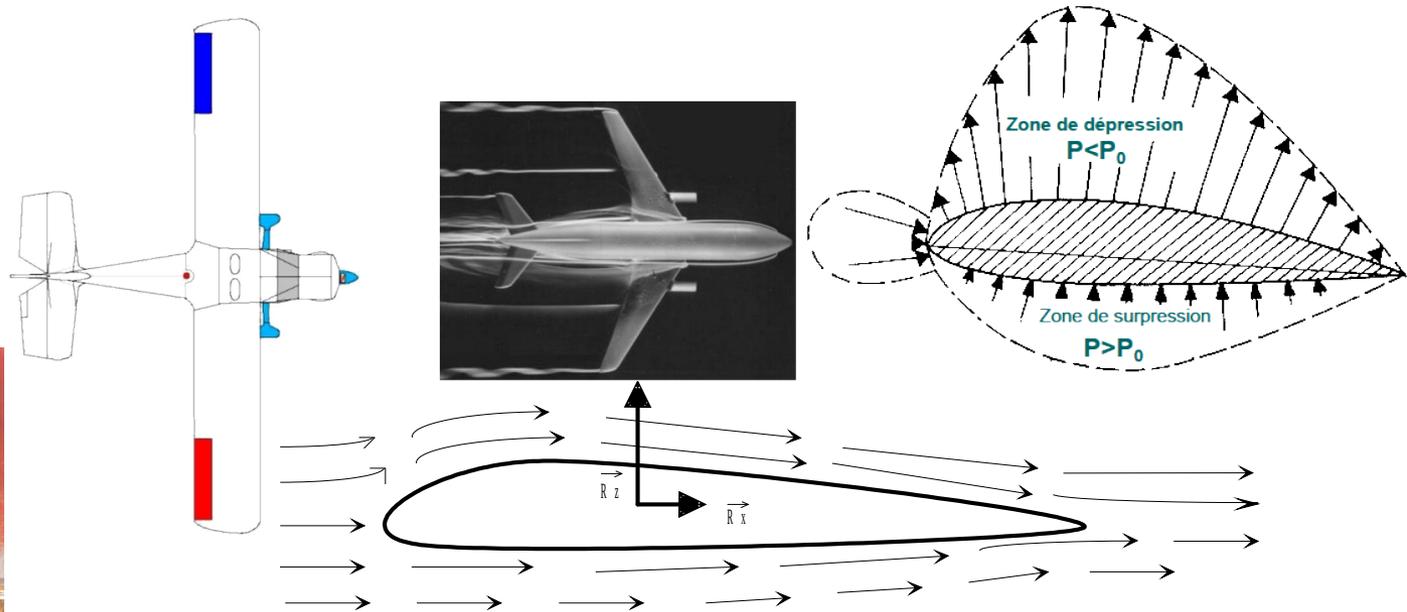




# Aérodynamique, Aérostatique Principes du vol

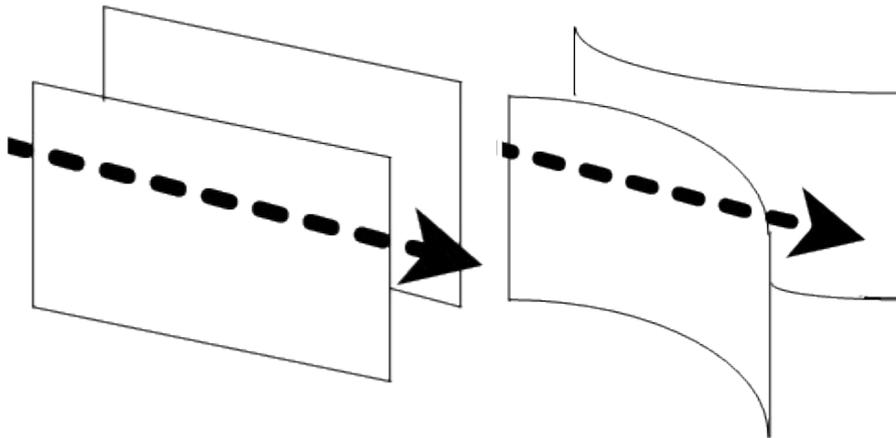
## 2.1 Sustentation et l'Aile. Notions préliminaires



# Les forces aérodynamiques

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

Créons un courant d'air entre 2 feuilles:



Loi de Bernouilli  
 $P + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = \text{constante}$

P = pression

$\rho$  = (rho) densité de l'air

V = vitesse de l'air

- l'air soufflé entre les feuilles voit sa pression diminuer du fait de l'augmentation de vitesse. Les feuilles se rapprochent: **Loi de Bernouilli: augmentation de la vitesse => diminution de la pression**

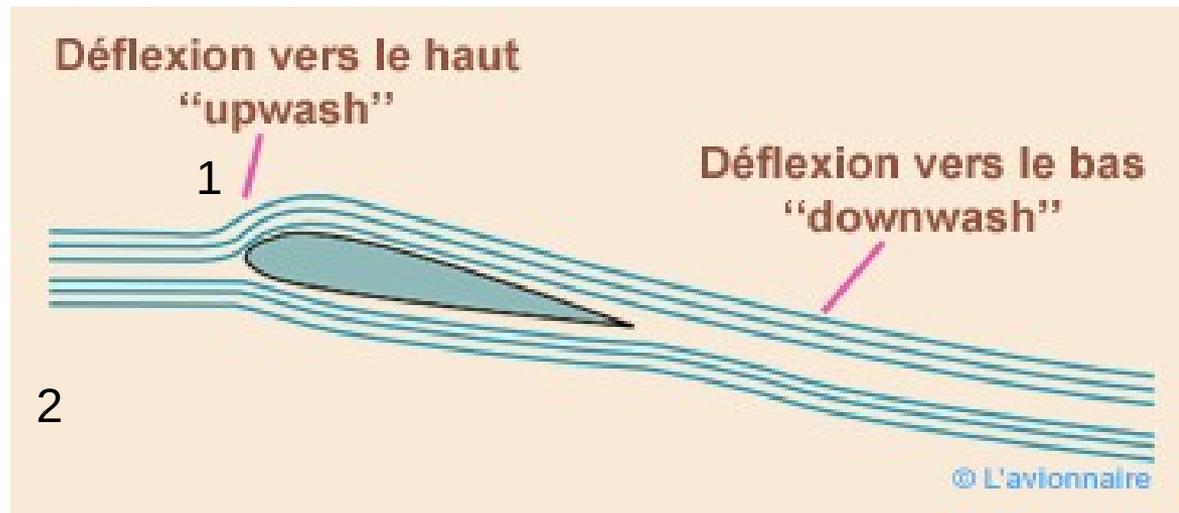
# Le trajet de l'air autour d'une aile vue de profil

Principe de Bernouilli

appliqué à une aile d'avion : trajet coté 1 plus long que trajet coté 2

$$\rightarrow V1 > V2$$

$$\rightarrow P1 < P2$$



$V1 > V2$  → la **pression** est plus faible au dessus de l'aile qu'en dessous

# Pression

## Définition:

- La pression correspond à la poussée exercée par un fluide (gaz ou liquide) sur tout corps avec lequel il est en contact.
- Si une **force** agit sur une surface donnée, la **pression = mesure de cette force par unité de surface**.

## Unité :

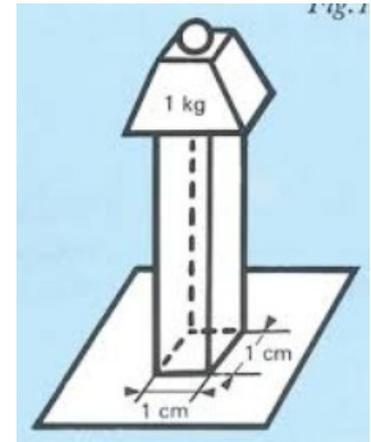
- s'exprime en  $\text{N/m}^2 = \text{Pascal (Pa)}$ . En aviation : hPa

## Autres unités :

- $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$
- $1 \text{ atmosphère (abandonné depuis 1982)} = 1013,25 \text{ hPa}$
- et aussi le psi (6895 Pa), le mm de Hg (ou Torr, = 133,2 Pa)...

$$P = \frac{F}{S}$$

P = Pression  
F = Force  
S = Surface



# Force

Une force est une action mécanique exercée par un objet A sur un objet B qui se traduit par des effets :

- de déformation
- de modification d'un mouvement (mise en mouvement, modification de trajectoire...)

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

➤ à distance (on parle de « champ » de force)

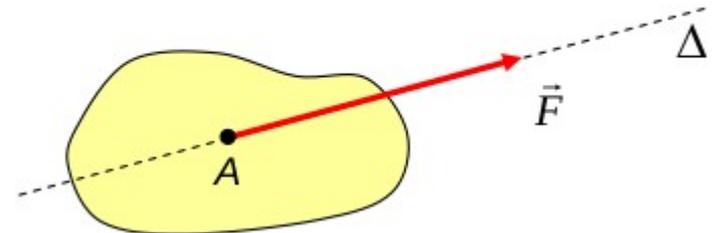
Par exemple :

- la gravité  $P = m.g$  (le champ de gravité)
- la force magnétique (attraction d'un aimant)

➤ de contact:

- l'avion par exemple est en contact avec:
  - l'air (en vol), qui lui permet de voler, mais aussi qui freine son avancée
  - le sol (atterrissage, décollage).

*Une force est représentée par un vecteur et a les propriétés d'un vecteur*

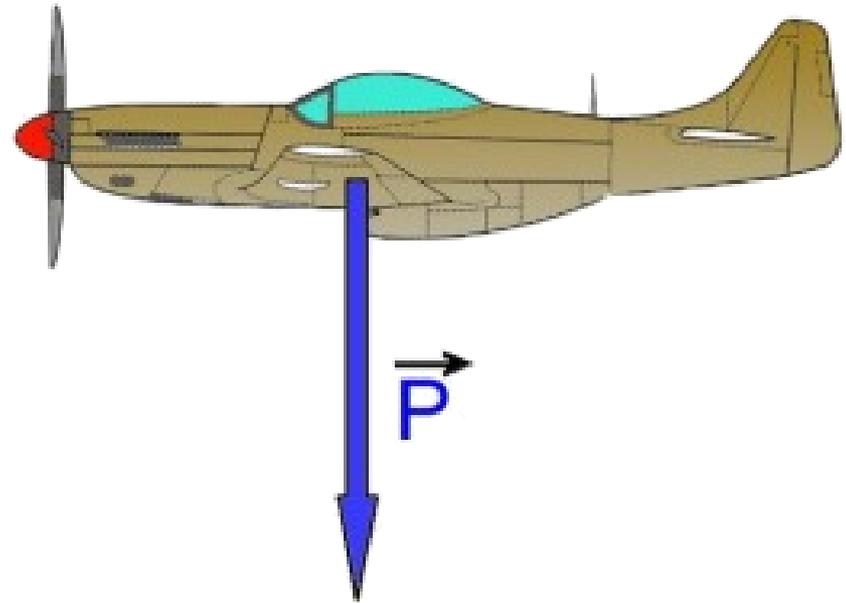


On représente les forces par un vecteur qui est défini par 4 caractéristiques :

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

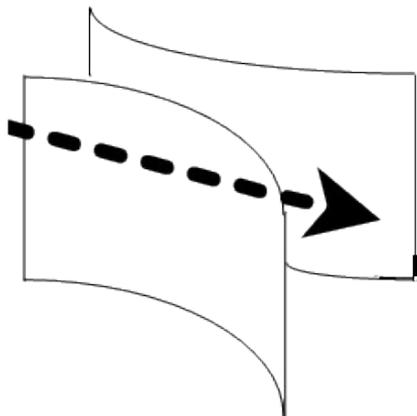
Par exemple, le poids d'un avion est une force

- verticale (sa **direction**),
- orientée vers le bas (son **sens**),
- de **module** (= **valeur**)  $P = m * g$  ( $m$  = masse de l'avion,  $g$  = la gravité terrestre),
- qui **s'applique à un point** particulier de l'avion appelé « centre de gravité »



Note : ne pas confondre le **poids de l'avion** (une force exprimée en Newton) et sa **masse** (exprimée en kilogrammes). Cette confusion est fréquente dans le langage courant. Comme  $g \sim 9,81 \text{ m/s}^2$ , on voit qu'une masse de 1 kg a un poids d'environ 9,8 N

# Vitesse



La vitesse intervient dans la loi de Bernoulli :

$$P + 1/2 * \rho * v^2 = \text{constante}$$

P = pression

$\rho$  = densité de l'air

**V = vitesse de l'air**

Dans le cas d'un avion, ce qui compte c'est la **vitesse de l'avion par rapport à l'air environnant** = sa **vitesse propre** (ou **vitesse air**, qui peut être différente de sa vitesse par rapport au sol)

## Unités utilisées en aviation pour la vitesse :

- le nœud (Nd) = 1 mille marin (1852 m) par heure
- le kilomètres par heure (km/h)
- le mach (Ma), pour les avions très rapides

pour la vitesse **verticale** :

- le mètre / seconde (m/s)
- le pied / minute (1 pied = 0,3048 m)

Calculer : 1 Nd =                      km/h ?

Calculer : 100 ft/mn =                      m/s ?

# Mach (Ma)

- Unité de mesure sans dimension = rapport entre la vitesse d'un mobile et la **vitesse du son** à l'endroit où se situe le mobile
- La vitesse du son dans un gaz varie avec sa nature et sa température => le nombre de Mach ne correspond pas à une vitesse fixe, il dépend des conditions locales.
- A 15°C et dans l'air, la vitesse du son vaut environ 340 m/s ou 1 224 km/h.
- A -56° (c.à d. vers 11000m d'altitude), elle vaut 295 m/s = 1062 km/h

$$\text{Ma} = \frac{V}{a}$$

V = la vitesse de l'objet (par rapport à son environnement)

a = la vitesse de propagation (= célérité) du son dans l'environnement considéré. **Elle ne dépend que de la température**

## Le mur du son (Mach 1)

Quand un avion atteint **la vitesse du son**, concentration de l'onde de surpression créée par l'avion → **onde de choc**, qui s'entend (le « bang » supersonique). **Ce bang accompagne l'avion tant qu'il vol à vitesse supersonique**



- ♦ A l'approche de la vitesse du son, durcissement des commandes
- ♦ Au passage de la vitesse du son, une onde de choc se forme sur l'aile, l'avion devient très instable, il vibre, il se comporte comme s'il décrochait (c'est le « **mur du son** »).
- ♦ Quand la vitesse augmente encore, l'onde de choc se forme en arrière de l'aile, l'avion redevient manœuvrable



Onde de choc visualisée par la condensation dans de l'air très humide



- 1945 - Premier passage probable du « mur du son » par Hans Guido Mücke (D), sur un Messerschmitt Me 262, en descente (badin bloqué à 1100 km/h)
- 27/9/1947 - Geoffrey de Havilland (UK) sur un De Havilland DH 108. Mais accident mortel, l'avion s'est désintégré
- 14/10/1947 – **Chuck Yeager** (USA) sur un Bell X1 largué d'un B29 (premier franchissement en vol horizontal)

# L'avion dans son milieu

Un avion évolue dans l'air

Propriétés physiques de l'air:

- 1 **expansible**
- 2 **compressible**
- 3 **élastique**
- 4 **pesant**
- 5 **visqueux**

L'air est **pesant** (on peut mesurer sa masse volumique), et il exerce une **pression** sur les surfaces avec lesquelles il est en contact.

L'air est **visqueux**, il résiste au mouvement et « colle » à l'avion

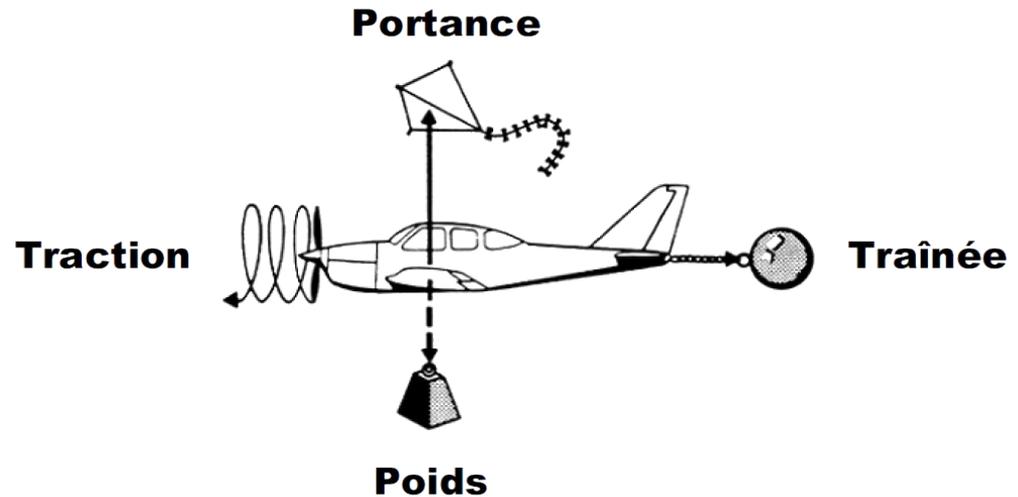
**La masse volumique de l'air** (masse par unité de volume)

- s'exprime en  $\text{kg/m}^3$

- à 15° au niveau de la mer, elle vaut  $1.225 \text{ kg/m}^3$

- si la température augmente, ou si la pression diminue, la masse volumique diminue

# Bilan des forces

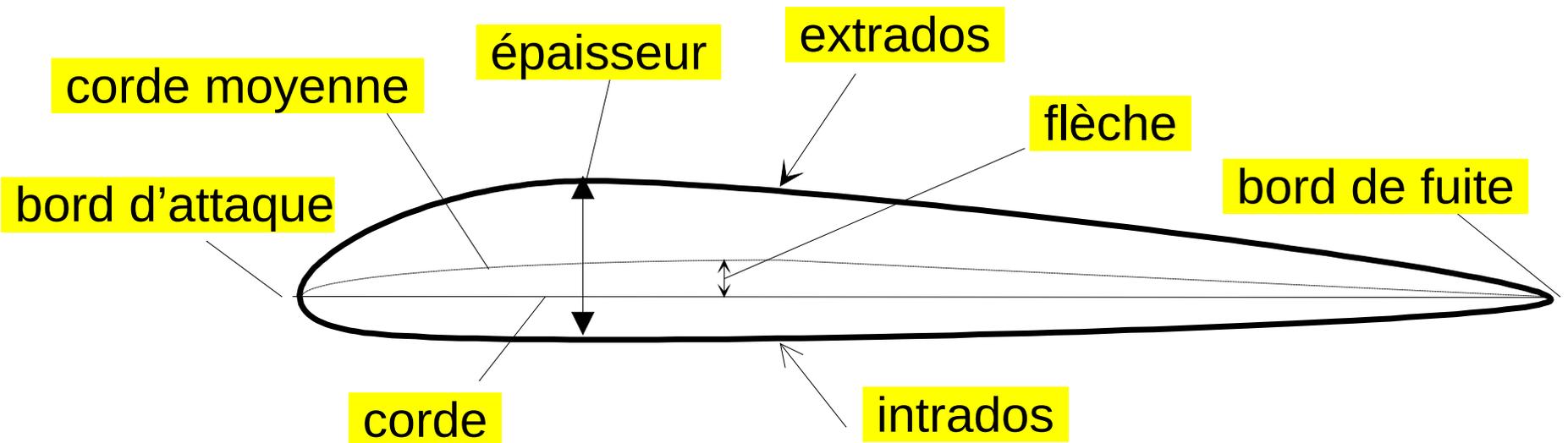


Un aéronef en vol dans l'air va être soumis à 4 forces:

- Son **poids**
- Une **force d'avancement** fournie par le moteur : **traction** (avion à hélice) ou **poussée** (avion à réaction)
- La résistance de l'air qui s'oppose à l'avancement = la **trainée**
- Une force due aux effets de pression sur l'aile quand l'avion avance : la **portance**, qui maintient l'avion en l'air

# La portance

La portance est créée par le mouvement de l'air autour de l'aile.  
Quelles sont les différentes parties d'une aile (ici, section par un plan vertical) ?



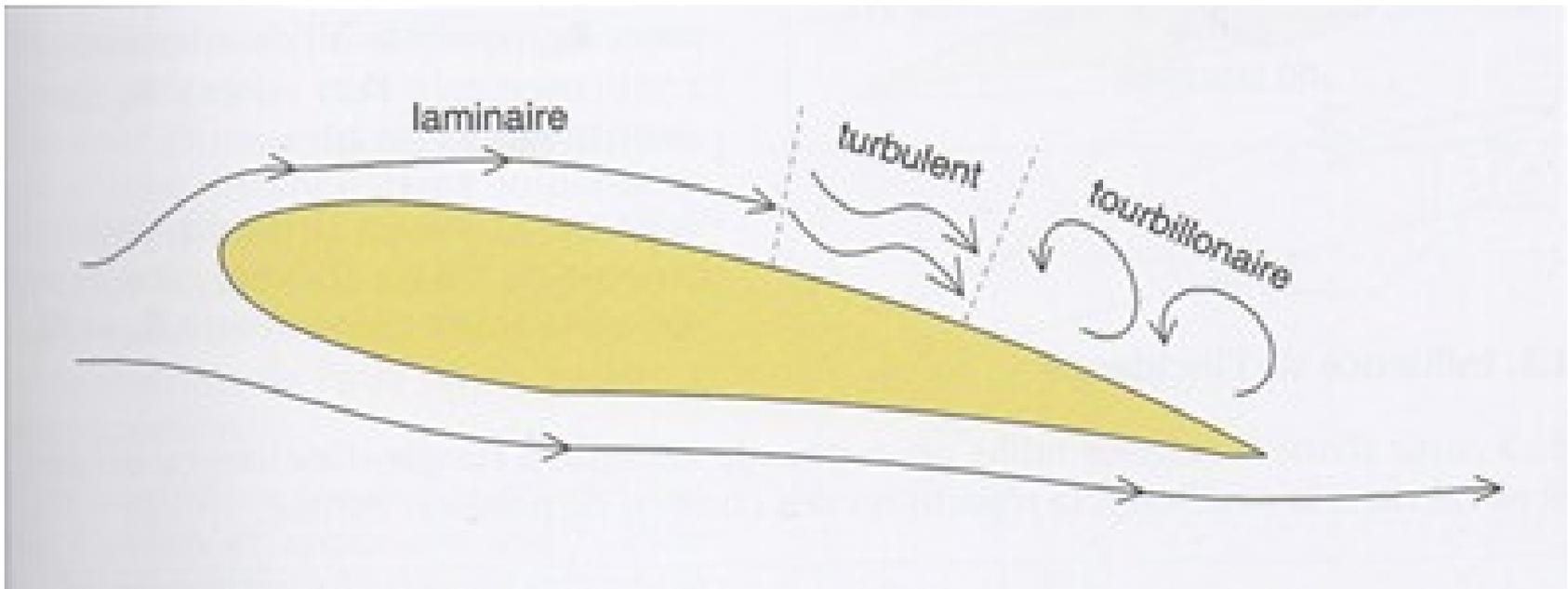
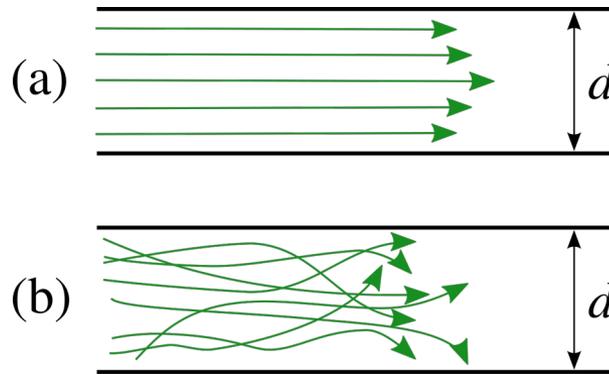
*Définitions à apprendre !*

**Autour d'une aile, l'écoulement d'air peut-être :**

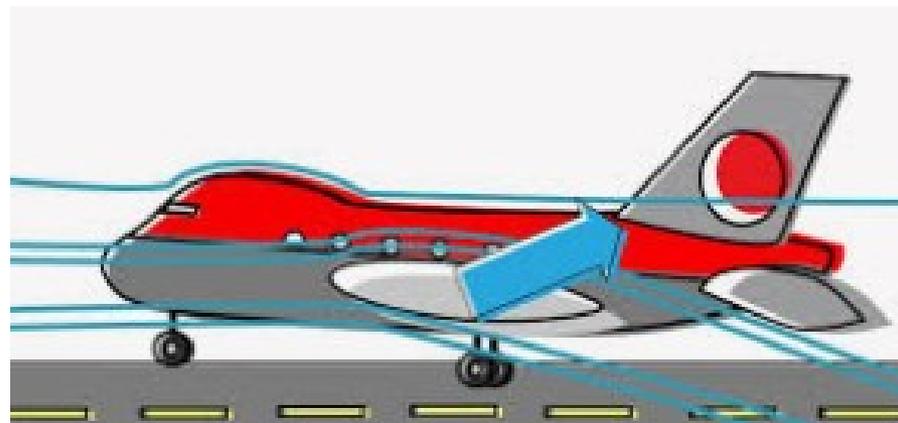
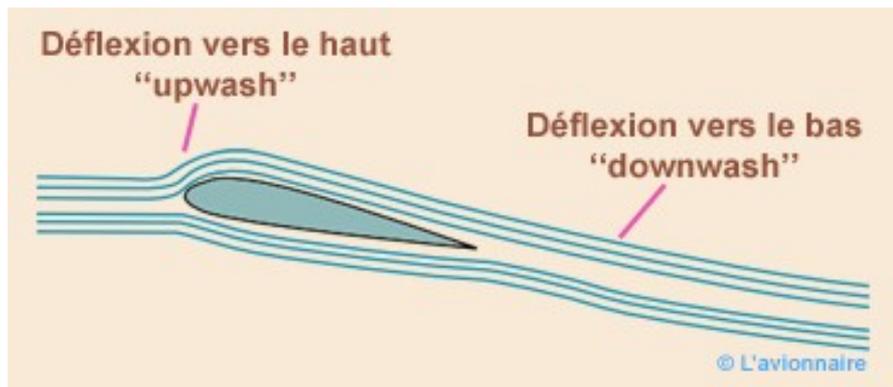
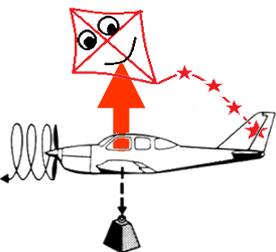
**(a) laminaire**

**(b) turbulent**

**(c) tourbillonnaire**



# La portance



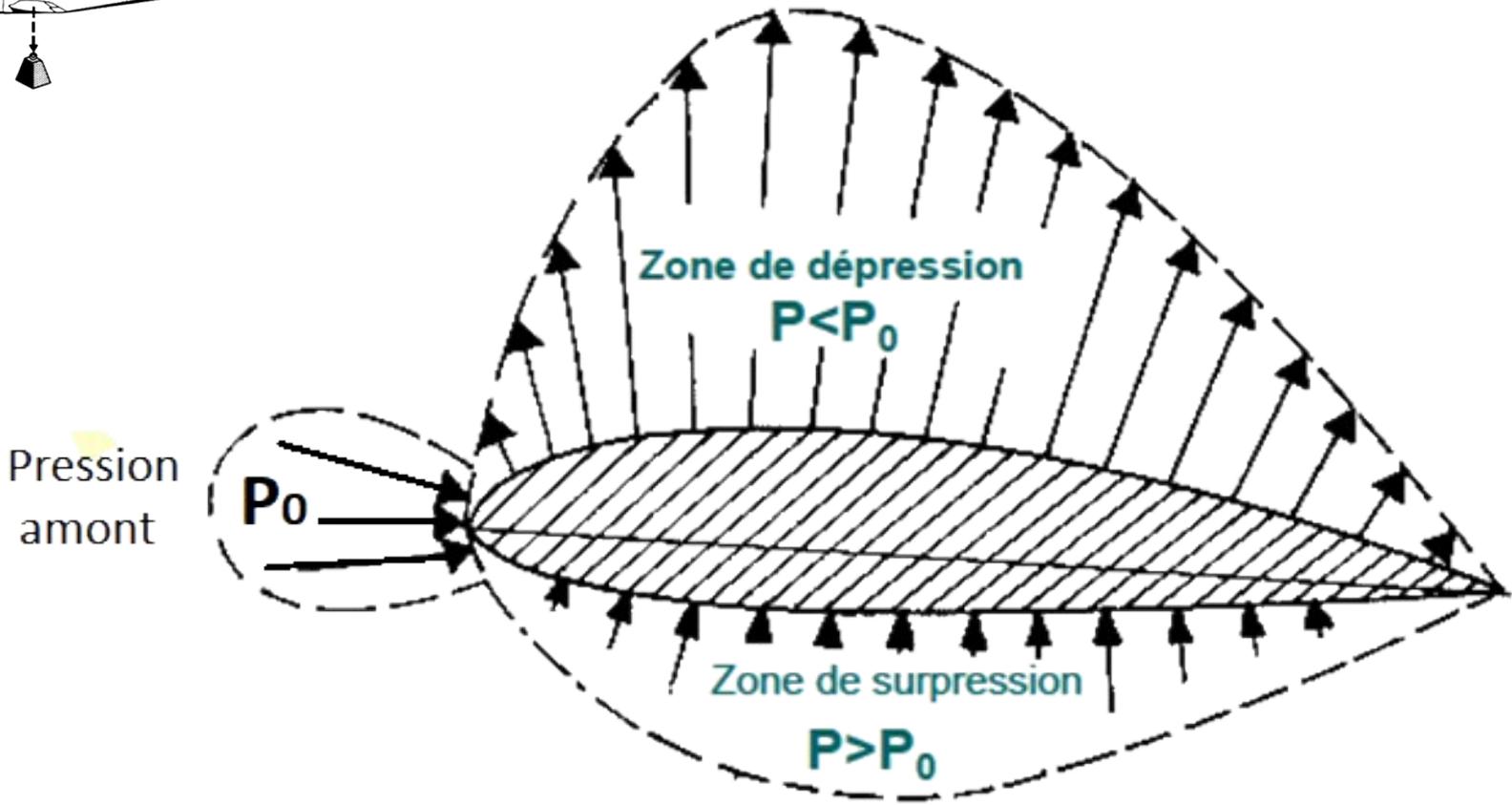
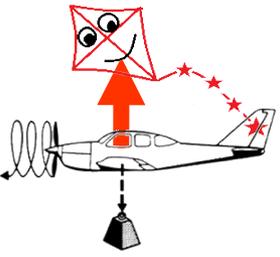
L'écoulement de l'air autour des profils aérodynamiques est **plus accéléré sur la surface supérieure (extrados) que sur la surface inférieure (intrados)** —► une dépression sur l'extrados et une surpression sur l'intrados —► force verticale orientée vers le haut (**la portance**).

