

COURS n° 2

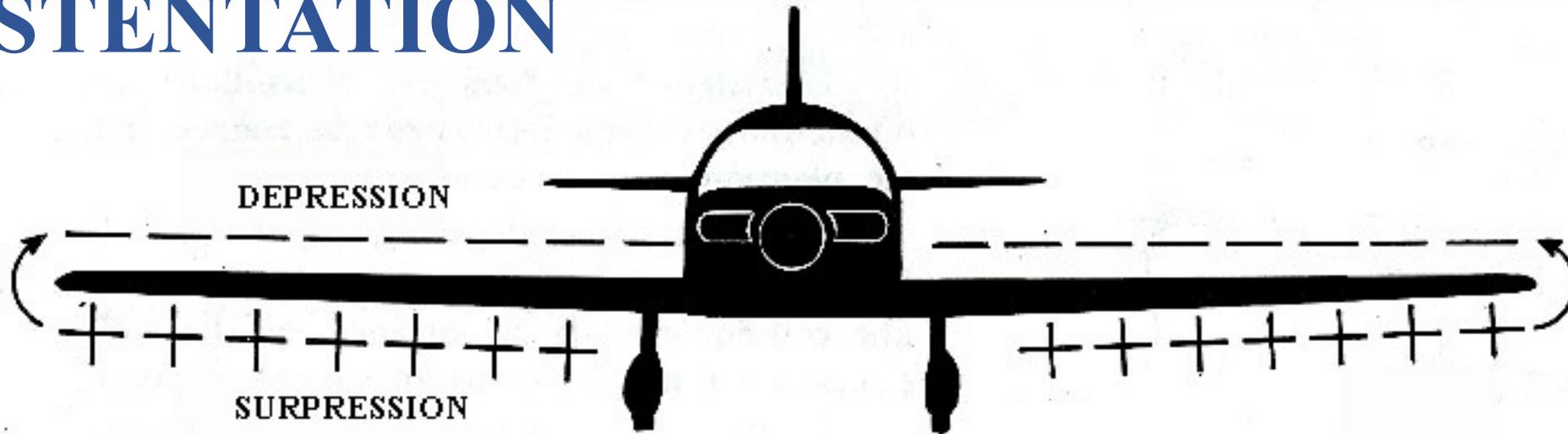
LA SUSTENTATION AERODYNAMIQUE

[Aerodynamic lift]

NOTIONS ELEMENTAIRES

[Basic notions]

LA SUSTENTATION



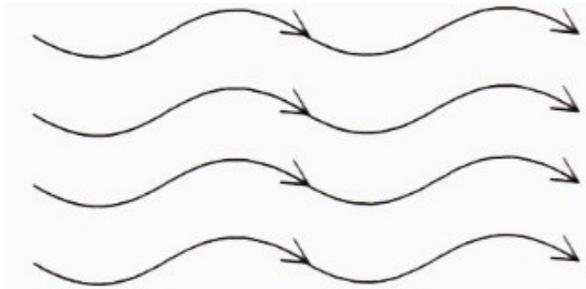
C'est **l'effet porteur** dû aux actions combinées des pressions et dépressions que l'air exerce sur un corps.

Pour un avion l'effet de sustentation s'exerce sur l'aile.

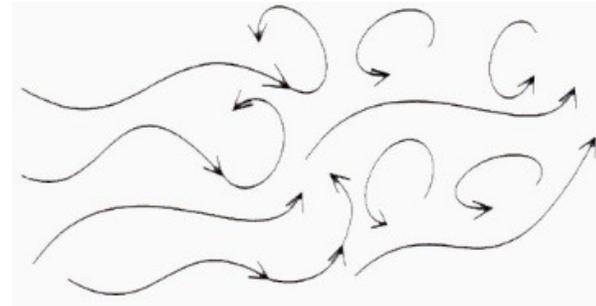
L'ÉCOULEMENT DE L'AIR [Air flow]

L'air s'écoule comme un fluide constitué de « filets d'air ».

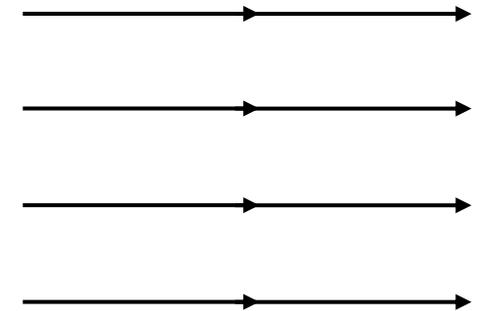
Les « filets d'air » qui se déplacent peuvent former plusieurs types d'écoulement :



Turbulent
[Turbulent]



Tourbillonnaire
[Swirling]



Laminaire
[Laminar]

Un écoulement d'air laminaire est nécessaire à la sustentation de l'aile d'avion

LA PRESSION [Pressure]

C'est l'application d'une force sur une surface :

[Force]

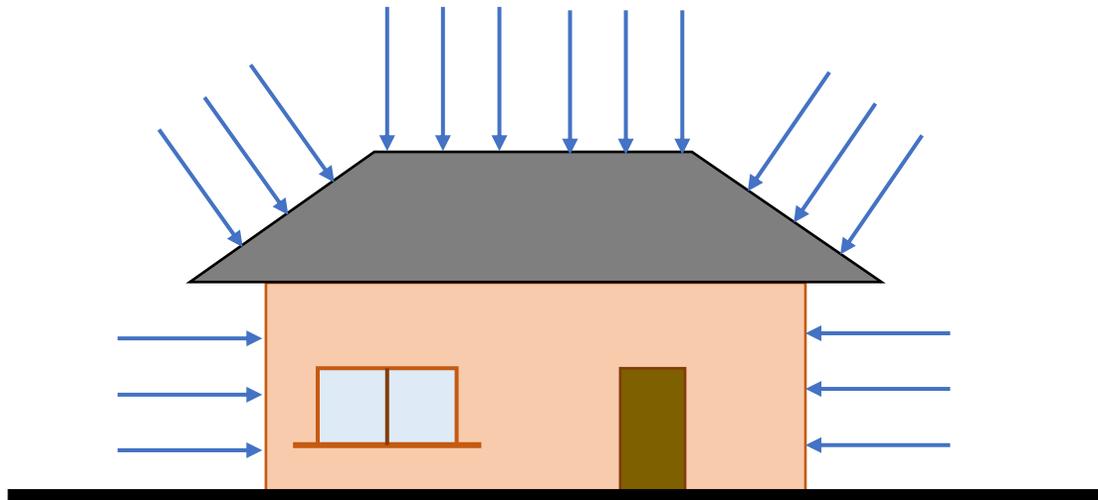
[Surface]

$$P = F / S$$

LA PRESSION STATIQUE : PS

[Static Pressure]

C'est la pression qui d'exerce sur un corps au repos .



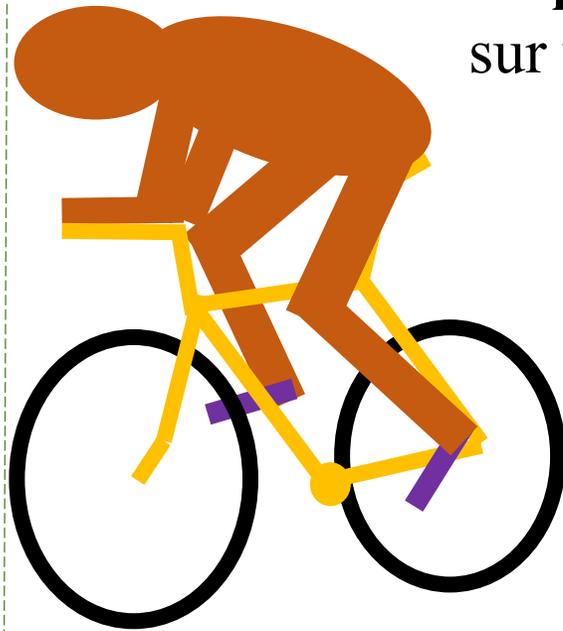
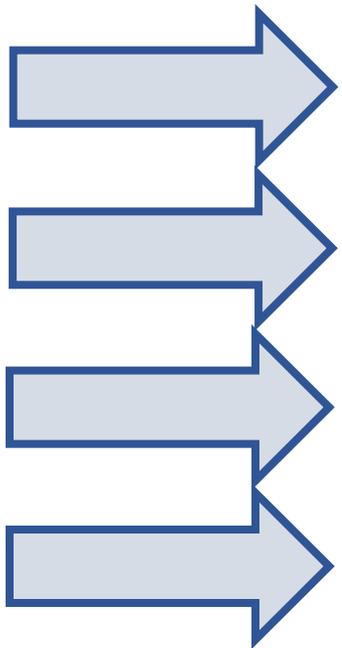
La **pression statique** (PS) correspond à la force appliquée par l'air ambiant sur toutes les surfaces d'un corps au repos.

LA PRESSION DYNAMIQUE : PD

[Dynamic Pressure]

C'est la pression qui d'exerce sur un corps en mouvement .

Vent relatif



La **pression dynamique** résulte de la force du vent relatif sur une surface perpendiculaire à l'écoulement de l'air.

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

ρ : masse volumique de l'air V : vitesse du vent relatif

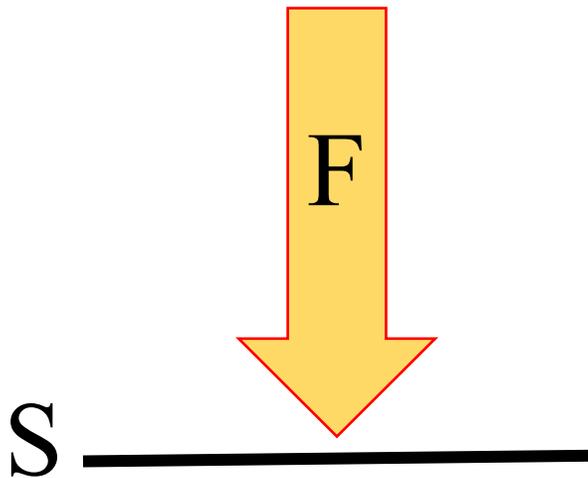
La masse volumique de l'air dépend de la température. A 20°C, elle vaut approximativement 1,200 kg/m³

LA PRESSION TOTALE : P_T (ou pression d'impact P_I)

C'est la somme de la pression statique et de la pression dynamique : $P_T = P_S + P_D$

On sait que $P = F / S$ donc Force = Pression x Surface

Force aérodynamique = P_D x Surface



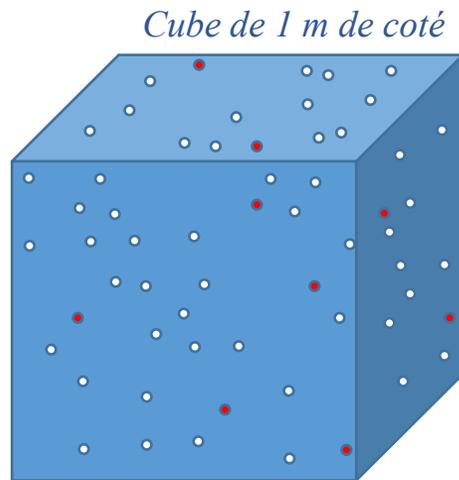
$$\text{Force aérodynamique} = \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2}_{\text{Pression dynamique}} \cdot S$$

C'est la formule de la pression dynamique vue la page précédente !

LA MASSE VOLUMIQUE DE L'AIR [Air density]

Désignée par la lettre grecque ρ (rhô).

