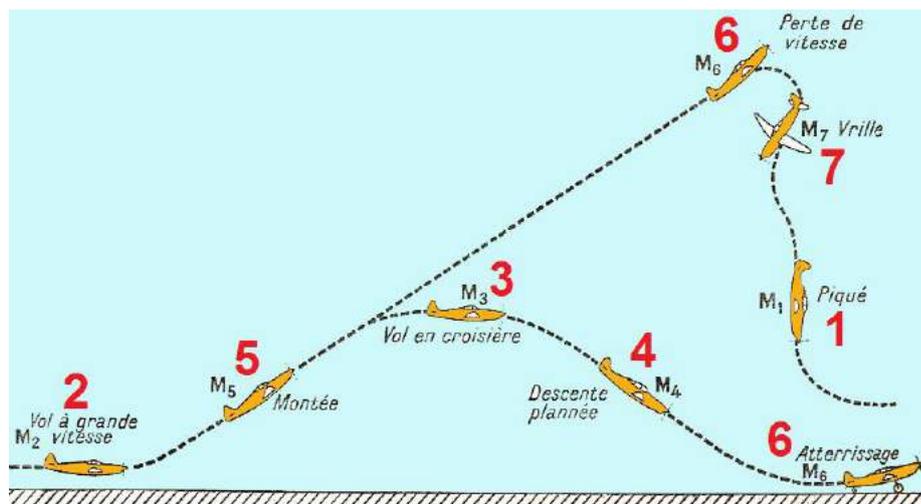
## II. Que peut-on lire sur la polaire d'une aile ?

La polaire est une donnée très importante car elle permet de déterminer un certain nombre de **points** qui sont **caractéristiques des diverses phases de vol de l'avion**.

Ces points caractéristiques sont illustrés dans des exemples schématiques sur la figure ci-contre associée à la polaire envisagée.

On étudiera surtout **1, 2, 4 & 6**

### Les points importants



- Le point **M<sub>1</sub>** correspond à l'angle d'incidence donnant une  $(C_z = 0)$ .

Il est situé à l'intersection de la polaire et de l'axe des  $C_x C_x$ .

*Cet angle est presque toujours négatif mais peut cependant pour certains profils atteindre des valeurs positives élevées. Atteindre cette situation avec une assiette quasi normale est impossible car l'avion ne peut pas "voler"... il ne peut que "tomber". Cette situation est donc plus facile d'accès en piqué.*

- Le point **M<sub>2</sub>** correspond au point de  $(C_x \text{ min})$ . Il est situé à

l'intersection de la tangente verticale à la polaire avec l'axe des  $C_x$ .

Une aile calée à cette incidence permet d'obtenir **la plus grande vitesse** en trajectoire horizontale. Il est donc utilisé pour obtenir la **vitesse maxi**.

- Le point **M<sub>4</sub>** correspond au point de  $(C_z / C_x \text{ max})$  c'est-à-dire celui

pour lequel l'angle d'incidence donne le plus grand rapport  $(\frac{C_z}{C_x} \text{ max})$ . La tangente à la courbe en ce point passe par l'origine.

Par vent nul, ce rapport  $C_z/C_x$  optimal permettrait d'atteindre le **maximum de rayon d'action**. Il peut servir pour planer au mieux en cas de panne moteur par exemple !

- Le point **M<sub>6</sub>** : correspond au point de  $(C_z \text{ max})$ .

Repéré par la tangente horizontale à la polaire. Il correspond donc à un **angle d'incidence maximal** avant décrochage. C'est l'angle qui, pour une vitesse donnée, permet d'emporter la charge maximum. Il représente donc un intérêt pratique lorsque l'avion est lourdement chargé...

**Mais ATTENTION au-delà de ce point, il y a risque de décrochage aérodynamique !**

### Commentaires sur les autres points

En 3 on est dans une utilisation normale (vol en croisière) sans recherche de performances particulières...

Le point 5 correspond à une vitesse de chute minimale déterminé par le calcul de  $\frac{C_x^3}{C_z^2} \text{ min}$ .

Le point 7 correspond a un



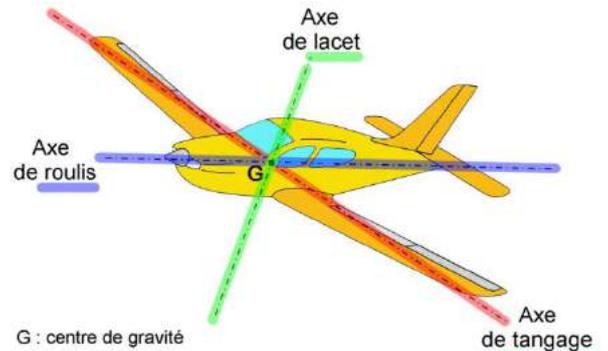
Afin de diriger l'avion dans l'espace, on utilise des efforts aérodynamiques (portance et trainées) créés sur de petites surfaces que l'on appelle afin de provoquer des rotations  
sur les trois axes de l'avion.

### I. Les 3 axes

L'avion se déplace dans les trois dimensions et doit donc pouvoir modifier son orientation suivant 3 axes.

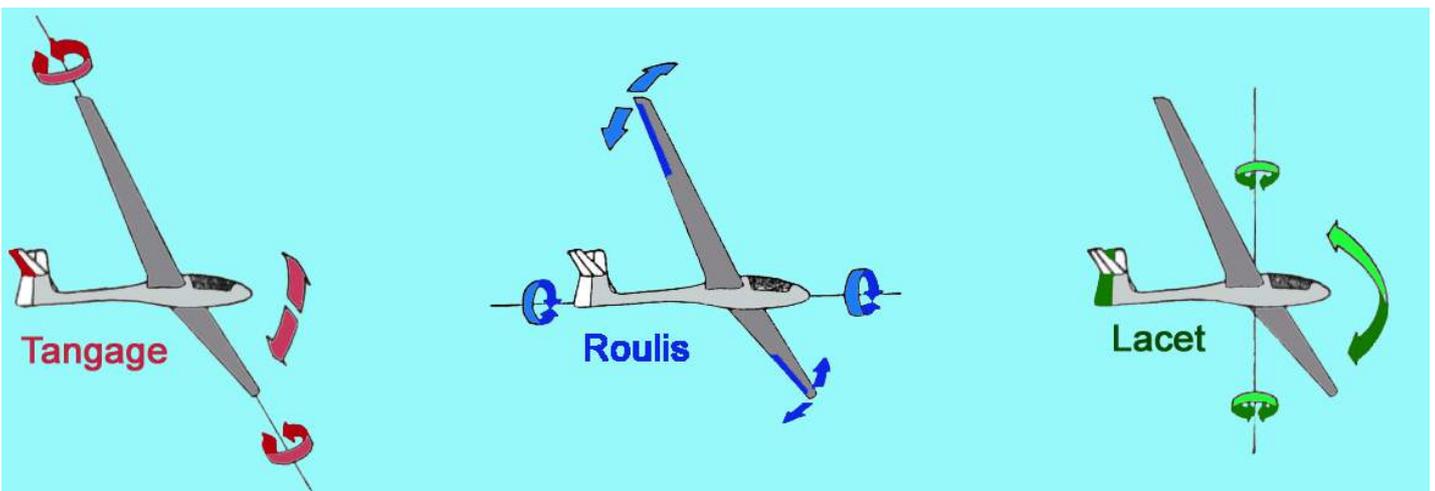
Pour un avion ils portent les noms suivant :

- ... Roll
- ... Pitch
- ... Yaw



### II. Les actions de pilotage correspondantes

AXES DE L'AVION	Gouverne	Commandes	Mouvement de l'avion
<b>Tangage</b> <i>(axe transversal)</i>	<b>Profondeur</b>	<b>Manche ou volant Av-Ar</b>	<b>Montée ou descente</b>
<b>Roulis</b> <i>(axe longitudinal)</i>	<b>Ailerons</b>	<b>Manche ou volant G-D</b>	<b>Inclinaison latérale D ou G</b>
<b>Lacet</b>	<b>Dérive</b>	<b>Palonniers <i>(Pédales)</i></b>	<b>Orientation du nez</b>



**Tangage**

Action avant-arrière du manche

**Roulis**

Action gauche-droite du manche

**Lacet**

Action du palonnier

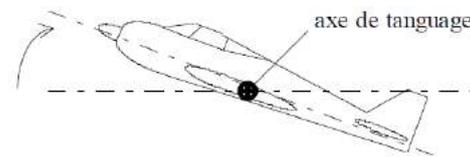
### III. Le fonctionnement des gouvernes associées

#### Contrôle du tangage - Gouverne de profondeur

AXE	Gouverne	Commandes	Mouvement de l'avion
Tangage (axe transversal)	Profondeur	Manche ou volant Av-Ar	Montée ou descente

L'action sur la gouverne de profondeur s'effectue au manche (ou volant).

Pour faire monter l'avion il faut basculer le nez vers le ciel et pour le faire descendre, il faut lui basculer le nez vers le sol.

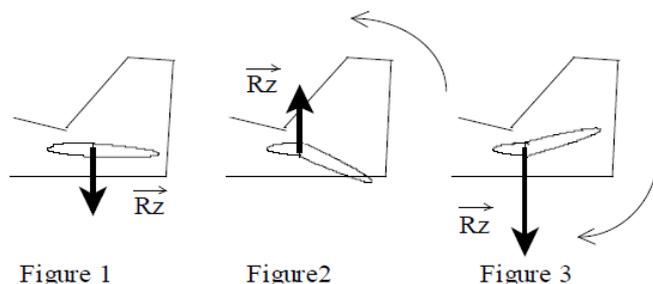


Autrement dit, il faut provoquer une rotation autour de l'axe de

On joue sur la de l'empennage  
horizontal.

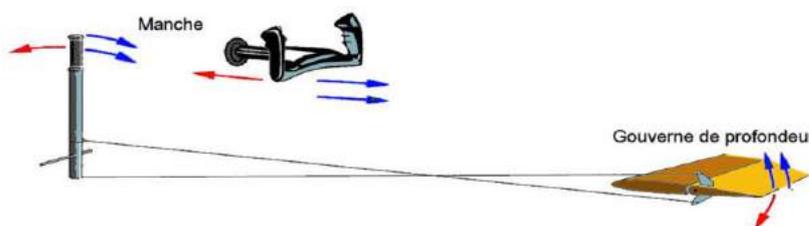
Si on augmente sa portance, la queue de l'avion va et le nez basculera vers le sol. ( figure 2).

Si on diminue sa portance, la queue de l'avion va et le nez basculer vers le ciel. ( figure 3).



Il est à noter qu'initialement pour un vol en palier équilibré, l'empennage horizontal de l'avion est ( c'est-à-dire que sa  
portance est orienté vers le bas).

On pousse (*rouge*) pour descendre.  
La **gouverne ou élévateur** voit sa portance augmenter ce qui génère un couple (effet) piqueur (la portance fait se soulever la queue de l'appareil).



A l'inverse on tire (*bleu*) pour monter.  
(La portance de la queue diminue etc...)

On peut choisir de basculer entièrement l'empennage horizontal (empennage monobloc). Les variations de portance sont alors obtenues simplement par la variation de l'incidence de la gouverne.

**Les mouvements de la profondeur sont** **sur la partie droite et la partie**  
**gauche de l'empennage horizontal.**

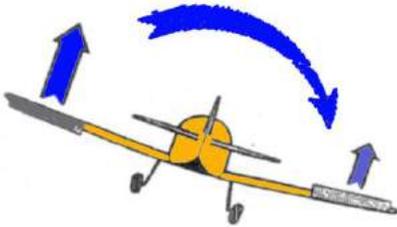
La commande de profondeur n'a pas d'effets secondaires sur la trajectoire. Toutefois, si on tire sur le manche, la montée que l'on amorce engendre

De même si on pousse sur le manche, il faut réduire les gaz pour éviter que la vitesse n'augmente.