Conséquence de l'inclinaison de l'aile : le flux d'air est dévié vers le bas à l'arrière de l'avion



<http://airtoair.net/gallery-vortices.htm>  
Photo: Paul Bowen

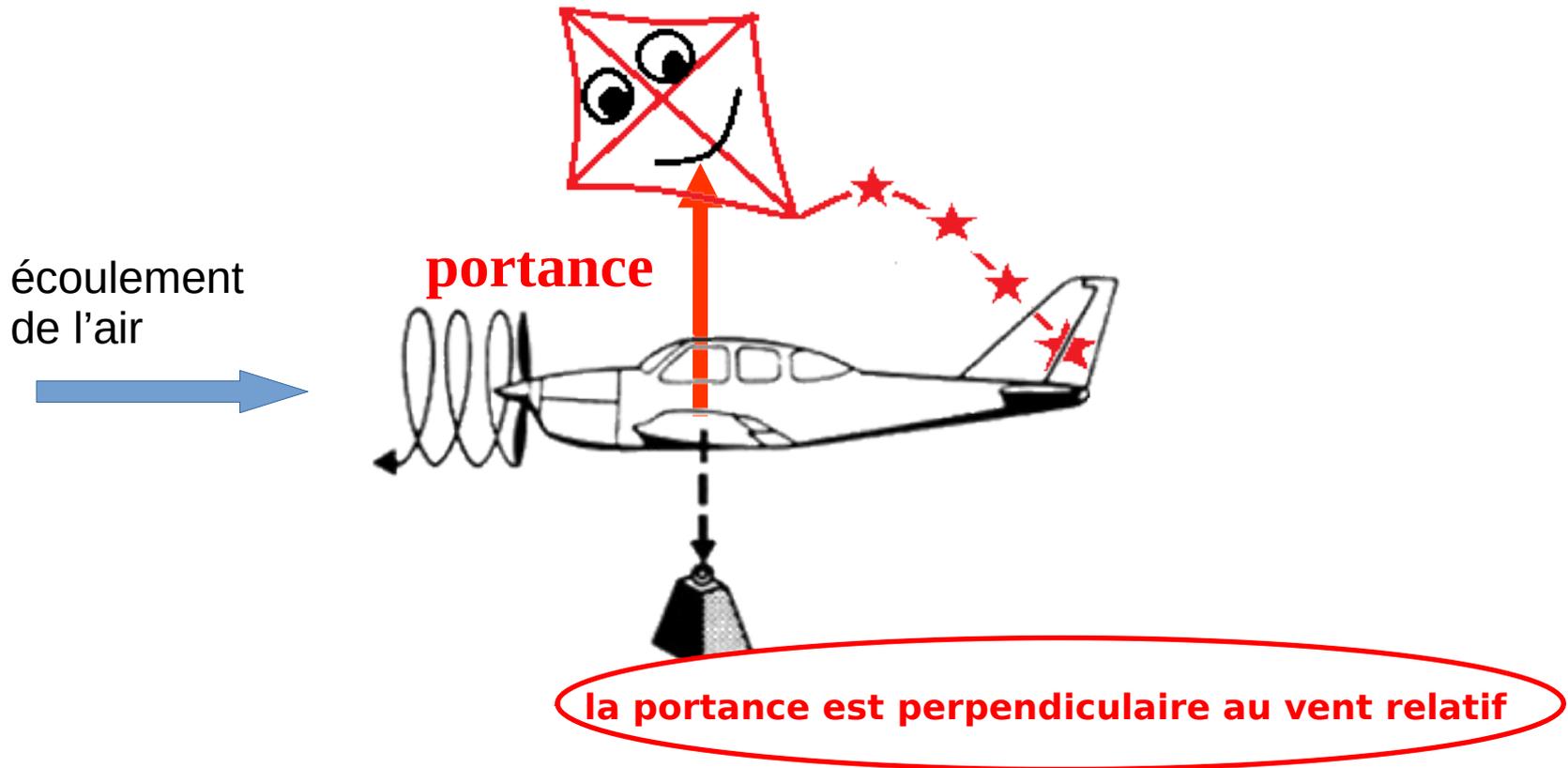
# Répartition des pressions autour d'un profil d'aile



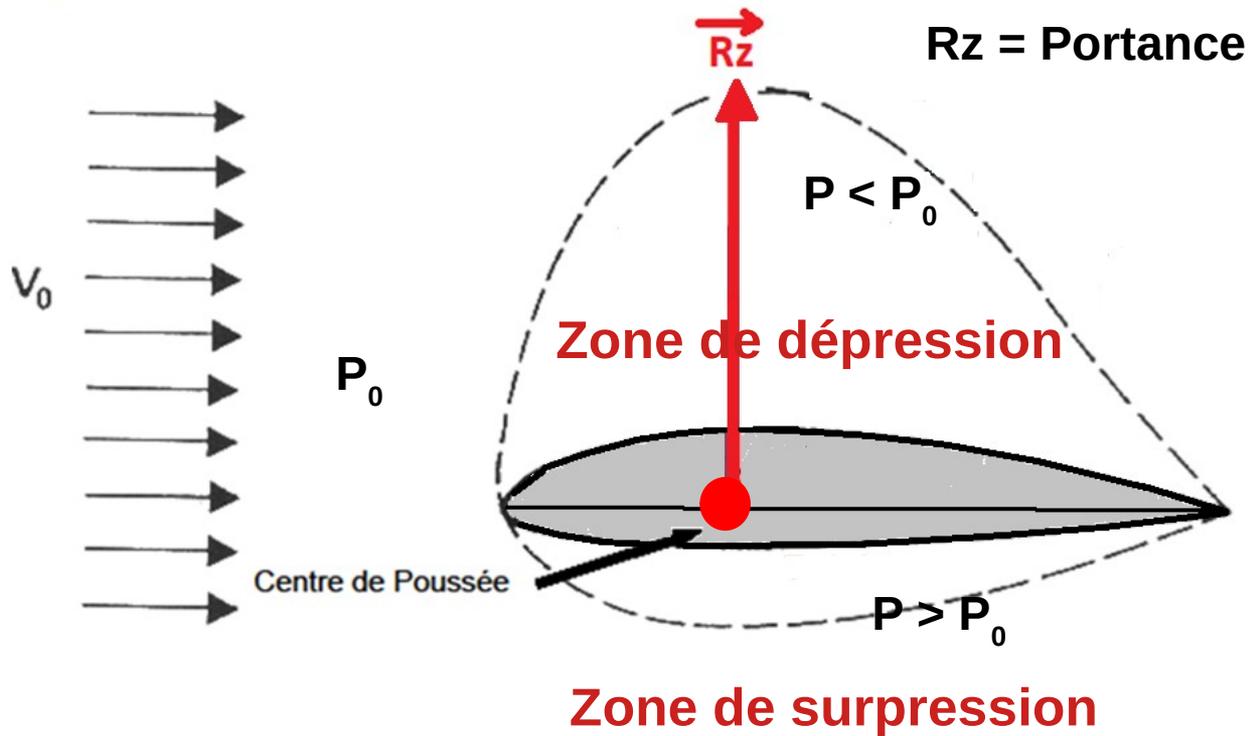
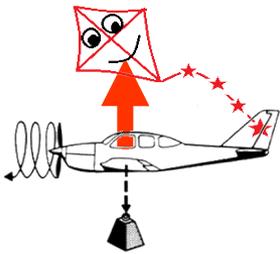
**La zone de dépression contribue pour 75 % à la portance globale de l'avion**

# La portance

**La portance ( $R_z$ ) est une force perpendiculaire à l'écoulement de l'air,**  
Qui résulte des différences de pression sur l'aile  
Elle permet de maintenir l'avion en l'air malgré sa masse



# La portance s'applique au centre de poussée



Le CP est en général à env. 25 % de la largeur de l'aile depuis le bord d'attaque, mais sa position change en fonction de la vitesse de l'avion et de l'inclinaison (incidence) de l'aile

# Valeur de la portance

Expression de la portance:

$$Rz = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot Cz$$

la portance dépend de :

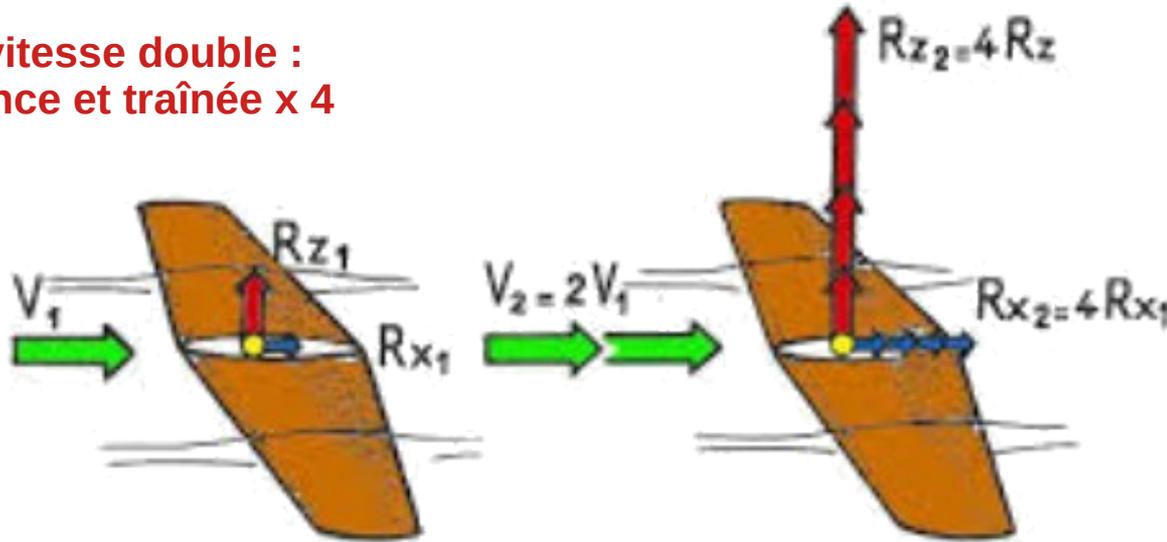
- la masse volumique de l'air ( $\rho$ , exprimée en  $\text{Kg/m}^3$ ). Diminue avec l'altitude
- la surface de l'aile  $S$  (exprimée en  $\text{m}^2$ )
- la vitesse de l'avion **dans l'air (vitesse air)** (en  $\text{m/s}$ )
- le **coefficient de portance** de l'aile  **$Cz$**  (sans dimension)

**Le coefficient  $Cz$  dépend de la forme du profil et de l'incidence de vol.**

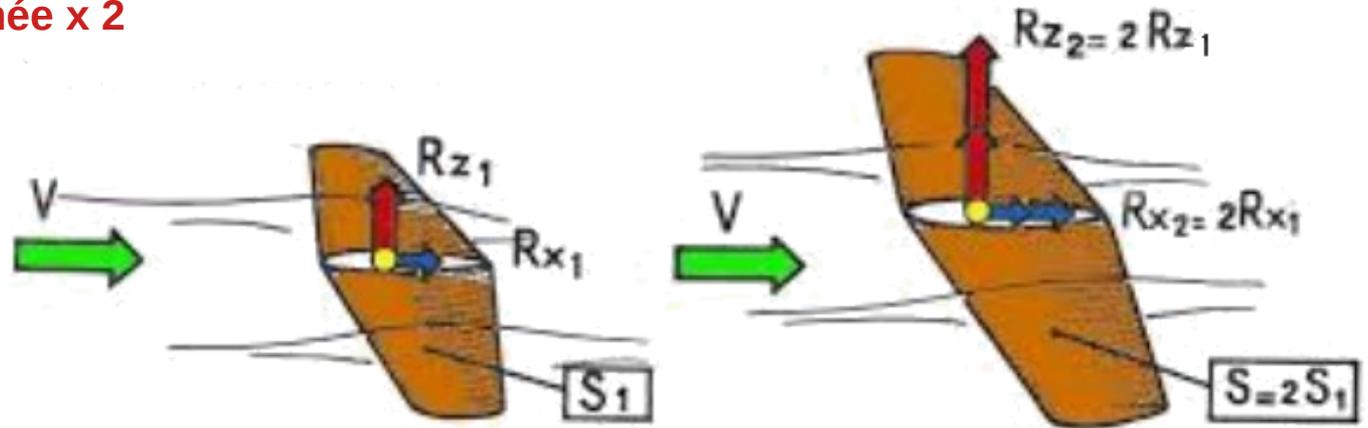
Les profils présentant des courbures importantes ont des bons  $Cz$ .

# Portance : effets de la variation de la vitesse et de la variation de la surface alaire

Si la vitesse double :  
portance et traînée x 4



Si la surface double :  
portance et traînée x 2



# Décollage et atterrissage

Le décollage d'un avion se fait **lorsque la portance devient > au poids**

**La portance dépend de la vitesse de l'avion par rapport à l'air ( $V_r$ ) et non de l'avion par rapport au sol ( $V$ )**

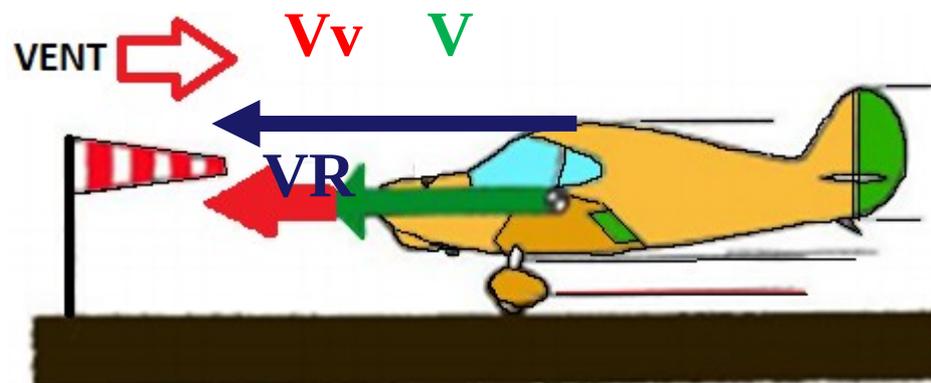
→ en cas de vent, il y aura un **sens préférentiel de décollage et d'atterrissage**

## Vent de face:

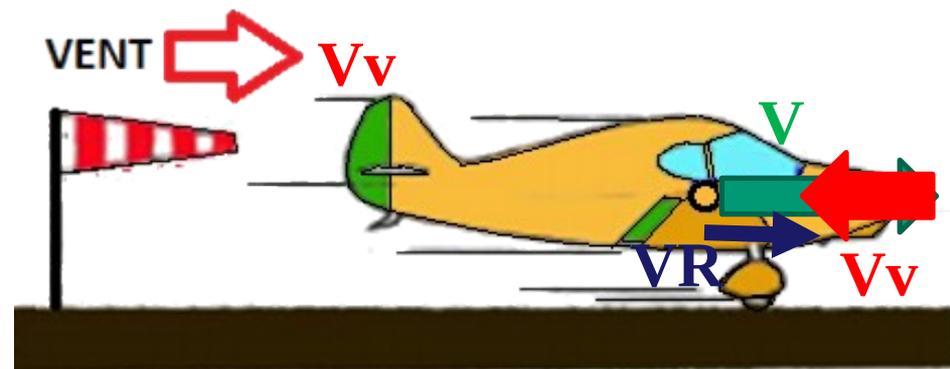
la vitesse du vent  $V_v$  s'ajoute à la vitesse  $V$  de l'avion pour donner une vitesse relative  $V_r$  de l'avion par rapport à l'air plus grande que  $V$ .

La vitesse de décollage (fonction de  $V_r$ ), est atteinte rapidement, la distance de roulage est courte. **Le décollage est donc facilité face au vent.**

**Vent de dos**, la distance de roulage peut s'allonger considérablement ( $V_r < V$ ). **Cela peut constituer un grave danger**



$$V_R = V_v + V$$



## Des exemples de QCM d'examen sur la partie de cours qui précède

**Sur le profil de l'aile, la vitesse de l'écoulement de l'air :**

- |    |  |
|----|--|
| a) | est constante sur l'intrados et l'extrados.        |
| b) | diminue sur l'intrados et augmente sur l'extrados. |
| c) | diminue sur l'extrados et augmente sur l'intrados. |
| d) | diminue sur l'intrados et l'extrados.              |

**Les paramètres intervenant dans la formule de la portance sont :**

- |    |   |
|----|---|
| a) | la vitesse et la surface alaire de l'aile.        |
| b) | la masse volumique et le poids de l'avion.        |
| c) | le coefficient de portance et le poids des ailes. |
| d) | la vitesse et le coefficient de traînée.          |

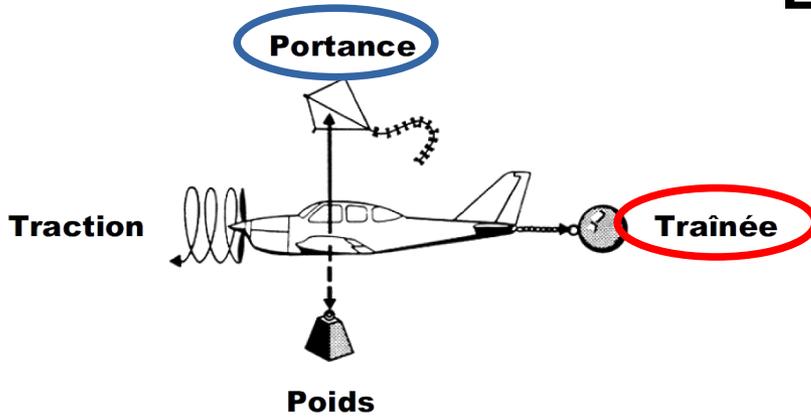
**En vol normal, sur ce profil, l'écoulement entre le point A et le point T est :**



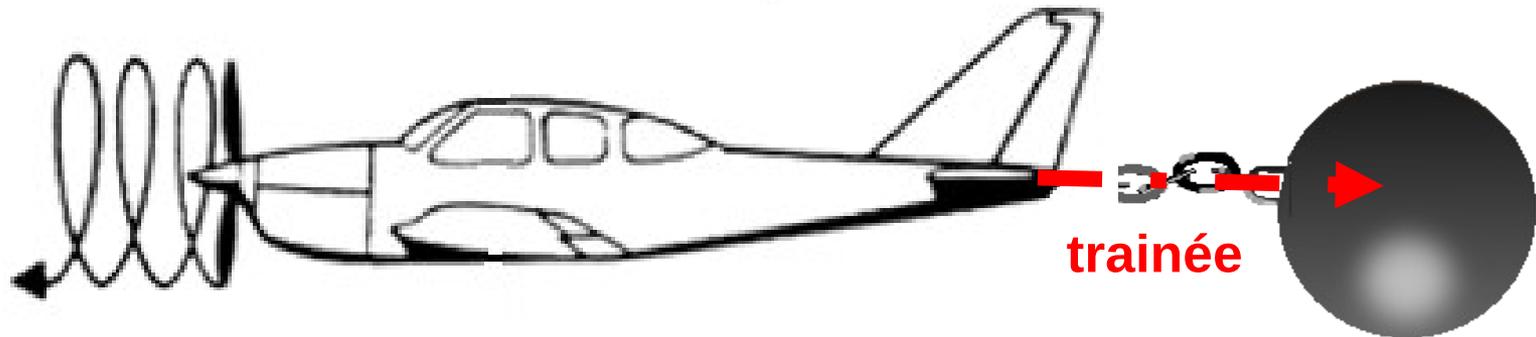
- |    |                       |
|----|-----------------------|
| a) | tourbillonnaire.      |
| b) | turbulent.            |
| c) | de vitesse constante. |
| d) | laminaire.            |

# Les forces aérodynamiques

## La traînée

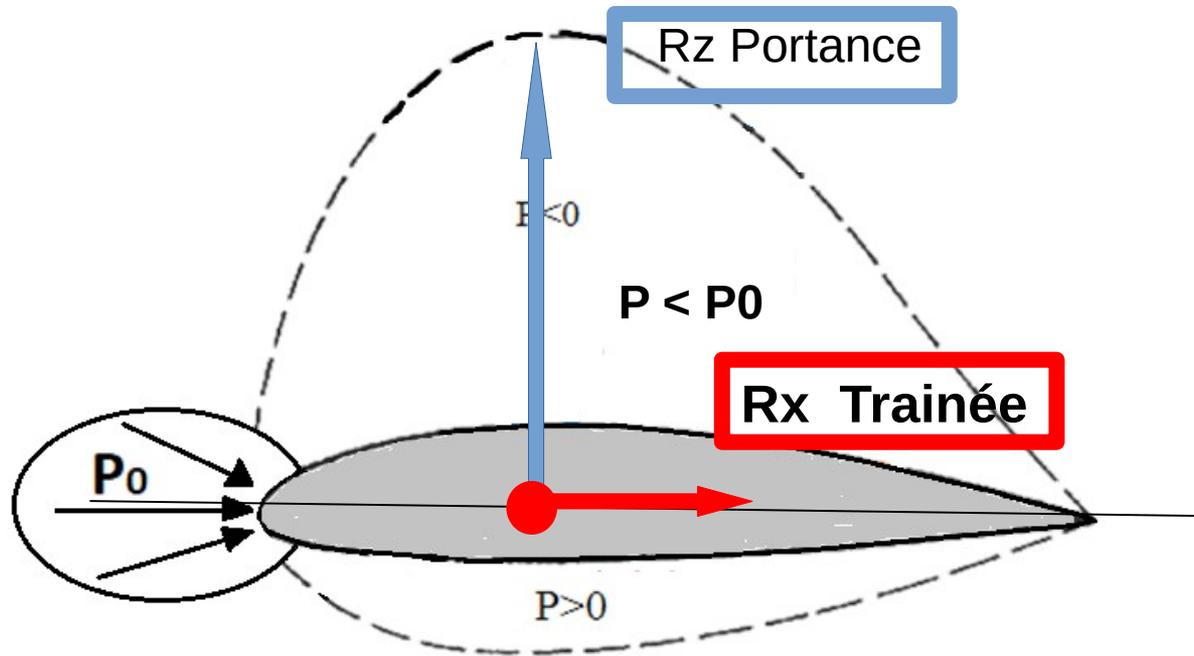
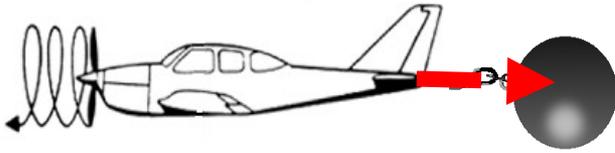


Un mal obligatoire... : la traînée ( $R_x$ ), une force parallèle au déplacement



**La traînée est la résistance rencontrée par un corps qui passe à travers un fluide (l'air est un fluide).**

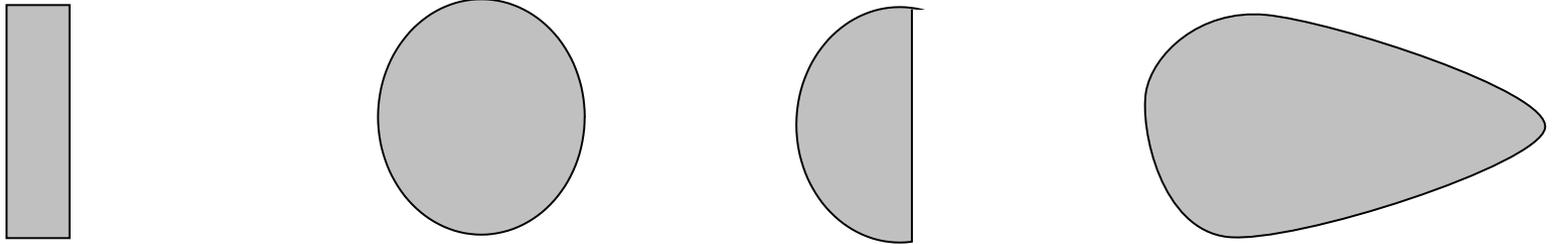
# La traînée



Comme la portance, la traînée s'applique au **centre de poussée** de l'avion

# Étude de la traînée

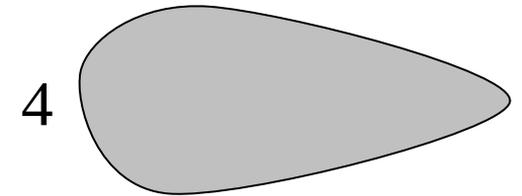
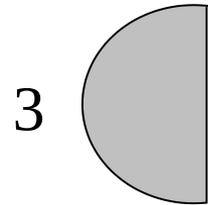
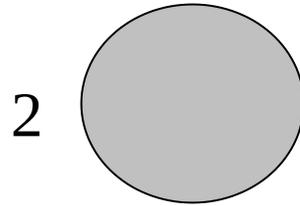
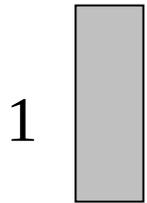
## Influence de la forme du mobile



On va tester en soufflerie 4 formes différentes et voir l'impact sur la traînée. **Toutes les formes ont la même surface frontale.**

# Étude de la traînée

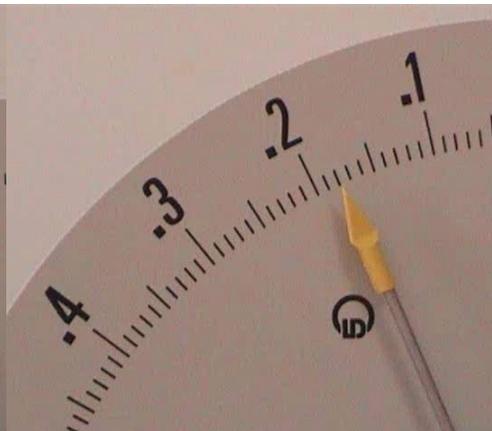
## Influence de la forme du mobile



**3,5 N**



**1,9 N**



**1,8 N**



**1,0 N**

**La traînée est donc très dépendante de la forme !**

# Étude de la traînée

## Les différentes traînées :

La traînée d'un profil résulte des forces de pression dans l'axe de l'avion. Toutefois on peut la décomposer en trois parties distinctes :

Traînée :

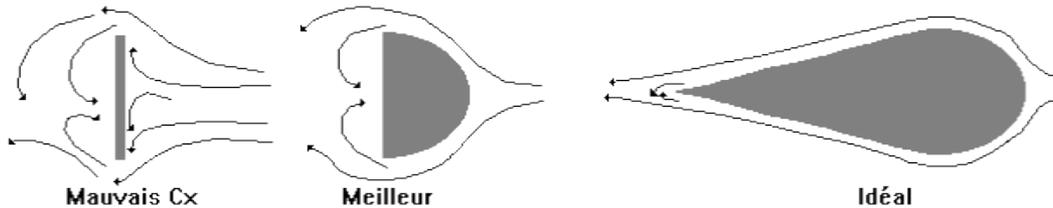
- **de forme**
- **de frottement**
- **induite**



# Étude de la traînée

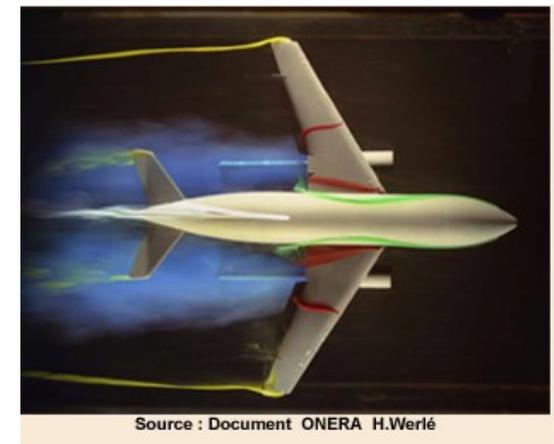
- **Traînée de forme:**

Dépend de la **forme (dessin) du profil**. Les différents profils engendrent des écoulements différents.