Elle correspond à la masse de l'air contenue dans 1 m^3 .



La composition de l'air de l'atmosphère terrestre :

- 78% d'azote
- 21% d'oxygène
- 1% de gaz rares (argon, krypton, xénon,...)

Cette proportion est constante sur toute l'épaisseur de la troposphère

L'air est « moins dense » plus on s'élève dans l'atmosphère ce qui correspond à une diminution du nombre des particules d'air dans chaque m^3 .

ρ diminue avec l'altitude

La masse volumique de l'air dépend aussi de la température.

A 20°C , elle vaut approximativement $1,200 \text{ kg/m}^3$

LA RESISTANCE DE L'AIR

C'est la force qui s'oppose au déplacement d'un corps dans l'air.

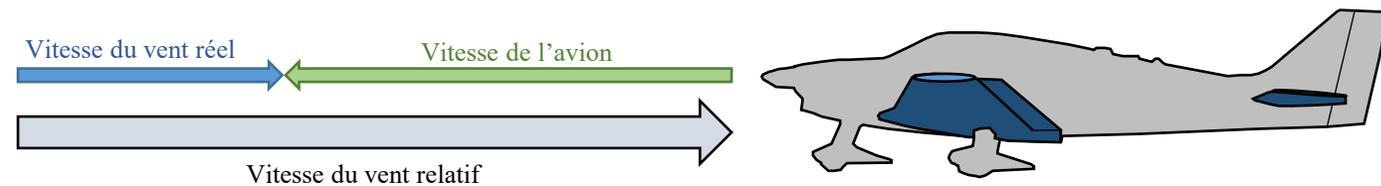
Elle dépend de plusieurs facteurs :

- **Masse volumique ρ de l'air**



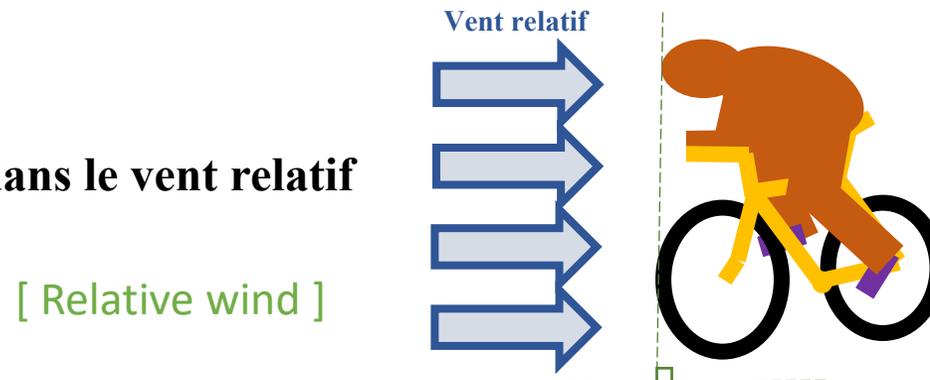
La densité de l'air **diminue avec l'altitude** car moins de particules d'air

- **Vitesse du vent relatif**



Vent relatif : vitesse propre du corps \pm vitesse de la masse d'air (vent naturel)

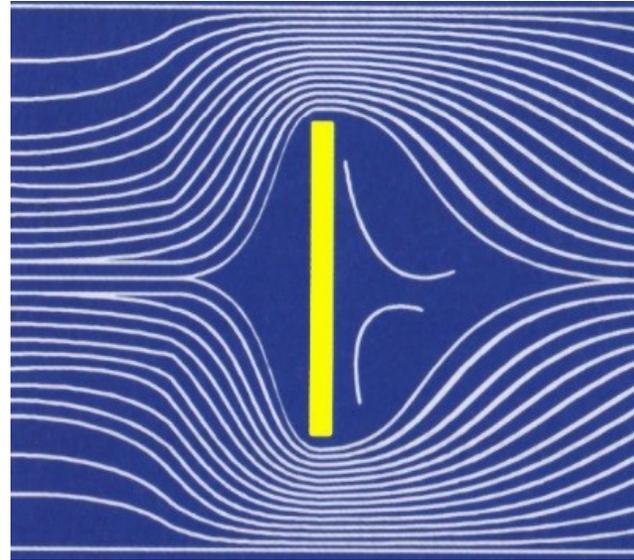
- **La forme de l'objet placé dans le vent relatif**



La forme de l'objet détermine son **profil aérodynamique**.

LA RESISTANCE DE L'AIR

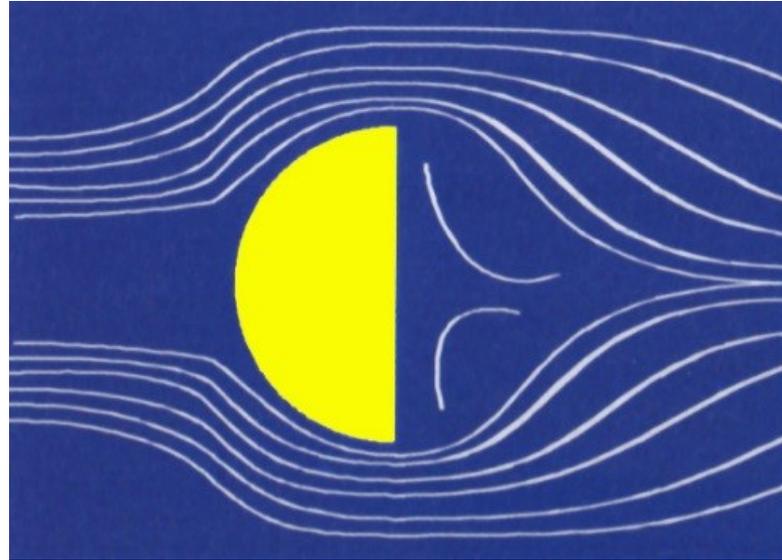
[Air drag]



Si l'on oppose une **surface plate** perpendiculairement à un écoulement d'air laminaire :

- Forte résistance à l'écoulement de l'air, qui augmente avec la surface
- L'air a du mal à contourner l'obstacle, forte pression sur la surface
- Air tourbillonnaire à l'arrière de la surface

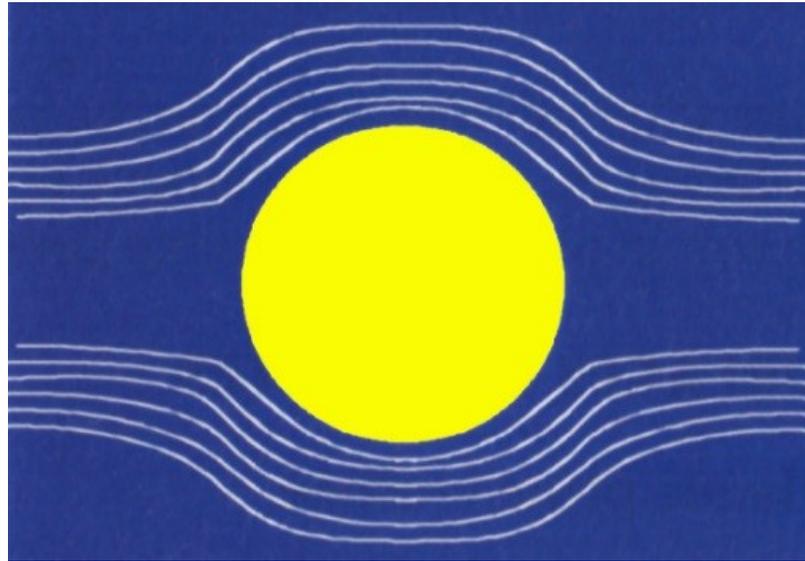
LA RESISTANCE DE L'AIR



Si l'on oppose une **demi-sphère** perpendiculairement à un écoulement d'air laminaire :

- Moindre résistance à l'écoulement de l'air que pour le disque
- L'air contourne mieux l'obstacle
- Air tourbillonnaire à l'arrière de la surface

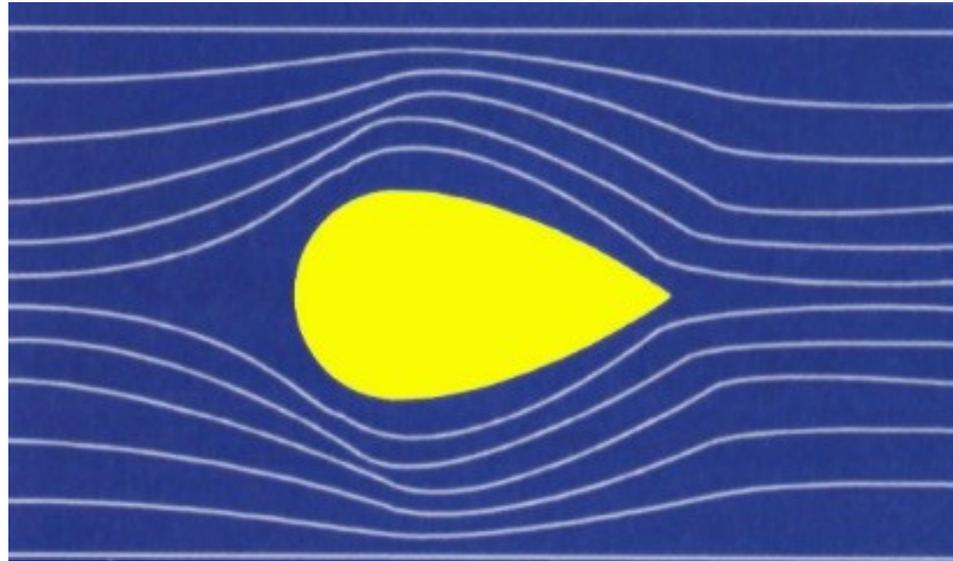
LA RESISTANCE DE L'AIR



Si l'on oppose une **sphère** perpendiculairement à un écoulement d'air laminaire :

- Moindre résistance à l'écoulement de l'air que le disque
- L'air contourne mieux l'obstacle
- Ecoulement d'air laminaire beaucoup plus proche du bord de fuite que pour la demi-sphère (zone d'écoulement tourbillonnaire diminuée)

LA RESISTANCE DE L'AIR



Si l'on oppose une **forme fuselée** (aile) perpendiculairement à un écoulement d'air laminaire :
[Tapered shape]

- Résistance aérodynamique peu élevée (8 fois moins que le disque)
- L'air contourne facilement l'obstacle
- L'écoulement de l'air reste laminaire

COMMENT LES AVIONS VOLENT – ILS ?