#### Contrôle du roulis – Ailerons

AXE	Gouverne	Commandes	Mouvement de l'avion
Roulis (axe longitudinal)	Ailerons	Manche ou volant G-D	Inclinaison latérale D ou G

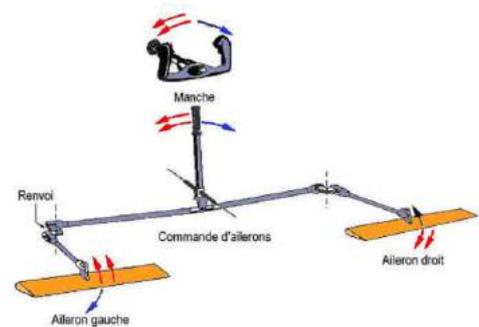
Pour faire basculer l'avion sur l'aile gauche ou sur l'aile droite, il faut jouer sur la commande des ailerons de chaque aile. Autrement dit, pour provoquer une rotation autour de l'axe de roulis, il faut braquer d'une aile et celle de l'autre.



Pour modifier la portance des ailes on utilise des gouvernes appelées ailerons. Ces gouvernes sont situées en bout d'aile (pour augmenter leur surface portante) et permettent d'obtenir un effet opposé sur les deux ailes par un braquage différentiel. On baisse l'aileron du côté où il faut diminuer la portance et on le relève du côté où il faut la

L'action sur les ailerons s'effectue au manche (ou volant). On incline le manche (ou on tourne le volant) vers le côté où l'on veut tourner.

Les deux ailes contribuent à l'inclinaison de l'appareil mais de manières différentes : l'aileron du côté intérieur au virage se relève, la portance de l'aile diminue et s'enfonce ce qui provoque l'inclinaison. De l'autre côté l'aileron s'abaisse et fait augmenter la portance. L'aile se relève et aide à l'inclinaison souhaitée.

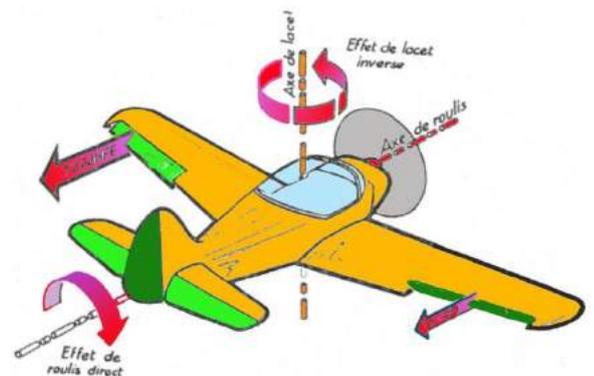


Baisser un aileron rend le profil cambré en bout d'aile et augmente également son efficacité. Il en résulte une augmentation de la portance du bout de l'aile.

Dans le langage des pilotes, plutôt que dire que l'on incline l'avion à droite ou à gauche, on dit que l'on gauchit à droite ou à gauche. Ce terme vient de l'époque où la rotation autour de l'axe de roulis s'obtenait en déformant les ailes entières.

Le gauchissement entraîne un effet secondaire sur la trajectoire : en effet, lorsqu'on incline l'avion, l'aile voyant sa portance augmenter, voit également sa trajectoire augmenter. Il se produit alors une rotation autour de l'axe de lacet.

Le nez part du côté de l'aile haute. Une inclinaison à droite engendre du lacet à gauche. On parle de lacet inverse.



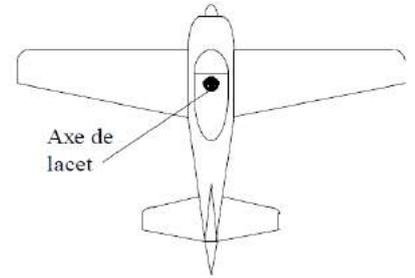
Le pilote annule le lacet inverse par une action sur la gouverne de direction, créant ainsi un moment de rotation en lacet dans le sens favorable au virage.

Des dispositifs automatiques ont aussi été inventés pour diminuer cet effet.

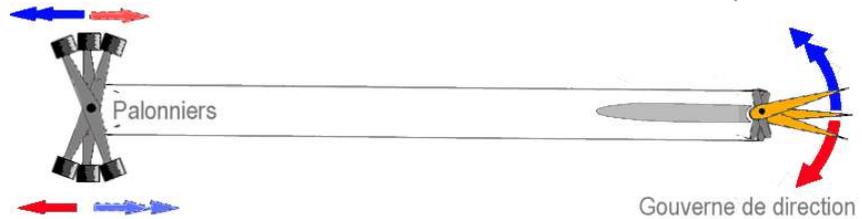
## Contrôle du lacet - Gouverne de direction

AXE	Gouverne	Commandes	Mouvement de l'avion
Lacet	Dérive	Palonniers (Pédales)	Orientation du nez

Pour faire basculer le nez de l'avion à gauche ou à droite, il faut provoquer une rotation autour de l'axe **de lacet**, c'est à dire l'axe au plan des ailes et passant par le centre de gravité de l'avion. C'est qui permet de créer cette rotation.

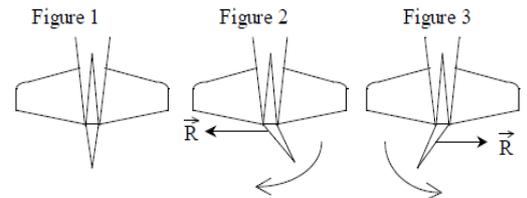


L'action sur la gouverne de direction (seule) s'effectue au palonnier. On pousse du côté ou l'on veut tourner. Poussée pied gauche (rouge) oriente la dérive à gauche... et, par effet girouette, fait tourner à gauche



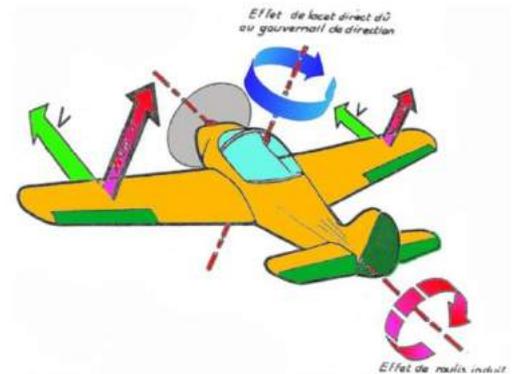
En fait la dérive se comporte verticalement comme un profil d'aile, et sa rotation provoque d'un côté une surpression et de l'autre une dépression comme dans le cas de la portance. La force aérodynamique qui en résulte fait tourner l'avion autour de son axe de lacet)

Lorsqu'on braque la gouverne à droite (en enfonçant le palonnier à droite), on engendre une résultante aérodynamique vers sur l'empennage vertical. Celui-ci est donc et le nez de l'avion

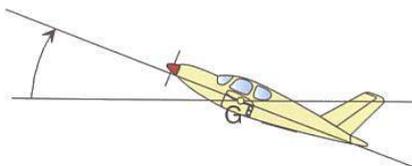


part

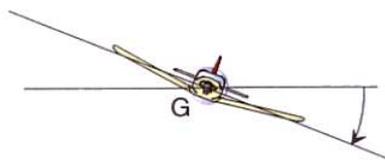
L'action sur la gouverne de direction a un **effet secondaire** : lorsque l'avion se met en rotation autour de l'axe de lacet, l'aile à l'extérieur avance plus vite que l'autre. L'aile extérieure voit donc sa portance augmenter ce qui engendre du **roulis**. On parle de **roulis induit**.



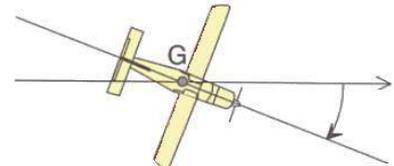
### IV. Les angles associés aux axes



La gouverne de profondeur permet de modifier l'angle d'assiette...ou assiette



Les ailerons permettent de modifier l'angle d'inclinaison... ou inclinaison



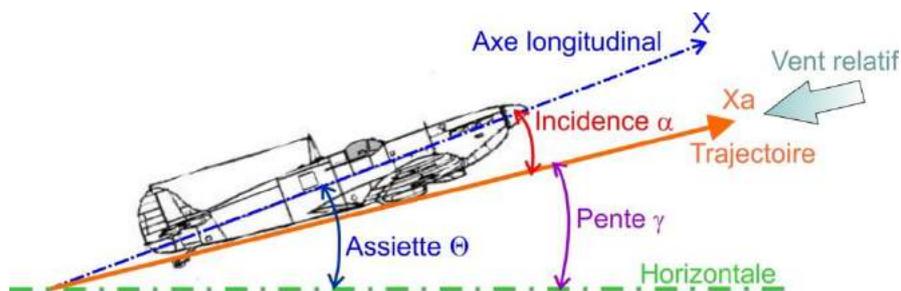
La dérive ou plus exactement la gouverne de direction permet de modifier l'angle de lacet ... ou lacet.

Attention malgré tout a ne pas catégoriser trop vite une action car les actions sur les gouvernes ont des effets induits sur les autres axes. Un braquage d'aileron (roulis) crée le lacet inverse par exemple !

## V. Les angles associés au vol

### Définitions :

Dans le plan vertical contenant la trajectoire de l'avion il est important de définir les relations entre la pente, l'assiette et l'incidence.



**La pente** est l'angle formé entre

Elle matérialise la trajectoire de l'avion. Elle est positive si la vitesse est au-dessus de l'horizontale.

**L'assiette** est l'angle

. C'est l'angle indiqué par l'horizon artificiel

**L'incidence** est l'angle formé

. Elle est comptée positivement si la ligne de foi est au-dessus de la direction de la vitesse.

ANGLE	Entre	Et
<b>Pente</b>	<b>L'horizontale</b>	<b>La trajectoire de l'avion</b> (ou la direction de la vitesse)
<b>Incidence</b>	<b>La trajectoire de l'avion</b> (ou la direction du vent relatif)	<b>L'axe longitudinal de l'avion ou la ligne de foi de l'avion</b>
<b>Assiette</b>	<b>La ligne de foi de l'avion</b>	<b>L'horizontale</b>

**Assiette = Pente + Incidence**

### Attention une assiette cabrée ne signifie pas montée :

ATTENTION l'attitude d'un avion (figée par exemple par une photographie) ne donne pas nécessairement sa trajectoire ...!

Attention donc par exemple... une assiette a cabré n'implique pas nécessairement de monter ! L'avion peut avoir une trajectoire horizontale ou même être en train de tomber !

De même pour l'inclinaison ou l'angle de lacet. Si l'action sur les gouvernes (ailerons et gouverne de direction) n'est pas coordonnée l'avion peut se positionner, et voler, de manière assez bizarre ("En crabe") avec la "bille" coincée à droite ou à gauche de l'instrument.

Sur l'image ci-contre... si on enlève la fumée l'avion semble monter de la gauche vers la droite alors qu'en réalité il descend comme le montre la trajectoire matérialisée par le fumigène... avec en plus les ailes dans le plan de descente.

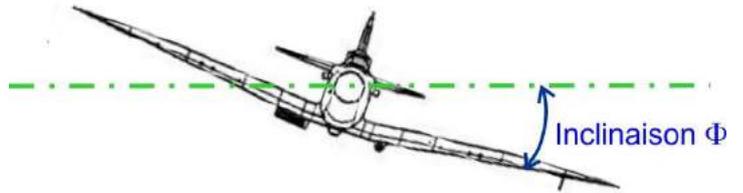


**L'inclinaison :**

L'inclinaison est l'angle formé entre

et

Il est repéré dans l'avion à l'aide de l'horizon artificiel ou de l'indicateur de virage. En vol à vue, on le repère par l'inclinaison du capot moteur sur l'horizon. L'inclinaison a pour but principal de permettre d'effectuer des virages plus ou moins serrés.



**Le dérapage :**

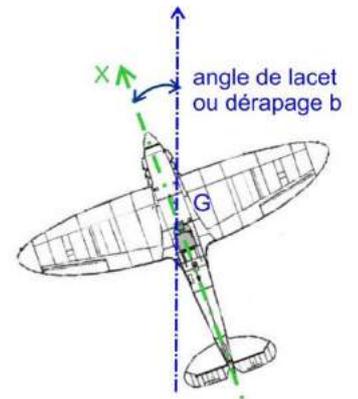
Le dérapage est l'angle entre

et

Il est compté positivement par la droite (nez à gauche) de la vitesse).

