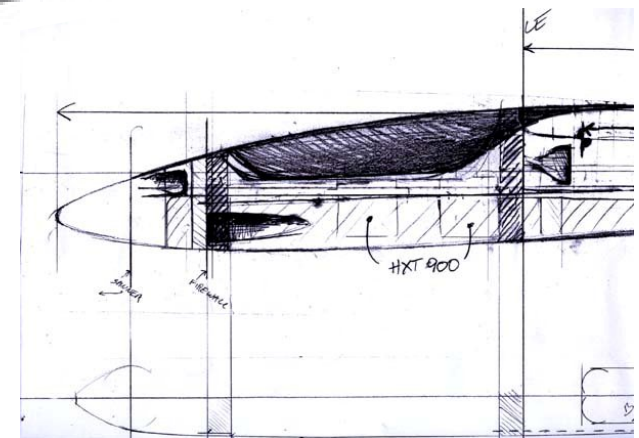




NOTIONS AERONAUTIQUES

CH 4 : L'aile 3D



V05
28/01/2015

Sommaire

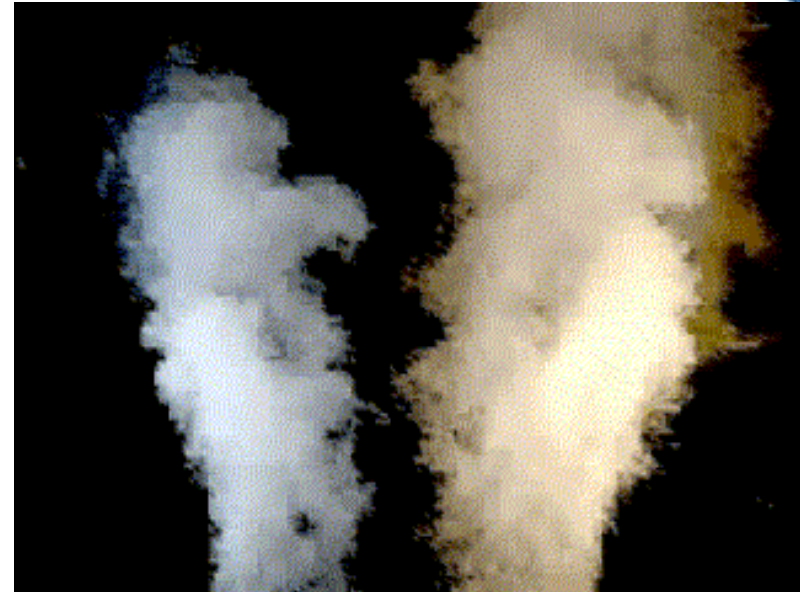


Introduction

- Aspect qualitative
- Ligne Portante de Prandtl
- Portance Elliptique
- Coefficients 3D
- Annexes

Introduction

- Lorsqu'on passe à une étude 3D, un nouveau phénomène prend naissance: la traînée induite.
- Cette dernière se manifeste visuellement sous forme de « vortex / tourbillon » en bout d'aile.



- On se propose de comprendre (sans rentrer dans les détails) la notion de la traînée induite.
- Puis on se propose de voir les différents types de voilure possibles en fonction des caractéristiques recherchés

Vocabulaire

Nervure du sauman

Bord de fuite

Lisses

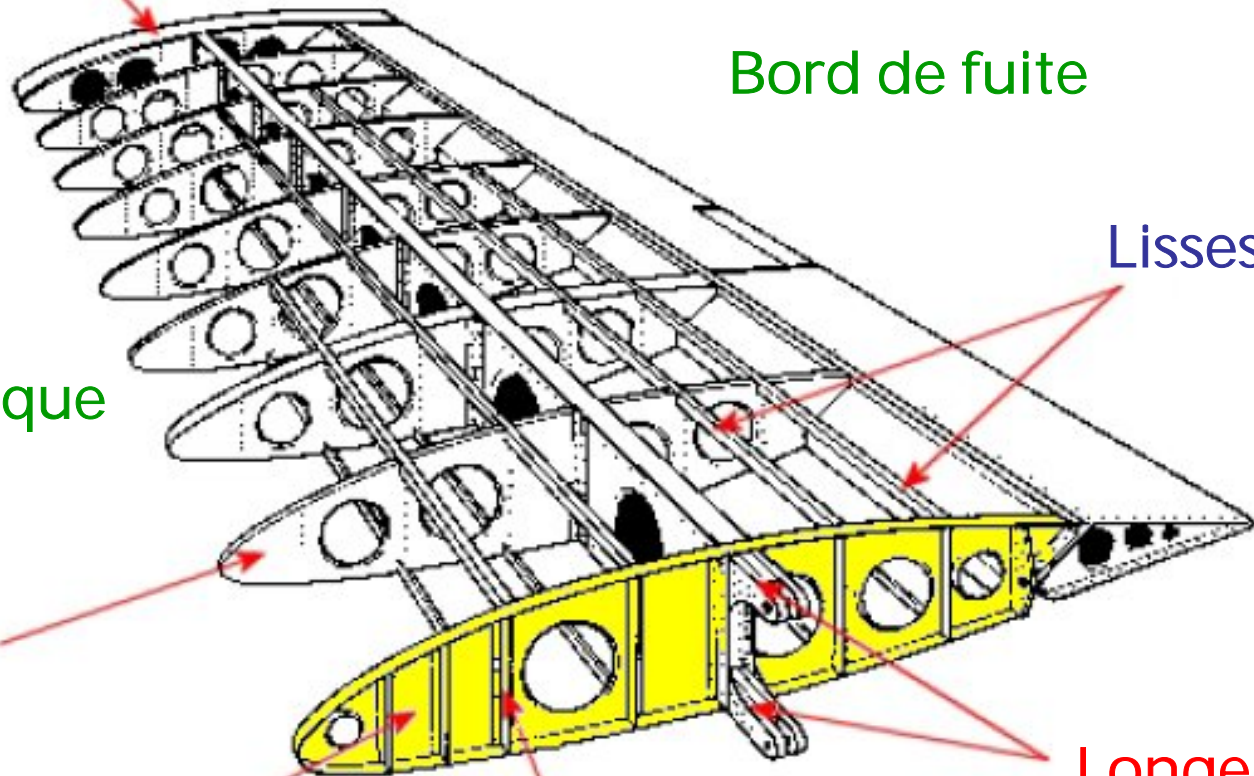
Bord d'attaque

Nervure

Longerons

Nervure
d'emplanture

Raidisseur vertical



Sommaire

- Introduction

Aspect qualitatif

- Ligne Portante de Prandtl
- Portance Elliptique
- Coefficients 3D
- Annexes

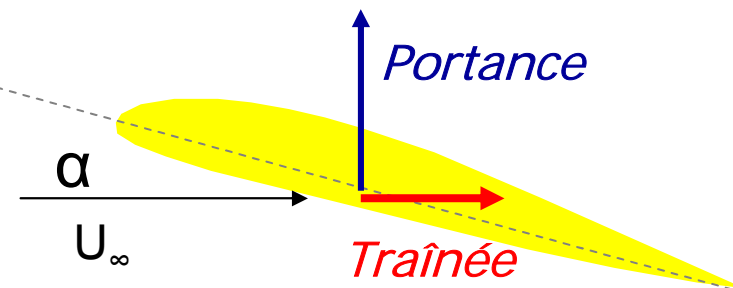
Trainée induite

- *Qualitativement*, on sait qu'on a une surpression sur l'intrados et une dépression sur l'extrados.

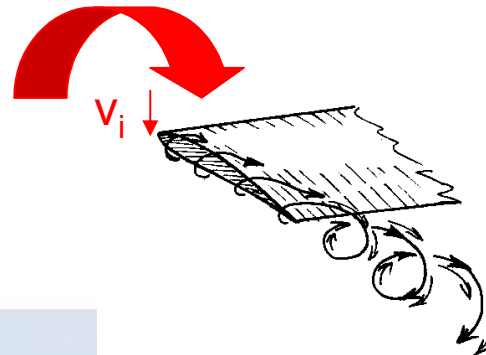


- On a une sorte de mouvement « induit » par cette différence de pression.

- Initialement l'écoulement forme un angle α avec le profil.



