

BEYOND THE SEA

Protocoles Mesures Expérimentales

Kite Design

Rapport



beyond the sea®
by Yves Parlier

January, 2025

Contents

1	Introduction	3
2	Travaux précédents (Zoé Marcelet)	4
2.1	Modèle Lagragien	4
3	Mesure de l'angle d'incidence au Zénith	6
3.1	Problème de l'angle de calage α_0	6
3.2	Utiliser un capteur de tension pour les A et les B au niveau du kite .	7
3.3	La sonde pitot	8
3.4	Les modèles de couches limites sont de la forme	9
3.5	Conclusion	10
4	Mesure de l'angle d'incidence en dynamique	12
4.1	Calcul de la finesse en pleine fenêtre	12
4.2	Influence des lignes	13

Chapter 1

Introduction

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.

Chapter 2

Travaux précédents (Zoé Marcelet)

2.1 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 Γ et l'angle d'incidence du vent θ , en fonction du vent et des coefficients aérodynamiques du kite :

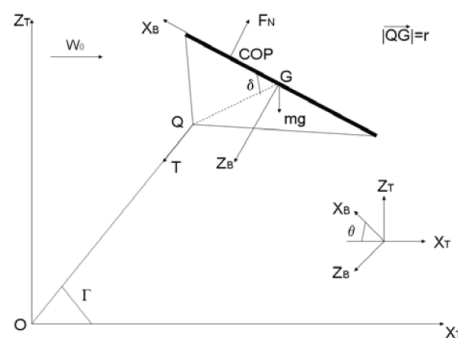


Figure 2.1: Schéma du kite au Zénith.

La première équation donne l'angle d'incidence θ :

$$\cos(\delta - \theta) + \beta(\sigma - \cos(\delta))C_N(\theta) = 0 \quad (2.1)$$

La deuxième équation donne l'angle d'élévation Γ :

$$\Gamma = \tan^{-1}\left(\frac{\beta C_N(\theta)\cos(\theta) - 1}{\beta C_N(\theta)\sin(\theta)}\right) \quad (2.2)$$

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 Marcelet/Rapport_zozo/06_Topic_modèle_aéro_zer)

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

Chapter 3

Mesure de l'angle d'incidence au Zénith

3.1 Problème de l'angle de calage α_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 α

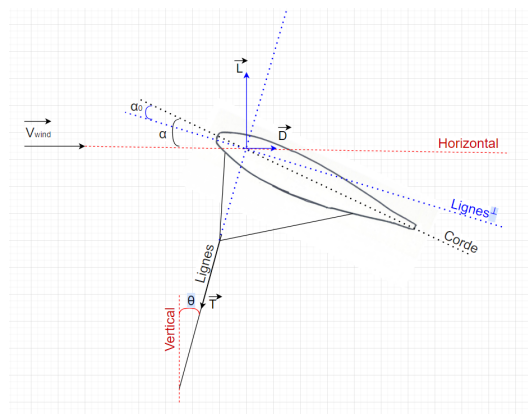


Figure 3.1: Schéma des angles qui paramètrent le Zénith.

La figure 3.1, l'angle α_0 dépend de considération aérodynamique, car :

$$\frac{L}{D} = \frac{1}{\tan(\theta)} = \frac{1}{\tan(\alpha + \alpha_0)} \quad (3.1)$$

Ainsi, l'angle que fait le cône de bridage avec les lignes qui le relie au sol s'adapte (via l'angle α_0) de sorte à aligner les efforts aérodynamiques avec les lignes des avants. Ainsi, cette angle permet de lier "géométrie" et "aérodynamique" :

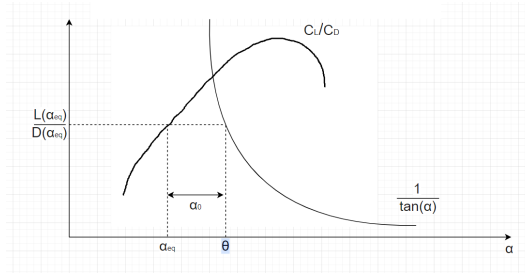


Figure 3.2: Graphique du lien entre finesse (aérodynamique) et l'angle α_0

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

$$x_T = \frac{Lx_F - Px_G - C_{M_0}}{L - P} \quad (3.2)$$

montre qu'en **vent fort**, pour $C_{M_0} = 0$, $x_T = x_F$, et donc on peut déterminer géométriquement α_0 ! **Donc la mesure de l'angle θ permet de remonter à α et à la finesse $\frac{L}{D}$**

3.2 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 α en s'affranchissant de la polaire aérodynamique du kite.

