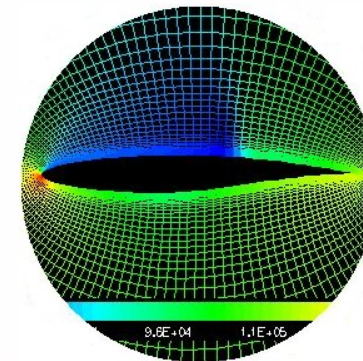
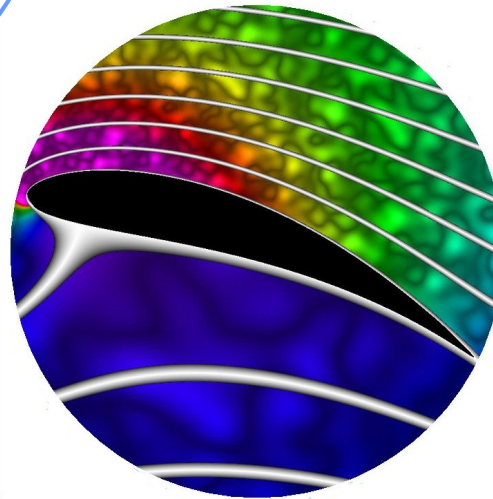
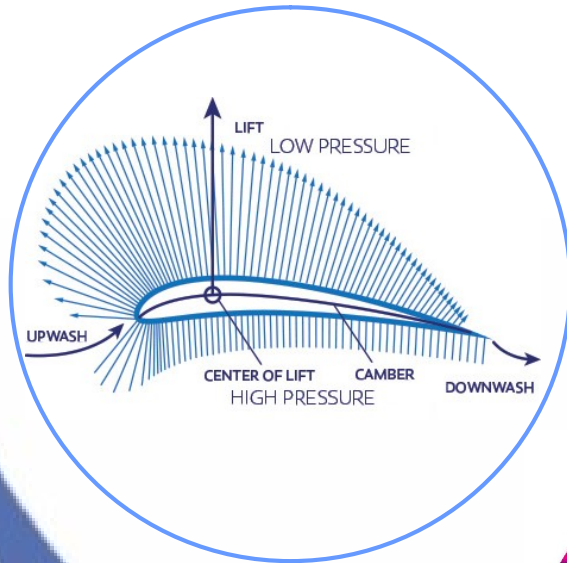


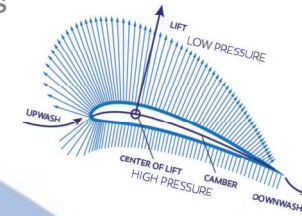
Notions d'aéronautique:

Chapitre 01-03

Profil d'Aile: Étude Détaillée



V06
01/06/2017



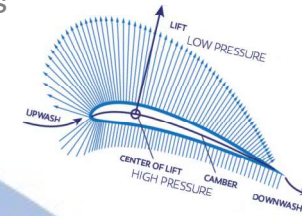
AVERTISSEMENT:

Ceci n'est pas un cours académique et ne peut pas servir en tant que tel.

Ceci est une approche simplifiée à l'intention des jeunes ingénieurs qui désirent se lancer dans l'aéromodélisme.

Pour une étude plus approfondie, il est indispensable de consulter la documentation spécialisée.

Sommaire

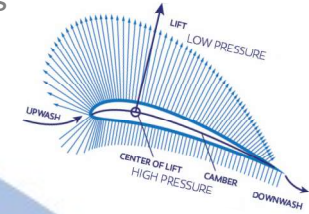


CLARK Y

Coefficients aérodynamiques

- Polaire
- Effet cambrure / épaisseur
- Types de profils
- Annexes

Coefficients aérodynamiques



- Un profil génère de la portance, de la trainée et un moment.
- Mais pour pouvoir comparer des profils entre eux, on a besoin de définir des coefficients sans dimensions.
- A l'aide des ces coefficients, on obtient directement la portance, la trainée et le moment :

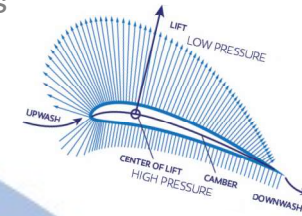
$$M_{25\%} = 0,5 \cdot \rho \cdot C_{m0} \cdot C \cdot S \cdot V^2$$

S= surface de l'aile
C: Corde
V: vitesse de l'écoulement
 ρ : masse volumique de l'air.

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

$$\text{Trainée} = 0,5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot S \cdot V^2$$

Sommaire

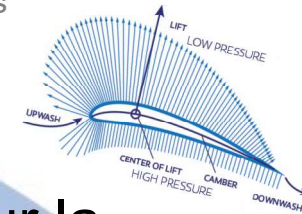


CLARK Y

Coefficients aérodynamiques

- Coefficient C_{m0} ,
- Coefficient C_x ,
- Coefficient C_z ,
- Polaire
- Effet cambrure / épaisseur
- Types de profils
- Annexes

Coefficient de moment: C_{m0}



- On commence par le moment qui est très important pour la stabilité longitudinale (on verra ça lors de l'étude de l'avion).
- On définit donc le coefficient de moment C_{m0} (sans unité) au niveau du foyer (25% de la corde*) de la façon suivante:

$$M_{25\%} = 0,5 \cdot \rho \cdot C_{m0} \cdot C \cdot S \cdot V^2$$

S= surface de l'aile C: Corde V: vitesse de l'écoulement ρ : masse volumique de l'air.

- Pour un profil symétrique ou une plaque plane C_{m0} est nul.
- On général le C_{m0} est négatif (moment de basculement / à piquer).



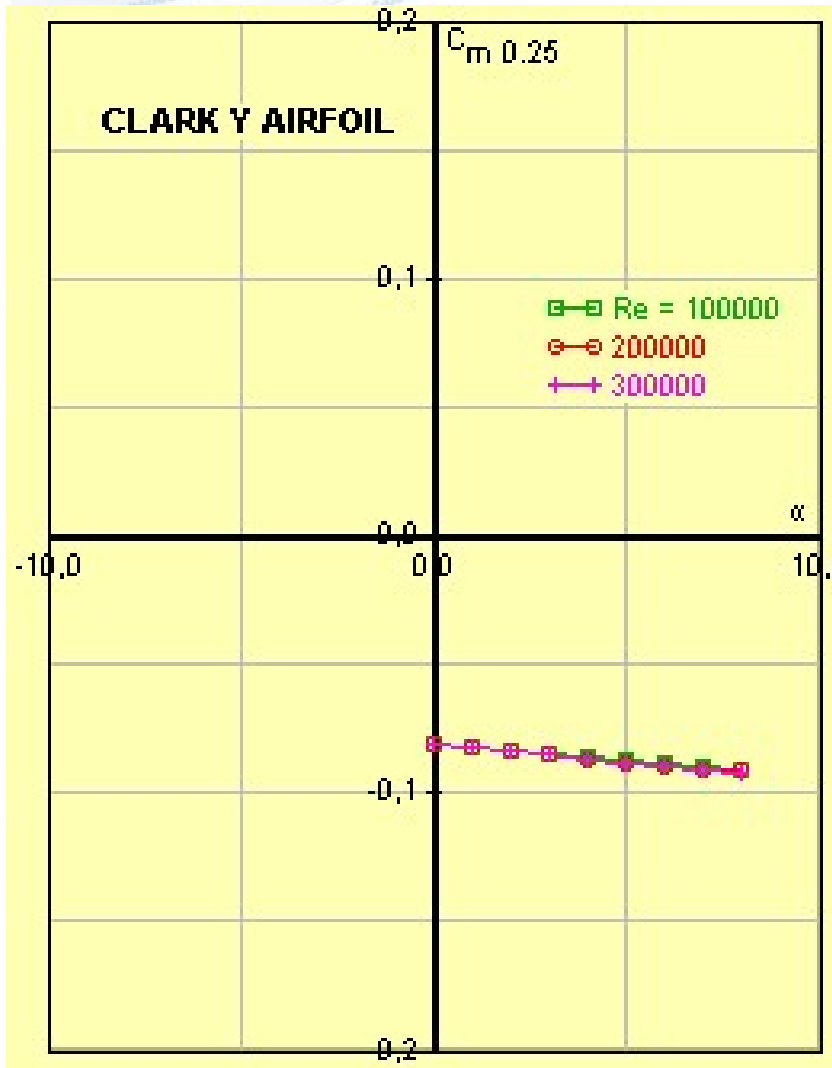
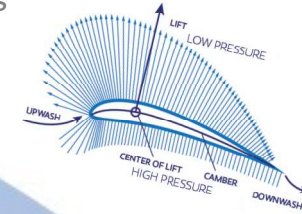
Les profils classiques ont une
tendance à piquer



Influence sur le « design »
de l'avion

(*) cas usuel

Coefficient de moment: C_{m0}

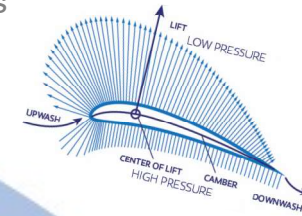


- Pour un Clark Y, on trouve que sur la plage de 0 à 8°, le C_{m0} est de l'ordre de **-0.086** (Re 10^5).
- Un profil cambrée (NACA6409) peut atteindre **-0.15** (le double d'un Clark Y)



C_{m0} peut varier de façon significative si la plage d'alpha change ou n change de Re.