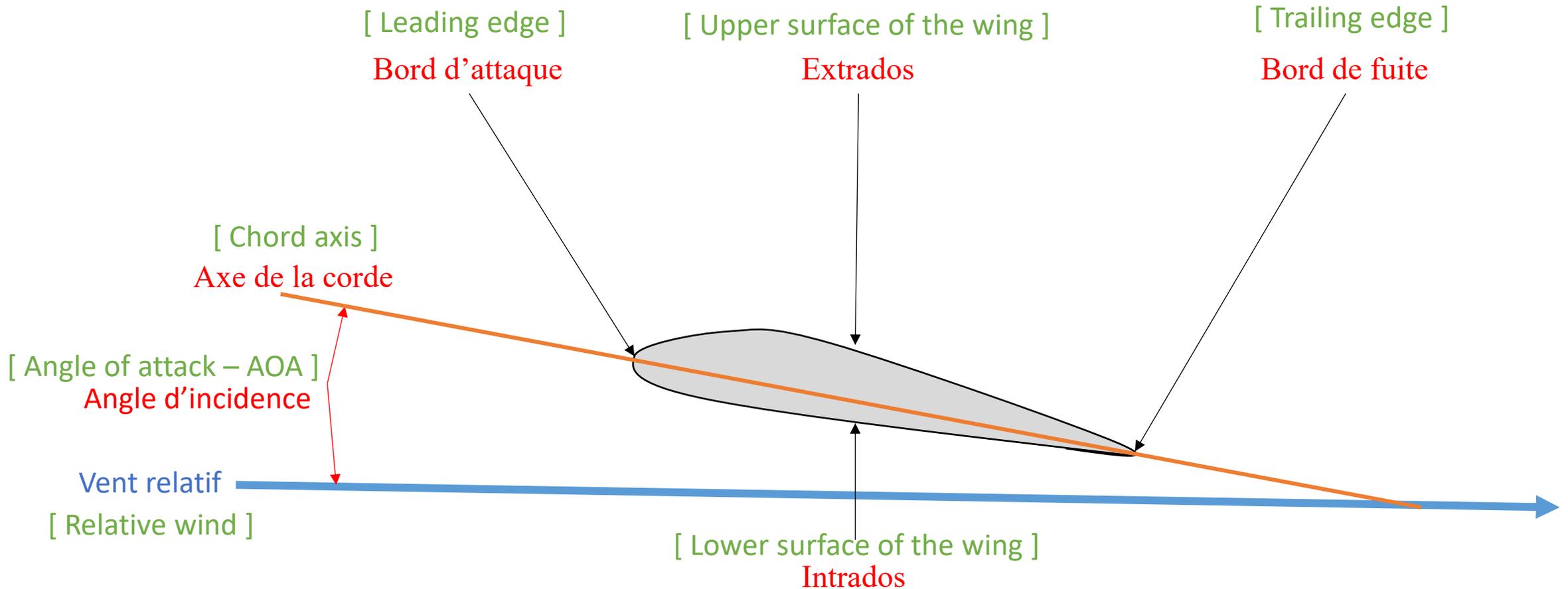
[How do planes fly ?]

... Grâce à leurs ailes !

[Thanks to their wings !]

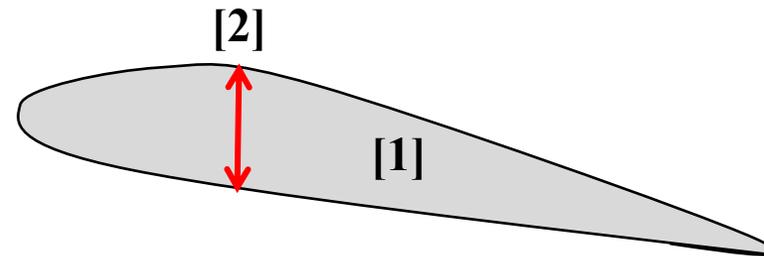
L'AILE D'AVION

[Aircraft wing]



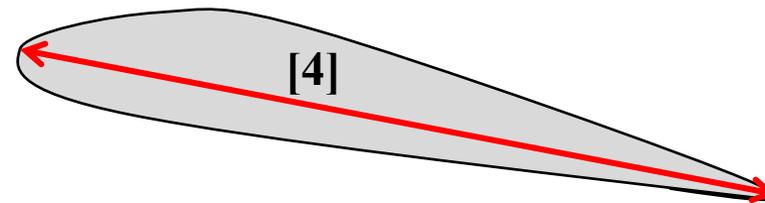
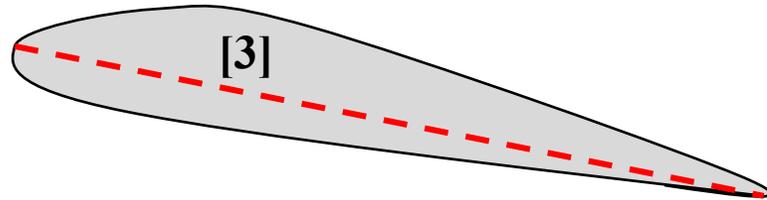
L'AILE D'AVION

- [1] **Profil** : coupe verticale de l'aile [Shape]
- [2] **Epaisseur** : distance maximale entre l'extrados et l'intrados [Thickness]



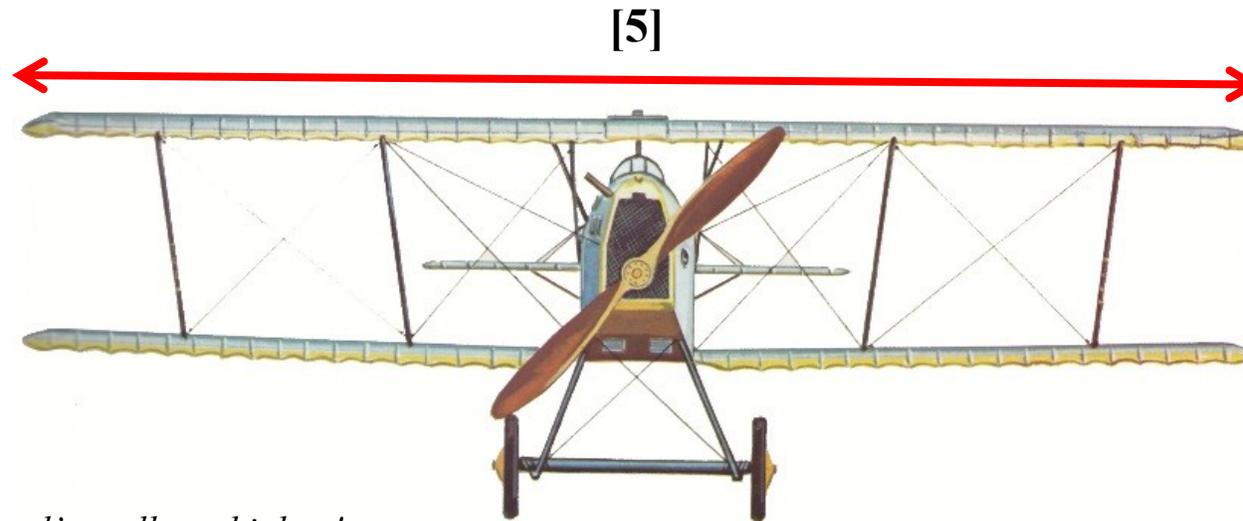
L'AILE D'AVION

- [3] **Corde** : ligne droite qui rejoint le bord d'attaque au bord de fuite [Chord of the wing]
- [4] **Profondeur** : longueur de la corde de profil [Depth of the wing]



L'AILLE D'AVION

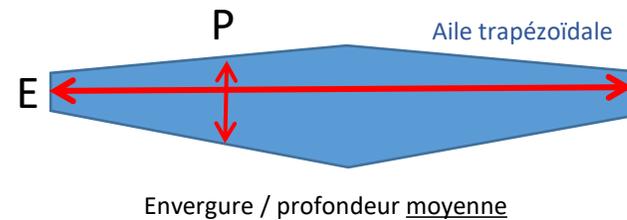
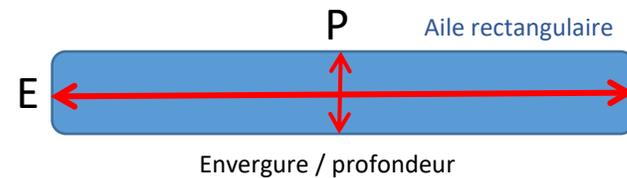
- **[5] Envergure** : distance entre les extrémités des deux ailes [Wing span]
- **Allongement** : envergure / profondeur moyenne (rapport) [Elongation]
- **Surface alaire** : surface totale de la voilure, y compris celle qui traverse le fuselage [Wing surface]



Cet avion a 4 ailes même si on l'appelle un biplan !

L'ALLONGEMENT DE L'AILE

Calcul de l'allongement de l'aile :

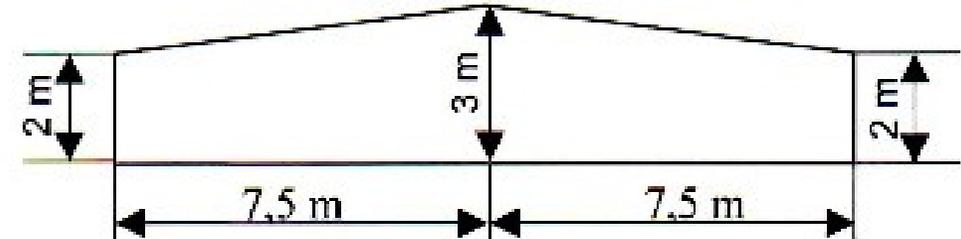


Allongement $\lambda = \frac{E}{P}$

\swarrow m
 \nwarrow m

λ est une valeur sans dimension

On considère l'aile trapézoïdale dont les dimensions sont données par le plan ci-dessous ; quel est son allongement λ ?



La profondeur moyenne vaut 2,5 m (moyenne entre 2 m et 3 m) et l'envergure est de 15 m

L'allongement est le rapport de l'envergure sur la profondeur moyenne soit $15 / 2,5$. Sans calculatrice, c'est la même chose que $30 / 5 = 6$!!!

LA CHARGE ALAIRE [Wing loading]

Pour voler, l'avion doit répondre à l'exigence suivante :

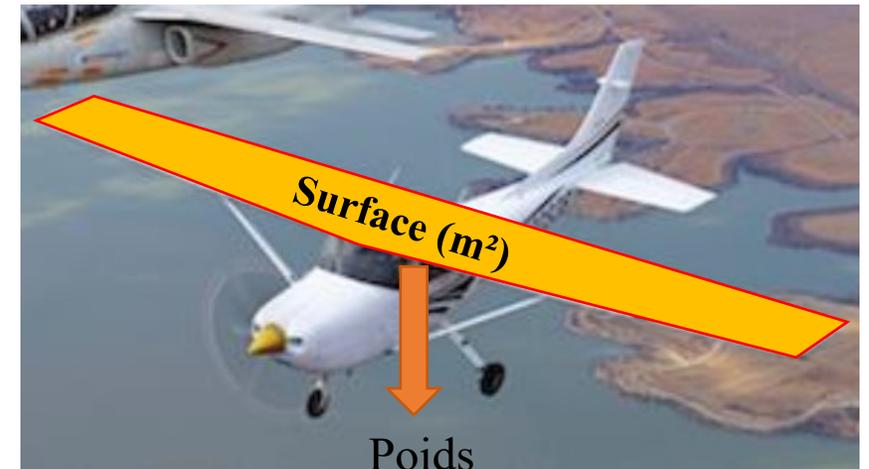
Portance = Poids c'est-à-dire :

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

- M masse de l'avion (kg)
- g accélération de la pesanteur (9,81 m.s⁻²)
- ρ masse volumique de l'air (1,2 kg / m³)
- S surface alaire (m²)
- V² vitesse relative (m/s)²
- Cz coefficient de portance (sans dimension)

On en déduit qu'à Cz identique, plus la charge alaire est importante, plus la vitesse de décollage et d'atterrissage est élevée.

