

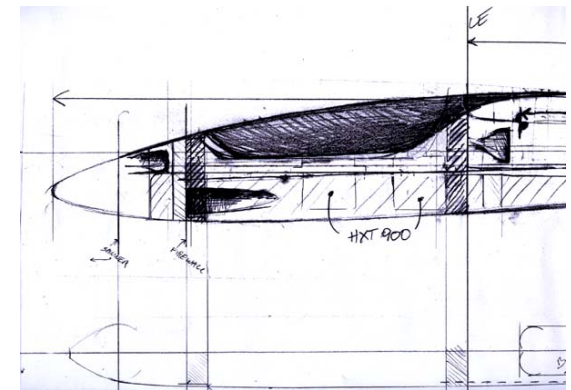


Initiation à la mécanique de vol

CH 02-01: Equilibre

V12

01/06/2017



Sommaire

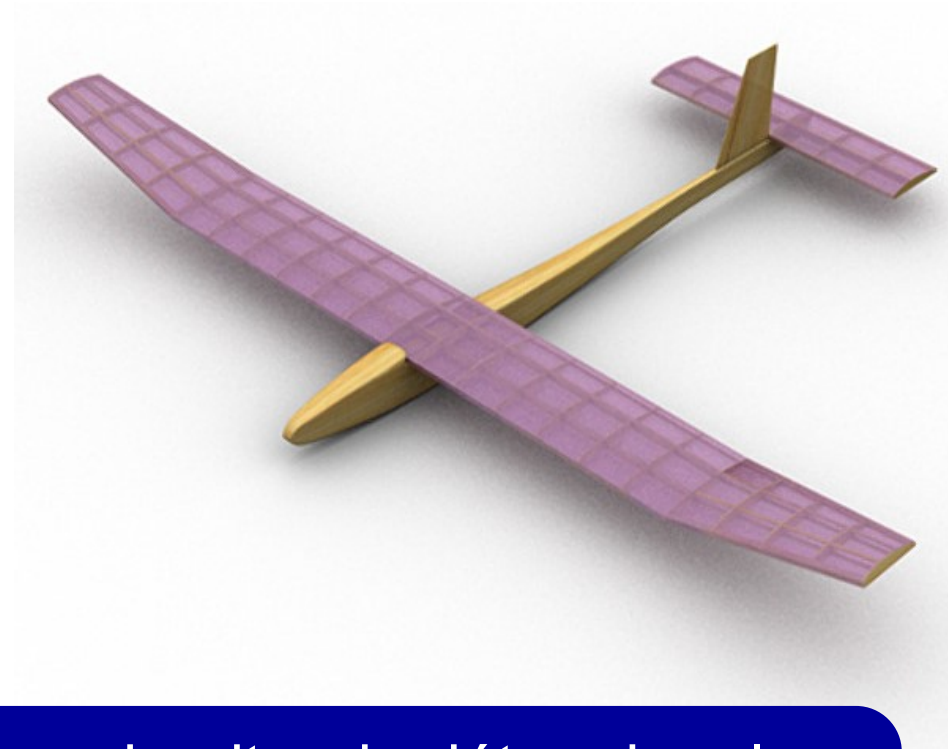


Introduction

- Equilibre des moments
- Equilibre des forces
- Réglages
- Annexes

Introduction

- Dans ce chapitre on s'intéresse à l'étude de l'équilibre d'un aéronef: le planeur.
- En l'absence de la motorisation, il est facile de comprendre la mécanique de cet appareil.



On se propose dans ce chapitre de déterminer les conditions d'équilibre qui permettent à un planeur de voler

Pour Info

équilibre

et

Sommes des moments: nulle

Sommes des forces: nulle

ou

Immobile

Mv rectiligne uniforme

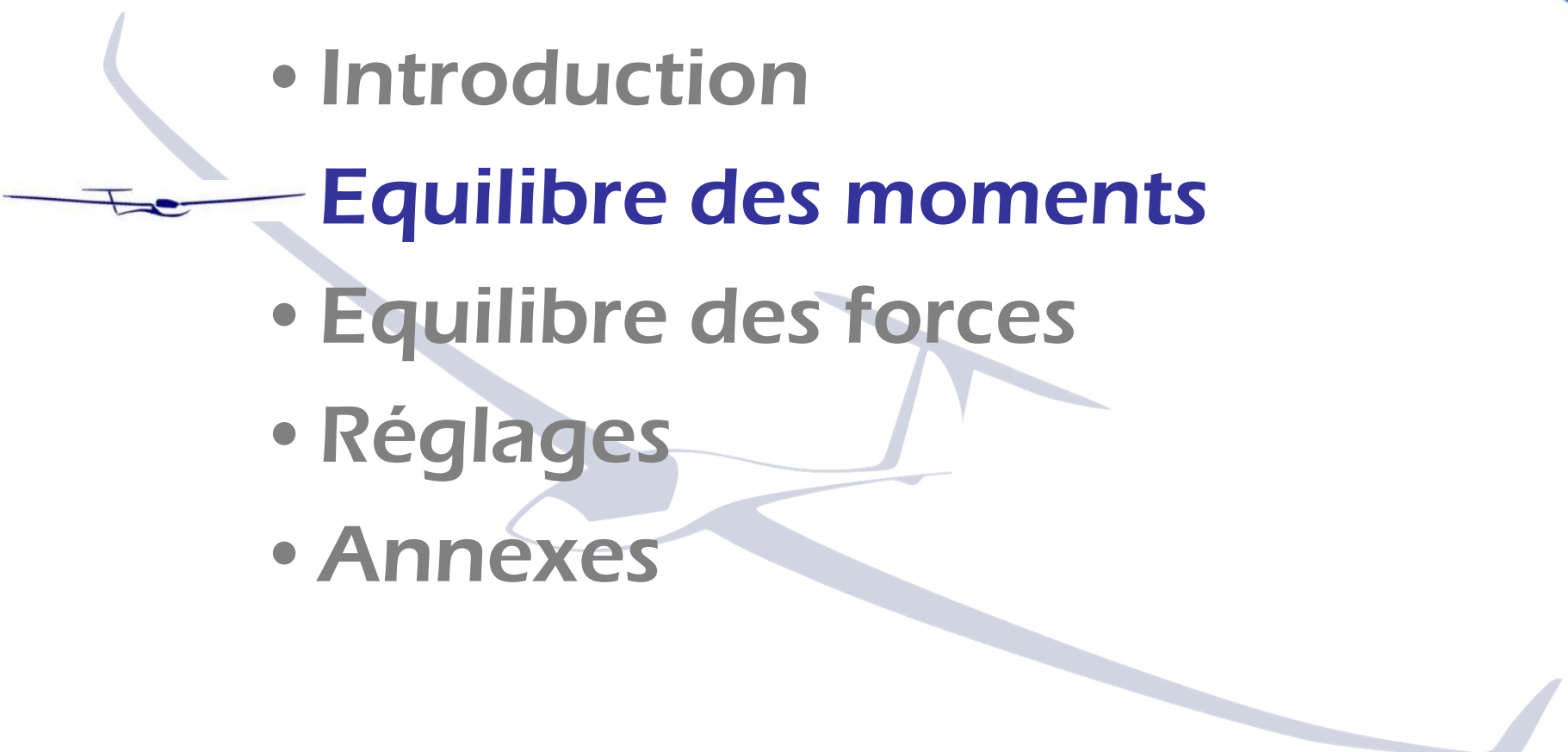
**équilibre
statique**

La capacité d'un système à retrouver l'équilibre suite à une perturbation (force, moment)

**équilibre
dynamique**

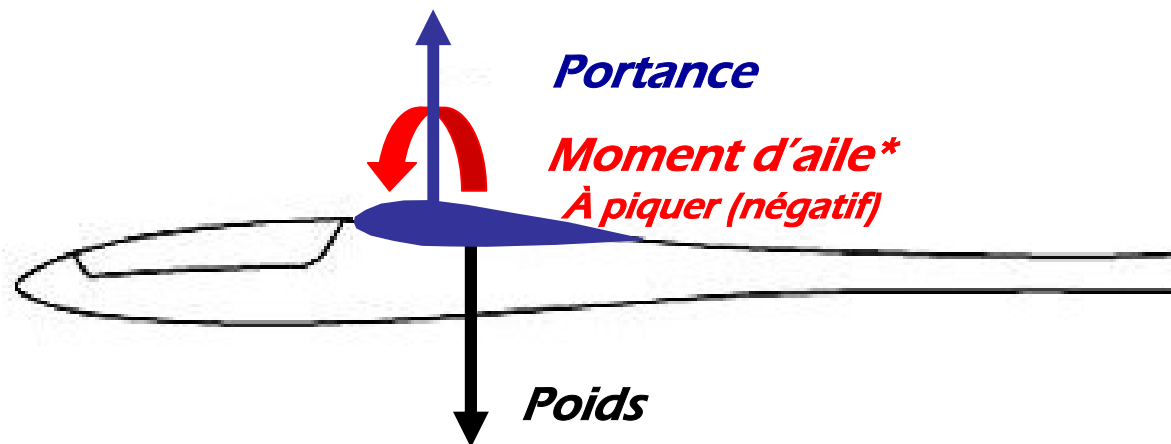
Modes propres qui vont permettre d'atteindre l'équilibre ou d'y revenir (après une perturbation)

Sommaire

- 
- Introduction
 - **Equilibre des moments**
 - Equilibre des forces
 - Réglages
 - Annexes

Problématique

- Un planeur, n'est qu'un fuselage destinée à accueillir un équipage ou du matériel de commande (pour le modélisme) et une aile de grande envergure (réduire la trainée induite inversement proportionnelle à l'allongement).
- Mais il est facile de voir les forces d'origines aérodynamique, n'ont aucune raison pour coïncider avec le pesanteur (**moment non nul**).

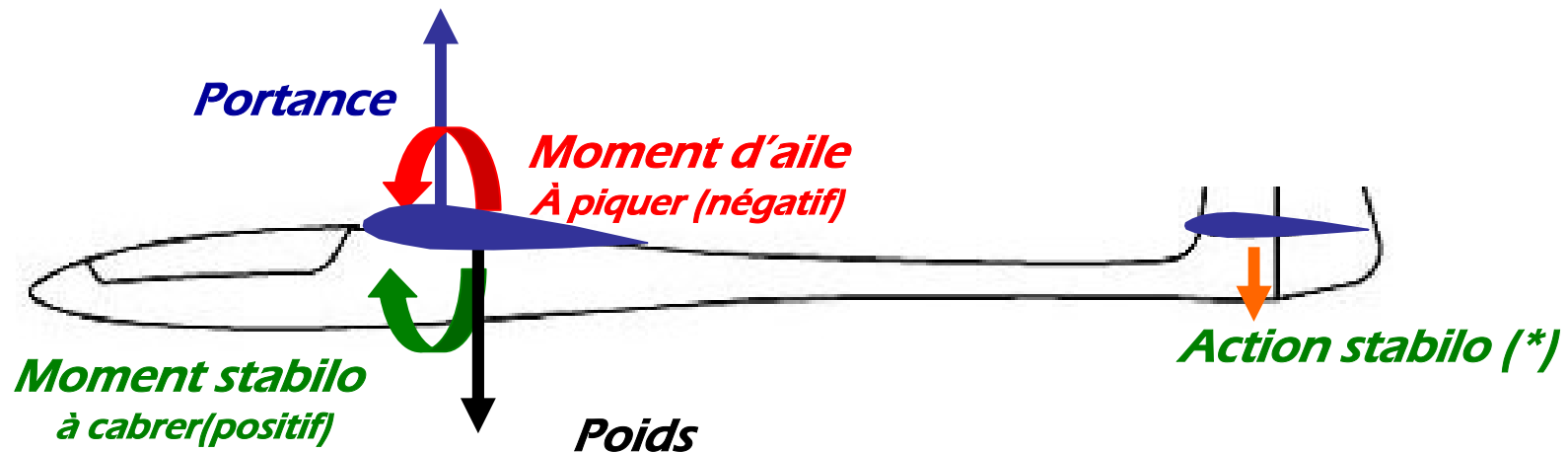


On a besoin en premier lieu d'équilibrer le moment de l'aile.