Sommaire

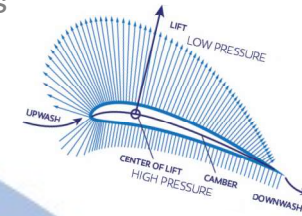


CLARK Y

Coefficients aérodynamiques

- Coefficient C_{m0} ,
- Coefficient C_x ,
- Coefficient C_z ,
- Polaire
- Effet cambrure / épaisseur
- Types de profils
- Annexes

Traînée du profil en régime sub-sonique

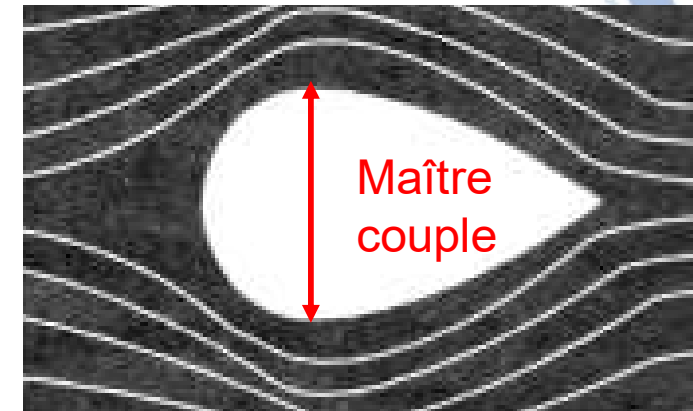
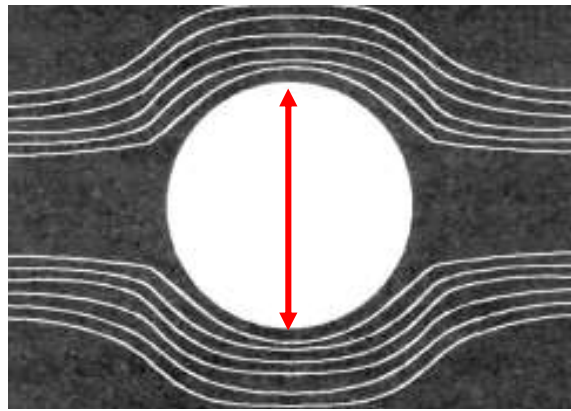
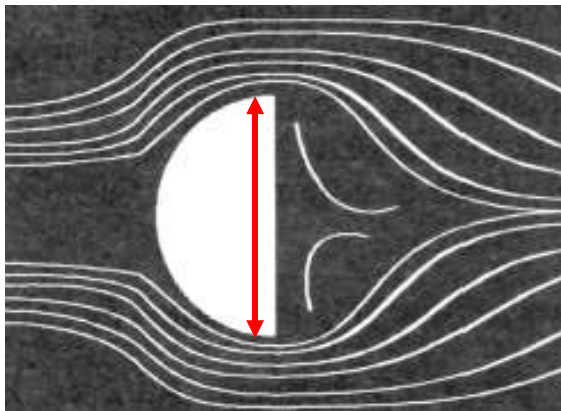


- Deux composantes forment la trainée, à savoir:

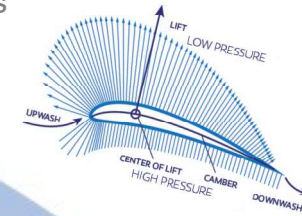
$$\text{Traînée (profil 2D)} = Tr \text{ de } \textit{forme} + Tr \text{ de } \textit{frottement}$$

Traînée de forme ou de pression

- Comme son nom l'indique, elle est due essentiellement à la forme du corps (en général) et celle du profil (en particulier).
- Dans ces trois cas, la trainée baisse en améliorant la forme « arrière » du corps en question, même si le **maître couple** est le même.

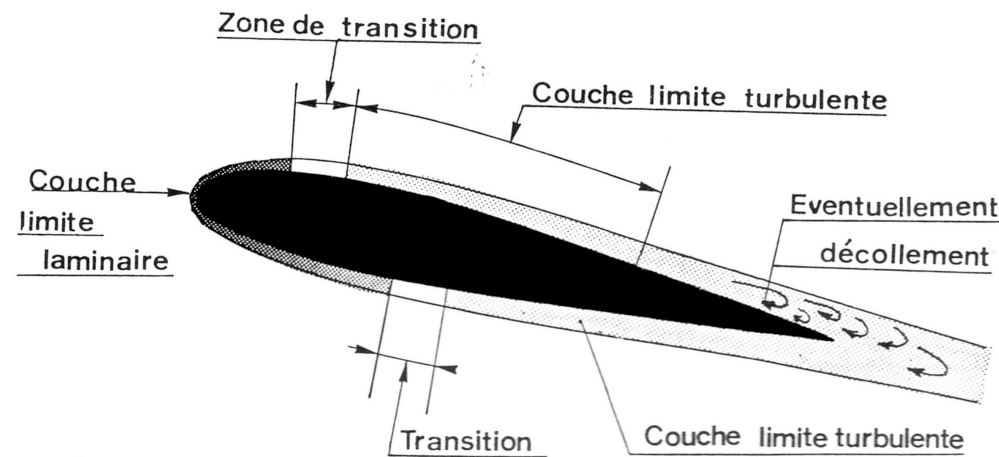


Traînée du profil en régime sub-sonique



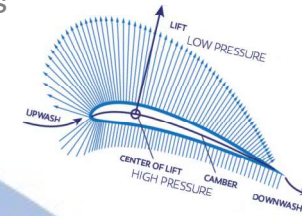
Traînée de friction / frottement

- Elle est fonction de la couche limite.
- Une **couche limite turbulente** cause **deux fois plus** de frottement qu'une **couche laminaire**.



- Mais la couche turbulente est plus résistante au décrochage / décollement.

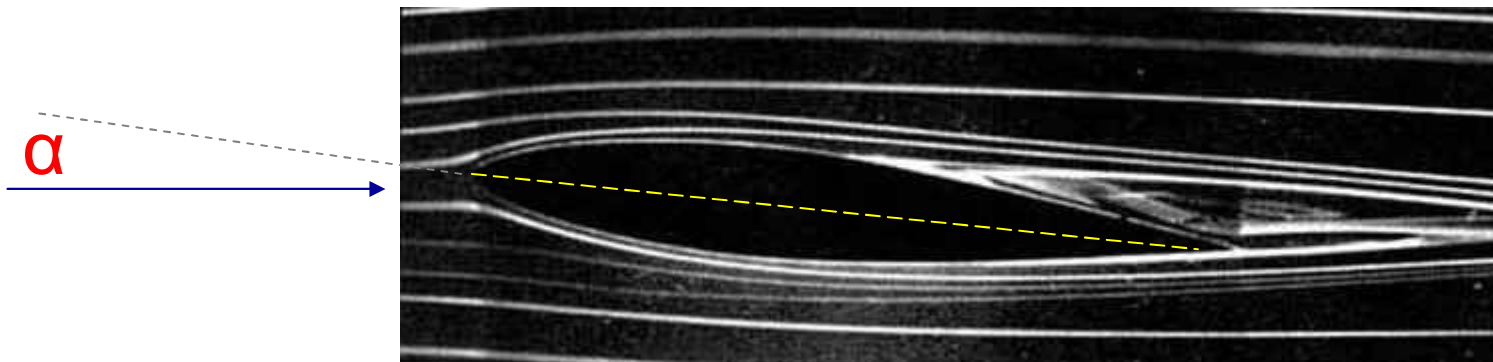
Coefficient de traînée



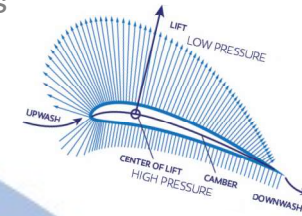
- Dans les souffleries, afin de déterminer la traînée d'un profil, on définit un coefficient caractéristique sans unité : C_x (pour un Re donnée).

$$\text{Traînée (pression \& frottement)} = 0,5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot S \cdot V^2$$

S= surface de l'aile V: vitesse de l'écoulement ρ : masse volumique de l'air.