Calcul de la charge alaire de l'aile :



Poids = masse x g (accélération de la pesanteur)

$$C_a = \frac{M}{S}$$

kg / m² ← Ca ← M (kg) ← S (m²)

L'ALLONGEMENT ET LA TRAINEE

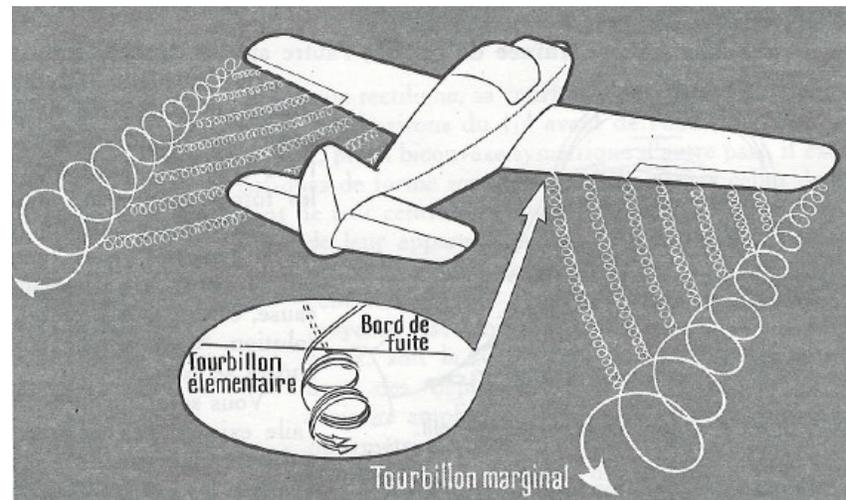
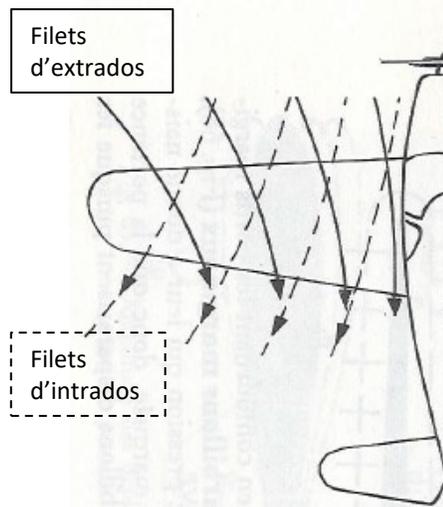
La traînée est une conséquence de la portance.

Elle croît et elle s'annule en même temps que la portance.

On peut sensiblement réduire la traînée induite d'une aile en augmentant son allongement.

Plus l'allongement est grand, plus les tourbillons marginaux sont faibles, d'où la réduction de la traînée.

C'est ce qui conduit aux voilures de grand allongement des planeurs.



[Wing turbulence]

Sur l'extrados, les filets d'air convergent vers le plan de symétrie de l'aile (vers le fuselage), tandis que les filets d'air sont déviés vers l'extérieur de l'aile sous l'intrados.

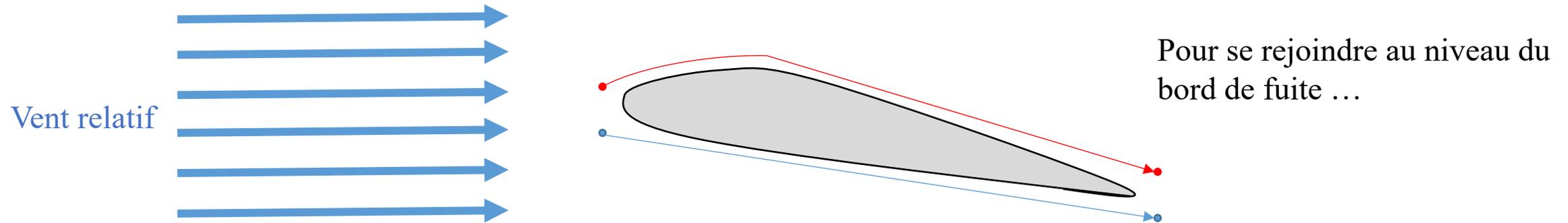
Les filets d'air venant de l'extrados et de l'intrados se croisent donc sous un certain angle au niveau du bord de fuite et des saumons, et s'enroulent les uns sur les autres pour former des tourbillons.

Il en résulte **une nappe de tourbillons** jusqu'à une certaine distance en arrière du bord de fuite et des **tourbillons marginaux** en arrière des saumons.

Ces tourbillons matérialisent la traînée induite.

L'AILE D'AVION

Deux particules d'air frappent en même temps le bord d'attaque de l'aile ...

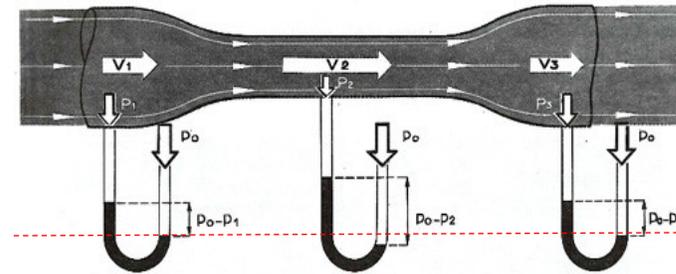


La particule rouge, qui parcourt une distance plus longue, devra aller plus vite que la bleue.

LOI DE BERNOULLI

Le dispositif de l'expérience est un tube avec un segment rétréci dans lequel circule de l'air. La pression à l'intérieur du tube est mesurée avant, au centre et après le rétrécissement.

Dans la partie rétrécie du tube, l'air est accéléré : $V_2 > V_1$



P_0 = pression statique qui sert de référence.
Elle est la même partout autour du tube.

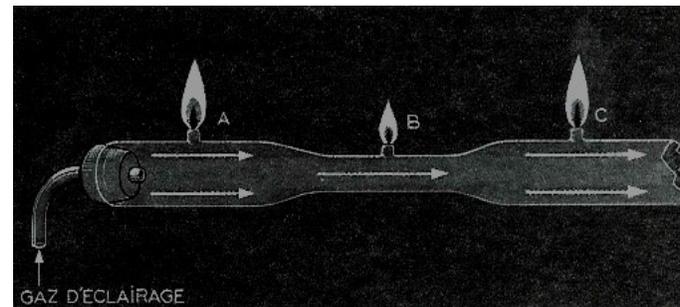
$$\text{Pression dynamique} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$$

ρ = masse volumique du fluide

V = vitesse du fluide.

On observe une baisse de la pression dans la partie rétrécie : $P_2 < P_1$
Elle provoque une aspiration de la colonne de liquide du baromètre qui fait s'abaisser le niveau inférieur sous P_0 et remonter le niveau supérieur de l'autre colonne.

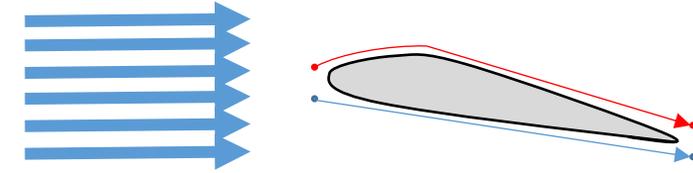
Il règne donc une **ZONE DE DEPRESSION** là où l'air est accéléré.



Si l'expérience est conduite avec un gaz inflammable, la hauteur de la flamme est plus petite en B, là où la pression du gaz est la plus faible.

$$\begin{array}{c} \text{Pression statique} \\ + \\ \text{Pression dynamique} \\ \hline = \text{CONSTANTE} \end{array}$$

L'AILE D'AVION



D'après la loi de BERNOULLI :

$$\text{Pression statique} + \text{Pression dynamique} = \text{Constante}$$

- ❑ Donc quand la PD augmente, la PS doit diminuer pour que la loi soit respectée.
- ❑ On sait que PD varie avec la vitesse d'écoulement de l'air ($1/2 \cdot \rho \cdot \underline{V}^2$)
- ❑ Si l'écoulement de l'air est plus rapide sur l'extrados que sous l'intrados, alors la Ps sur l'extrados est plus faible que celle sous l'intrados :
Il règne donc une **ZONE DE DEPRESSION** sur l'extrados de l'aile

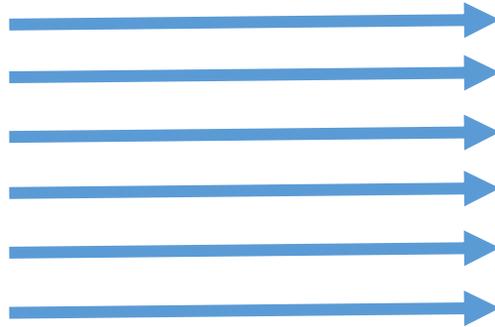
PETITE EXPERIENCE :

- 1) Positionnez horizontalement le petit coté d'une feuille de papier A4 au contact de votre lèvre inférieure.
- 2) En maintenant la feuille dans cette position, soufflez fort droit devant vous.
- 3) La feuille qui pendait se redresse tant que vous soufflez ... car l'air qui se déplace plus vite au dessus de la feuille qu'en dessous (où il ne bouge pas) provoque une dépression qui aspire la feuille vers le haut.

L'AILE D'AVION

Quand l'avion se déplace ...

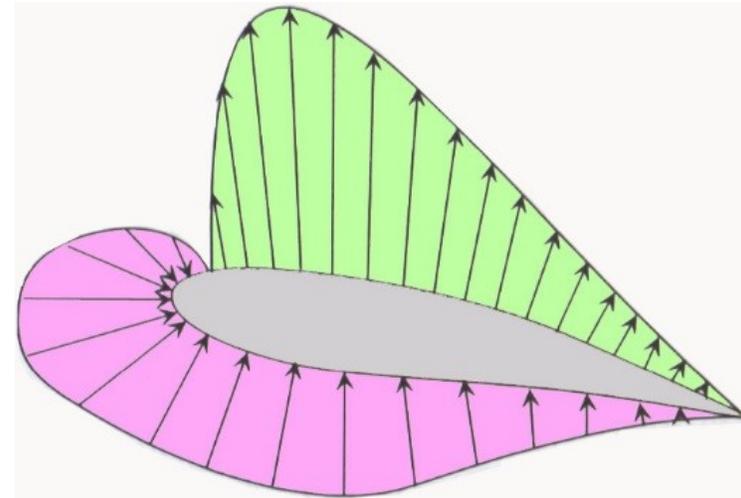
Vent relatif



Zone de DEPRESSION

Elle aspire l'aile vers le haut

[Depression]



Zone de SURPRESSION

Elle pousse l'aile vers le haut

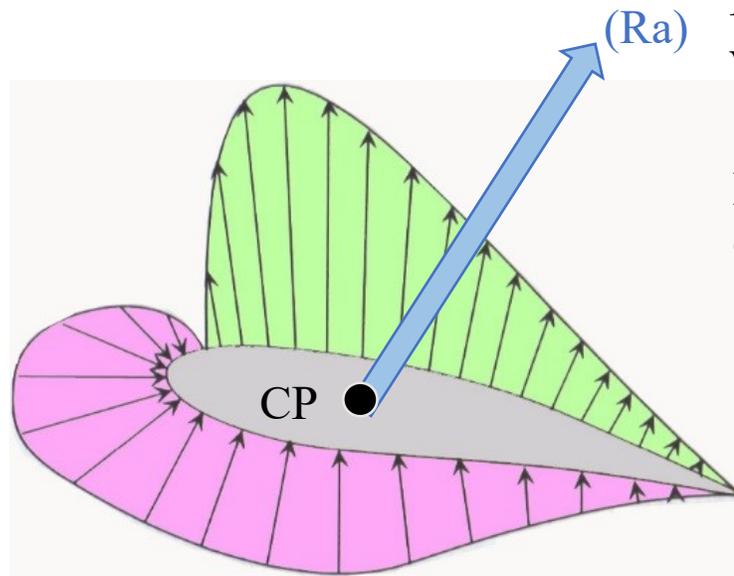
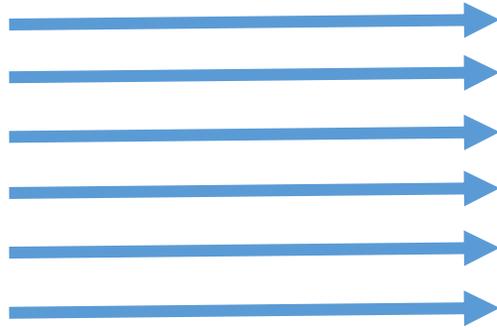
[Overpressure]

L'AILE D'AVION

Zone de DEPRESSION

Quand l'avion se déplace ...