(*)ne pas oublier que, dans le moment de l'aile, il y a le Cm_0 qui est en général négatif et qui l'emporte sur le moment de la portance (au niveau du foyer).

Le « Stabilo »

- La solution classique est d'ajouter un « **stabilisateur horizontal** » à l'arrière de l'appareil.
- Son rôle est de **générer un moment** qui équilibre le moment de l'aile.

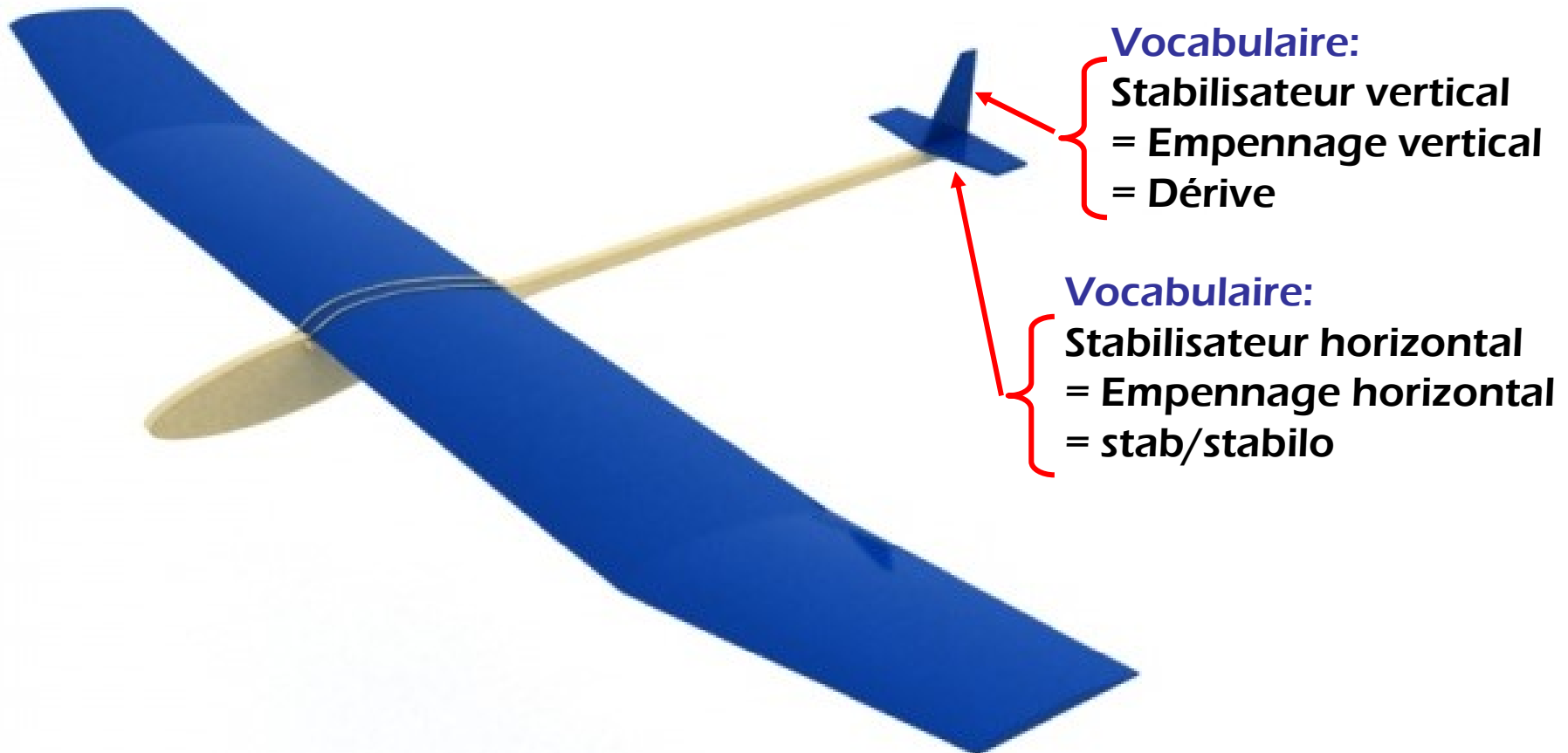


- Pour maximiser le moment, on s'éloigne du Cg (bras de levier important).
- Certains optent pour un empennage avant, on parle d'un plan canard.

(*) le stabilo rajoute de la traînée qui n'est pas représentée ici.

Stabilo & dérive

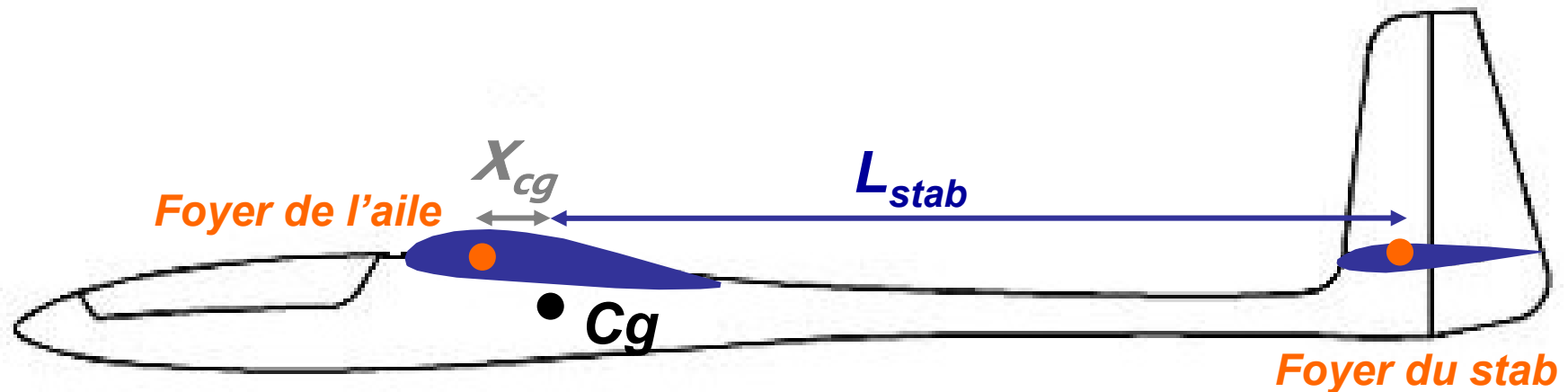
- Pour la stabilité de direction, on ajoute *un stabilisateur verticale* qu'on appelle **dérive**(*).



(*) le terme est emprunté au lexique des bateaux.

Le « Stabilo »

- On prend le foyer de l'aile comme référence.
- On note X_{cg} la distance entre le foyer de l'aile et le Cg ($X_{cg} > 0$ si le Cg est « derrière » le foyer de l'aile).
- On note L_{stab} , la distance entre le foyer du stab et le foyer de l'aile.



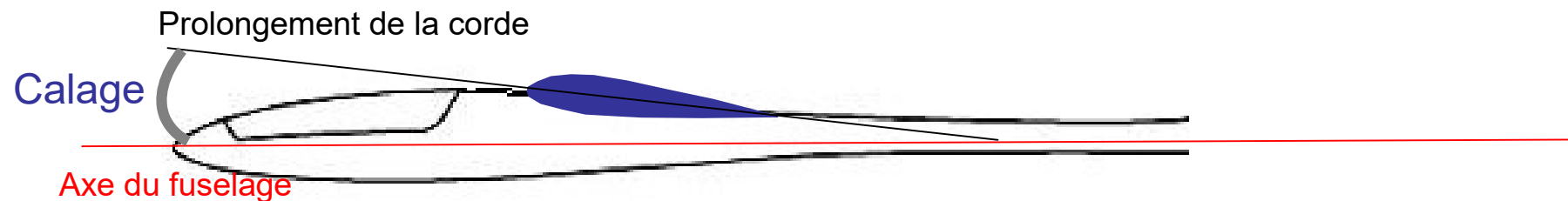
Remarque: dans la réalité, L_{stab} est fonction du Cg qui bouge. Mais on verra que $L_{stab} \gg X_{cg}$. Donc au premier ordre, on néglige cette variation.

Dans ce chapitre, le rôle de la dérive n'intervient dans la stabilité longitudinale, c'est pourquoi elle ne figure pas sur le dessin.

Calage de l'aile

- Lorsqu'on fixe l'aile sur le fuselage, il y a un angle très important à prendre en compte: Angle de calage de l'Aile.

**Angle de calage de l'aile :
angle entre l'axe du fuselage et la corde de l'aile.**

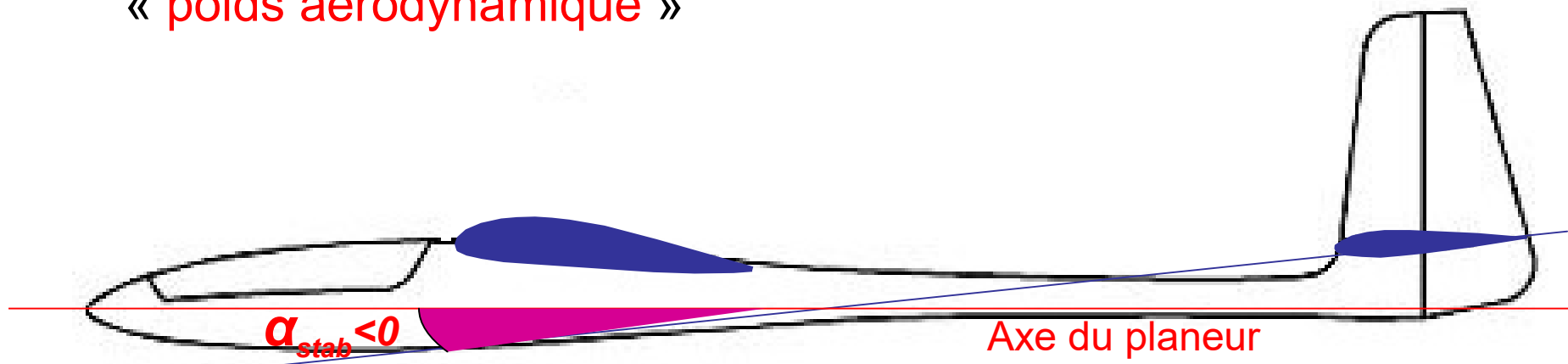


**Le choix de l'angle sera important en terme de
trainée. Une valeur typique de 2° est très
courante.**

AOA: Angle Of Attaque

Calage du stabilo

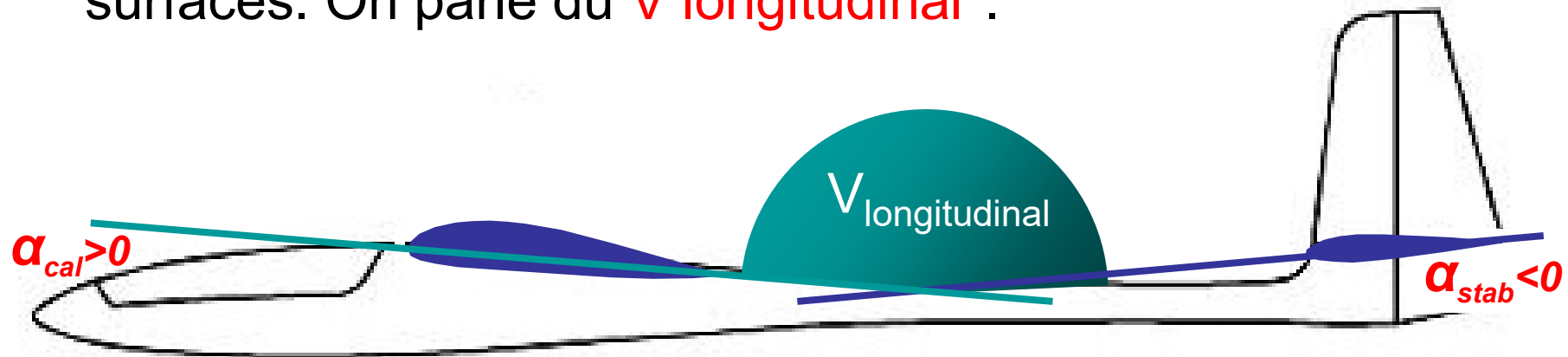
- Le stabilisateur forme un angle α_{stab} avec l'axe de l'appareil.
- Cet angle est en général **négatif** pour générer une portance « négative ».
- On parle d'un **stabilisateur déporteur** ou de « **poids aérodynamique** »



- L'effet du stabilisateur réside dans le moment créé (force * Bras de levier).
- Pour la force en elle-même, **on peut la négliger au premier ordre** et ne tenir compte que du poids et de la portance de l'aile.