- **Traînée de sillage (ou : de frottement)**

Elle dépend de la **viscosité de l'air** et de la **qualité de la surface de l'avion**. Un avion sale engendre de la traînée

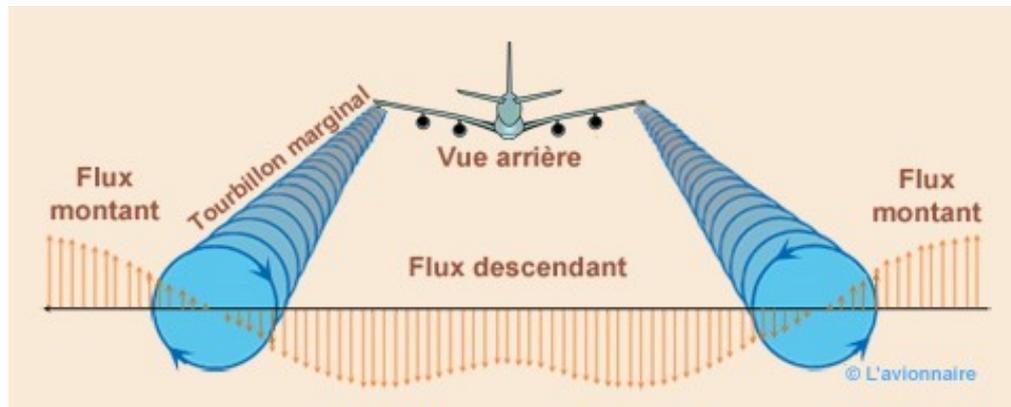


Source : Document ONERA H.Werlé

# Étude de la traînée

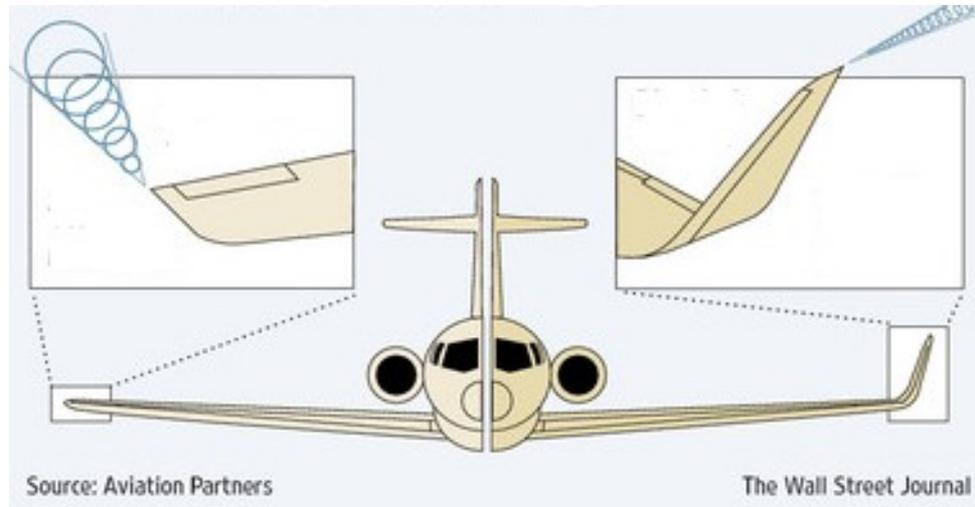
- **Traînée induite**

Est liée aux différences **de pression** entre l'intrados et l'extrados de l'aile (qui engendrent la portance). L'air du dessous du profil a tendance à **remonter** vers le dessus au niveau des saumons d'aile. Cela crée des tourbillons que l'on appelle **tourbillons marginaux**.



# Comment réduire la traînée induite ?

1. Avoir des ailes les plus longues possible (grande envergure)
2. Ajouter des winglets ou sharklets en bout d'aile.



AIPBIA



# La traînée

Expression de la traînée:

$$R_x = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot C_x$$

*(expression presque identique à celle de la portance !)*

La traînée dépend de :

- la masse volumique de l'air. Diminue avec l'altitude (exprimée en Kg/m<sup>3</sup>)
- la surface de l'aile S (exprimée en m<sup>2</sup>)
- la vitesse de l'avion **dans l'air (vitesse air)** (en m/s)
- le **coefficient de traînée** de l'aile C<sub>x</sub> (sans dimension)

C<sub>x</sub> dépend de la forme du profil et de l'incidence de vol. Il augmente continuellement avec l'incidence

L'expression de la trainée et de la portance ne diffèrent qu'au niveau de  $C_x$  et  $C_z$

**Quelle unité pour C ?**

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

$$R_x = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_x$$

pression dynamique,  
(même valeur pour  $R_x$  ou  $R_z$ )

$\rho$  = masse volumique =  $M.L^{-3}$

$V$  = vitesse =  $L.T^{-1}$

$S$  = surface alaire =  $L^2$

$R$  = une force =  $M.\gamma = M.L.T^{-2}$

$\gamma$  (gamma) = accélération  
= variation de vitesse/sec  
=  $(L.T^{-1}).T^{-1} = L.T^{-2} = m/s^2$

en écrivant l'expression à l'envers :

$$\begin{aligned} C_z &= R_z / (\frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot S) \\ &= (M.L.T^{-2}) / (M.L^{-3}) \cdot (L.T^{-1})^2 \cdot L^2 \\ &= M.L.T^{-2} / M.L.T^{-2} \\ &= 1 \end{aligned}$$

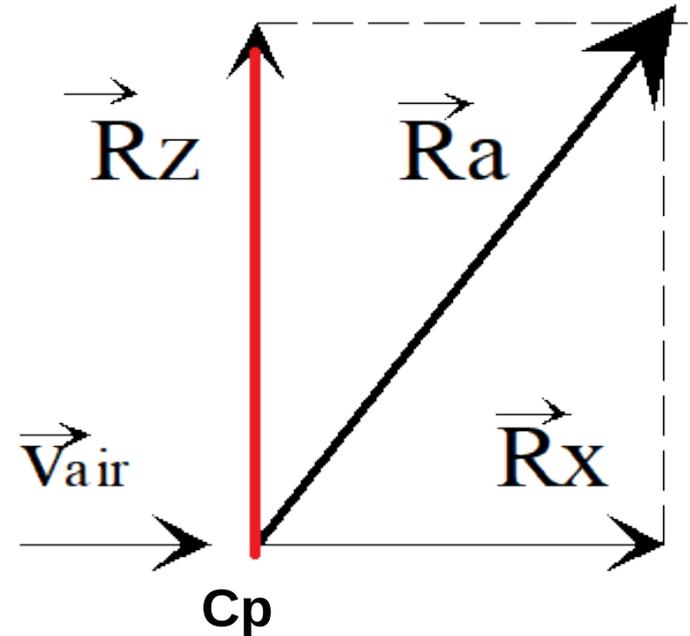
**On voit que C n'a pas d'unité. C'est un « nombre sans dimension »**

# En combinant portance et traînée : la résultante aérodynamique

Les actions de l'air se décomposent donc en deux forces  $R_z$  et  $R_x$

Dans le cas d'une trajectoire horizontale :

- la **portance  $R_z$** , **perpendiculaire à la vitesse de l'air** (ou trajectoire), est verticale.  **$R_z$  équilibre le poids**
- la **traînée  $R_x$** , **parallèle à la vitesse de l'air** (ou trajectoire) et de même sens, est horizontale



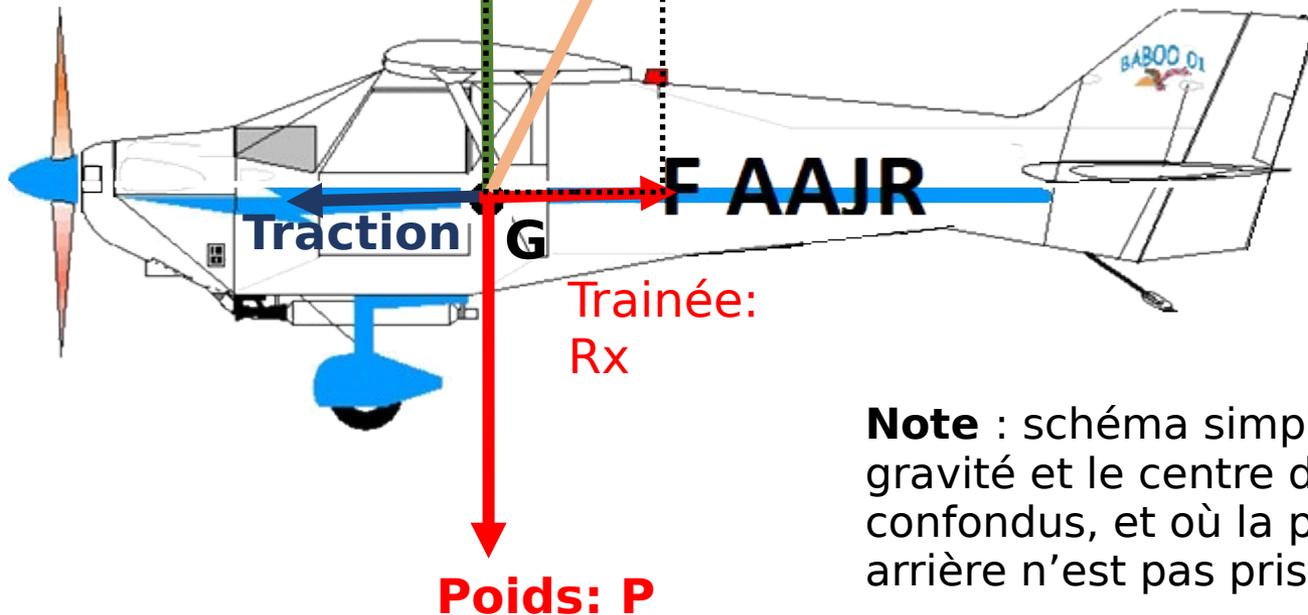
La somme vectorielle de ces deux forces constitue **la résultante** des forces aérodynamiques  **$R_a$** . Elle s'applique au **centre de poussée**

# Les forces appliquées à l'avion

on est dans le cas du vol horizontal....

Portance:  
 $R_z$   $R_a$

La portance  $R_z$  équilibre le poids  $P$   
La traction équilibre la trainée



**Note** : schéma simplifié, où le centre de gravité et le centre de poussée sont confondus, et où la portance du plan arrière n'est pas prise en compte

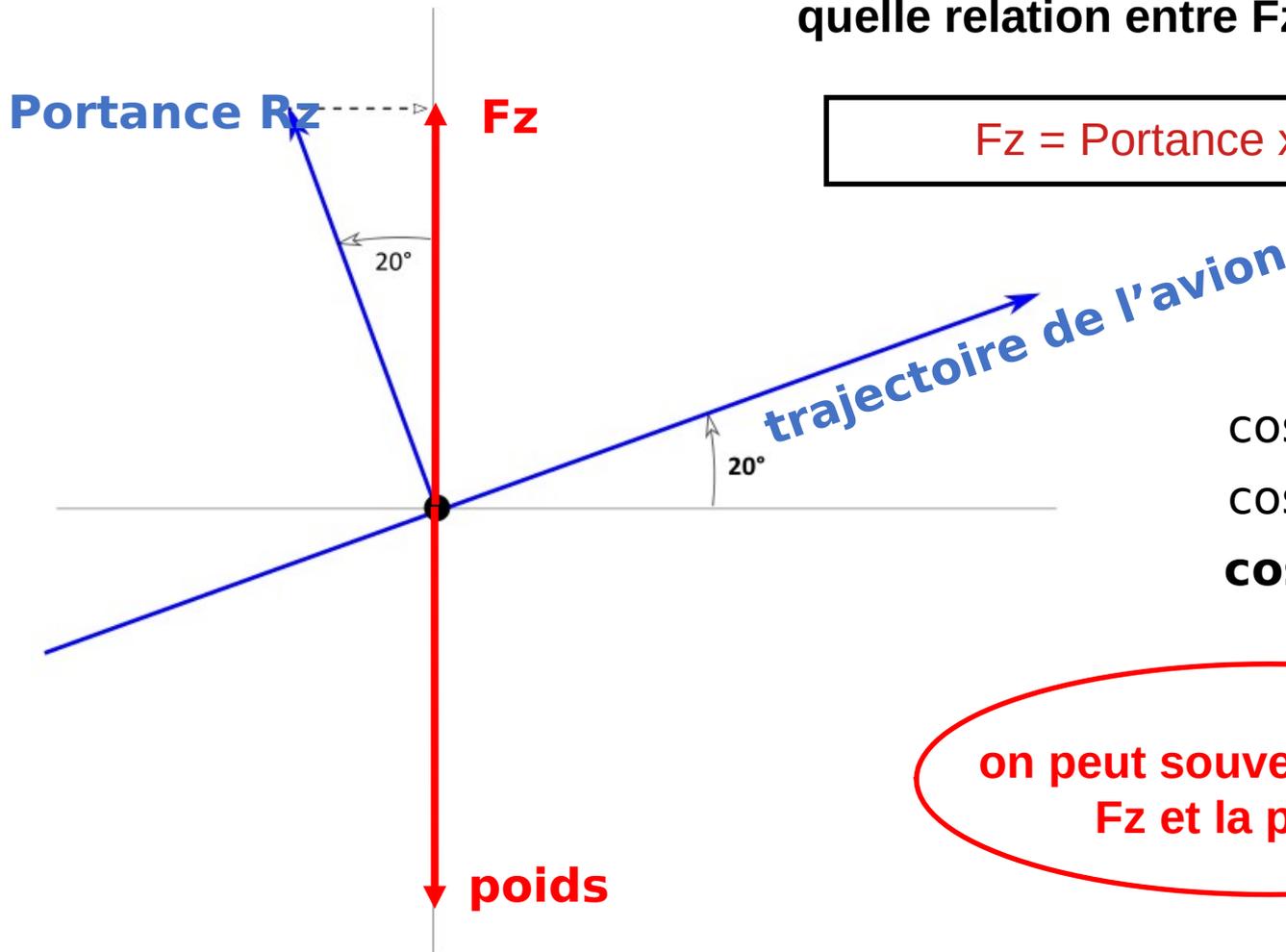
En vol horizontal, la portance équilibre le poids

et si l'avion monte ou descend ?

Fz doit équilibrer le poids

quelle relation entre Fz et la portance ?

$$Fz = \text{Portance} \times \cos(20^\circ)$$



$$\cos(20^\circ) = 0,94$$

$$\cos(10^\circ) = 0,98$$

$$\cos(5^\circ) = \mathbf{0,996}$$

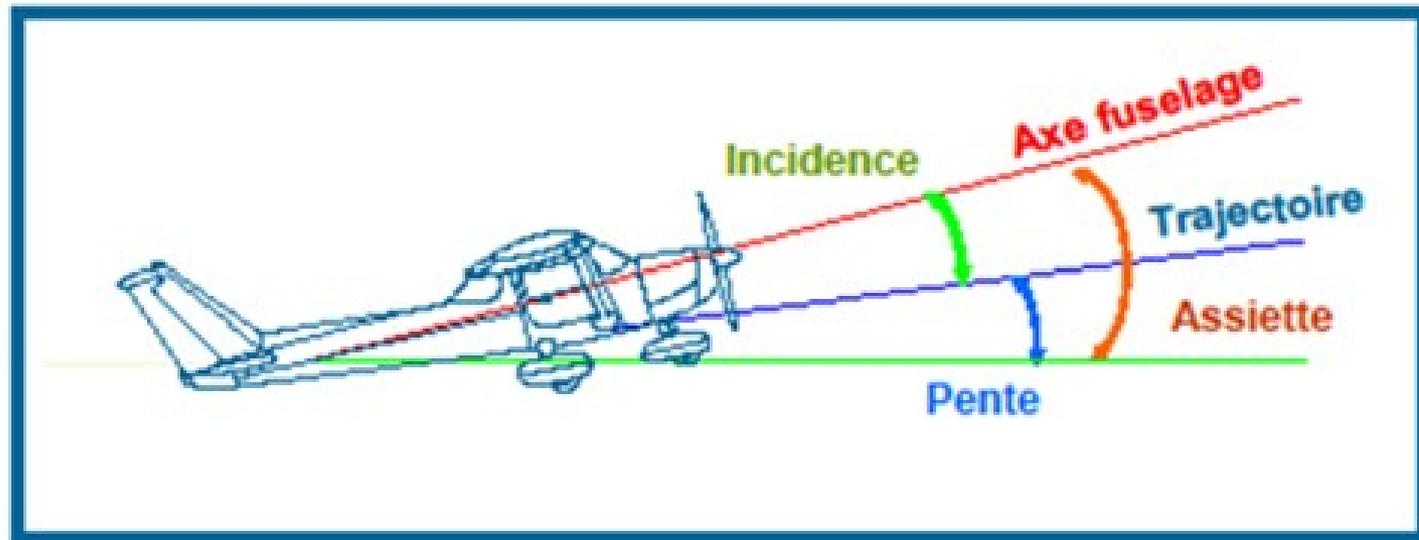
on peut souvent confondre  
Fz et la portance

# Incidence, Pente et Assiette

**Incidence** = angle entre **trajectoire (ou vent relatif)** et **axe du fuselage**

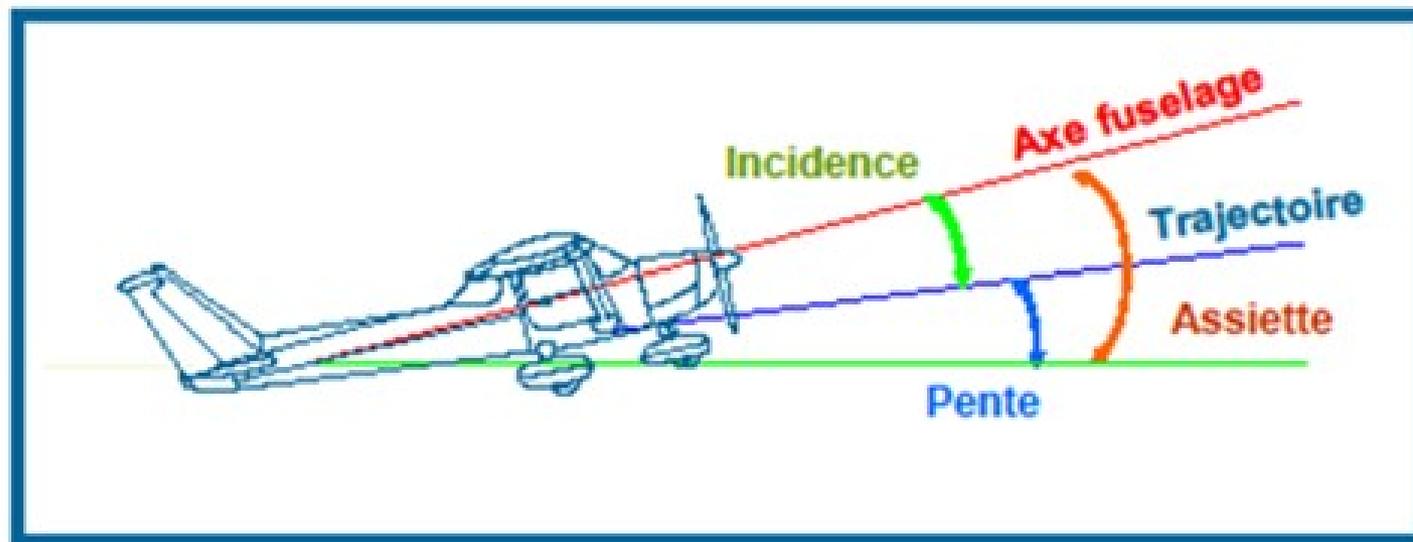
**Pente** = angle entre **trajectoire** et **horizontale**

**Assiette** = angle entre **axe du fuselage** et **horizontale**

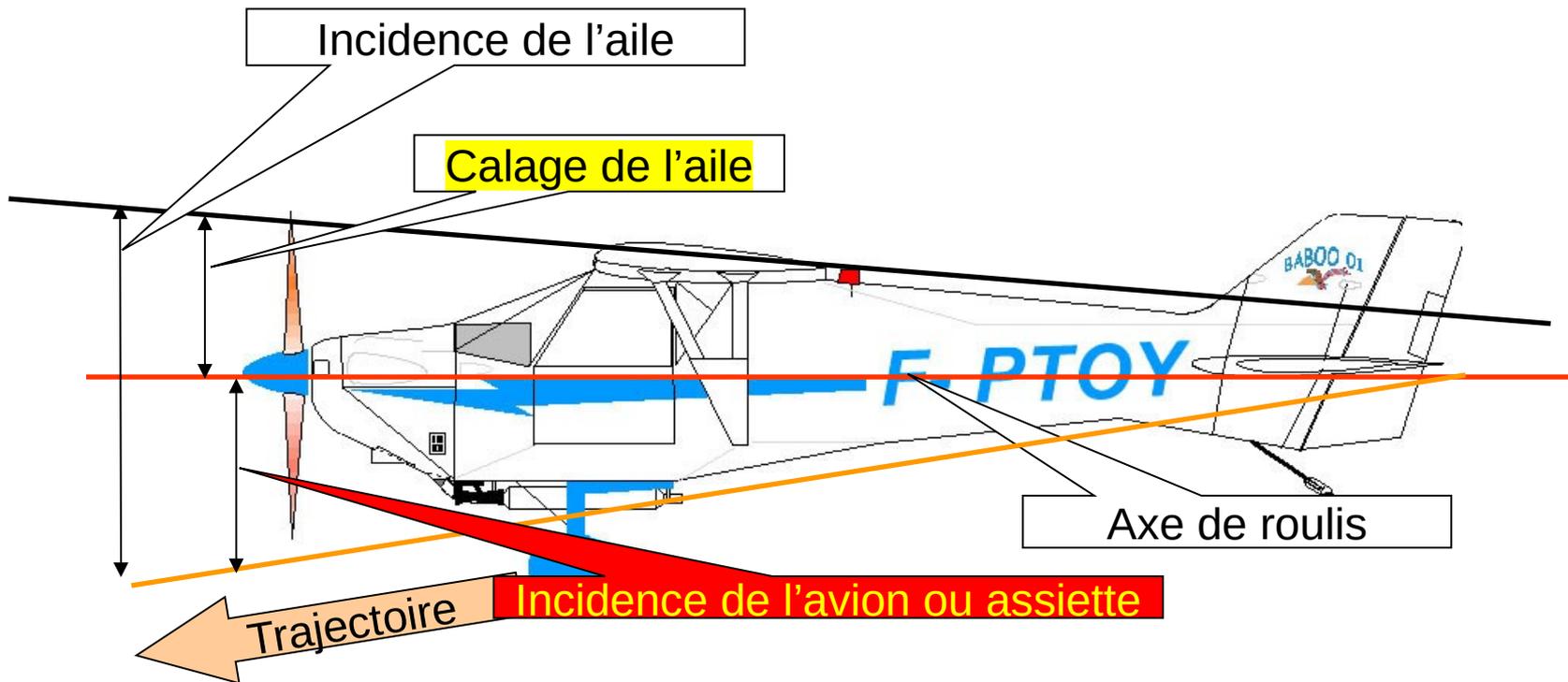


# Incidence, Pente et Assiette

- Assiette = Pente + Incidence
- **Pente**
  - Positive quand trajectoire au dessus de l'horizon
  - Négative quand la trajectoire est au dessous de l'horizon
- **Assiette**
  - Positive quand l'axe de référence est au dessus de l'horizon
  - Négative quand l'axe de référence est au dessous de l'horizon



