
MÉCANIQUE DU VOL : ÉTUDE DU PROFIL D'AILE D'AVIONS DE VOLTIGE

LE GALLIC DIMITRI – JUIN 2024
SPORTS ET JEUX

SOMMAIRE

- Introduction
- Mécanique du Vol–Théorie
- Mise en place de l'expérience
- Interprétation des résultats
- Comparaison avec la modélisation numérique
- Conclusion

INTRODUCTION

La voltige est un sport aérien particulièrement éprouvant pour le pilote et son avion. Parmi l'ensemble des contraintes propre à ce sport, le profil des ailes joue un rôle particulier.

On s'intéresse donc ici à ce qui sépare ces profils d'ailes de profils beaucoup plus convenus.



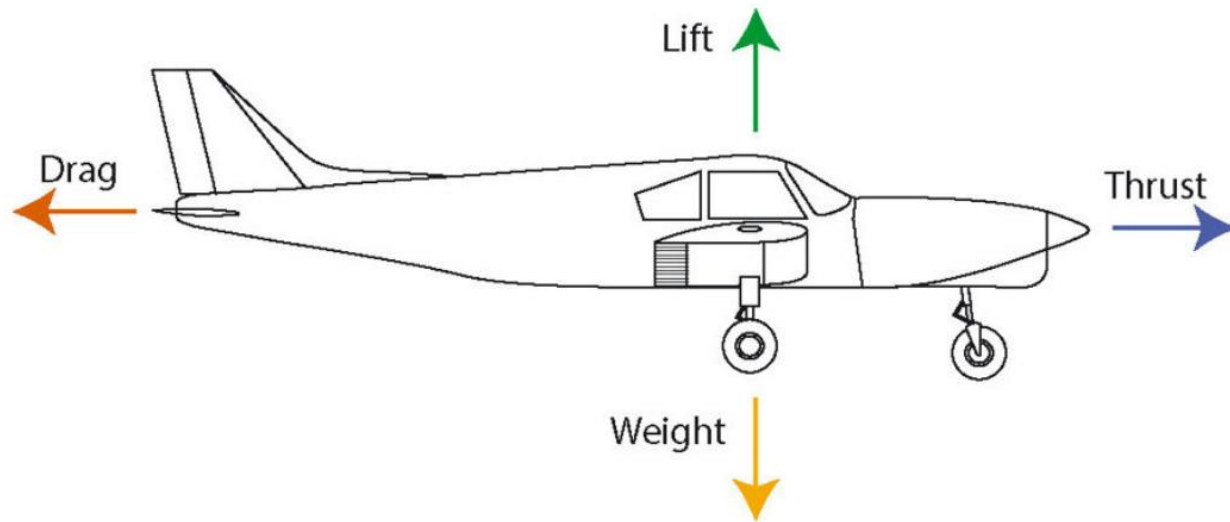
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Walter_Extra_300_SC,_Vigo.jpg

OBJECTIF



Modéliser de façon cohérente les propriétés aérodynamique d'une aile et tracer une polaire permettant d'isoler les caractéristiques propres de chaque aile.

MÉCANIQUE DU VOL-THÉORIE



On s'intéresse ici à la résultante aérodynamique de l'aile, constituée d'une force de portance R_z et d'une force de trainée R_x .

Fig. 4 The four forces that act on an airplane in flight.

PORTANCE ET TRAINÉE

- Notations :
 - ρ : masse volumique de l'air
 - v : vitesse de l'aile par rapport au vent relatif
 - S : surface de référence
 - C_z/C_x : coefficients de portance et de trainée respectivement
 - F_z/F_x : Forces de portance et de trainée respectivement

Deux lois régissent ces forces :

$$R_z = \frac{1}{2} * \rho * S * v^2 * C_z$$

$$R_x = \frac{1}{2} * \rho * S * v^2 * C_x$$

THÉORÈME DE BERNOULLI

On établit à partir de l'équation de Navier-Stokes(*), en reprenant les notations introduites précédemment, la formule de Bernoulli suivante :

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g z + p = cste$$

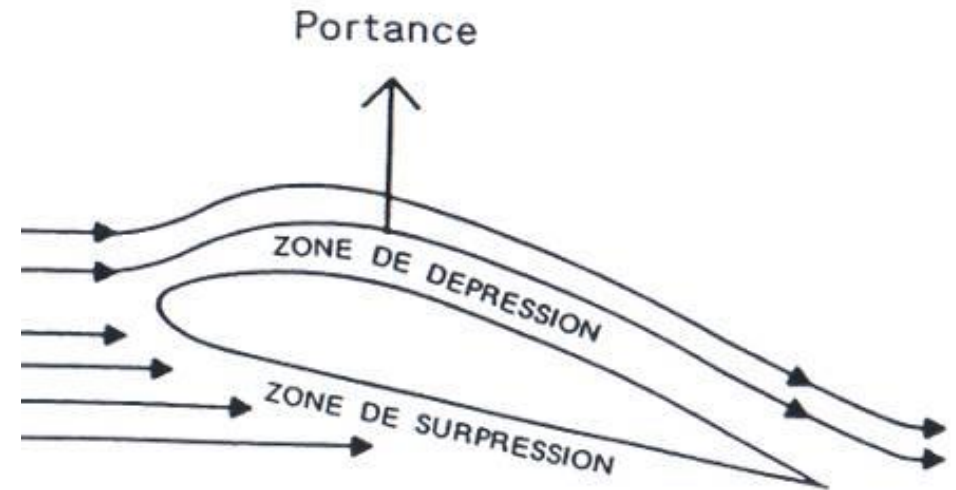
(valable dans le cas d'un fluide en régime stationnaire, irrotationnel)

Ainsi en supposant que le poids est négligeable on obtient :

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p = cste$$

On en déduit que lorsque la vitesse de fluide est supérieure sur l'extrados(*) d'une aile que sur son intrados, la pression au niveau de l'extrados est inférieure à la pression au niveau de l'intrados, d'où la force de portance.

