

BEYOND THE SEA

Etude du diamètre et de la cambrure d'un kite

Kite Design

Rapport



beyond the sea®
by Yves Parlier

December, 2024

Contents

1	La théorie	3
1.1	Regresion de Breukels : théorie 2D	3
2	Le Code	5
2.1	Le cas d'étude - 2D	5
2.2	Le cas d'étude - 3D	6
3	Les Résultats	8
3.1	2D - résultats par alpha	8
3.2	2D - résultats moyennes pondérées par Gaussienne	9
3.3	3D - résultats par alpha	9
3.4	3D - résultats moyennes pondérées par Gaussienne	11
3.5	3D - Exemple d'exploitation de résultats 3D	11
4	Etudes Complémentaires	13
4.1	Etude de la position de la cambrure maximale	13
4.2	Stabilité	14
4.3	Optimisation avec Aerosandbox	15
4.4	Optimisation d'un SK5	16
5	Limites	20
5.1	Limite de la Gaussienne	20
5.2	A faire pour la suite	20

Chapter 1

La théorie

1.1 Regresion de Breukels : théorie 2D

Si la VSM permet d'étudier l'aérodynamique 3D d'un kite, elle requiert le calcul des coefficients 2D de chaque section (C_L , C_D , C_M). Afin de limiter le coût de calcul et de se baser sur des polaires adaptées à des profils "non conventionnels", la VSM utilise une formule de regression de Breukels.

Cette formule est issue de résultats obtenus sur des profils typiques de kites à boudin, et ne dépend que du diamètre du boudin et de la cambrure du profil.

$$C_L = \lambda_5 \alpha^3 + \lambda_6 \alpha^2 + \lambda_7 \alpha + \lambda_8 \quad (1.1)$$

avec :

$$\lambda_i = S_x k + S_y \quad (1.2)$$

et :

$$S_i = C_x t^2 + C_y t + C_z \quad (1.3)$$

où les 23 coefficients C_x sont prédéterminés, et (t,k) est le couple (diamètre, cambrure) définit tel que :

$$t = \frac{\text{Diamètre}(BA)}{\text{Corde}}; k = \frac{\max(\text{CoordonnéesExtrados})}{\text{Corde}} \quad (1.4)$$

Ainsi, l'obtention ds coefficients 2D permet ensuite à la VSM d'ajouter l'influence des effets 3D (loi de corde, d'envergure, de route...) sur les coefficients aérodynamiques d'un kite

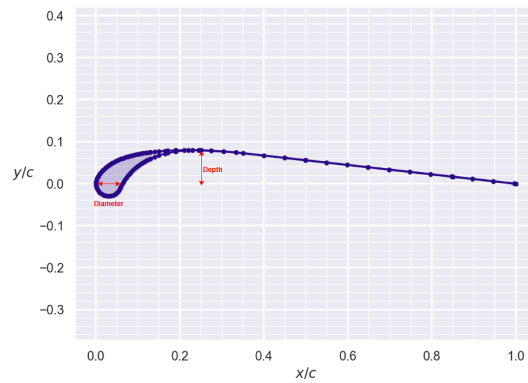


Figure 1.1: Profil central d'une SK50-VG avec identification du diamètre et de la cambrure tel que utilisés par la VSM.

Chapter 2

Le Code

2.1 Le cas d'étude - 2D

On étudie dans un premier temps La fonction de Breukels pour en chercher les optimum. On utilise pour ce faire un code d'optimisation fournit par la bibliothèque **aerosandbox** et on se place dans le cas d'optimisation suivant:

- Maximum de $\sum_{\alpha=0}^{20} \frac{C_L(\alpha)}{C_D(\alpha)} \text{Gaussienne}(\alpha, center, sigma)$

où $\text{Gaussienne}(\alpha, center, \sigma) = e^{-\frac{(center-\alpha)^2}{2\sigma^2}}$ est une Gaussienne permettant d'obtenir une moyenne pondérée.

Les résultats sont présentés dans la partie suivante.