# Incidence, pente, assiette et **calage de l'aile**

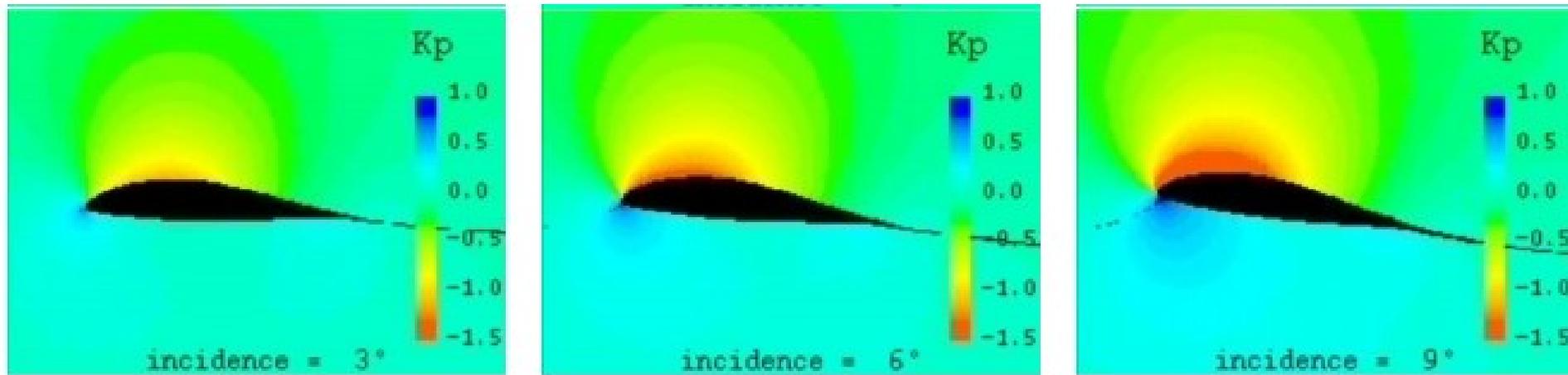


Le **calage de l'aile** est l'angle formé par la corde de l'aile et l'axe de roulis

L'**angle d'incidence de l'avion** est défini comme étant celui entre l'axe longitudinal (axe de roulis) et la trajectoire (ou la direction du vent relatif)

# Influence de l'incidence sur la portance

Une expérience en soufflerie, à vitesse du flux d'air constante :  
**variation de pression sur l'aile** pour une incidence de  $0^\circ$  à  $+9^\circ$



**Quand l'incidence augmente :**

- on remarque l'augmentation de la dépression sur l'extrados → **augmentation de portance**
- une augmentation de la surpression sur l'intrados → **augmentation de la portance**
- **le centre de poussée se déplace vers l'avant de l'aile**

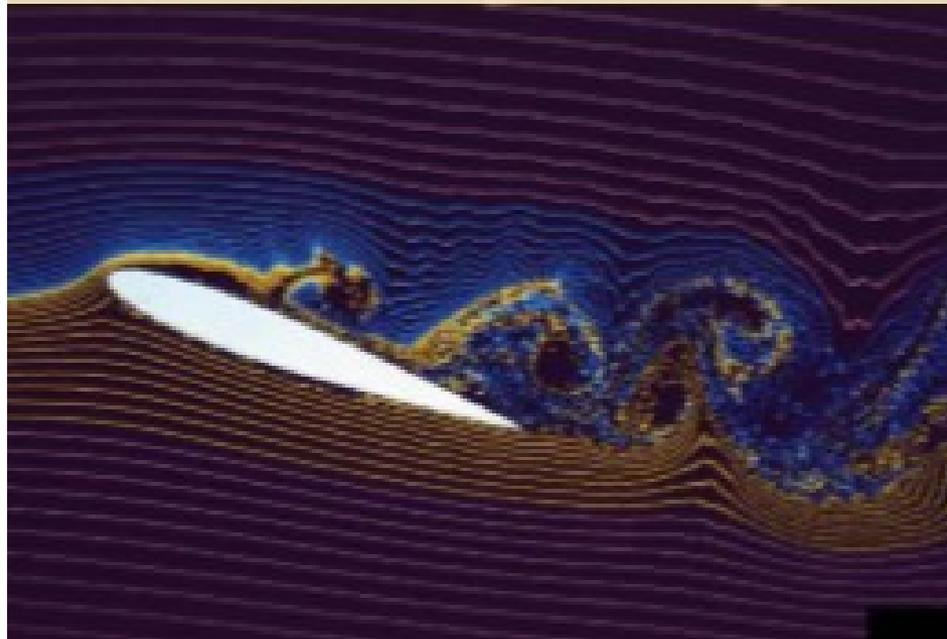
# Influence de l'incidence sur la portance, décrochage

- Lors des différentes phases de vol (montée, vol en palier, descente), l'incidence varie. **Le centre de poussée  $C_p$  se déplace sur l'aile** (30 à 50% de la corde depuis le bord d'attaque)
- Si le centre de poussée dépasse une certaine limite vers l'avant (**incidence limite**), l'avion **décroche** (il fait une abattée = basculement de l'avion vers l'avant)
- Si le **décrochage est symétrique** (les deux ailes décrochent en même temps), il suffit de diminuer l'incidence (pousser sur le manche) pour reprendre l'avion en mains
- Si le **décrochage est dissymétrique** (une seule des deux ailes décroche), l'avion part en vrille, parfois irrécupérable

# Influence de l'incidence sur la traînée

**La traînée augmente en continu avec l'incidence.**

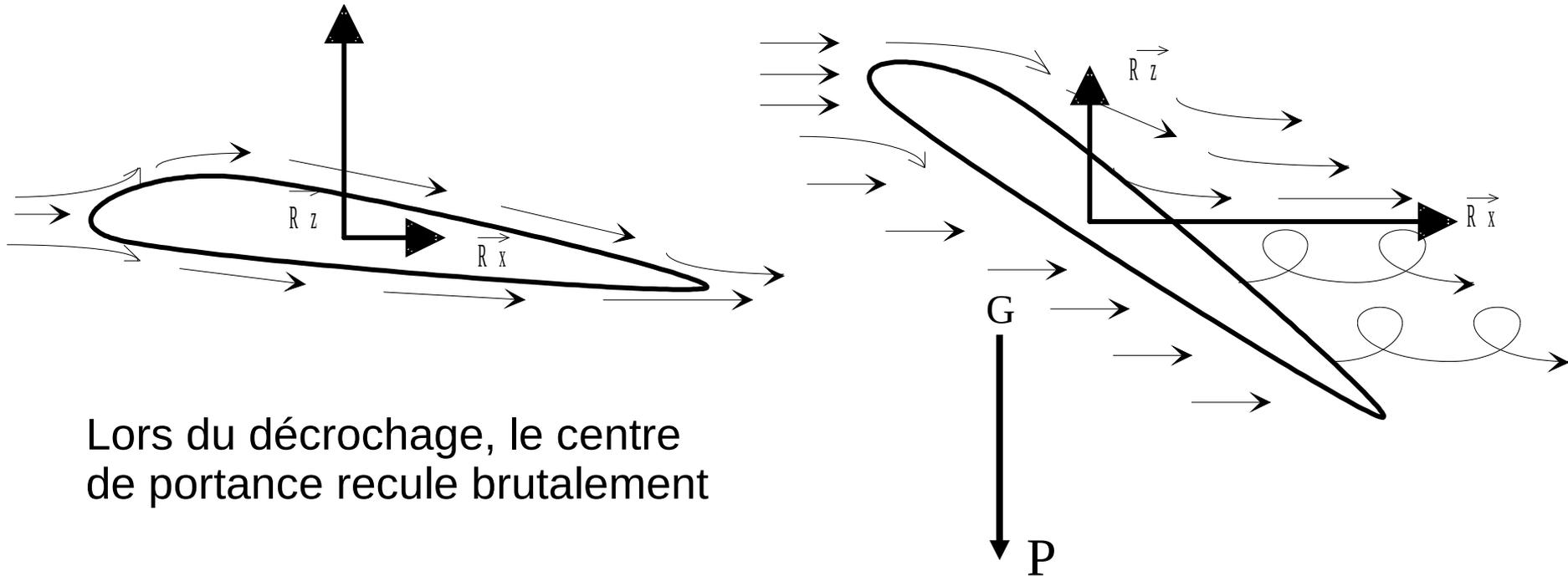
A grande incidence, la traînée importante peut nécessiter de maintenir une puissance importante au moteur.



# Influence de l'incidence : portance et traînée combinées

## Décrochage

- En pratique, on constate que si l'incidence dépasse une certaine valeur, la portance n'augmente plus mais chute très fortement. C'est le **décrochage** de l'aile :

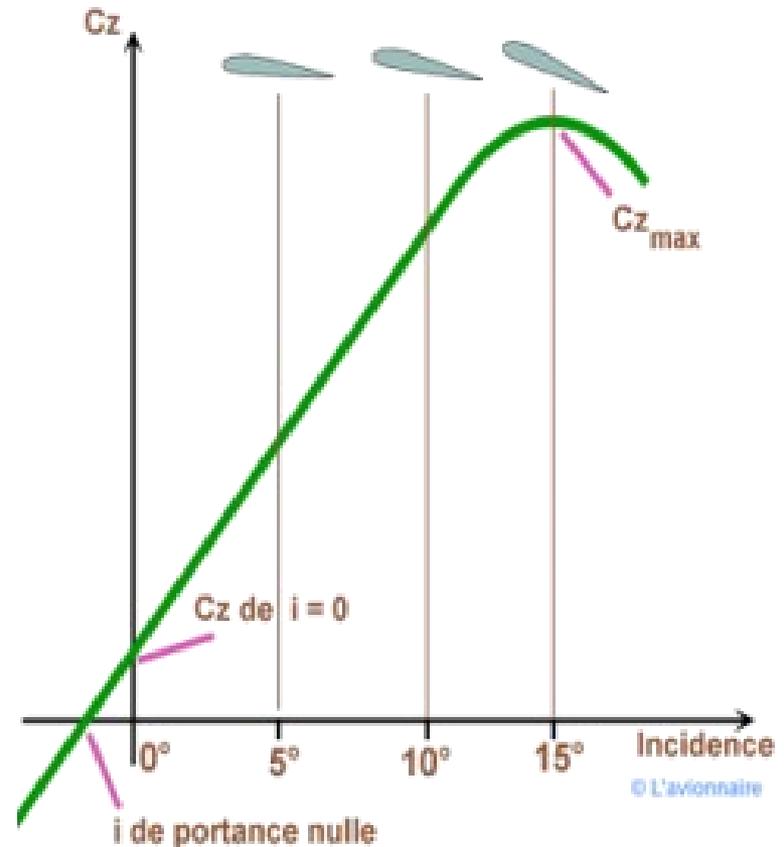


Lors du décrochage, le centre de portance recule brutalement

# Incidence, portance, traînée

En conclusion, à vitesse donnée la traînée et la portance de l'aile augmentent avec l'incidence, jusqu'à une incidence limite.

Le décrochage se produit parce qu'on atteint cette incidence limite. Pour env.  $15^\circ$  à  $20^\circ$  d'incidence



# Nous verrons en « Connaissances des aéronefs » des artifices pour retarder la vitesse de décrochage

- Vrillage de l'aile.
- Ajouts aérodynamiques pour réduire la vitesse décrochage:
  - Bec de bord d'attaque
    - fixes
    - automatiques
    - commandés
    - basculants, Handley Page, Kruger, Betz
  - Volets
    - intrados
    - volets de courbure simple ou à fente
    - volets fowlers (volets à recul) simple ou à fente



# Aérodynamique et Mécanique du vol

## la polaire

Dans la mécanique du vol, 2 paramètres fondamentaux et liés : **Cz et Cx**, qui dépendent de la géométrie de l'aile et la caractérisent

Il est intéressant de visualiser ces paramètres dans un même diagramme : ce diagramme est la **polaire de l'aile**.

### Etude des polaires

- Eiffel
- Vitesse

# Aérodynamique et mécanique du vol : la polaire

La polaire est une courbe qui permet de caractériser l'efficacité d'un profil d'aile.

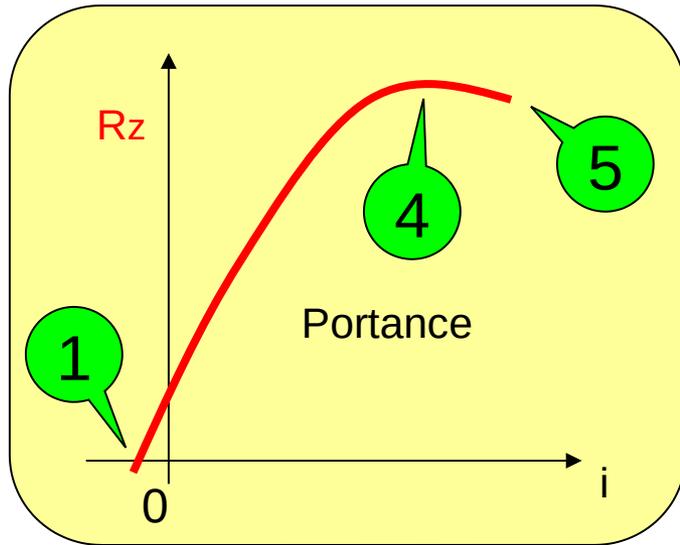
Dans la pratique, 2 types de polaire :

**La polaire d'Eiffel**, qui représente  $C_z$  en fonction de  $C_x$  quand l'incidence de l'aile varie

**La polaire des vitesses**, qui représente la vitesse de chute  $V_z$  en fonction de la vitesse horizontale  $V_x$  dans le cas du vol plané. Elle est surtout utile dans la conception des ailes de planeur ou des voiles de parapentes

Ces polaires ne sont pas des courbes théoriques, mais **des courbes expérimentales** faites à partir d'essais en soufflerie ou de tests en vol

# La polaire d'Eiffel



On étudie successivement en soufflerie :

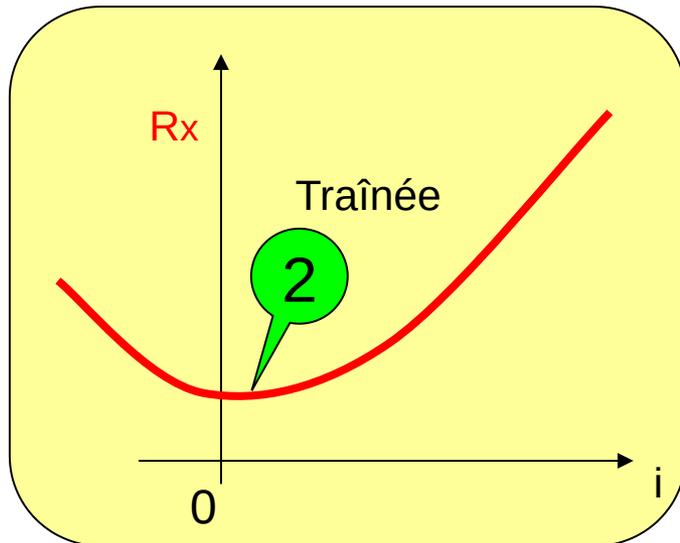
**la portance  $R_z$  en fonction de l'incidence de l'aile  $i$**

Des points particuliers

(1) **portance nulle** pour une incidence en général faiblement négative

(4) une incidence particulière pour laquelle la **portance est maximale**

(5) une **incidence maximale**. Si on la dépasse, l'aile décroche

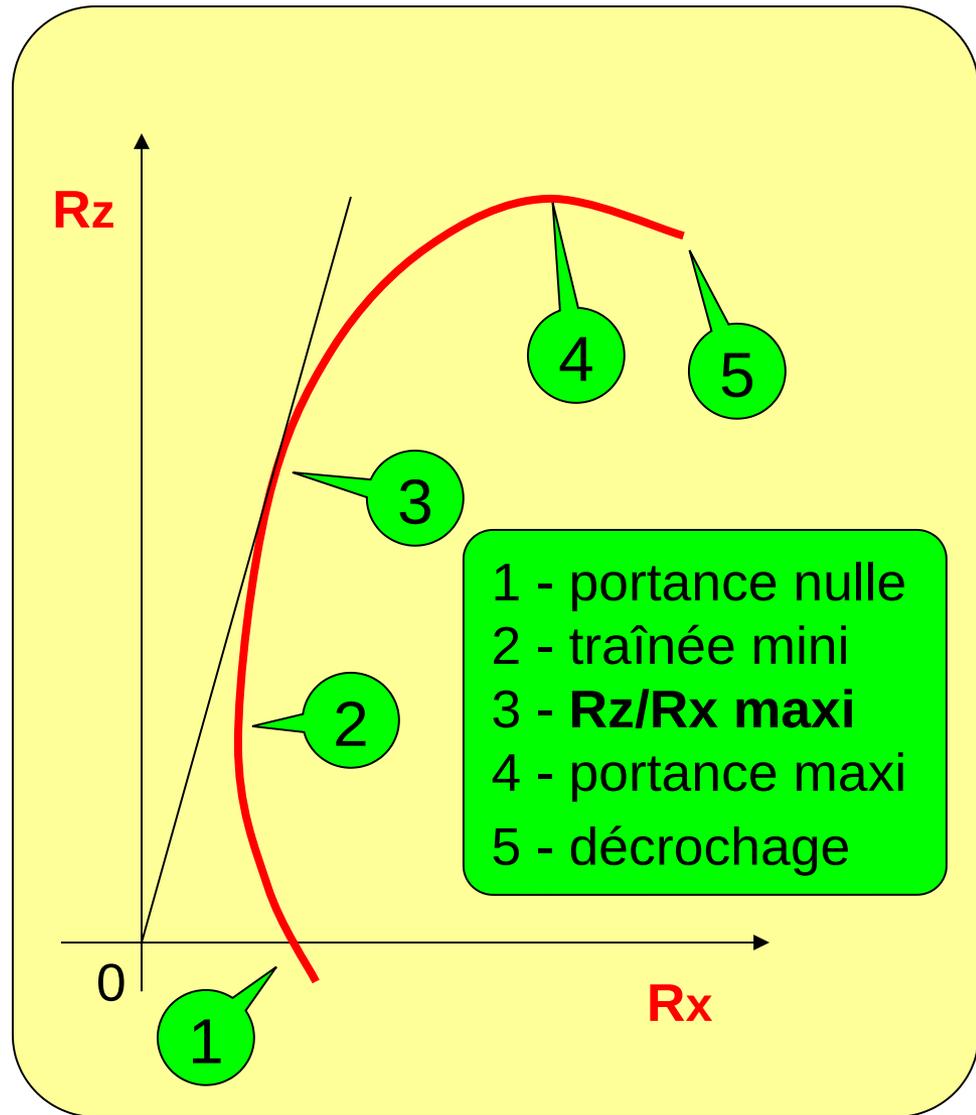
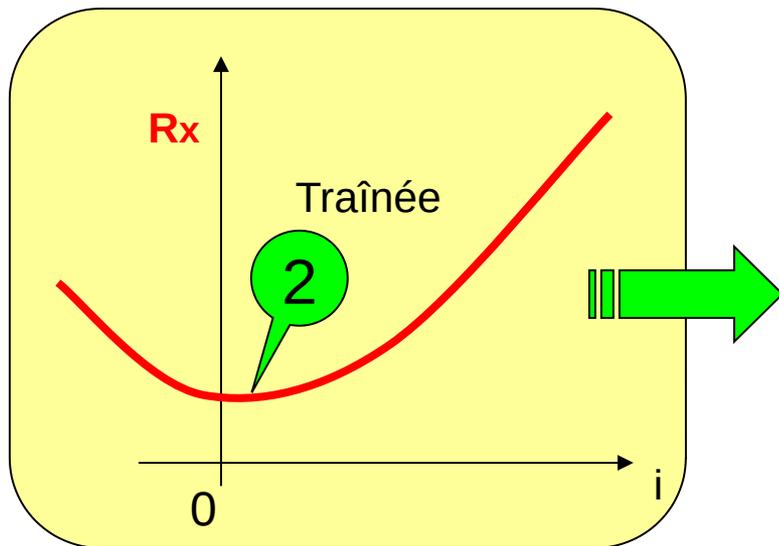
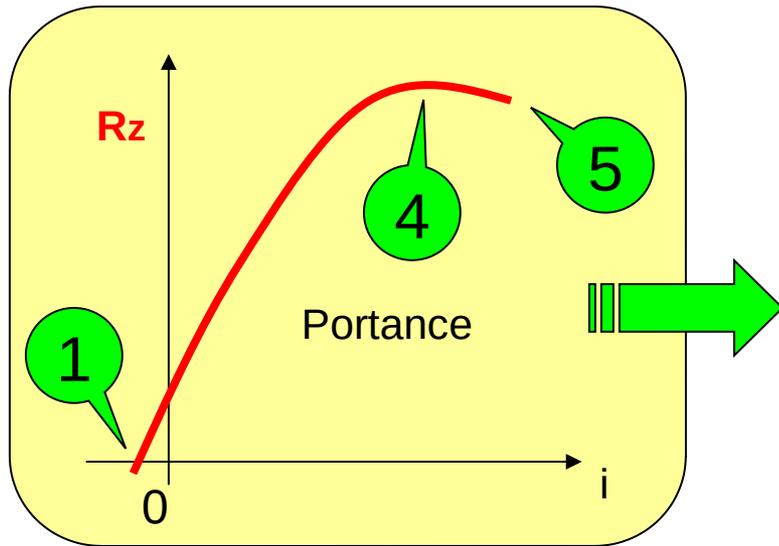


**la traînée  $R_x$  en fonction de l'incidence de l'aile  $i$**

Un point particulier :

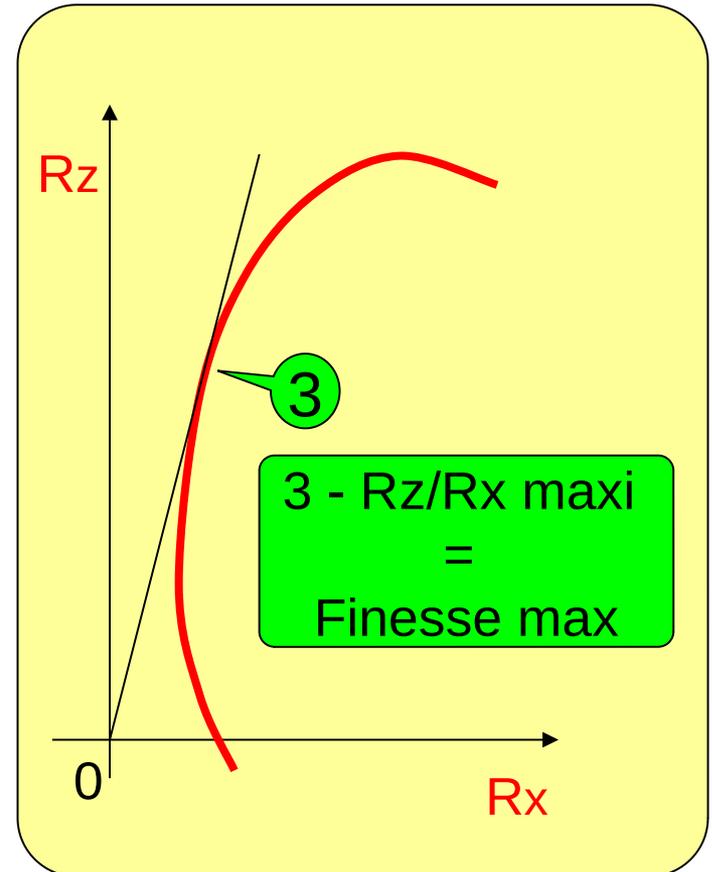
(2) l'incidence pour laquelle la **traînée est minimale**

# La polaire d'Eiffel : combinaison des 2 courbes $R_z = f(i)$ et $R_x = f(i)$



# La finesse

- Elle est **définie par  $R_z/R_x$**
- Elle **varie en fonction de l'incidence**
- Une incidence particulière pour laquelle  $R_z / R_x$  passe par un maximum
- C'est **la finesse maximum**
- Le point de **finesse max** se repère sur la polaire en prenant **la tangente à la courbe passant par l'origine** du repère.
- C'est un nombre sans dimension (sans unité)



# Différentes expressions de la finesse

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

La **finesse** peut donc se définir de plusieurs façons :

- De façon immédiate
  - Du rapport de la **portance (Rz)** sur la **trainée (Rx)**
  - Du rapport **Cz sur Cx**
- De façon moins immédiate (cf diapo suivante)
  - Du rapport de la **vitesse horizontale (Vx)** sur la **vitesse verticale (Vz)**
  - Du rapport de la **distance parcourue horizontalement (D)** sur la **distance verticale (Δz)**

$$f = \frac{C_z}{C_x} = \frac{R_z}{R_x} = \frac{V_x}{V_z} = \frac{D}{\Delta z}$$

**Remarque : la finesse d'un aéronef est indépendante de son poids !  
Balaster un planeur ne modifie pas sa finesse max, mais il ira plus vite...**

## Compléments sur la finesse

Seconde loi de Newton :

$$m(dV/dt) = F_z + F_x + mg$$

si mouvement **non accéléré**

$$dV/dt = 0 = F_z + F_x + mg$$

En projetant  $mg$  sur l'axe des  $x$  :

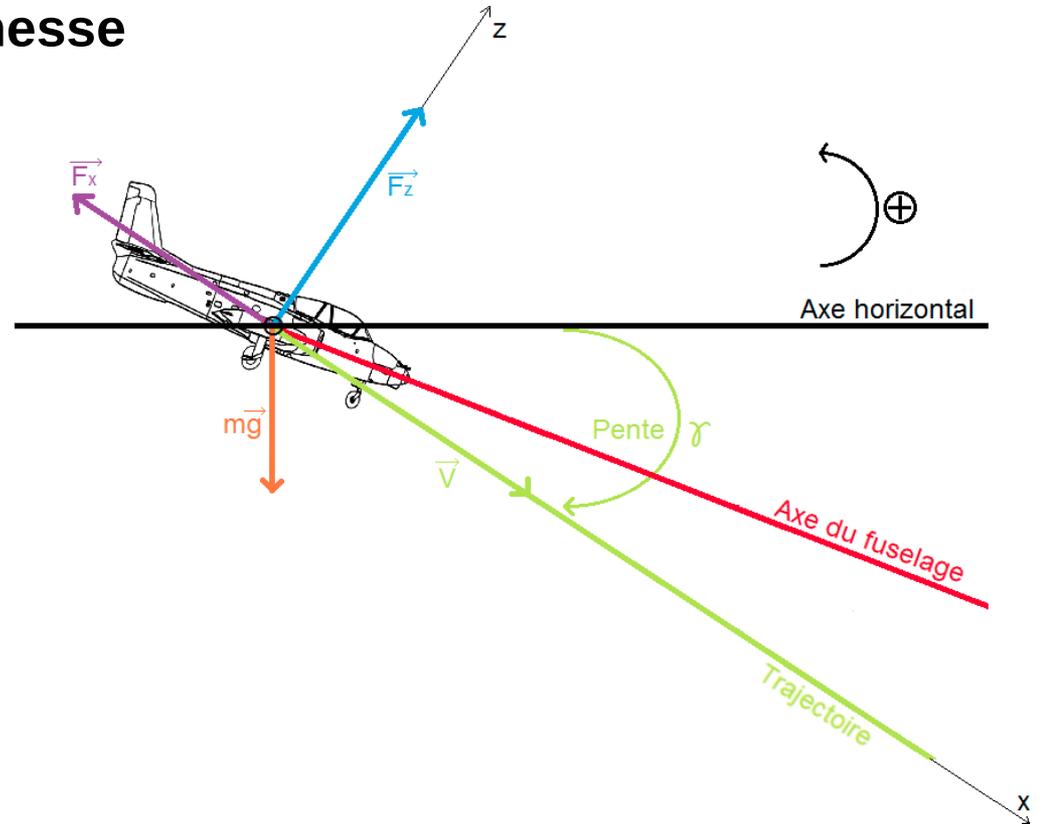
$$0 = -\frac{1}{2}\rho V^2 S C_x + mg \sin \gamma$$