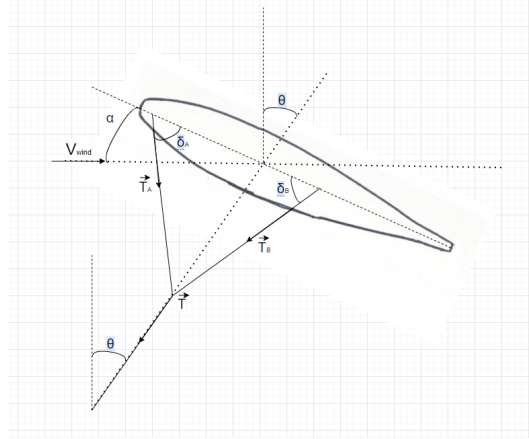


Figure 3.3: Schéma des tensions dans les bridages

Le graphique 3.3 permet d'écrire la relation suivante :

$$T_A \cos(\delta_A) - T_B \cos(\delta_B) = T \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha - \theta\right) \quad (3.3)$$

et ainsi d'en déduire :

$$\alpha = \theta + \sin^{-1}\left(\frac{T_B \cos(\delta_B) - T_A \cos(\delta_A)}{T}\right) \quad (3.4)$$

Ainsi, on peut déterminer l'angle d'incidence α à partir de :

- T : la tension des avants (capteur "3 axes")
- θ : $\frac{\pi}{2}$ - 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")
- δ_A : l'angle des A par rapport à la corde moyenne du kite (surfplan ou au laser)
- δ_B : l'angle des B par rapport à la corde moyenne du kite (surfplan ou au laser)

3.3 La sonde pitot

L'équilibre au Zénith permet d'obtenir :

$$\begin{cases} L = P + T \sin(\theta) \\ D = T \cos(\theta) \\ 0 = C_{M_0} + (x_T - x_F)(L \cos(\alpha) + D \sin(\alpha)) - P \cos(\alpha)(x_T - x_G) \end{cases} \quad (3.5)$$

Ainsi, couplé avec les résultats de la section 3.2, on peut mesurer $L(\alpha)$, $D(\alpha)$ et α 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 :

$$\begin{cases} L = \frac{1}{2} \rho V^2 SC_L \\ D = \frac{1}{2} \rho V^2 SC_D \end{cases} \quad (3.6)$$

3.4 Les modèles de couches limites sont de la forme

$$u(z) = -C \mu e^{\frac{z}{\lambda}} \sin\left(\frac{z}{\lambda}\right) \quad (3.7)$$

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)).

Un autre modèle est celui proposé par Fechner et Schmehl **en 2013** dans "Model-Based Efficiency Analysis of Wind Power Conversion by a Pumping Kite Power System" :

$$v_{w,exp} = v_{w,ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (3.8)$$

Avec $v_{w,ref}$ la vitesse de référence à z_{ref} , et α un coefficient dont la valeur standard est 1/7, là où en offshore α vaut plutôt 0.11

Aussi, la connaissance de ρ est nécessaire. La formule suivante peut être utilisée :

$$\rho = \rho_0 e^{-\frac{z}{H_\rho}} \quad (3.9)$$

avec $H_\rho = 8 : 55 \text{ km}$ et $\rho_0 = 1.225 \text{ Kg.m}^{-3}$

Un autre modèle, meilleur, sera proposé plus tard par Fechner **en 2015** dans "Dynamic Model of a Pumping Kite Power System" est :

$$v_{w,log} = v_{w,ref} \frac{\log(z/z_0)}{\log(z_{ref}/z_0)} \quad (3.10)$$

avec z_{ref} la hauteur de référence et z_0 la hauteur de rugosité. Ainsi, avec la mesure du vent à deux hauteurs on peut obtenir le profil de couche limite atmosphérique.