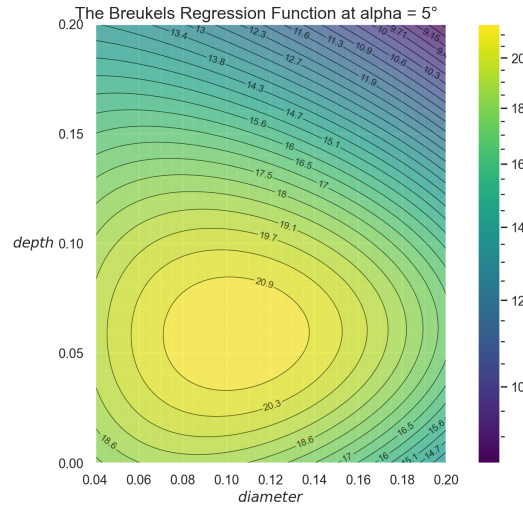


Figure 2.1: Tracer de $\frac{C_L}{C_D}$ par Régression de Breukels à $\alpha=5^\circ$

2.2 Le cas d'étude - 3D

L'étude est réalisée à 50 knots.

On se place dans le cas d'étude d'un SK50-VG dont on fait varier le **diamètre t** entre -0.02 et +0.1 et la **cambrure k** entre -0.1 et 0.1.

On ajoute sur chaque rib les limites suivantes :

- le diamètre ne peut pas être inférieur à 0.04
- la cambrure ne peut pas être inférieure au demi-diamètre

Ainsi, les résultats sont à nuancer : **une aile avec un certain delta de t ou de k ne veut pas dire que toutes les sections ont été modifiées de ce delta; seules les sections respectant ces critères de minimum énoncés précédemment le sont.**

La loi d'évolution de t et k sur une VG est initialement:

- t : [0.07 0.067 0.065 0.063 0.061 0.06 0.06 0.06 0.06 0.06 0.06 0.06 0.06 0.06 0.06 0.061 0.063 0.065 0.067 0.07]
- k : [0.034 0.05 0.0645 0.0686 0.072 0.075 0.08 0.08 0.08 0.08 0.08 0.08 0.08 0.08 0.08 0.075 0.072 0.0686 0.0645 0.05 0.034]

A nouveau, on cherche l'optimum dans le problème d'optimisation suivants:

- Maximum de $\sum_{\alpha=0}^{21} \frac{C_L(\alpha)}{C_D(\alpha)} \text{Gaussienne}(\alpha, \text{center}, \text{sigma})$

Les résultats sont présentés dans la partie suivante.

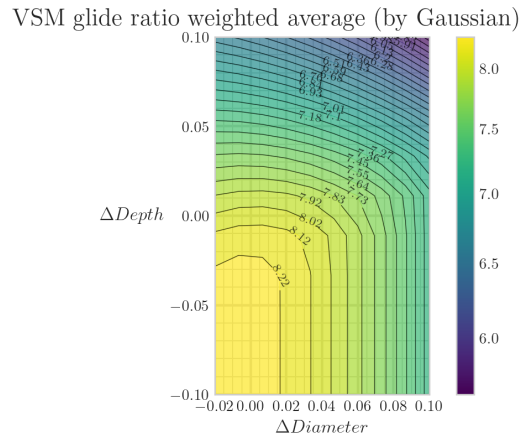


Figure 2.2: Tracer de $\frac{C_L}{C_D} * Gaussian(\alpha_{center} = 7^\circ, \sigma = 8^\circ)$ par VSM en faisant varier (t,k)

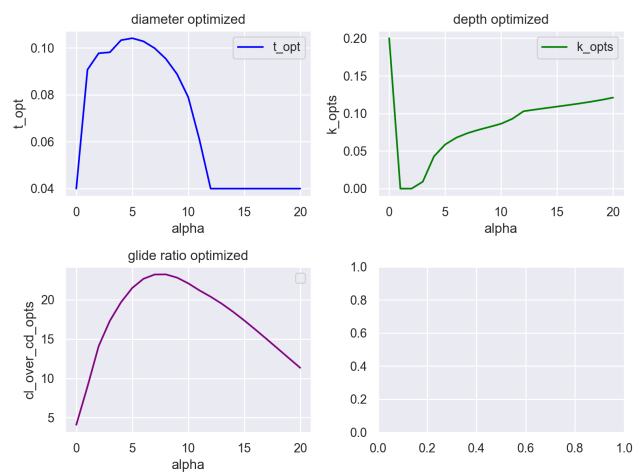
Chapter 3

Les Résultats

3.1 2D - résultats par alpha

α	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
diamètre _{opti}	0.040	0.091	0.098	0.098	0.10	0.10	0.10	0.10	0.095	0.089	0.079	0.061	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040
cambrure _{opti}	0.20	0.00	0.00	0.01	0.04	0.06	0.068	0.074	0.078	0.082	0.086	0.093	0.103	0.105	0.107	0.109	0.111	0.113	0.115	0.118	0.121