En projetant  $mg$  sur l'axe des  $z$  :

$$0 = \frac{1}{2}\rho V^2 S C_z - mg \cos \gamma$$

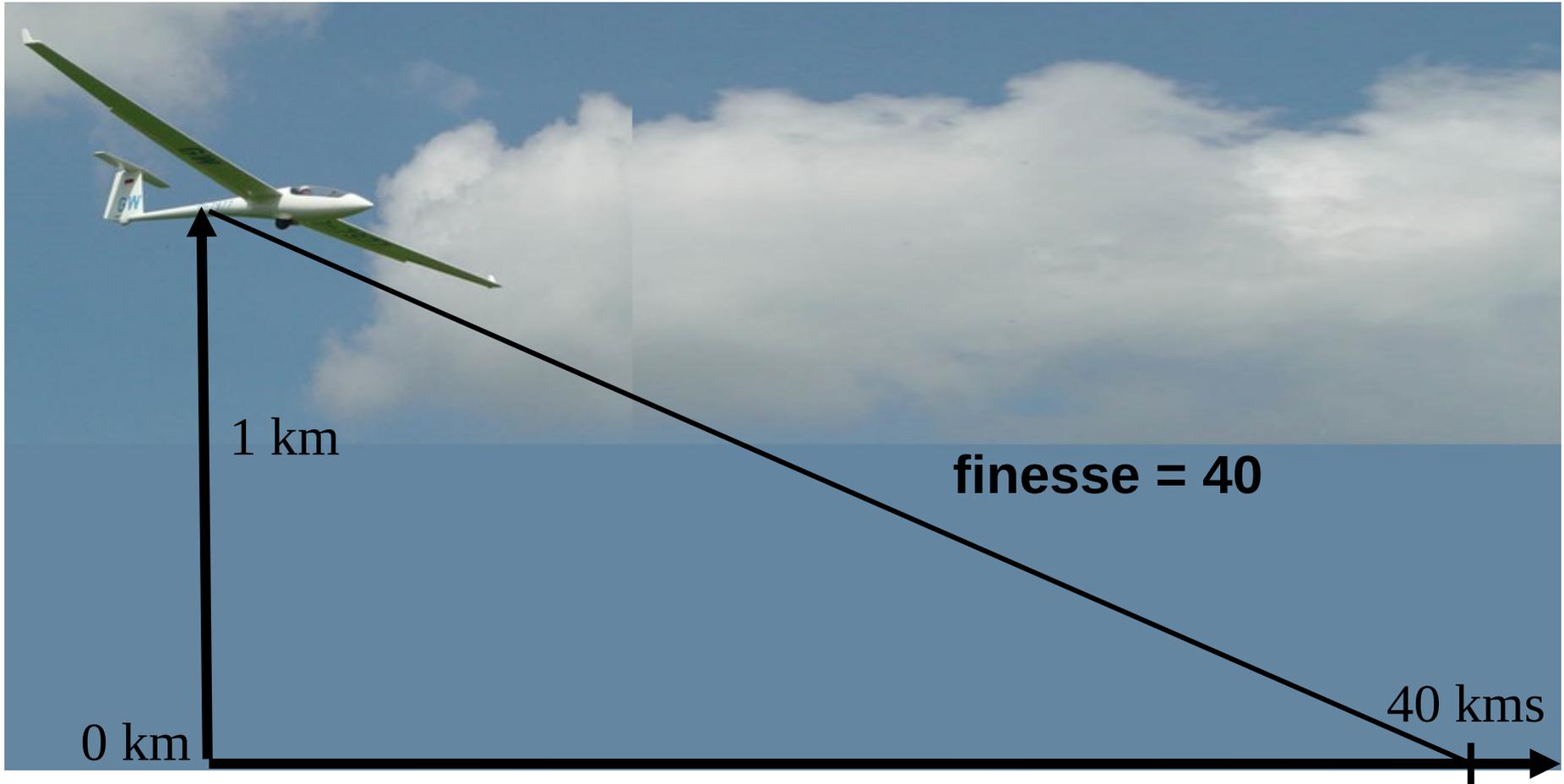
Pour un vol plané à vitesse sol constante, en faisant le rapport des 2 expressions :

$$\text{finesse} = \frac{1}{\tan |\gamma|} = \frac{\text{distance horizontale parcourue}}{\text{hauteur perdue}} = \frac{v_{\text{horizontale}}}{v_{\text{verticale}}}$$



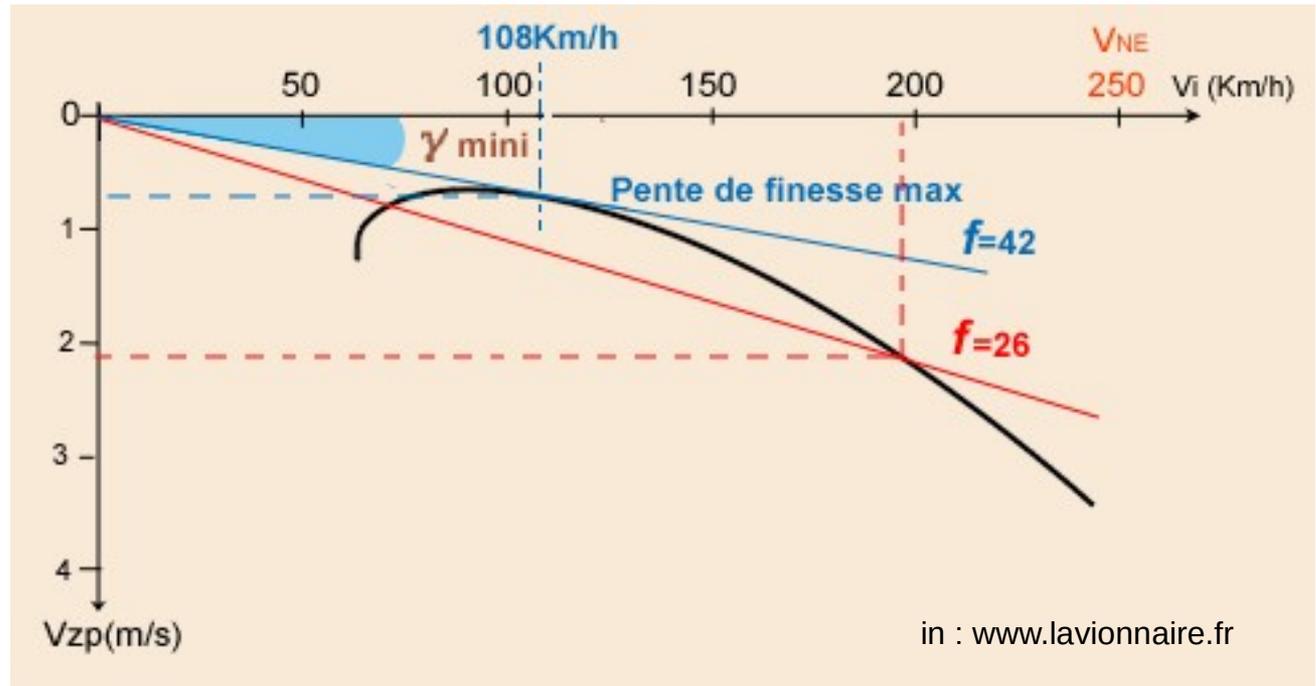
In Wikipedia

# Expression habituelle de la finesse : $D/h$



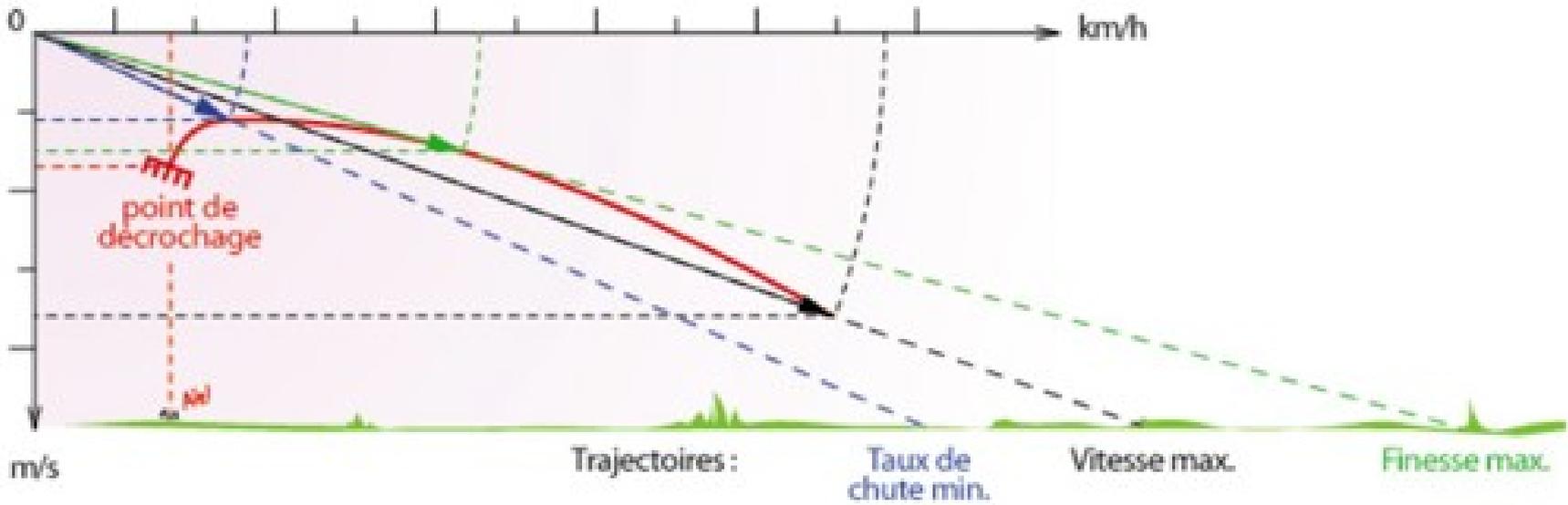
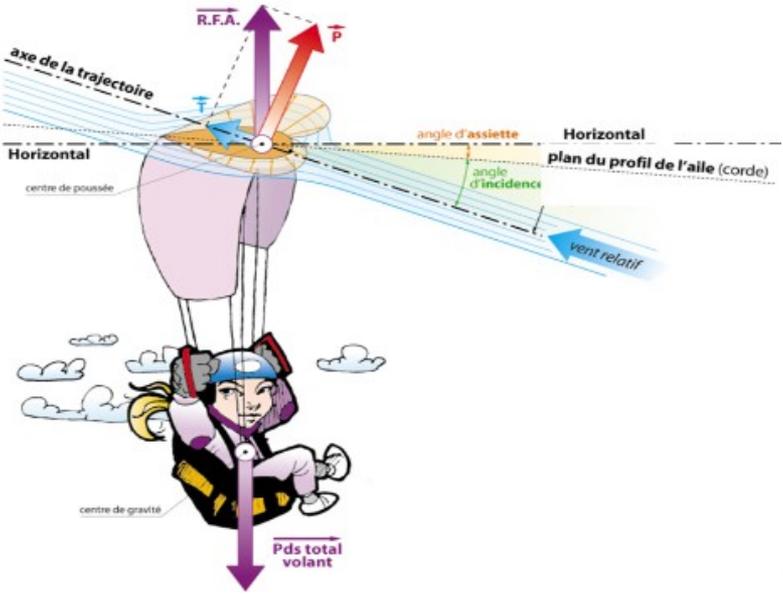
# La polaire des vitesses

C'est la courbe qui montre l'**évolution du taux de chute en fonction de sa vitesse**, pour un aéronef sans moteur (planeur, parapente..)



- La polaire de vitesse n'est pas calculée, mais **mesurée** lors de vols d'essais pour chaque planeur ou chaque voile.
- C'est au régime de **finesse maximale** ou au régime de **taux de chute minimum** (en fonction des conditions aérologiques) que se placent les **vélivoles** et les **parapentistes** dans les ascendances

# Polaire vitesse d'un parapente



# Finesses de quelques aéronefs

Airbus A380 => 20

Boeing 747 => 17,7

Airbus A320 => 17



Cirrus SR20 => 11

Robin DR400 => 10



planeur => 25 à 60



deltaplane => 14 à 22

parapente => 9 à 13

wingsuit => 3 à 4



# Impact du profil et de l'épaisseur d'une aile sur la portance et la traînée (et donc sur la finesse)

- Pour la portance :
  - Un profil possédant une certaine **épaisseur** est plus efficace qu'un simple plan incurvé pour la portance
- Pour la portance et la traînée :
  - La **forme** du profil influe beaucoup sur la portance, la traînée et leur coefficient

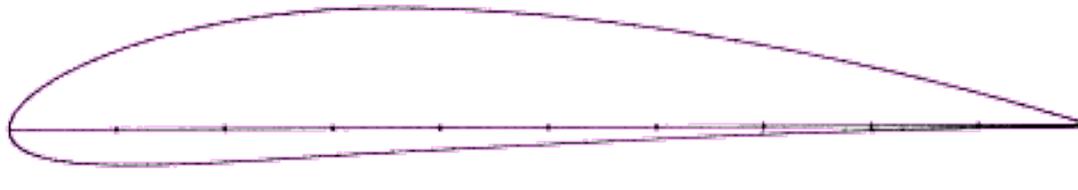


# Caractéristiques d'une voilure

Suivant les profils d'ailes on aura plus ou moins de portance et/ou de traînée



Le profil **plan convexe** « porte » bien.



Le profil **biconvexe dissymétrique** « porte » bien



Le **biconvexe symétrique** ne « porte » pas bien



Le profil à **double courbure** (ou **autostable**) a une portance moyenne et traînée importante.

## Des exemples de QCM d'examen sur la partie de cours qui précède

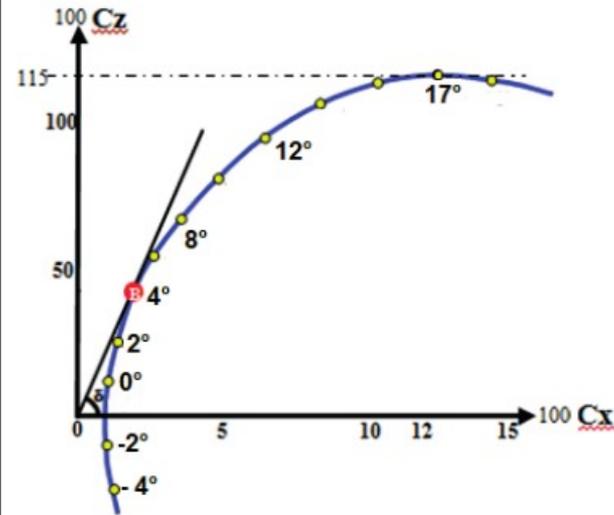
Un planeur de finesse 50 vole en ligne droite à 2000m d'altitude dans un air stable. La distance maximale qu'il peut parcourir sans ascendance est de :

- a) 10 km.
- b) 25 km.
- c) 40 km.
- d) 100 km.

Plus la finesse d'un planeur est élevée :

- a) plus la distance qu'il peut parcourir est faible.
- b) plus son poids est faible.
- c) plus la distance qu'il peut parcourir est élevée.
- d) plus sa traînée est importante.

Avec la polaire suivante, le  $C_z$  max est obtenu à :



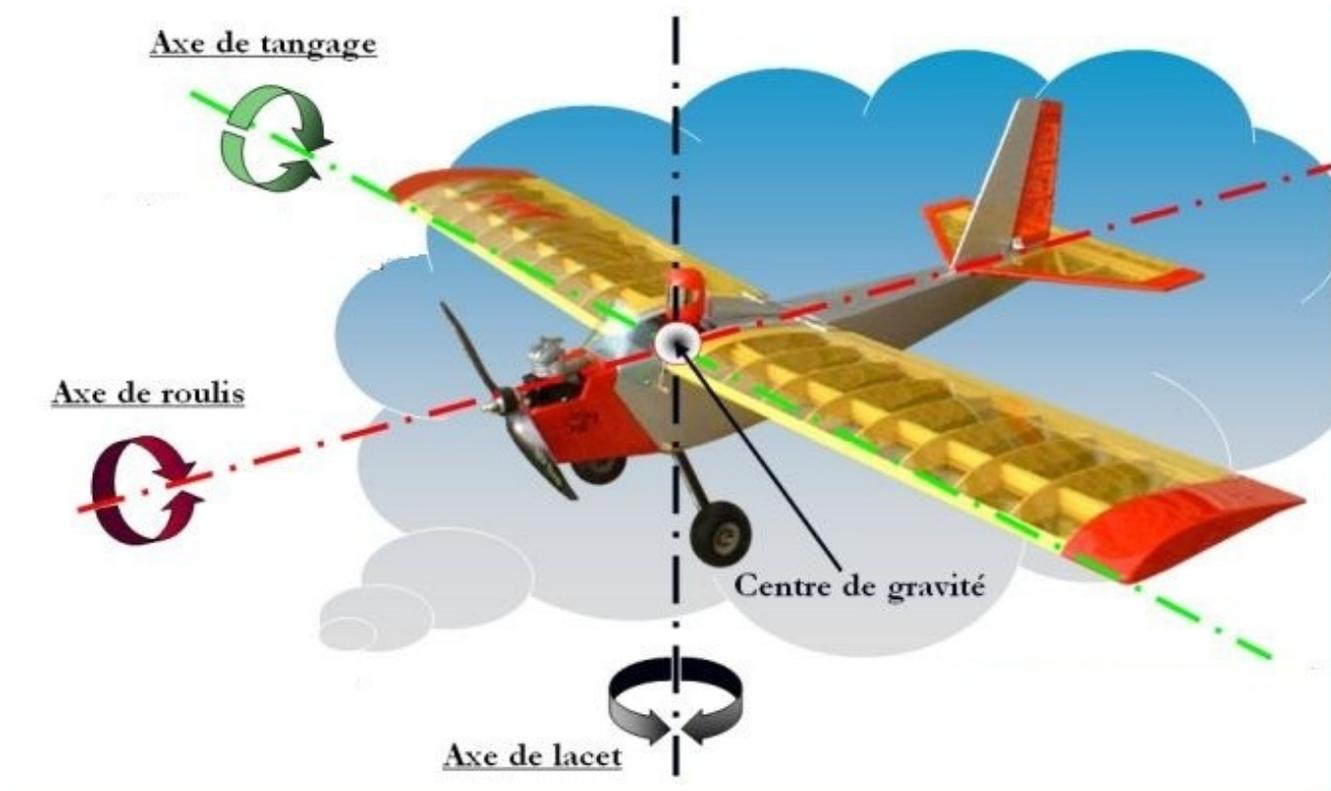
- a)  $-1,3^\circ$  d'incidence.
- b)  $4^\circ$  de température.
- c)  $17^\circ$  de température.
- d)  $17^\circ$  d'incidence.

# Equilibre, stabilité et maniabilité d'un aéronef



- **Pour qu'un avion soit facilement pilotable, il faut qu'il soit stable.**
- **Il doit avoir tendance compenser naturellement les petites variations de vitesse ou d'attitude non désirées qui peuvent survenir du fait de l'aérodynamique.**

# Les axes du mouvement

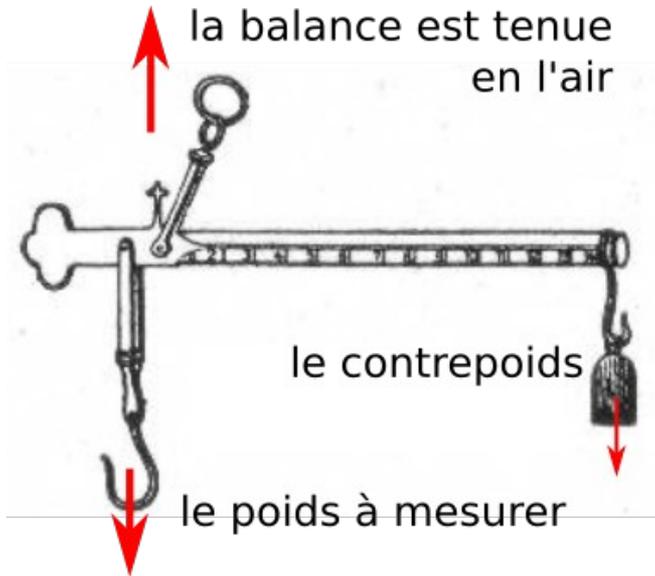


# Stabilité statique longitudinale

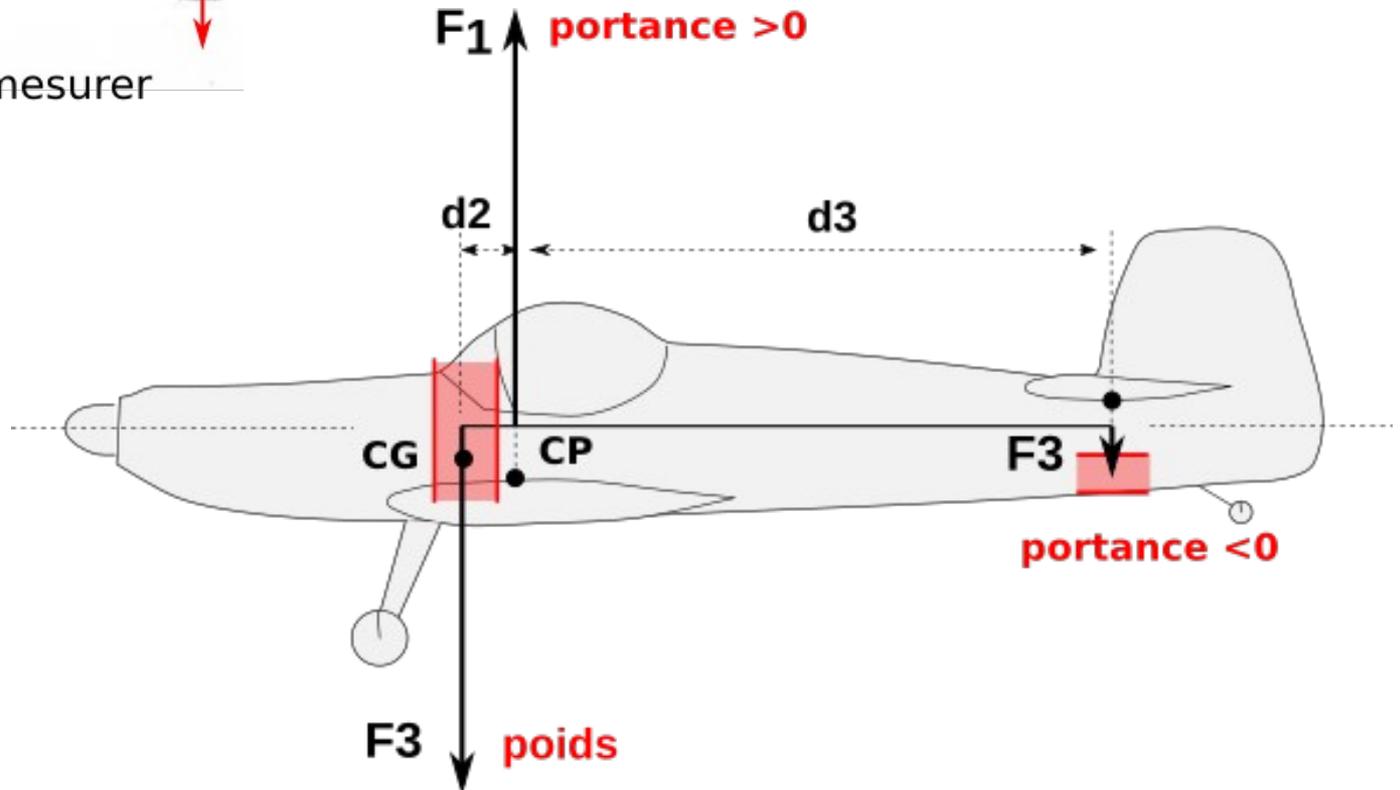


- La stabilité est dite **longitudinale** quand on étudie les mouvements autour de l'**axe de tangage**.
- Une petite **variation d'incidence** doit provoquer un retour spontané à la position d'équilibre.

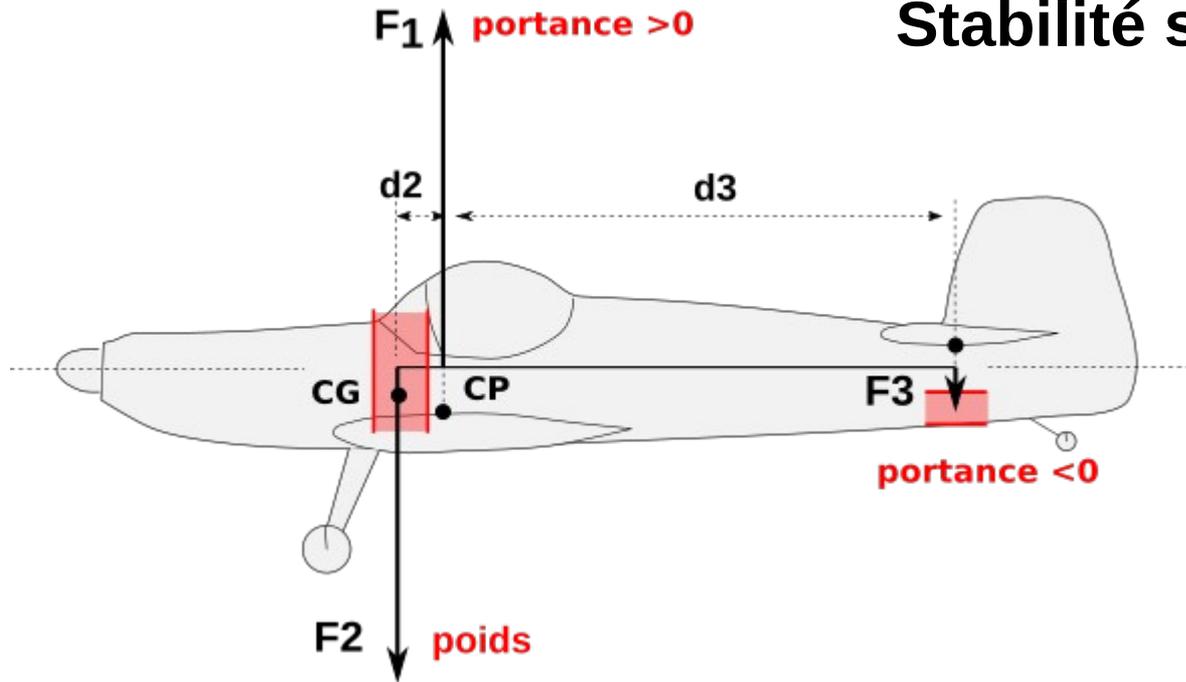
# Stabilité statique longitudinale



On peut voir un avion comme une vieille balance de marché (balance romaine) !