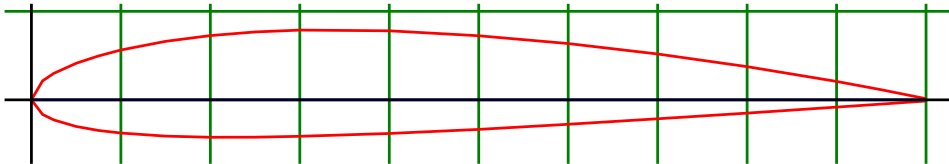
((*) : démonstration du théorème de Bernoulli et vocabulaire propre aux profils d'aile en annexe)



MISE EN PLACE DE L'EXPÉRIENCE

CHOIX DES PROFILS ÉTUDIÉS :

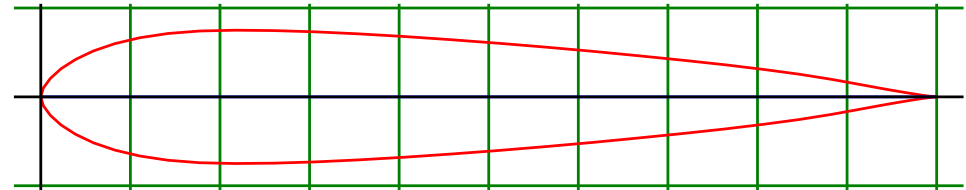
NACA 2412



Name = NACA 2412
Chord = 100mm Radius = 0mm Thickness = 100% Origin = 0% Pitch = 0°

Profil standard d'aile d'avion de loisir : Cessna 172

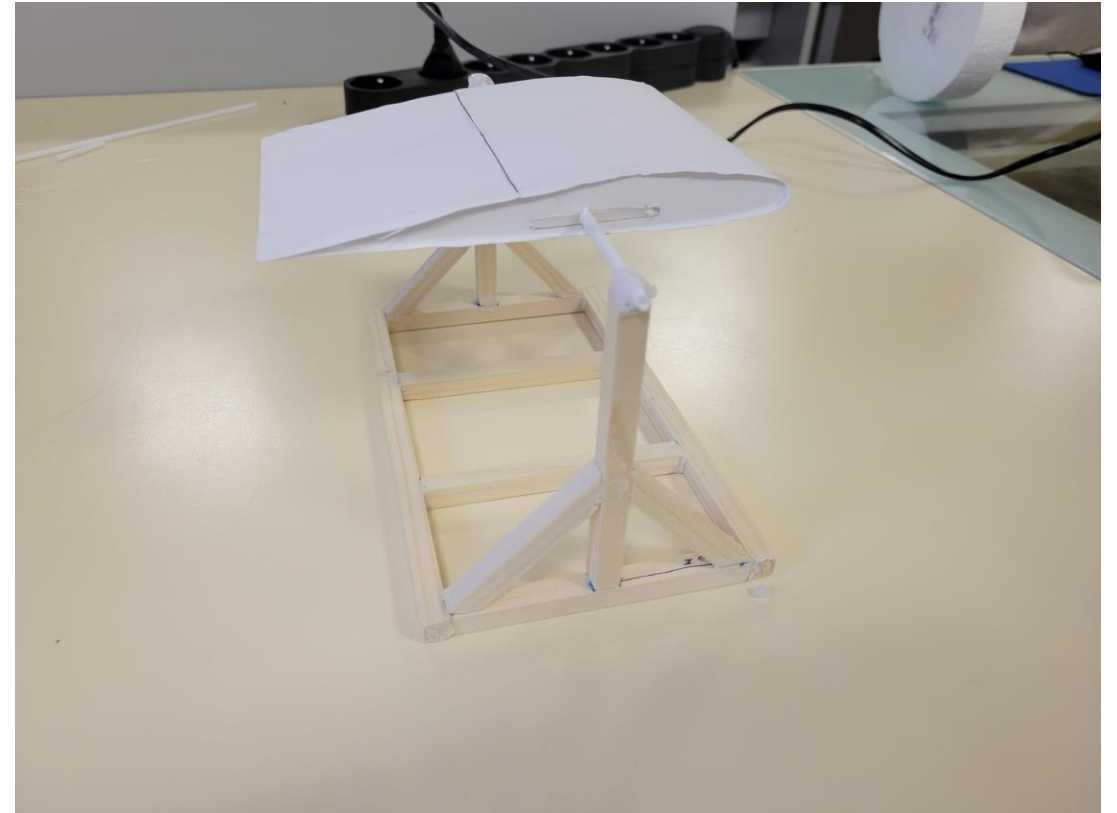
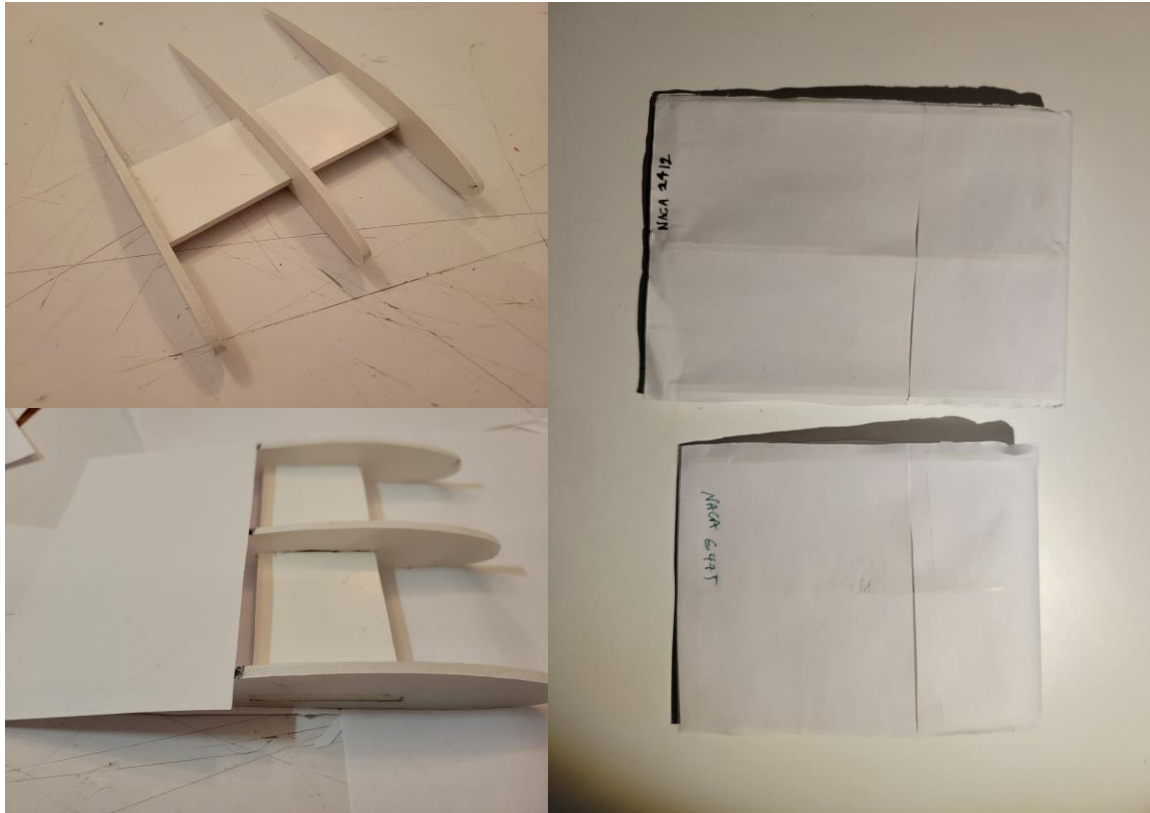
NACA E475



Name = E475 (15.01%)
Chord = 100mm Radius = 0mm Thickness = 100% Origin = 0% Pitch = 0°

Profil d'aile d'avion de voltige

CONCEPTION DES PROFILS D'AILE



Les 2 profils d'ailes ont été réalisés à l'échelle 1/15^e

OBJET DE L'ÉTUDE

On s'intéresse à la résultante aérodynamique des ailes en fonction de deux principaux paramètres :

1. La vitesse du vent relatif
2. L'angle d'incidence du profil

On isolera la composante verticale (portance) et la composante horizontale (trainée) afin de pouvoir plus clairement comparer ce qui différencie les différents profils, à l'aide notamment d'un polaire.

