

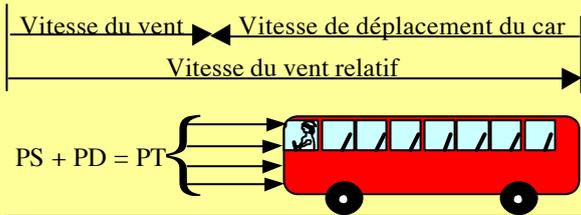
## LA SUSTENTATION

c'est l'effet porteur dû aux actions combinées des pressions et dépressions que l'air exerce sur un corps

La pression est l'application d'une force sur une surface :  $P = F / S$



1/ **Corps au repos** : on appelle "pression statique PS", la pression exercée par l'air immobile sur toute la surface d'un corps au repos



2/ **Corps en mouvement** : on appelle pression dynamique PD, l'énergie acquise par l'air grâce à sa vitesse, ou pression due à la vitesse du vent relatif appliqué sur une surface perpendiculaire aux filets d'air. La valeur de cette pression peut être déterminée par le loi de Bernoulli :

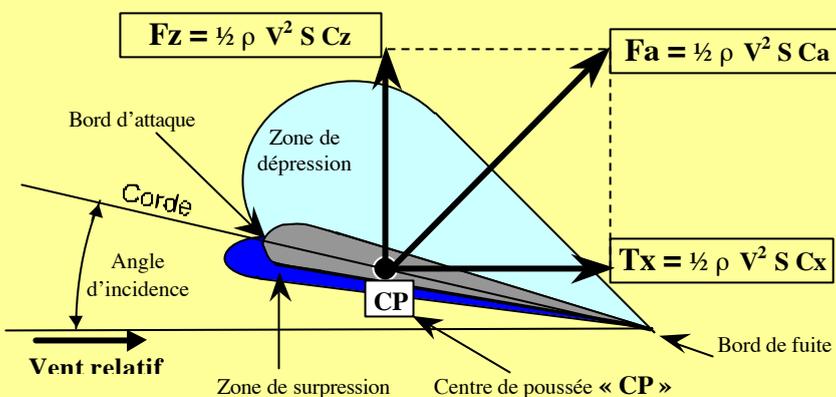
$$PD = \frac{1}{2} \rho V^2$$

V = Vitesse du vent relatif  
 $\rho$  = masse volumique de l'air

On appelle pression totale « PT », ou pression d'impact « PI », la somme des pressions statique et dynamique

L'air étant compressible, sa masse volumique est proportionnelle à la pression exercée et inversement proportionnelle à la température. La force résultant de la pression dynamique sur une surface perpendiculaire « S » vaut :

$$\text{Force} = \text{Pression} \times \text{Surface} \Rightarrow \text{Force aérodynamique} = PD \times S = \frac{1}{2} \rho V^2 S$$



### FORCE AERODYNAMIQUE

c'est la force générée par l'ensemble des surpressions à l'intrados et des dépressions à l'extrados. Elle augmente avec vitesse et angle d'incidence

Son centre d'application s'appelle :

Centre de poussée

### COMPOSANTES DE LA FORCE AERODYNAMIQUE (Fa)

La portance (**Fz**) est la composante aérodynamique perpendiculaire aux filets d'air du vent relatif.

La traînée (**Tx**) est la composante aérodynamique parallèle aux filets d'air du vent relatif.

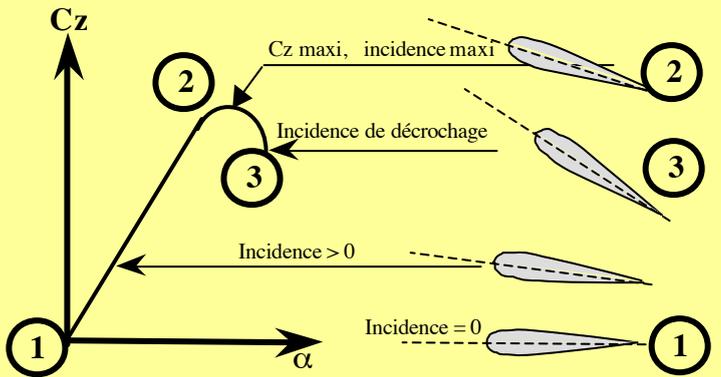
LE CENTRE DE POUSSEE (**C.P.**) point d'application des forces aérodynamiques. Il se déplace suivant l'angle d'incidence

LE FOYER est le point d'application des variations de portance. Il est fixe

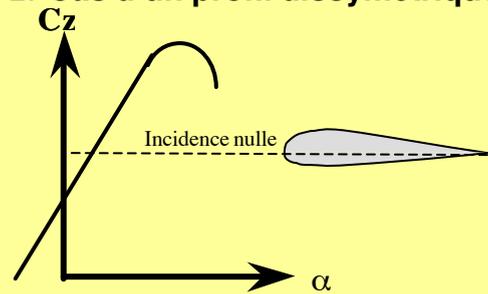
Les coefficients CZ et Cx sont respectivement les coefficients de portance et de traînée. Ils varient en fonction : a/ la forme du profil b/ l'angle d'incidence

## VARIATION DU COEFFICIENT DE PORTANCE

### A/ Cas d'un profil symétrique



### B/ Cas d'un profil dissymétrique



A portance nulle, l'incidence est **négative**

A incidence nulle, la portance est **positive**

1/ **l'incidence et le coefficient de portance sont nuls**

2/ **l'incidence et le coefficient de portance sont au maximal**

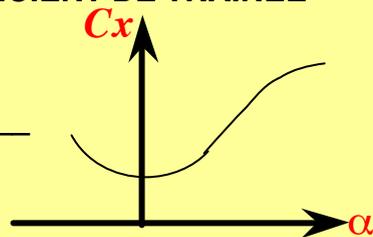
Entre 2 et 3/ **l'incidence augmente tandis que le coefficient de portance diminue**

3/ **l'aile décroche, il n'y a plus de portance**

## VARIATION DU COEFFICIENT DE TRAINEE

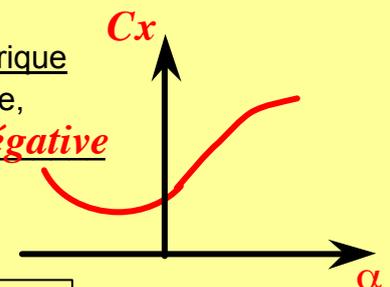
### A/ Profil symétrique

à incidence nulle,  
la traînée est **positive**  
et minimale



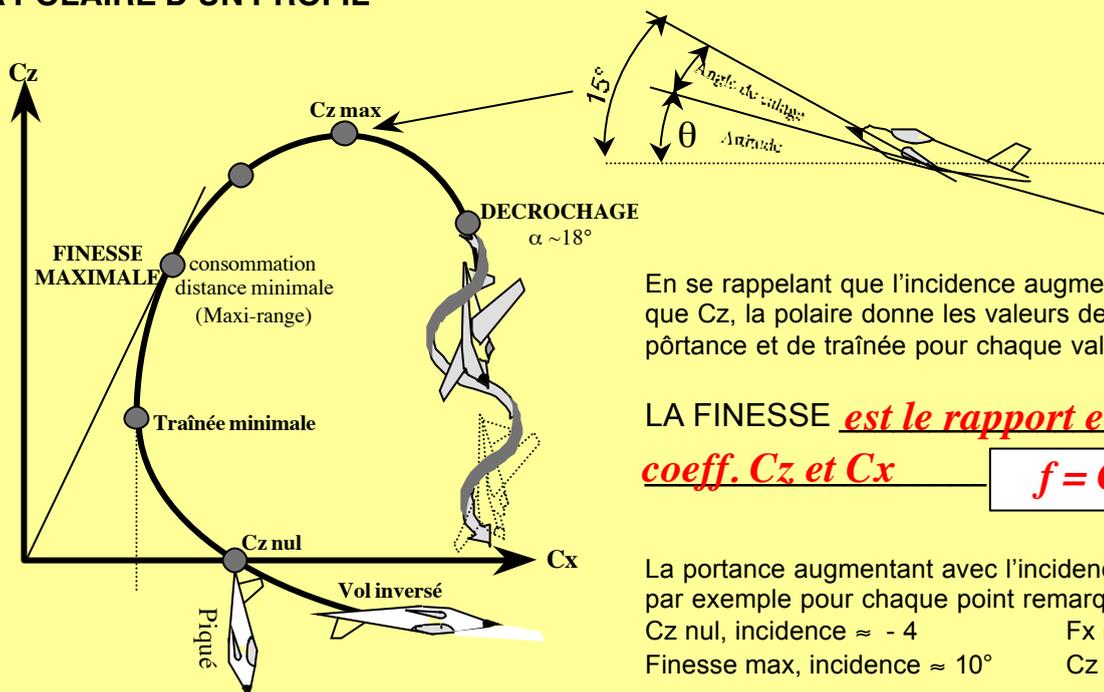
### B/ Profil dissymétrique

à traînée minimale,  
l'incidence est **négative**



La traînée est toujours **positive**

## LA POLAIRE D'UN PROFIL



En se rappelant que l'incidence augmente en même temps que  $C_z$ , la polaire donne les valeurs des coefficients de portance et de traînée pour chaque valeur d'incidence.