V longitudinal

- Pour le calcul, ce n'est pas l'angle de calage de l'aile ou du stabilisateur qui comptent, mais l'angle entre les deux surfaces. On parle du **V longitudinal***.



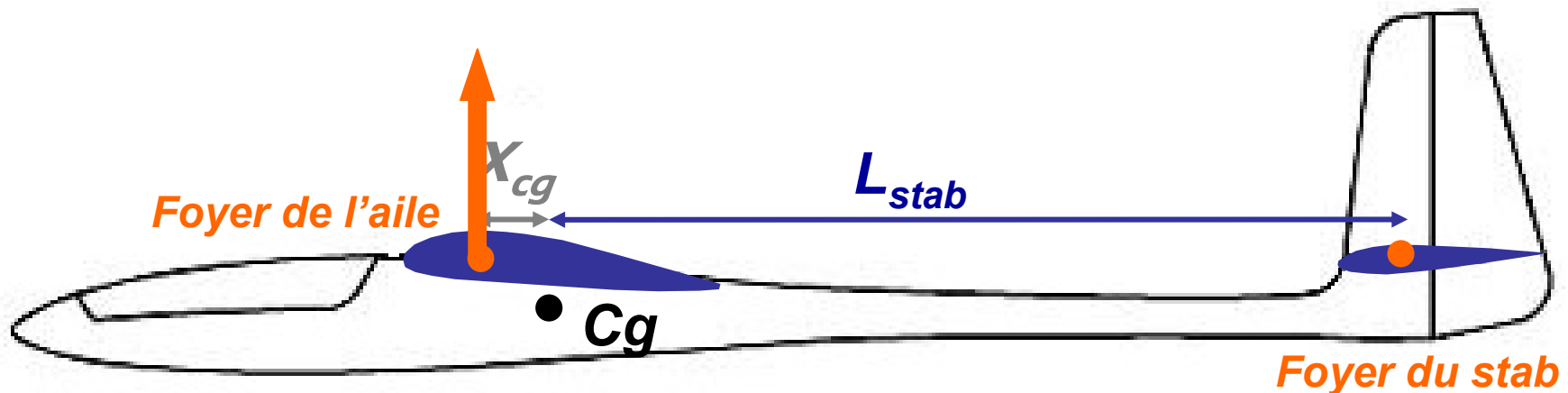
$$V_{long} = 180 - \alpha_{cal} + \alpha_{stab}$$

- Pour agir sur le $V_{longitudinal}$ on peut faire varier le calage de l'aile (exemple: le réglage au sol en en aéromodélisme) ou le calage du stab.
- On général, on fixe un calage optimum de l'aile, puis on agit sur le stabilisateur (notion de trim).

* Certains disent dièdre longitudinal

Moment de l'aile

- A partir de ce schéma, on en déduit le moment généré par l'aile en fonction de l'angle d'attaque alpha:



$$\text{Moment}_{\text{aile}}(\alpha) = 0.5 \cdot \rho \cdot C \cdot C_{m0} \cdot S_{\text{aile}} \cdot V^2 + 0.5 \cdot \rho \cdot C_{z\text{Aile}}(\alpha) \cdot S_{\text{aile}} \cdot V^2 \cdot x_{cg}$$

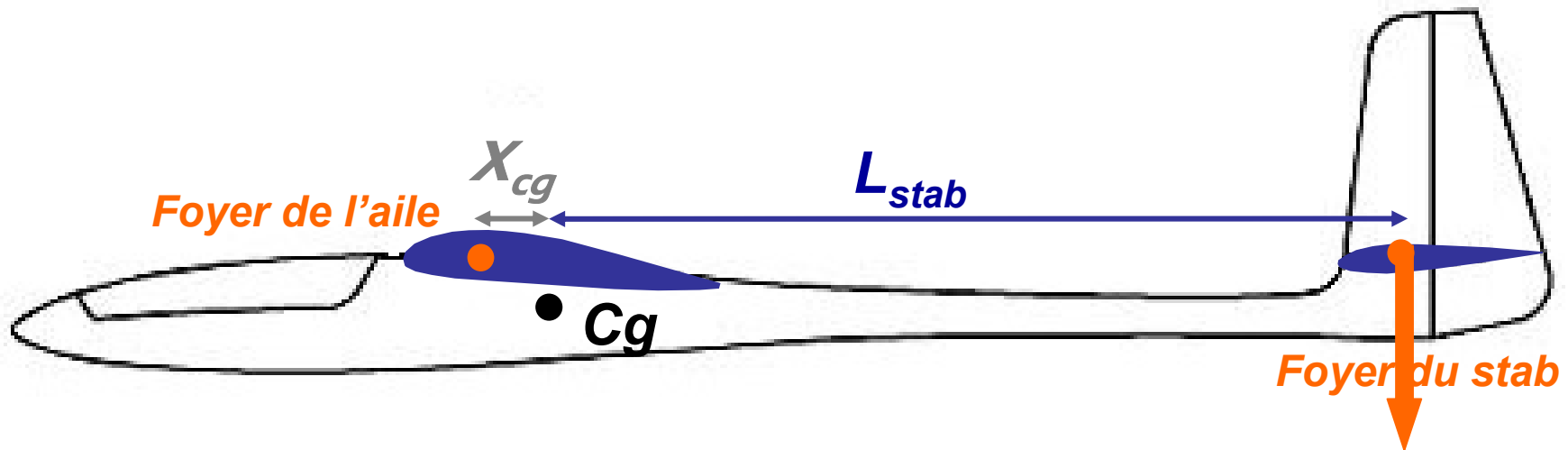
Plus simplement:

$$\text{Moment}_{\text{aile}}(\alpha) = (C_{m0} + C_{z\text{Aile}}(\alpha) \cdot X_{\%}) \cdot 0.5 \cdot \rho \cdot C \cdot S_{\text{aile}} \cdot V^2 < 0$$

$$\text{Avec } X_{\%} = X_{cg}/C$$

Moment du stabilo

- A partir de ce schéma, on en déduit le moment généré par le stabilo en fonction de de l'angle d'attaque α de l'aile et de l'angle V_{long} :



$$\text{Moment}_{\text{stabilo}}(\alpha, V_{long}) = 0.5 \cdot \rho \cdot C_{z\text{stab}}(\alpha, V_{long}) \cdot S_{\text{stab}} \cdot V^2 L_{\text{stab}} > 0$$

Equilibre des moments

- A l'équilibre la somme des moments doit être nulle:

$$\text{Moment}_{\text{aile}}(\alpha) + \text{Moment}_{\text{stabilo}}(\alpha, V_{\text{long}}) = 0$$

$$\underbrace{C_{m0} + C_{z\text{Aile}}(\alpha) \cdot x_{\%}}_{\text{Moment Aile}} - \underbrace{V_{\text{Stab}} \cdot C_{z\text{stab}}(\alpha, V_{\text{long}})}_{\text{Moment stab}} = 0$$

- Avec le « volume du stab » défini comme étant:

$$V_{\text{stab}} = \frac{S_{\text{stab}} * L_{\text{stab}}}{S_{\text{aile}} * \text{Corde}}$$