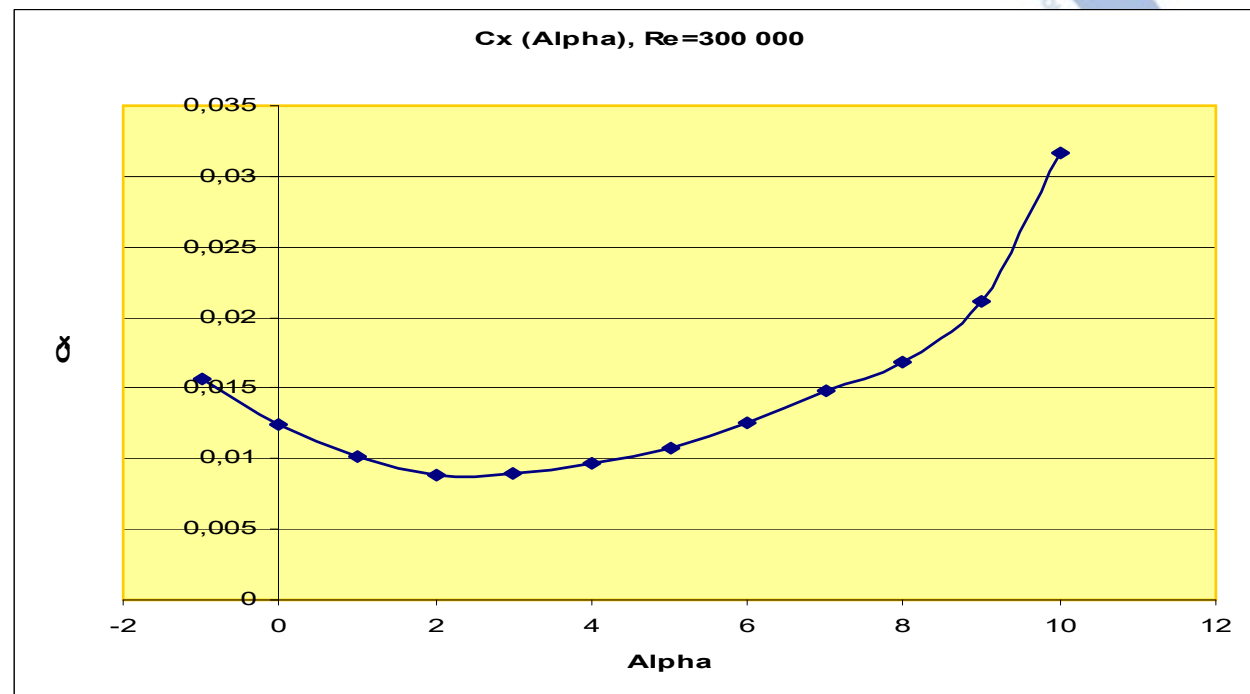


Coefficient de traînée



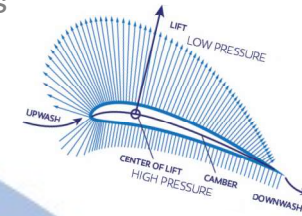
- Ce C_x va dépendre de l'angle d'attaque α .
- Les grandes incidences augmentent de façon significative le C_x .
- Ceci est d'autant plus marqué que **le décrochage** commence à se manifester (écoulement tourbillonnaire).

Ordre de grandeur
0.02/ 0.03



Clark Y, Re=300000

Sommaire



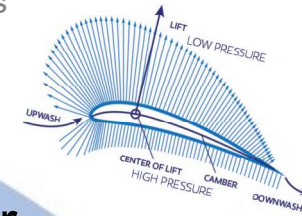
CLARK Y

Coefficients aérodynamiques

- Coefficient C_{m0} ,
- Coefficient C_x ,
- Coefficient C_z ,
- Polaire
- Effet cambrure / épaisseur
- Types de profils
- Annexes

Coefficient de Portance

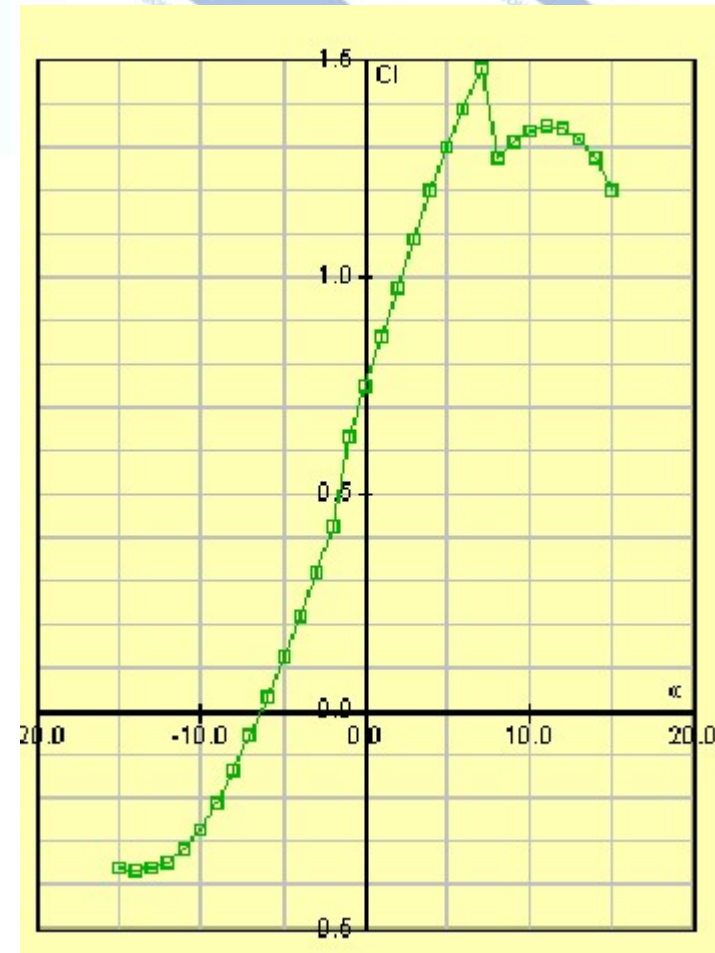
- Comme pour la traînée, on va faire appel au coefficient C_z pour caractériser la portance d'un profil (pour un Re fixé)



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

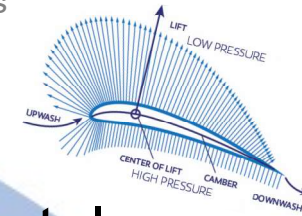
S= surface de l'aile V: vitesse de l'écoulement ρ : masse volumique de l'air.

- Comme pour C_x , le C_z va dépendre de l'angle d'attaque α
-> **C_z augmente avec l'incidence** (pour des faibles valeurs).
- Des valeurs typiques de 1 ou 1.2* sont à retenir pour un Re de 100000.



