

# Identification Expérimentale des Coefficients Aérodynamiques

2024 - Romain LAMBERT

## Résumé

Ce bureau d'étude a pour sujet l'identification expérimentale des coefficients aérodynamiques. L'objectif final étant de déterminer un protocole expérimental permettant de mesurer l'angle d'incidence d'un kite ; en vue d'obtenir une polaire expérimentale des voiles.

## I. TRAVAUX PRÉCÉDENTS (ZOÉ MARCELET)

### A. Modèle Lagrangien

D'après le document "*Dynamics and Control of Single-Line Kites*" de Gonzalo Sanchez-Arriaga (2006), les formules suivantes permettent d'obtenir l'élévation  $\Gamma$  et l'angle d'incidence du vent  $\theta$ , en fonction du vent et des coefficients aérodynamiques du kite :

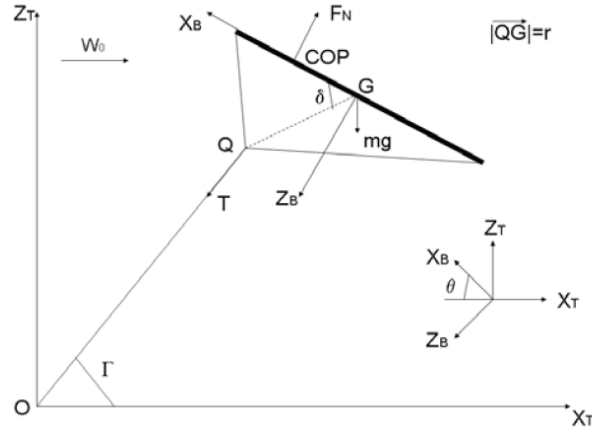


FIGURE 1. Schéma du kite au Zénith.

La première équation donne l'angle d'incidence  $\theta$  :

$$\cos(\delta - \theta) + \beta(\sigma - \cos(\delta))C_N(\theta) = 0 \quad (1)$$

La deuxième équation donne l'angle d'élévation  $\Gamma$  :

$$\Gamma = \tan^{-1}\left(\frac{\beta C_N(\theta)\cos(\theta) - 1}{\beta C_N(\theta)\sin(\theta)}\right) \quad (2)$$

Avec  $\beta = \frac{\rho A W_0^2}{2mg}$  et  $\sigma = \frac{X_{cp}}{r}$

Ces équations ont été codées (disponible sur Nextcloud : 06-RESSOURCE/AC-Admin Commun/4-Rapports Stagiaires/Stage Zoé Marcellet/Rapport\_zozo/06\_Topic\_modèle\_aéro\_zenith).

**Elles restent cependant peu concluantes car requièrent les coefficients aérodynamiques du kite.**

## II. MESURE DE L'ANGLE D'INCIDENCE AU ZÉNITH

### A. Problème de l'angle de calage $\alpha_0$

Une première intuition nous amène à penser que la connaissance de l'angle d'élévation et de la géométrie des bridages permet de remonter à l'angle d'incidence  $\alpha$

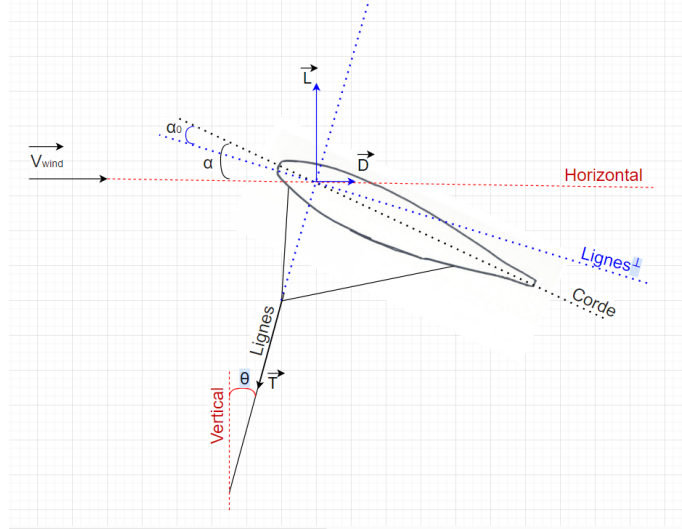


FIGURE 2. Schéma des angles qui paramètrent le Zénith.