Afin de pouvoir vérifier la cohérence de nos mesures et leurs incertitudes, nous évaluerons par ailleurs la température de l'air afin de pouvoir estimer le nombre de Reynolds, utile à la modélisation numérique.

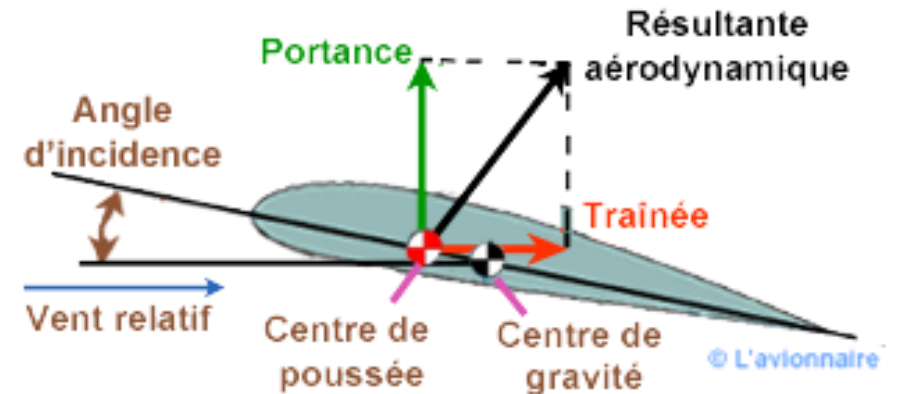
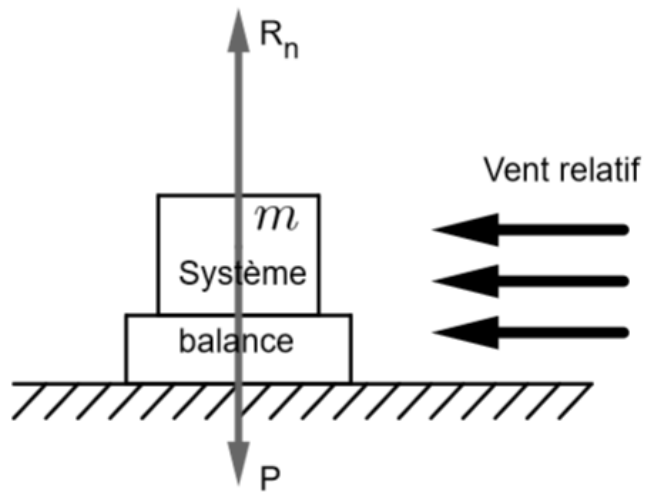
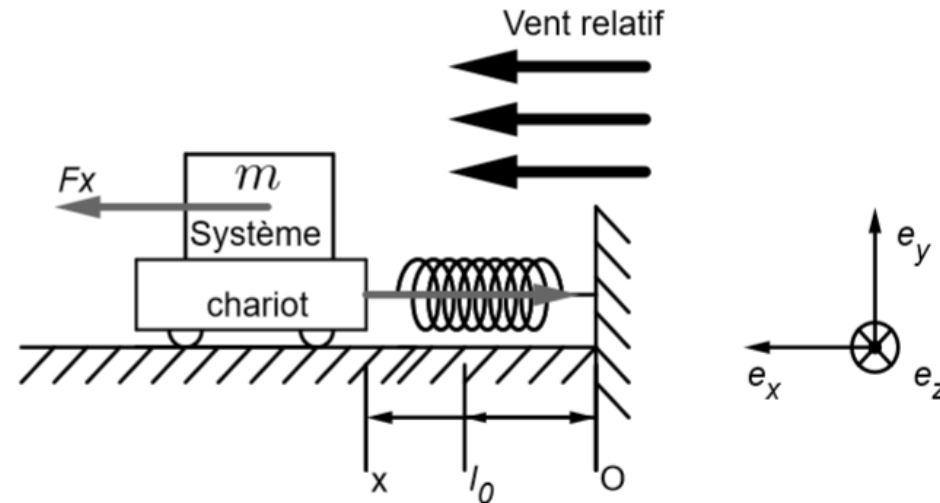


SCHÉMA DES EXPÉRIENCES

On effectue les mesures en influant sur l'angle α d'attaque de l'aile ainsi que de la vitesse \mathbf{v} du vent