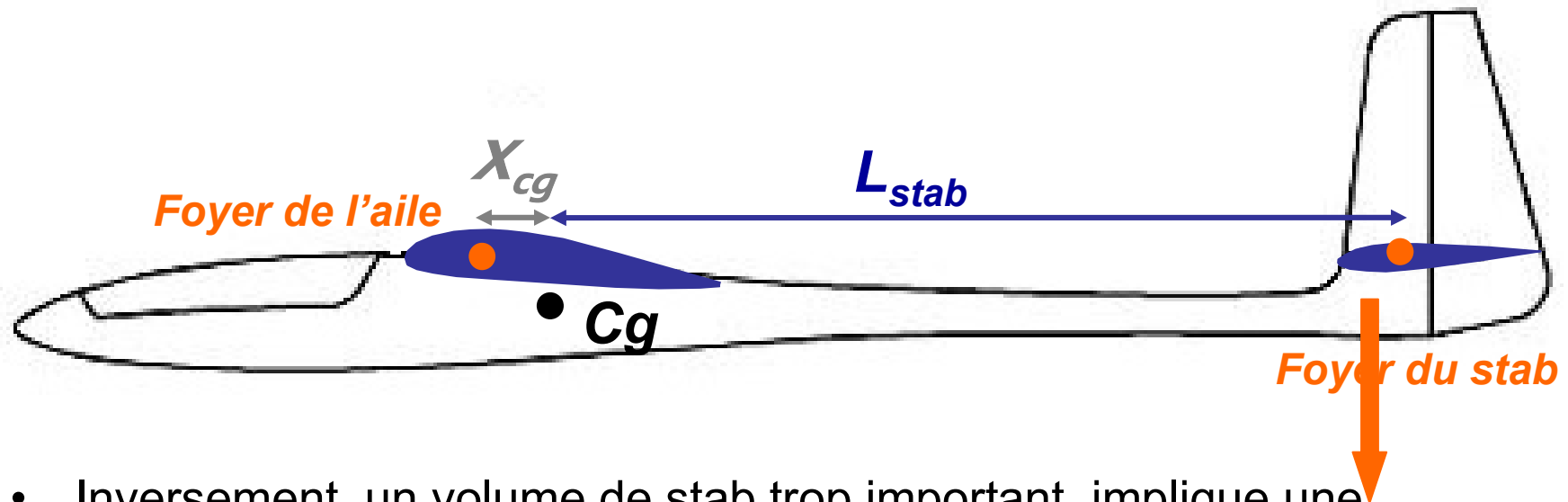
S_{aile} : surface de l'aile

S_{stab} : surface du stab

Corde: corde moyenne de l'aile

Interprétation

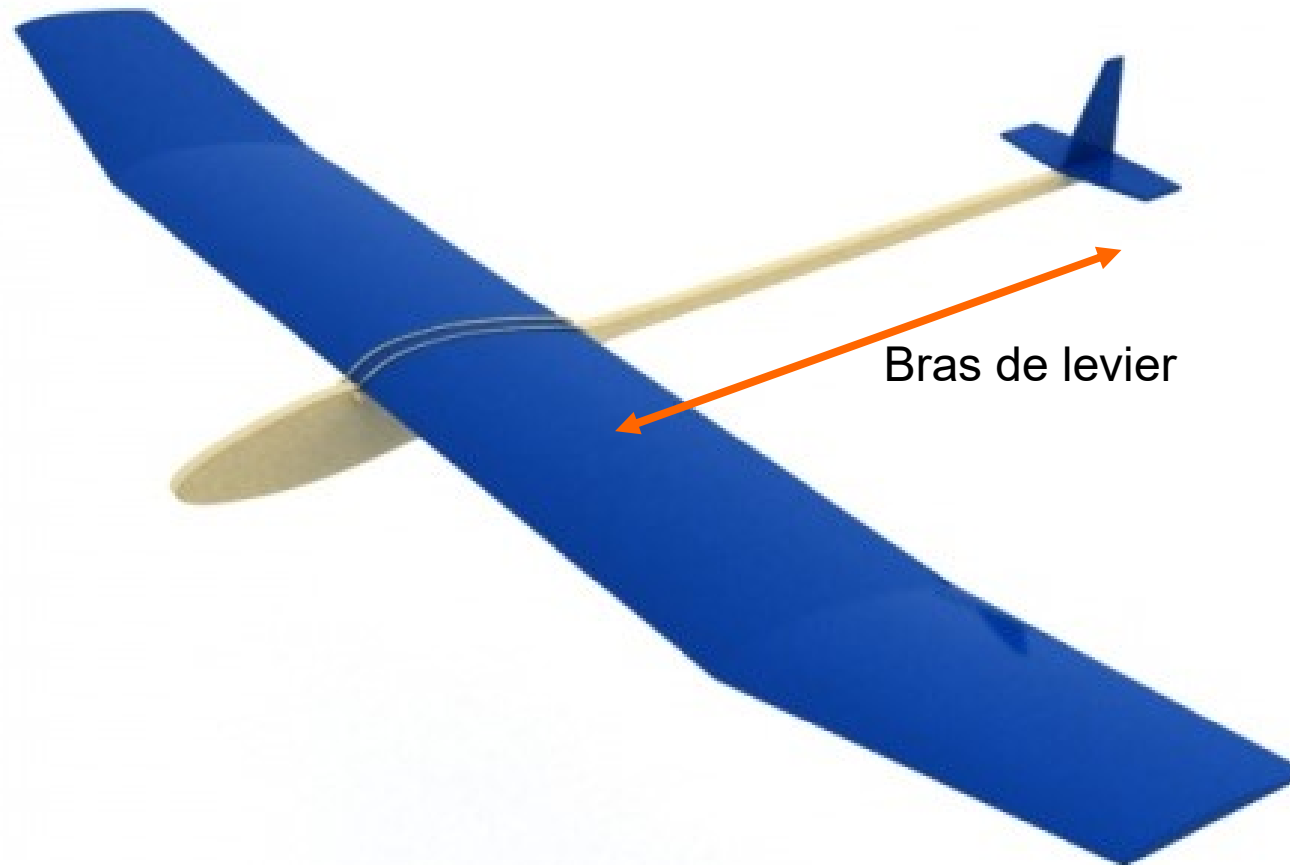
- Le stabilisateur agit via son C_z et son volume de stab: V_{stab} .
- Donc un **volume de stab trop faible**, exige un C_z important qui peut aboutir à un **décrochage du stab**->



- Inversement, un volume de stab trop important, implique une stabilité importante-> manœuvrabilité limité.
- Le volume stab varie en fonction des appareils, mais on peut prendre 0.5 comme valeur de référence.

Pour info

- Le stabilo est caractérisé par sa surface multiplié par son bras de levier, ce qui est homogène à un « volume », c'est pourquoi on parle de volume de stab.



Relation Alpha et V_{long}

- A partir de cette équation:

$$\underbrace{C_{m0} + C_{zAile}(\alpha) \cdot x_{\%}}_{\text{Moment Aile}} - \underbrace{V_{Stab} \cdot C_{zstab}(\alpha, V_{long})}_{\text{Moment stab}} = 0$$

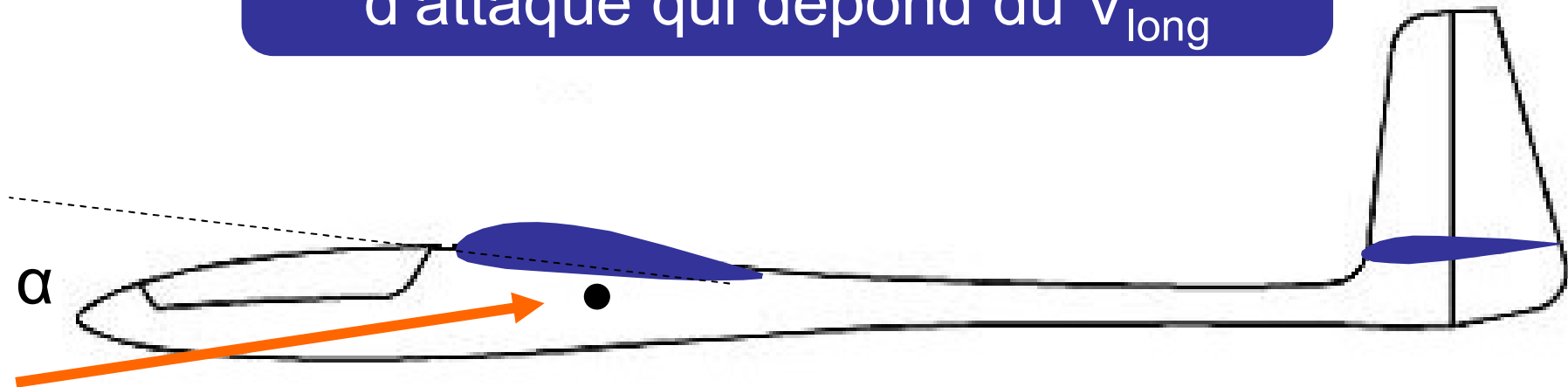
- On peut montrer que l'angle d'attaque alpha est fonction de l'angle V_{long} :

$$\alpha = \text{Fonction} (V_{long})$$

- Donc pour chaque valeur de V_{long} , on obtient une valeur unique de l'angle d'attaque alpha.
- Si l'angle d'attaque est dans la limite du fonctionnement de l'aile (portance positive sans décrochage), on est alors bien à l'équilibre des moments.

Résumé

L'équilibre des moments fixe l'angle d'attaque qui dépend du V_{long}



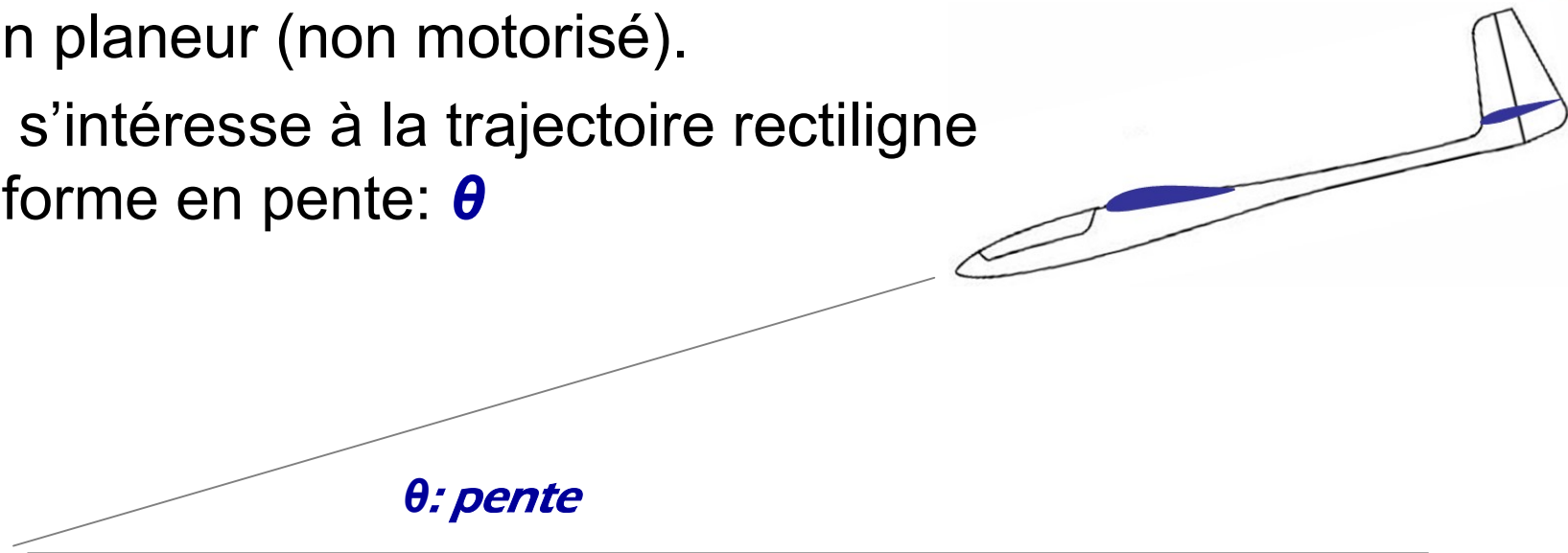
Sommaire

- Introduction
- Equilibre des moments
- **Equilibre des forces**
- Réglages
- Annexes



Trajectoire d'un planeur

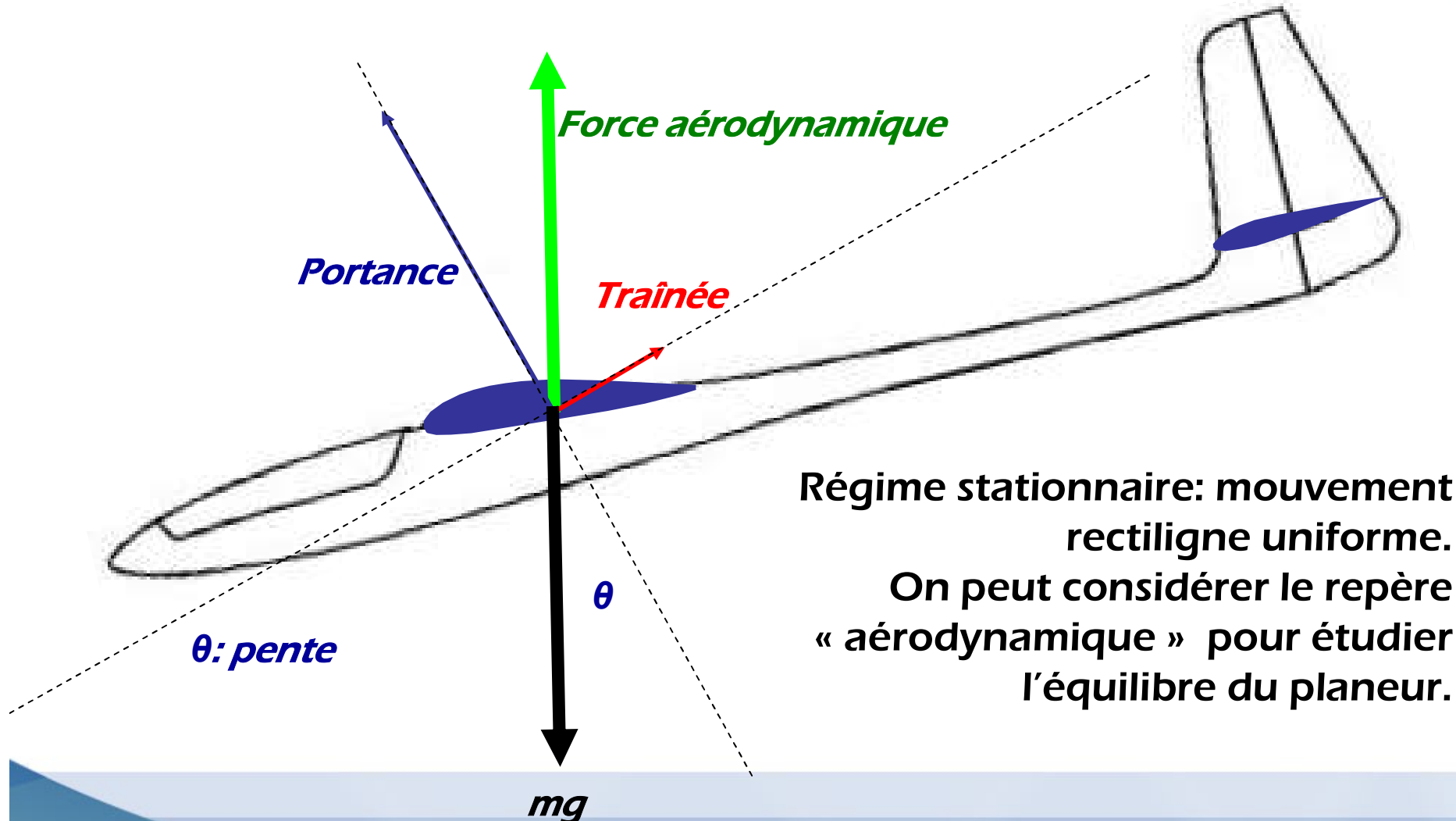
- On se propose d'analyser la trajectoire d'un planeur (non motorisé).
- On s'intéresse à la trajectoire rectiligne uniforme en pente: θ