Vent relatif



Elle pousse en même temps l'aile vers le HAUT et vers l'ARRIERE

Elle s'applique sur le CENTRE de POUSSEE (CP)

[Center of thrust]

Zone de SURPRESSION

La force ainsi générée par l'écoulement de l'air autour du profil d'aile s'appelle la

RESULTANTE AERODYNAMIQUE (Ra)

[Aerodynamic resultant]

LA RESULTANTE AERODYNAMIQUE R_a

- ❑ C'est la force **générée par l'ensemble des surpressions à l'intrados et des dépressions à l'extrados.**
- ❑ Elle augmente avec **la vitesse** et avec **l'angle d'incidence.**
[Speed] [Angle of attack - AOA]
- ❑ Son centre d'application s'appelle le **centre de poussée (CP).**

L'ANGLE D'INCIDENCE DE L'AILE α

ou « INCIDENCE DE L'AILE »

C'est l'angle formé entre

[The angle between]

1 La corde moyenne de l'aile

[Mean chord]

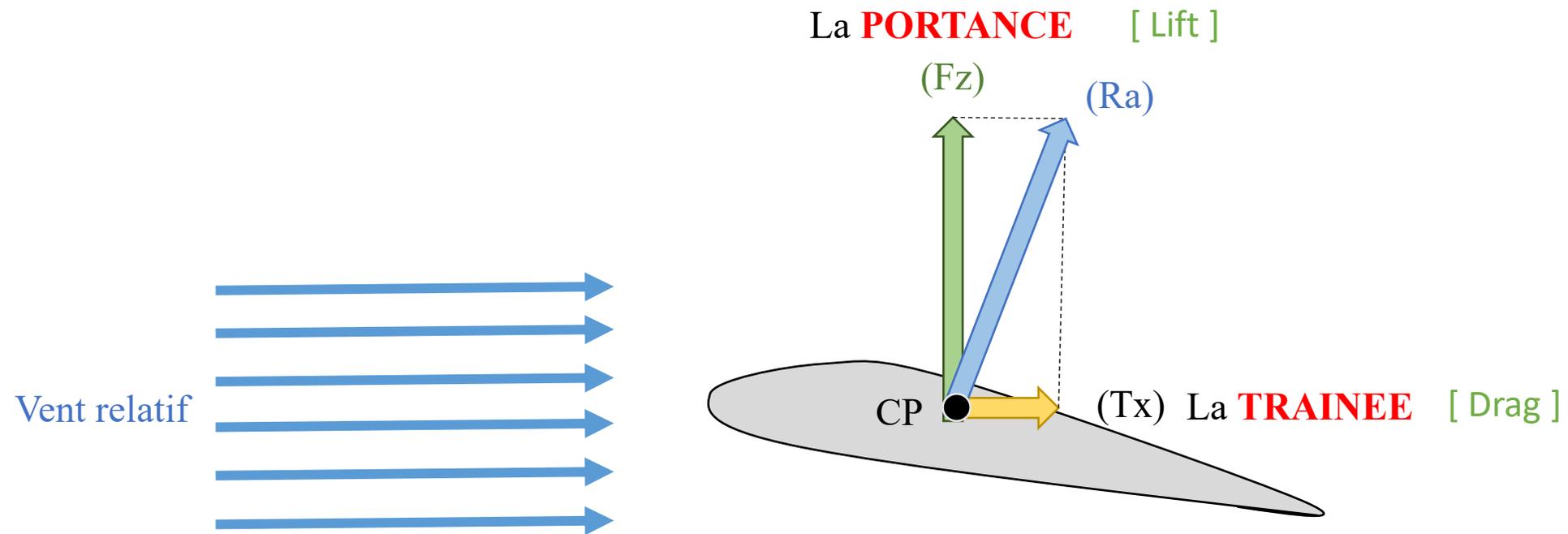
et

2 Le vent relatif [Relative wind]



L'AILE D'AVION

La résultante aérodynamique R_a peut être décomposée en deux forces perpendiculaires :



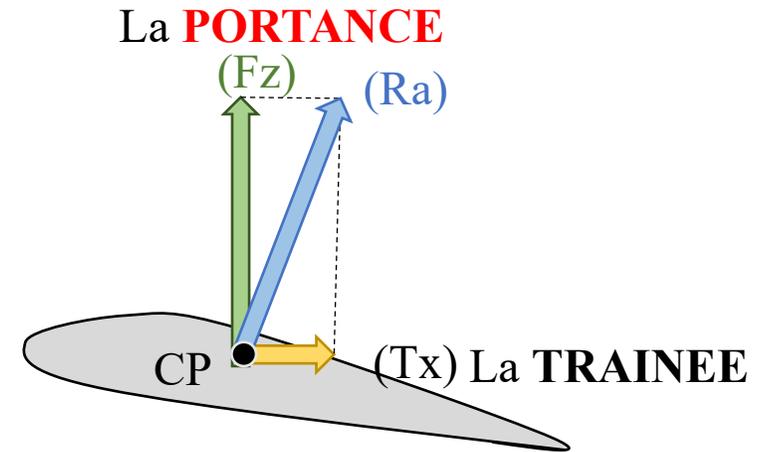
LA PORTANCE F_z

☐ Elle permet de **faire voler l'avion**.

☐ C'est la composante aérodynamique **perpendiculaire aux filets d'air du vent relatif**.

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

C_z = coefficient de portance [Lift coefficient]



LA TRAINEE T_x

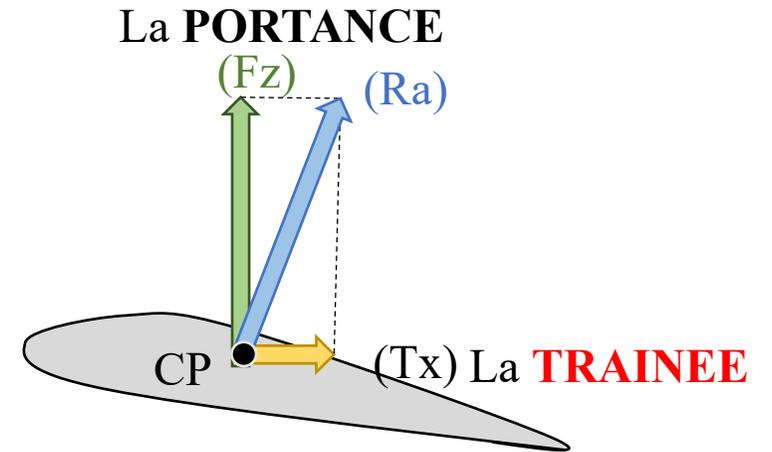
❑ Elle s'oppose à l'avancement de l'aile (frein)

❑ C'est la composante aérodynamique parallèle aux filets d'air du vent relatif.

❑
$$T_x = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_x$$

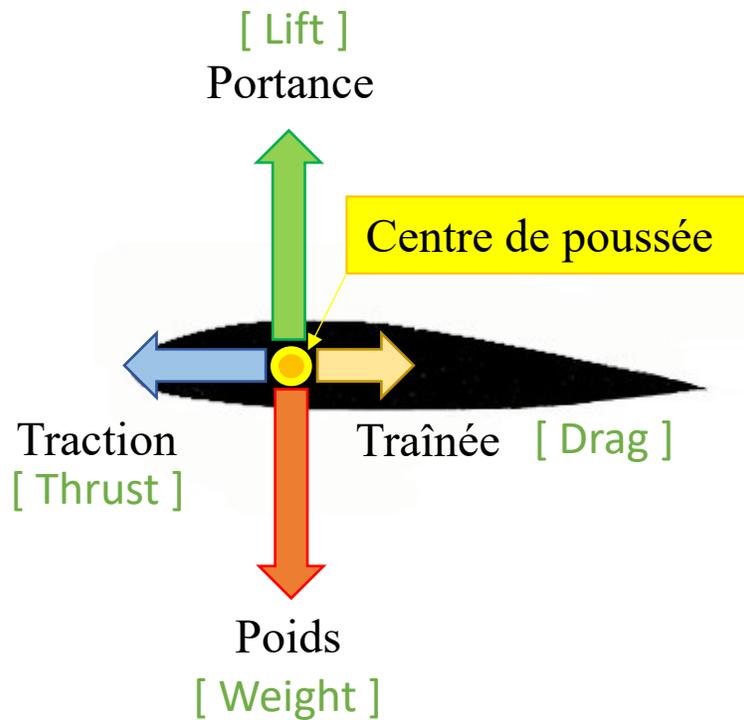
C_x = coefficient de traînée

[Drag coefficient]



LE CENTRE DE POUSSEE CP

C'est le point d'application des forces aérodynamiques.

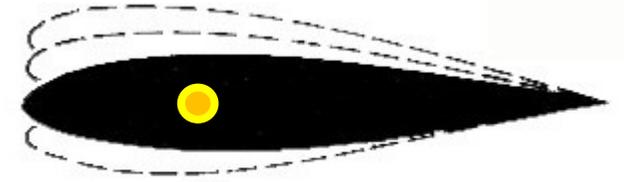


Il se déplace en fonction :

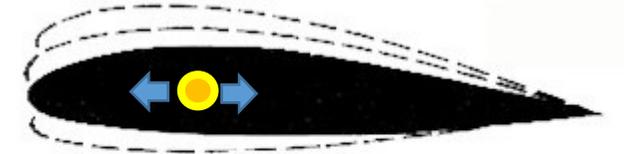
- du **centrage de l'avion**
(répartition des masses : pilote(s), passagers, carburant, bagages, ...)
- de **l'angle d'incidence**.
(l'amplitude du déplacement du CP dépend du profil de l'aile)

Les schémas montrent l'amplitude du déplacement du CP en fonction du profil de l'aile lors des changements d'incidence. Le déplacement est nul pour un profil biconvexe symétrique et maximal pour un profil creux.