Il est indiqué à bord de l'avion par

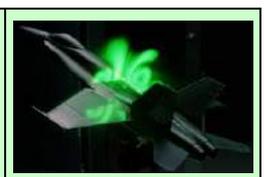
Si elle est au centre, le dérapage est nul, si elle est à droite, le dérapage est positif (la bille indique le sens de la vitesse vraie).



**VI. Récapitulatif : vidéo et simulation**



**IV - Mécanique du vol.**  
**2 - Les principales phases du vol**



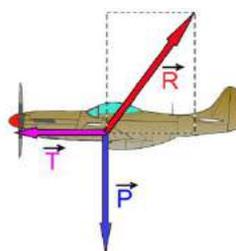
**I. Montée, descente, vol horizontal... et principe d'inertie !**

On cherche à expliquer ici l'équilibre des forces qui permet à l'avion de rester en l'air.

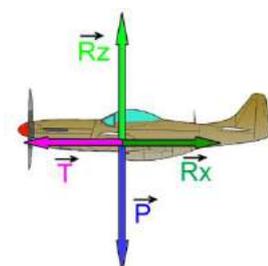
L'avion est soumis à 3 forces, ou 4 si on décompose la résultante aérodynamique en deux forces. :

On s'intéresse aux forces exercées sur un avion se déplaçant

- En montée à vitesse constante,
- En descente à vitesse constante,
- En vol horizontal à vitesse constante,



Séparation traction (T) et résultante aérodynamique (R). Intéressant...



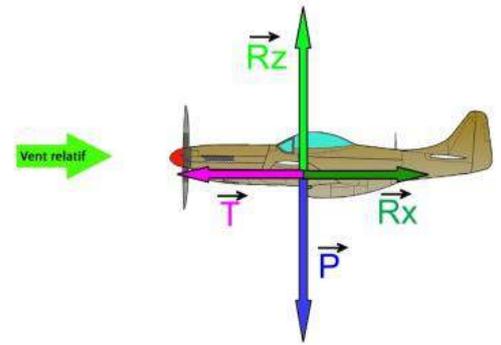
Décomposition de R en Rx (trainée) et Rz (portance). **Schéma le plus utilisé** pour la compréhension du vol.

## II. Le vol rectiligne uniforme en palier.

Le vol rectiligne en palier à vitesse constante reste la configuration de vol la plus fréquente.

Pour maintenir l'équilibre de l'avion il faut que :

- 
- 



## III. La montée rectiligne uniforme .

La montée est plus complexe à étudier.

Du point de vue de la sustentation les choses restent assez simples :

- La portance doit compenser

:

$$R_z = m \times g \times \cos\theta$$

La portance est inférieure au poids et **le facteur de charge est inférieur à 1.**

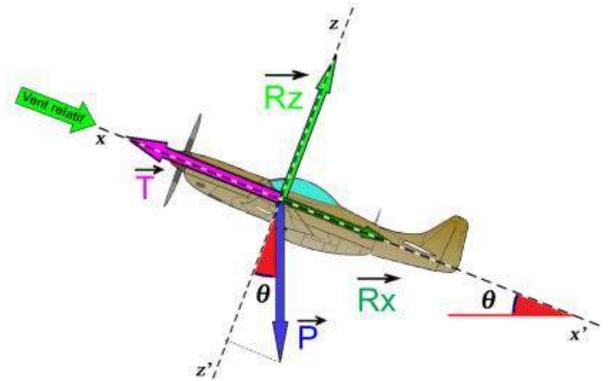
Le facteur de charge est le rapport portance sur poids :

$$n = \frac{R_z}{P}$$

Pour la propulsion, la traction doit compenser

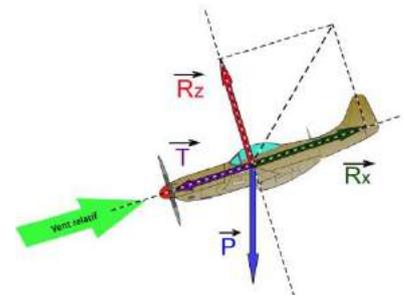
dans sa direction :

$$T = R_x + m \times g \times \sin\theta$$



## IV. La descente rectiligne uniforme .

Le poids de l'avion devient moteur et on peut se permettre de diminuer la traction pour maintenir la vitesse.



**Bilan: pour que la somme des 3 vecteurs soit nulle sur les trois schémas, la force motrice (T) augmente en montée et diminue en descente... tout est parfaitement logique.**

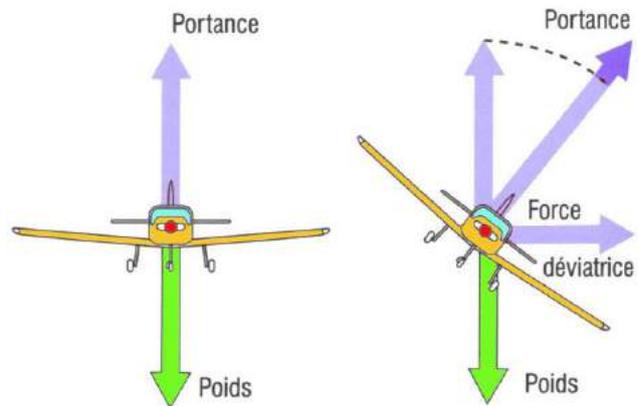
## V. La mise en virage

La mise en virage d'un avion ne s'effectue pas comme pour une voiture : si on essaie d'orienter le nez de l'avion grâce au palonnier, en le faisant pivoter autour de son axe de lacet, on constaterait qu'il volerait « **en crabe** » et qu'il poursuivrait sa ligne droite pendant quelques instants.

Pour éviter cela, on fait en sorte d'incliner la portance pour déclencher un virage. Cette opération se fera en inclinant les ailes. La composante horizontale de la portance est dirigée vers l'intérieur du virage. Elle constitue ainsi une force déviatrice qui modifie la trajectoire de l'avion.

Mais cette seule force n'oriente pas le nez de l'avion dans une direction souhaitée. Elle ne fait qu'entraîner l'avion latéralement. Il faut par conséquent aligner l'avion dans le lit du vent relatif. La solution tient dans l'application de « **l'effet de girouette** » : on place une surface verticale à l'arrière, la dérive, pour que l'avion ne vole pas en crabe.

Grâce à elle, l'avion pivotera autour de son axe vertical (axe de lacet) et le nez s'alignera tangentiellement au virage. Là est le rôle essentiel de la dérive : maintenir l'axe longitudinal de l'avion parallèle à l'axe du vent relatif. Lorsque cette condition est réalisée, le **vol** est dit « **symétrique** ».



*On constate une nécessité d'augmentation de la portance*

### Virage, vitesse et inclinaison

Le virage étudié ici est un virage à altitude et rayon constant. La trajectoire est alors assimilable à un mouvement circulaire uniforme où l'avion subit une accélération centripète

#### Relation entre rayon de virage et vitesse

A inclinaison constante, le rayon de virage varie comme le carré de la vitesse, autrement dit, lorsque la vitesse est doublée, le rayon de virage est quadruplé.

Se souvenir qu'à inclinaison donnée :

- faible vitesse = petit rayon de virage
- grande vitesse = grand rayon de virage

#### Relation entre le rayon de virage et l'inclinaison

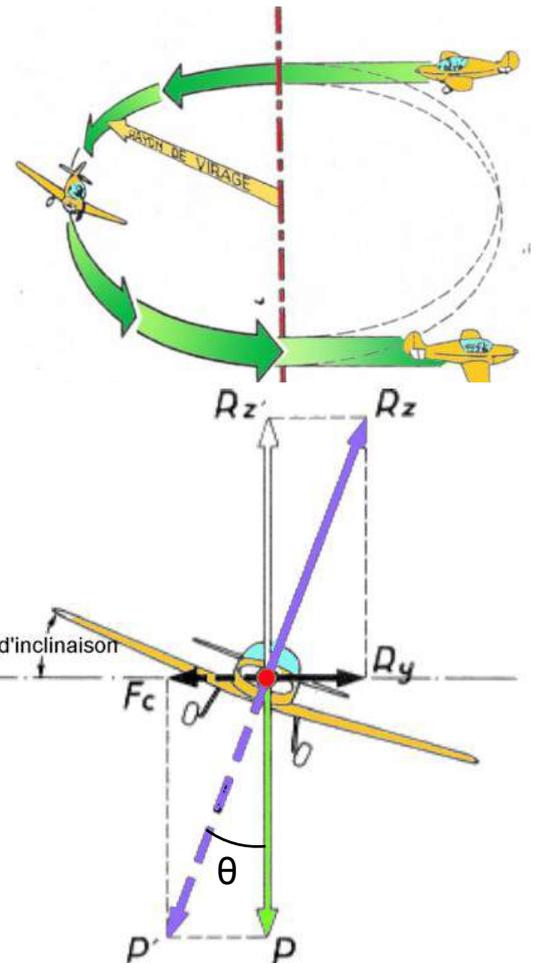
À vitesse constante, le rayon de virage varie dans le sens inverse de l'inclinaison.

Retenir que :

- faible inclinaison = grand rayon de virage
- grande inclinaison = petit rayon de virage

#### Virage symétrique en palier à vitesse constante

L'équilibre des forces peut s'écrire ainsi :



- La composante verticale de

compense le

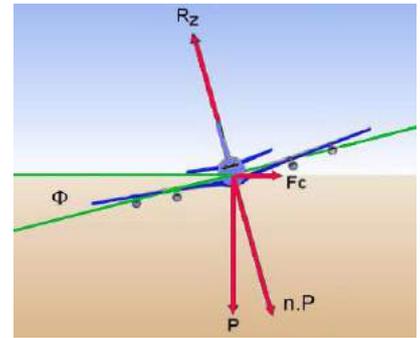
$$P = R_z \times \cos\theta$$

Le **facteur de charge** est le rapport entre la **charge totale** supportée par la structure d'un appareil appelée **poinds apparent (\*)** et le **poinds réel** de cet appareil.

Comme la **portance** est égale au **poinds apparent** (puisque'elle doit le contrebalancer), on obtient la définition d'usage :

**Le facteur de charge est le rapport portance sur poinds :**

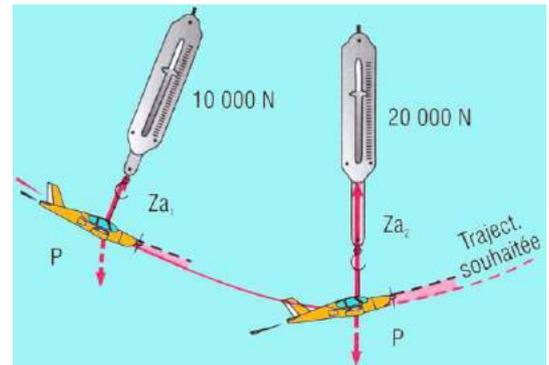
$$n = \frac{\text{Portance}}{\text{Poinds}}$$



### Le facteur de charge en virage ou lors d'une ressource

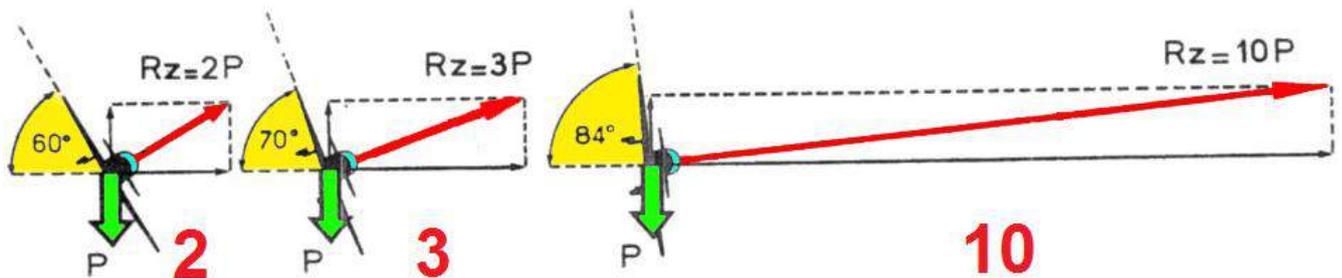
Lors de ces phases de vols, l'avion et le pilote subissent une force résultante qui naît de la conjugaison du poids et de la force centrifuge générée par la courbure de trajectoire.