LA FINESSE **est le rapport entre les coeff.  $C_z$  et  $C_x$**

$$f = C_z / C_x$$

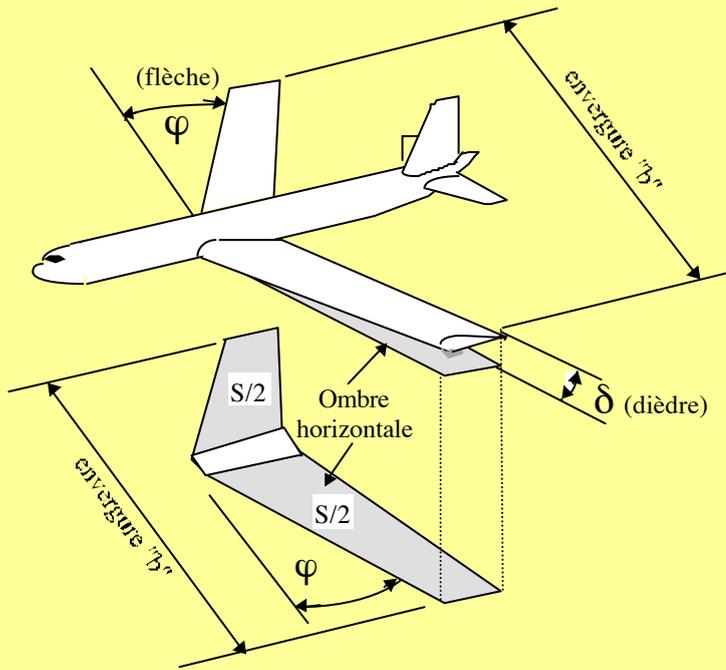
La portance augmentant avec l'incidence, on peut prendre par exemple pour chaque point remarquable :

$C_z$  nul, incidence  $\approx -4^\circ$

$C_x$  mini, incidence  $\approx 5^\circ$

Finesse max, incidence  $\approx 10^\circ$

$C_z$  max, incidence  $\approx 15^\circ$



**ENVERGURE « b »** : longueur comprise entre les extrémités extérieures des deux demi-ailes.

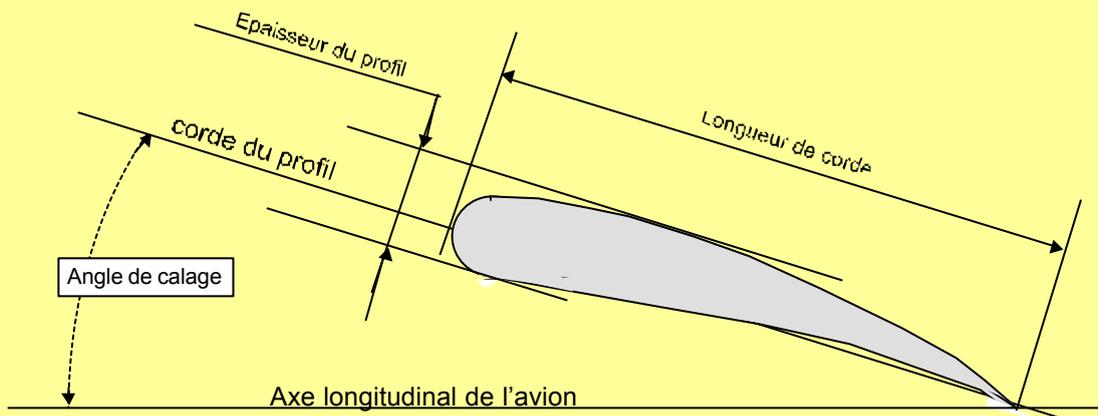
**SURFACE ALAIRE « S »** : surface de l'aile projetée (ombre) sur le plan perpendiculaire à l'axe des lacets de l'avion. Dans le cas d'une aile haute, la surface alaire comprend, en sus de la surface alaire de chaque demi-aile, la surface correspondant à la largeur du fuselage.

**DIEDRE (δ)** : angle formé entre le plan de l'aile et le plan perpendiculaire au plan de symétrie de l'avion.

**FLECHE « φ »** : angle compris entre une ligne de référence de l'aile et la perpendiculaire au plan de symétrie de l'avion.

**PROFIL D'AILE**

coupe de l'aile suivant un plan parallèle au plan de symétrie de l'avion, plan lui même perpendiculaire au plan de la surface alaire.



**LIGNE MOYENNE**

ligne à égale distance de l'extrados et de l'intrados (en pointillés)

**PROFONDEUR**

longueur de la corde de référence prise du bord d'attaque au bord de fuite

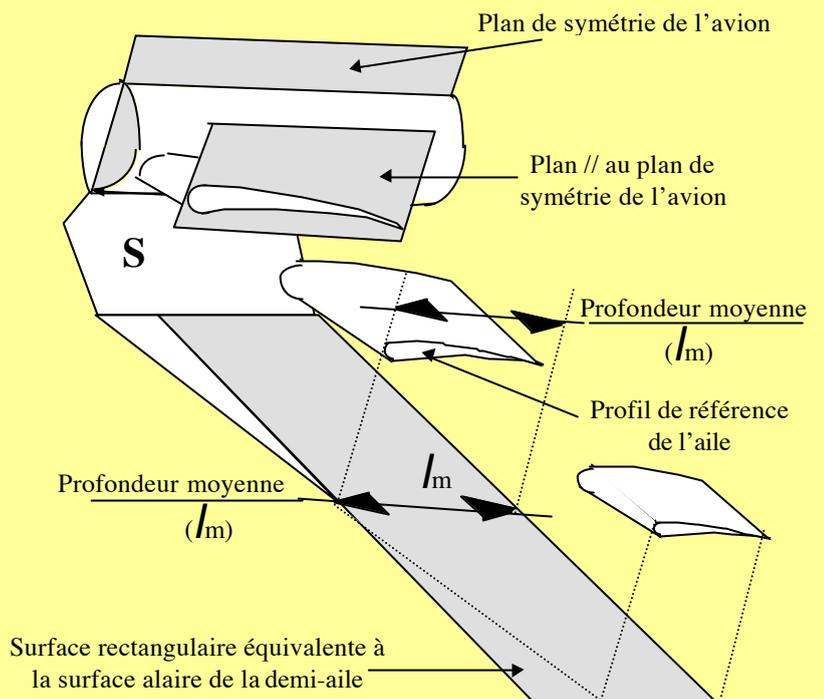
**ALLONGEMENT**

C'est le rapport entre l'envergure et la profondeur moyenne de l'aile

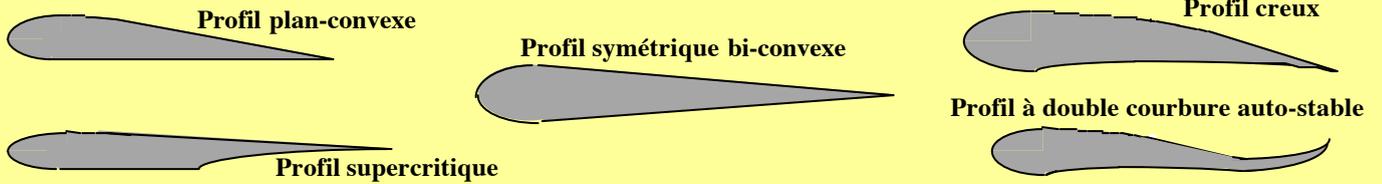
$$\lambda = \frac{b_{\text{envergure}}}{l_m} = \frac{b^2}{l_m \times b} = \frac{b^2}{S}$$

**L'ANGLE DE CALAGE**

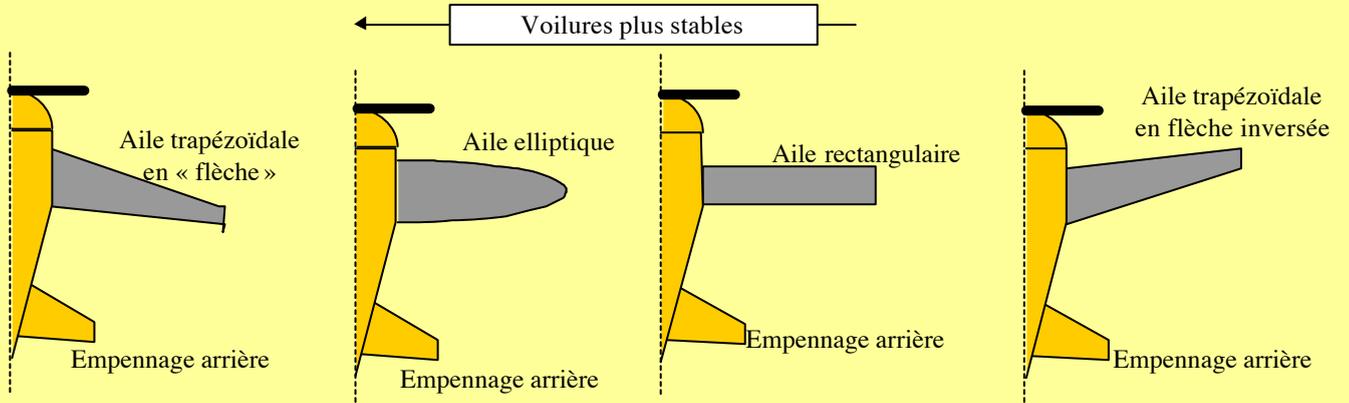
Angle compris, par construction, entre l'axe longitudinal de l'avion et la corde de référence de l'aile.



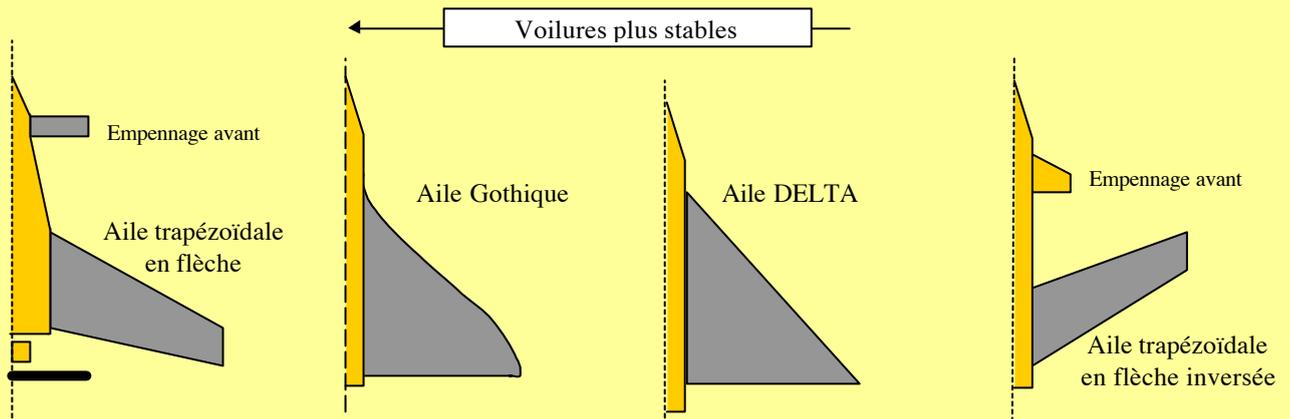
### PROFILS D'AILES



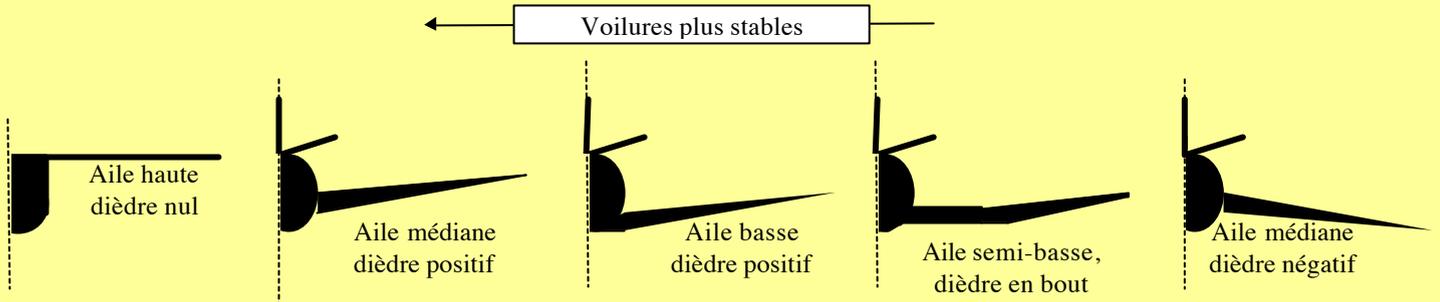
### PLANS LONGITUDINAUX : FORMULE CLASSIQUE