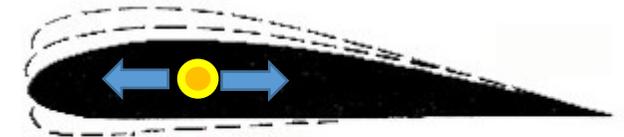
Profil biconvexe symétrique



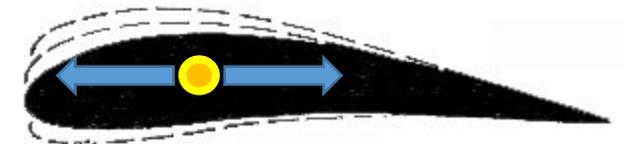
Profil biconvexe dissymétrique



Profil plat

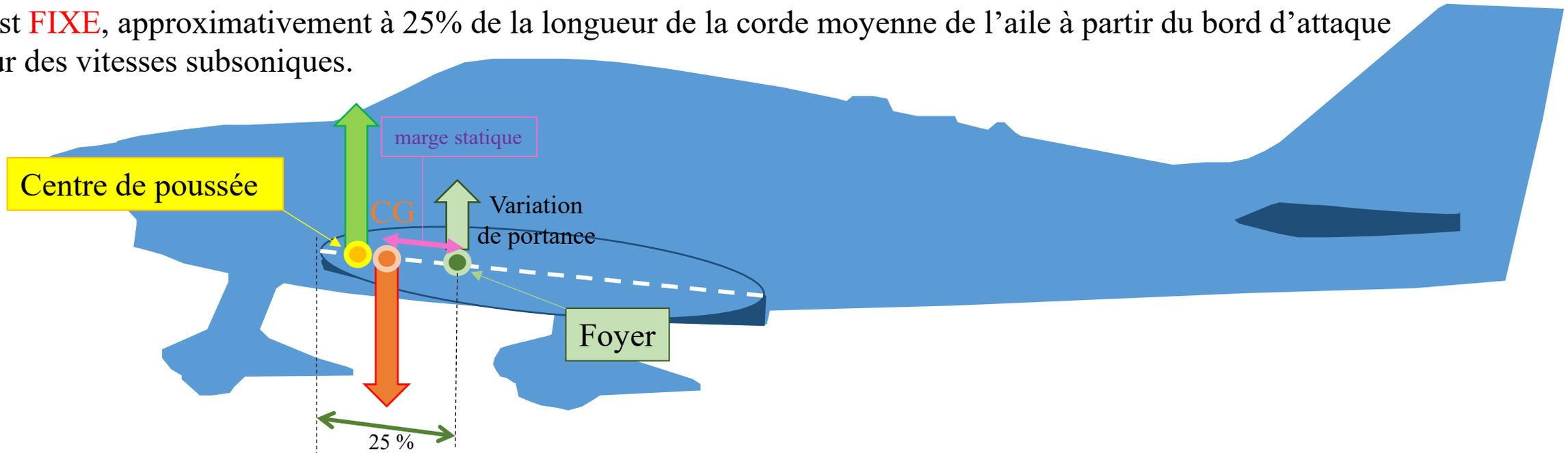


Profil creux



LE FOYER

- ❑ Situé en arrière du centre de poussée, il est le point d'application des variations de la portance.
- ❑ Il est **FIXE**, approximativement à 25% de la longueur de la corde moyenne de l'aile à partir du bord d'attaque pour des vitesses subsoniques.



- ❑ La position du CP change en fonction des variations d'incidence et de vitesse au cours du vol. C'est le point d'application de la résultante aérodynamique : portance + traînée (pour simplifier le schéma, seule la portance est représentée).
- ❑ Pour que l'avion soit stable il faut que le foyer se situe derrière le CG où s'appliquent le poids et la traction (non représentée). La distance entre le CG et le foyer s'appelle la **marge statique** qui détermine les limites de centrage AV et AR de l'avion.

[Static margin]

LE COEFFICIENT DE PORTANCE C_z

LE COEFFICIENT DE TRAINEE C_x

C_z et C_x varient en fonction de :

- du **profil de l'aile** (forme, épaisseur, allongement, ...). [Profile of the wing]

Les facteurs qui influencent la portance et la traînée :

Toutes choses égales par ailleurs, la portance et la traînée d'une aile sont d'autant plus fortes que :

- la courbure de son profil est importante
- son profil est plus épais

(Inversement, la portance et la traînée sont plus faibles avec une courbure de profil faible et une aile mince)

- de **l'angle d'incidence de l'aile.**

Le coefficient de portance C_z et le coefficient de traînée C_x :

□ Dépendent de facteurs constants liés à la construction de l'aile :

- L'épaisseur de l'aile (C_z et C_x augmentent avec l'épaisseur de l'aile)
- La courbure de l'aile (C_z et C_x augmentent avec la courbure de l'aile) [Curvature of the wing]
- L'allongement de l'aile (Si l'allongement est plus grand, le C_x est plus petit)

□ Varient en fonction de facteurs liés au pilotage :

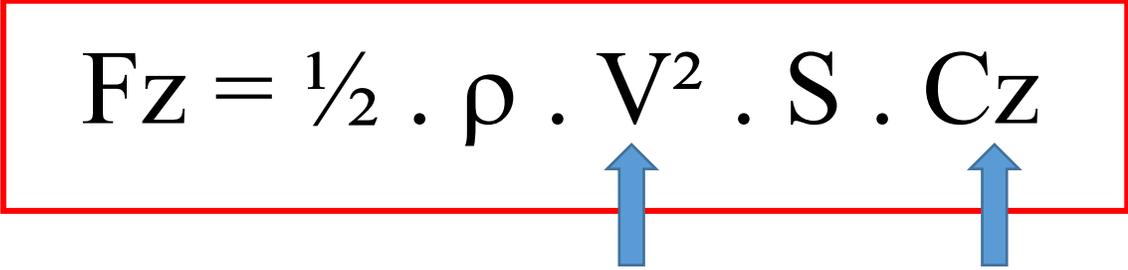
- La configuration (les dispositifs hypersustentateurs changent la courbure de l'aile et son allongement) [Wing configuration]
- L'angle d'incidence de l'aile (variable au cours du vol)

PORTANCE – C_z – C_x

POLAIRE – FINESSE

LA PORTANCE

Elle est proportionnelle :

$$F_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_z$$
A red rectangular box encloses the equation $F_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_z$. Two blue arrows point upwards from below the box to the terms V^2 and C_z .

- au **carré de la vitesse** de l'avion [Square of speed]
- au **coefficient de portance** C_z

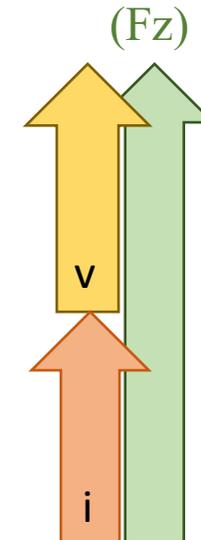
C_z varie en fonction :

- du profil de l'aile = variable selon la **configuration** (becs, volets).
- de **l'angle d'incidence de l'aile** = variable au cours du vol.

LA PORTANCE

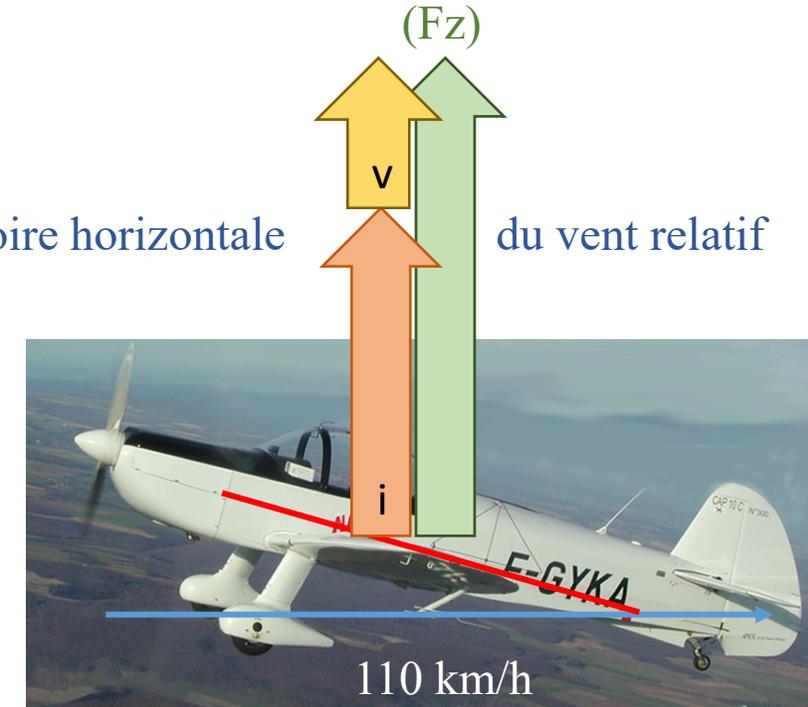
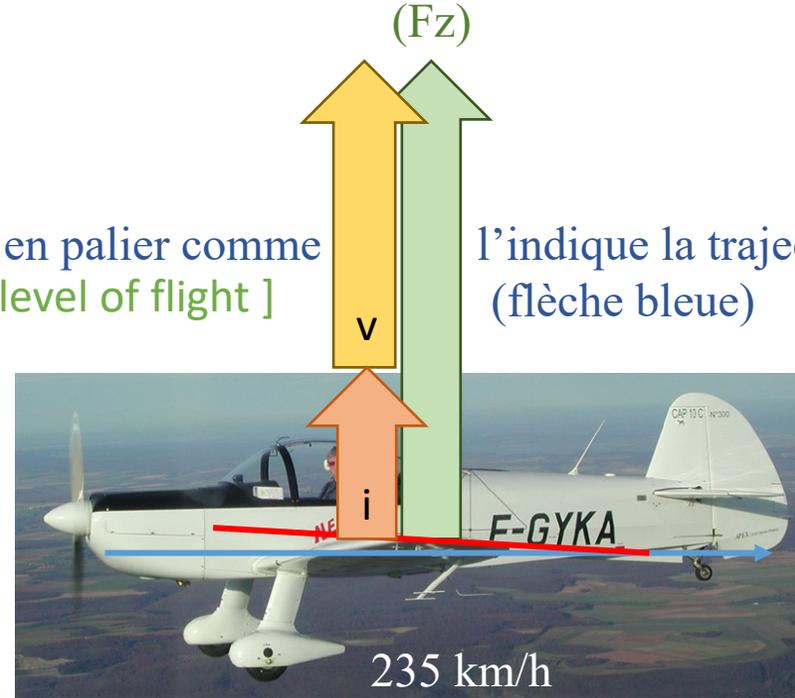
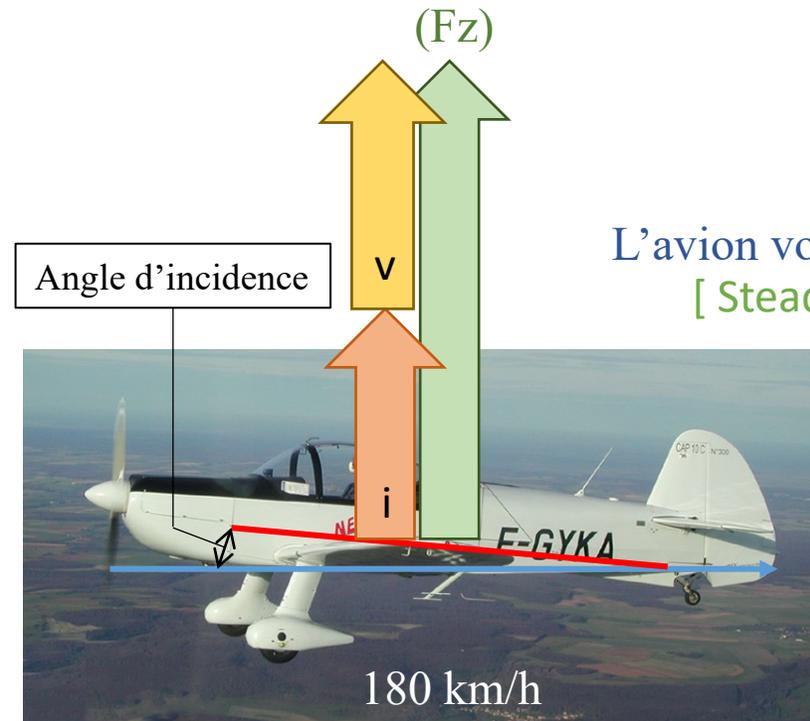
On peut donc considérer que **la portance a 2 composantes** :
[Two components]