(a) Valeurs optimales pour chaque alpha



(b) Tracer de t et k optimaux pour chaque alpha

Figure 3.1: Résultats 2D optimaux (finesse) de diamètre et cambrure par alpha

On observe que pour les grands angles le diamètre optimal tend à être le plus petit possible. La cambrure optimale augmente avec α . Les résultats sont cohérents en ordre de grandeur

3.2 2D - résultats moyennes pondérées par Gaussienne

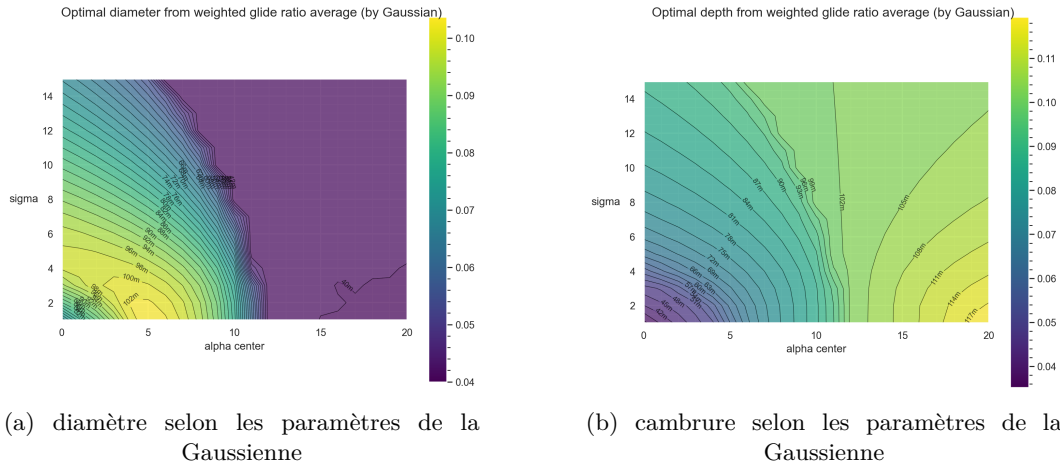


Figure 3.2: Sensibilité des résultats 2D en fonction de l'écart-type σ et de la valeur centrale α_{center} de la Gaussienne

Pour σ proche de zéro (écart-type "très petit"), les résultats convergent vers ceux de la partie précédente.

Le diamètre optimal augmente avec α_{center} (jusqu'à environ 5°) puis diminue avec α_{center} pour des σ inférieurs à 4. Augmenter σ (i.e. "prendre davantage d'angles en considération") tend à diminuer le diamètre pour α_{center} plus grand que 5. Le diamètre optimal sature à sa valeurs minimale au delà de 12° .

La cambrure optimale augmente avec α . Elle augmente avec σ pour alpha inférieur à 12° et diminue avec σ pour alpha plus grand. *