# Stabilité statique longitudinale

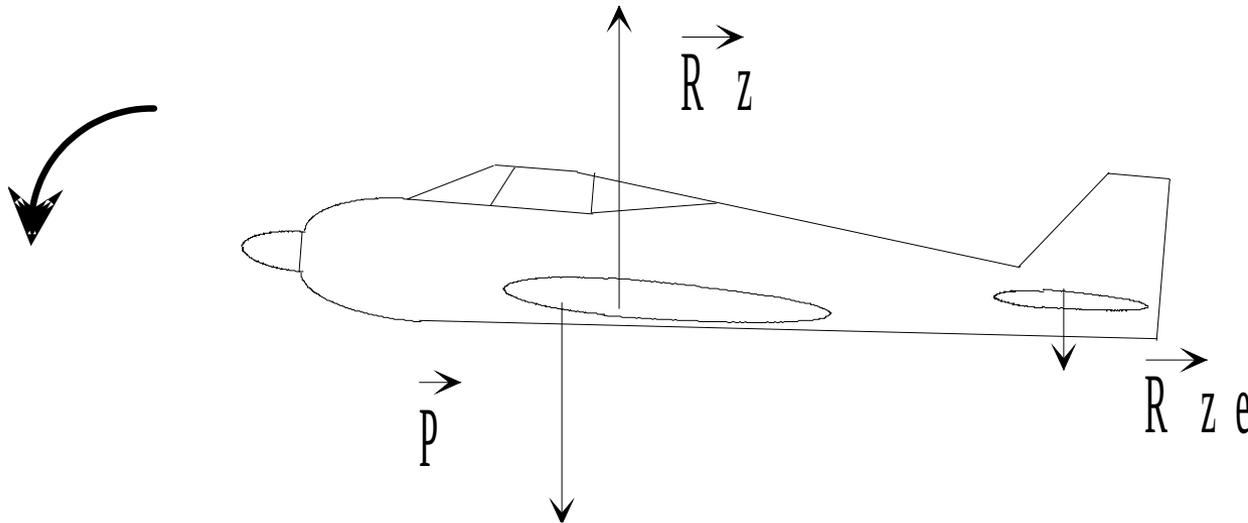


- Le centre de gravité est en avant du centre de poussée de l'aile, **la voilure est porteuse et l'empennage est déporteur** (sa portance est négative, dirigée vers le bas)
- **La portance de l'aile s'applique au centre de portance CP**. Elle fait basculer le nez de l'avion vers le bas mais **la portance négative de l'empennage** permet de contrer cette rotation afin d'assurer l'équilibre
- L'avion est équilibré longitudinalement si  $F_2 \times d_2 = F_3 \times d_3$  (égalité des "moments"  $M_2$  et  $M_3$ ).



# Stabilité statique longitudinale

Réaction à une augmentation d'incidence:



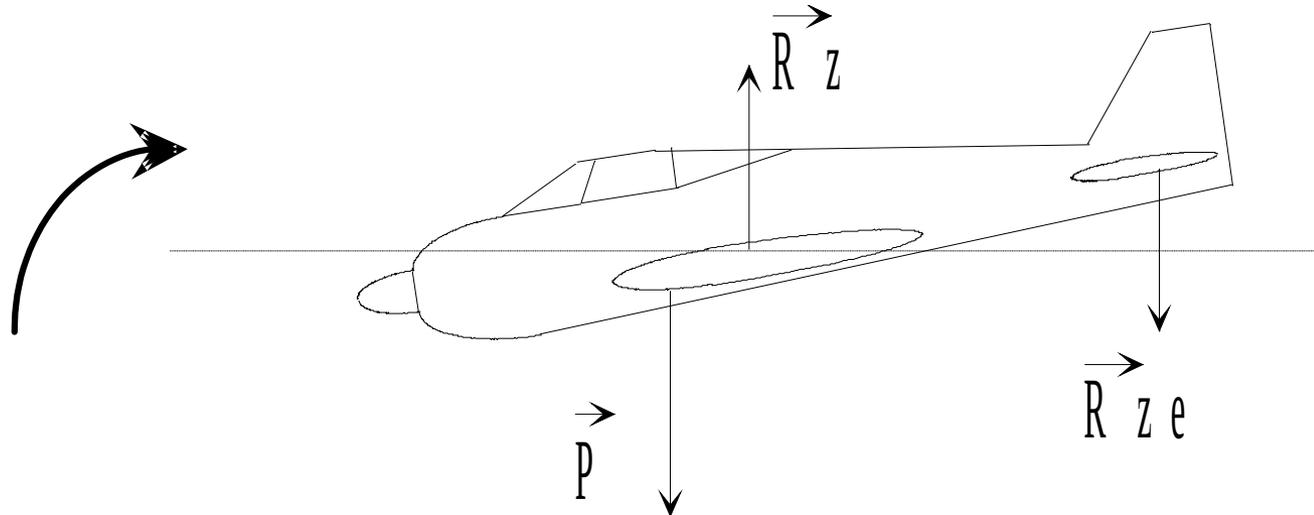
Si  $i$  augmente,  $R_z$  augmente et  $R_{z_e}$  diminue (elle devient moins négative).

On a donc un couple à piquer qui tend à ramener l'avion dans sa position initiale.



# Stabilité statique longitudinale

Réaction à une diminution d'incidence:



Si  $i$  diminue,  $R_z$  diminue et  $R_{ze}$  augmente (elle devient plus négative).

On a donc un couple à cabrer qui tend à ramener l'avion dans sa position initiale.

# *V Stabilité statique d'un aéronef*

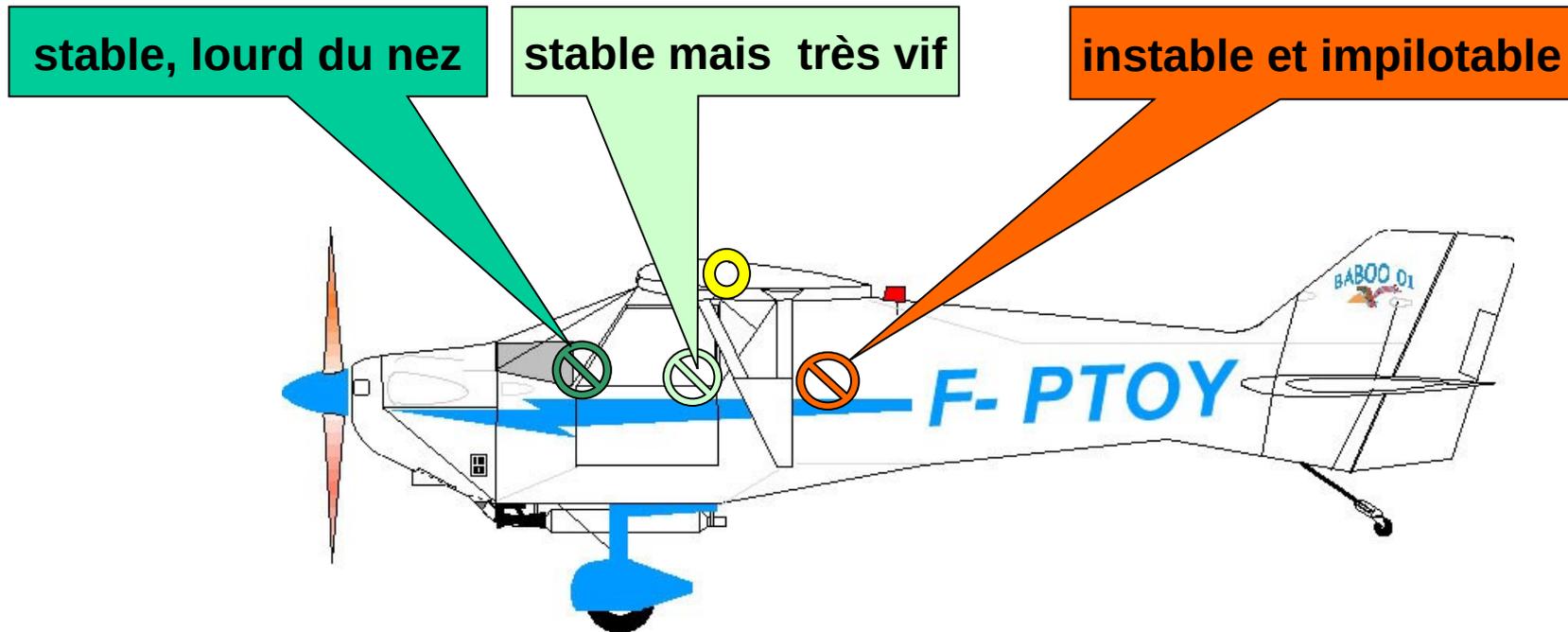
## *1. Stabilité statique longitudinale*

- **Un avion est stable longitudinalement si le centre de gravité de l'avion est en avant du centre de poussée.**
- **Plus un avion est stable, moins il est maniable**
- **Plus un avion est maniable, moins il est stable.**

# Stabilité statique longitudinale : comment la maintenir ?

- Le pilote doit maîtriser **la position du centre de gravité** de l'avion (**opération de « centrage »**)
- Le centre de gravité doit se trouver entre deux limites fixées par le constructeur (limite avant / limite arrière)
- Si le centre de gravité est « vers l'avant » de l'avion, l'avion sera stable, mais peu maniable
- Si le centre de gravité est « vers l'arrière », l'avion sera maniable, mais peu stable
- En vol, le pilote maintient l'horizontalité de l'avion en jouant sur la l'inclinaison (et donc la portance) du plan arrière

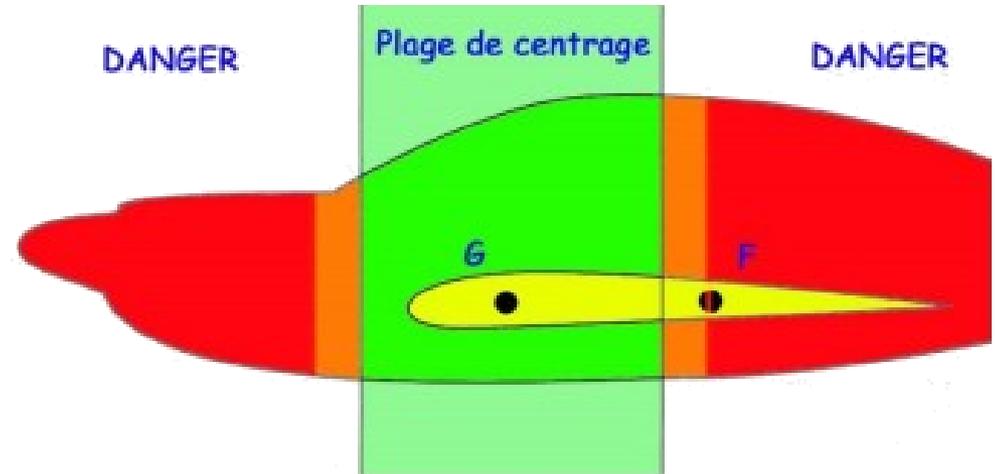
**Selon la position du centre de gravité par rapport au centre de poussée, l'avion sera :**



**Le centre de gravité doit toujours se situer en avant du centre de poussée.**

# Les limites du centrage

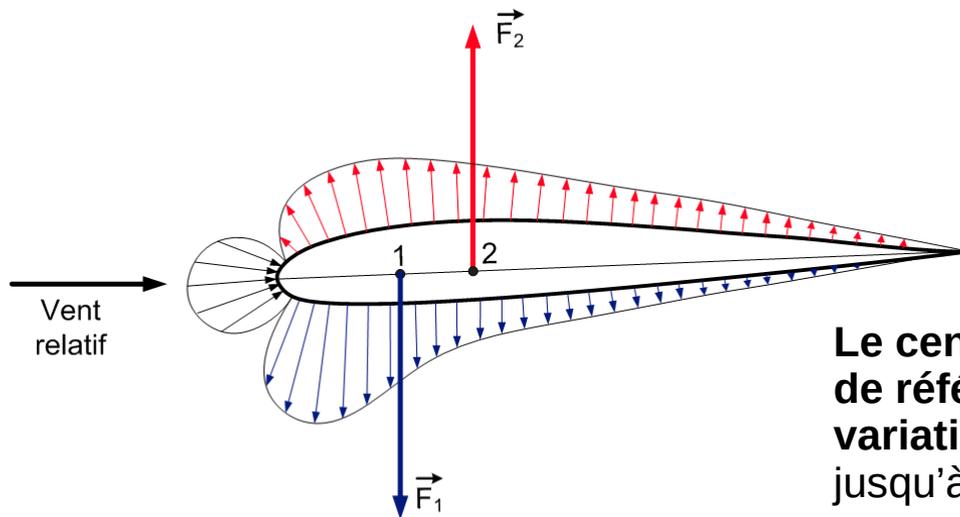
La distance  $G F$  s'appelle la **marge statique**.



Si  $G$  (le entre de gravité) se rapproche trop de  $F$  (**foyer**) l'avion devient très réactif à la moindre sollicitation des commandes.

La zone de positionnement de  $G$  (en vert) par rapport à  $F$  s'appelle la **plage de centrage**. En dehors de cette plage le centrage devient dangereux.

Quand l'incidence varie, le point d'application de la portance ( $C_p$ ) varie => compliqué de prendre ce point comme référence pour le centrage. **On prend un point fixe appelé le foyer, indépendant de l'incidence** C'est le « point d'application des « variations de portance » quand l'incidence de l'aile varie.



## Le foyer

**Le centre de poussée est un mauvais point de référence car il se déplace avec les variations d'incidence (il avance sur l'aile jusqu'à l'incidence de décrochage)**

Par ailleurs,  $F_1$  et  $F_2$  (portances de l'extrados et de l'intrados) ne s'appliquent pas au même point de la corde de l'aile → **apparition d'un couple de tangage** (l'aile tend à basculer)

Il y a un point particulier de l'aile pour lequel ce couple de tangage est **indépendant de l'incidence**. On l'appelle **centre aérodynamique** de l'aile (ou **foyer**, ou encore « point d'application des variations de portance »). C'est un point fixe, donc un meilleur point de référence que le  $C_p$ . **Le foyer est en général à environ 25 % de l'aile depuis le bord d'attaque**

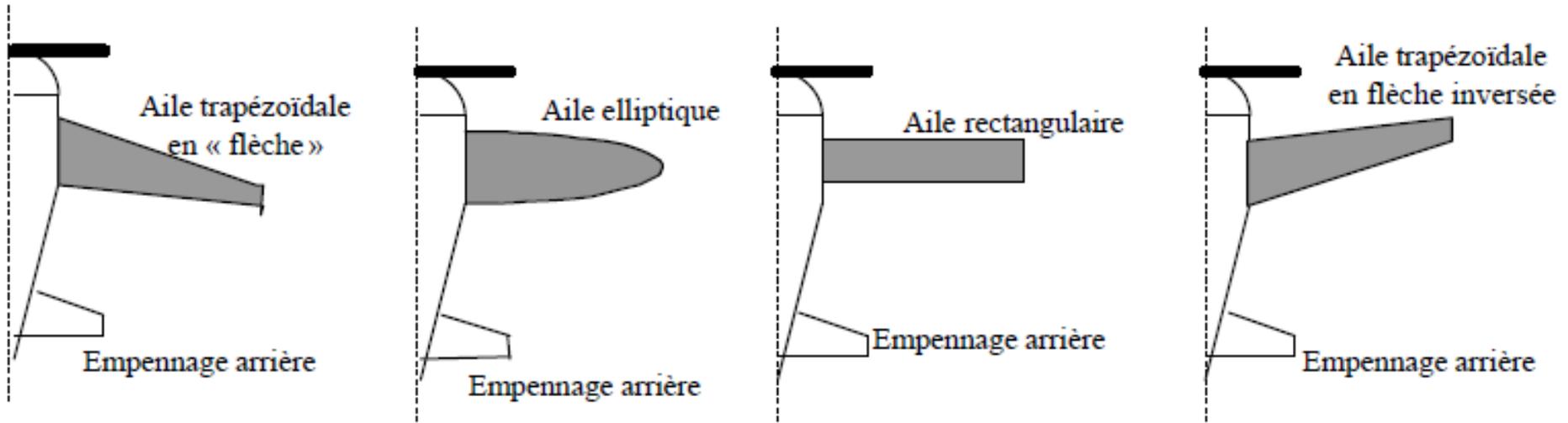
La portance en ce point se manifeste lorsque  $\|F_2\| > \|F_1\|$ . La portance en ce point est indépendante du couple de tangage de l'aile



# Stabilité statique transversale

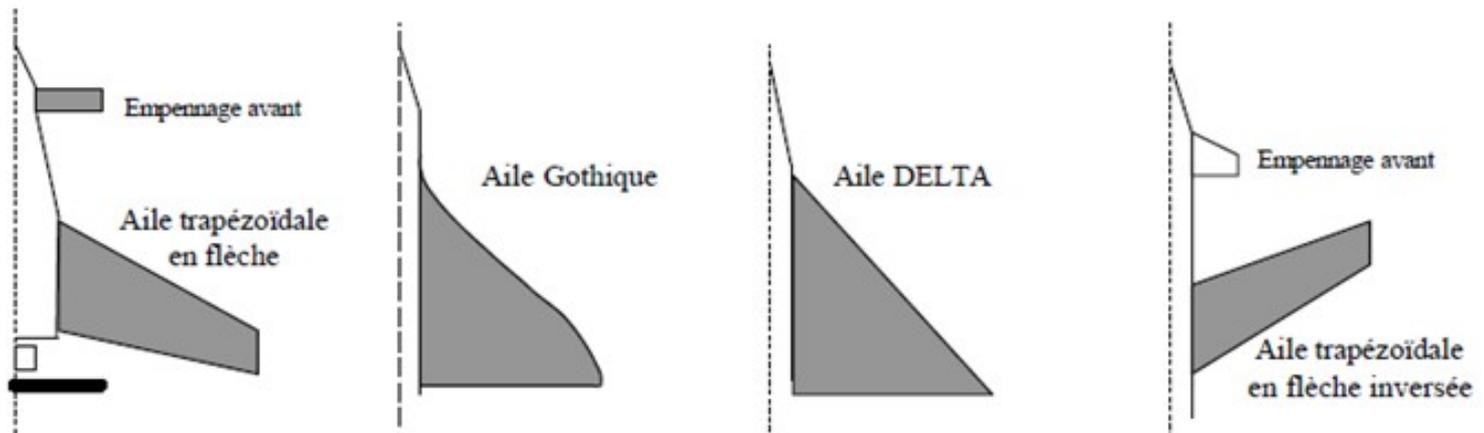
- La stabilité statique transversale concerne les **rotations autour des axes de roulis et de lacet** lors des petites variations de dérapage et d'inclinaison.
- Son étude est assez complexe et on ne retiendra que l'influence du dièdre, de la flèche, de la position de l'aile et de la dérive

# Influence de la forme de l'aile sur la stabilité de l'avion



+ Stable

- Stable



## Quelques formes d'ailes



**aile elliptique du Spitfire (UK, 1936)**



**aile gothique du Concorde  
(UK et F, 1976)**

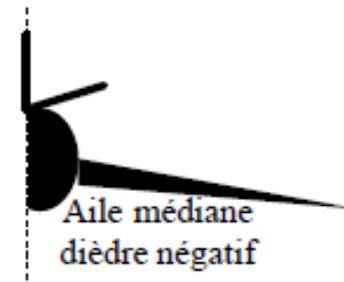
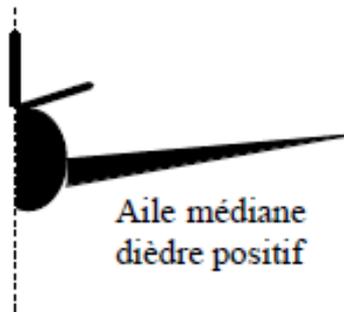


**voilure canard avec aile à flèche inverse  
du Grumman X29 (USA, 1984)**

# Influence du dièdre et de la position de l'aile

+ Stable

- Stable



## Quelques formes d'ailes



ULM à aile haute Aeroprakt A22 (Russie)



Aile basse, dièdre à l'emplanture  
Airbus A380 (Europe, 2005)



Aile semi-basse, dièdre en bout. Le Jodel  
D140 Abeille d'Huez (France, 1958 )

# Stabilité statique transversale

Pour assurer une stabilité transversale en roulis on adopte en général les configurations suivantes :

<b>type d'aile</b>	<b>position</b>	<b>dièdre</b>
droite	haute	environ nul
droite	basse	positif
en flèche	basse	faiblement positif
en flèche	haute	fortement négatif

# Stabilité statique : évolution actuelle

- Les importants progrès des systèmes de commandes de vol électriques permettent de concevoir des **avions légèrement instables**.
- **Le pilotage assisté par ordinateur** permet de rendre l'avion quand même contrôlable.

## Des exemples de QCM d'examen sur la partie de cours qui précède

**Le décollage d'un avion se fait toujours face au vent pour :**

- a) décoller sur une distance plus courte.
- b) diminuer la portance.
- c) éviter de dépasser la VNE.
- d) diminuer la traînée.

**Le décrochage se produit toujours à :**

- a) La même assiette.
- b) La même vitesse.
- c) La même incidence.
- d) La même inclinaison.

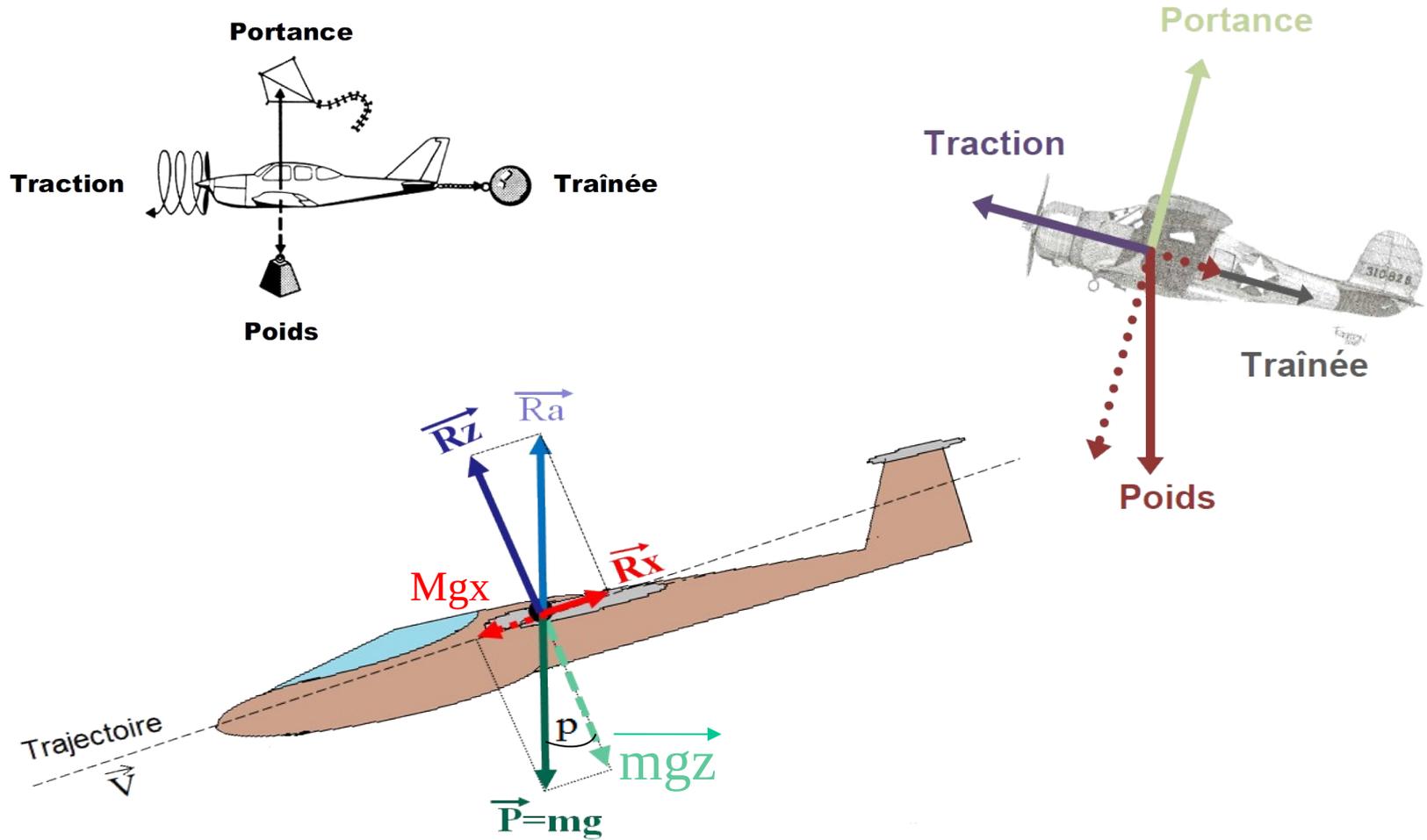
**Le centrage de l'aéronef a un effet majeur sur sa stabilité autour de son axe :**

- a) de gauchissement.
- b) de roulis.
- c) de tangage.
- d) de lacet.

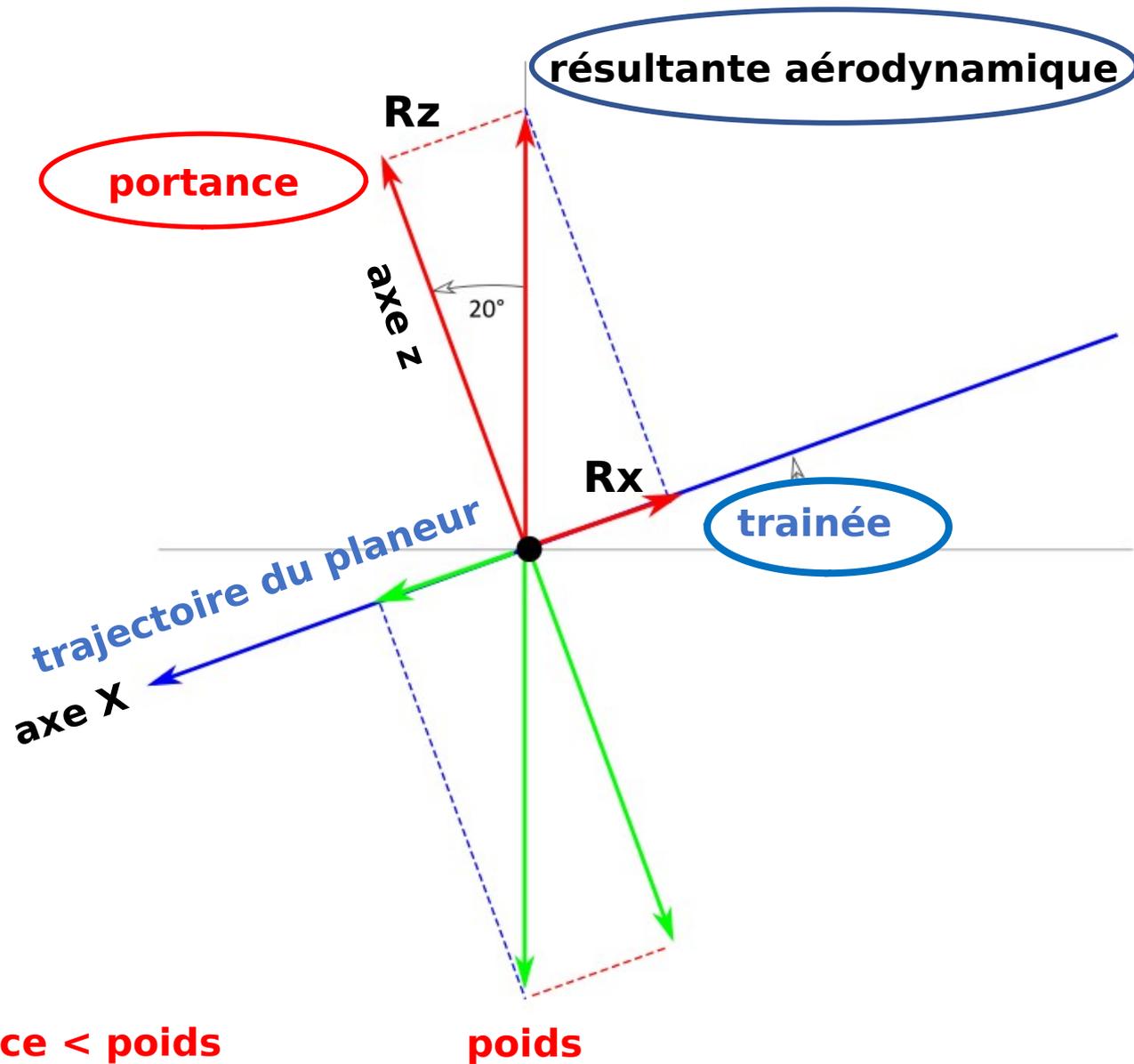
**L'angle de calage d'une aile est compris entre :**

- a) la corde de profil de l'aile et l'axe longitudinal de l'avion.
- b) la corde de profil de l'aile et le vent relatif.
- c) le plan de l'aile et l'horizontale.
- d) le bord d'attaque et la perpendiculaire de l'axe avion.