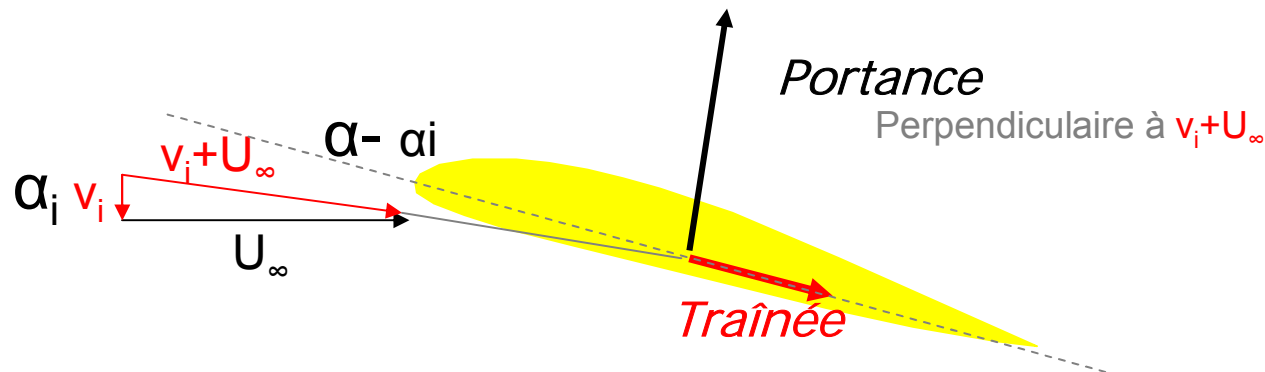
- La différence de pression modifie l'écoulement : elle *induit une vitesse verticale* vers le bas:



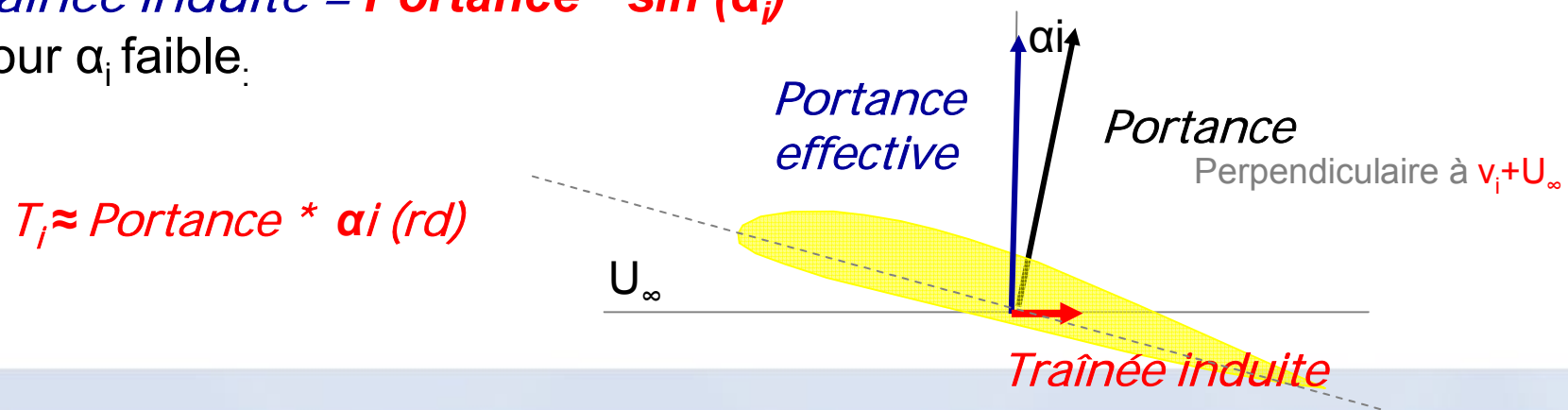
On parle de *downwash*

Trainée induite

- L'écoulement a maintenant un angle $\alpha - \alpha_i$.
- La portance est perpendiculaire à cet écoulement.



- Mais notre étude reste toujours par rapport à l'écoulement amont U_∞ .
- Donc, une partie de la portance s'ajoute maintenant à la trainée: *c'est la trainée induite* = **Portance * $\sin(\alpha_i)$**
- Pour α_i faible.



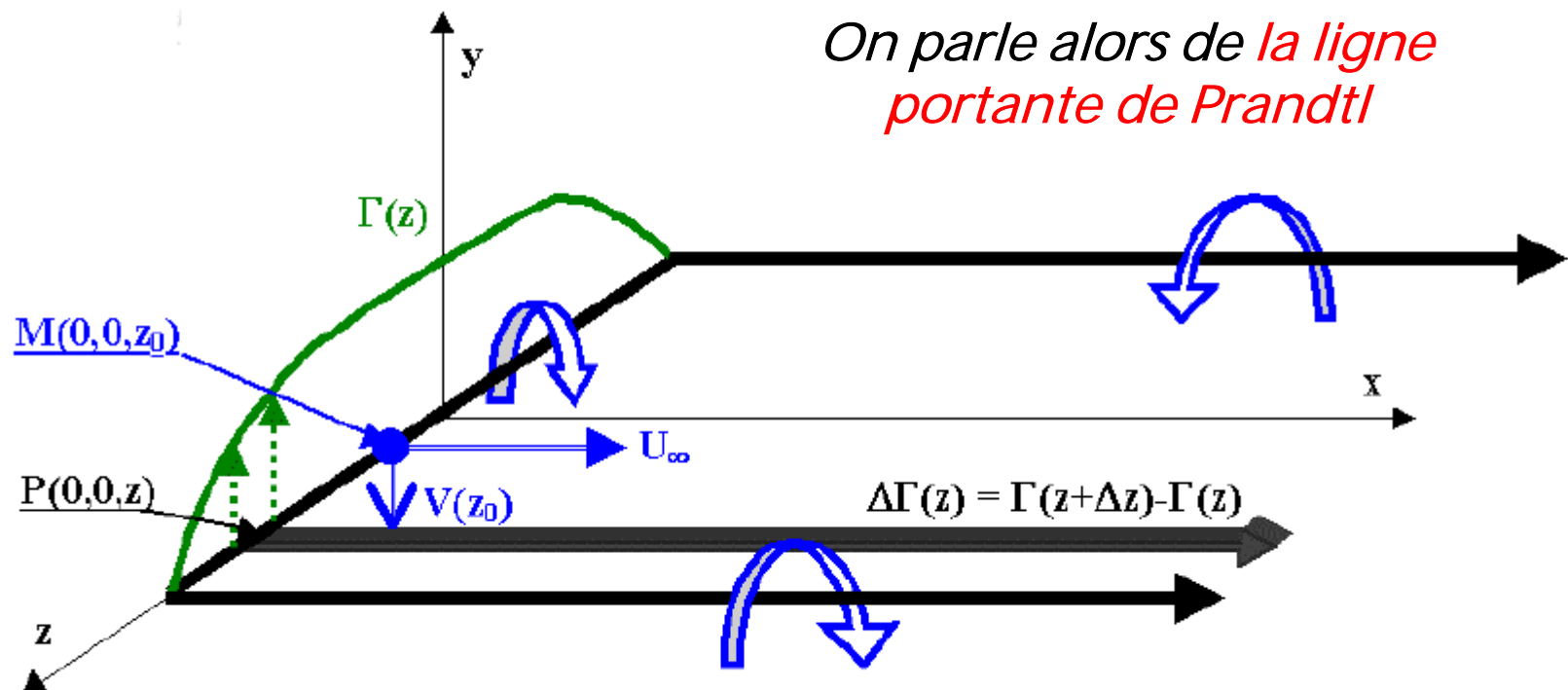
Sommaire

- Introduction
- Aspect qualitatif
- Ligne Portante de Prandtl
- Portance Elliptique
- Coefficients 3D
- Annexes