- Bilan des forces: la planeur est soumis uniquement à son poids et la force aérodynamique des ailes.
- La force générée par le **stabilisateur est négligeable** à ce stade de l'étude.

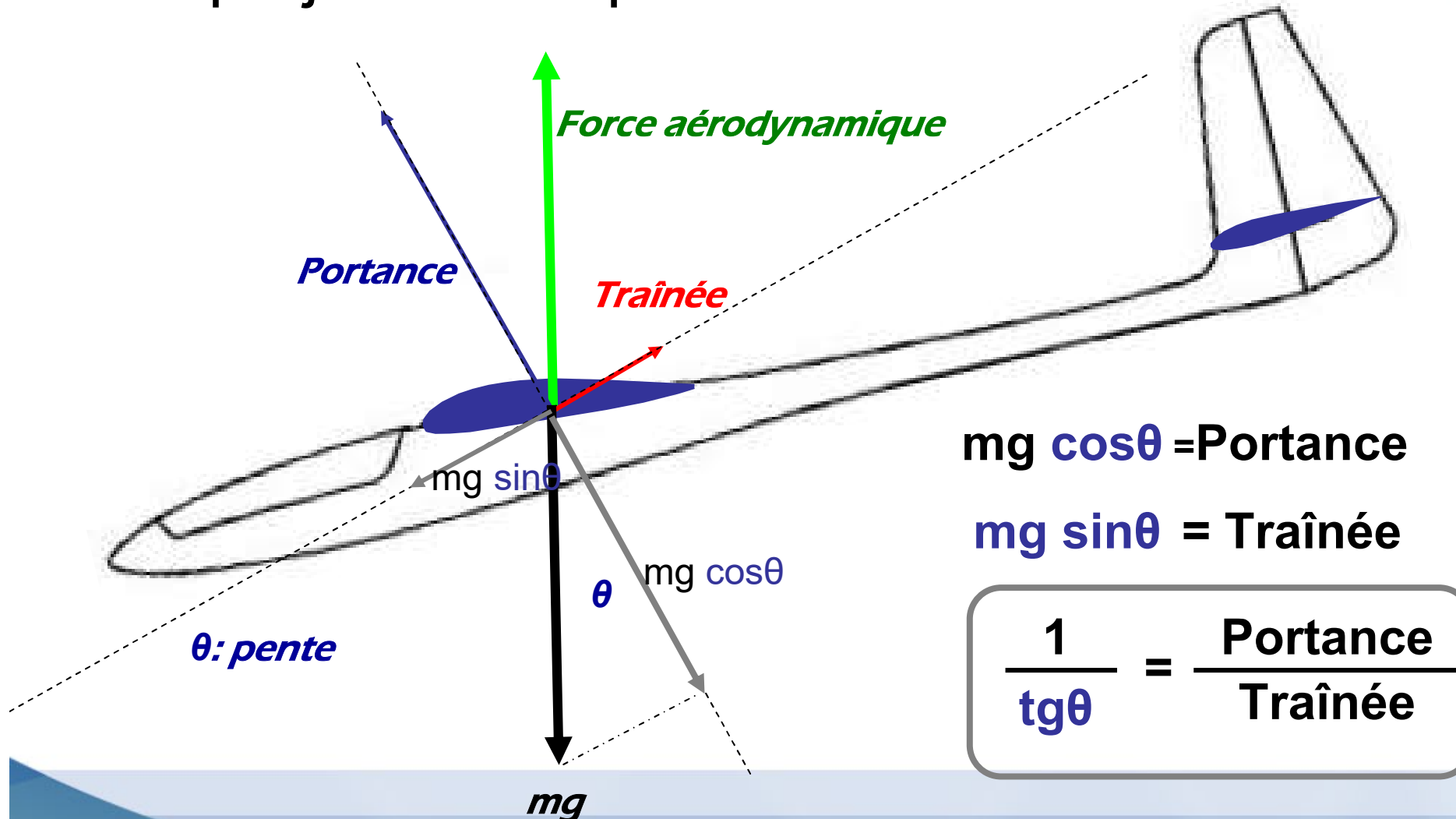
Equilibre es forces

- On a donc:



Equilibre es forces

- La projection du poids donne:



$$mg \cos\theta = \text{Portance}$$

$$mg \sin\theta = \text{Trainée}$$

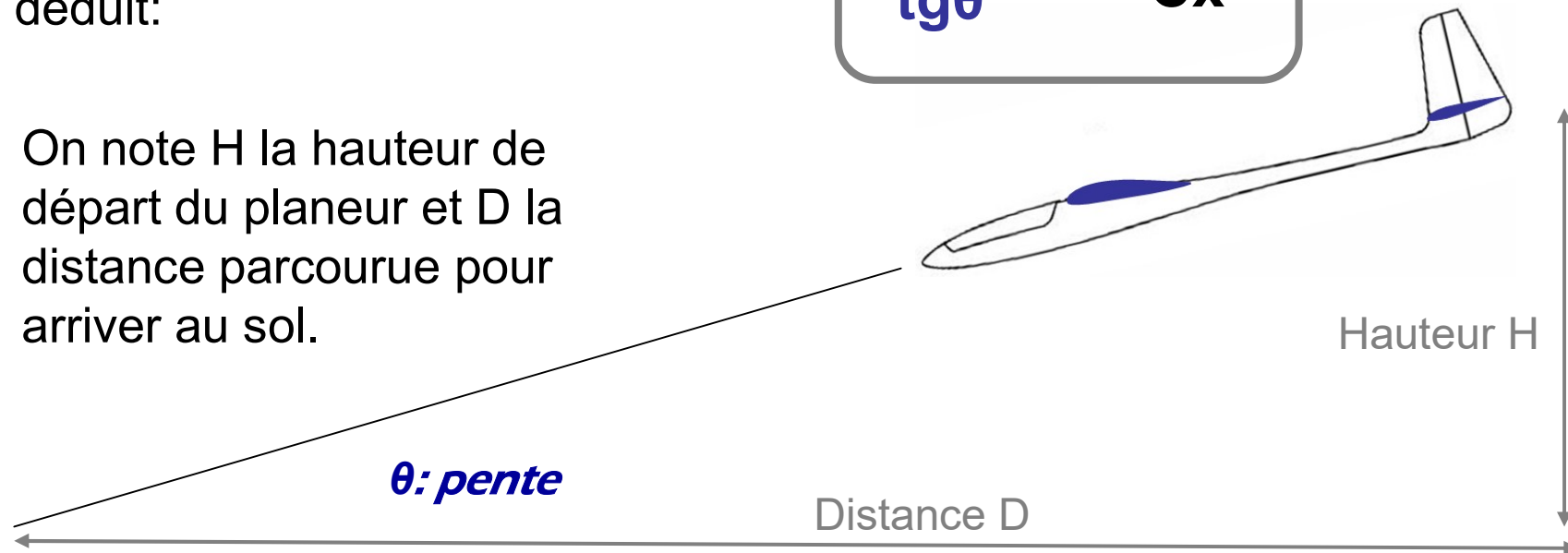
$$\frac{1}{\text{tg}\theta} = \frac{\text{Portance}}{\text{Trainée}}$$

La finesse

- Comme la portance et la traînée sont fonctions de C_z et C_x , on en déduit:

$$\frac{1}{\text{tg}\theta} = \frac{C_z}{C_x}$$

- On note H la hauteur de départ du planeur et D la distance parcourue pour arriver au sol.



- On appelle **Finesse** le rapport D/H . On en déduit que:

$$\text{Finesse} = \frac{D}{H} = \frac{1}{\text{tg}\theta} = \frac{C_z}{C_x}$$

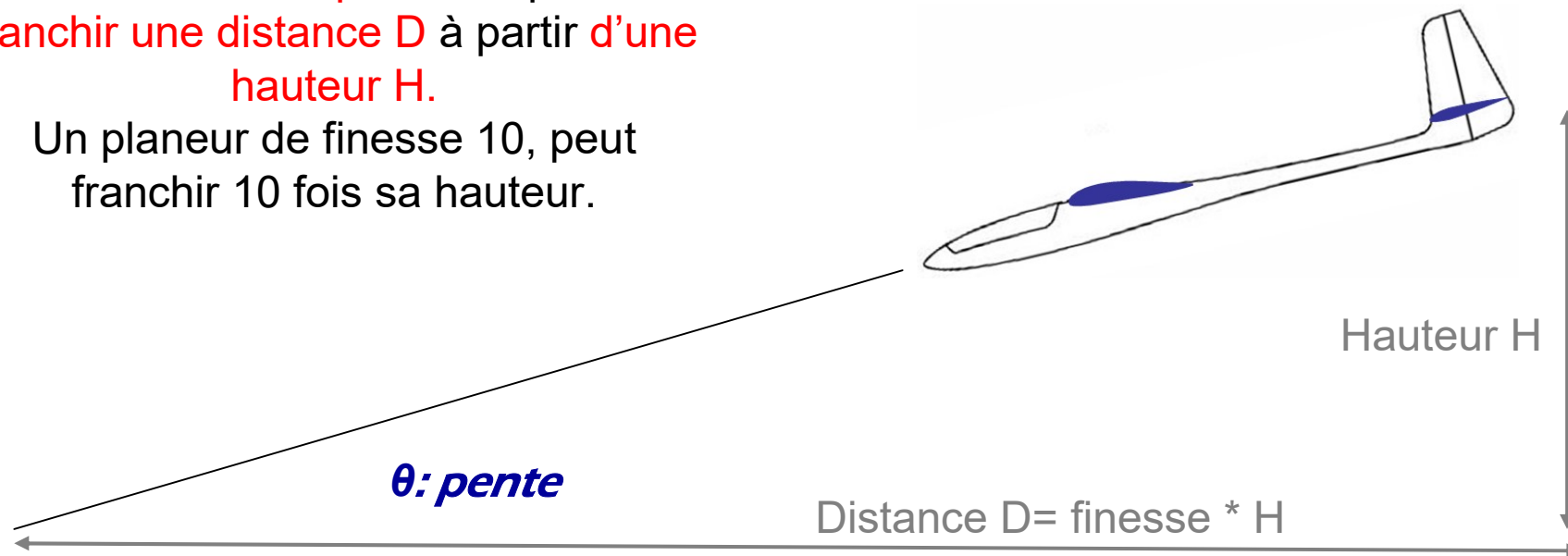
La finesse

- Donc, l'angle d'attaque α du planeur, détermine les coefficient C_z et C_x . Il détermine ainsi la pente θ et donc la Finesse:

Angle d'attaque: α \longrightarrow pente: θ & Finesse

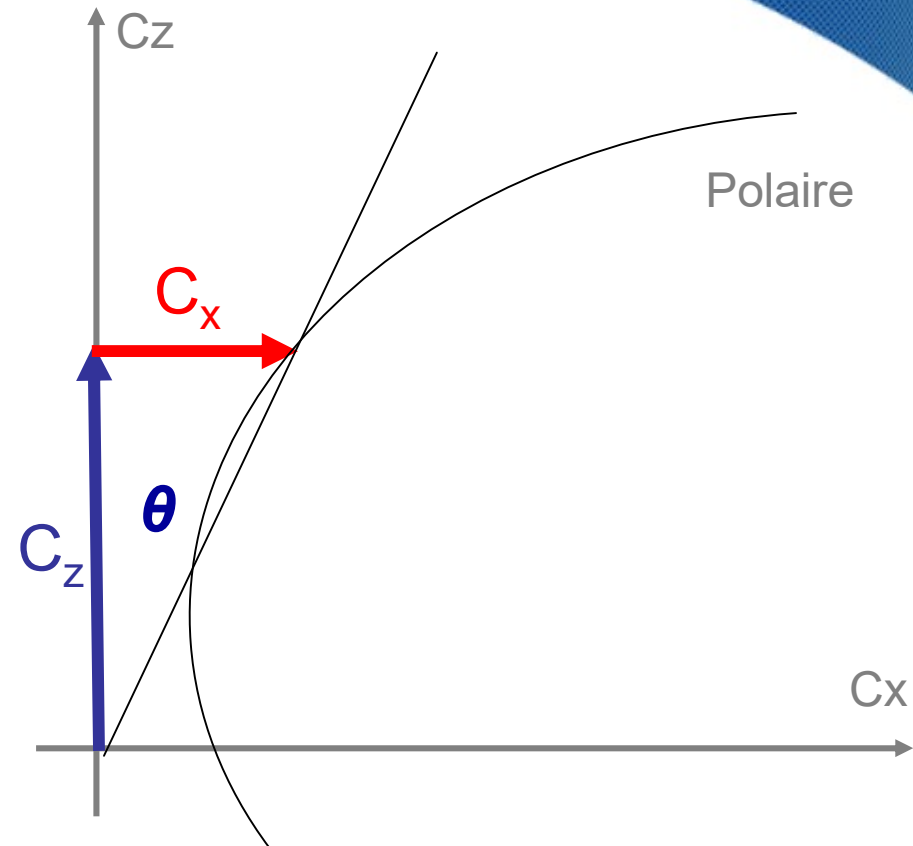
La finesse est la capacité du planeur à franchir une distance D à partir d'une hauteur H .

Un planeur de finesse 10, peut franchir 10 fois sa hauteur.



Relation Finesse / Polaire

- On considère la polaire du planeur: C_z en fonction de C_x .
- Si on reporte le C_z et le C_x du vol en question, on trouve directement l'angle θ qui la pente.



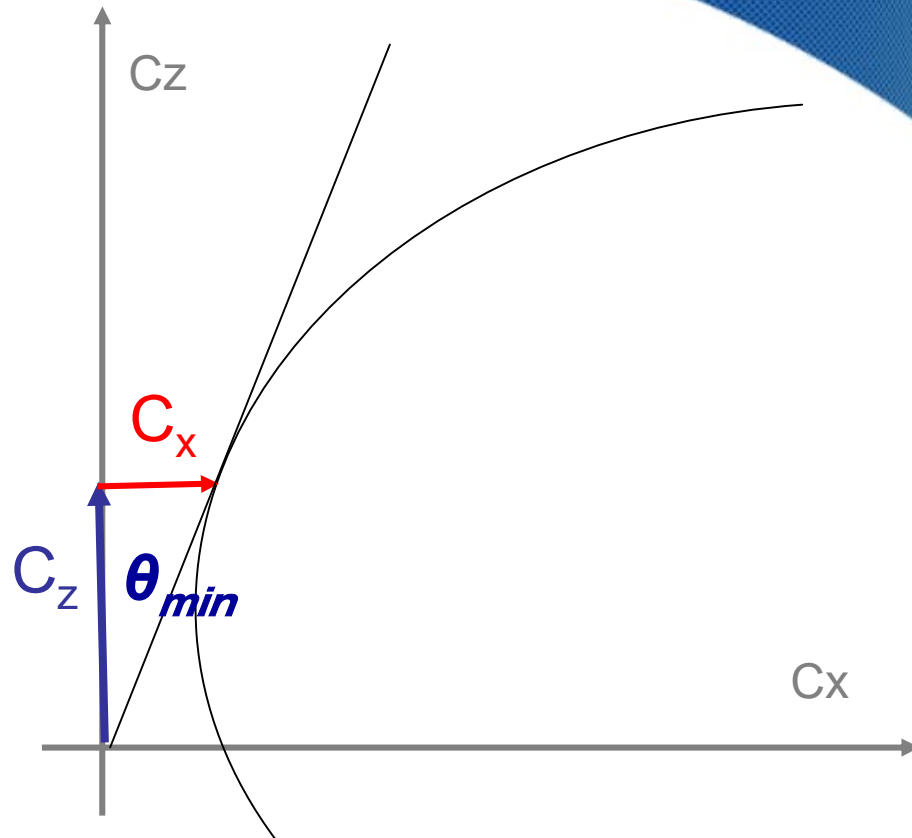
La polaire est très intéressante car elle nous donne le lien direct entre les caractéristiques aérodynamiques (α , C_z , C_x) et une performance du planeur: la finesse.

Finesse max:

- Si on veut maximiser la finesse, il faut réduire l'angle $\theta \rightarrow \theta_{min}$.

$$F_{max} = \frac{1}{\operatorname{tg}\theta_{min}}$$

- Sur la polaire, ceci donne: la tangente qui passe par l'origine.



- On peut démontrer le résultat mathématiquement (voir annexe)

Vitesse du planeur

- Nous avons vu que la pente est déterminée à partir de C_z/C_x .
- Pour la vitesse, elle résulte directement de l'équation:

$$mg \cos\theta = \text{Portance}$$

- Si la pente est faible ($\cos\theta \sim 1$) on peut déduire:

$$V^2 = \frac{mg}{0.5\rho C_z S} \quad \text{On note charge alaire:} \quad C_a = \frac{mg}{S}$$

- On en déduit: $V^2 = \frac{C_a}{0.5\rho C_z}$

La charge alaire

- La notion de charge alaire sera très intéressante car elle permet de nous renseigner sur la vitesse (qui est plus compliquée à calculer étant donnée qu'elle est au carré).

$$V^2 = \frac{Ca}{0.5\rho C_z}$$

- En aéromodélisme, pour une valeur typique de 0.5 pour C_z on peut ainsi comparer les vitesses de différents appareils.

Clarification

- Pour deux planeurs identiques (aérodynamiquement parlant), le planeur le plus lourd, ira plus vite:

$$V_1^2 = \frac{Ca_1}{0.5\rho C_z} > V_2^2 = \frac{Ca_2}{0.5\rho C_z}$$

- Mais les deux planeurs auront **la même finesse** car elle est fonction uniquement de l'angle d'attaque.

Ceci va à l'encontre de l'idée intuitive qui consiste à penser qu'un planeur plus léger peut parcourir une distance plus importante!

- Attention: le poids peut modifier les propriétés aérodynamiques d'une aile si l'écart de vitesse entraîne un écart important au niveau du nombre de Reynolds.

Sommaire

- Introduction
- Equilibre des moments
- Equilibre des forces
- **Réglages**
- Annexes



Comment régler la pente θ ?

- Nous avons vu qu'à l'équilibre du moment, l'angle d'attaque est fonction du $V_{\text{longitudinal}}$.

$$\alpha = \text{Fonction} (V_{\text{long}})$$

- Nous avons vu qu'à l'équilibre des forces, la pente est fonction de C_z/C_x -> donc la pente est fonction de l'angle d'attaque

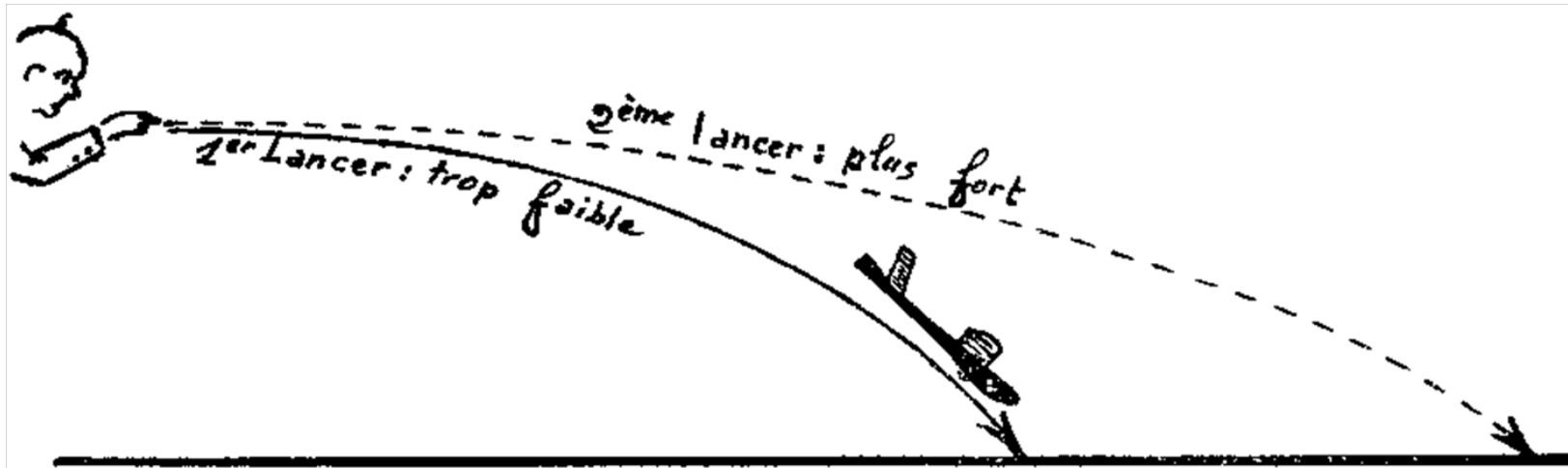
$$\theta = \text{Fonction} (\alpha)$$

- Donc la pente est fonction $V_{\text{longitudinal}}$.