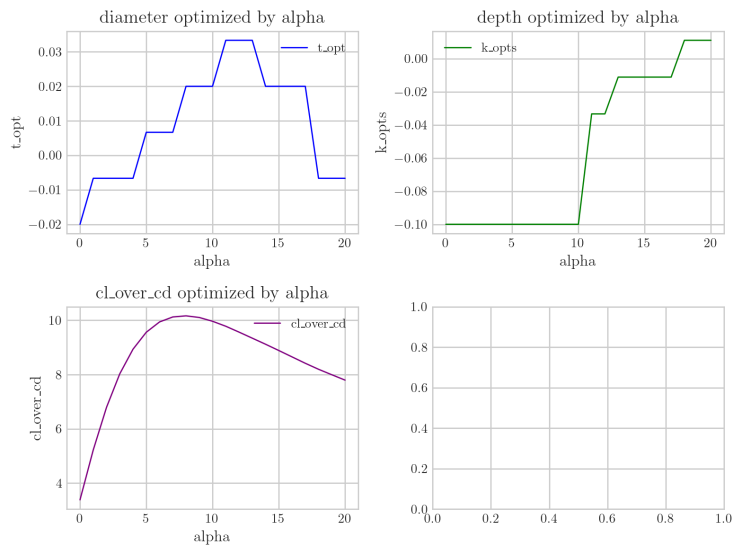
3.3 3D - résultats par alpha

Le tableau suivant présente les résultats obtenu avec la VSM (3D). Les nombres de ribs saturés en diamètre/cambrure sont, pour chaque alpha, les nombre de ribs qui ne pouvaient pas atteindre la valeurs objective (Valeurs initiale + delta) et qui donc sont "saturés" à la valeurs minimal ($\frac{Diamètre}{2}$ pour la cambrure et 0.04 pour le diamètre).

A noter que les ribs initialement à faible diamètre (relatif) sont ceux du bord d'attaque, et que les profils les moins cambré sont aux tips; en témoigne les valeurs initiales de t et k présentés en II.B..

α	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
δ diamètre	-0.02	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.02	-0.02	-0.02	0.033	0.033	0.033	0.02	0.02	0.02	0.02	-0.007	-0.007	-0.007
Nombre ribs saturés en diamètre	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
δ cambrure	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.033	-0.033	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.1
Nombre ribs saturés en cambrure	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	12	12	4	4	4	4	4	0	0	0

(a) Valeurs optimales pour chaque alpha



(b) Tracer de t et k optimaux pour chaque alpha

Figure 3.3: Résultats 3D optimaux (finesse) de diamètre et cambrure par alpha

On observe que le diamètre optimal augmente avec α jusqu'à 13° puis diminue. La cambrure sature à sa valeurs minimale en dessous de 10° puis augmente avec α

3.4 3D - résultats moyennes pondérées par Gaussienne

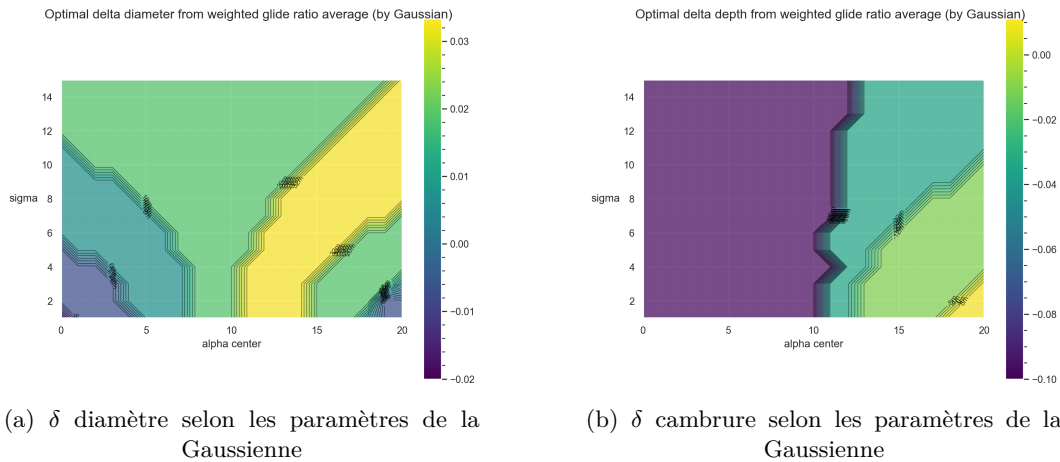


Figure 3.4: Sensibilité des résultats 3D en fonction de l'écart-type σ et de la valeur centrale α_{center} de la Gaussienne

Sur la figure 3.4 (comme sur la figure 3.2), on rappelle que σ proche de zéro signifie un écart-type quasi nul, i.e. on retrouve les mêmes résultats que sur la figure 3.3. A l'inverse, σ grand signifie qu'on augmente l'influence des angles autour de α_{center} sur la moyenne pondérée; fonction objective de l'optimisation.