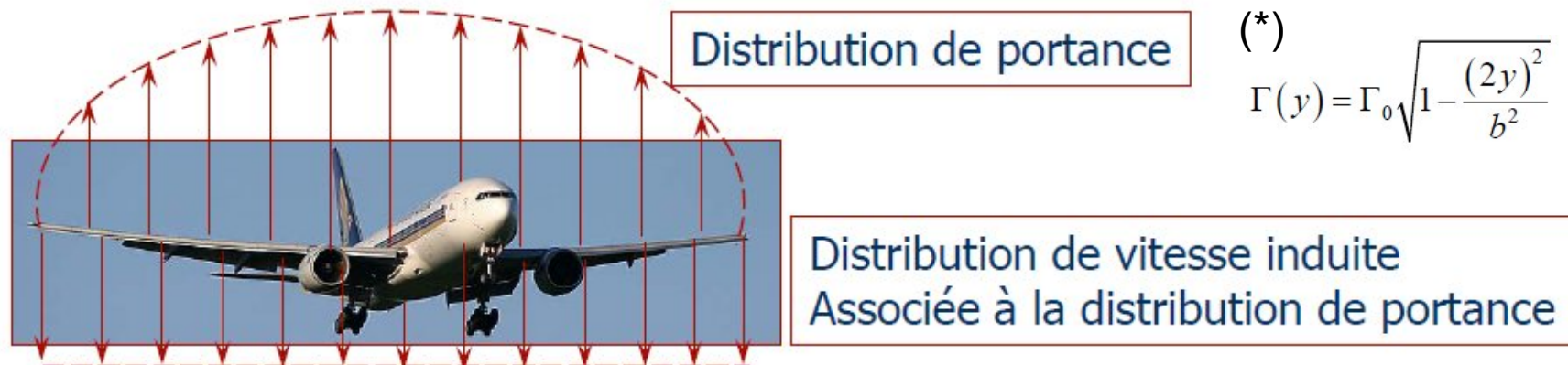
TH. LIGNE PORTANTE DE PRANDTL

- Ça sera prétentieux d'expliquer la théorie de Prandtl mais il s'agit juste de comprendre la philosophie.
- Prandtl a eu le génie d'étendre la notion de la circulation à une aile 3D.
- Chaque élément de l'aile est le siège d'une circulation et génère un tourbillon (trainée induite)



Portance Elliptique

- Cette théorie permet d'évaluer la traînée induite et l'optimiser.
- On démontre moyennant quelques pages de calculs que *la répartition elliptique* donne la traînée induite la plus faible.



- Le coefficient de traînée induite est égale à:
- Il dépend bien du C_z (traînée induite par la portance).
- Il dépend aussi de l'allongement (Aspect Ratio)

$$C_{xi} = \frac{C_z^2}{e\pi\lambda}$$

C_z en 3D

e : égale au mieux à 1 (répartition elliptique): coefficient d'Oswald.

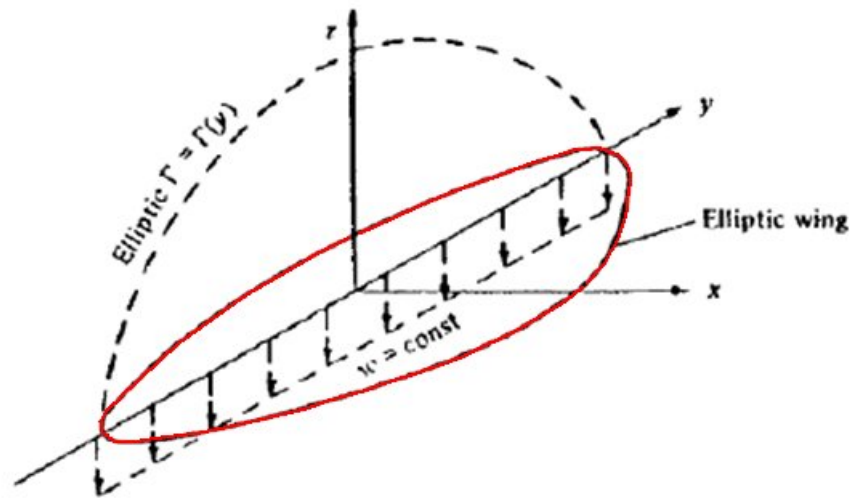
$$\lambda = \frac{E^2(\text{envergure de l'aile})}{\text{Surface de l'Aile}}$$

(*) Leçon 4: Ailes d'envergure finie, Master MFE 2012/2013

Portance Elliptique

- Le Spitfire est l'application directe de la ligne de Prandtl

$$(*) \quad \alpha_i = 57,3 \frac{C_z}{\pi \cdot \lambda} \quad (\text{en degrés})$$



aile elliptique -> portance elliptique

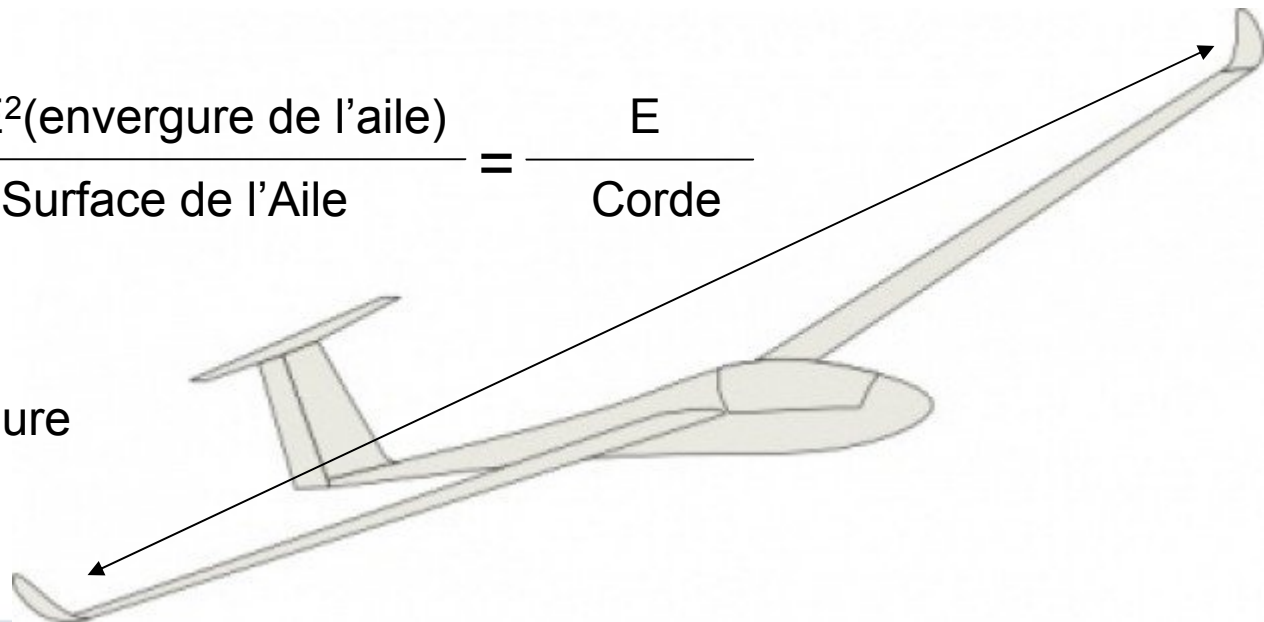
(*) Document de Gougnot

L'allongement λ

- L'allongement d'une aile est une caractéristique géométrique cruciale.
- On a vu que la trainée induite diminue si λ et inversement.
- Or l'allongement (pour une aile presque rectangulaire) est égale à:

$$\lambda_{\text{(allongement)}} = \frac{E^2(\text{envergure de l'aile})}{\text{Surface de l'Aile}} = \frac{E}{\text{Corde}}$$

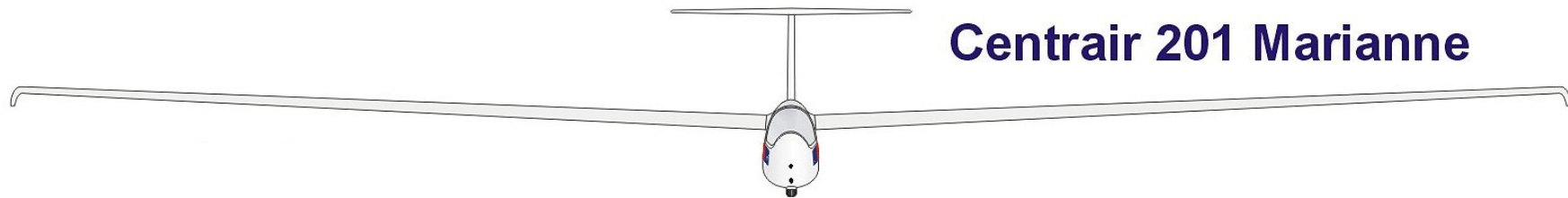
Envergure



Cas du planeur

- Pour un planeur, la traînée est l'ennemie numéro 1.
- Alors pour réduire la traînée, en particulier la traînée induite, on joue sur l'allongement:
- On comprend pourquoi l'envergure des planeurs est très importante par rapport à la corde.

Envergure ↗ → Allongement ↗ → Trainée induite ↘



- Sur un avion, cette solution n'est pas pratique car l'inertie de roulis est importante et on est limité en vitesse sous peine de casser la voilure.