## 2 - Étude du vol stabilisé



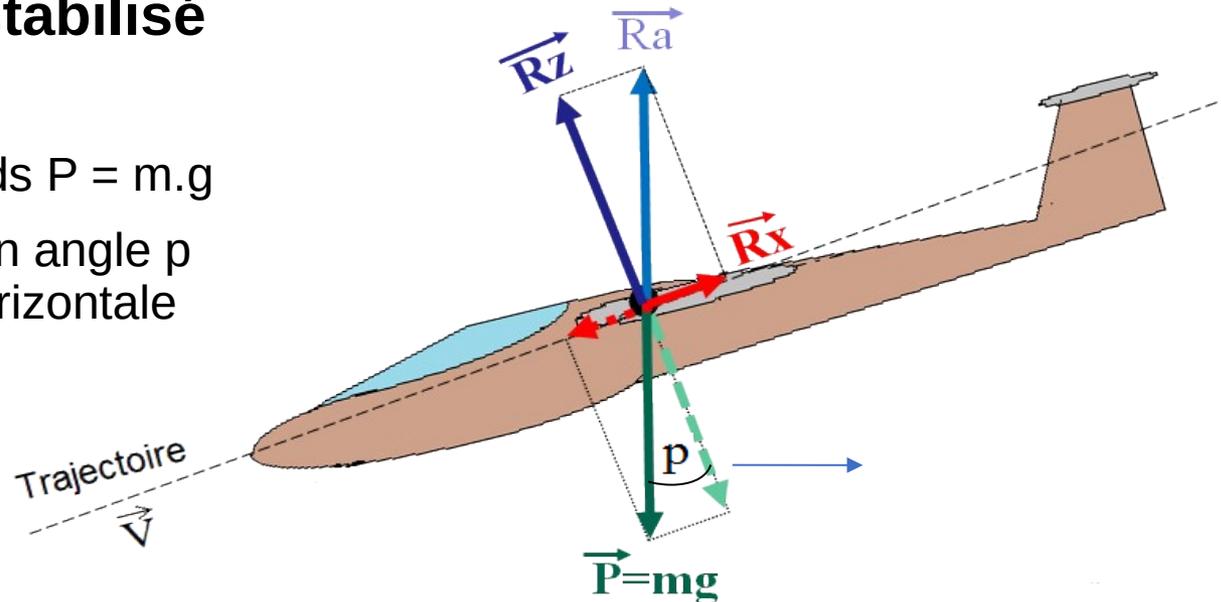
# Le vol plané stabilisé



# Le vol plané stabilisé

$R_a$  équilibre le poids  $P = m.g$

La trajectoire fait un angle  $p$   
(= pente) avec l'horizontale



L'équilibre de vol donne les 2 équations suivantes :

- En projetant  $\vec{R}_a = -\vec{P}$  sur la direction  $R_z$

$$R_z = m.g.\cos(p) = \frac{1}{2}.\rho.S.v^2.C_z$$

- En projetant  $R_a$  sur la direction  $R_x$

$$R_x = m.g.\sin(p) = \frac{1}{2}.\rho.S.v^2.C_x$$

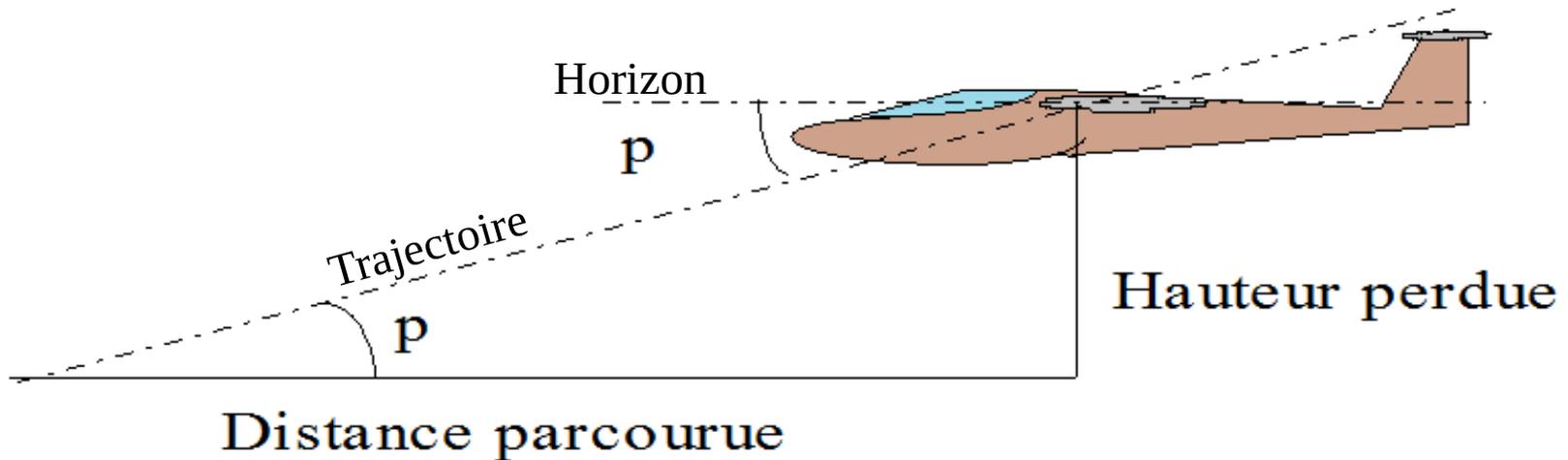
## Le vol plané stabilisé

- 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 donc d'autant plus faible que la finesse est importante.**
  - Pour une finesse de 10 (Robin) :  $p = \text{atang}(0,1) = 5,7^\circ$
  - Pour une finesse de 60 (planeur de compétition): pente =  $0,9^\circ$
  - Pour une finesse de 3 (wingsuit) : pente =  $18^\circ$

# Le vol plané stabilisé



- Comme le montre le schéma ci-dessus, 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 f et H on peut calculer D :  $D = f.H$**

# **Vol motorisé: les principales phases de vol**

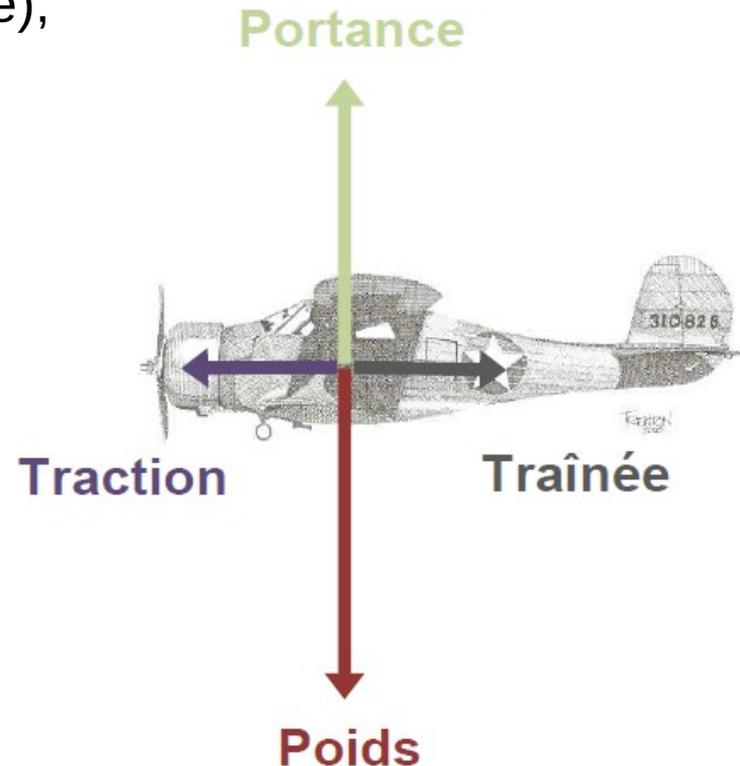
- **Le vol rectiligne uniforme en palier**
- **Traction, Propulsion**
- **La montée rectiligne uniforme**
- **La descente rectiligne uniforme**
- **Le virage symétrique en palier à vitesse constante (facteur de charge, force centrifuge)**
- **Le vol plané**
- **Le décollage**
- **L'atterrissage**

# Le vol moteur rectiligne en palier

## Rappel du **second principe de Newton**

(un des principes fondamentaux de la mécanique !) :

Pour un corps qui se déplace à **vitesse constante** (ni accélération, ni freinage), **la somme de toutes les forces appliquées est nulle**



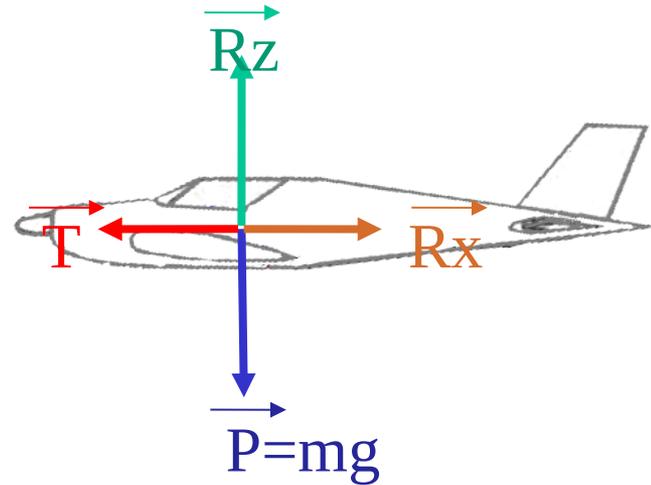
# Le vol moteur rectiligne en palier

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

- La portance équilibre le poids (\*)

$$Rz = m.g = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot Cz$$

\* portance totale, aile + plan arrière



pression dynamique

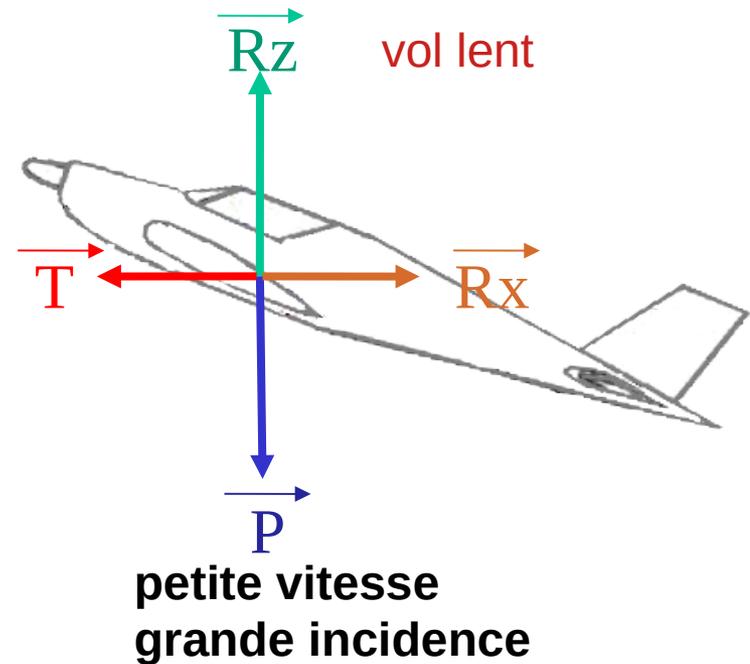
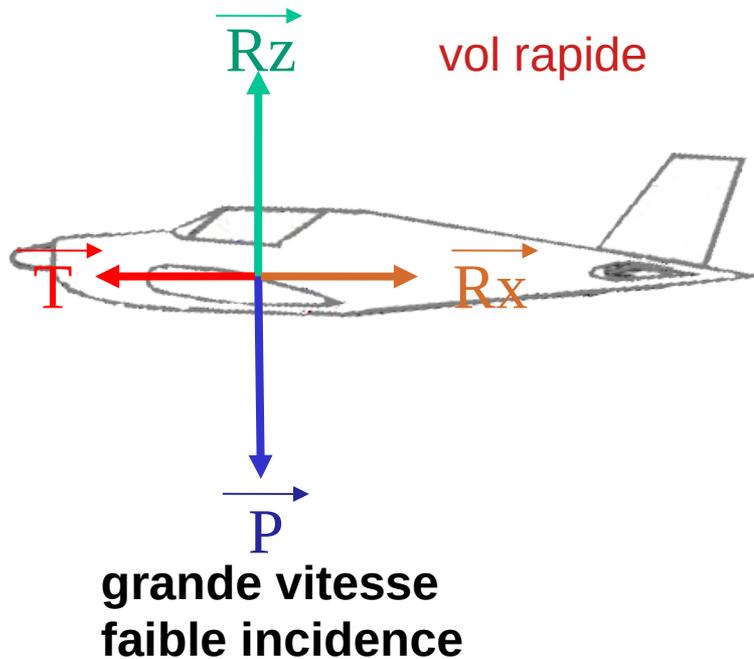
- La traction équilibre la traînée

$$T = Rx = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot Cx$$

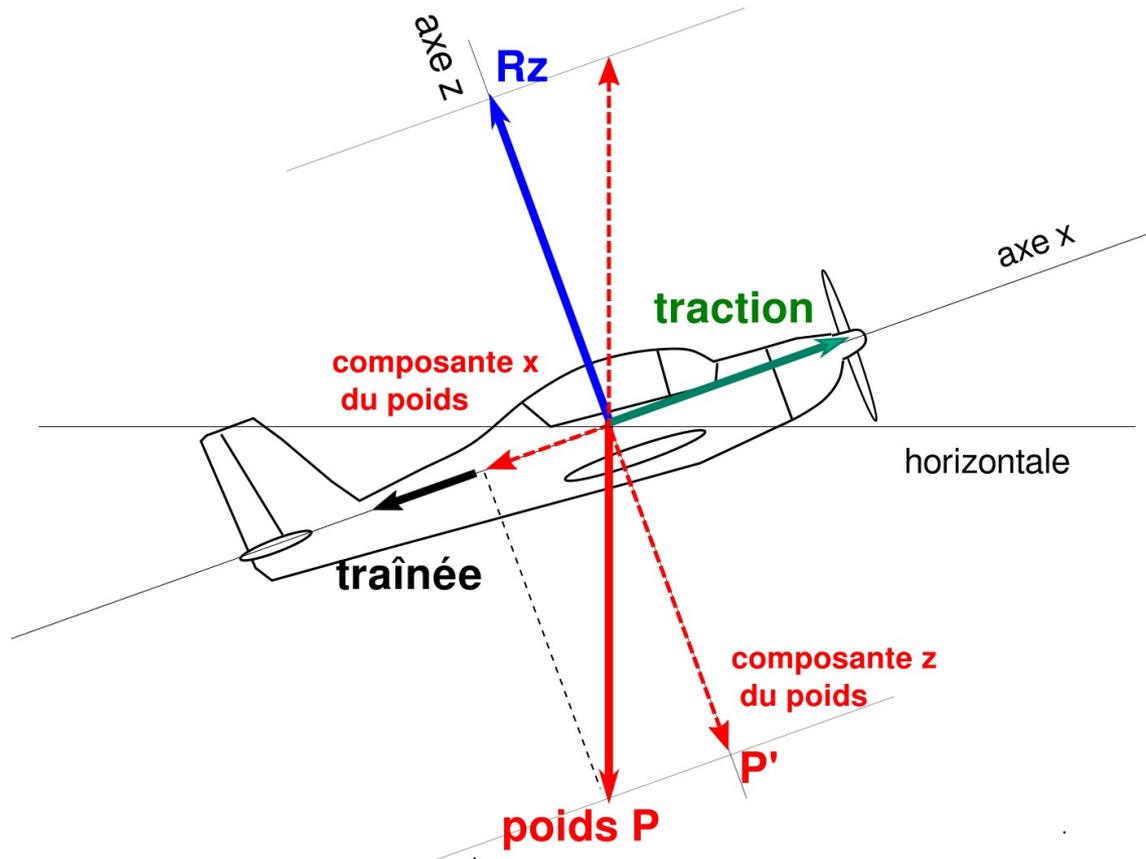
# Le vol moteur rectiligne en palier

La pression dynamique (et donc  $R_z$ ) varie avec l'incidence et la vitesse. Le pilote peut donc jouer soit sur la vitesse, soit sur l'incidence pour maintenir son avion en palier.

Il y a une infinité de couples incidence-vitesse possibles ! Par exemple :



# Le vol rectiligne à vitesse constante en montée



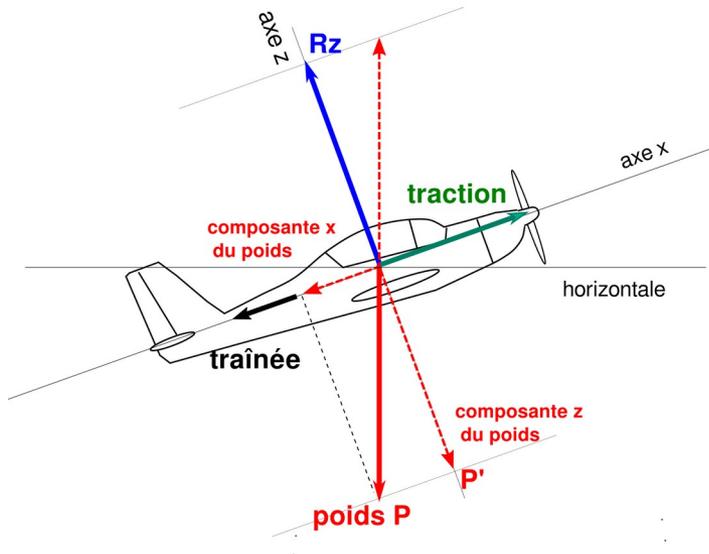
Vitesse constante → somme des forces = 0

**La traction doit équilibrer la traînée + la composante selon x du poids**

**La portance doit équilibrer la composante selon z du poids (P')**

→ valeur de la portance < poids de l'avion

# Le vol rectiligne à vitesse constante en montée



## Mise en équation

$\varphi$  = pente de la trajectoire

$Rz$  = composante  $z$  du poids

Traction  $T$  = composante  $P_x$  + trainée  $R_x$

$$T = R_x + m.g. \sin(\varphi) = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_x + m.g. \sin(\varphi)$$

$$R_z = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_x = m.g. \cos(\varphi)$$

**La traction doit être supérieure à la trainée**

**La portance est inférieure au poids  $\|Rz\| < \|P\|$**

# Le vol rectiligne à vitesse constante en montée

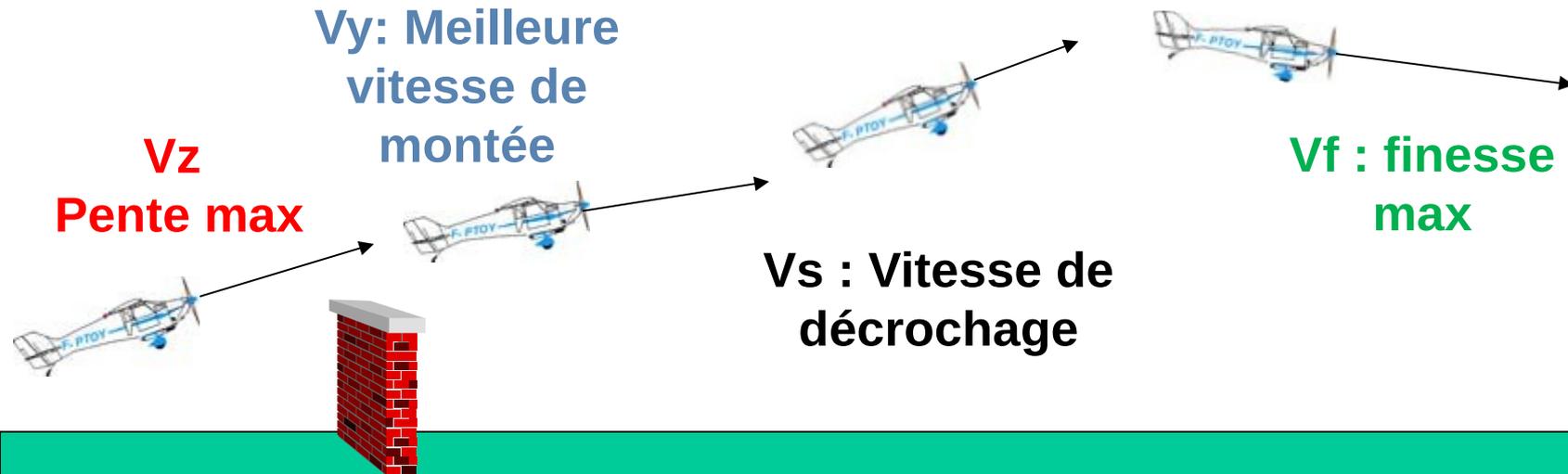
Il existe plusieurs montées à vitesse stabilisée utilisées en pratique selon les priorités :

- **$V_z$**  la montée à **pente max** (pour **gagner le plus d'altitude possible sur une faible distance**) pour le franchissements d'obstacles.
- **$V_y$**  la montée à **vitesse de montée max** pour gagner le plus rapidement possible de l'altitude

$V_z$  est plus basse que  $V_y$  : pour un avion léger, souvent

$V_z \sim 120$  km/h et  $V_y \sim 145$  km/h

# Quelques vitesses air remarquables

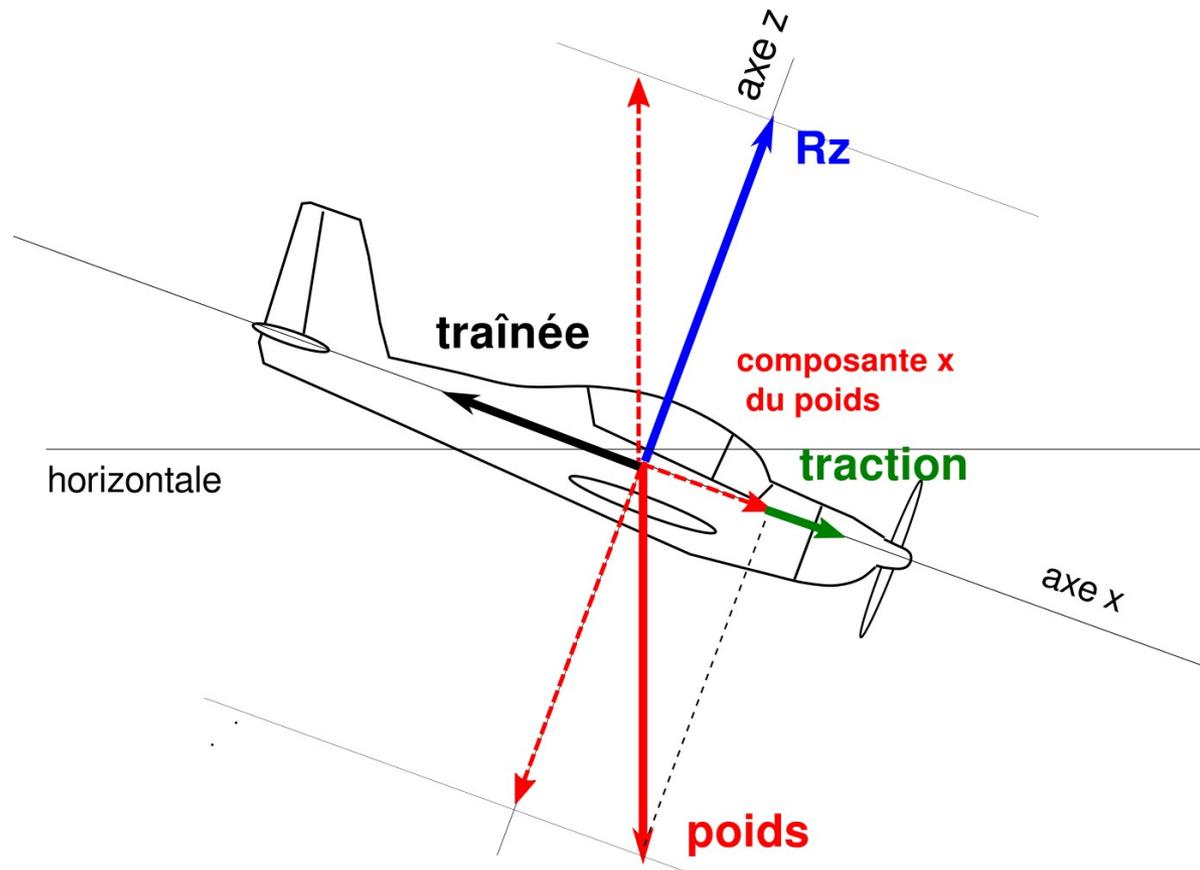


**Vz** : meilleur angle de montée ou pente max: le plus fort gain d'altitude pour la plus faible distance / sol : passage d'obstacles.

**Vy** : meilleure vitesse de montée: le plus fort gain d'altitude par unité de temps

**Vs** : vitesse de décrochage (dépend de la configuration de l'aéronef: lisse ou avec volets et du facteur de charge)

# Le vol rectiligne à vitesse constante en descente



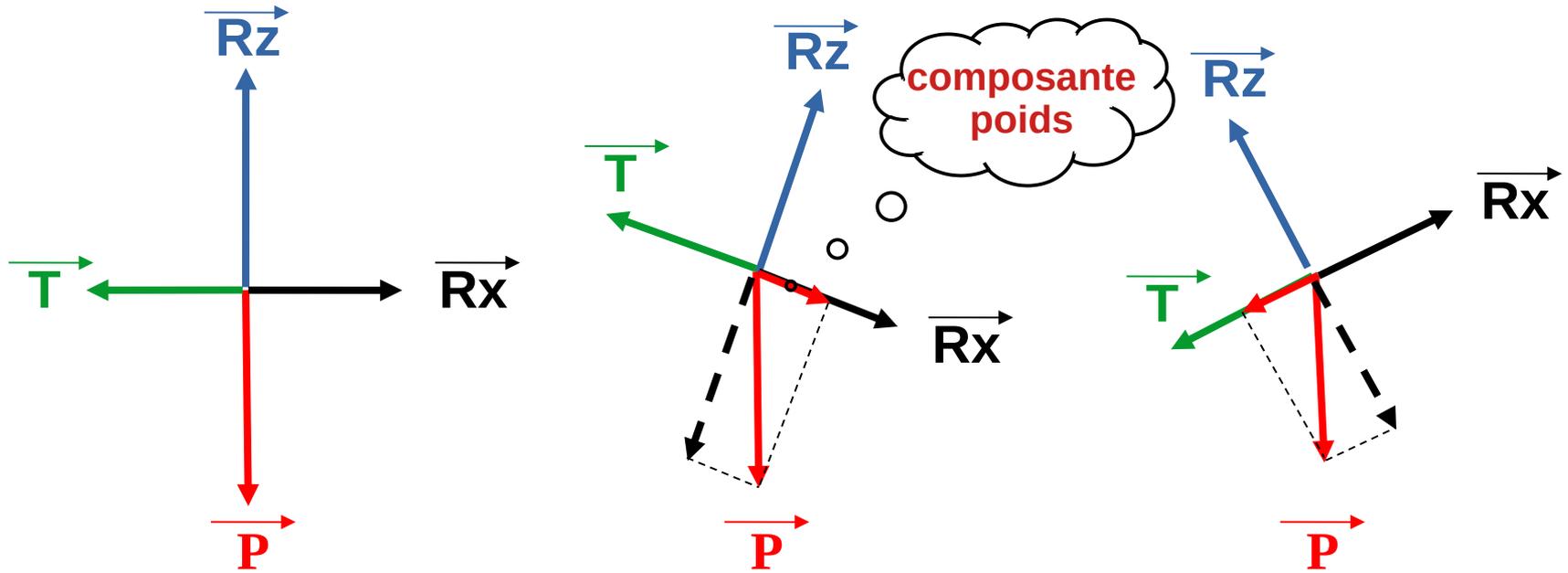
La traînée est équilibrée par **la composante du poids + la traction**

Si  $\| P_x + \text{traction} \| > \| \text{traînée} \|$ , l'avion ne peut que accélérer ...