Cette force donne une sensation de tassement et elle est d'autant plus importante que la manœuvre est serrée **et/ou** rapide.



Exemple d'une ressource (action sur le manche visant à faire remonter l'avion)

La portance doit être « égale et opposée » au poids apparent pour que le vol soit possible. Elle est donc plus importante en virage qu'en ligne droite.

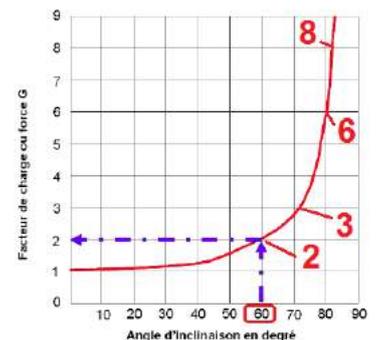


C'est cette augmentation que quantifie le facteur de charge.

Pour un virage coordonné (*écoulement symétrique... ou ni dérapé ni glissé*), on a la relation :

$$n = \frac{1}{\cos(\alpha)}$$

Une inclinaison de 60° produit un facteur de charge de 2 ou une force de 2 G



## VI. Danger en virage

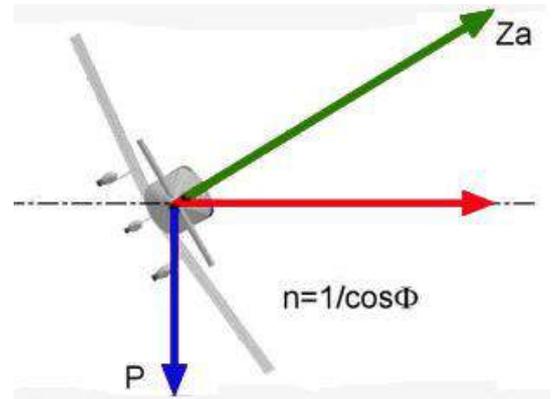
### Le décrochage en virage

Le premier danger vient de l'augmentation du facteur de charge ( $n$ ) qui augmente avec l'inclinaison.

Le risque de décrochage augmente... parce que la vitesse de décrochage augmente très rapidement.

$$V_S = v_s \times \sqrt{n}$$

$V_S$  = vitesse de décrochage (S : stall)  
 $v_s$  = vitesse de décrochage sans inclinaison



On rappelle que l'avertisseur de décrochage se déclenche à 1.15 de  $V_s$  (donc 5 à 10 kt au-dessus de la vitesse de décrochage).

Le second danger vient de la dissymétrie. Un écoulement non symétrique risque de faire décrocher une aile avant l'autre... avec une conséquence immédiate : la mise en autorotation ou vrille.

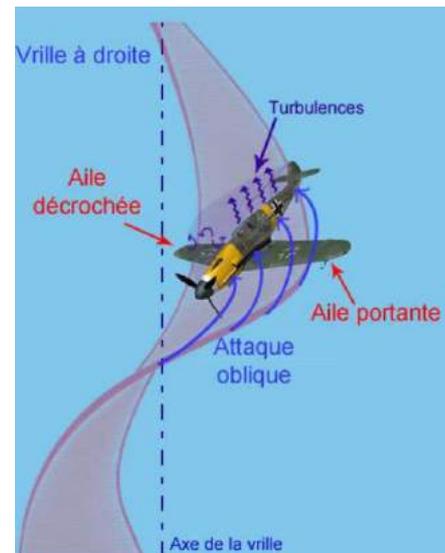
### La vrille ou autorotation.

La vrille est un décrochage dissymétrique entretenu.

Lorsqu'un avion est installé en vrille, une de ses ailes est décrochée, l'autre non.

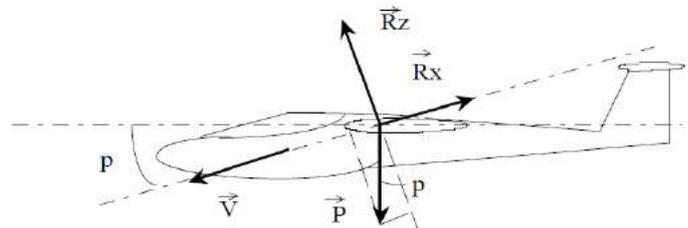
L'avion tourne sur lui-même avec le nez bas décrivant une spirale très serrée en descente verticale lorsque le phénomène est établi.

*Pour sortir de vrille, il faut faire cesser la dissymétrie en utilisant le plein débattement de la gouverne de direction puis, presque simultanément, "rendre la main" (pousser sur le manche) afin de réduire l'incidence de l'aile pour empêcher cette dernière d'atteindre ou de rester à ou au-delà de l'incidence de décrochage.*



## VII. Le vol plané

Ce type de vol correspond au régime des planeurs et des parapentes. Étudions le cas d'une descente planée à vitesse constante :



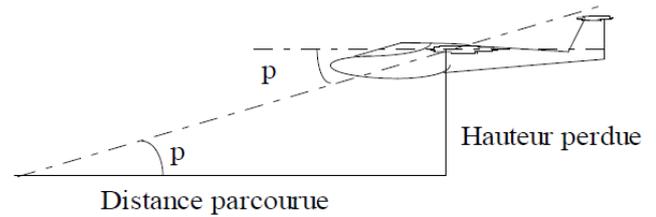
En vol plané rectiligne stabilisé, l'équilibre des forces impose que :

- pour la sustentation : la portance compense
- pour la propulsion : la trainée est compensée par

On peut alors en déduire la pente de descente :  $\tan(p) = \frac{R_x}{R_z} = \frac{C_x}{C_z} = \frac{1}{f}$

La pente de descente est d'autant plus faible que la finesse est importante.

Comme le montre le schéma ci-contre, la tangente de la pente correspond aussi au rapport de l'altitude perdue sur la distance parcourue :



$$\tan(p) = \frac{H}{D} = \frac{1}{f}$$

Connaissant la finesse de l'aéronef et l'altitude de vol, on peut calculer la distance parcourue :

**Pour un aéronef donné, la finesse maximale correspond à une incidence de vol précise. Si la masse de l'aéronef augmente, la finesse maximale est inchangée mais la vitesse correspondante est plus élevée.**

<p><b>B.I.A.</b> Atelier Aéronautique</p> 	<p><i>V - Décollage atterrissage.</i></p>	
--	---	--

### I. Pourquoi tenir compte du vent ?

En vol ce qui compte c'est la vitesse de l'avion par rapport à la masse d'air... peu importe la vitesse et la direction de cette masse d'air ! (\*)

Au sol votre vitesse est souvent insuffisante pour maintenir l'avion en l'air et c'est donc la composition des vitesses (*somme vectorielle de la vitesse sol et de la vitesse du vent*) qui va déterminer votre capacité à voler ou non !

En approche (atterrissage) le vent va modifier votre pente de descente et, selon qu'il est de face ou de dos, réduire ou allonger votre trajectoire réelle par rapport au sol.

(\*) L'influence se réduit à la valeur et à la direction de votre vitesse (*projeté sur le*) sol. Cela influe énormément sur votre navigation (avance, retard, déviation ou dérive) ... mais pas sur votre vol !

## II. Décollage... face au vent !

Tout le monde "sait" qu'il faut **décoller** (mais aussi se poser) **face au vent**. La **manche à air** (biroutte) indique la direction et la force du vent (approximativement)... Expliquons pourquoi :

Vent de face (schéma du haut) la **vitesse du vent**  $V_v$  s'ajoute à la vitesse  $V$  de l'avion pour donner une vitesse relative  $V_R$  de l'avion par rapport à l'air plus grande que  $V$ .

La vitesse de décollage dépendant de  $V_R$  elle est atteinte très rapidement. Le décollage est donc facilité face au vent.

A l'inverse, vent de dos, la distance de roulage peut s'allonger considérablement car  $V_R$  devient très inférieure  $V$ . Cela peut constituer un grave danger.

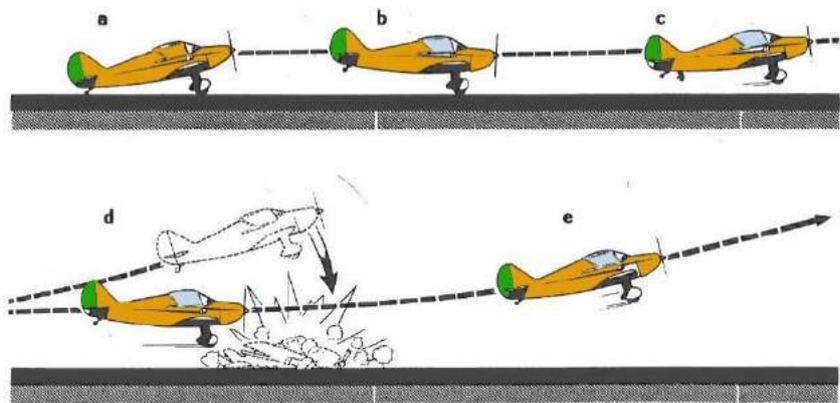
a – plein gaz lâcher les freins.

b – accélération (lever la queue pour les trains classiques)

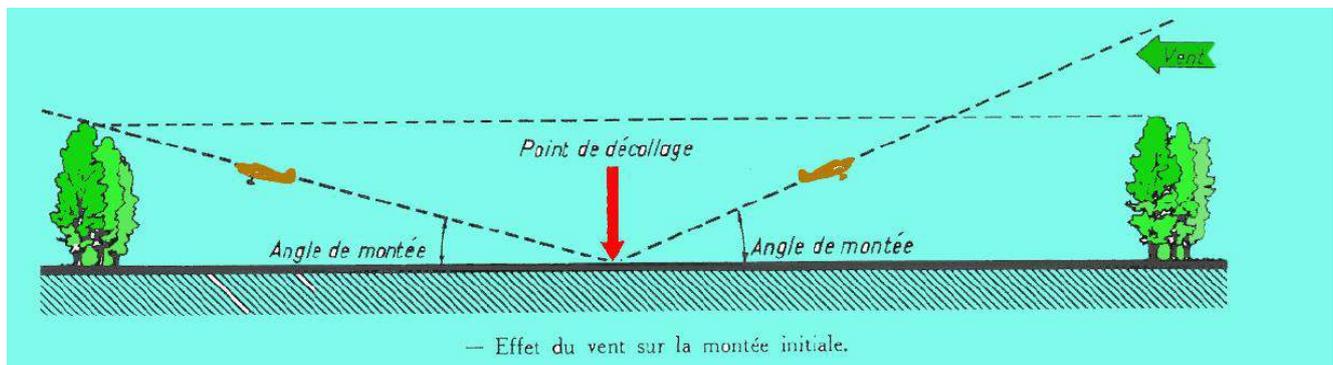
c – décollage

d – prise de vitesse (vouloir monter immédiatement réduit la vitesse... ce qui peut vous faire passer en dessous de la vitesse de décrochage)

e – mise en montée



— Phases du décollage.

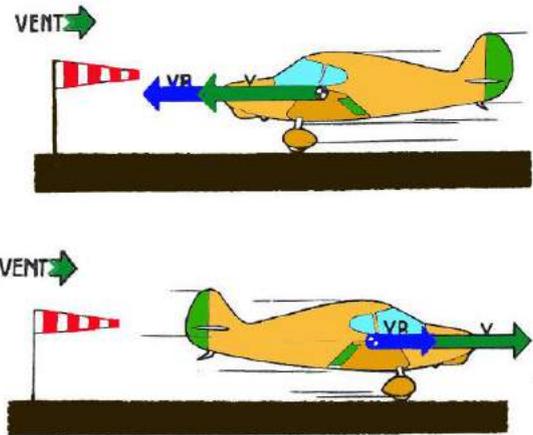


— Effet du vent sur la montée initiale.