NACA6409 (RE 63000)

* On parle d'un profil 2D

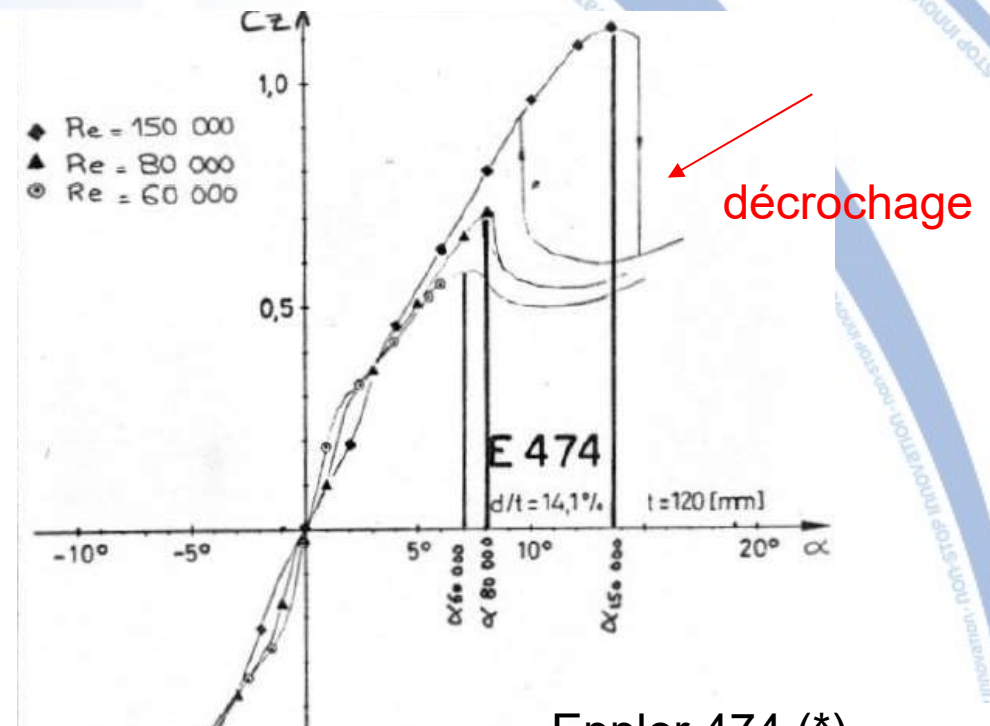


Coefficient de Portance

- A partir d'un seuil d'incidence donné, une chute brutale caractérise le C_z .
- C'est la manifestation du « **décrochage** » de l'aile.

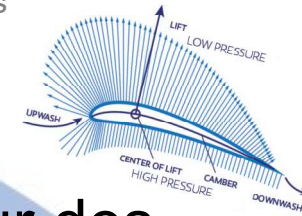


Plus on est proche de α_{\max}
plus la portance est
importante, mais on risque le
décrochage.



Eppler 474 (*)

(*) Ref: R Gougnot



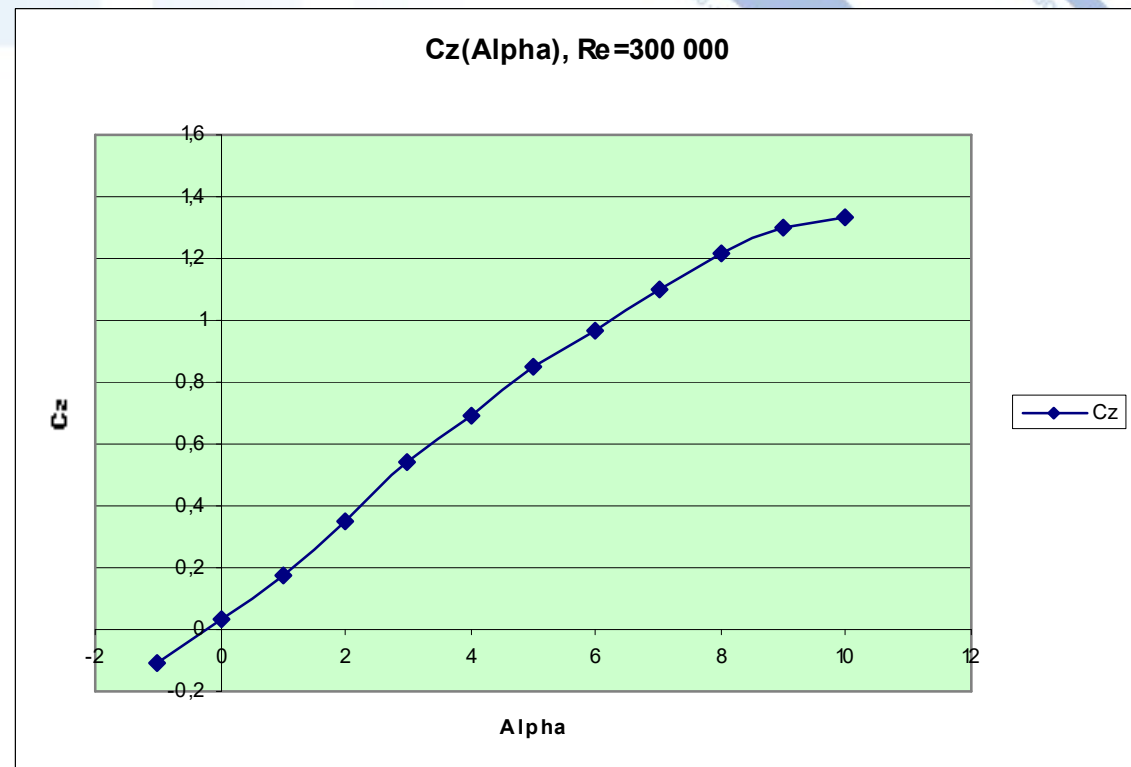
Coefficient de Portance

- Si on fait appelle à la théorie de la circulation, et pour des profils particuliers (*) mais très utilisés on trouve (sur une zone linéaire):

$$C_z \approx 2 \cdot \pi \cdot \alpha \text{ (rd)} + \text{Cste}$$

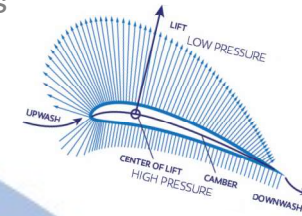
$$\alpha \text{ (rd)} = 2 \cdot \pi \cdot \alpha \text{ (}^\circ\text{)}$$

$$C_z \approx 0,11 \cdot \alpha \text{ (}^\circ\text{)} + \text{Cste}$$



(*) profils obtenus par transformation conforme

Sommaire

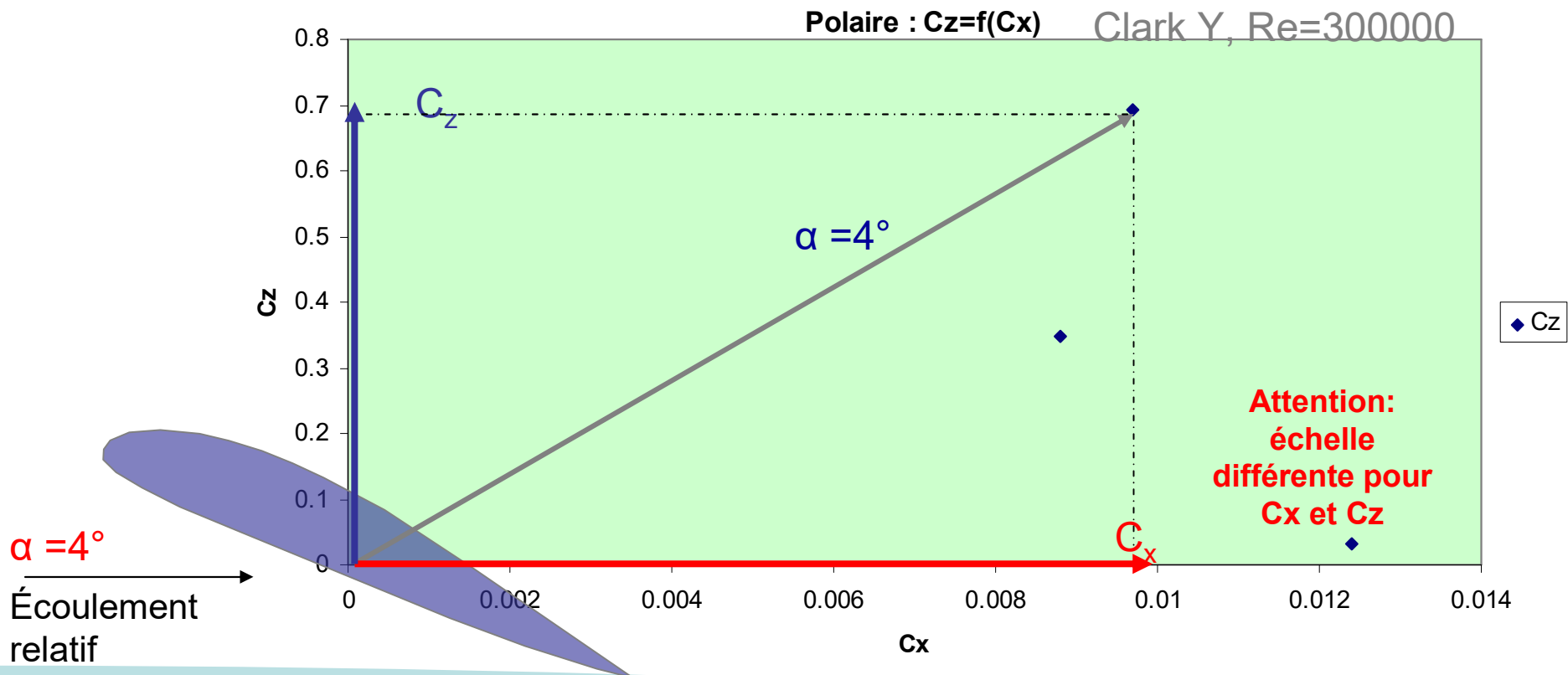
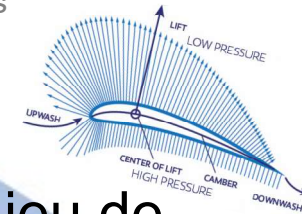


- Coefficients aérodynamiques
- Polaire
- Effet cambrure / épaisseur
- Types de profils
- Annexes



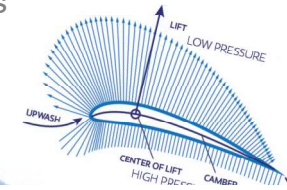
La Polaire

- La polaire est la représentation en (r,θ) d'un vecteur, au lieu de la représentation (x,y) .
- La polaire représente la force aérodynamique en fonction de l'angle d'attaque: la projection horizontale C_x / verticale C_z .