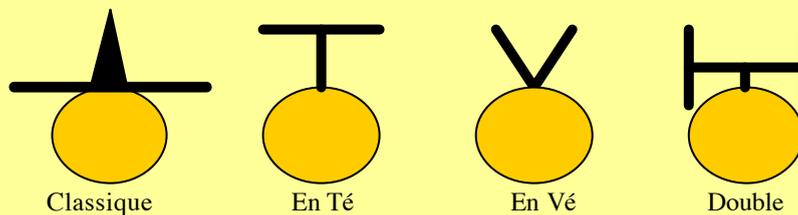
### PLANS LONGITUDINAUX : FORMULE « CANARD »



### PLANS FRONTAUX : AILES

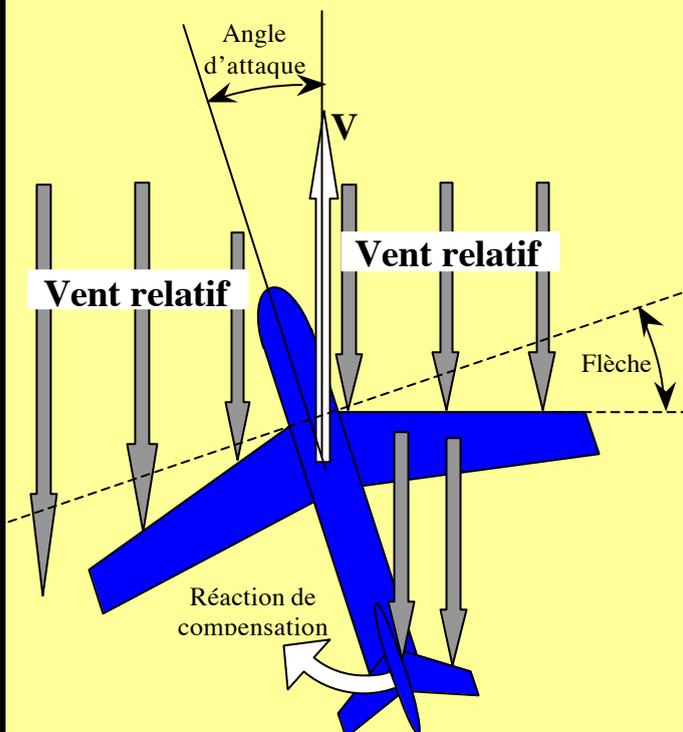


### PLANS FRONTAUX : EMPENNAGES CRUCIFORMES



## LE DERAPAGE

Lors d'un dérapage, l'écoulement de l'air n'est pas parallèle au plan de symétrie de l'avion. On dit que cet écoulement est *dissymétrique*



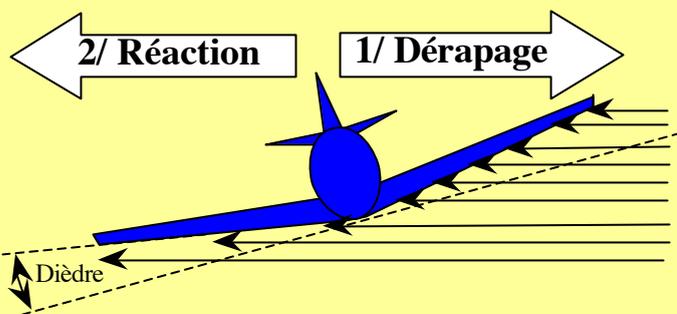
### Stabilité de route

a) l'effet du vent sur les surfaces verticales (dérive et fuselage) tend à « redresser » l'avion par rotation autour de l'axe de *lacets*

b) Par effet de la flèche, l'aile « en avant » attaque le vent relatif de front, alors que l'aile en arrière l'attaque plus en oblique. La traînée de l'aile en avant est plus *importante* que celle de l'aile en arrière. Par suite, on constate un effet correcteur de cap par rotation autour de l'axe de *lacets*.

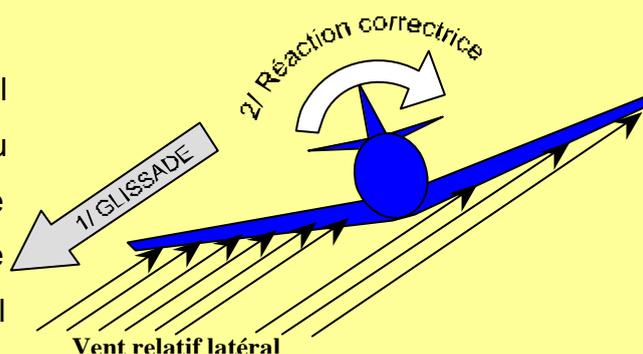
### Stabilité latérale

L'aile en arrière "sous le vent", attaque les filets d'air en oblique, sa traînée et sa portance sont *moins* importantes que celles de l'aile "en avant". La différence de portance entraîne une rotation autour de l'axe de *roulis*, et une contre-réaction tend à réduire le déplacement *latéral* de l'avion. Cet effet est accentué par le *dièdre* de chaque demi-aile de l'avion.

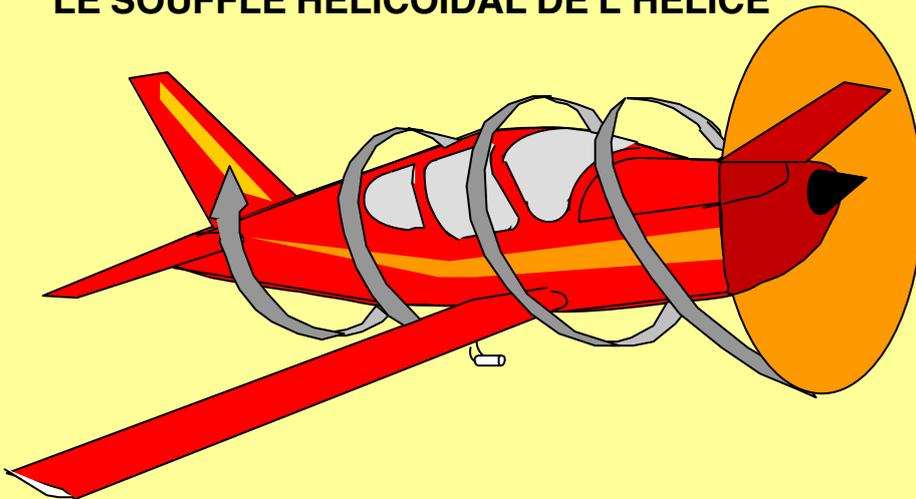


## LA GLISSADE

L'appareil étant incliné (sans mise en virage), il glisse vers le bas. L'aile au vent, par effet du dièdre, a une portance *supérieure* à celle de l'aile sous le vent. Il s'ensuit une rotation autour de l'axe de *roulis*. L'attaque du vent relatif latéral sur la dérive ajoute à cette correction mais avec un effet de rotation autour de l'axe de *lacets*



## LE SOUFFLE HELICOÏDAL DE L'HELICE



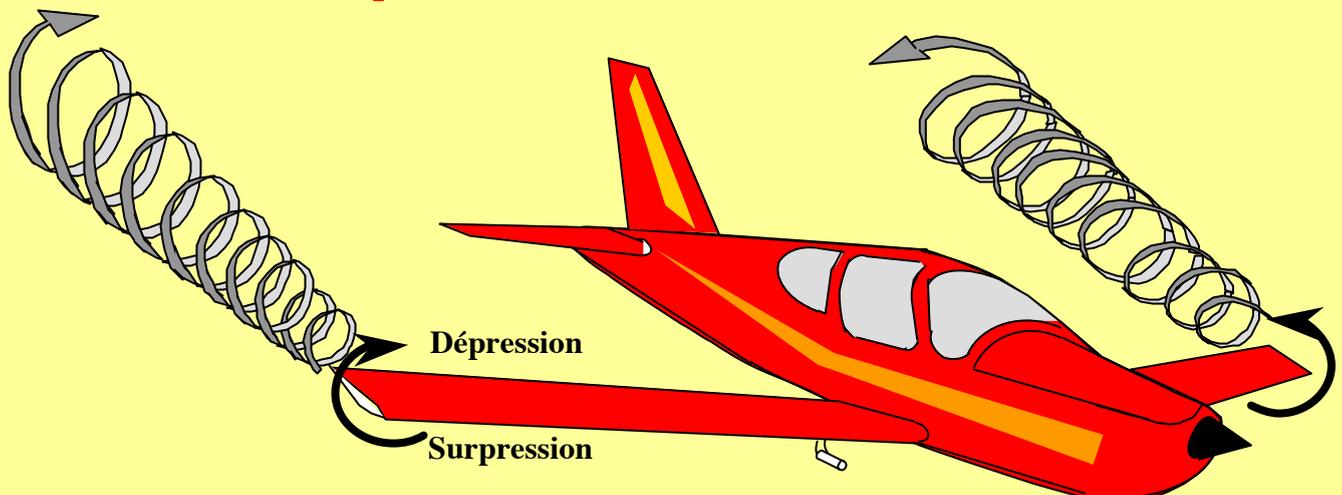
La masse d'air refoulée par l'hélice vers l'arrière tourne dans le même sens. Il résulte de ce souffle :

- dissymétrie de l'écoulement de l'air sur les surfaces aérodynamiques verticales entraînant une rotation autour de l'axe des roulis et de lacet  
Cet inconvénient sera réduit en vol de croisière par un déport de la dérive par rapport à l'axe des roulis et en décalant l'axe du moteur.
- une traînée plus importante sur la surface du fuselage que sur les autres surfaces.