Sommaire

- Introduction
- Aspect qualitatif
- Ligne Portante de Prandtl



- Portance Elliptique
- Coefficients 3D
- Annexe

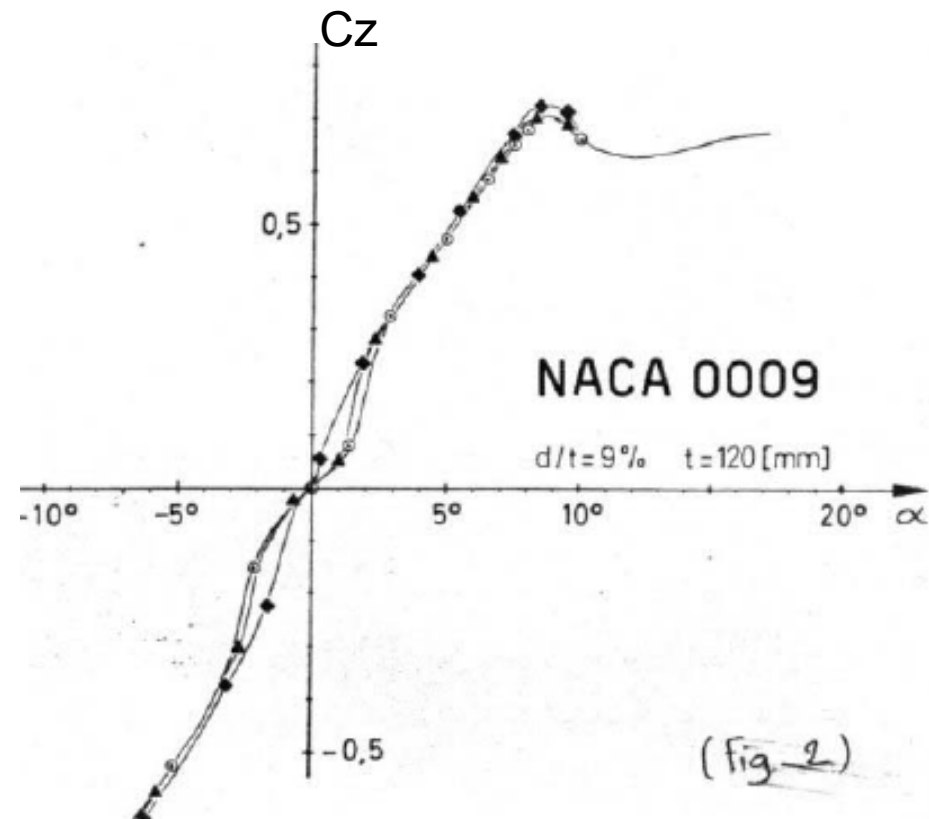
Portance elliptique

- Donc une portance elliptique permet de minimiser l'effet néfaste de la trainée induite.
- Pour avoir une telle répartition on dispose de trois techniques (utilisables séparément ou par combinaison)
 1. Construire une aile elliptique ou aile en trapèze
 2. Vriller l'aile
 3. Faire évoluer le profil,

1a - Aile elliptique ou presque

$$\text{Portance} = 0,5 \cdot \rho \cdot C_z \cdot S \cdot V^2$$

- On peut obtenir une portance elliptique, si S est une ellipse (et C_z constante).
- Le C_z est fonction de Re et donc de la corde.
- Il nous faut un profil qui a un C_z relativement indépendant du Re .
- Le NACA0009 est un bon exemple.
- **Attention**, l'aile elliptique perd son efficacité si le C_z varie sur l'aile (en fonction du Re et donc de la corde)



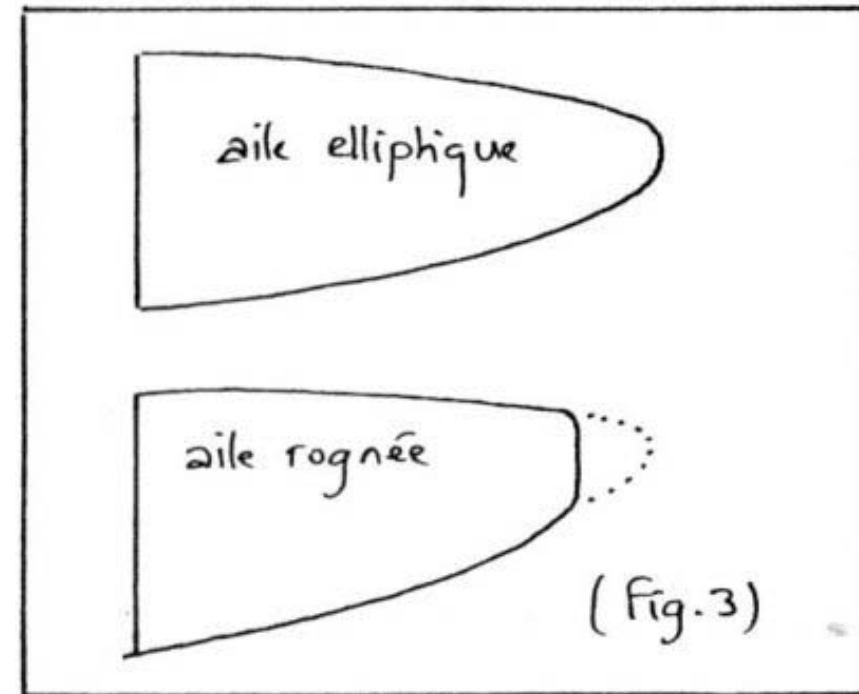
(*) R Gougnot 2002

Remarques

- Commentaire R Gougnot(*) un spécialiste du sujet au sujet de l'aile elliptique:

Ceci a été réalisé sur des avions comme le Spitfire ou le Heinkel 111, où les ailes étaient des ellipses parfaites, et sur lesquels même les empennages adoptaient cette forme.

Cependant, des ailes de cette forme posent des problèmes aux basses vitesses à cause des faibles cordes de leurs bords marginaux, ce qui les rendait vicieux au décrochage. Pour cette raison, les Spitfire eurent les ailes rognées (cf Fig.3) pour le vol à basse vitesses (appui au sol) mais perdirent de leur finesse donc de leur vitesse en vol rapide...

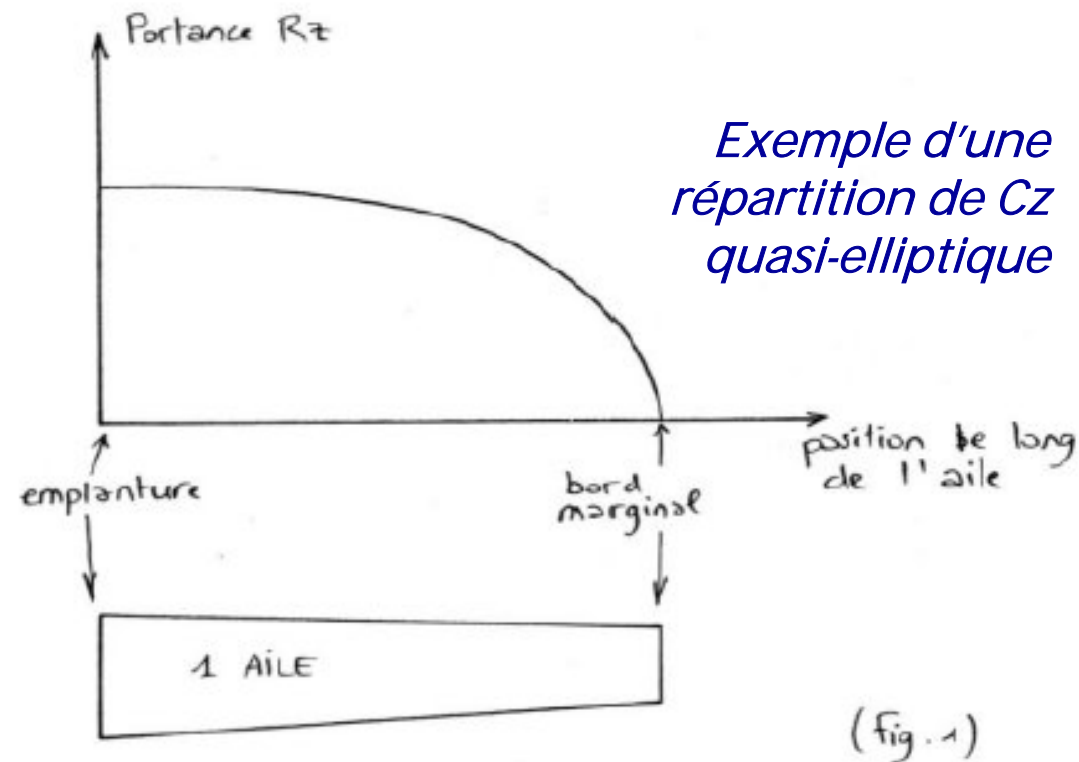


Pour finir l'aile elliptique bien qu'intéressante, elle est difficile à fabriquer (en particulier en modélisme). On cherche alors à l'approcher par une aile en trapèze.