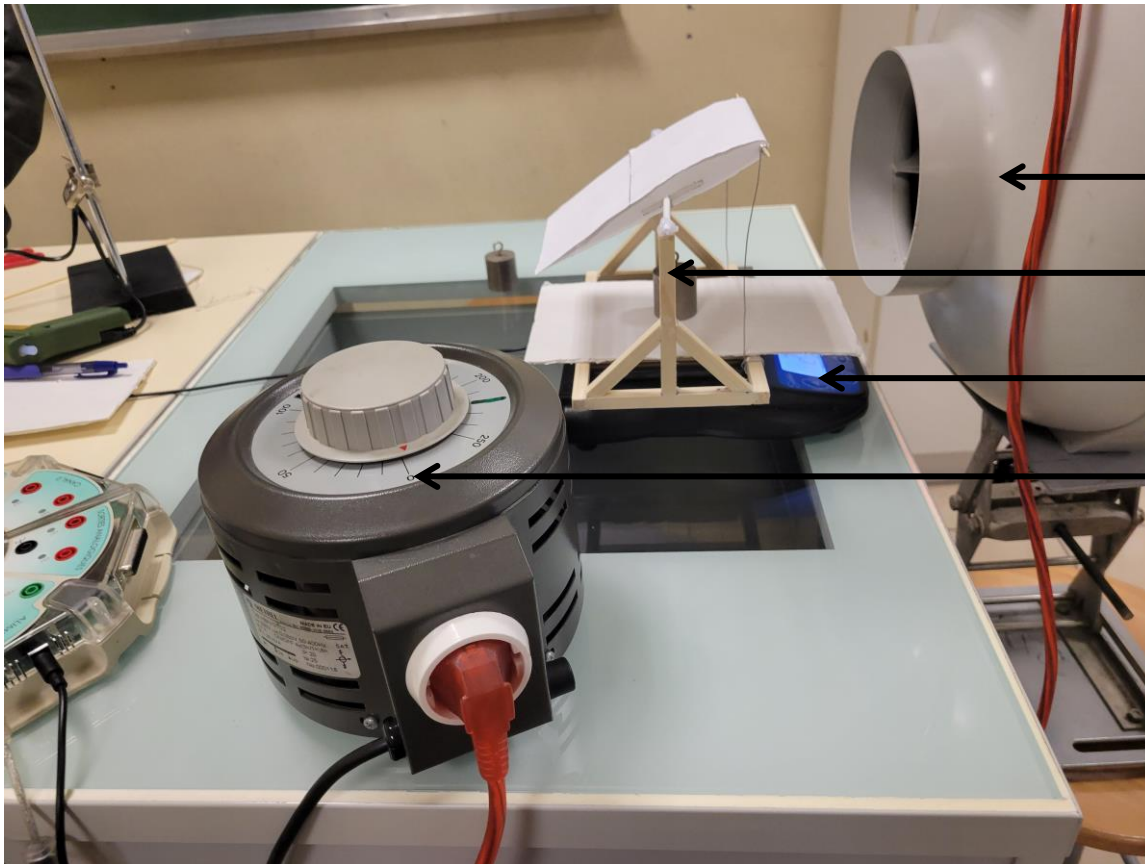


Mesure de la Force de portance



Mesure de la Force de trainée

RÉALISATION DES EXPÉRIENCES—MESURE DE LA PORTANCE



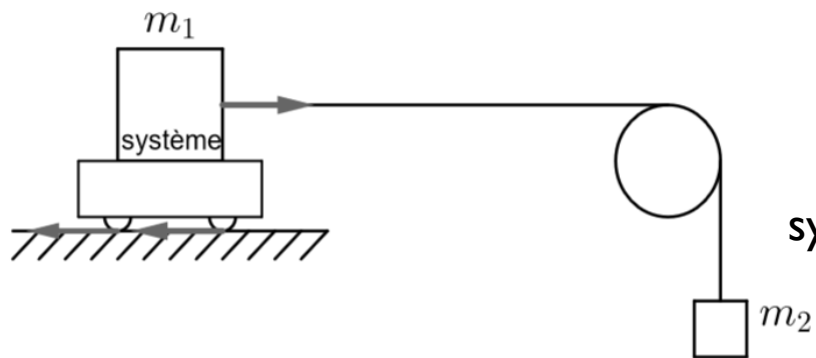
← Soufflerie

← Système

← Balance

← Alternateur régulant la vitesse
des pales de la soufflerie

MESURE DE LA TRAINÉE—ÉTAPE PRÉLIMINAIRE



Schématisme de l'expérience nécessaire afin d'estimer le coefficient de frottement entre le chariot et le rail