- une liée à la **VITESSE**
- une liée à l'**INCIDENCE**



LA PORTANCE

Plusieurs possibilités :



Incidence moyenne

[Mean AOA]

Vitesse moyenne

[Mean speed]

Incidence faible

[Little AOA]

Vitesse élevée

[High speed]

Incidence forte

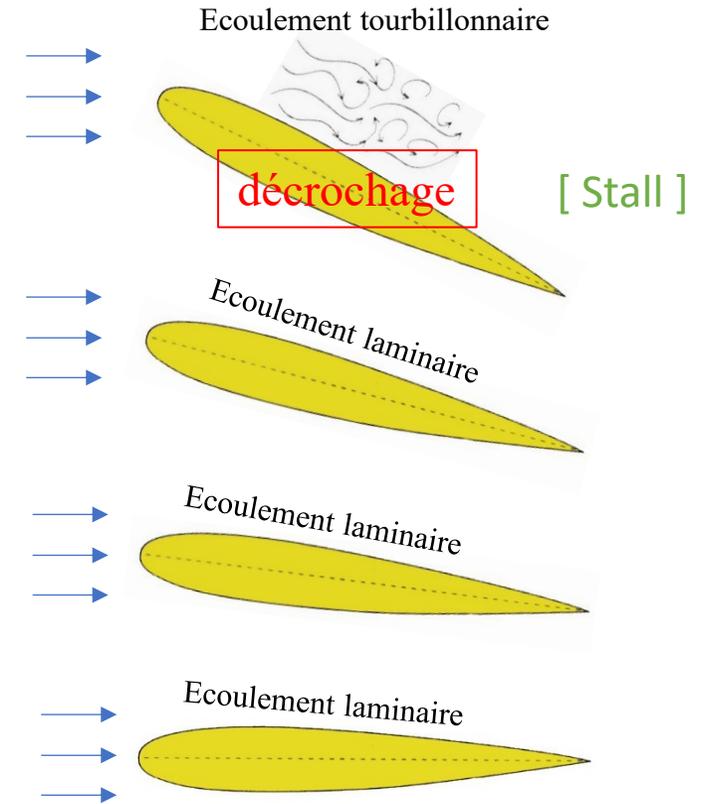
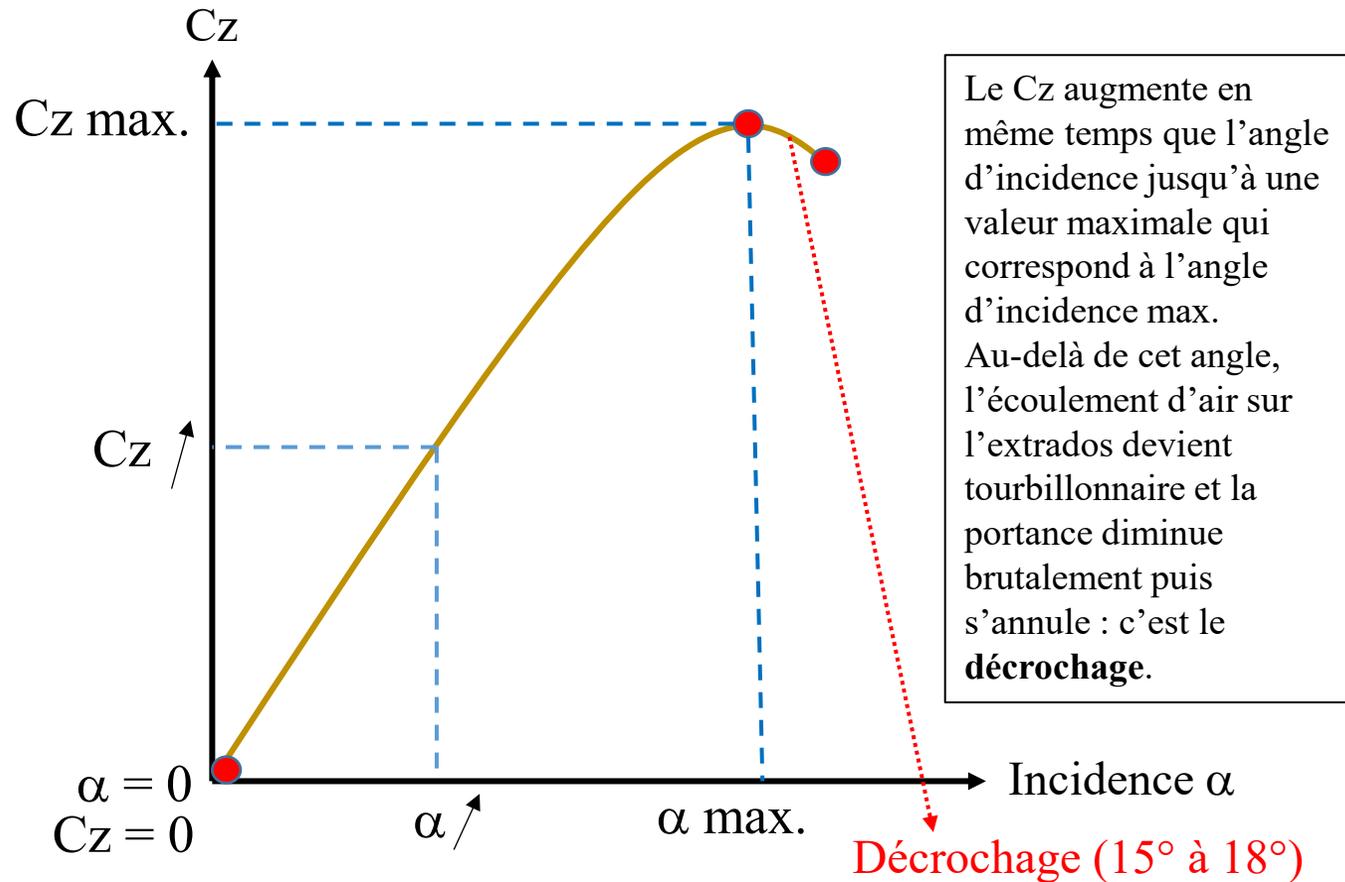
[Large AOA]

Vitesse basse

[Low speed]

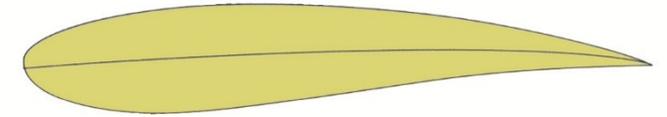
LA VARIATION DU C_z (coefficient de portance)

Si le profil de l'aile est SYMETRIQUE :

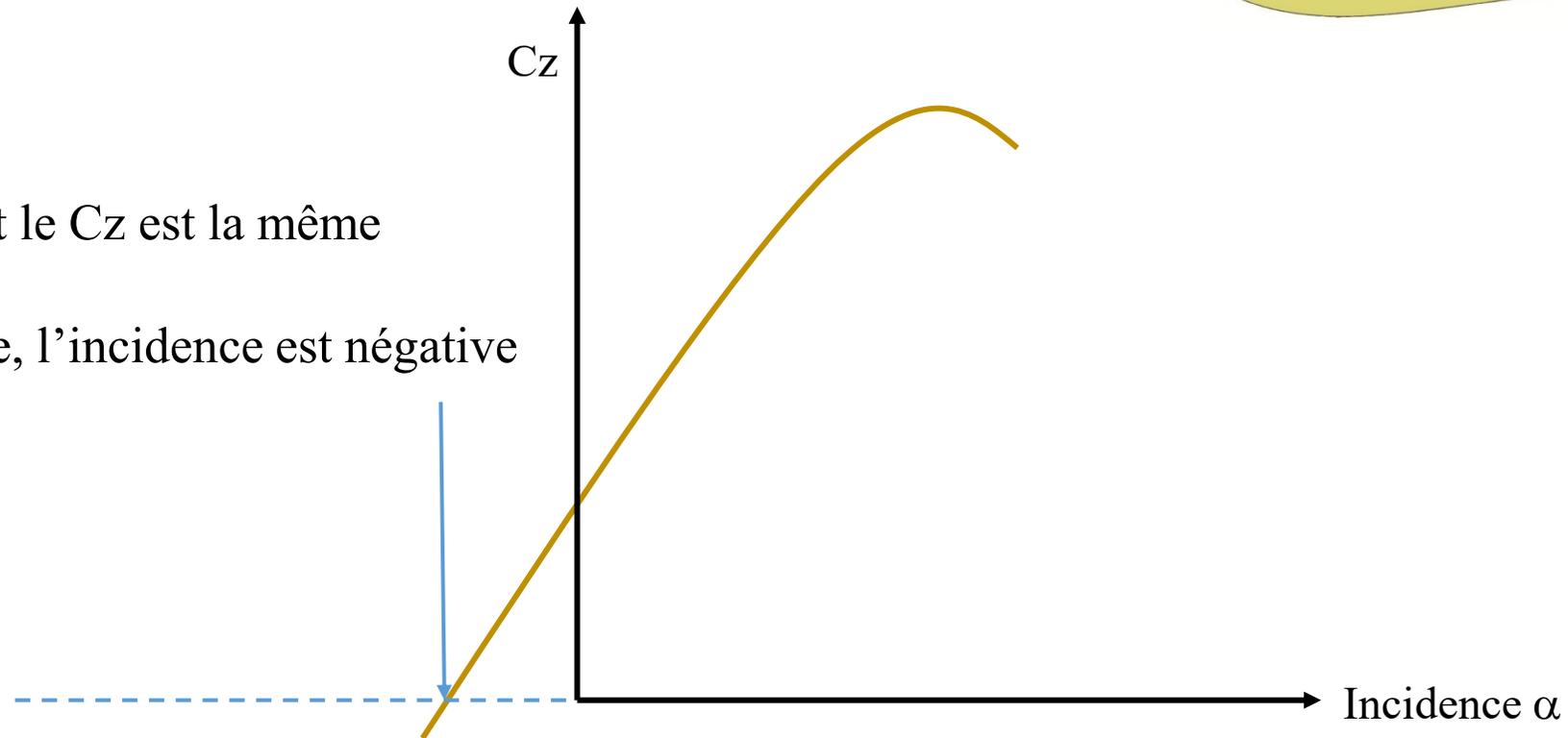


LA VARIATION DU C_z (coefficient de portance)

Si le profil de l'aile est DISSYMETRIQUE :



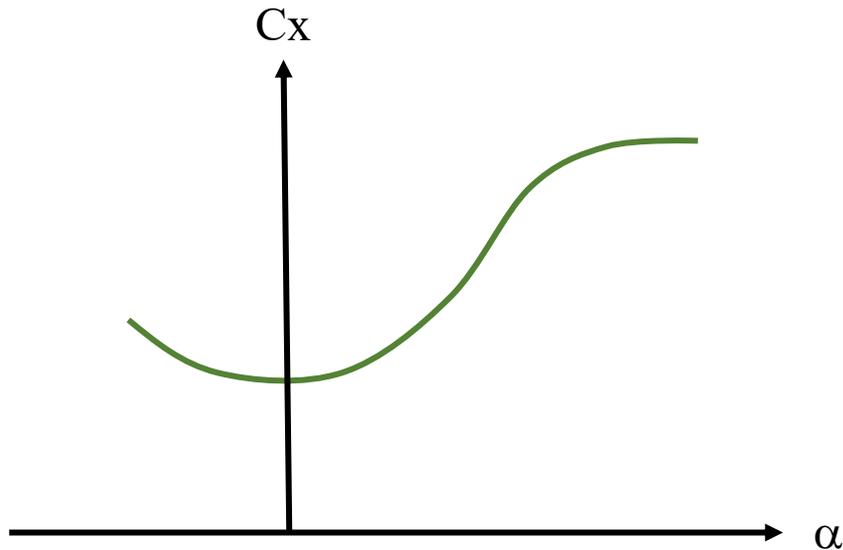
La relation entre α et le C_z est la même
mais à portance nulle, l'incidence est négative



LA VARIATION DU C_x (coefficient de traînée)

La traînée augmente avec la portance ... donc avec la vitesse (petites incidences),
et avec l'incidence (grandes incidences, basse vitesse).