L'angle de montée se mesure entre l'horizontale (sol) et la trajectoire de l'avion/sol. On comprend facilement que cet angle augmente **vent de face** et que **le franchissement des obstacles est facilité**.

A l'inverse, un décollage vent de dos peut, par le double effet de l'allongement du roulage et de l'abaissement de la trajectoire (angle de montée plus faible) rendre un décollage très dangereux.

Effets du vent sur le décollage

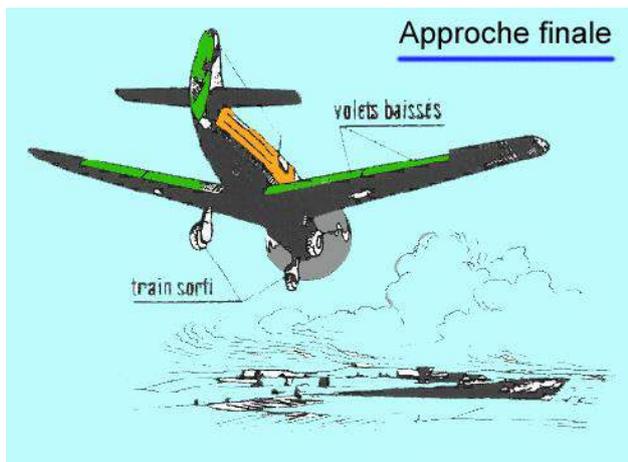


### III. Atterrissage ... face au vent !

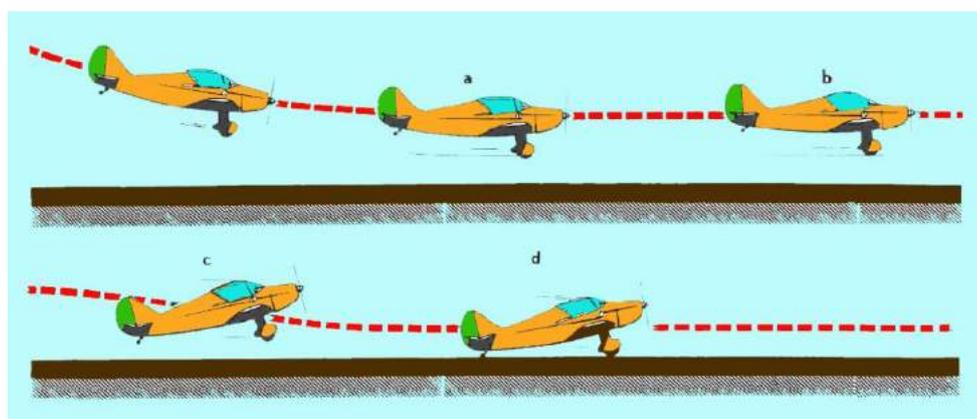
Il faut donc AUSSI **atterrir face au vent**.

Il faut AUSSI **réduire sa vitesse** alors que l'on est en descente (*réduction moteur augmentation des traînées... sortie du train d'atterrissage*).

Pour réduire encore la vitesse tout en préservant la sécurité (*rester au-dessus de la vitesse de décrochage*) on va **sortir progressivement tous les crans de volets** (et même les becs pour certains avions).

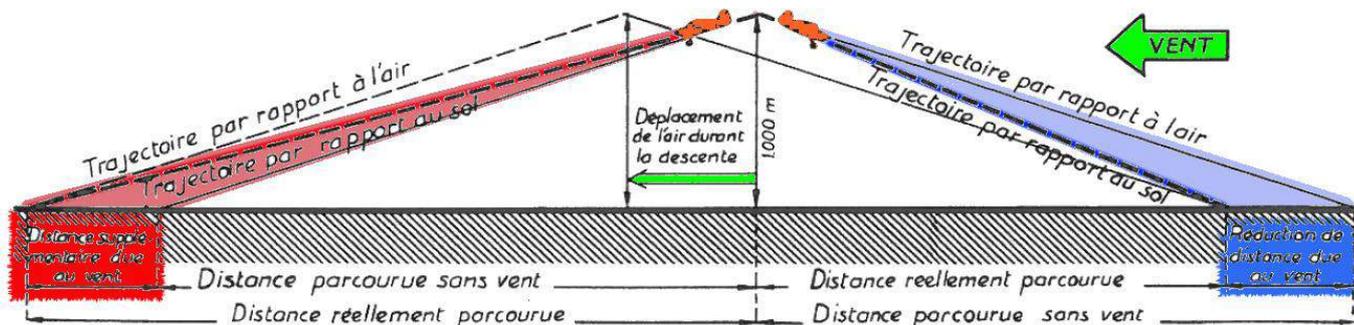


Approche finale



- a – l'arrondi, juste avant de toucher le sol, amène l'avion sur une trajectoire parallèle au sol.
- b – moteur réduit l'avion décélère... mais l'effet de sol peut le maintenir en l'air quelque temps même en dessous de la vitesse habituelle de décrochage
- c – décrochage (au ras du sol pour un "kiss landing")
- d – touché des roues (ici un posé "trois points" caractéristique des avions à train classique).
- e – freinage puis libération de la piste

### La pente de descente



— Effet du vent sur la distance parcourue en descente planée.

Vous remarquerez que le vent perturbe votre descente en allongeant votre trajectoire lorsqu'il est de dos. On privilégie donc TOUJOURS le vent de face.

### Contrôle de la descente

Il se fait par l'intermédiaire de l'assiette qui pilote le vario (en général, 500 ft/mn est une bonne valeur pour un avion de club) et de la puissance qui pilote la vitesse, le choix du couple vario/vitesse déterminant une **pente de descente**.

Votre vitesse de descente sera néanmoins limitée : vous ne dépasserez pas la « vitesse maximale de croisière »  $V_{NO}$  (de l'anglais « Velocity Normal Operating ») si l'air est turbulent, et vous ne dépasserez en aucun cas la vitesse à ne jamais dépasser »  $V_{NE}$  (de l'anglais « Velocity Never Exceed »). Ces deux vitesses figurent dans le manuel de vol de votre avion. Vous ne commencerez à sortir les volets que lorsque vous serez rentré dans la zone prévue (arc blanc de l'anémomètre).

Arc blanc: de  $V_{FE}$  à  $V_{S0}$  : zone d'utilisation normale en configuration atterrissage





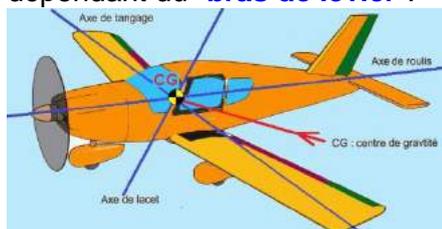
### I. Trois points très particuliers qu'il est important de bien définir

#### Le centre de Gravité CG ou G (en physique)

Le **centre de gravité** ( $C_G$ ) ou barycentre des masses est par définition le point d'application de la force de gravitation : le **poids** ( $P$ ).

Sa position ne dépend que des masses des différentes parties de l'avion et absolument pas de son aérodynamique. Par contre il peut se déplacer lors du chargement (passagers, essence, bagages... etc) mais aussi en vol, lorsque du carburant est consommé, ou même simplement déplacé pour équilibrer certains avions (Concorde notamment !). Ce point n'est donc PAS un point FIXE.

C'est aussi le point autour duquel s'appliquent **les moments de toutes les autres forces** en particulier les **forces aérodynamiques** s'exerçant sur les ailes et les gouvernes et qui ont un effet très dépendant du "**bras de levier**".



En mécanique du vol, **le mouvement de l'avion** est assimilé au **mouvement de son centre de gravité**.

De même, pour l'étude du **mouvement "autour" du centre de gravité**, ce point est l'**intersection** (ou l'origine) des **trois axes de rotation** de l'avion (*Roulis, tangage et lacet*).

#### Centre de poussée CP

La portance se crée sur chaque partie de l'aile (*principalement car la contribution du fuselage est habituellement négligeable*). Le point d'application de la portance s'appelle le **centre de poussée** ( $CP$ ). Il correspond au point d'application de la **résultante des forces aérodynamiques**. Comme pour le centre de gravité c'est un "barycentre" c'est-à-dire un point qui rassemble une multitude de petits effets en un point unique. La position de ce point dépend de l'aérodynamique de l'avion et de l'angle d'attaque... il peut donc se déplacer en vol !

Pour les avions classiques le **centre de poussée** est un point qui se situe au niveau du profil entre 30 et 50% de la corde depuis le bord d'attaque.

#### Le foyer F

Le **foyer** est un point très important pour un avion. En fait c'est sa position par rapport au centre de gravité qui a une très grande importance qui détermine sa stabilité et sa maniabilité. Il est défini comme le **point d'application des variations de portance**. En pratique il se situe entre 20 et 30% de la corde depuis le bord d'attaque. Sa position varie peu.

Ce point difficile à définir de manière simple dépend de la forme aérodynamique de l'avion.

#### Déplacement du centre de Gravité CG

Le pilote doit savoir où se trouve le centre de gravité de son appareil. La position "**à vide**" est inscrite dans le manuel de vol.

Lors du chargement (*passagers, bagages, carburant*) le pilote déplace ce point et il doit estimer sa nouvelle position "**après chargement**".

Ce point peut aussi effectuer un "**déplacement en vol**" par exemple lorsque le carburant est consommé... mais, sur certains appareils, il est aussi parfois déplacé, à l'initiative du pilote, par transfert de carburant ou par vidange, (*sur le Concorde qui était un cas très intéressant, le carburant était déplacé pour chaque phase du vol suite au déplacement des forces aérodynamiques en particulier lors du franchissement du "mur du son" ! Il y a aussi le cas des "water ballast" des planeurs*).



Planeur à réaction ? Non vidange des "water ballasts" !

## II. Centrage et stabilité

### C'est quoi la stabilité ?

Pour qu'un l'avion soit pilotable (par un être humain !!! (\*)), il est nécessaire qu'il soit stable c'est à dire qu'il réagisse dans le "bon sens" lors d'une perturbation de son équilibre.

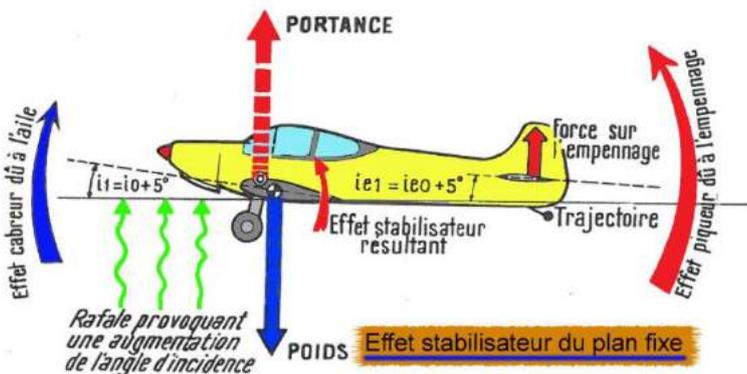
Si l'avion subit un brusque changement d'incidence il est souhaitable qu'il réagisse par une action tendant à contrer cet écart... Par exemple : si une perturbation provoque un mouvement à piquer, l'avion réagit en relevant le nez spontanément sans que le pilote agisse sur les commandes

(\* Certains avions sont construits instables (Il existe des prototypes de chasseurs modernes avec flèche inversée type X29 ou Su47...) mais seul un ordinateur et des commandes de vol électriques permettent de les faire voler.

**La stabilité d'un aéronef est caractérisée par la tendance pour cet aéronef à revenir à sa position d'équilibre lorsqu'une cause quelconque l'en écarte.**

### Rôle de l'empennage dans la stabilité

L'aile seule ne peut apporter une stabilisation suffisante ... ce rôle est tenu par l'empennage horizontal.



Si on suppose une rafale de vent faisant augmenter l'incidence de  $5^\circ$ .

- La portance augmente
  - Le centre de poussée avance
  - Tout ceci crée une augmentation supplémentaire du cabrage !
- Pour le plan fixe l'effet est le même.
- La portance augmente
  - Une force supplémentaire s'exerce sur l'empennage. Elle est dirigée vers le haut.