On observe qu'augmenter σ diminue la cambrure optimale. Le comportement est identique pour le diamètre si α_{center} est supérieur à 15° ; le comportement inverse en dessous de 15°

3.5 3D - Exemple d'exploitation de résultats 3D

Avec une Gaussienne de paramètres **center** = **7°** et **sigma** = **8**, les valeurs qui maximisent la fonction objective (moyenne pondérée de finesse aérodynamique) sont :

- $\delta diameter$: 0.02
- $\delta depth$: -0.1

Les valeurs de diamètre et cambrure optimaux ainsi obtenus en 3D sont :

- t : 0.090 0.086 0.085 0.083 0.081 0.080 0.080 0.080 0.080 0.080 0.080 0.080
0.080 0.080 0.080 0.081 0.083 0.085 0.087 0.090
- k : 0.045 0.043 0.043 0.041 0.040 0.040 0.040 0.040 0.040 0.040 0.040 0.040
0.040 0.040 0.040 0.040 0.041 0.043 0.043 0.045

A comparer avec les valeurs initiales :

- t : 0.07 0.067 0.065 0.063 0.061 0.06 0.06 0.06 0.06 0.06 0.06 0.06 0.06 0.06
0.06 0.061 0.063 0.065 0.067 0.07
- k : 0.034 0.05 0.0645 0.0686 0.072 0.075 0.08 0.08 0.08 0.08 0.08 0.08 0.08 0.08
0.075 0.072 0.0686 0.0645 0.05 0.034

On note donc une tendance (en 3D) à augmenter le diamètre du BA et diminuer la cambrure du kite.

Chapter 4

Etudes Complémentaires

4.1 Etude de la position de la cambrure maximale

Tout d’abord Breukels ne prend en compte que le diamètre et la cambrure maximal d’un profil, **la position de la cambrure maximale d’un profil n’est donc pas prise en compte.**

En conduisant des simulations (VSM) basées cette fois sur des polaires déterminées à partir de NeuralFoil (Aersoandbox), on pense alors capturer l’influence de la position de la cambrure maximale. **On mène l’étude sur des SK50-VG avec $(t,k)=(0.06, 0.08)$:**