## TOURBILLONS MARGINAUX

Appelés également turbulence de sillage, ces tourbillons sont dus au principe même de la portance qui n'existe que par la différence de pression entre l'intrados et l'extrados de l'aile. La pression étant plus importante à l'intrados, l'air tend à se déplacer vers l'extrados afin d'équilibrer les pressions. Ce courant d'air se traduit par une divergence des filets à l'intrados et une convergence des filets vers le fuselage à l'extrados.

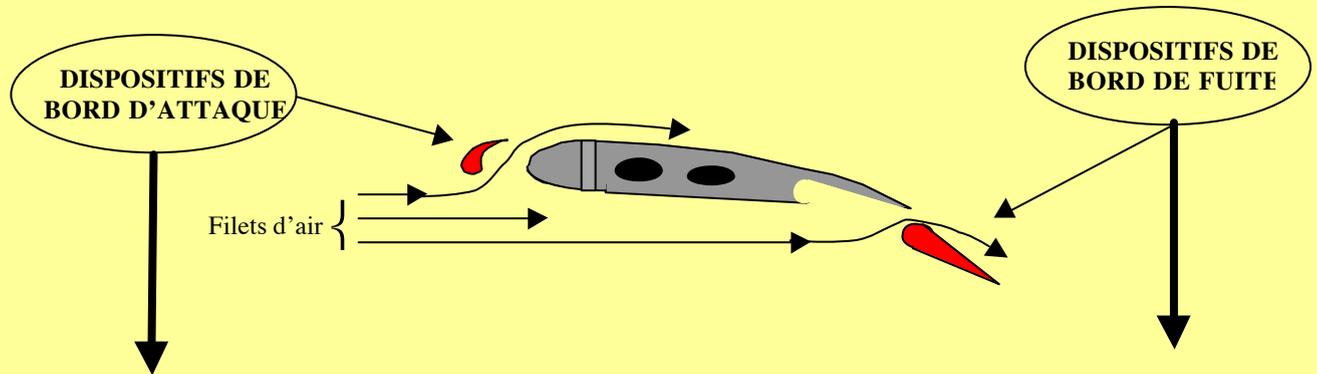
Il résulte de ce phénomène, une traînée induite qui est d'autant plus faible que l'allongement de l'aile est important



Ces tourbillons sont dangereux pour un avion léger qui serait pris dans ceux d'un gros porteur. Le pilote prendra garde en tenant compte de la direction du vent qui « transporte ce tourbillon » et il devra se tenir légèrement au dessus de l'aile de cet avion qui le précède

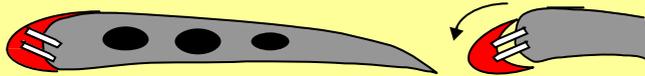
*Ils ont pour fonction d'augmenter la portance aux basses vitesses et de diminuer la finesse par augmentation de traînée :*

- a) *par augmentation de la surface portante*
- b) *augmentation de la courbure de l'aile*
- c) *augmentations simultanées de la surface portante et de la courbure*

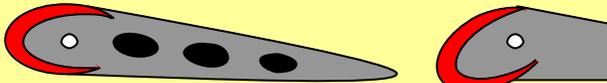


**1/ Bec fixe :** bec de sécurité, utile à basse vitesse mais présentant une forte traînée à grande vitesse.

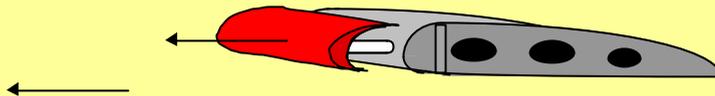
**2/ Becs automatiques :** à grande vitesse, ils sont maintenus en configuration lisse (fermé) par la pression dynamique. Ils sortent par gravité à basse vitesse.



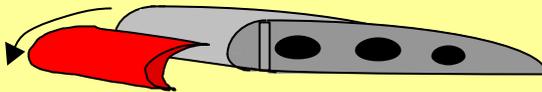
**3/ Bec basculant commandé**



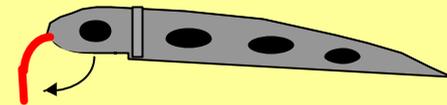
**4/ Bec de sécurité à fente :** automatique ou commandé



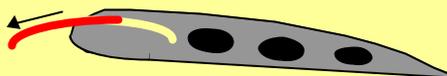
**5/ Bec HANDLEY-PAGE :** bec alliant basculement (augmentation de courbure) et fente qui assure une meilleure efficacité des ailerons à grande incidence



**6/ Volet Kruger**



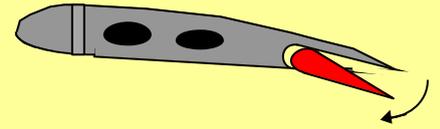
**7/ Volet BETZ**



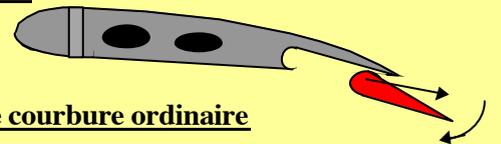
**EFFETS DES DISPOSITIFS DE BORD D'ATTAQUE**

- a) *augmentation de  $C_z$  max*
- b) *augmentation modérée de  $C_x$*
- c) *augmentation de l'incidence max*

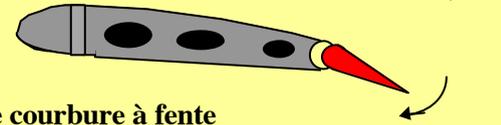
**1/ Volet d'intrados :** source d'une traînée importante, il favorise le freinage aérodynamique à l'atterrissage, mais pénalise les performances au décollage et donne lieu à vibrations.



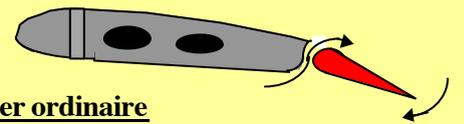
**2/ Volet ZAP**



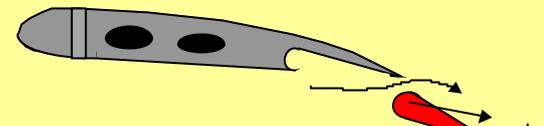
**3/ Volet de courbure ordinaire**



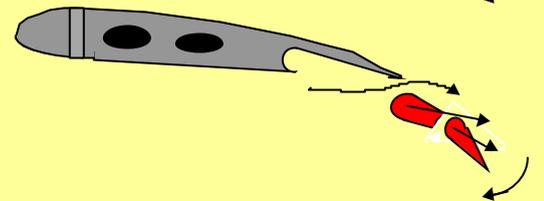
**4/ Volet de courbure à fente**



**5/ Volet Fowler ordinaire**



**6/ Volet Fowler à fentes multiples**



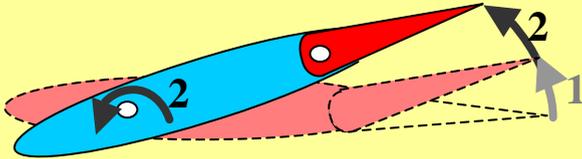
**EFFETS DE DISPOSITIFS DE BORD DE FUITE**

- a) *augmentation de  $C_z$  max*
- b) *forte augmentation de  $C_x$*
- c) *diminution de l'incidence max*

### COMPENSATEURS DE REGIME

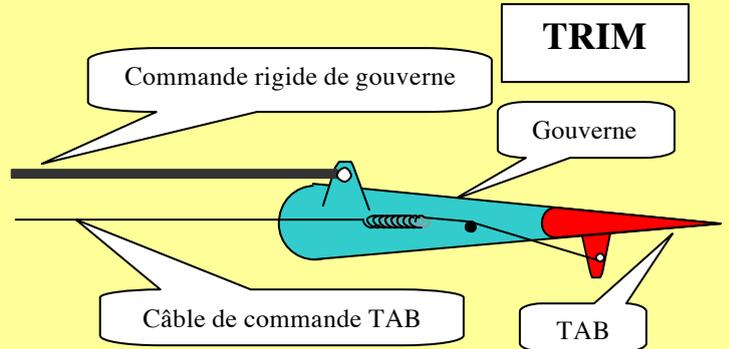
Ils ont pour rôle *d'annuler les efforts du pilote aux commandes lors des vols stabilisés*. Ce sont des organes commandés par le pilote.

#### P.H.R. (plan horizontal réglable)



L'évolution est commandée par le braquage gouverne(pointillés). Lorsque l'avion est stabilisé sur la nouvelle trajectoire, un calculateur commande un nouveau calage du plan horizontal réglable(P.H.R.). Ce principe a pour avantage de réduire la traînée.