En combinant les équations 3.8 et 3.10, on obtient :

$$v_w = v_{w,log} + K(v_{w,log} - v_{w,exp}) \quad (3.11)$$

Et

$$\alpha = \frac{\log(v_{w,exp}(z_1)/v_{w,ref})}{\log(z_1) - \log(z_{ref})} \quad (3.12)$$

On devrait ainsi obtenir des courbe de la forme :

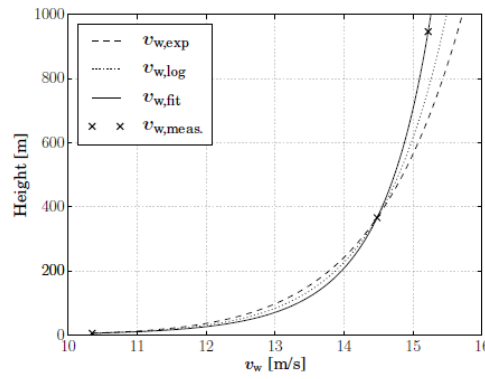


Figure 3.4: Profil type d'une Couche Limite Atmosphérique (Fechner 2015)

Dans la figure 3.4, $v_{w,fit}$ et la courbe obtenue à partir de 3 mesures $v_{w,meas}$.

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]

3.5 Conclusion

Muni des capteurs

- 3 axes
- IMU
- Cyclops
- Sonde pitot

On propose de :

-
- Mesurer α grace à l'équation 3.4, et le couple $(L(\alpha); D(\alpha))$ grace à l'équation 3.5. 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*)
 - Dédire grâce à 3.6 les coefficients aéro au zénith.

Chapter 4

Mesure de l'angle d'incidence en dynamique

4.1 Calcul de la finesse en pleine fenêtre

En l'absence d'angle de calage ($\alpha_0 = 90^\circ$), on a l'équilibre dynamique qui devient :

$$L\sin(\theta) - D\cos(\theta) = t\sin(\alpha_0) \Rightarrow \frac{D}{L} = \tan(\alpha) \quad (4.1)$$

ainsi, Fechner et Schmehl dans "Model-Based Efficiency Analysis of Wind Power Conversion by a Pumping Kite Power System" proposent :

$$v_a^2 = (v_w \cos(\beta) \cos(\Phi) - v_{t,0})^2 (1 + (\frac{L}{D})^2) \quad (4.2)$$

par relation de pythagore, avec ici β est l'angle d'élévation, Φ l'angle azimuth, et $v_{t,0}$ la reel_out speed utilisée par kite-power (nul dans notre cas d'un point fixe)

Finalement on obtient la relation :

$$v_a = (\cos(\beta)\cos(\Phi) - \frac{v_{t,0}}{v_w})v_w\sqrt{1 + (\frac{L}{D})^2} \quad (4.3)$$

Cette relation permet d'obtenir la finesse du kite, en shoot (vitesse max) en fonction de l'élévation, du vent réel, et du vent relatif !

4.2 Influence des lignes

Quand on parle de finesse, on parle en réalité de la **finesse de l'ensemble du système Kite + Ligne**, soit $finesse = \frac{C_L^k}{C_D^k + C_D^{lignes}}$

Fechner et Schmehl dans "Model-Based Efficiency Analysis of Wind Power Conversion by a Pumping Kite Power System" proposent pour prendre en compte la traînée des lignes supérieures uniquement, la portion des lignes qui se déplace à la vitesse du kite, la portion inférieure étant alors considérée fixe :

$$C_{D,eff}^{lignes} \approx 0.31\bar{l} \frac{d}{A_{kite}} C_D^{lignes} \quad (4.4)$$

Dès lors on a $C_D = C_D^k + C_{D,eff}^{lignes}$ et **en l'absence d'angle de calage**:

$$F_{t,max} = \frac{1}{2}\rho v_a^2 A_{kite} C_D \sqrt{1 + (\frac{L}{D})^2} \quad (4.5)$$