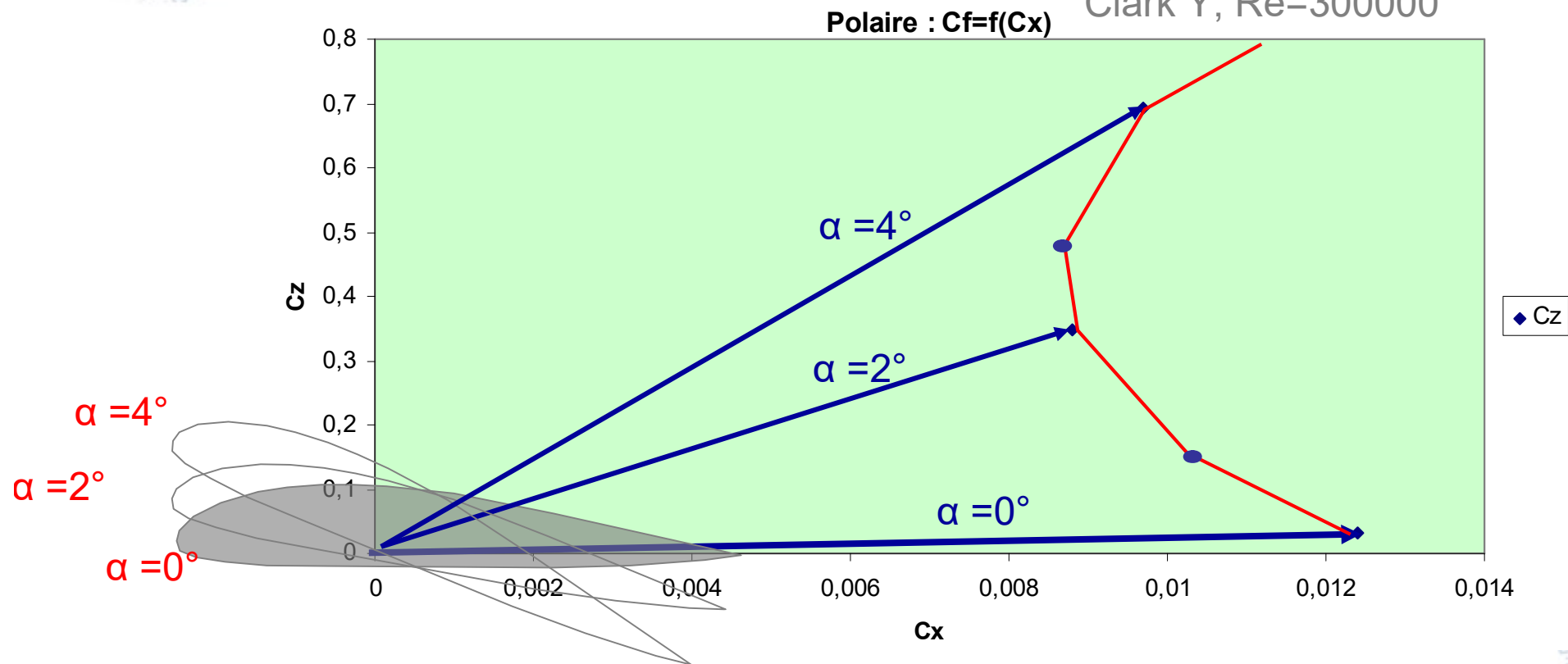


La Polaire

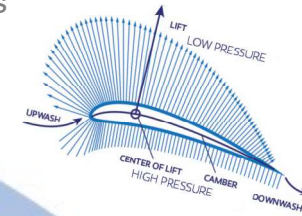
- On fait varier α :



Clark Y, $Re=300000$



Pour info: Le premier à introduire la notion de Polaire est **l'ingénieur Eiffel**, mais son utilisation réelle remonte à **Otto Lilienthal**, le père du vol à voile (planeur de nos jours).



Interprétation de la polaire

- Une polaire est valable pour un Re donnée + les conditions de la simulation.

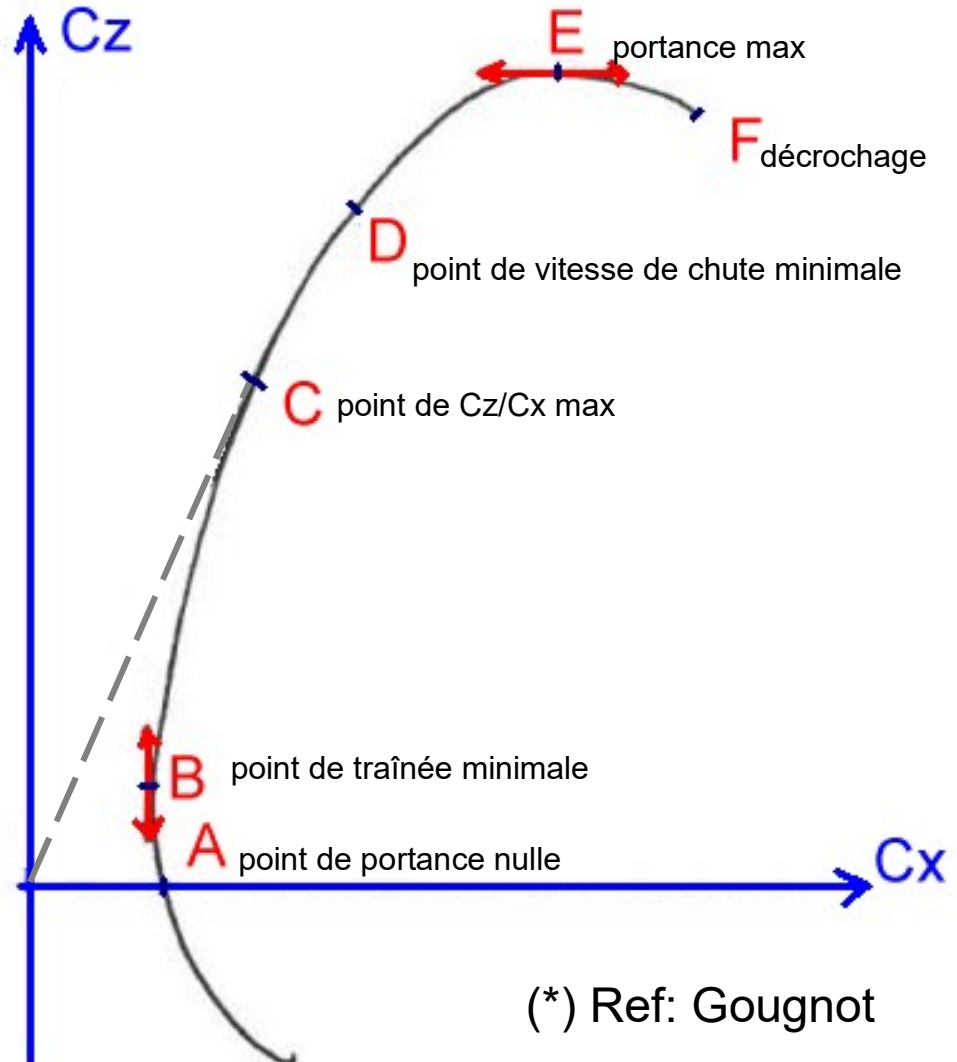
- Donc, *à éviter de comparer des polaires établies par des logiciels ou des souffleries différentes.*