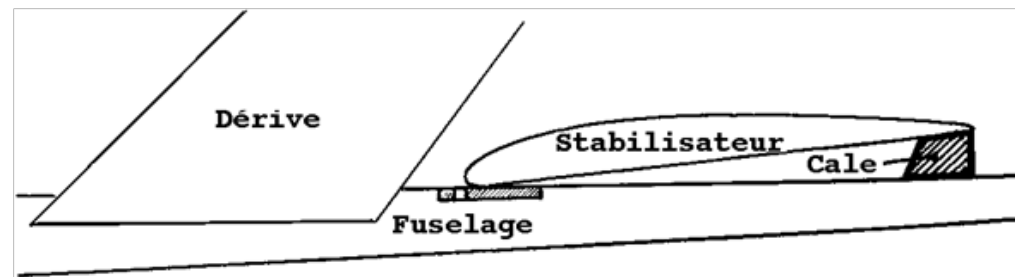
$$\theta = \text{Fonction} (v_{\text{long}})$$

Exemple:

- Lorsqu'on lance un planeur, il est facile de voir que la distance parcourue n'est pas forcément optimale.



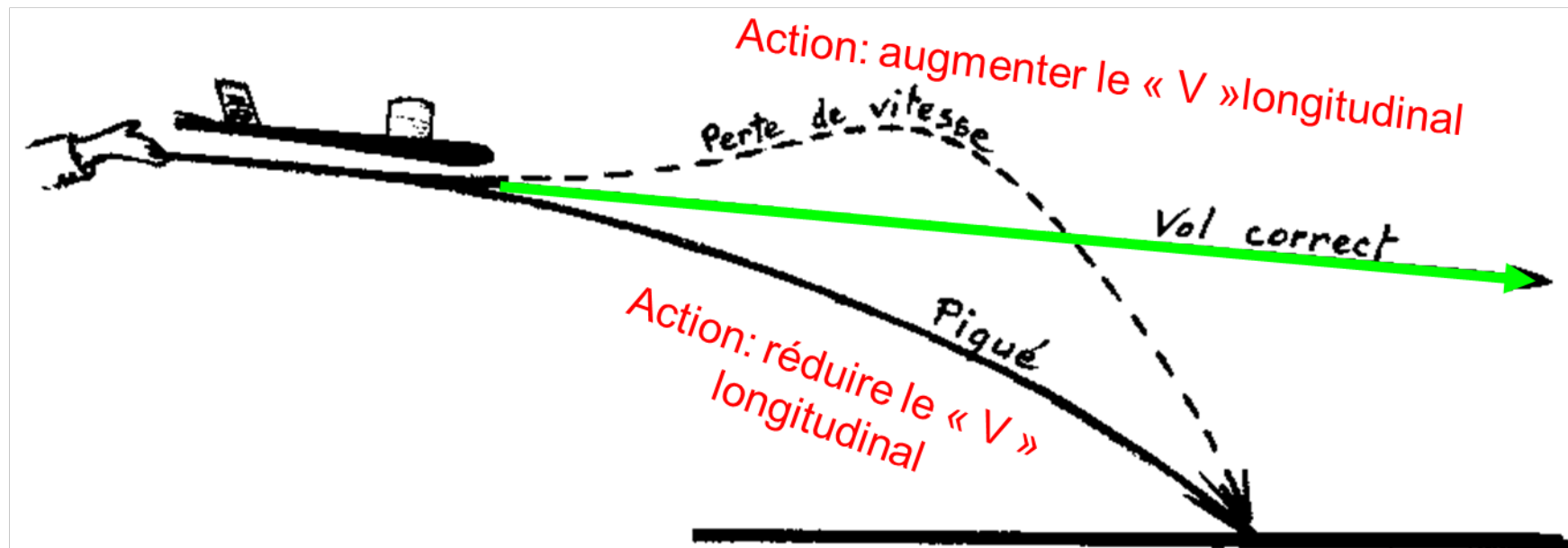
- Un réglage possible consiste à mettre une cale sous le BF du stabilisateur.



→ Cette action a réduit le $V_{\text{longitudinal}}$

Réglages

- Donc on trouve bien qu'une action sur le V_{long} permet de modifier l'angle d'attaque et donc elle permet de modifier la pente.

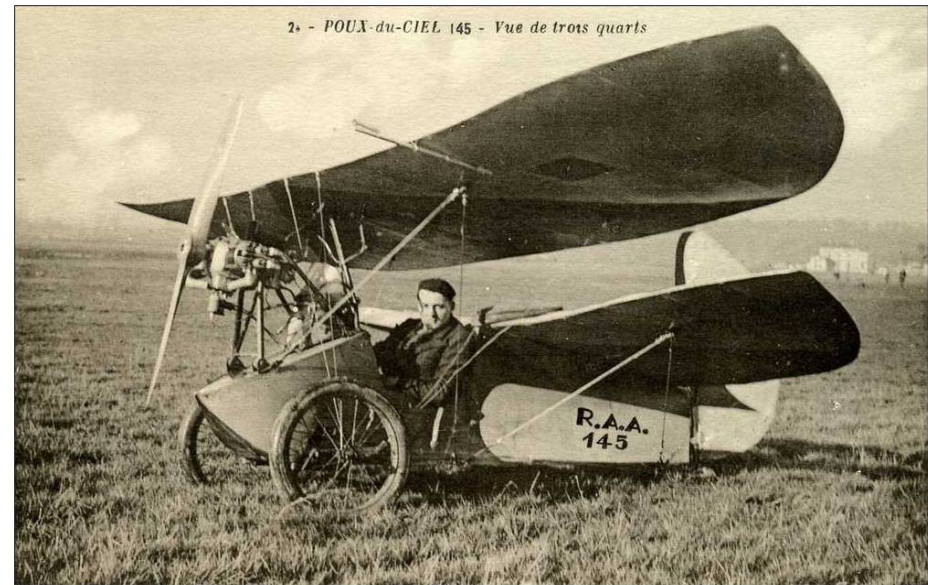
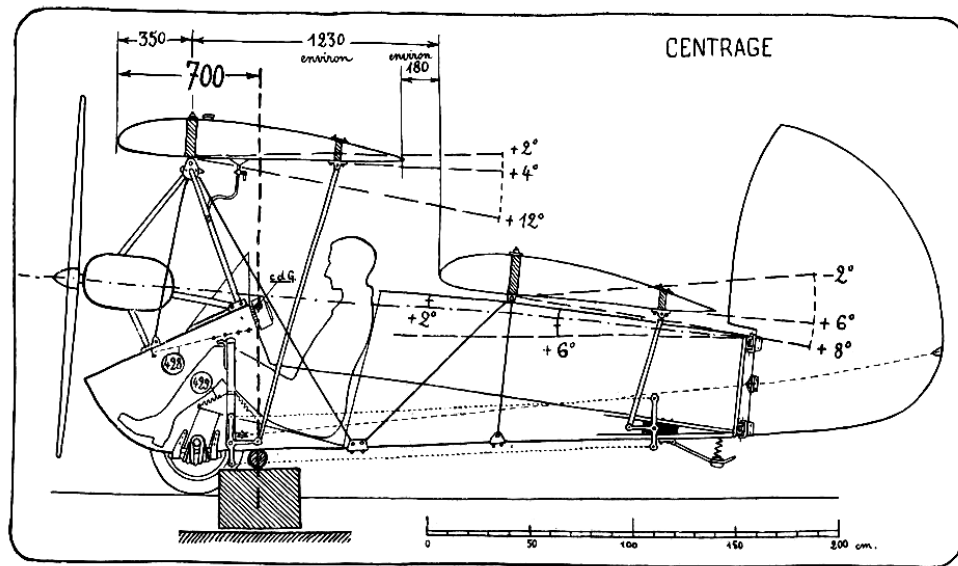


Réglage en vol

- Pour modifier le V_{long} en vol, il est possible d'opter à une de ces deux techniques:
 - Modifier le calage de l'aile (rare, mais ça existe),
 - Modifier l'incidence du stabilisateur: c'est la solution la plus classique. Elle se décline en 3 possibilités:
 - Stabulo pendulaire,
 - Trim de profondeur,
 - PHR (Plan Horizontal Réglable)

1- Modifier le calage de l'aile

- C'est rare, mais le poux du ciel est un avion des années 30 qui a la particularité d'avoir une « aile mobile ».
- On parle d'aile à incidence intégrale.
- Le concept est particulier, mais l'avion a fait ses preuves.
- C'est en agissant sur l'aile que le pilote modifie le V_{long} et donc son angle d'attaque / pente.

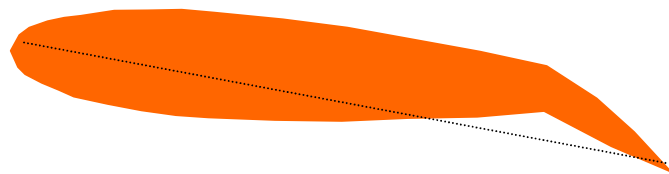


2-a Stabulo pendulaire

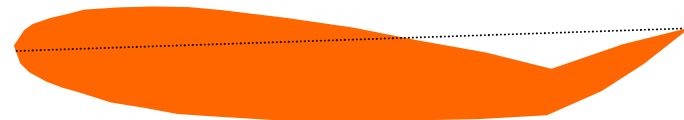
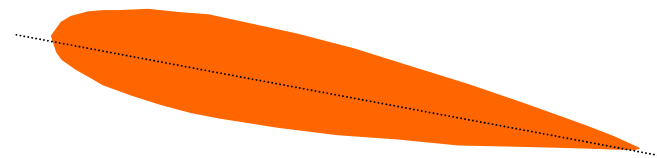
- Sur certains avion de tourisme ou des planeurs on opte pour un stabilisateur mobile.
- On parle d'un **stabilisateur pendulaire**.
- Le stabilisateur sert aussi comme commande de profondeur (on parle aussi de profondeur mono-bloque)

2-b Trim de profondeur

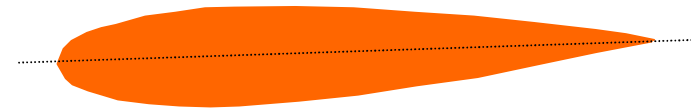
- Le stabilisateur pendulaire est techniquement difficile à mettre en place.
- On opte alors à l'utilisation d'une autre technique basée sur « la commande de profondeur »
- Cette gouverne a un mouvement très petit vers le haut ou vers le bas. Le résultat est équivalent à changement de calage du stabilo.
- Ce déplacement est « figé » temporairement → **on parle d'un trim de profondeur.**



Eq →



Eq →



Déplacement exagéré pour l'explication

2-c Plan Horizontal Réglable

- Sur un avion commercial, on a besoin toujours d'optimiser C_z et C_x -> le calage du stabilo est variable: on parle de PHR ou THS

Trimmable Horizontal Stabilizer



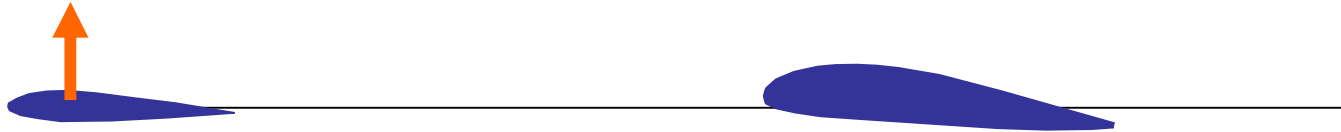
Sommaire


- **Introduction**
- **Equilibre des moments**
- **Equilibre des forces**
- **Réglages**

Annexes



Plan canard



- Le calcul reste valable avec $Bl < 0$ (c'est-à-dire un stabilisateur à l'avant de l'aile).
 - On parle d'un plan canard.
 - Le stabilo est porteur, ce qui est un avantage.
- 
- A photograph of a white and red canard aircraft in flight. The aircraft has a small leading wing and a larger trailing wing. The registration number G-WILY is visible on the tail. The aircraft is flying against a clear blue sky.
- Mais aérodynamiquement, l'aile se trouve dans le sillage du stabilo ce qui diminue ses performances.