Au bilan l'empennage crée un couple piqueur (stabilisateur car retour vers l'assiette initiale) qui s'oppose à l'effet cabreur de l'aile.

L'avion sera **STABLE** si l'effet redresseur produit par le plan fixe est supérieur à l'effet perturbateur créé par l'aile.

### Le centrage

Pour obtenir la stabilité il faut positionner le centrage en respectant certaines règles dictées par la mécanique et l'aérodynamique.

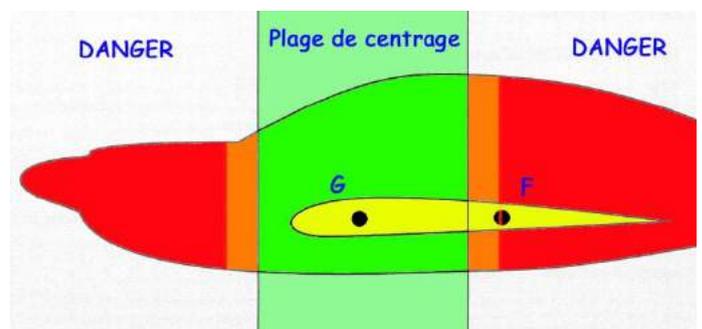
**Centrer un aéronef signifie placer son centre de gravité à une certaine distance du foyer.**

**La règle absolue de la stabilité est de placer le centre de gravité en avant du foyer.**

Si G se rapproche un peu trop de F l'avion devient très réactif à la moindre sollicitation des commandes. On veillera donc à garder une marge.

La distance G F s'appelle la **marge statique**.

La zone de positionnement de G (en vert sur le schéma) par rapport à F s'appelle la **plage de centrage**.



En dehors de cette plage le centrage devient dangereux. (En pratique la plage de centrage a été calculée avec une tolérance raisonnable... mais il ne vaut mieux pas explorer cette zone de tolérance)

## Centrage avant ou centrage arrière ? Positions relatives de CP et CG.

On dira qu'un avion est **centré arrière** lorsque son centre de gravité se trouve en arrière du centre de poussée.

On dira qu'un avion est **centré avant** lorsque son centre de gravité se trouve en avant du centre de poussée.

**Du point de vue de la stabilité c'est le centrage avant qui est la solution la plus favorable car les effets de l'aile et du plan fixe s'ajoutent pour améliorer la stabilité.**

*Cependant, c'est une autre préoccupation qui amène à déterminer la limite avant de centrage. En effet, plus le centre de gravité avance, plus important doit être l'effort demandé à l'empennage et ceci au détriment de la **maniabilité**, c'est-à-dire la possibilité pour le pilote d'effectuer sans effort prohibitif les manœuvres permettant de contrôler l'appareil.*

Un avion **centré avant** est très stable mais peu maniable

Un avion **centré arrière** est plus vif (limite instable) et donc très maniable.

Lorsque son centre de gravité se trouve en avant du centre de poussée.



On retrouve deux grandes familles dans l'aviation légère et sportive, laquelle regroupe tous les sports de l'air : **les aérodynes et les aérostats**.

- **Les aérodynes**, dont la sustentation est principalement assurée par des forces aérodynamiques, sont aussi appelés « les plus lourds que l'air ».
- **Les aérostats**, dont la sustentation est assurée par la poussée d'Archimède, sont appelés les « plus léger que l'air ».

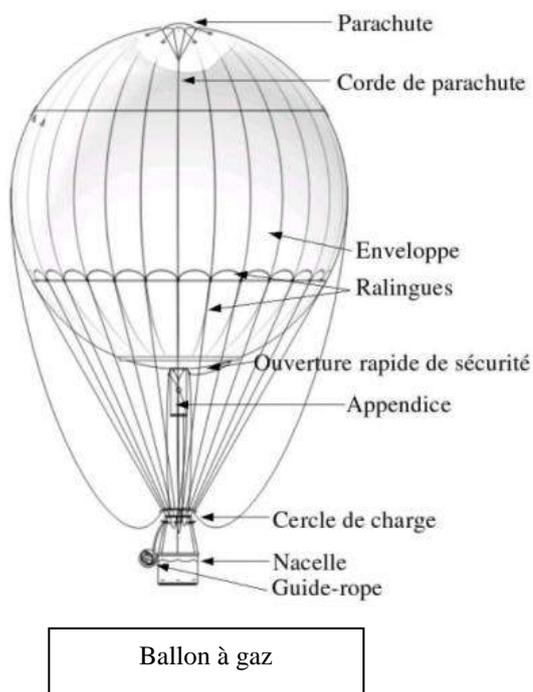
Ainsi, le ballon à gaz est un aérostat.

Il contient un gaz moins dense que l'air à température identique, en général de l'hydrogène ou de l'hélium, (auparavant du gaz d'éclairage) contrairement à la montgolfière, dont l'enveloppe est gonflée d'air chaud.

**Un aérostat ne se déplace pas lui-même (-stat pour « statique »).**

Sauf pour les dirigeables, le vol d'un aérostat ne peut être contrôlé que dans la direction verticale, et dans une certaine mesure horizontalement par le biais des courants aériens de différentes directions selon l'altitude.

### 6.1 – Types d'aérostats :

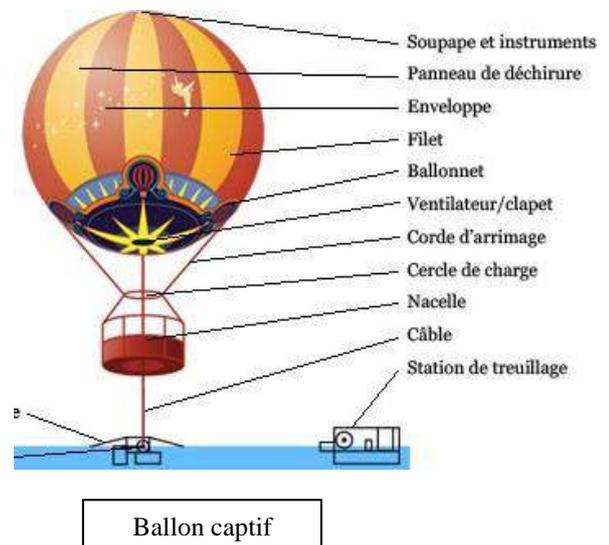


L'enveloppe des ballons à gaz est étanche, munie à son sommet d'un parachute et à sa partie inférieure d'un tuyau de gonflement appelé l'appendice. est attachée grâce à des qui recouvrent l'enveloppe.

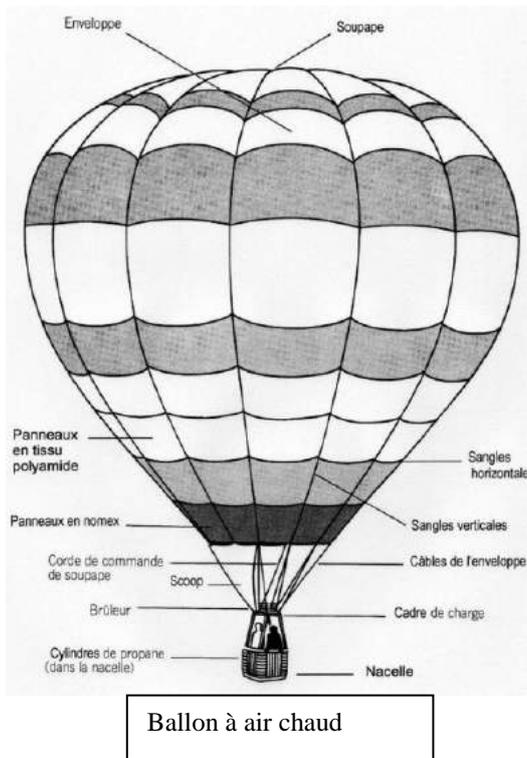
Le gaz utilisé peut être

**Au gonflement**, les ralingues sont attachées à des sacs de sable. Seule la proportion de lest nécessaire au voyage est embarquée.

**En vol** le pilotage s'effectue en lâchant du lest pour monter ou en laissant fuir du gaz pour descendre.



Les ballons captifs sont reliés au sol par un câble. La montée et la descente se font grâce à un treuil.



L'enveloppe est composée de panneaux de toile en nylon ou polyester cousus entre eux sur des sangles verticales et horizontales.

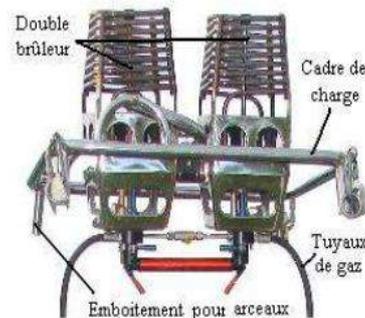
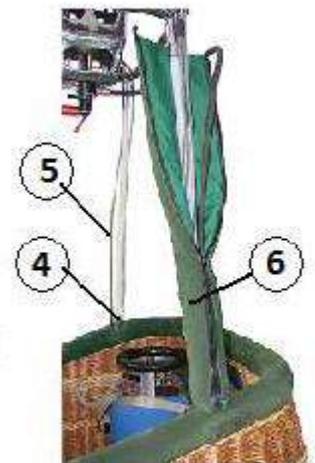
Au sommet une soupape permet l'évacuation de l'air chaud pour faire descendre le ballon ou le vider.

En partie basse les sangles sont reliées à des câbles en acier reliant l'enveloppe au cadre de charge du brûleur.

La première couronne de tissus est en Nomex, matière qui résiste à la flamme.

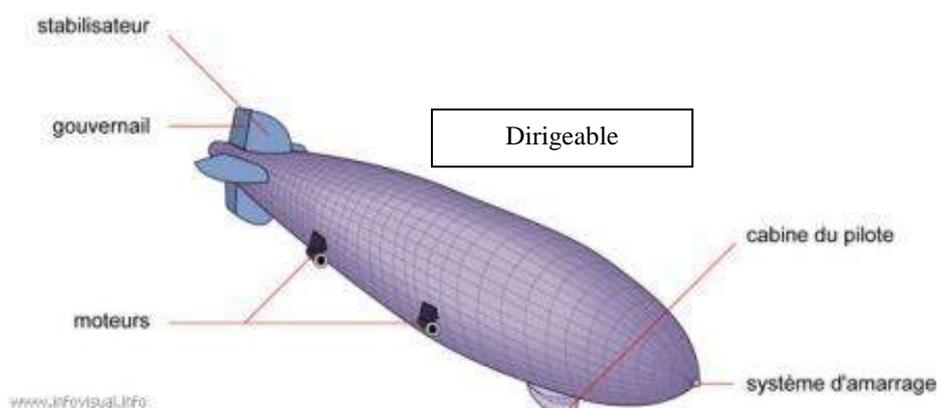
L'air est chauffé par un brûleur orientable qui permet de diriger la flamme au centre de la bouche de l'enveloppe.

Le gaz utilisé est du propane liquide.



Un ballon dirigeable est un aéronef plus léger que l'air, également appelé aérostat, renfermant des dispositifs destinés à assurer la sustentation ainsi que des systèmes de propulsion lui conférant une dirigeabilité totale.

Pour se déplacer, les dirigeables utilisent la propulsion par hélices, qui peuvent être mues par des moteurs à explosion, par des moteurs électriques ou par un pédalier, ou plus récemment par des moteurs électriques reliés à des tissus capteurs photovoltaïques.



## 6.2 – Principe :

### La poussée d'Archimède ou force archimédienne :

C'est une force verticale orientée vers le haut. Sa valeur est égale au poids de l'air ambiant déplacé par le ballon. Elle varie avec la température de l'air et la pression atmosphérique.