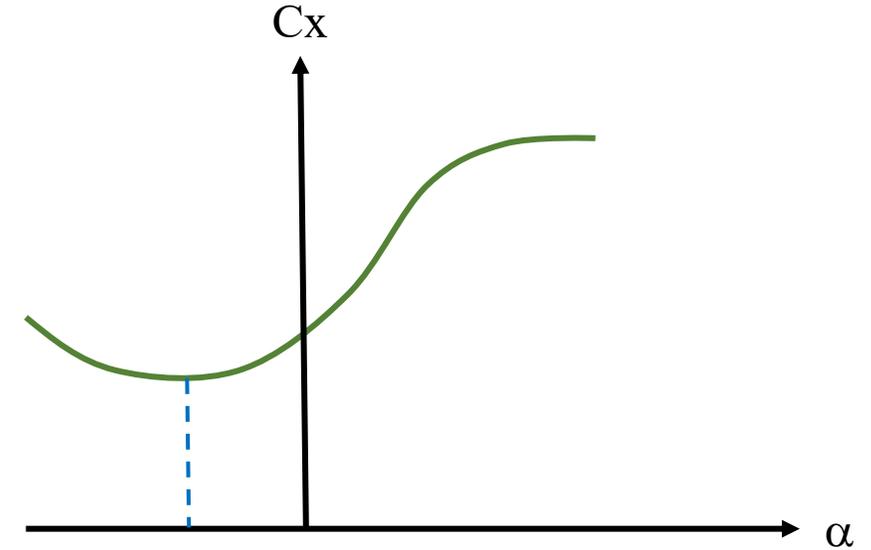
Profil SYMETRIQUE :



A incidence nulle ($\alpha = 0$) la traînée est positive et minimale

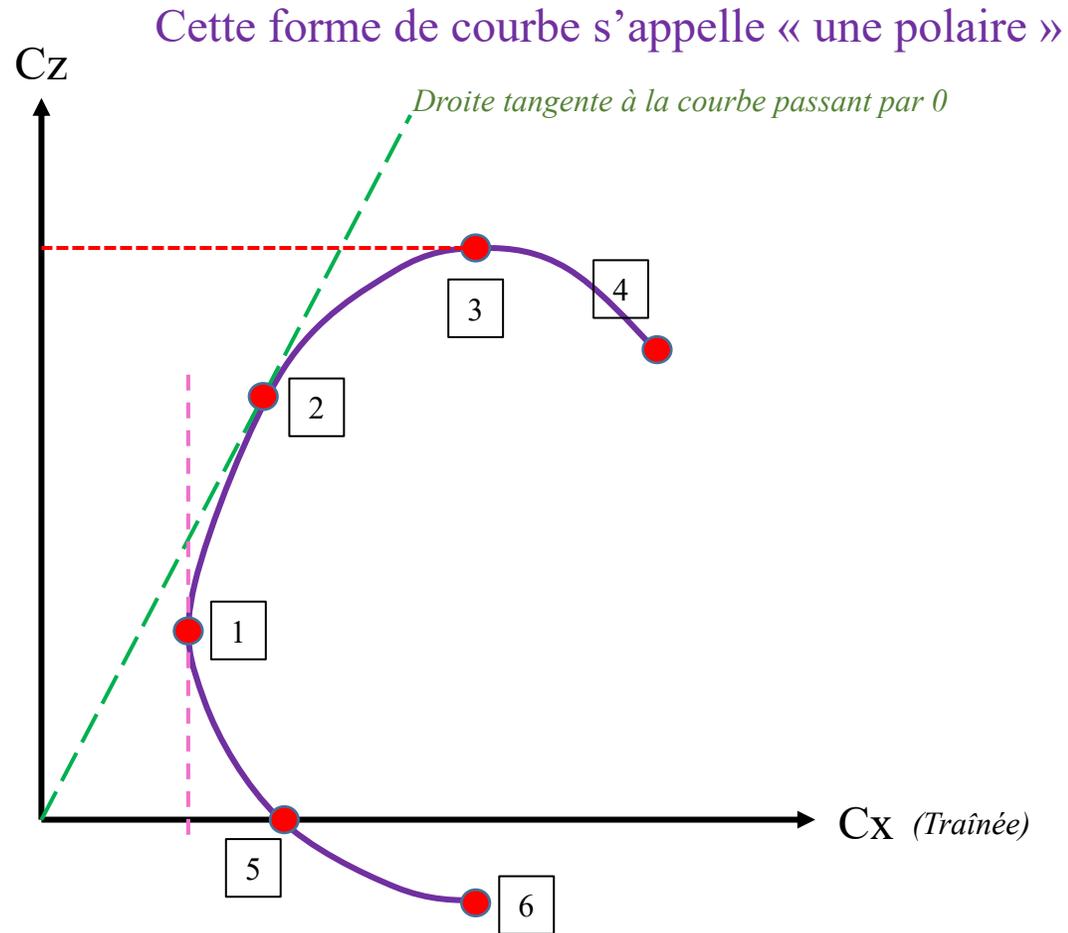
La traînée est toujours POSITIVE

Profil DISSYMETRIQUE :



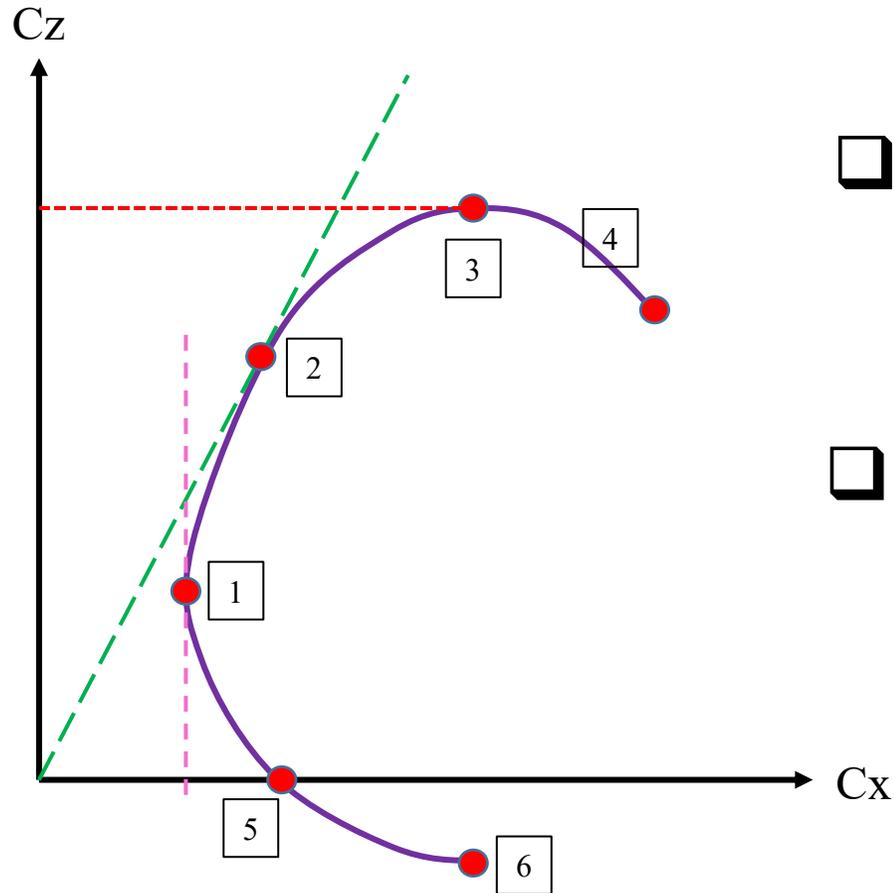
La traînée minimale correspond à une incidence négative ($\alpha < 0$)

LA POLAIRE D'UN PROFIL D'AILE



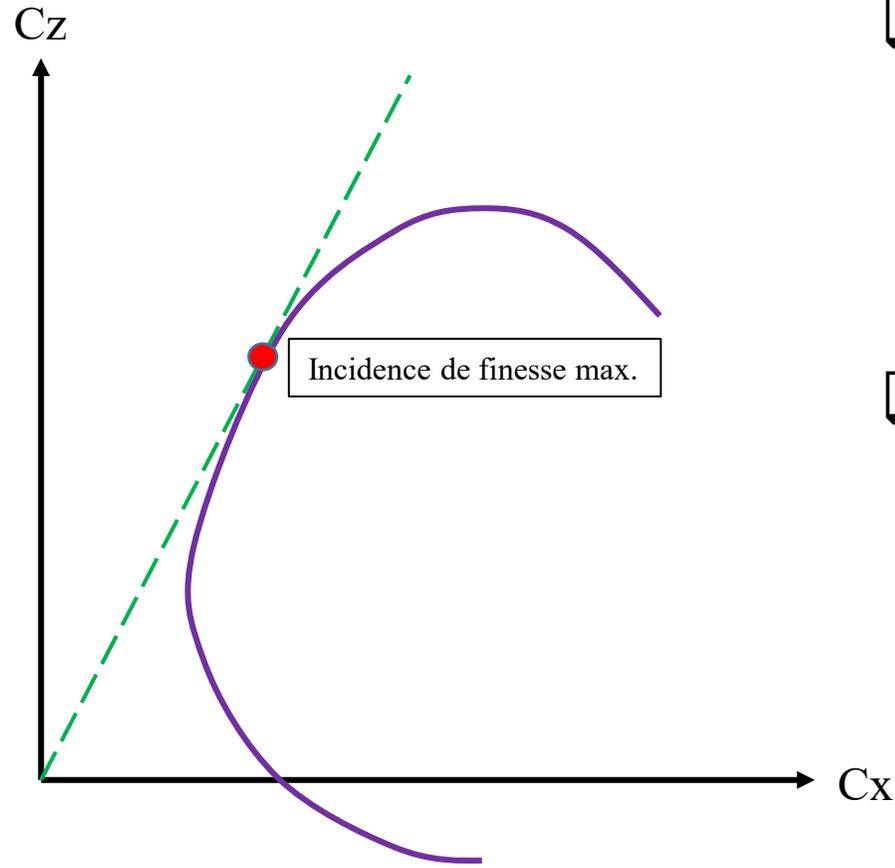
- 1 Incidence de traînée minimale
- 2 Incidence de finesse maximale
- 3 Incidence maximale
- 4 **Décrochage**
- 5 Incidence de portance nulle (piqué vertical)
- 6 Incidence négative (vol inversé = vol dos)

LA POLAIRE D'UN PROFIL D'AILE



- ❑ L'incidence augmente en même temps que C_z
- ❑ La polaire donne des valeurs de C_z et de C_x pour chaque valeur d'incidence

LA POLAIRE D'UN PROFIL D'AILE



- ❑ La finesse est le rapport :

$$F = C_z / C_x$$

- ❑ L'incidence de finesse max. permet de parcourir la plus grande distance
 - Avec la consommation minimale (avion)
 - Avec la perte d'altitude minimale (vol plané)