- Si ces précautions sont respectées, la polaire est un excellent moyen pour choisir un profil en fonction du besoin (planeur, acrobatie, etc)

- Les points les plus remarquables sont :

- **Point C:** C_z/C_x max. On parle de **finesse max**, on verra l'importance de ce point en particulier pour les planeur. Il est déterminé par la tangente à la courbe qui passe par l'origine

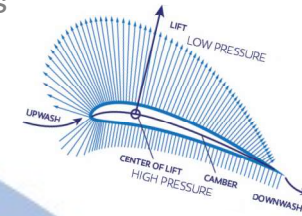
- **Point F:** décrochage



(* Ref: Gougnot

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

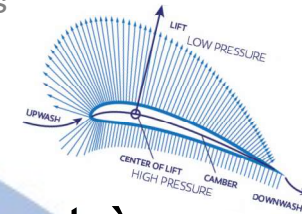
Sommaire



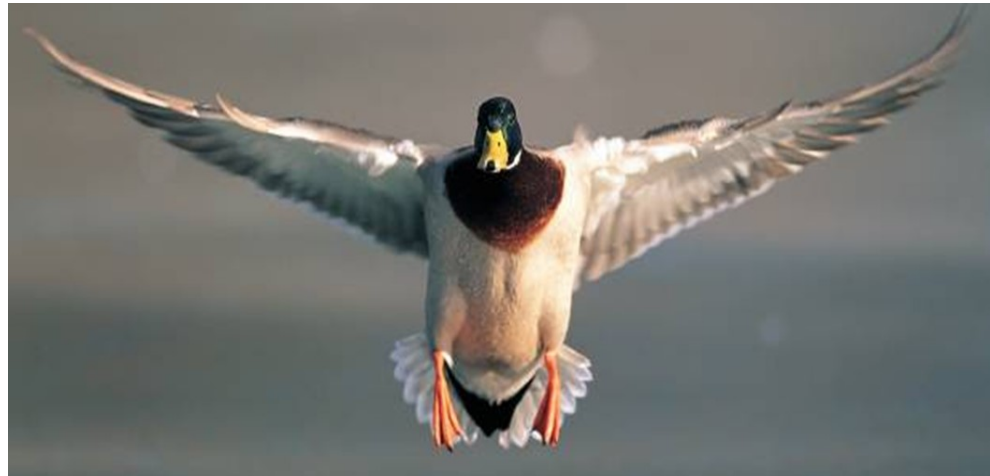
- Coefficients aérodynamiques
- Polaire
- **Effet cambrure / épaisseur**
- Types de profils
- Annexes



Influence de la cambrure

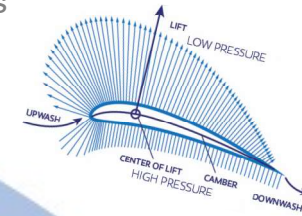


- Le critère géométrique qui influe directement et de façon très significative sur le C_z est la **Cambrure Relative**.
- Mais, en même temps, une **forte cambrure** signifie aussi une **forte traînée**.
- Les valeurs courantes de cambrure sont entre 0 et 6% (en aéromodélisme). On ne parle pas des configurations particulières (atterrissage).

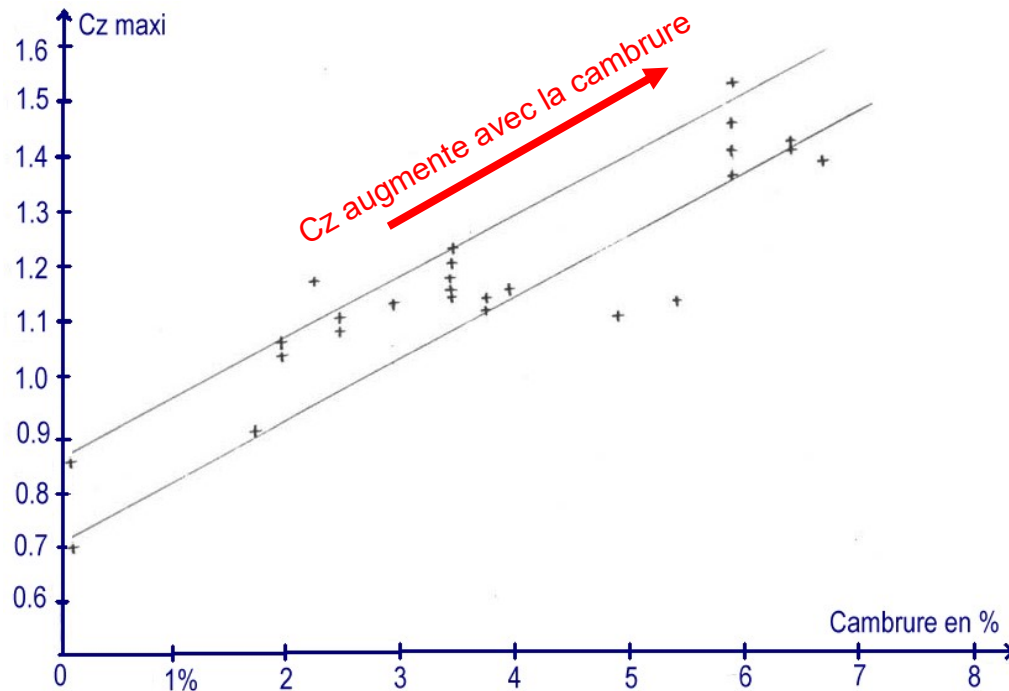


Ce canard adopte une **cambrure importance** -> il **réduit sa vitesse** mais **augmente le C_z** -> il garde une portance suffisante pour voler et une vitesse faible pour atterrir.

Influence de la cambrure



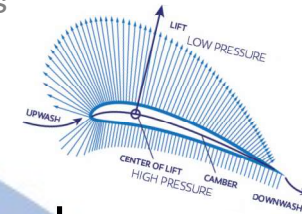
- Donc pour générer un C_z important à faible vitesse (typiquement à l'atterrissage, ou modèle in-door) on a besoin d'une forte cambrure.



In-door: Profil cambrée à 6%

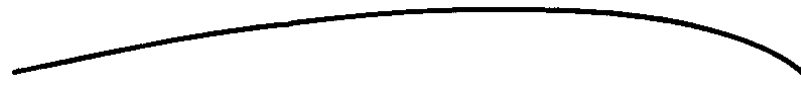
Pour Info: Le Clark Y a une cambrure de 3,468

Influence de l'épaisseur



- La prise en compte de la variation de C_z et C_x en fonction de l'épaisseur n'est pas très intuitive.
- On sait que si l'**épaisseur augmente**, la **trainée de forme augmente**.
- Donc historiquement, on a commencé par utiliser des profils de ce genre (*):

LA PLAQUE CREUSE
(profil sans épaisseur)

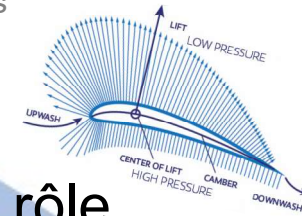


Réplique avion
Rolland Garosse,
atterrissage à
Bizerte 13/09/2013



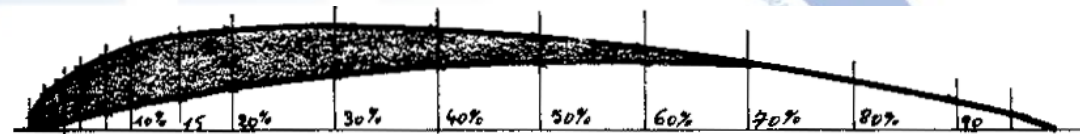
(*) Philippe Kauffmann , Calculer_Son_Modele_Reduit

Influence de l'épaisseur



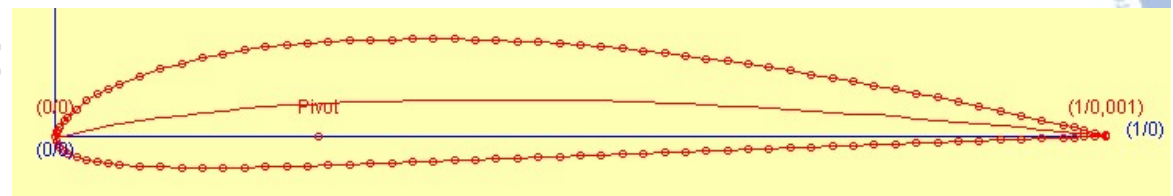
- Mais, on a rapidement compris que l'épaisseur joue un rôle important dans la **rigidité de l'aile** (e^3 pour être plus précis).
- On a commencé alors à introduire de l'épaisseur. On obtient des designs de ce genre:

Les PROFILS du TYPE dit "JEDELSKY"

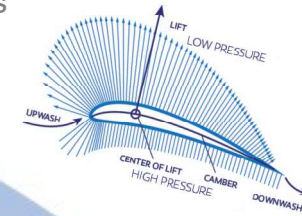


- Puis on a compris que l'épaisseur (9% -> 15%) peut augmenter la portance sans introduire une traînée dramatique. En même temps l'aile devient plus petite et plus rigide -> gain en masse donc en portance / traînée.
- Les valeurs usuelles de e sont entre 8% à 18%:
- Pour le Clark Y:

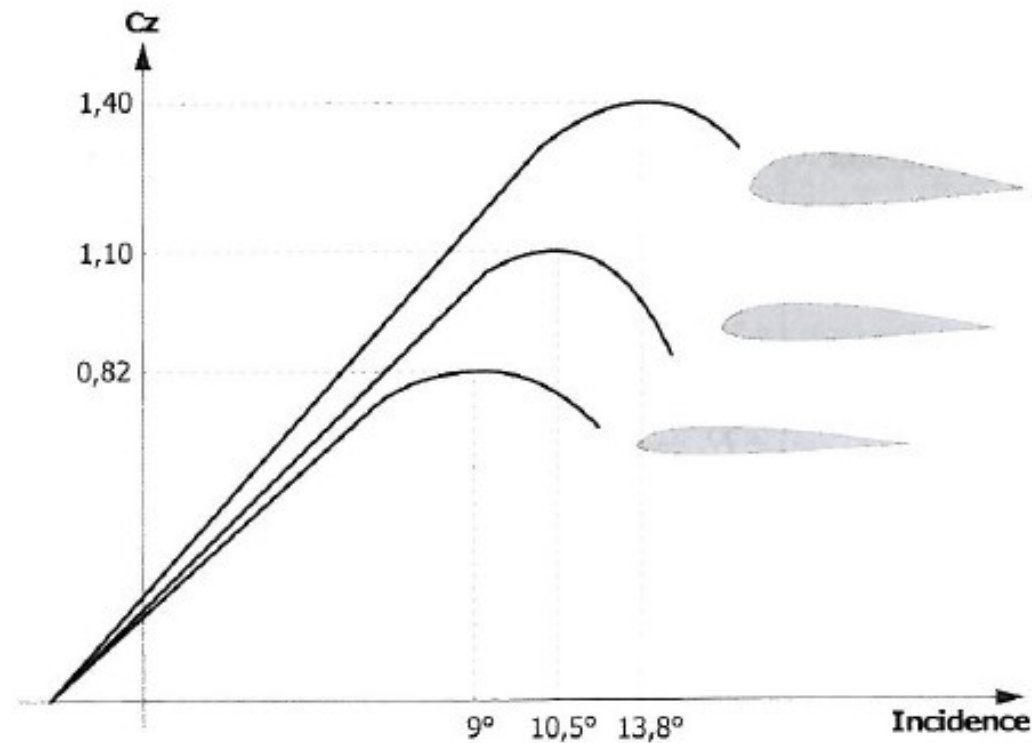
$$e = 11.707 \%$$

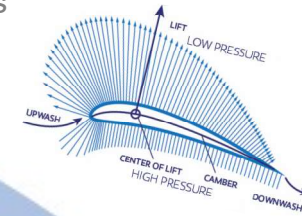


Effet de l'épaisseur:



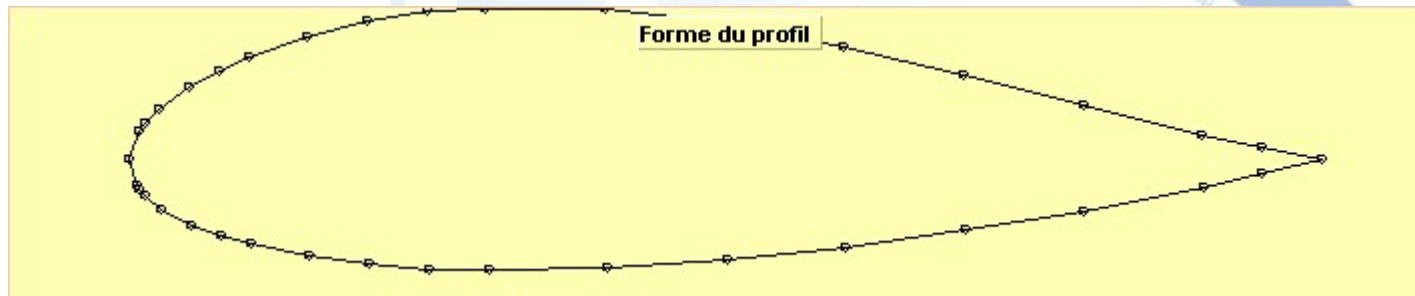
- Evolution de C_z en fonction de l'épaisseur relative:





Remarque

- Une forte épaisseur (22%) peut être utile à l'emplanture de l'aile (jonction aile/fuselage)



profil B29 emplanture, profil de bombardier subsonique de la seconde mondiale

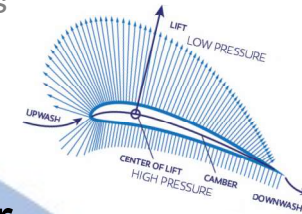
- Voici le commentaire de P Kaufmann(*) à ce sujet:

Profil « provocation », 22 % d'épaisseur relative maximale ! Il était comme son nom le suggère utilisé à l'emplanture des ailes des célèbres bombardiers américains qui ont entre autre brûlé et irradié le Japon. Ce profil démontre à ceux qui ne veulent pas l'admettre qu'un fort maître couple ne nuit pas nécessairement aux performances. Sa forte épaisseur augmentant la résistance intrinsèque de l'aile permettait de construire plus léger, ce qui permettait de diminuer la surface alaire, ce qui diminuait finalement la traînée ; CQFD

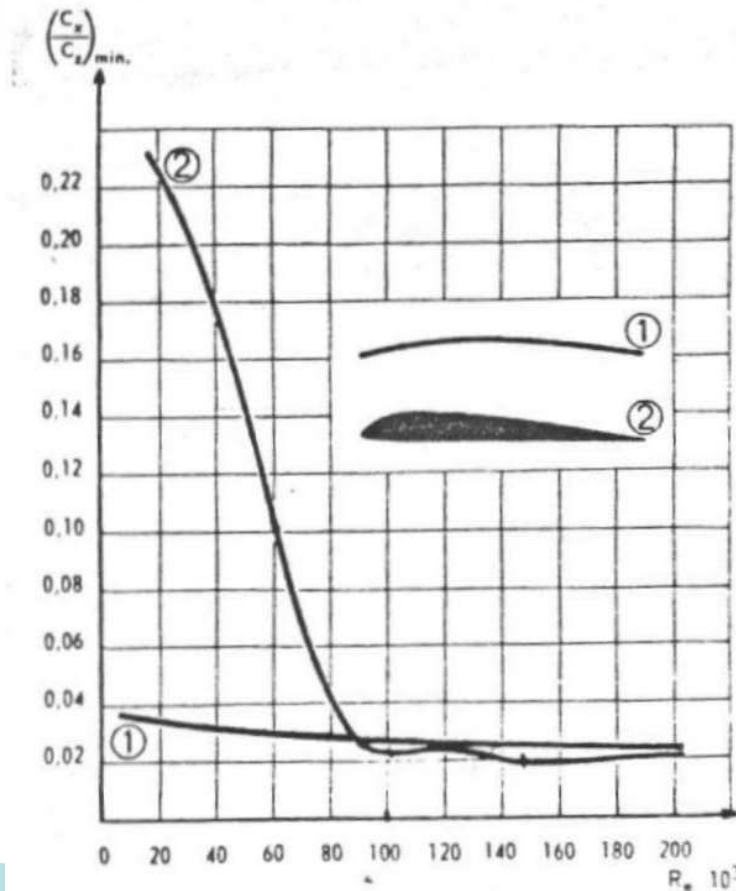
(*) Philippe Kaufmann, aéromodéliste renommé

Pour info

- Notons que le profil « plaque » ou « plaque galbée » peut avoir beaucoup d'intérêt à basse Re .
- Un profile « classique » va être **au-dessous du Re critique** -> bulle ou zone morte -> **forte traînée et faible portance**.