système et chariot

poulie

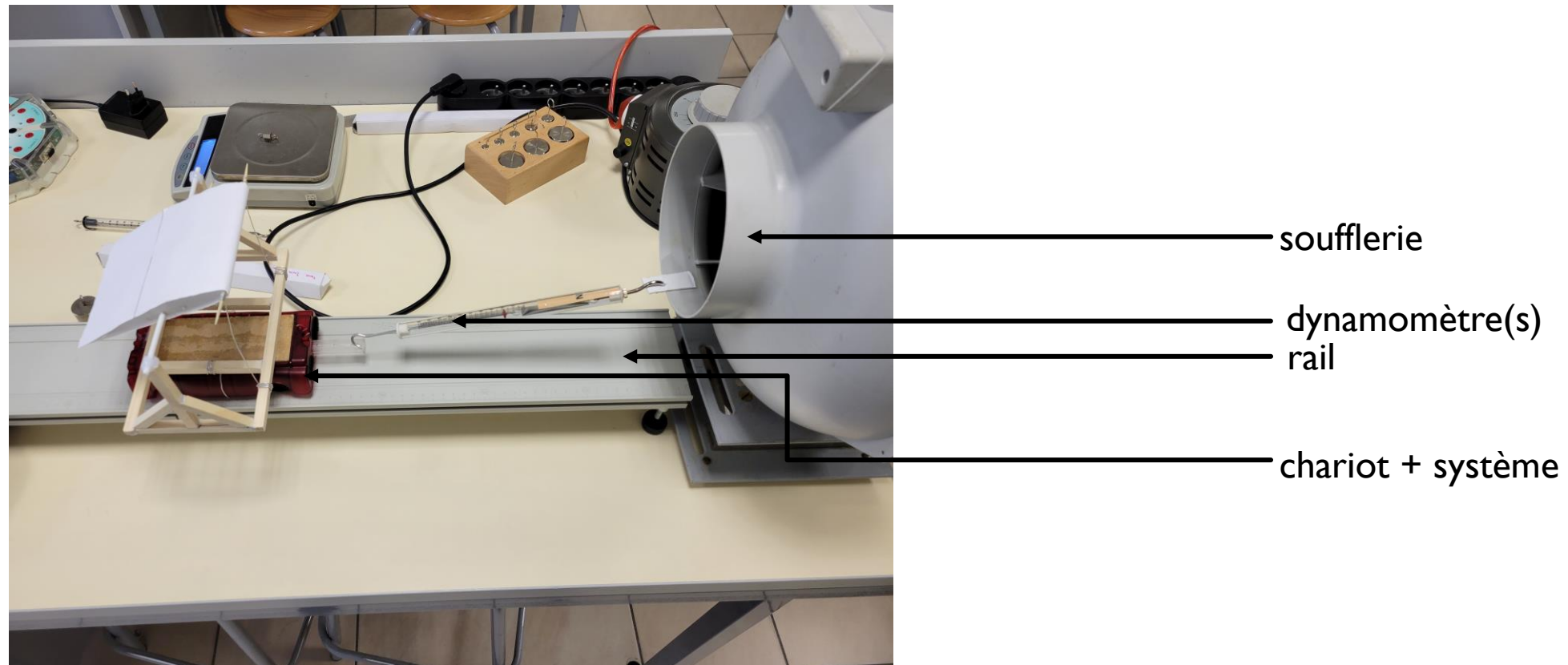
rail

ficelle et poids



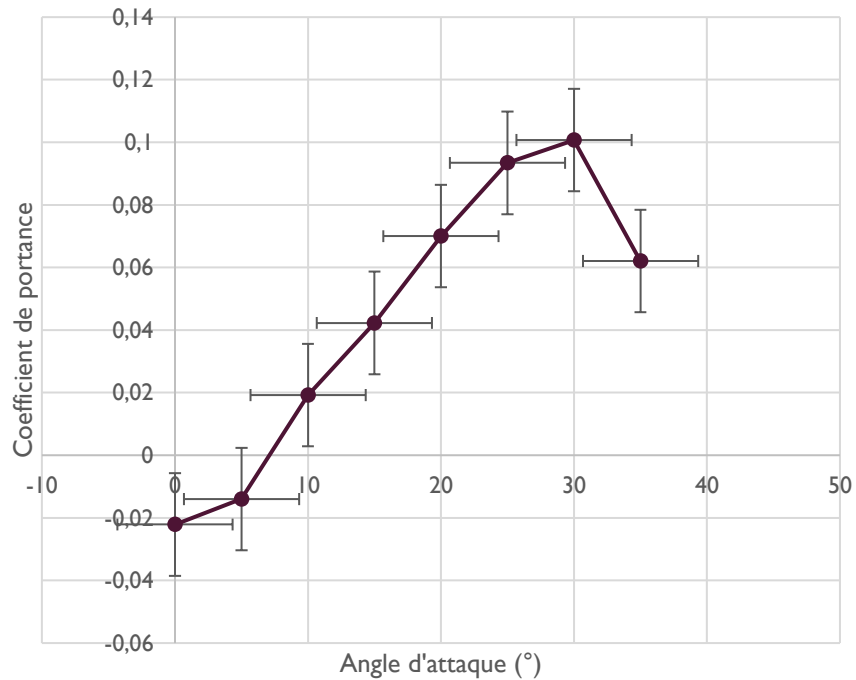
Pour une masse de seulement 3g le chariot se met en mouvement. Puisque cette masse est très largement inférieure à la masse du chariot et du système, on peut négliger le frottement entre les rails et le chariot.

RÉALISATION DES EXPÉRIENCES—MESURE DE LA TRAINÉE

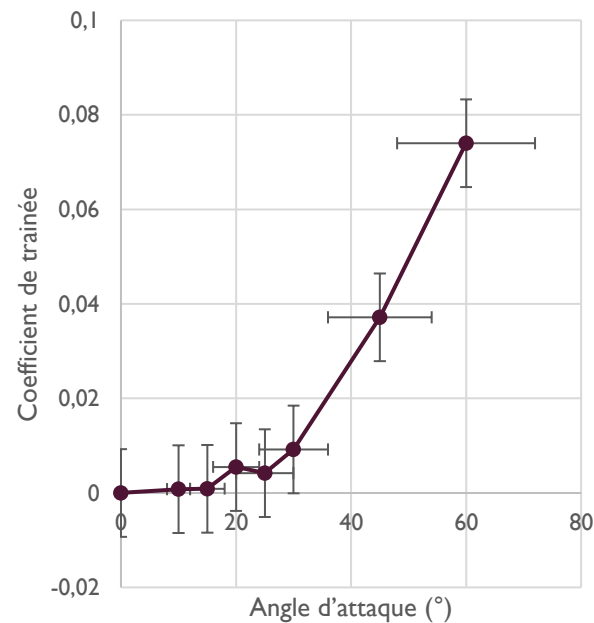


INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS-NACA 2412

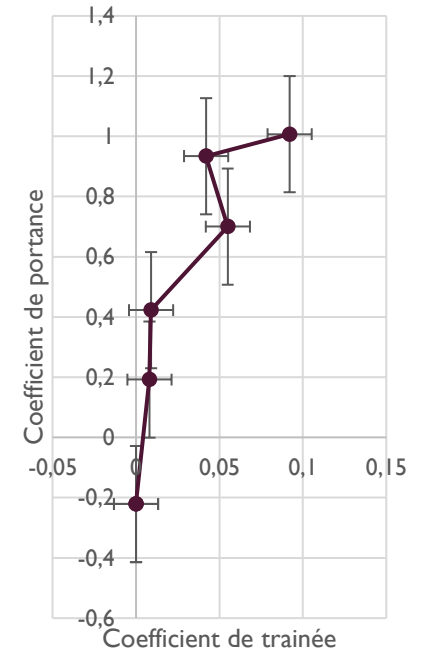
Cz pour le vol de dos du profil NACA 2412