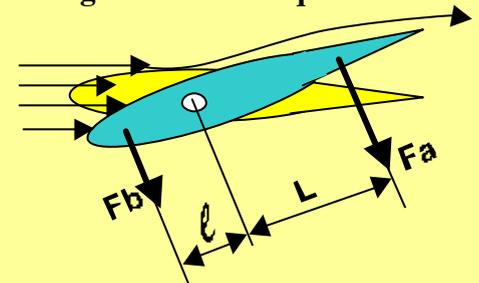
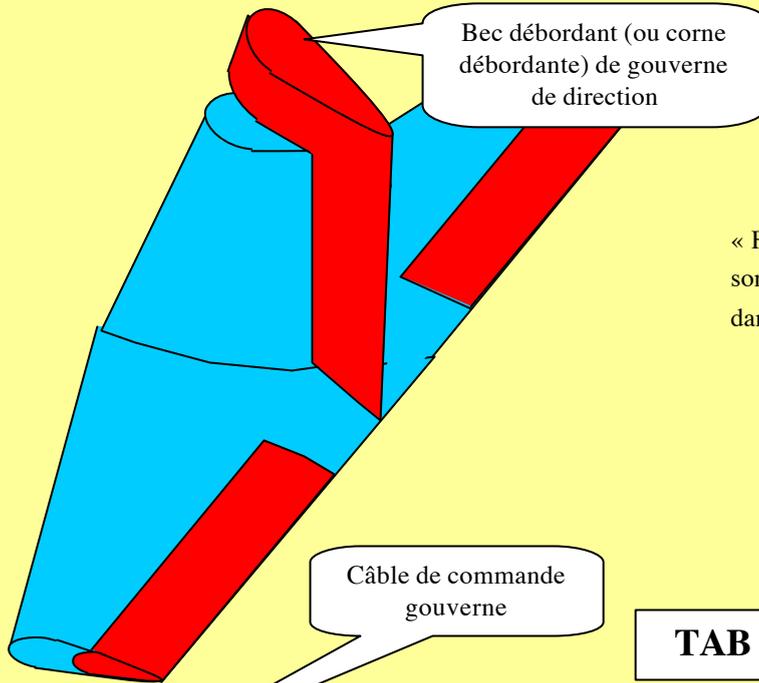
#### TRIM



le trim, ou tab commandé, permet au pilote de régler l'effet de gouverne en fonction du régime de vol stabilisé recherché. (croisière, montée, descente, attitude)

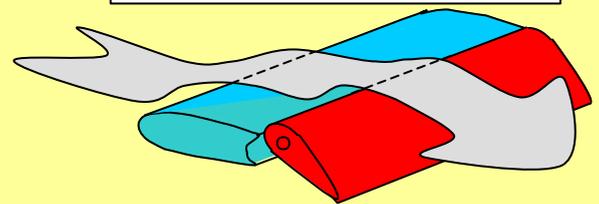
### COMPENSATEURS D'EVOLUTION

Ils ont pour rôle *de réduire les efforts pilote aux commandes lors des évolutions de l'avion autour de son centre de gravité*. Ce sont des organes automatiques dont l'effet est proportionnel au braquage de la gouverne commandée.

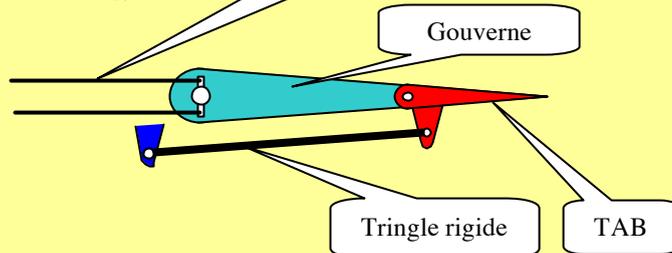


«  $F_a \cdot L$  » est le moment que doit équilibrer le pilote par son effort. «  $F_b \cdot l$  » est le moment assistant le pilote dans son effort

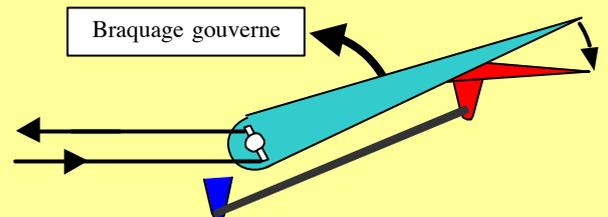
#### GOVERNE A AXE DÉPORTÉ



#### TAB AUTOMATIQUE



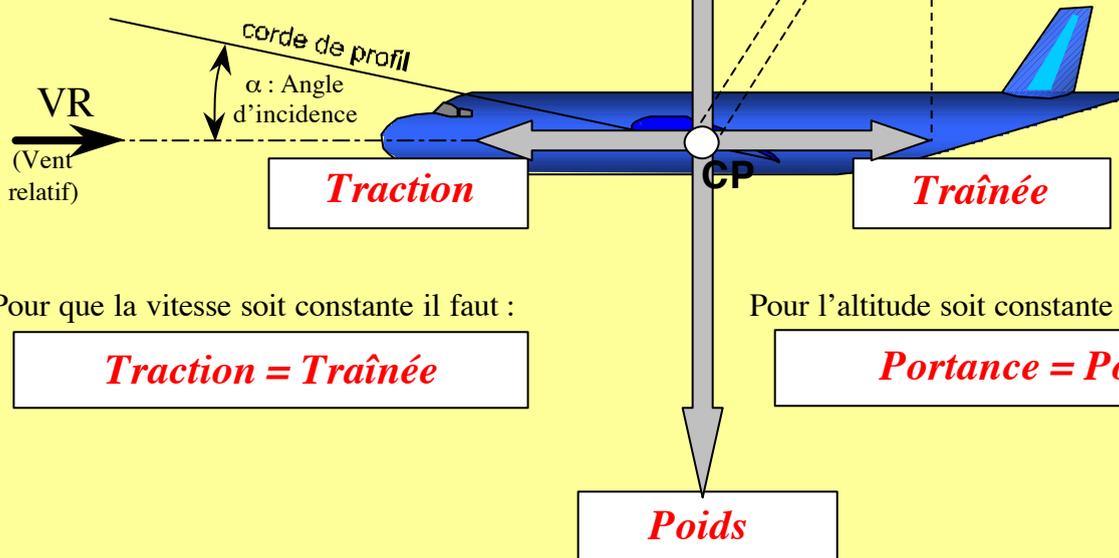
a) Gouverne au neutre



b) Gouverne braquée

### DEFINITION

*Vol horizontal à vitesse et altitude constante*



Pour que la vitesse soit constante il faut :

***Traction = Traînée***

Pour l'altitude soit constante il faut :

***Portance = Poids***

### RELATION VITESSE / INCIDENCE

Si la traction augmente, la vitesse augmente, la portance augmente, l'avion monte

Si l'incidence augmente, la portance augmente, l'avion monte

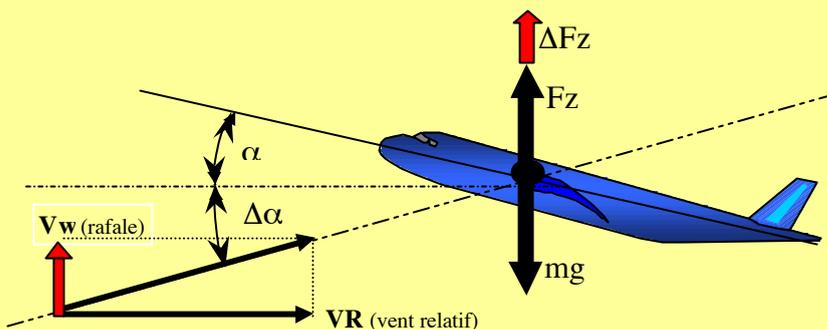
Si la traction diminue, la vitesse diminue, la portance diminue, l'avion descend

Si l'incidence diminue, la portance diminue, l'avion descend

Pour effectuer un vol à altitude constante, il faut :

- si la vitesse augmente : diminuer l'incidence
- si la vitesse diminue : augmenter l'incidence
- si l'incidence augmente : diminuer la traction
- si l'incidence diminue : augmenter la traction

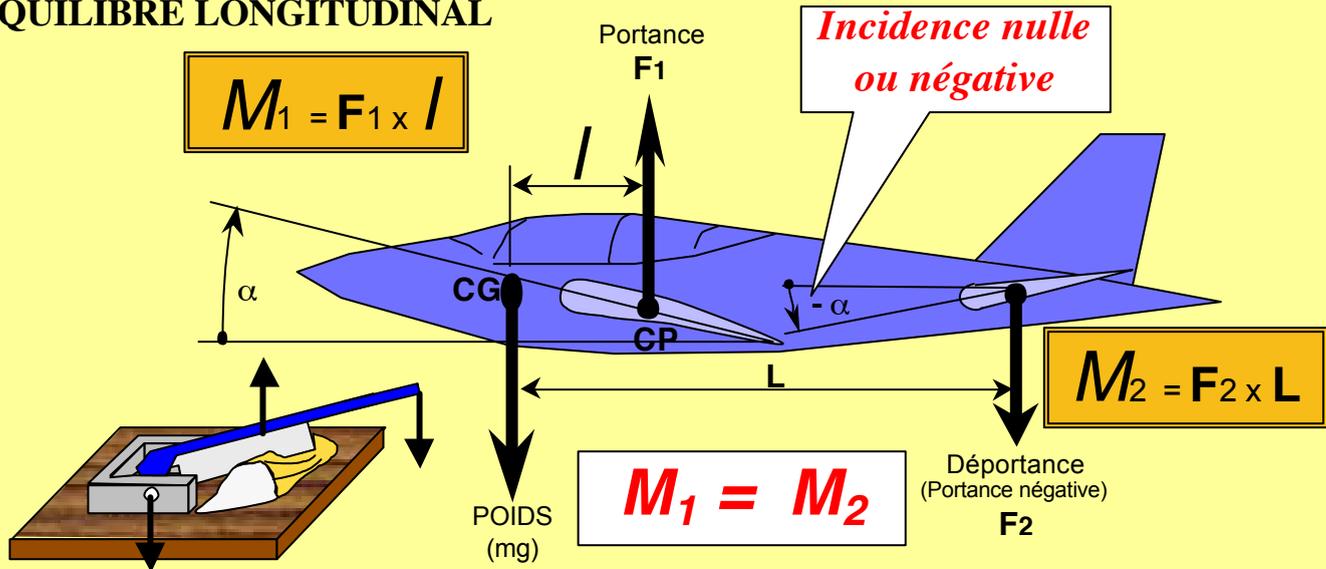
### EFFET D'UNE RAFALE ASCENDANTE ( $V_{wz}$ )