(*) <http://www.chez.com/aerodynamique>

1b - Aile trapèze

- On cherche à approcher une répartition elliptique de la portance, mais avec une aile moins difficile à fabriquer.
- On peut utiliser des ailes en trapèze, sachant que le *Re varie* en fonction de la corde \rightarrow le *Cz varie de façon presque elliptique*.



1b - Aile trapèze

- Exemples:

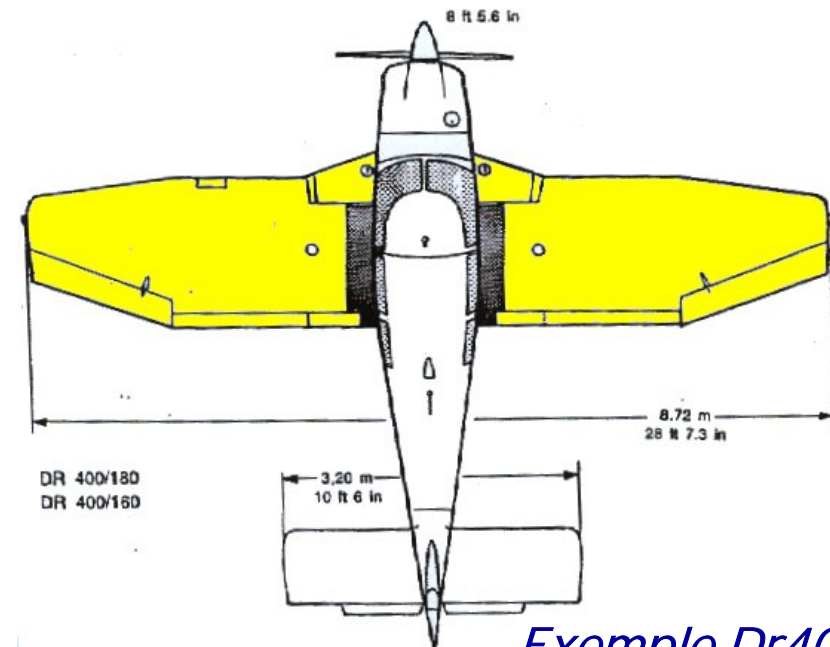
Trapézoïdales

Trapézoïdales

Trapèze à l'extrémité

Trapèze à l'extrémité

Double Trapèze



Exemple Dr400

1b - Aile trapèze

- Pour obtenir une aile trapézoïdale on recourt à la notion suivante:

Effilement

- Il n'y a pas une définition claire de l'effilement. Mais voici les conditions que **je considère(*)** nécessaire est suffisante pour avoir un effilement pure (sans flèche):
 1. Les nervures sont parallèles au fuselage.
 2. Les nervures ont une taille décroissante vers l'extrémité.
- La condition 1 n'est souvent pas respectée, c'est pourquoi on doit introduire la notion de flèche.



(*) ça n'engage que l'auteur!

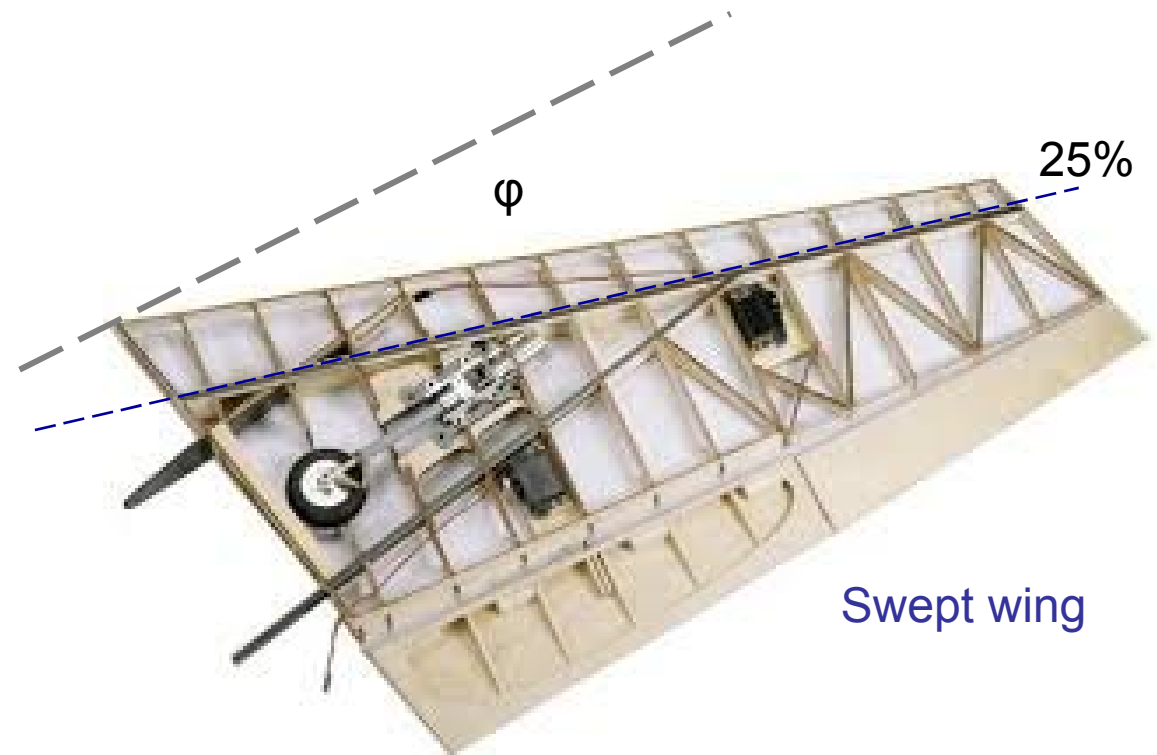
1b - Aile trapèze

La Flèche

- Les nervures qui forment le profil de l'aile sont disposées d'une façon inclinée.

Dans cet exemple, les nervures ont une taille décroissante et inclinées -> on a **un effilement** et **une flèche**.

Une aile en flèche pure est une aile rectangulaire qu'on incline vers l'arrière.



1b - Aile trapèze

- La technique de faire une aile en trapèze est très intéressante car elle est facile à mettre en œuvre.
- Elle donne un bon résultat: un effilement de 65% (nervure du sauman = 1/3 de la nervure à l'implanture) permet de conserver 90% de la portance.
- Il y a des 10% de portance qui sont perdus sous forme de traînée.
- On peut dire que 10% de la surface de l'aile ne contribue pas à la portance mais continue à générer de la traînée.

effilement	0 %	20 %	33 %	50 %	65 %
kd	0,86	0,9	0,91	0,92	0,9

(*)