Cx/AoA NACA 2412



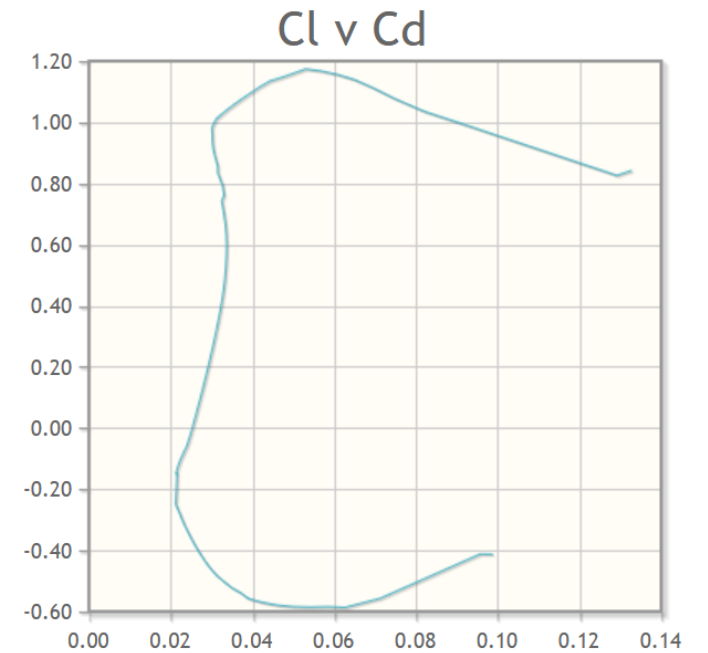
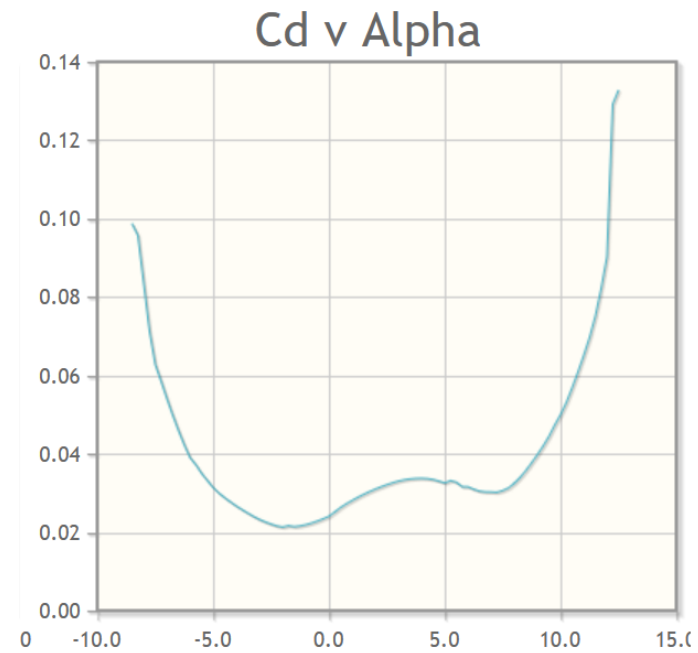
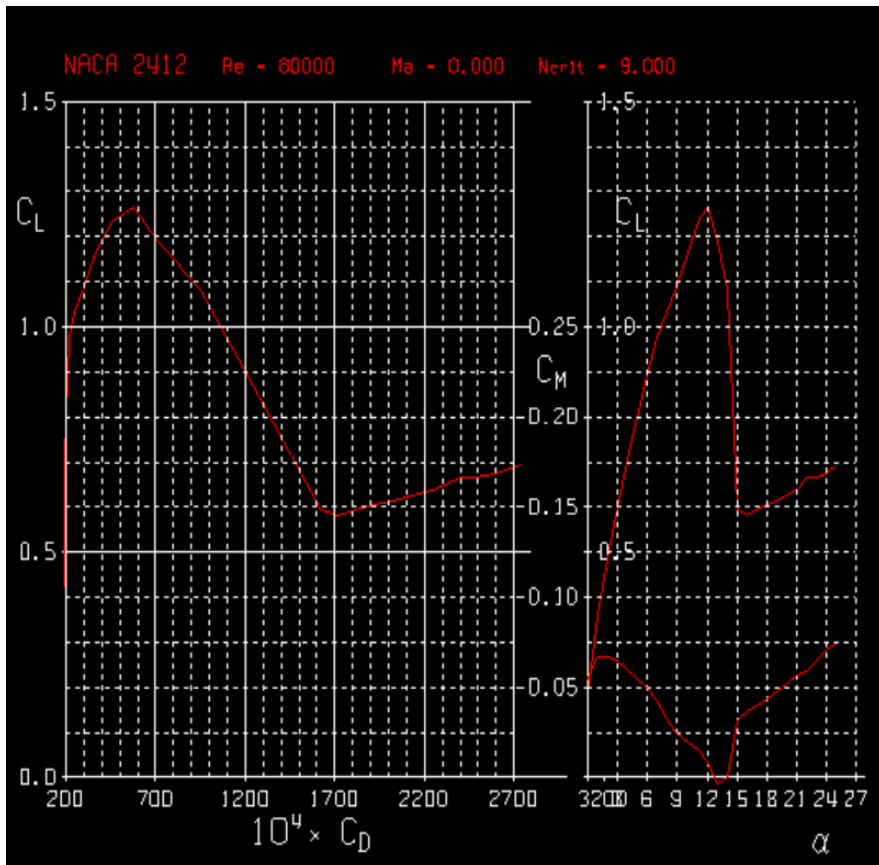
Cz/Cx NACA 2412



En reprenant les formules présentées dans la partie théorique on trouve :

$$C_{z/x} = \frac{2R_{z/x}}{\rho S v^2}$$

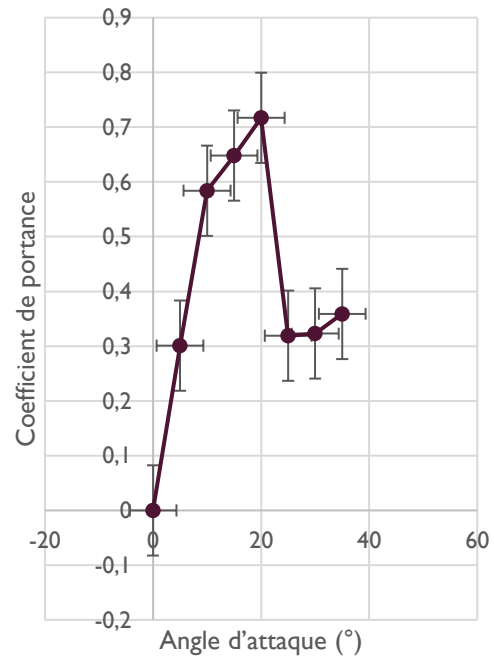
COMPARAISON AVEC LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE-NACA2412