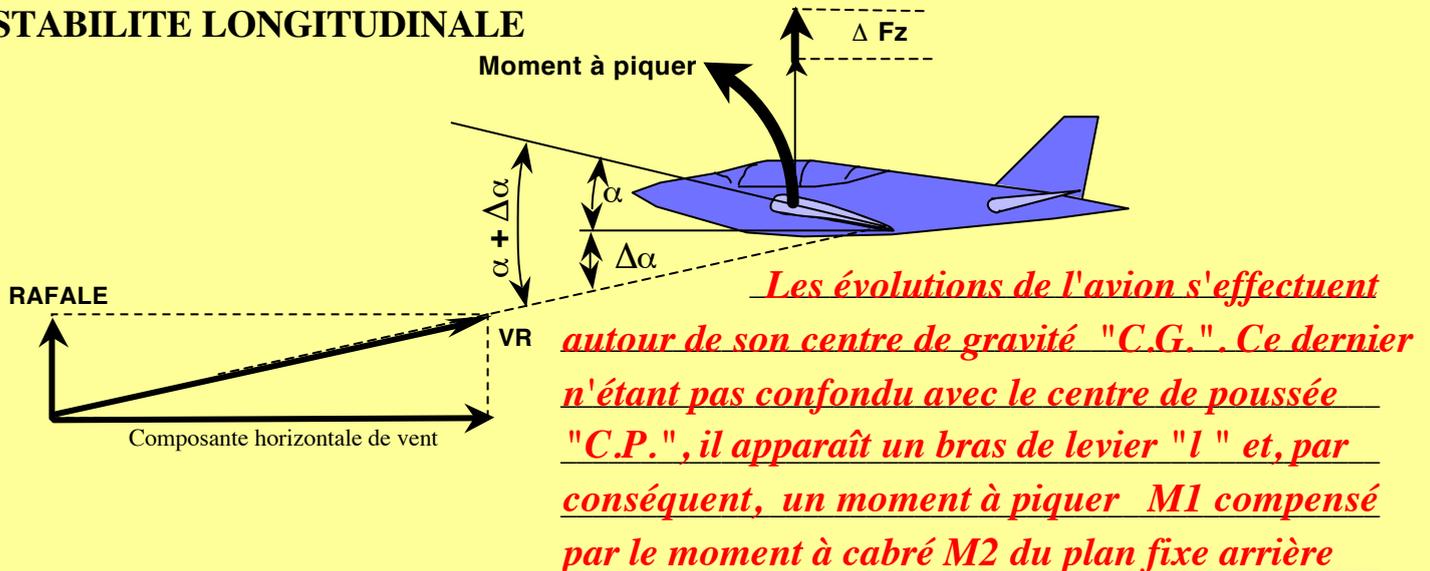
Une rafale ascendante a pour effet d'augmenter l'incidence et par conséquent la portance. Mais si, avant que n'est lieu la rafale, l'avion volait déjà à une incidence proche de l'incidence maximale (vitesse minimale et coefficient de portance maximal) :

***il y a risque de décrochage***

## EQUILIBRE LONGITUDINAL



## STABILITE LONGITUDINALE



## MODIFIER L'EQUILIBRE LONGITUDINAL

On peut être amené à modifier l'équilibre longitudinal pour :

- maintenir la portance lors de variations de vitesse*
- maintenir l'incidence lors de rafales*
- augmenter ou diminuer la portance pour monter ou descendre*

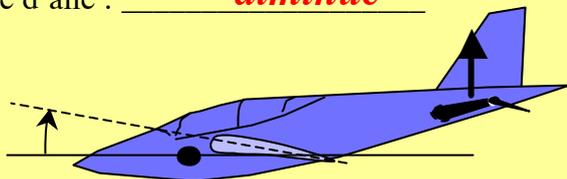
On peut modifier cet équilibre en modifiant le calage de l'empennage

PRINCIPE : *gouverne de profondeur ou empennage mobile modifiant «  $M_2$  »*

Gouverne de profondeur baissée :

Calage empennage : *positif*

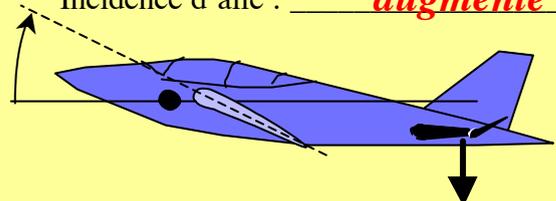
Incidence d'aile : *diminue*



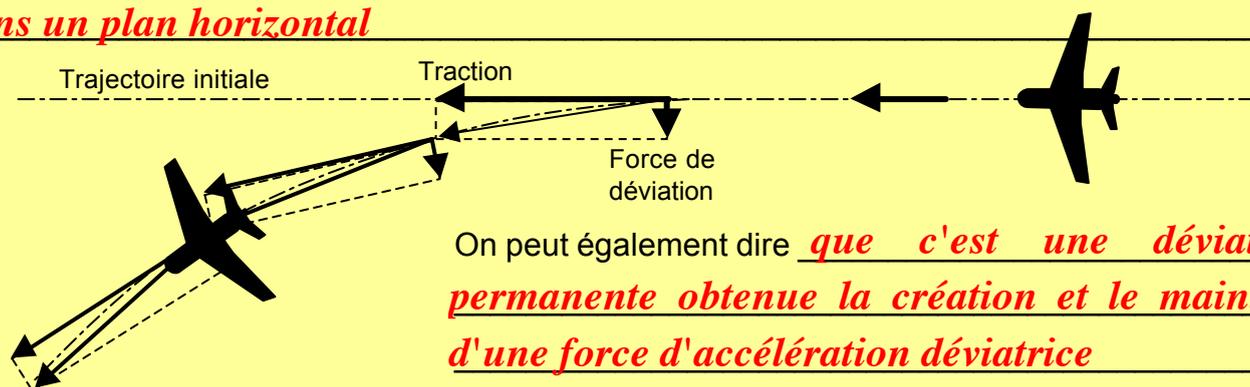
Gouverne de profondeur levée :

Calage empennage : *négatif*

Incidence d'aile : *augmente*

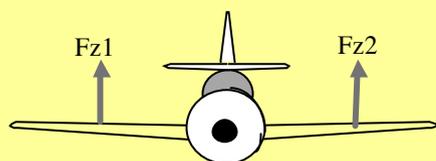


**DEFINITION DU VIRAGE** *Le virage est un changement permanent de trajectoire dans un plan horizontal*



On peut également dire que c'est une déviation permanente obtenue la création et le maintien d'une force d'accélération déviatrice

### VOL RECTILIGNE HORIZONTAL

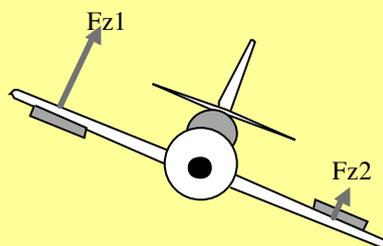


- Aile horizontale
- Ailerons au neutre

$$Fz1 = Fz2$$

### MISE EN VIRAGE (on incline l'avion)

Demi-aile levée, aileron baissé

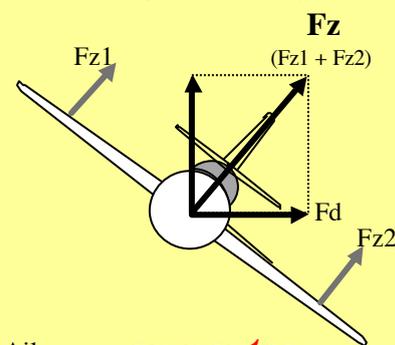


Demi-aile baissée, aileron levé

on constate :  $Fz1 > Fz2$

l'avion s'incline

### VIRAGE STABILISE

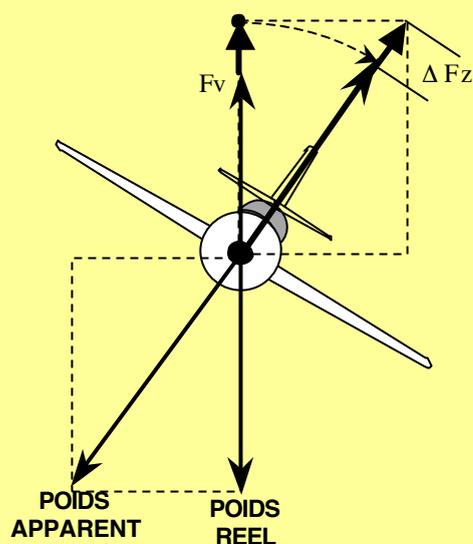


Ailerons au neutre

$$Fz1 = Fz2$$

L'avion reste incliné

### MAINTIEN DE L'ALTITUDE



Si l'on incline l'avion sans augmenter la portance, la composante  $F_v$  est inférieure au poids de l'avion. Il faut donc augmenter la portance lors de l'évolution en virage pour maintenir l'altitude. Pour cela, deux solutions :

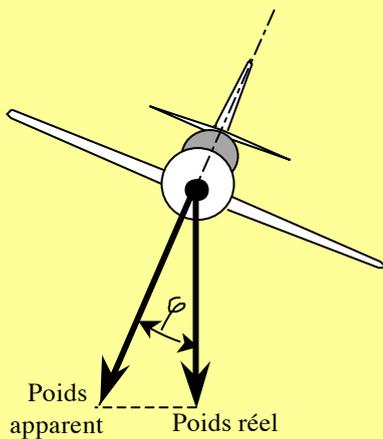
- augmentation de l'incidence
- augmentation de la traction

de même que  $F_v$  équilibre le poids de l'appareil, on voit apparaître, en virage, un poids apparent qui équilibre la portance en évolution. Ce poids apparent est supérieur au poids réel, l'avion semble lourd.

### DEFINITION DU FACTEUR DE CHARGE

$$\text{Facteur de charge} = \frac{\text{Portance en évolution}}{\text{Portance en palier}} = \frac{\text{Poids apparent}}{\text{Poids réel}}$$

### LE FACTEUR DE CHARGE

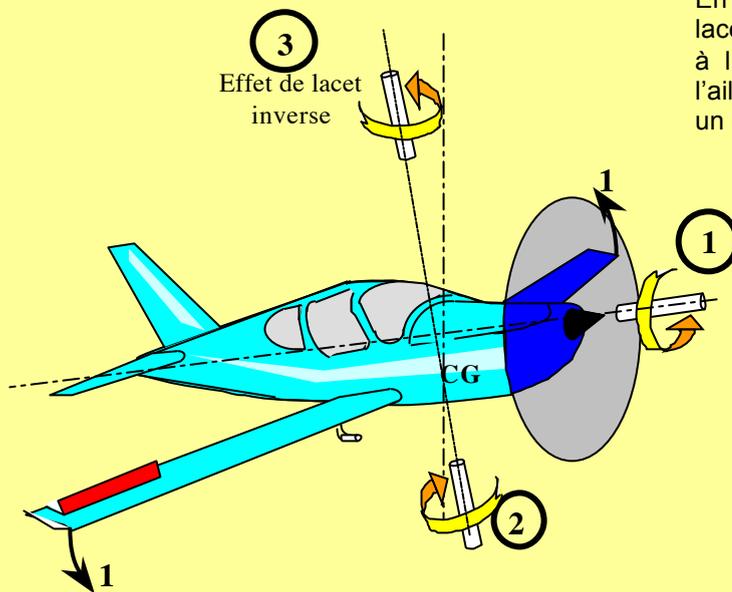


Il a pour effet "**d'alourdir**" l'avion qui perd alors de **l'altitude**

Pour maintenir **l'altitude** à puissance constante, il faut **augmenter** la portance en **augmentant** l'incidence, et par conséquent la vitesse **diminue**.