Tableau 1 : portance relative en fonction de l'effilement d'une aile

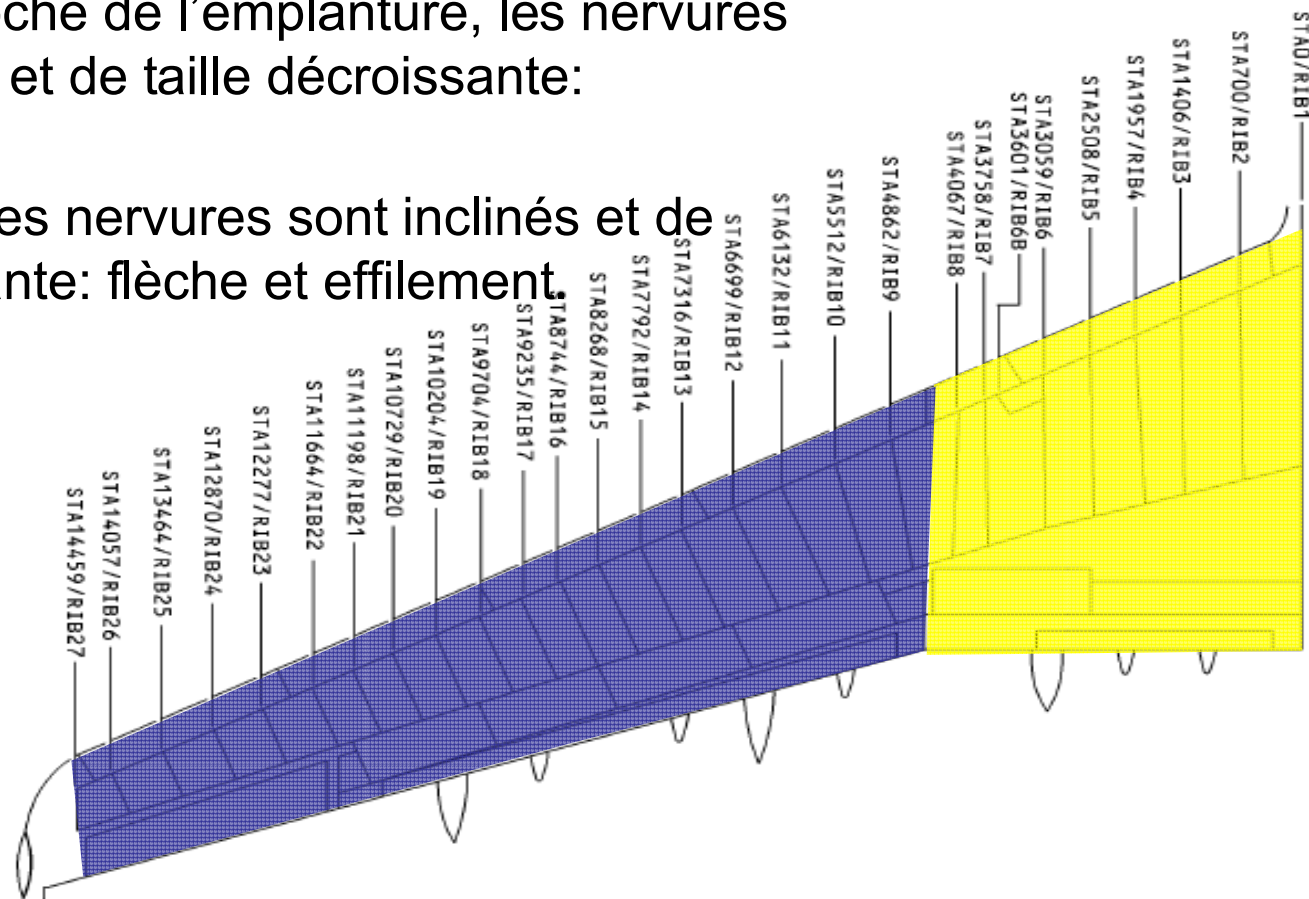
Kd est noté *Coefficient de Portance*

$$K_D = \frac{\text{Portance 3D}}{\text{Portance 2D}}$$

(*) Philippe Kauffmann , Calculer_Son_Modele_Reducit

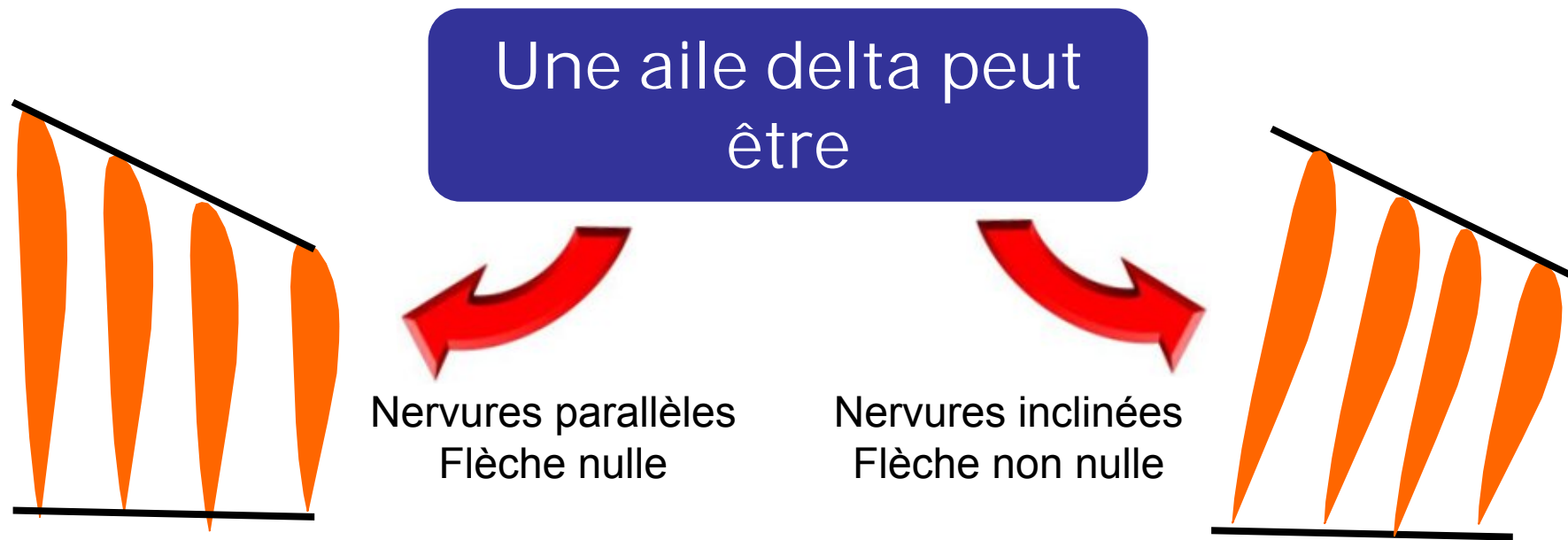
Rq: Effilement & Flèche

- Il est intéressant de voir cette voilure A320 qui combine les deux notions:
 - Sure partie proche de l'emplanture, les nervures sont parallèles et de taille décroissante: effilement.
 - Sure le reste, les nervures sont inclinés et de taille décroissante: flèche et effilement.



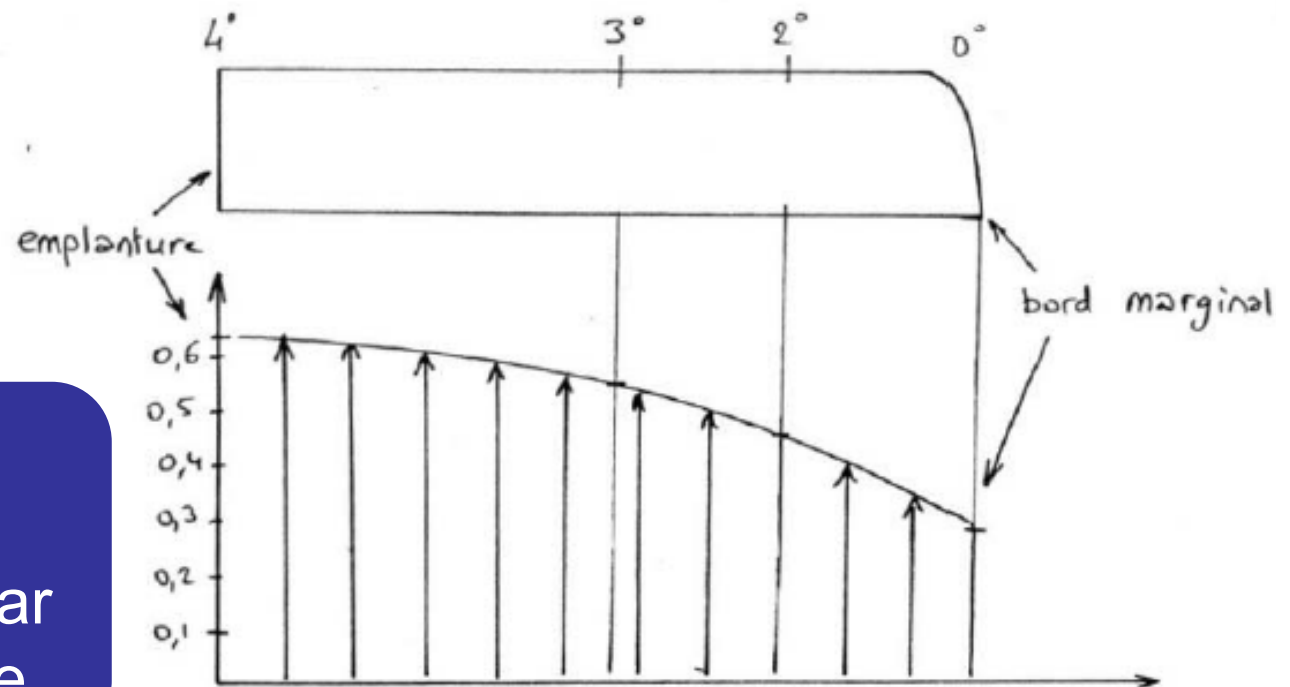
Rq: Effilement & Flèche

- Dans la littérature qu'on peut trouver sur le sujet, on a tendance de parler de flèche chaque fois qu'on a une aile « inclinée ».
- Je ne partage pas cet opinion. On peut deviner l'effilement par la forme de l'aile: **taille** nervure emplanture / saumon.
- Mais pour deviner si on a une aile en flèche ou pas il faut voir la disposition des nervures (ce qui n'est pas évident).