La figure 2, l'angle  $\alpha_0$  dépend de considération aérodynamique, car :

$$\frac{L}{D} = \frac{1}{\tan(\theta)} = \frac{1}{\tan(\alpha + \alpha_0)} \quad (3)$$

Ainsi, l'angle que fait le cône de bridage avec les lignes qui le relient au sol s'adapte (via l'angle  $\alpha_0$ ) de sorte à aligner les efforts aérodynamiques avec les lignes des avants. Ainsi, cette angle permet de lier "géométrie" et "aérodynamique" :

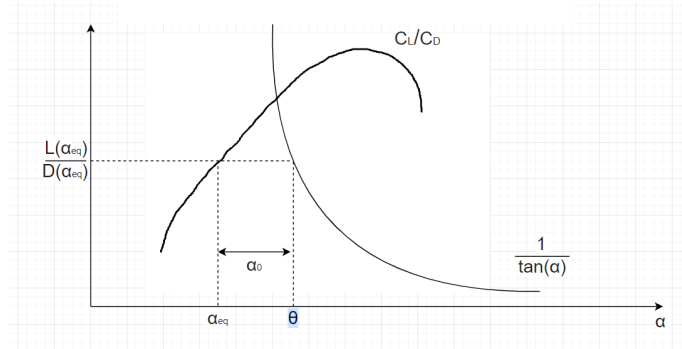


FIGURE 3. Graphique du lien entre finesse (aérodynamique) et l'angle  $\alpha_0$

**Cependant**, la formule à l'équilibre suivante (voir "equilibre kite" pour demo) :

$$x_T = \frac{Lx_F - Px_G - C_{M_0}}{L - P} \quad (4)$$

montre qu'en **vent fort**, pour  $C_{M_0} = 0$ ,  $x_T = x_F$ , et donc on peut déterminer géométriquement  $\alpha_0$  ! **Donc la mesure de l'angle  $\theta$  permet de remonter à  $\alpha$  et à la finesse  $\frac{L}{D}$**

### B. Utiliser un capteur de tension pour les A et les B au niveau du kite

L'idée est que notre système {kite+bridages} se comporte comme un pendule inversé. Mesurer les tensions dans les A et les B permet de mesurer la position de la résultante aérodynamique le long du kite et ainsi de prédire son angle d'incidence  $\alpha$  en s'affranchissant de la polaire aérodynamique du kite.

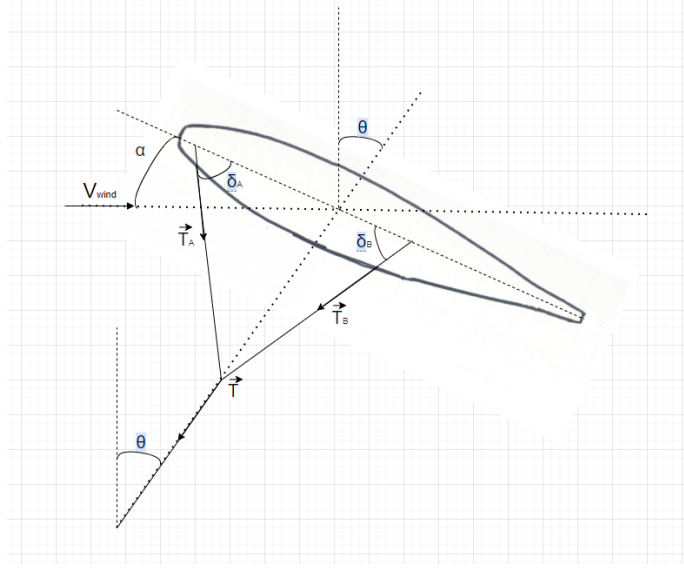


FIGURE 4. Schéma des tensions dans les bridages

Le graphe 4 permet d'écrire la relation suivante :