Pour maintenir **l'altitude** à vitesse constante, il faut **augmenter** la portance en conservant **l'incidence** et en augmentant, si possible, la **puissance**.

### LE LACET INVERSE

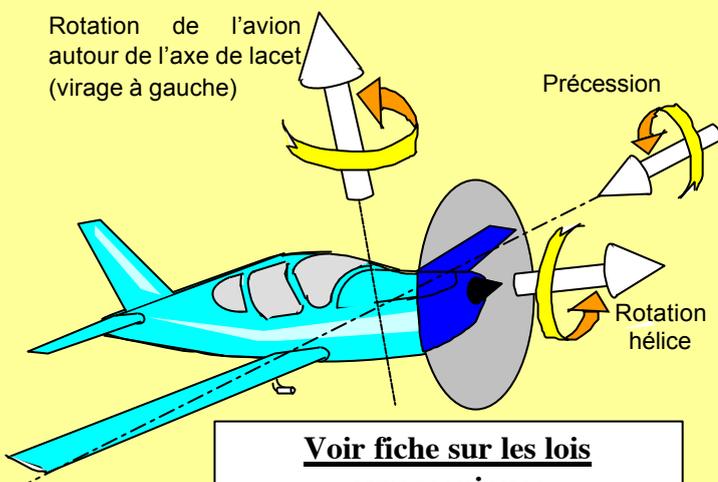


En virage, à inclinaison (1) et évolution autour de l'axe des lacets (2), l'aileron baissé (aile levée extérieure au virage) est à l'origine d'une traînée plus importante que celle due à l'aileron levé (aile baissée intérieure au virage) ; il s'ensuit un effet inverse sur l'axe des lacets (3)

#### Corrections :

- a) par construction : **braquage différentiel des ailerons**
- b) le pilote : **par action sur le palonnier qui commande la gouverne de direction**

### L'EFFET GYROSCOPIQUE DE L'HELICE



**Voir fiche sur les lois gyroscopiques**

Lors d'un virage (évolution autour de l'axe des lacets), l'hélice fait, par inertie, "basculer" l'avion autour de l'axe des tangages. Le sens du basculement appelé "précession" dépend de :

- a) **sens de rotation de l'hélice**
- b) **sens du virage**

dans le cas d'un virage à droite, hélice tournant en sens anti-horaire vue de la place pilote, l'avion aura tendance à :

**cabrer**

pour le même avion en virage à gauche, la tendance est à **piquer**

Poids réel = = *supérieur au poids apparent et à la portance*

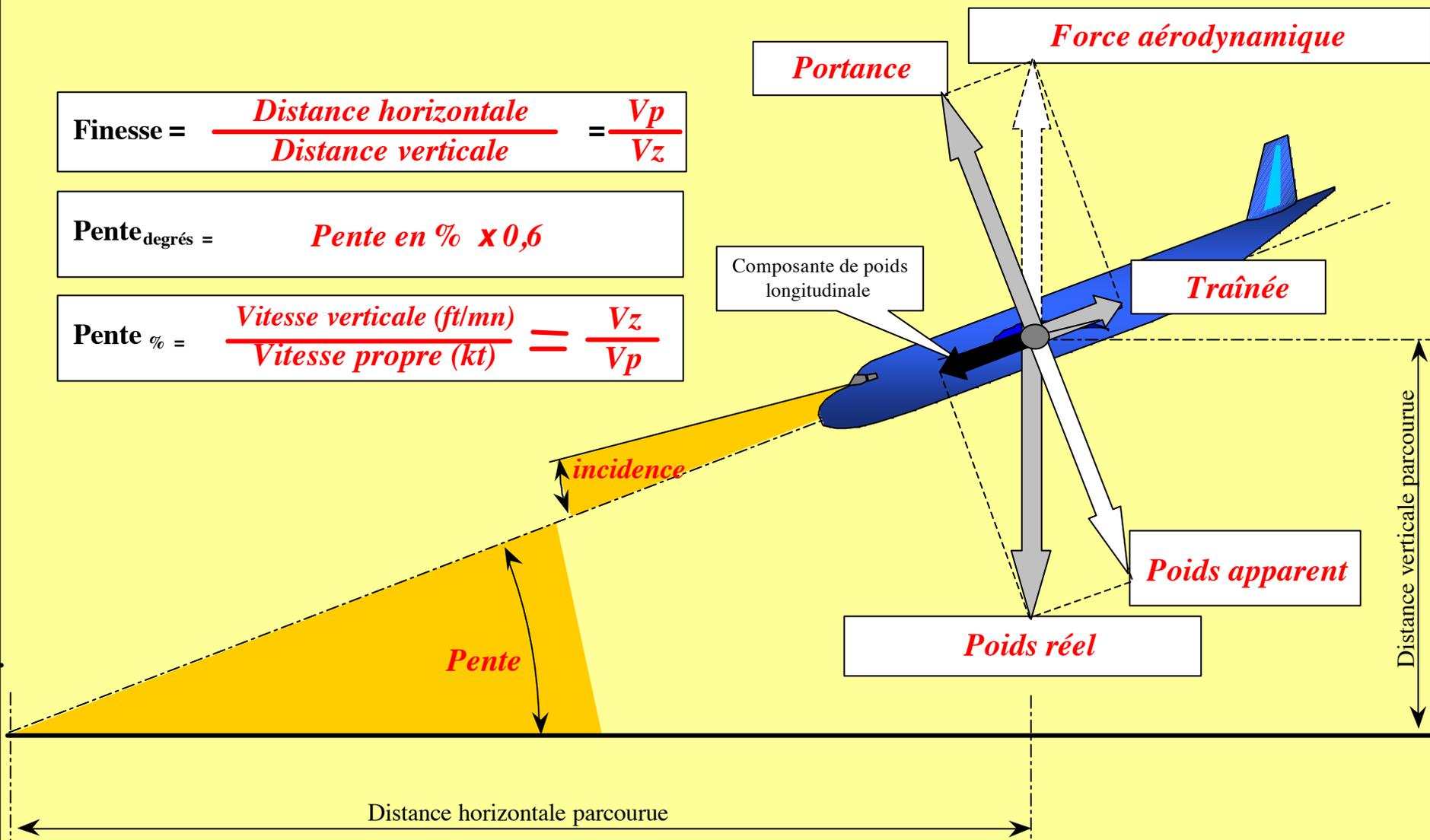
Poids apparent = *inférieur au poids réel*

Composante de poids longitudinale = *traction*

$$\text{Finesse} = \frac{\text{Distance horizontale}}{\text{Distance verticale}} = \frac{V_p}{V_z}$$

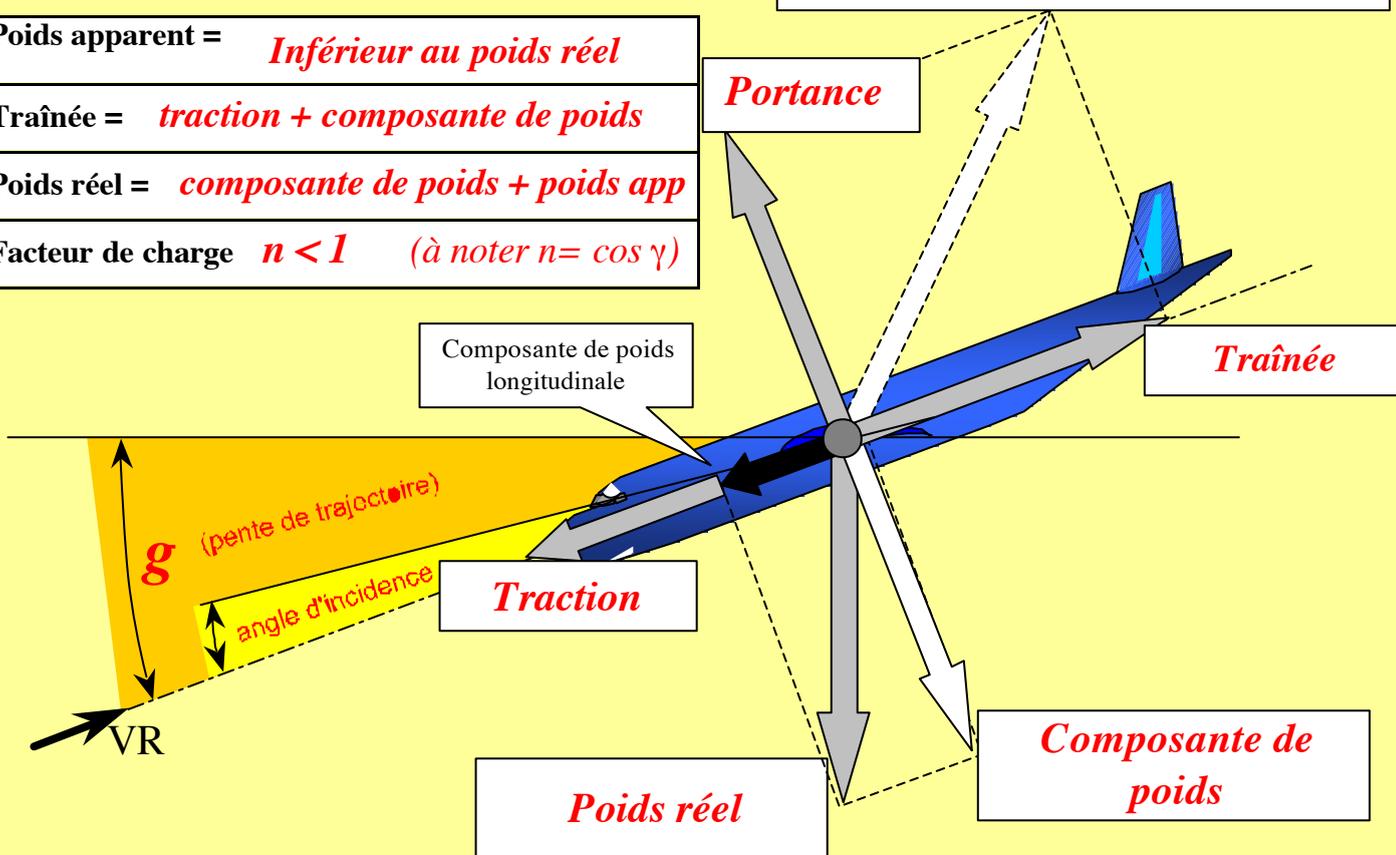
$$\text{Pente}_{\text{degrés}} = \text{Pente en \%} \times 0,6$$

$$\text{Pente \%} = \frac{\text{Vitesse verticale (ft/mn)}}{\text{Vitesse propre (kt)}} = \frac{V_z}{V_p}$$