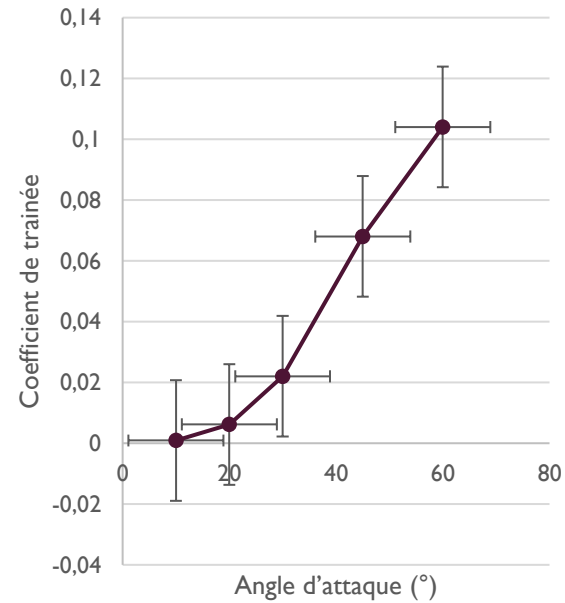
Re = 50 000

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS-NACA E475

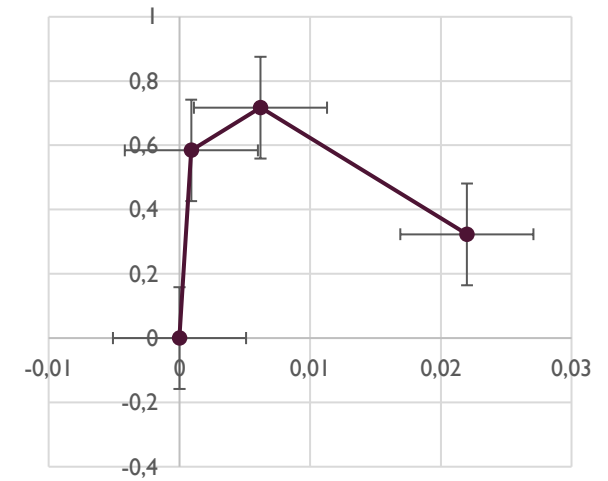
Cz Vol de dos NACA E475



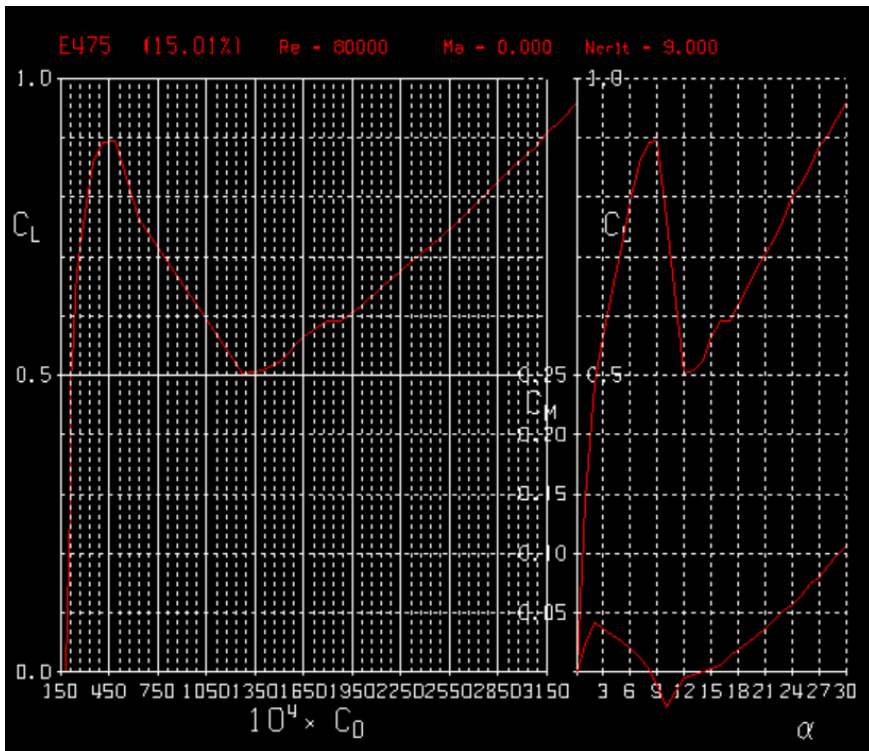
Cx/AoA



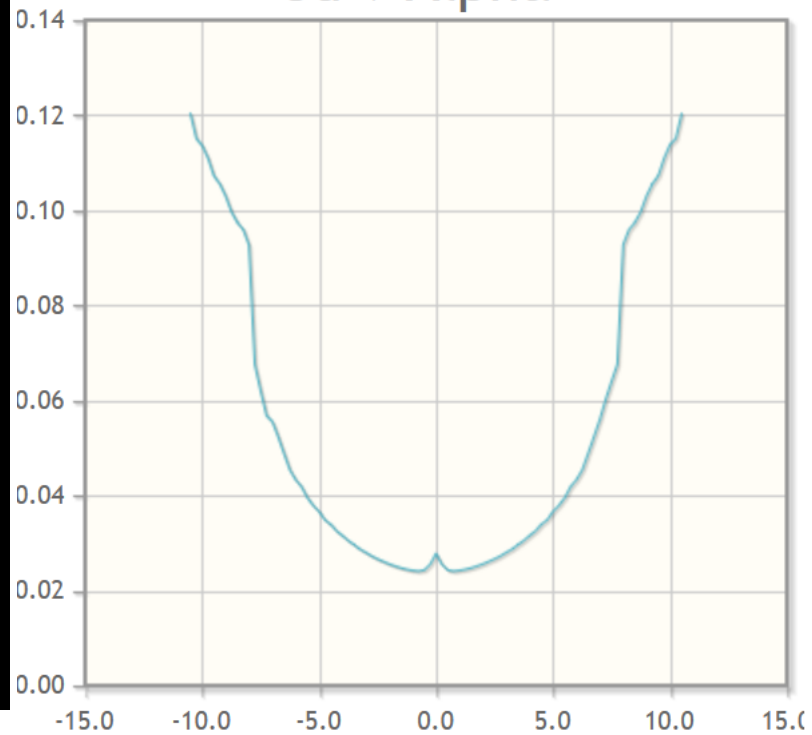
Cz/Cx



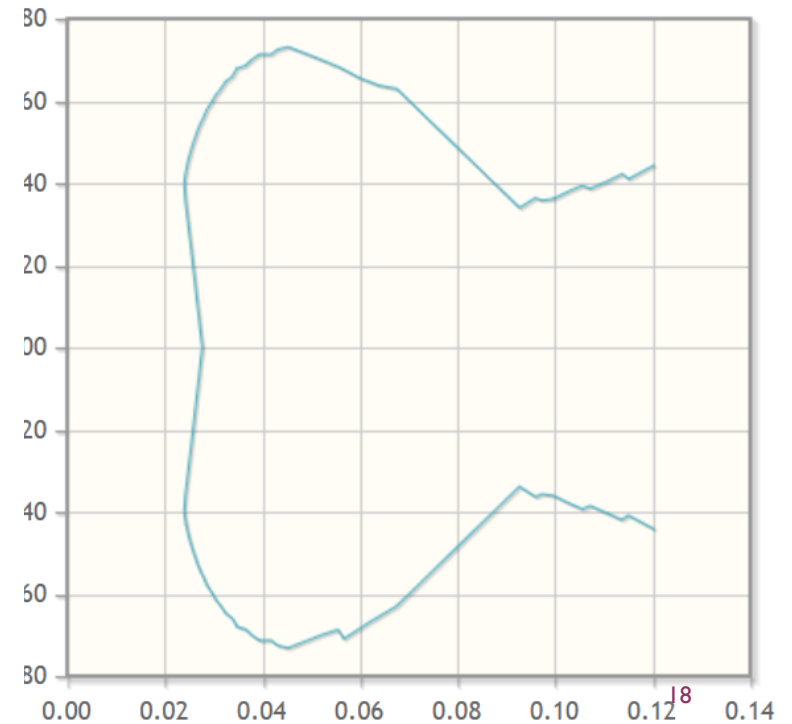
COMPARAISON AVEC LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE-NACA E475



Cd v Alpha



Cl v Cd



CONCLUSION



Les profils d'aile d'avions de voltiges tendent donc vers des performances médiocre en croisière, de par leur faible portance et plus grande trainée. Cependant, la zone de décrochage était plus nettement défini que dans le cas d'un avion de loisir, il est plus aisé d'entrer dans de nombreuses figures aériennes. Enfin la symétrie du profil favorise le vol de dos, beaucoup plus difficile à maintenir sur un avion de loisir.