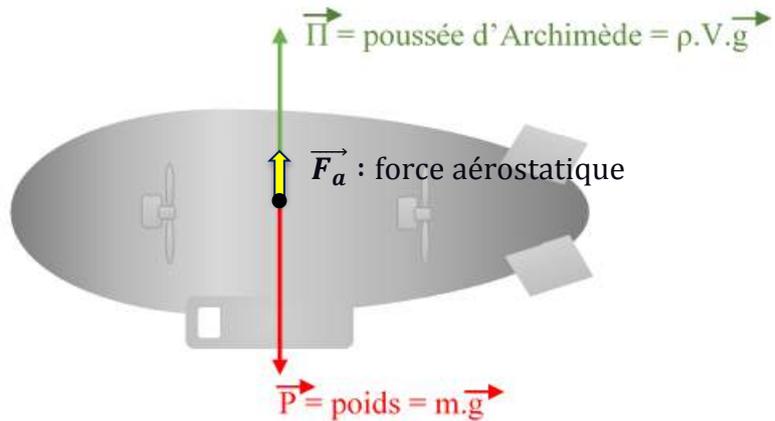
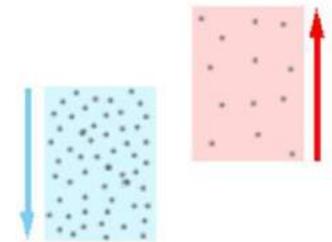
### La force aérostatique ou poussée aérostatique :

### C'est la force résultant de :

L'air chaud étant plus léger que l'air ambiant, la résultante de ces 2 forces est une force verticale orientée vers le haut. C'est l'effet direct de la différence des masses volumiques : masse volumique de l'air ambiant - masse volumique de l'air chaud.

La force aérostatique d'un ballon est proportionnelle au volume de l'enveloppe et au différentiel de température. Elle varie avec l'altitude et la pression atmosphérique.

Lorsque l'air est chauffé, les molécules d'air ont tendance à s'écarter et à prendre plus de place. La masse volumique diminue.



**En plus simple:** Lorsque la montgolfière est gonflée avec de l'air chaud, la masse volumique de l'air à l'intérieur est plus faible que celle à l'extérieur de la montgolfière. Conséquence, la montgolfière est soumise à une force la tirant plus fortement vers le haut (poussée d'Archimède) que celle la maintenant au sol (poids). La montgolfière décolle !!



L'espace est la zone qui débute au-delà de l'atmosphère. L'espace est quasiment vide au vu de son absence de matière.

Cependant dans cet environnement, les objets sont soumis aux lois de la physique que nous connaissons.

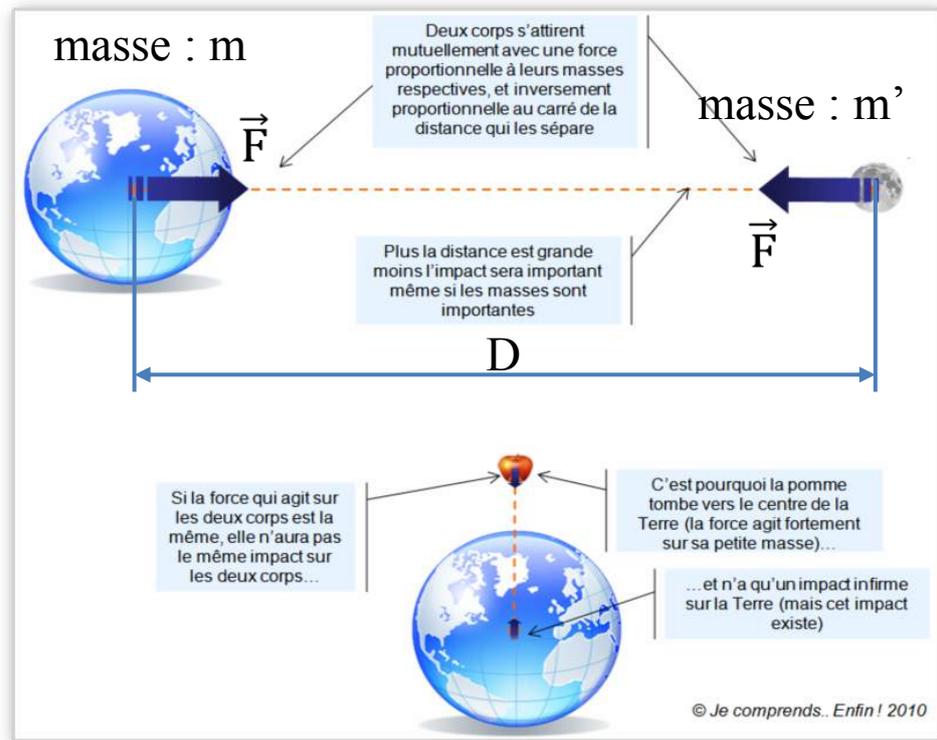
Ainsi, contrairement aux idées que suggèrent le cinéma et la science-fiction, un vaisseau spatial ne peut pas évoluer librement dès lors qu'il a franchi l'atmosphère terrestre. Il est soumis à la

## 7.1 - VOL D'UNE FUSÉE

### L'attraction terrestre :

La gravitation est le phénomène physique d'attraction des corps matériels les uns par rapport aux autres. La loi de la gravitation universelle fût démontrée par Isaac Newton :

Tout corps à la surface de la terre et ayant une certaine masse, sera attiré vers le centre de la terre.

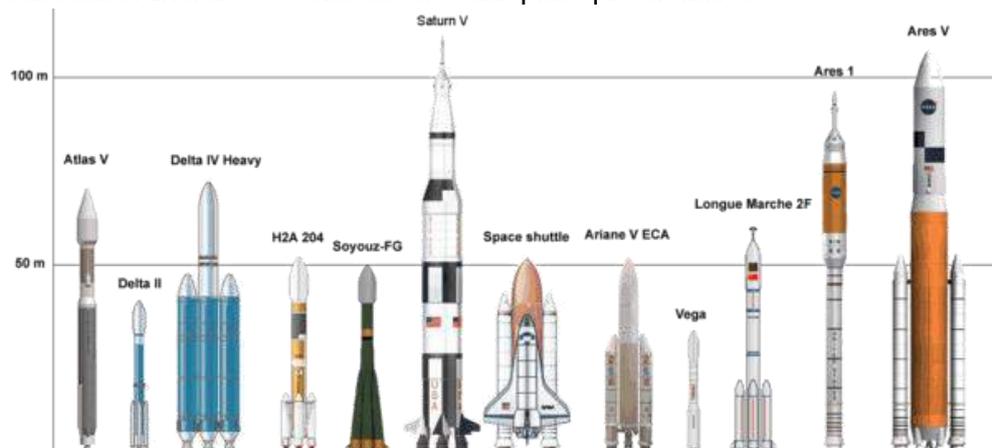


Pour cela, il faut lui donner une impulsion suffisante :

À partir de la surface, s'il n'y avait pas d'atmosphère, un boulet de canon devrait être projeté verticalement à la vitesse de 11.2 km/s pour ne plus retomber. Cela représenterait une gigantesque quantité d'énergie.

La vitesse de libération décroît avec l'altitude. Ainsi à 36000km elle ne vaut plus que 4.3km/s.

On a donc recours à des lanceurs qui placeront le mobile à la hauteur suffisante. À l'altitude désirée le lanceur donne une dernière impulsion qui donnera à l'objet sa vitesse de libération.



## La fusée ou le lanceur :

Dans le vide de l'espace il n'y a aucun support physique, le seul moyen de se mouvoir est la propulsion par réaction.

Le moteur éjecte à très grande vitesse vers l'arrière d'importantes quantités de gaz.

Par réaction à la masse de gaz ainsi générée, le lanceur est propulsé vers l'avant. La force ainsi créée s'appelle **qui** doit être au minimum supérieure au poids du lanceur.

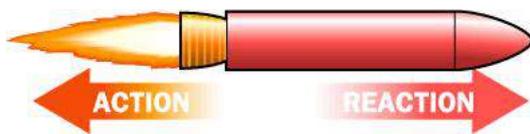
Elle est constituée de moteurs et d'une masse important de carburant qui fournira l'énergie nécessaire pour quitter l'attraction terrestre.

Les différents étages, en se détachant, permettent d'alléger la fusée dès que les réservoirs se vident.

La propulsion se fait par éjection vers l'arrière d'une masse de gaz à une vitesse très élevée.



Selon la 3<sup>ème</sup> loi de Newton : principe de l'action et de la réaction, la masse de gaz éjectée vers l'arrière génère une force vers l'avant nommée :



## Régime de vol :

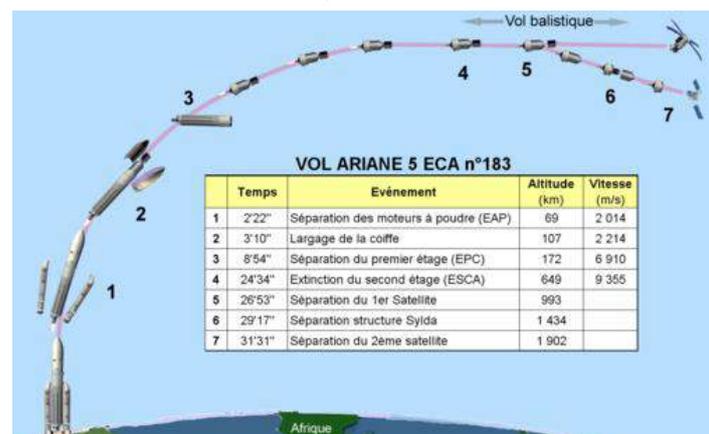
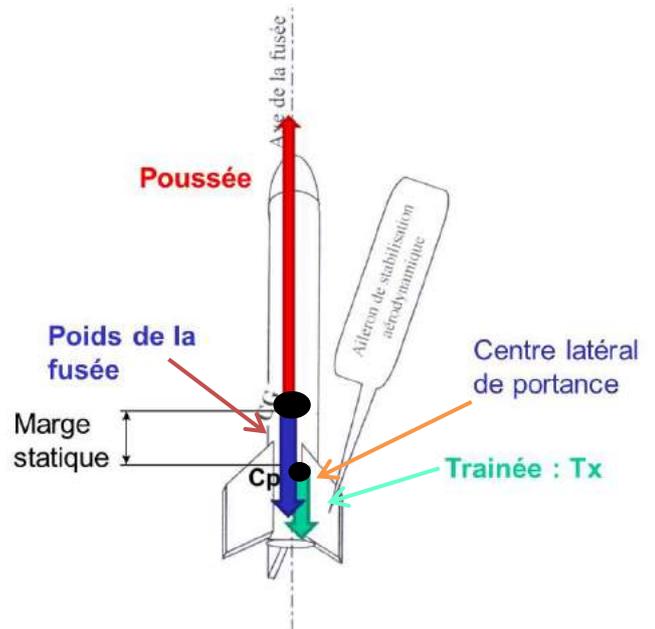
Afin de ne pas endommager la charge utile, l'accélération doit être progressive.

- La fusée accélère quand :

- Vitesse stabilisée:

- La marge statique permet d'assurer la stabilité de la fusée : le centre de poussée doit être sous le centre de gravité.

En se débarrassant progressivement de ses étages, inutiles dès que ses réservoirs sont vides, le lanceur est considérablement allégé et peut augmenter sa vitesse.



## 7.2 - TRAJECTOIRE DE LANCEMENT

La satellisation n'est pas qu'une question d'altitude. C'est pourquoi une impulsion verticale ne suffit pas. Pour se mettre en orbite un objet a besoin d'une

Le lanceur commence par monter verticalement pour quitter le plus tôt possible les couches denses de l'atmosphère.