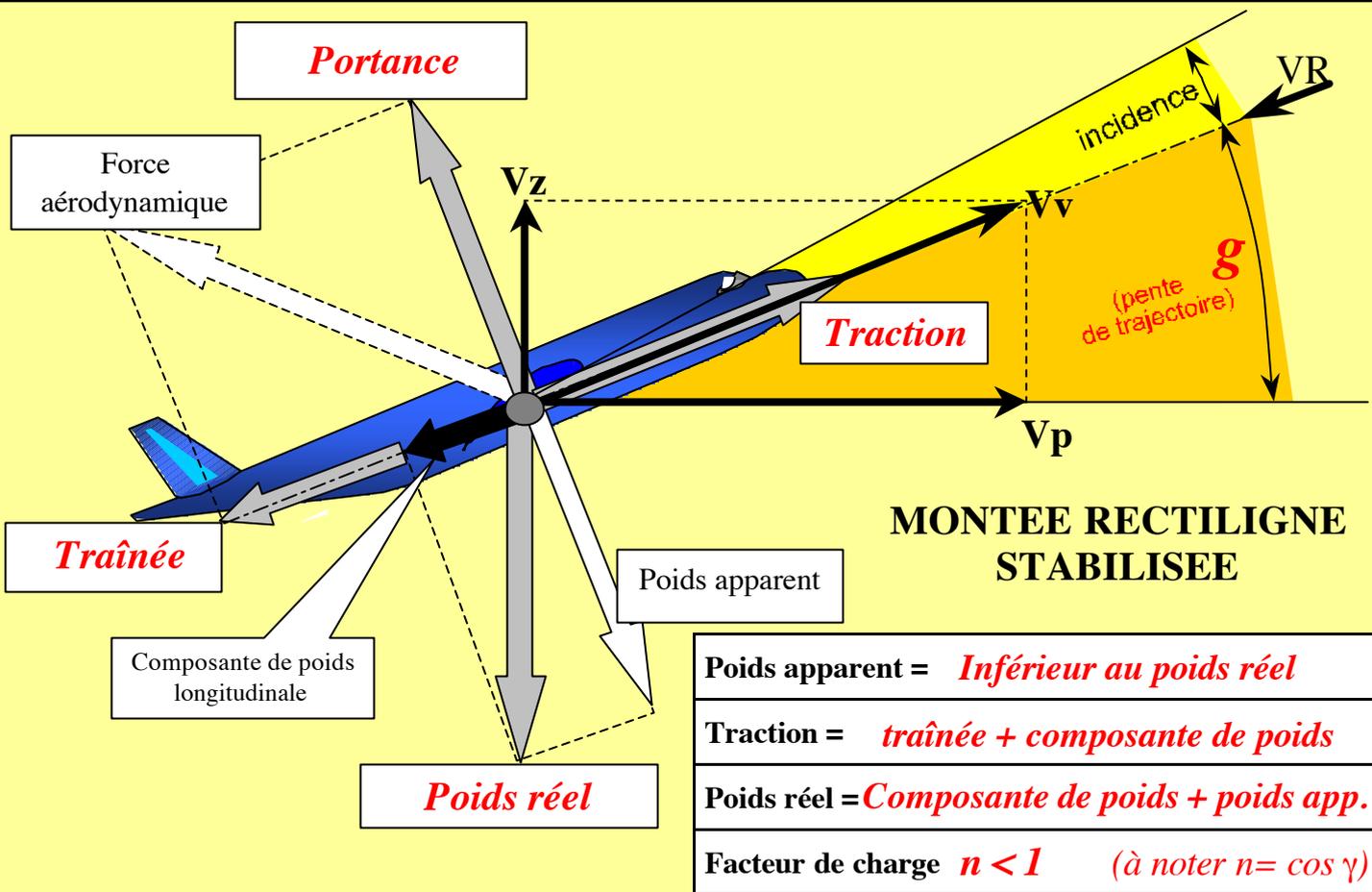


## DESCENTE RECTILIGNE STABILISEE

- Poids apparent = *Inférieur au poids réel*
- Traînée = *traction + composante de poids*
- Poids réel = *composante de poids + poids app*
- Facteur de charge  $n < 1$  (à noter  $n = \cos \gamma$ )



## MONTEE RECTILIGNE STABILISEE



- Poids apparent = *Inférieur au poids réel*
- Traction = *traînée + composante de poids*
- Poids réel = *Composante de poids + poids app.*
- Facteur de charge  $n < 1$  (à noter  $n = \cos \gamma$ )

**LA DISTANCE DE DECOLLAGE**

Elle est définie réglementairement comme étant la distance nécessaire à un avion pour passer 15 mètres d'altitude au décollage.  
Elle est d'autant plus courte que le vent de face est fort  
Elle est plus courte volets en position « décollage »  
Elle est plus longue volets tous sortis ou en configuration lisse

**LA PENTE**

En configuration lisse la finesse de l'avion est plus grande qu'en configuration volets en position décollage. On peut ainsi obtenir une pente plus grande qu'avec les volets en position décollage. Cette configuration est utilisée pour le passage d'obstacles.

**LE ROULAGE (volets sortis)**

L'avion doit accélérer. La traction doit vaincre à la fois :

- l'inertie due à la masse de l'avion
- le frottement des des roues sur le sol
- la traînée aérodynamique

**LA ROTATION (volets sortis)**

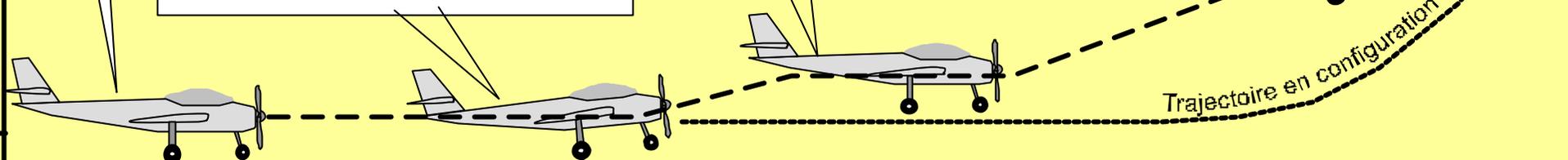
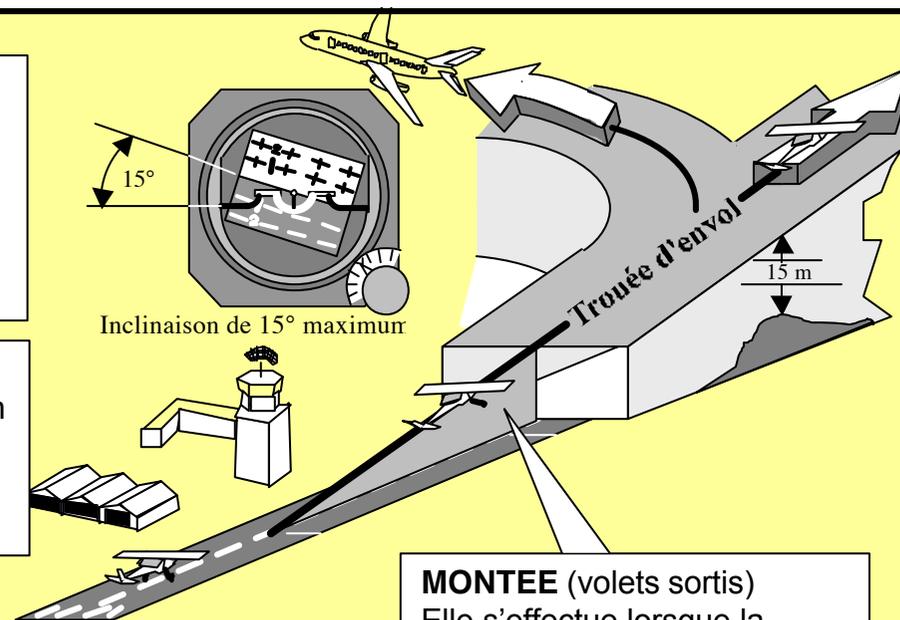
Elle s'effectue lorsque la portance est légèrement supérieure au poids de l'avion.

**REDUCTION D'INCIDENCE (volets sortis)**

La traînée diminue, il n'y a plus de frottements des roues sur le sol :  
la vitesse augmente

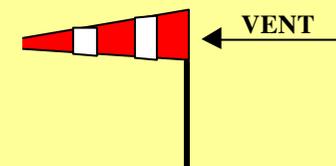
**MONTEE (volets sortis)**

Elle s'effectue lorsque la vitesse minimale de sécurité est atteinte



Distance de roulement avec les volets en configuration décollage

Distance de roulement avec les volets en configuration lisse (rentrés)



**APPROCHE FINALE**

Volets braqués en position « *atterrissage* »

L'ouverture des volets *diminue* la finesse.

Moteur réduit de manière à suivre une *pente de 5%*

A une vitesse minimale de sécurité de *1,3 V<sub>So</sub>*

**COURTE FINALE**

Volets *plein sortis*

**ARRONDI**

Pour *diminuer la vitesse*

**VOL EN PALIER**

La vitesse *diminue*

Il faut *augmenter* l'incidence

**ANGLE D'INCIDENCE CRITIQUE**

Portance *diminue*, vitesse *diminue*,

l'avion *« s'enfonce »*

**ROULAGE A INCIDENCE MAX**

La vitesse diminue rapidement par *freinage* aérodynamique.

La portance diminue jusqu'à ce que la roulette de nez soit posée.

**ROULAGE 3 POINTS**