2. Vrillage de l'aile

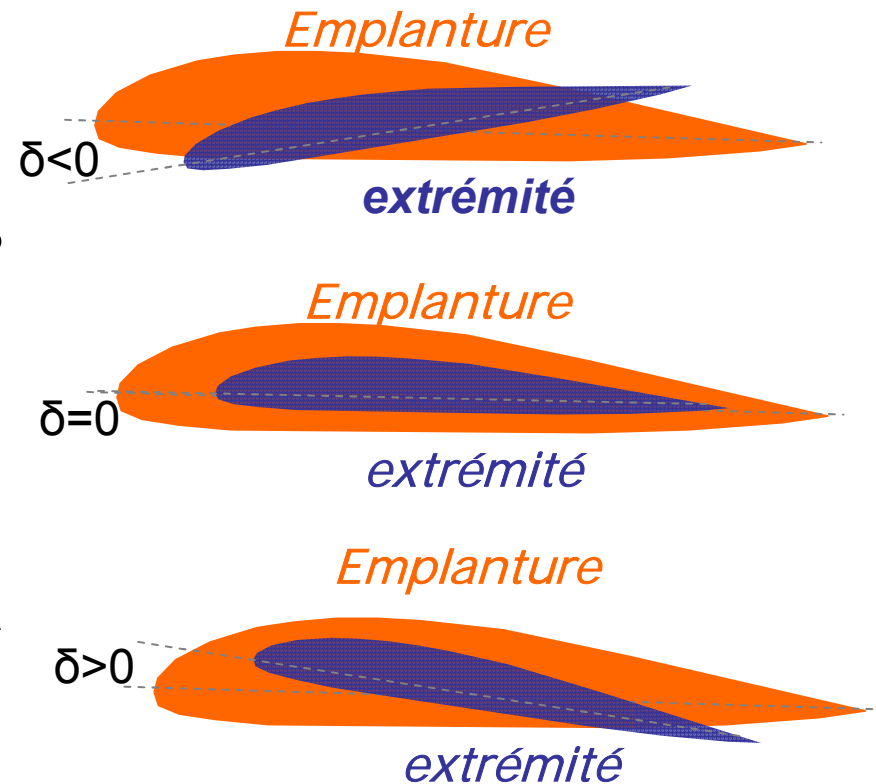
- Vriller l'aile consiste à lui donner un angle variable depuis l'emplanture et jusqu'à l'extrémité.
- Si l'angle est variable, alors le C_z varie également et donc la portance



En voici un exemple d'une aile vrille. L'extrémité est à -4° par rapport à l'emplanture.

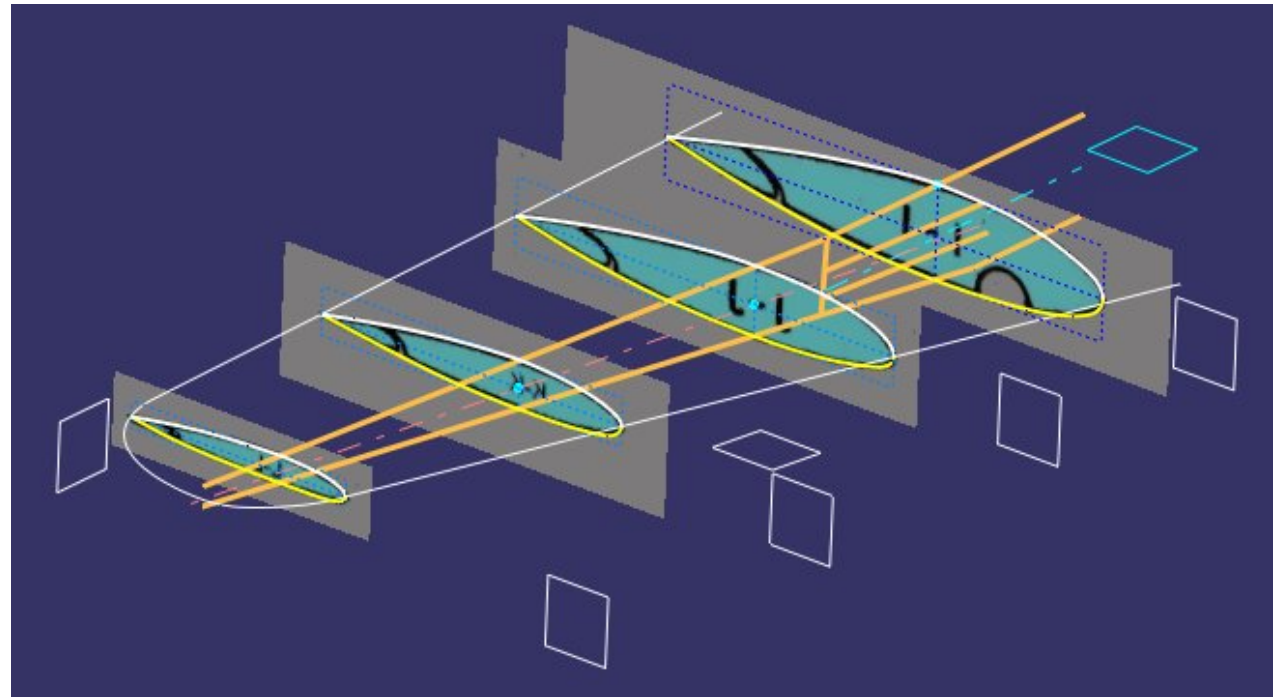
2. Vrillage de l'aile

- Le vrillage est négatif si la nervure de l'extrémité (saumon) est inclinée vers le bas (par rapport à la nervure de l'emplanture).
- Cette technique est relativement compliquée à mettre en place.



3. Profil variable

- On parle d'une aile évolutive.
- Le profil est variable de l'emplanture à l'extrémité, et donc le C_z (par exemple du NACA0022 à l'emplanture et NACA0009 au niveau du saumon).
- La difficulté est liée à la construction d'une telle aile.
- Il faut s'assurer de la bonne jonction entre les profils (exclure un profil creux entre deux profils biconvexes).



Sommaire

- Introduction
- Aspect qualitatif
- Ligne Portante de Prandtl
- Portance Elliptique
- Coefficients 3D
- Annexes



Portance d'une aile 3D

- Une aile 3D a une portance inférieure à celle calculée en 2D.

Profil 2D : $C_z = a_{2D} \cdot \alpha \text{ (rd)} + C_{ste}$

- Pour une aile elliptique, on a (*) :

Aile 3D : $C_z = a_{3D} \cdot \alpha \text{ (rd)} + C_{ste}$

$$a_{3D} = \frac{a_{2D}}{1 + a_{2D} / \pi \lambda}$$

- On trouve pour $a_{2D} = 2\pi$:

$$a_{3D} = \frac{\lambda}{\lambda + 2} a_{2D}$$

(*) Il suffit d'écrire $C_z = a_{2D}(\alpha - \alpha_i) + c_{ste} = a_{2D}(\alpha - C_z / \pi \lambda) + c_{ste}$

Portance d'une aile 3D

- Pour une aile quelconques, on fait une approximation:

Allongement $\lambda > 4$

$$a_{3D} = \frac{a_{2D}}{1 + a_{2D} / e\pi\lambda}$$

e: égale au mieux à 1
(répartition elliptique):
coefficient d'Oswald.

Allongement $\lambda < 4$

$$a_{3D} = \frac{a_{2D}}{\sqrt{(1 + (a_{2D} / \pi\lambda)^2) + a_{2D} / \pi\lambda}}$$

Coefficient de pente
pour des angles en rd



Ces formules peuvent être utiles lorsqu'il s'agit de faire un calcul analytique pour dimensionner un avion de modèle réduit.

Portance d'une aile 3D

- Si on travail avec des angle en deg (le plus commode), on a:

Allongement $\lambda > 4$

$$a_{3D} = \frac{a_{2D}}{1 + 18.26 * a_{2D} / e\lambda}$$

$a_{2D} \approx 0.11$
 $18.26 = 180/\pi^2$

Allongement $\lambda < 4$

$$a_{3D} = \text{Faire le calcul en rd puis revenir en deg}$$

L'équation linéarisée de $C_z(\alpha)$ est facile, car le C_z en 3D est nulle pour le même angle d'attaque que pour le 2D.

$$C_{z_{2D}} = a_{2D} (\alpha - \alpha_0)$$

$$C_{z_{2D}} = a_{3D} (\alpha - \alpha_0)$$

Traînée d'une aile 3D

- Donc, avec la notion de traînée induite, on déduit que la traînée globale est de la forme (régime subsonique):

Trainée = Traînée_(pression & frottement) + Trainée_{induite}

$$C_{x\text{tot}} = C_x + \frac{C_z^2}{e \cdot \pi \lambda} \quad C_z \text{ en 3D}$$

e: un facteur qui est égale au mieux à 1 (répartition elliptique). On parle de *coefficient d'Oswald*.