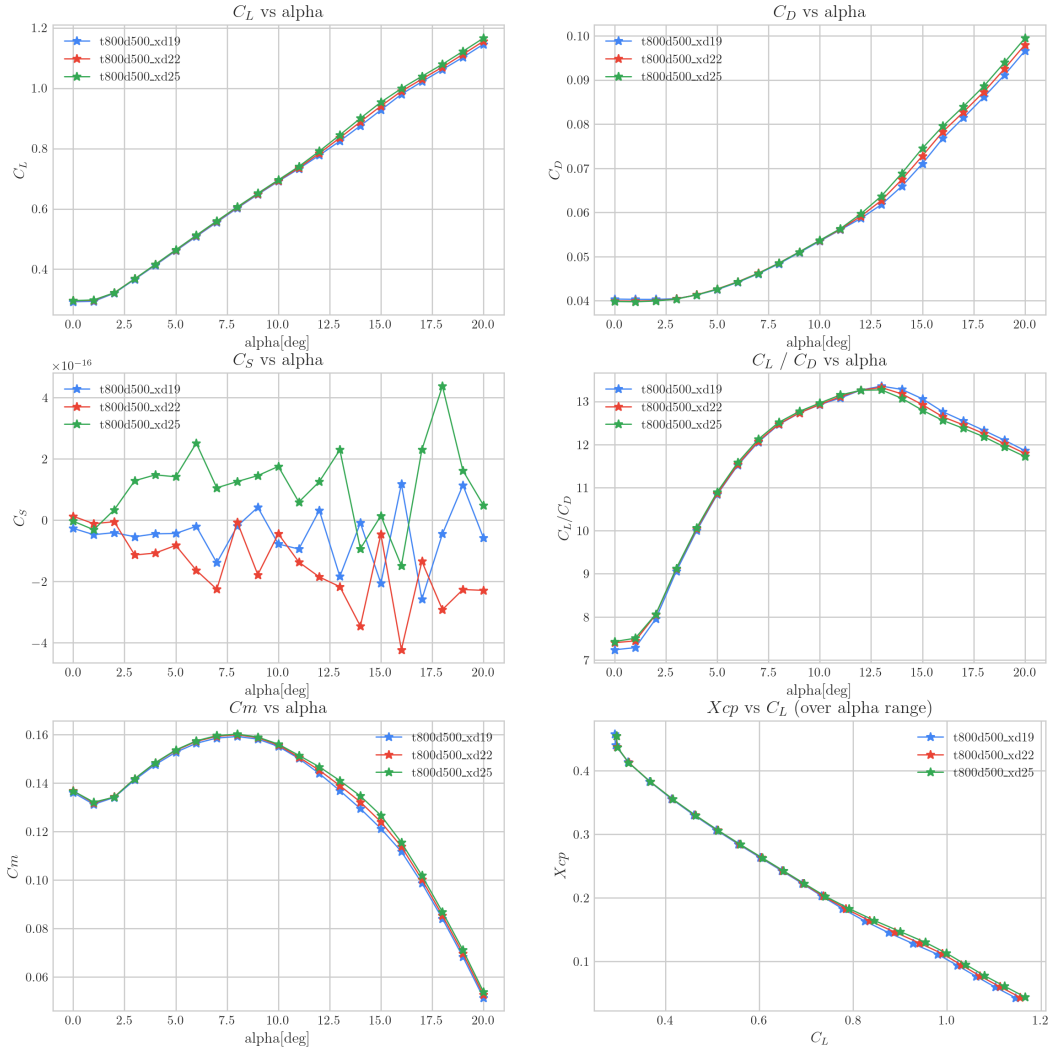


Figure 4.1: Influence de la position de la cambrure maximale

On observe que les résultats sont sensiblement les mêmes à des angles inférieurs à 10° . Cependant au delà de 10° NeuralFoil, qui est basé sur la même théorie que XFOIL (écoulement potentiel + équations couche limite) couplé avec de l'IA, perd en fiabilité.

les résultats semblent donc être quasi-indentiques pour des variations de position de cambrure maximale entre 19% et 25%, aux faibles angles ($<10^\circ$)

4.2 Stabilité

Ensuite, l'étude réalisée **ne fait pas intervenir de critère de stabilité**. En témoignage la figure 4.1, nous avons ajouté l'évolution de X_{cp} , la position du centre de poussée le long de la corde, sur les polaires.

Le raisonnement est le suivant : "Xcp doit être suffisamment faible (effort aérodynamique proche du bord d'attaque) à faible Cl (limite de l'équilibre poids-portance) pour que le moment associé soit suffisamment cabreur et que l'aile ne tende pas à aller vers des Cl plus petits"

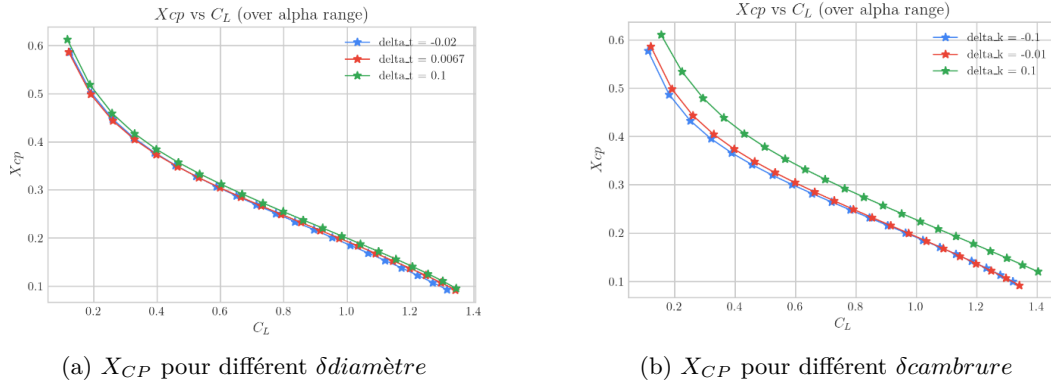


Figure 4.2: Sensibilité de la stabilité du kite aux variations de (t,k)

Il semblerait donc que la cambrure joue un rôle majeur dans la stabilité du kite. Diminuer la cambrure déplace la courbe de X_{CP} vers la gauche et donc stabilise le kite (figure 4.2b). La figure 4.2a montre la faible influence du diamètre de BA sur la stabilité.