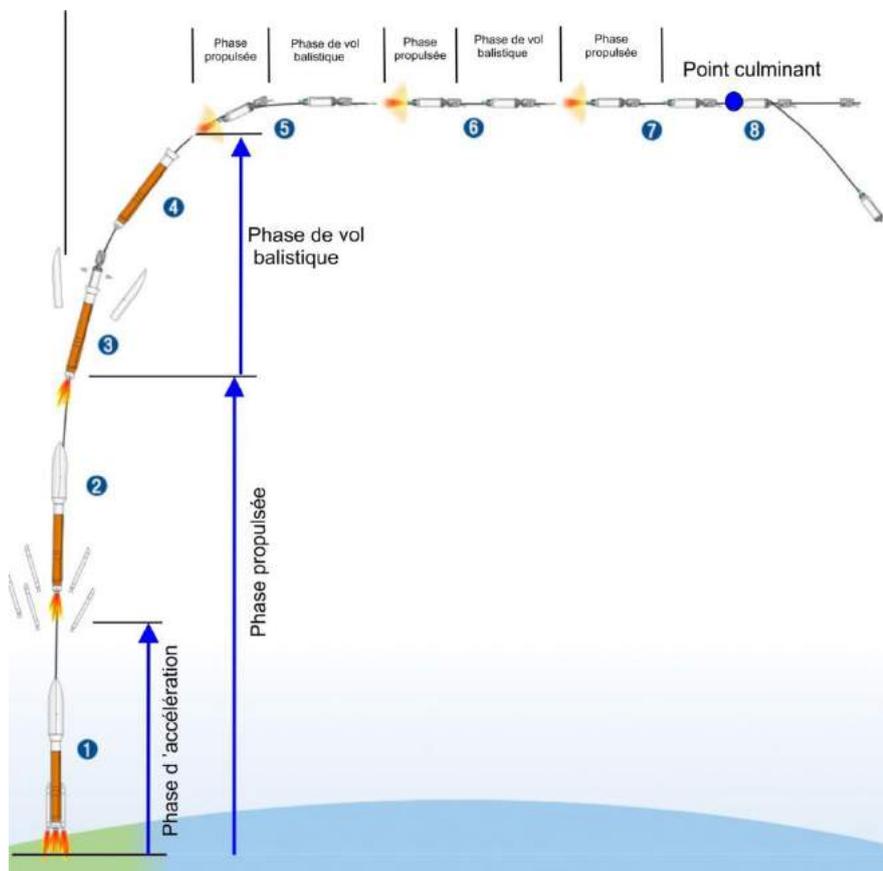
Le 1<sup>er</sup> étage, le plus gros, emporte donc tout le lanceur dans le vide spatial, à environ 200km d'altitude.

Le lanceur adopte alors une trajectoire horizontale qui lui permet d'atteindre une vitesse considérable, d'au moins 28000km/h.

Le vol d'une fusée comprend deux phases:

- La phase , permettant de donner la vitesse nécessaire
- La phase .

La fusée continue sur sa lancée en étant ralentie par les forces de résistance à l'avancement



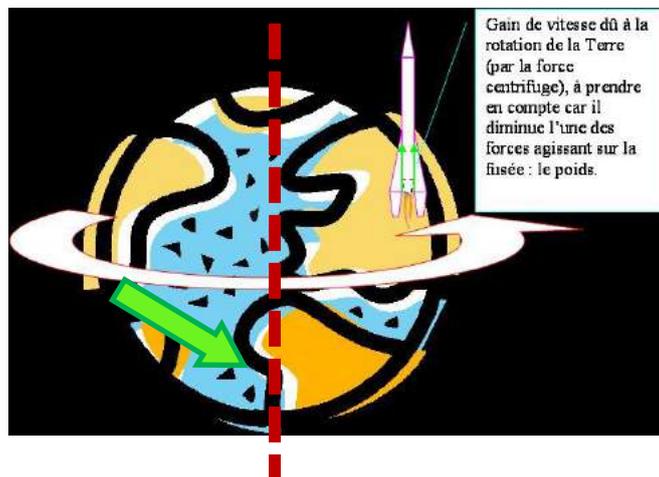
### L'effet de fronde :

Comme la terre tourne d'ouest en est, si on veut profiter au maximum de la rotation de la Terre, il est donc préférable, dans la mesure du possible de tirer vers l'est.

Plus la zone de lancement est située près de l'équateur, moins le cout du lancement est faible. En effet, la terre effectue un tour complet sur elle-même en 24h. Les points situés à la plus grande distance de l'axe de rotation auront la vitesse la plus importante

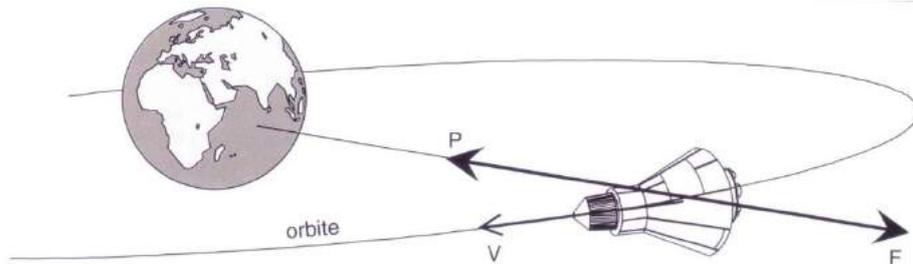
Ainsi la vitesse de rotation de la terre au niveau de l'équateur est de 465m/s. Le pas de tir est immobile par rapport au sol, et possède 5,7% de sa vitesse nécessaire à sa mise en orbite.

La fusée peut donc emporter plus de charge sans augmenter son cout de construction. Les satellites européens sont quant à eux envoyé de Guyane, relativement proche de l'équateur.



## 7.3 - MISE EN ORBITE

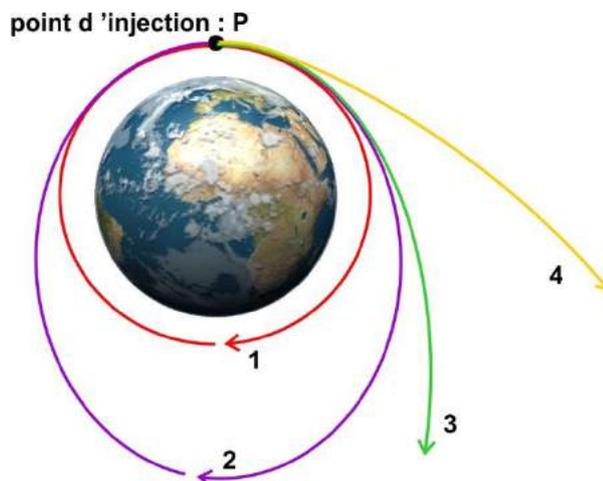
Le lancement d'une sonde spatiale ou la mise sur orbite d'un satellite obéissent aux lois fondamentales de la mécanique.



Le mobile est en équilibre sous l'action de l'attraction terrestre et de la force centrifuge  $F$  créée par la vitesse  $V$ .

Si la vitesse communiquée au véhicule spatial placé au point d'injection  $P$  est trop faible, il retombe sur Terre, en décrivant un mouvement de chute parabolique.

Les trajectoires décrites dépendent de la vitesse communiquée au véhicule au point d'injection,  $P$ .



### Satellisation :

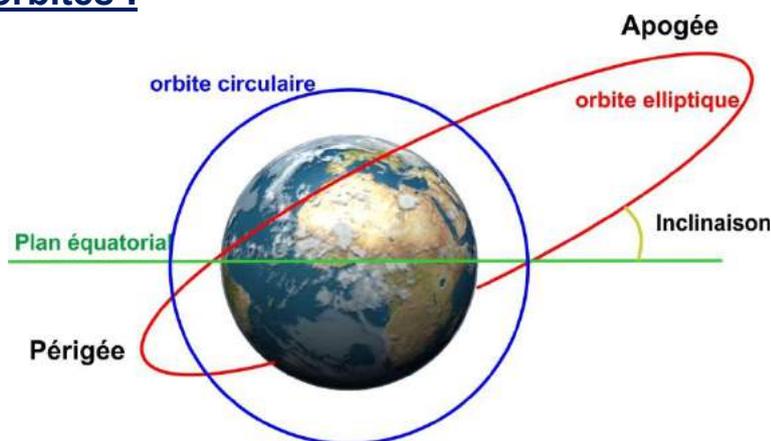
Pour décrire une **trajectoire circulaire**, le mobile doit atteindre la vitesse d'injection dite, (ou "première vitesse cosmique"), est de l'ordre de  $7,5 \text{ km.s}^{-1}$  pour une orbite décrite à  $800 \text{ km}$  d'altitude (**situation 1**).

Si la **vitesse** communiquée est très légèrement **supérieure à  $v_s$** , le véhicule spatial décrit une **trajectoire elliptique** dont le périgée  $P$  correspond au point d'injection sur orbite (**situation 2**).

A la **vitesse de libération,  $v_l$**  (ou "deuxième vitesse cosmique"), le véhicule s'éloigne indéfiniment de la Terre (**situation 3**). Ces conditions sont réunies pour  $v_l = v_s \cdot 2^{1/2}$ , soit près de  $11 \text{ km.s}^{-1}$ .

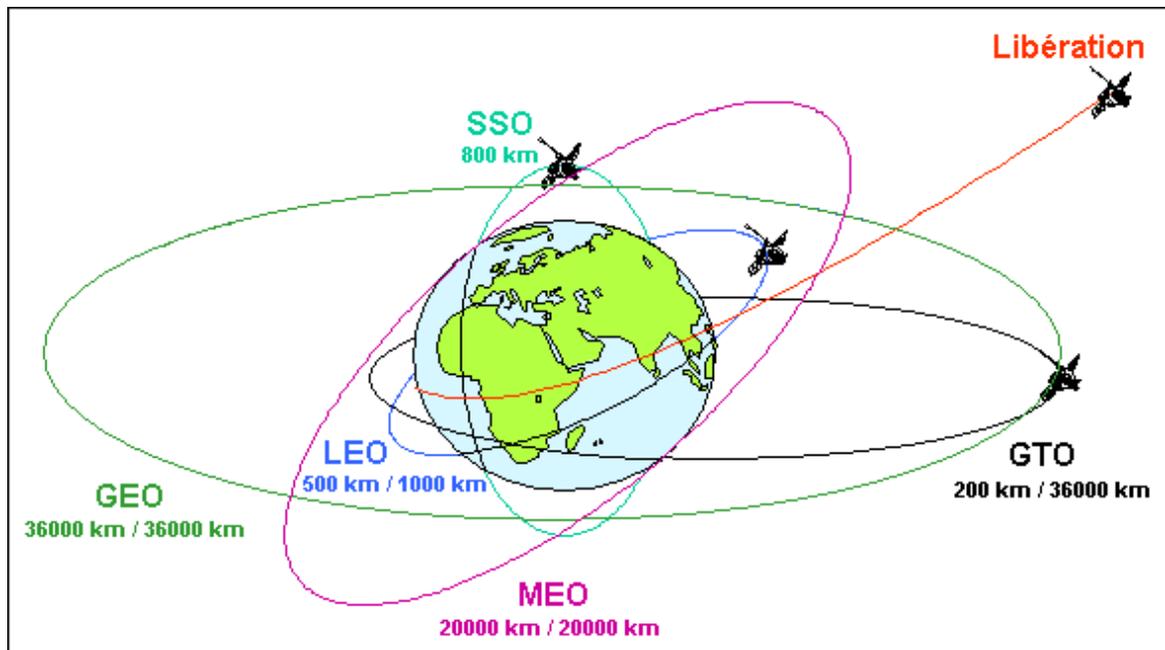
Si le mobile dépasse  $v = 16.1 \text{ km.s}^{-1}$ , le véhicule quitte l'attraction solaire. (situation 4)

### Types d'orbites :



**Les orbites circulaires** ou quasi-circulaires (LEO, MEO, GEO), dont l'altitude (basse moyenne ou haute) est choisie en fonction des objectifs de la mission.

**Les orbites elliptiques**, d'excentricité plus ou moins importante, l'un de leurs foyers coïncide avec le centre de la Terre. On y trouve en particulier les orbites de transfert géostationnaire, GTO



### Avantages des différentes orbites :

Un satellite de communication doit survoler en permanence la même région, il sera placé sur l'orbite . Il aura

Un satellite d'observation (ex : SPOT) doit survoler un site terrestre donné au cours d'orbites successives, dans les mêmes conditions d'éclairage. On le placera dans une orbite passant par les pôles et il se trouvera à environ 820 km. C'est l'orbite .

L'orbite de transfert est une orbite elliptique reliant l'orbite basse à l'orbite géostationnaire. (GTO)