Seule une approche expérimentale peut confirmer la valeur de e.

Mais, c'est très courant de considérer que

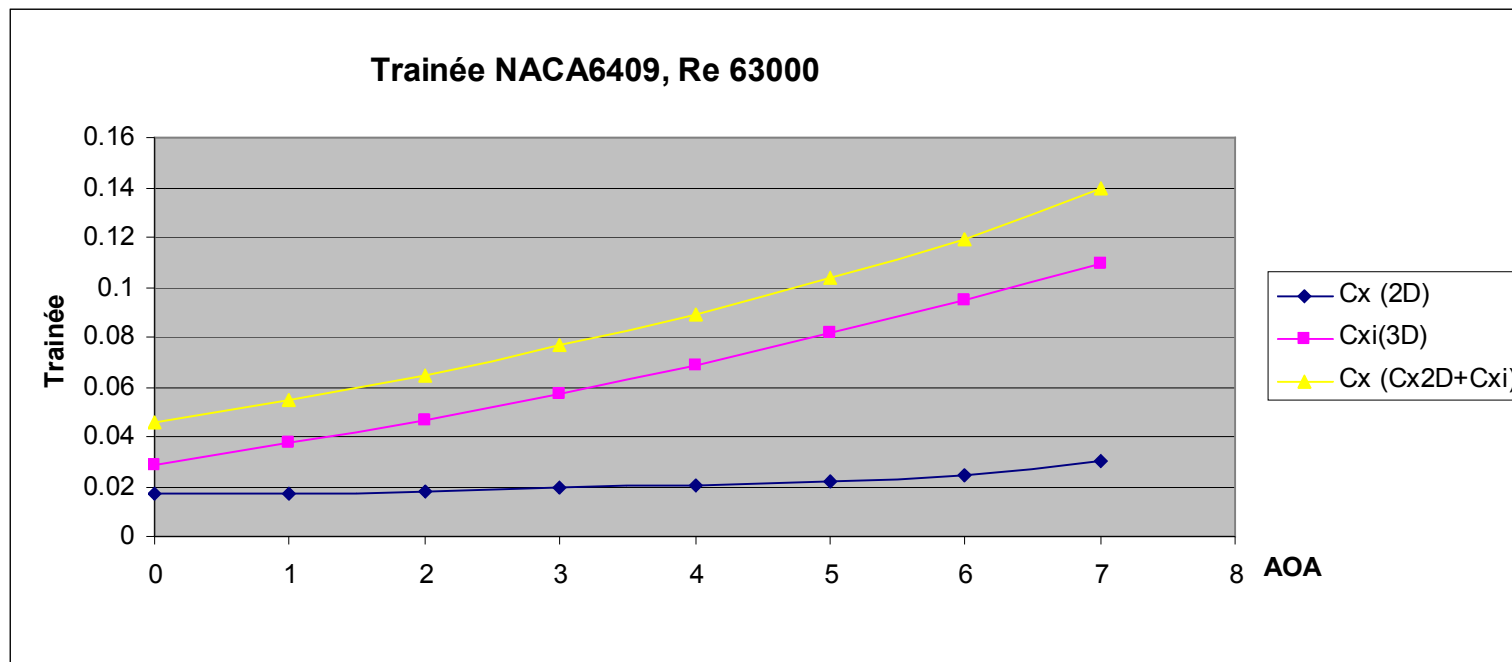
$$e = C_z(3D) / C_z(2D)$$

Traînée d'une aile 3D

- Dans la pratique, une aile avec effilement nul a un K_d de 0.86. On considère que c'est notre coefficient d'Oswald.
- Avec JavaFoil on calcule C_z et C_x pour un angle allant de $1 \rightarrow 7^\circ$.
- On en déduit C_{xi} et C_{xtot}

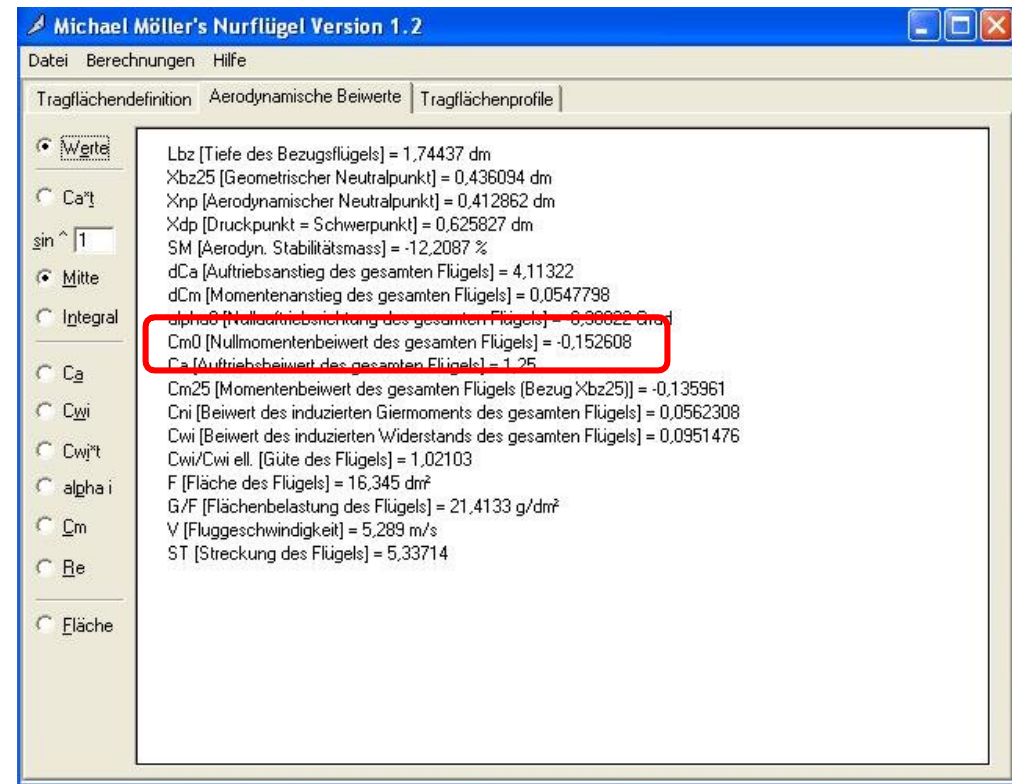
effilement	0 %	20 %	33 %	50 %	65 %
kd	0.86	0.9	0.91	0.92	0.9

Tableau 1 : portance relative en fonction de l'effilement d'une aile



Cm0 d'une aile 3D

- La diminution de la portance laisse a pensé que le moment diminuera aussi.
- Mais estimer cette diminution reste un exercice difficile.
- Alors en l'absence, au moment de la rédaction de ces ligne, d'un document ou une formulation acceptable, on recommande aux lecteurs d'utiliser un logiciel (comme Nurflug).



Sommaire

- Introduction
- Aspect qualitatif
- Ligne Portante de Prandtl
- Portance Elliptique
- Coefficients 3D



Annexes

Pour Info

- C'est l'angle du downwash derrière une aile elliptique:

$$\text{Angle}_{\text{de déflexion}} = -2 \frac{C_z}{\pi\lambda} \text{ (rd)}$$

Références:



Foilers, le blog des bateaux volants

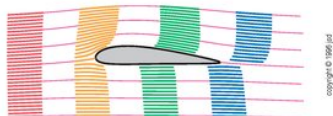
– <http://foils.wordpress.com/2011/12/07/portance-13/>



Nasa: Nationa Aironautics & Space Administration:

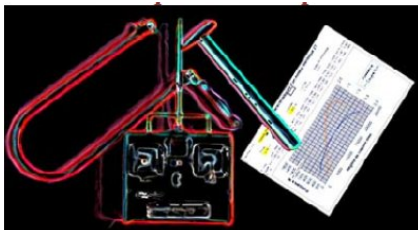
<http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/wrong1.html>

See How It Flies



See how it flies de John S. Denker

<http://www.av8n.com/how/htm/airfoils.html>



Philippe Kauffmann

<http://techniquemodelisme.free.fr/Modelisme>