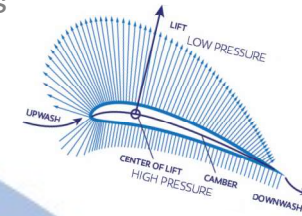
- La plaque galbée offre l'avantage d'un bord d'attaque mince qui provoque une couche limite turbulente **plus stable vis-vis de la formation d'une zone morte**.
- Il faut rester à faible Re pour profiter des avantages de la plaque plane.



(Fig. 4)

Variation du coefficient de glissement minimal, en fonction du nombre de Reynolds, pour une plaque creuse et un profil classique.

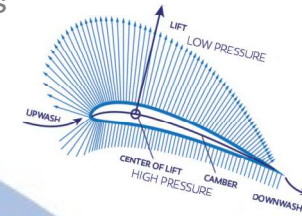
Sommaire



- Coefficients aérodynamiques
- Polaire
- Effet cambrure / épaisseur
- **Types de profils**
- Annexes



Type de profils

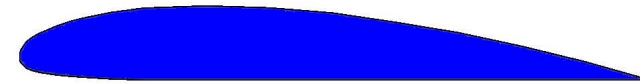


- On distingue plusieurs profils possibles.
- Mais, on peut dresser quelques catégories (familles):

Biconvexes symétriques



Plat ou Plan convexe



Biconvexes dissymétriques



Profil creux



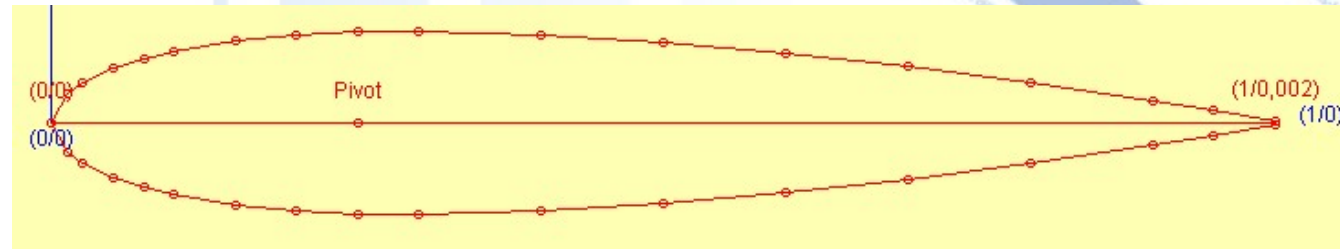
Profil Autostable



Type de profils

- **Biconvexes symétriques**, comme les profils types NACA (ex-NASA)
NACA00xx:

NACA 0015
 \downarrow
 $e=15\%$

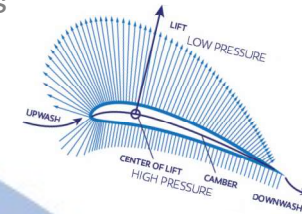


On utilise souvent le NACA0009 pour les empennages



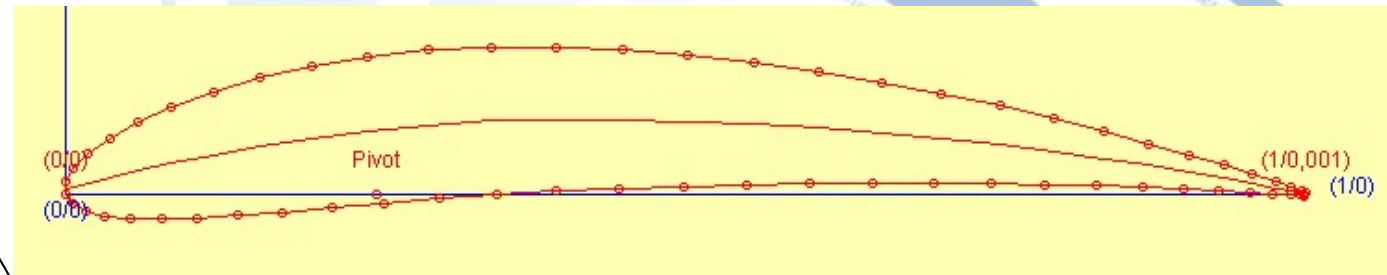
Un NACA0012 utilisée sur un planeur.

Type de profils



- **Biconvexes dissymétriques**, comme les profils types NACA XZZZ

Comme NACA6412



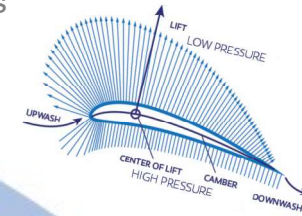
Cambrure=6%
À 40% corde

e=12%

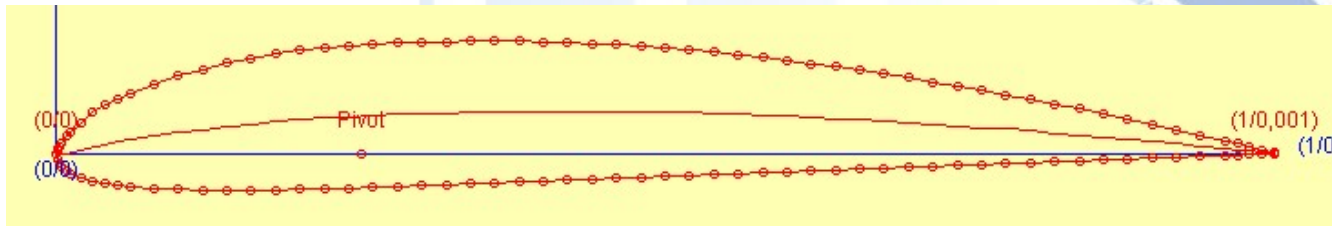
Le NACA6409 utilisé sur un In-Door



Type de profils

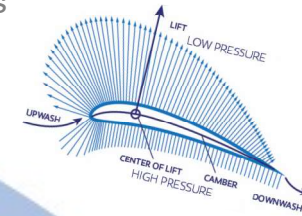


- **Plat ou Plan convexe**, comme le Clark Y ou les Eppler



Idéal pour des avions stables (pas de voltige) ou certains planeurs:





Type de profils

- **Profil creux**, comme le jedelsky

Classique



" JEDELSKY"

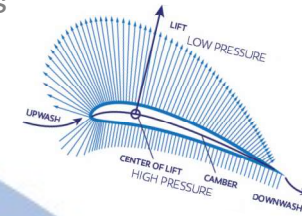


- **Profil Autostable**, idéal pour les ailes volantes (C_{m_0} positif)



D'autres profils existent. C'est un domaine très vaste. Lorsqu'on fait de l'aéromodélisme, on cherche les profils usuels qui ont fait leurs preuves et qui sont faciles à construire.

Choix d'un profil



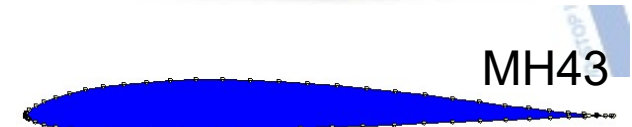
- Il n'existe pas de profil idéal. En fonction du besoin et des contraintes de fabrication, on s'oriente vers un profil ou un autre.
- Si le Clark Y revient souvent en aéromodélisme, c'est que l'intrados est quasi-plat. C'est une faciliter importante pour la fabrication. Il a aussi des bonnes caractéristiques aérodynamiques.
- À titre d'illustration:



Type Jedelsky
Indoor: basse vitesse

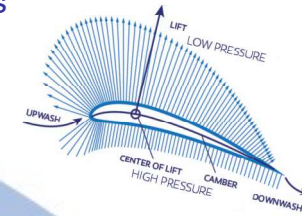


CLARK Y
Aéromodélisme usuel:
facile à fabriquer



MH43
Avion d'aéromodélisme
de type racer: vitesse.

Sommaire

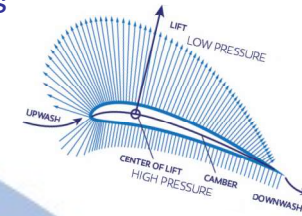


- Coefficients aérodynamiques
- Polaire
- Effet cambrure / épaisseur
- Types de profils



Annexes

Références:



Foilers, le blog des bateaux volants

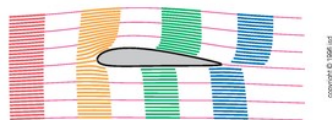
– <http://foils.wordpress.com/2011/12/07/portance-13/>



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>