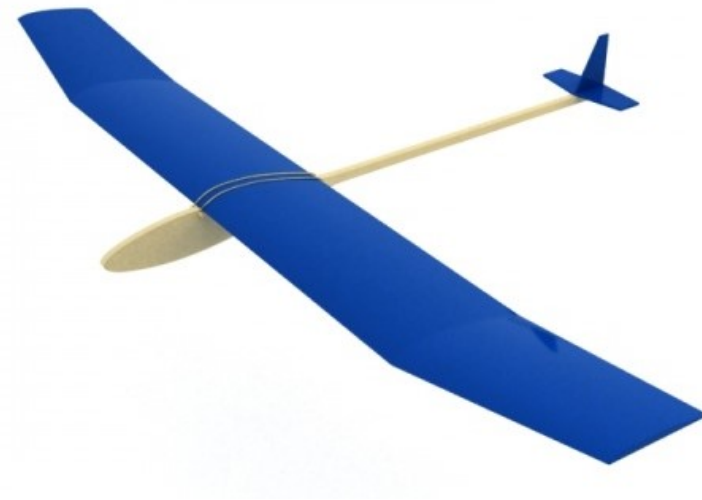
Trainée de la finesse max

- Le traînée du planeur s'écrit:

$$\text{Trainée} = \text{Traînée induite} + \text{Traînée parasite}^*$$

$$\text{Traînée parasite} = \text{Trainée (aile, fuselage, stab)} + \text{Traînée d'interférence}$$

- Le traînée parasite est fonction de $C_x(\alpha)$ et V^2 .
- Le traînée induite est fonction de $C_z^2 V^2$. En vol en palier et à l'équilibre (Poids=Portance), C_z^2 est proportionnel à $1/V^4$.
- Le **traînée induite** est fonction de $1/V^2$.

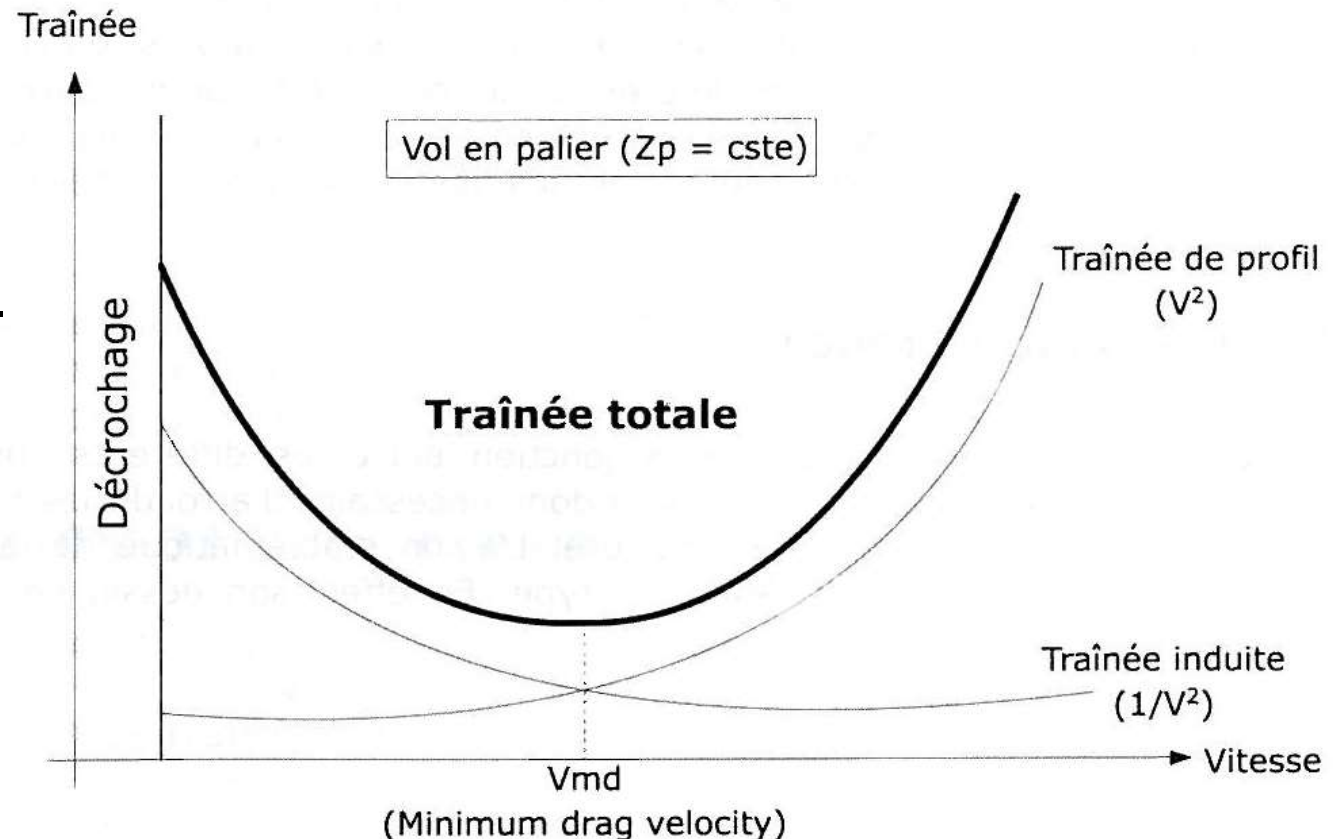


* On parle de traînée de profil aussi

Trainée de la finesse max

- Si on trace les deux traînées en fonction de la vitesse, on trouve:

- La traînée de profil augmente avec V^2 .
- La traînée induite évolue comme $1/V^2$.
- La traînée est minimum pour une vitesse donnée.
- À cette vitesse les deux traînées sont égales*.



(*) c'est un modèle qui suppose que C_x est presque constant en fonction de l'angle d'attaque α

Finesse max:

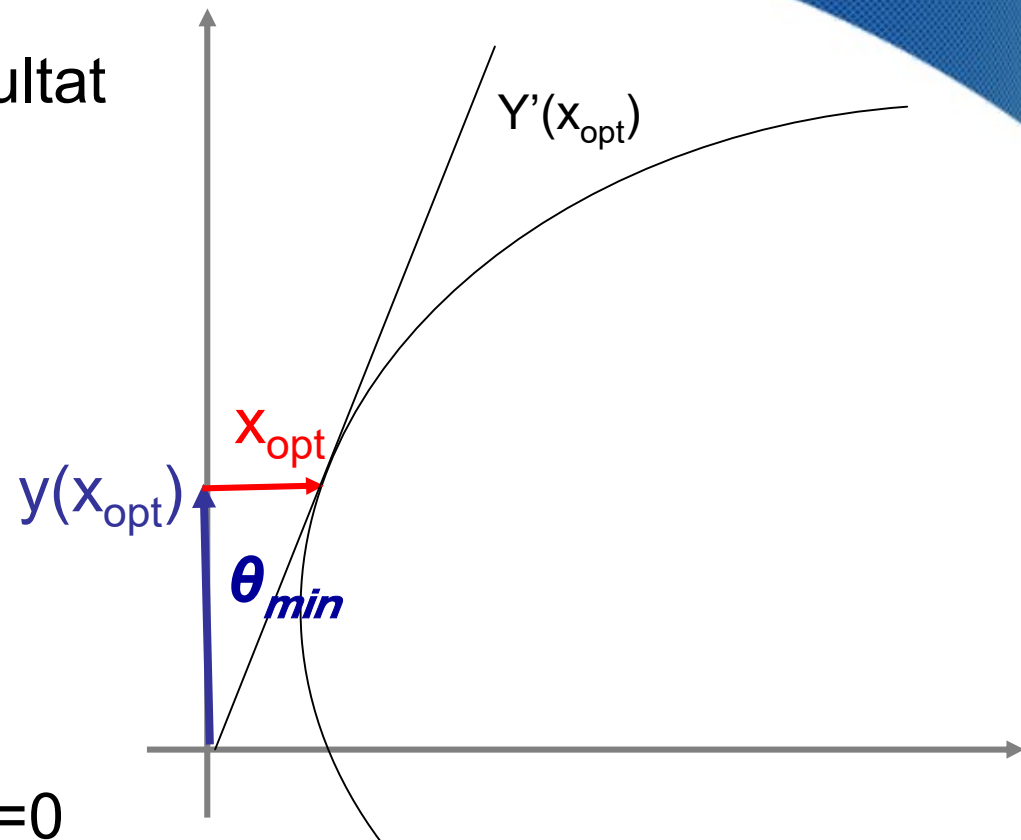
- On peut démontrer le résultat mathématiquement.
- On pose

$$Cz = y(x)$$

$$Cx = x$$

$$F(x) = y(x)/x$$

L'optimum pour $F(x)$ est obtenu pour $dF/dx=0$.
 Ceci donne $dF/dx = y'x - y/x^2 = 0$
 avec $y' = dy/dx$
 Ceci est obtenu pour x_{opt} qui satisfait: $y(x_{opt}) = y' * x_{opt}$

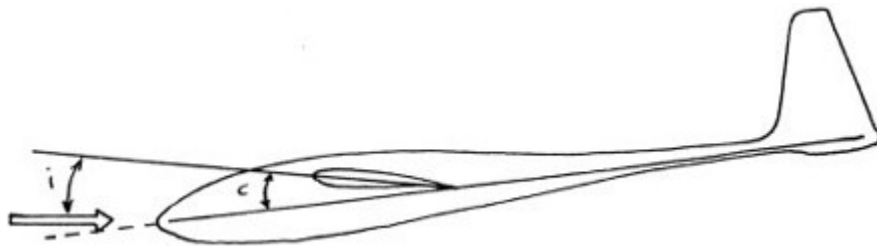


Le x_{opt} ne peut être que celui qui donne une tangente y' qui passe par l'origine.

Importance Calage Aile

- A noter qu'en fonction du calage de l'aile on peut avoir les deux situations extrêmes suivantes:

Si le calage est fort,
*pour que l'angle d'incidence soit respecté,
il faut que le planeur vole "queue haute".*



Si le calage est faible,
*pour que l'angle d'incidence soit respecté,
il faut que le planeur vole "queue basse".*

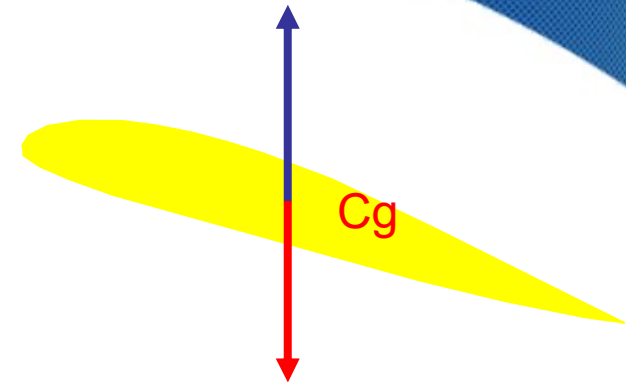


Dans ces deux cas, **la traînée de fuselage n'est pas optimum.**

Un calage optimal de l'aile doit correspondre à un fuselage horizontal (mini traînée).

Centre de poussée / C_g

- Il est vrai que si on place le C_g au niveau du C_p , on aura une aile parfaitement en équilibre.
- Mais, si α augmente légèrement, le C_p avance (profil dissymétrique), le moment devient positif \rightarrow équilibre instable.
- Mais, pour faire intelligent, on peut repérer le C_p du vol de croisière.
- On y place le C_g à ce niveau, le stabilo ne participe pas à l'équilibre \rightarrow traîner faible.



Un centrage au niveau du C_p du vol de croisière est le plus judicieux!