ANNEXE-BERNOULLI

D'après l'équation de Navier-Stokes on a avec les notations conventionnelles, d'un écoulement stationnaire d'un fluide incompressible parfait :

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} \right) = -\vec{\nabla} p + \Delta \vec{v} + \rho \vec{g}$$

On a de plus $\vec{\nabla} v^2 = 2 \left(\vec{v} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{v}) \right) + 2(\vec{v} \cdot \vec{\Delta}) \vec{v}$

donc $(\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} = \vec{\nabla} \left(\frac{v^2}{2} \right) - \vec{v} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{v})$

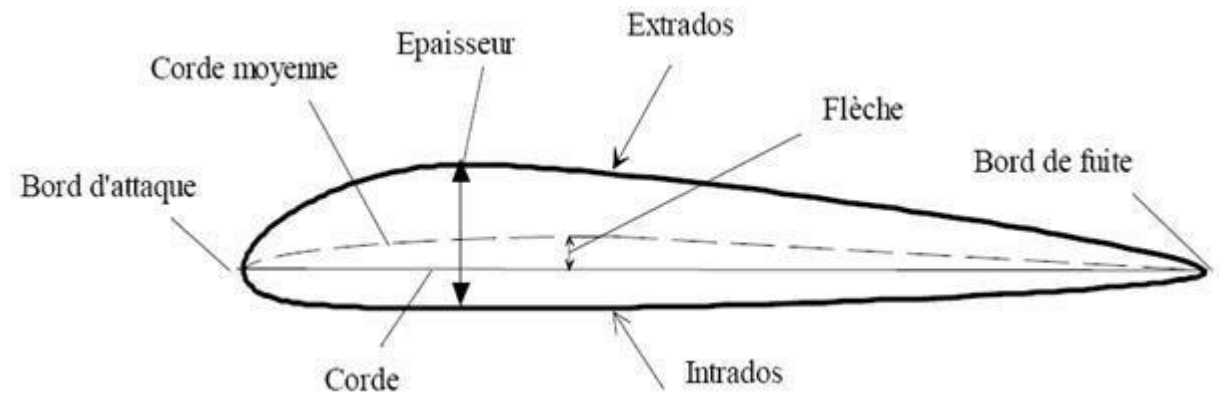
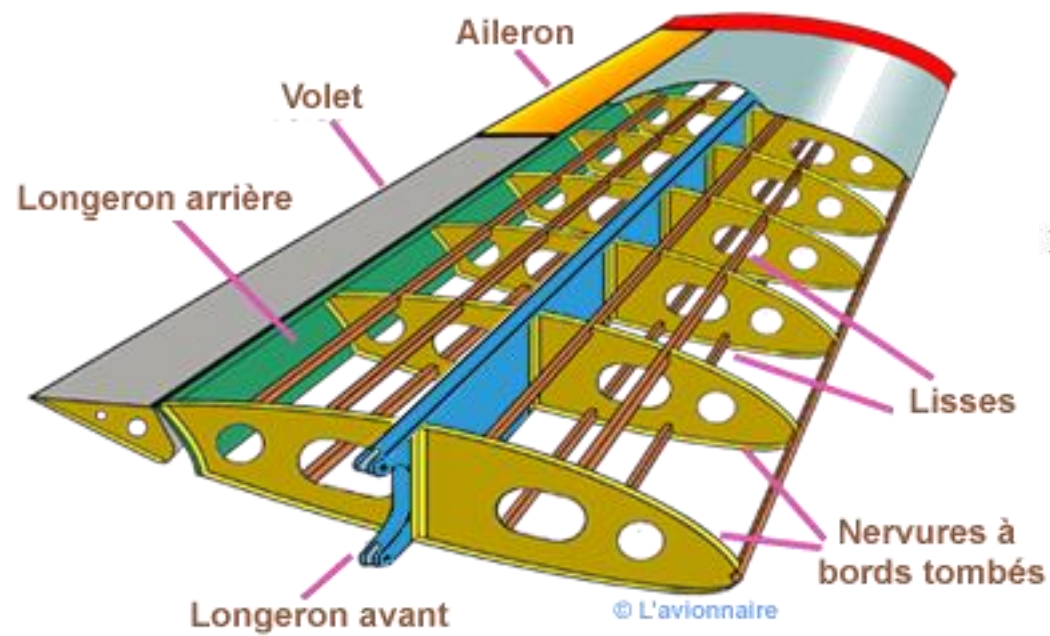
Finalement comme $\vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{v}) = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{v}) - \Delta \vec{v}$

On a $\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{\nabla} \left(\frac{v^2}{2} \right) - \vec{v} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{v}) \right) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \left(\frac{\vec{\nabla} \cdot \vec{v}}{=0} \right) - \vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{v}) + \rho g$

Puisque l'écoulement est stationnaire, irrotationnel; en supposant que le poids soit négligeable on aboutit à :

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \vec{\nabla} \wedge \vec{v} = 0 \text{ et } \rho g = 0 \text{ donc } \rho \left(\vec{\nabla} \left(\frac{v^2}{2} \right) \right) = -\vec{\nabla} p \Rightarrow \vec{\nabla} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 + p \right) = 0 \Rightarrow \frac{1}{2} \rho v^2 + p = cste$$

STRUCTURE D'UNE AILE



<https://aeronautique.meabilis.fr/les-bases-du-pilotage/connaissances-de-l-avion/vocabulaire.html>

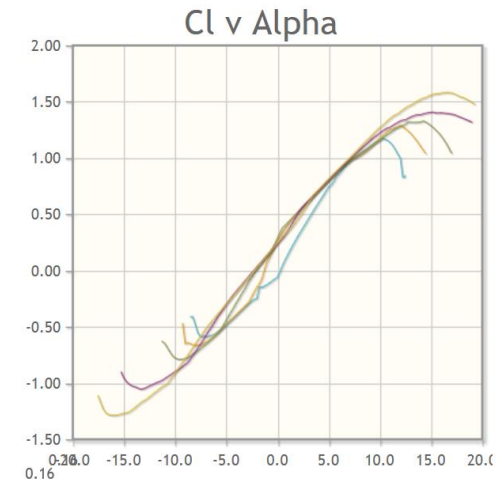
NOMBRE DE REYNOLDS

Le nombre de Reynolds caractérise la transition entre le régime laminaire du fluide autour de l'aile et le régime turbulent. Il a donc un effet sur les performances des ailes, qui à même profil mais nombre de Reynolds différents, ne présenteront pas exactement les mêmes caractéristiques.

Il a pour formule associée :

$$Re = \frac{\rho \|(\vec{v} \cdot \vec{v})\vec{v}\|}{\eta \|\Delta\vec{v}\|} \text{ ce qui se simplifie dans le cas unidimensionnel par } Re = \frac{\rho VL}{\eta}$$

Avec η la viscosité dynamique du fluide.



Exemple des changements de performances selon le nombre de Reynolds sur le profil naca 2412

Mes mesures ont été réalisées à une température de $20,5^{\circ}\text{C}$ et avec un vent relatif allant aux alentours de $10\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Ainsi j'ai $Re \approx 8 * 10^4$