**Attention à ne pas dépasser la VNE, ou « vitesse à ne jamais dépasser ».**

**Solution : diminuer au max la puissance du moteur, diminuer la pente de descente**

# En résumé



Vol en palier

Vol en montée

Vol en descente



## Des exemples de QCM d'examen sur la partie de cours qui précède

En vol en palier stabilisé (vol horizontal stabilisé), la force de propulsion (traction hélice ou poussée réacteur) équilibre :

- a) le poids
- b) la portance
- c) la traînée
- d) la résultante aérodynamique

**Pour passer en régime de montée stabilisée, le pilote doit :**

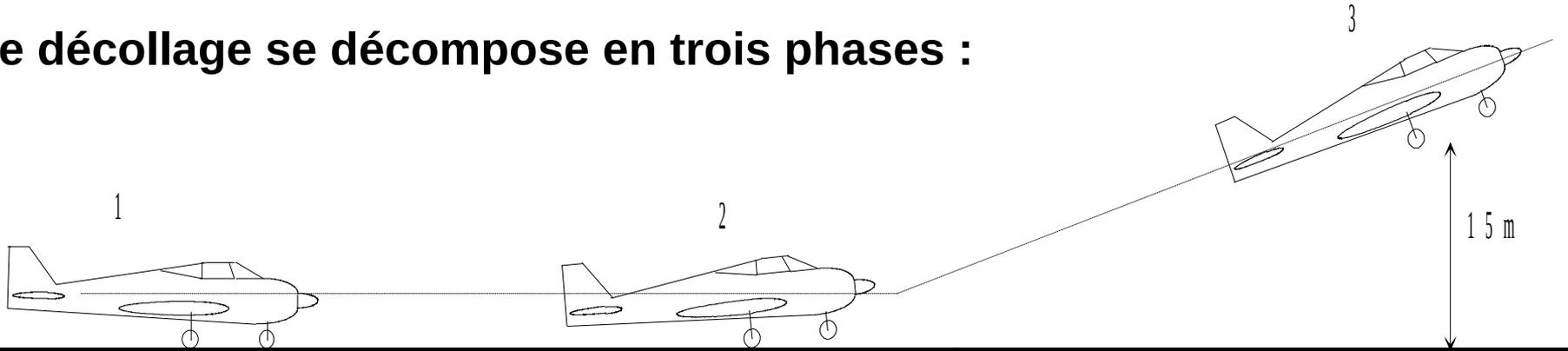
a)	réduire la puissance moteur.
b)	tirer sur le manche et conserver la même puissance moteur.
c)	tirer sur le manche et augmenter la puissance moteur.
d)	pousser sur le manche et réduire la puissance moteur.

**En montée rectiligne uniforme, la portance est :**

- (a) inférieure au poids
- (b) égale à la traînée
- (c) supérieure au poids
- (d) égale au poids

# Phases particulières du vol rectiligne: le décollage

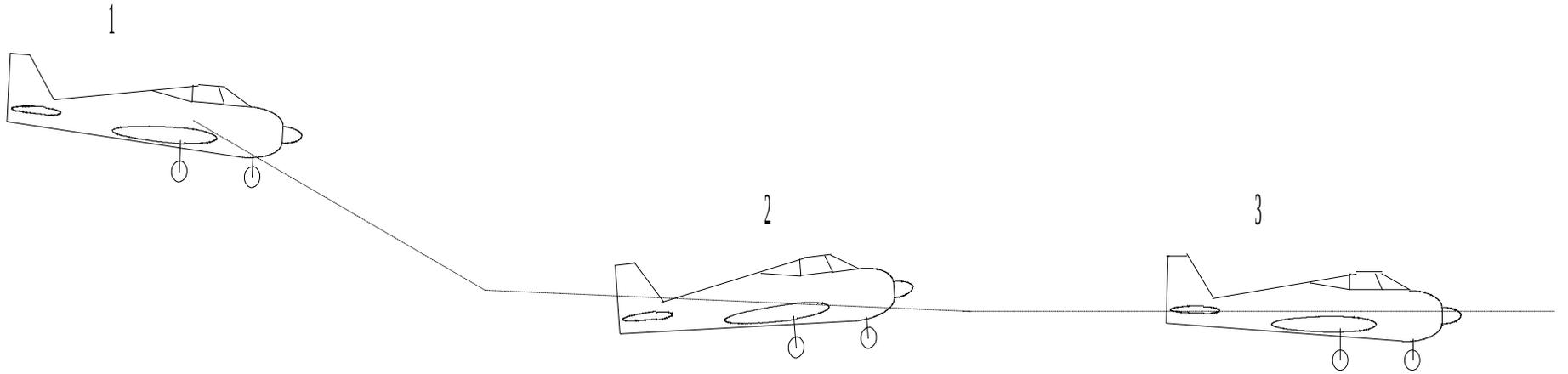
Le décollage se décompose en trois phases :



- le roulage (1) : pendant cette phase l'avion accélère sur la piste afin d'atteindre une vitesse lui permettant d'assurer sa montée initiale grâce à une portance suffisante
- La rotation (2) : la vitesse de décollage est atteinte, le pilote cabre l'avion (il tire sur le manche) pour le mettre sur une trajectoire montante (montée initiale)
- Le passage des 15 m (des 50 ft) (3) : le décollage est considéré comme fait quand l'avion atteint cette hauteur. C'est la **distance de décollage de l'avion** (de l'ordre de 2 fois la distance de roulage)

# Phases particulières du vol : l'atterrissage

L'atterrissage se décompose aussi en trois phases :



- **La finale (1)** : l'avion descend avec une vitesse et une pente stabilisées
- **L'arrondi (2)** : à proximité du sol, le pilote réduit sa pente (il arrondit) de façon à ce que l'avion vienne tangenter la piste. Sa vitesse chûte, il finit par décrocher et toucher le sol
- **Le roulage(3)** : l'avion roule sur la piste, en continuant à perdre de la vitesse (freinage). Quand la vitesse est suffisamment basse, il peut dégager par une bretelle vers son parking.

# Des atterrissages parfois difficile

Un cas fréquent : **vent de travers** au lieu d'être dans l'axe de la piste

L'avion doit arriver « en crabe » pour rester dans l'axe de la piste en contrant le vent, puis « décrocher » au moment du toucher des roues ! Délicat..

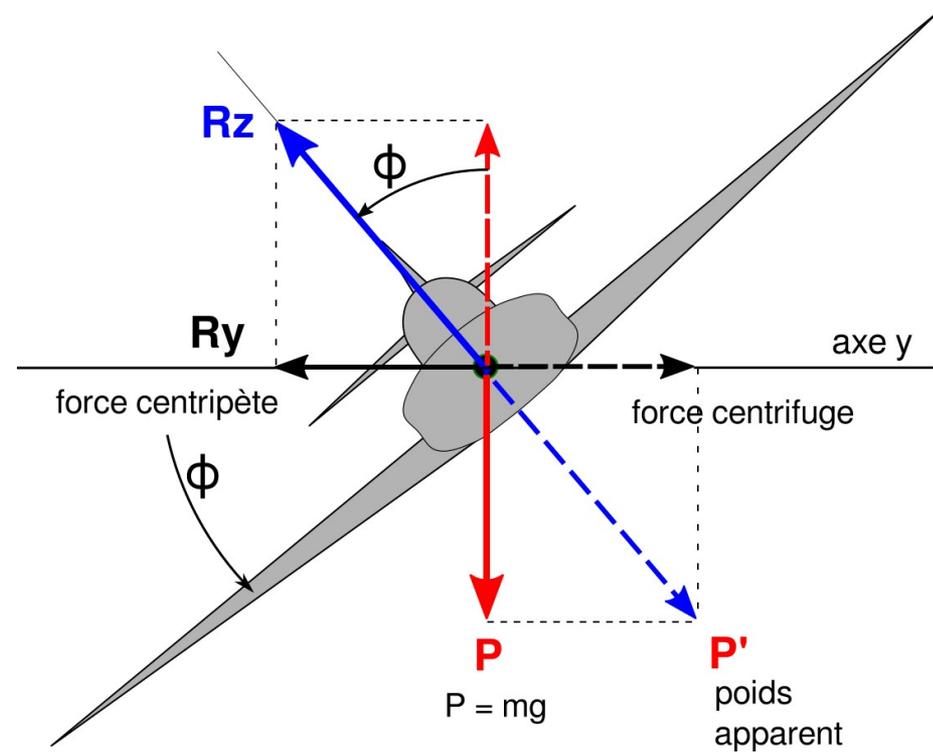
Quand l'atterrissage se passe mal, le pilote peut avoir à « remettre les gaz »



# L'avion en virage

Pour virer, on incline l'avion autour de l'axe de roulis en utilisant les ailerons.

Quand l'avion est incliné, il apparaît une **composante  $R_y$  perpendiculaire à l'axe de roulis**. C'est une force « centripète », qui fait virer l'avion



**Composante du poids équilibrant  $R_z =$  poids apparent  $P'$**   
 **$P' > P$**  ( $\rightarrow P'$  « tasse » le pilote sur son siège)

On montre en mécanique que tout corps en mouvement (ici l'avion) soumis à une force centripète décrit un cercle, de rayon d'autant plus grand que la masse de l'avion est grande, ou que sa vitesse est forte. L'avion va donc suivre une trajectoire circulaire.

La gouverne de direction sert essentiellement à maintenir l'avion bien parallèle à la trajectoire !

## En virage

### Il faut maintenir l'avion en palier

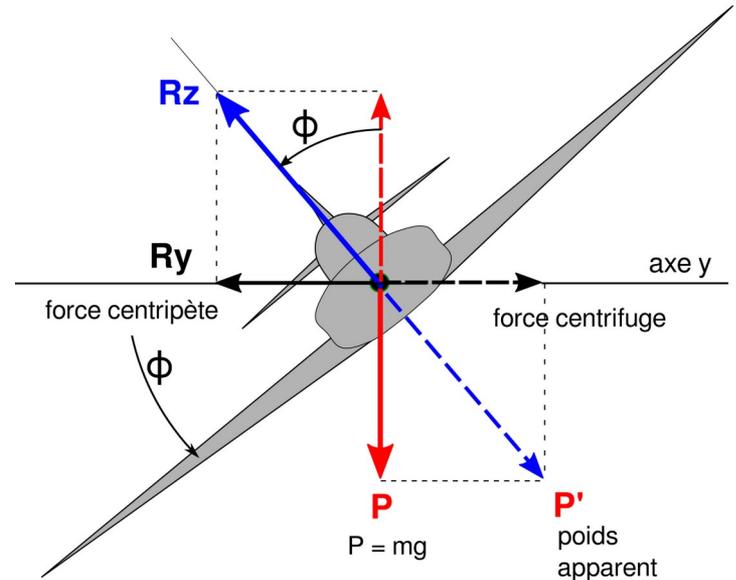
Composante verticale de  $R_z = R_z \cdot \cos(\varphi)$

$R_z = P / \cos(\varphi) \rightarrow$  pour maintenir l'équilibre vertical, il faut  $R_z > P$

(alors qu'avant le virage, on avait  $R_z = P$ )

Il faudra donc augmenter  $R_z$  :

- soit augmenter la vitesse
- soit augmenter l'incidence



### Le facteur de charge $n$ augmente

Par définition, **facteur de charge  $n =$  poids apparent  $P'$  / poids  $P$**

(nombre sans dimensions, même si on l'exprime souvent (et faussement) en g)

$$P = P' \cdot \cos(\varphi) \rightarrow \boxed{n = P' / P = 1 / \cos(\varphi)}$$

Pour un virage à

- $30^\circ$  :  $n = 1/0,866 = 1,15$
- $45^\circ$  :  $n = 1/0,707 = 1,41$
- **$60^\circ$  :  $n = 1/0,500 = 2$**  (le pilote « pèse » 2 fois son poids)
- $85^\circ$  :  $n = 1/0,087 = 11,47$  (en dehors de limites de résistance de l'avion !)

# Virage symétrique en palier à vitesse constante

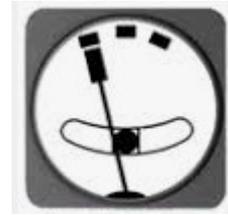
Le facteur de charge  $n$  augmente avec l'angle de virage

La vitesse de décrochage augmente avec  $n$  :

elle est multipliée par  $\sqrt{n}$

Virage non symétrique (bille non centrée) :

- Si le nez de l'avion est à l'intérieur de la trajectoire, le virage est qualifié de dérapé
- Si le nez de l'avion est à l'extérieur de la trajectoire, le virage est qualifié de glissé



Pour surveiller la bille, on peut utiliser :

un instrument bille-aiguille classique

ou un EFIS (ici : Garmin G5)



## Des exemples de QCM d'examen sur la partie de cours qui précède

**À incidence et puissance constantes, la mise en virage d'un avion entraîne :**

- |    |                               |
|----|-------------------------------|
| a) | un maintien de l'altitude.    |
| b) | un gain d'altitude.           |
| c) | une perte d'altitude .        |
| d) | une diminution de la vitesse. |

**En vol, si le pilote tire fortement sur le manche, le facteur de charge :**

- |    |                 |
|----|-----------------|
| a) | augmente.       |
| b) | diminue.        |
| c) | reste constant. |
| d) | devient nul.    |

**Le facteur de charge subi par un aéronef en virage :**

- a) diminue avec l'inclinaison
- b) est toujours égal à 2
- c) ne dépend que du type d'aéronef
- d) augmente avec l'inclinaison

## Rayon du virage

Ry est équilibrée par une force d'inertie dirigée vers l'extérieur du virage, la **force centrifuge Fc**

Fc dépend de la vitesse, de la masse et du rayon du virage :

$$F_c = m.V^2 / R$$

Par ailleurs :  $\tan(\varphi) = F_c / P = F_c/m.g$

En combinant  $F_c = \tan(\varphi).m.g$  et  $F_c = m.V^2 / R$ ,  
on obtient  $g.\tan(\varphi) = V^2 / R \rightarrow$

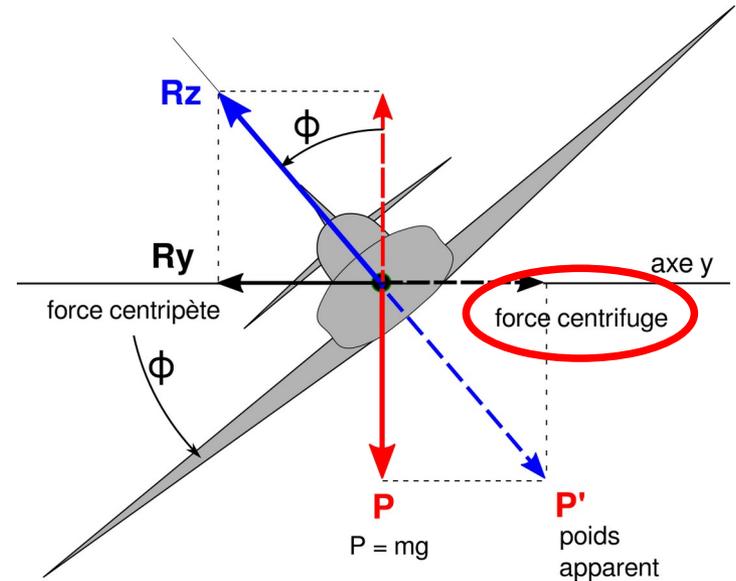
$$R = V^2 / g. \tan(\varphi)$$

à 200 km/h (env. 110 kt)

$$\varphi = 30^\circ \rightarrow R = 545 \text{ m}$$

$$\varphi = 45^\circ \rightarrow R = 315 \text{ m}$$

$$\varphi = 60^\circ \rightarrow R = 182 \text{ m}$$



Attention aux unités : il faut exprimer g en  $m.s^{-2}$  ( $g = 9,81 m.s^{-2}$ ) et V en m.s. Le résultat du calcul est R en m

## Équilibre des forces et valeur de n lors d'une ressource

L'avion décrit dans le plan vertical  
un arc de cercle de rayon R

→ la force centrifuge  $F_c$  s'ajoute à  $P'$

$$\rightarrow n = (F_c + P') / P$$

$$F_c = (m \cdot V^2) / R$$

$$P' = (m \cdot g) \cdot \cos(\varphi)$$

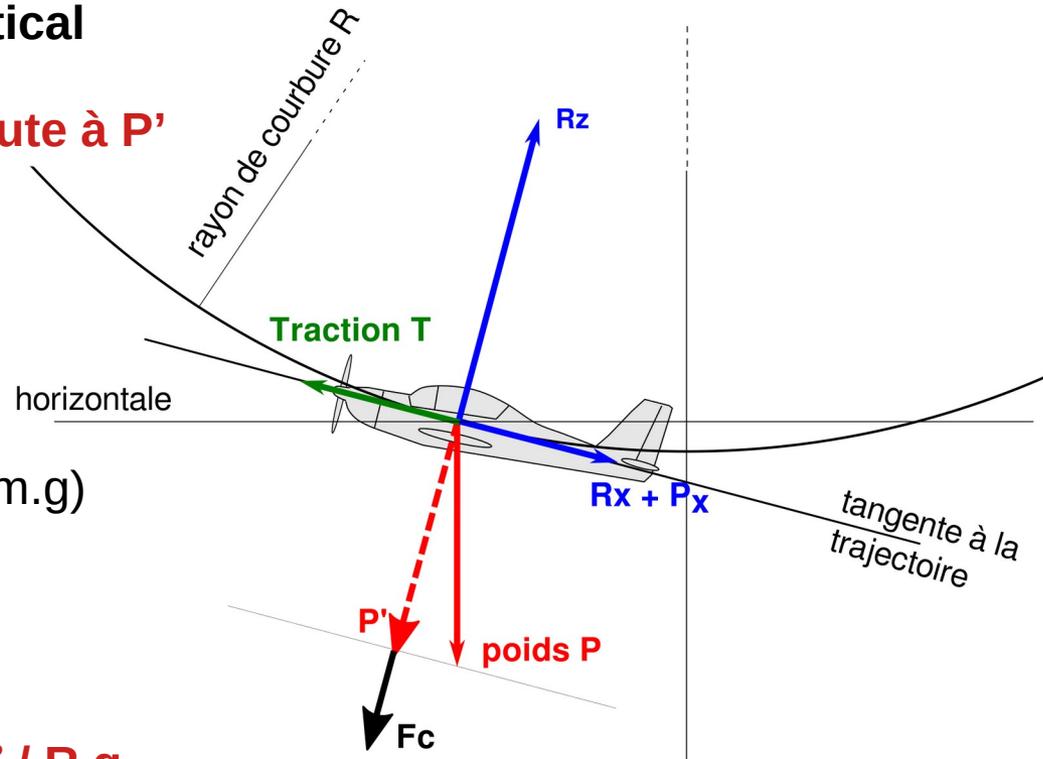
$$\rightarrow n = (m \cdot V^2 / R + m \cdot g \cdot \cos(\varphi)) / (m \cdot g)$$

$$\rightarrow n = (V^2 / R + g \cdot \cos(\varphi)) / g$$

Si  $\varphi$  (pente de montée) faible

$$\rightarrow \cos(\varphi) \sim 1$$

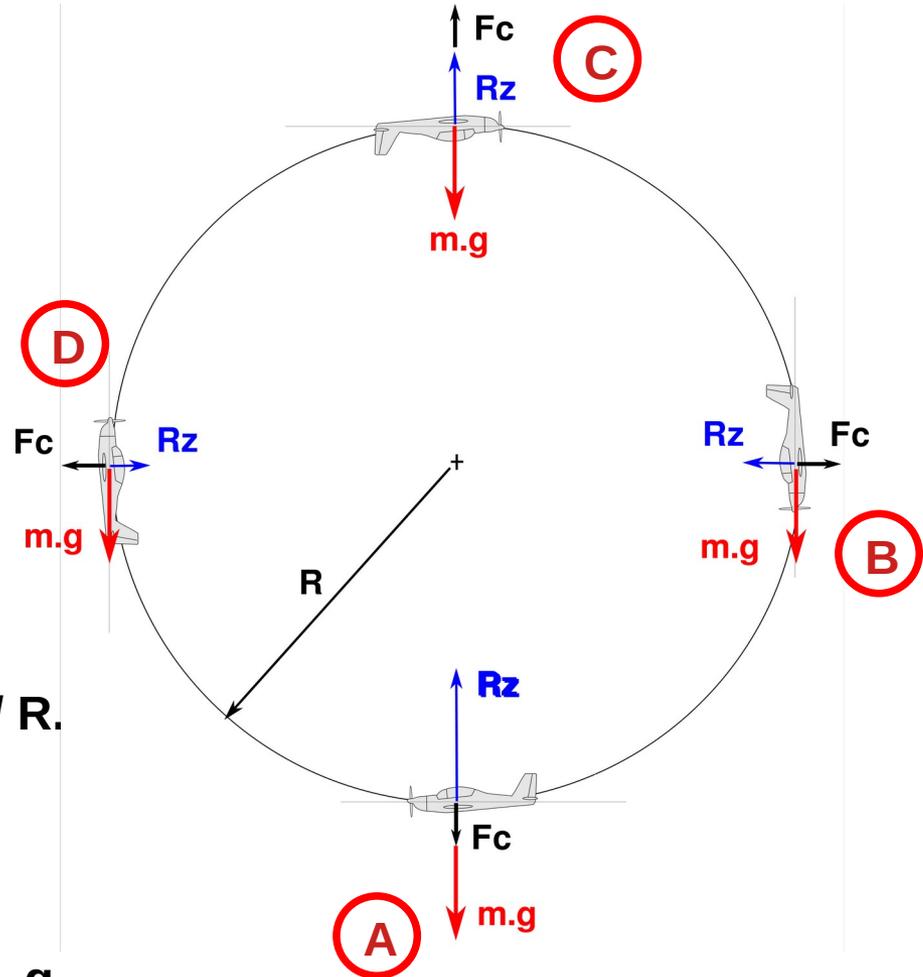
$$n = 1 + V^2 / R \cdot g$$



Si la ressource est brutale (R petit) et la vitesse forte, le facteur de charge peut dépasser la limite tolérée par l'avion !

$$\text{Pour } 120 \text{ Kt et } R = 200 \text{ m} \rightarrow n = 2,15$$

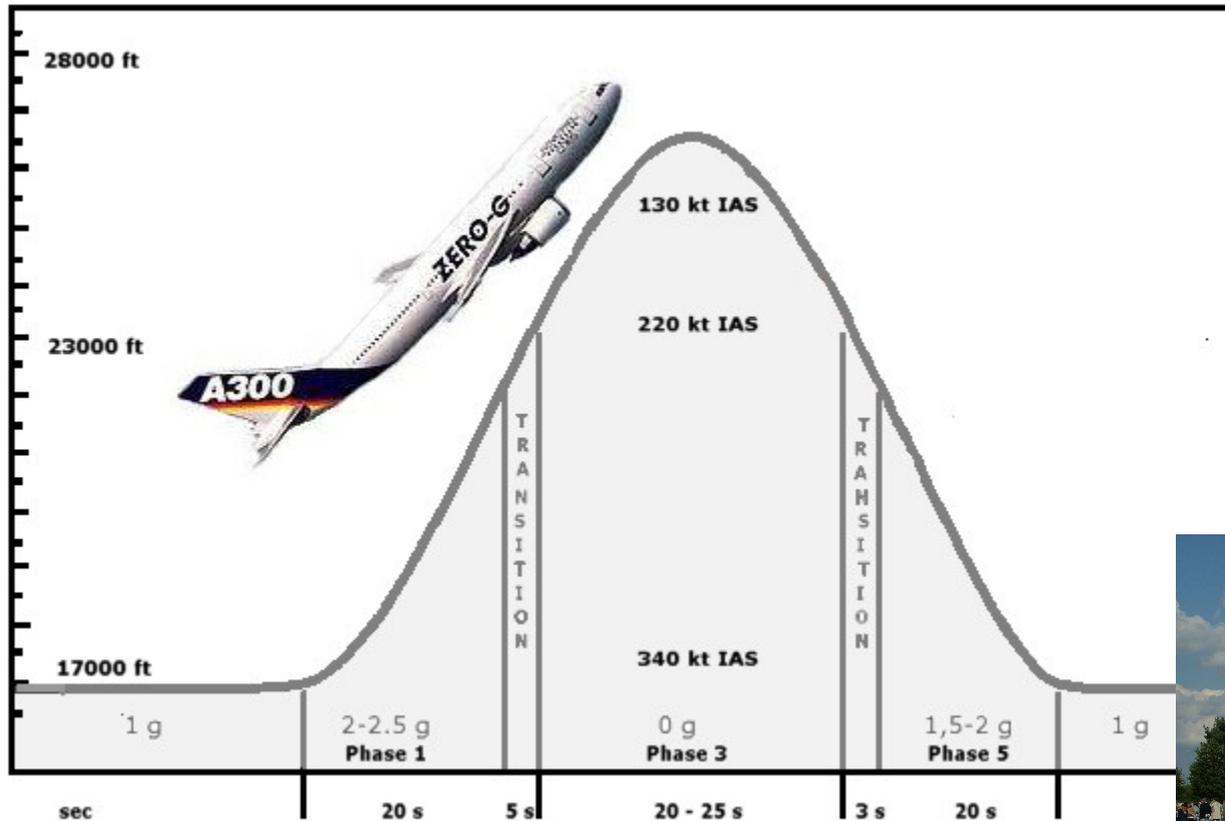
## Équilibre des forces et valeur de $n$ lors d'une boucle



- en A (ressource) :  $n = 1 + V^2 / R$ .  
n peut être très élevé
- en B et D :  $n = V^2 / R.g$
- en C (vol dos) :  $n = -1 + V^2 / R .g$   
n peut être  $< 0$

# Vol parabolique

Dans ce type de vol « en cloche », l'avion se trouve pendant quelques secondes en apesanteur (facteur de charge  $n = 0$ )



Un Airbus A310, aménagé pour permettre des expériences de courte durée en apesanteur. Également des vols payants touristiques



# Ressources ou liens utiles

- <http://www.futura-sciences.com/sciences/videos/kezako-passe-t-il-lorsquun-avion-franchit-mur-son-866/>
- TPE Aviation <http://mecanique-et-physique-du-vol.e-monsite.com/pages/vie-associative.html>
- Fédération Française de parachutisme  
[http://www.grandvol.com/FFP-manuel/mv\\_02.htm](http://www.grandvol.com/FFP-manuel/mv_02.htm)
- Manuel BIA CIRAS Toulouse version 3.0 de 2019
- BIA/Lille/Aérodynamique%20et%20mécanique%20du%20vol/Aero%20meca%20de%20vol/Profile%20aile%20portance%20trainée.pdf
- [http://pedagogie.ac-limoges.fr/ciras/IMG/pdf/1\\_-\\_amv\\_-\\_bia\\_eleve\\_2016.pdf](http://pedagogie.ac-limoges.fr/ciras/IMG/pdf/1_-_amv_-_bia_eleve_2016.pdf)
- Kezako Comment un avion vole t il?
- [http://ffa-jeunes.ens-cachan.fr/BIA-P%C3%A9dago\\_files/C.pdf](http://ffa-jeunes.ens-cachan.fr/BIA-P%C3%A9dago_files/C.pdf)

et bien d'autres documents à rechercher sur Wikipedia !