$$T_A \cos(\delta_A) - T_B \cos(\delta_B) = T \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha - \theta\right) \quad (5)$$

et ainsi d'en déduire :

$$\alpha = \theta + \sin^{-1}\left(\frac{T_B \cos(\delta_B) - T_A \cos(\delta_A)}{T}\right) \quad (6)$$

Ainsi, on peut déterminer l'angle d'incidence  $\alpha$  à partir de :

- $T$  : la tension des avants ( capteur "3 axes" )
- $\theta$  :  $\frac{\pi}{2}$  - l'angle d'élévation (capteur "IMU")
- $T_A$  : la tension dans les A au point d'attache du kite (capteur "cyclops")
- $T_B$  : la tension dans les B au point d'attache du kite (capteur "cyclops")
- $\delta_A$  : l'angle des A par rapport à la corde moyenne du kite (surfplan ou au laser)
- $\delta_B$  : l'angle des B par rapport à la corde moyenne du kite (surfplan ou au laser)

### C. La sonde pitot

L'équilibre au Zéntih permet d'obtenir :

$$\begin{cases} L = P + T \sin(\theta) \\ D = T \cos(\theta) \\ 0 = C_{M_0} + (x_T - x_F)(L \cos(\alpha) + D \sin(\alpha)) - P \cos(\alpha)(x_T - x_G) \end{cases} \quad (7)$$

Ainsi, couplé avec les résultats du chapitre II-B, on peut mesurer  $L(\alpha)$ ,  $D(\alpha)$  et  $\alpha$  à partir des capteurs cités dans ce même chapitre. Cependant, la connaissance du vent en altitude, à 50m de haut, est incertaine et l'ajout de la sonde pitot, fixée à un kite stable, permet d'obtenir avec précision les coefficients  $SC_L$  et  $SC_D$  via :

$$\begin{cases} L = \frac{1}{2} \rho V^2 SC_L \\ D = \frac{1}{2} \rho V^2 SC_D \end{cases} \quad (8)$$

Les modèles de couches limites sont de la forme

$$u(z) = -C\mu e^{\frac{z}{\lambda}} \sin\left(\frac{z}{\lambda}\right) \quad (9)$$

où les différents coefficients sont caractéristiques du lieu. (**Source** : Sébastien Blein. *Observation et modélisation de couche limite atmosphérique stable en relief complexe : le processus turbulent d'écoulement catabatique*. Météorologie. Université Grenoble Alpes, 2016. Français. [ffNNT : 2016GREAI023ff](#). [fftel-01622676f](#) - équation 2.69 du chapitre 2.3.1 (modèle de Prandtl)).

**Ainsi, on propose de mesurer les vitesses à différentes hauteurs grâce à la sonde pitot afin d'établir un modèle de couche limite pour un lieu (*plage de Pereire*) et une provenance de vent (*Nord-Ouest-Sud*) [l'état de la couche limite dépend des obstacles qui précèdent le lieu de mesure]**

#### D. Conclusion

Muni des capteurs

- 3 axes
- IMU
- Cyclops
- Sonde pitot

On propose de :

- Mesurer  $\alpha$  grâce à l'équation 6, et le couple  $(L(\alpha); D(\alpha))$  grâce à l'équation 7. Répéter l'essai pour différentes valeurs de **TowPoint**
- Déterminer un modèle de couche limite grâce à la sonde pitot en mesurant des valeurs de vitesse vent à différentes hauteurs (*réunion avec Delft mercredi 16/10 et voir avec mecatro pour filtrer/moyenner mesures*)
- Déduire grâce à 8 les coefficients aéro au zénith.