Augmenter la cambrure semble donc dégrader la stabilité du kite. Ce résultat semble cohérent puisque augmenter la cambrure tend à augmenter la charge arrière. L'influence du diamètre est négligeable devant celle de la cambrure.

4.3 Optimisation avec Aerosandbox

Finalement les fonctions d'optimisation d'Aerosandbox ne sont pas applicables à la VSM. Elles sont cependant utilisées pour optimiser la fonction de Breukels (2 paramètres).

Aerosandbox peut aussi représenter et optimiser les profils avec 10 paramètres (Kulfan parameters). **Ce n'est pas le sujet de ce papier, cependant c'est une façon différente d'aborder le problème. Ce sera probablement le sujet d'une étude à venir.**

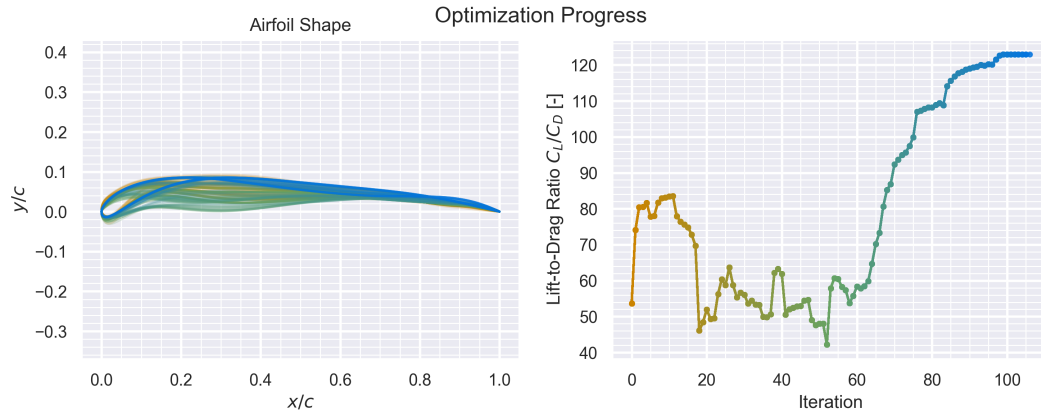
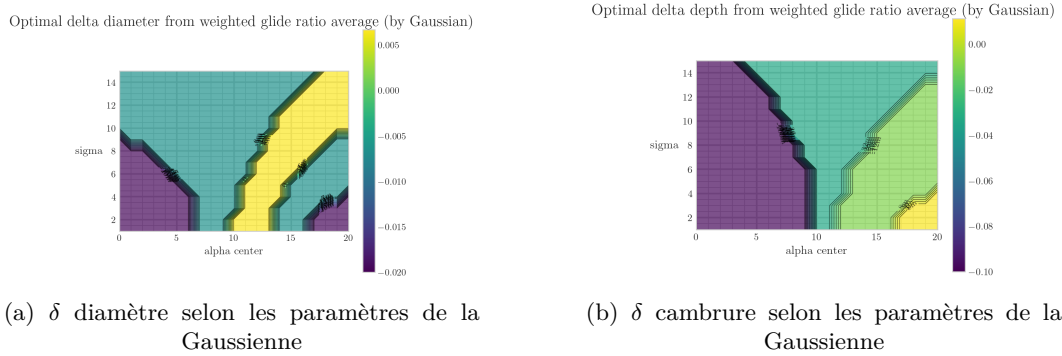


Figure 4.3: Optimisation réalisée avec Aerosandbox sur des profils dis "de Kulfan"

4.4 Optimisation d'un SK5

La même étude que présentée dans ce papier a été réalisée sur un SK5-VB afin de permettre un premier prototype pour Beyond. Voici les résultats :



(a) δ diamètre selon les paramètres de la Gaussienne

(b) δ cambrure selon les paramètres de la Gaussienne

Figure 4.4: sk5 vb VB - Sensibilité des résultats 3D en fonction de l'écart-type σ et de la valeur centrale α_{center} de la Gaussienne

polar SK5-VB Re 8.05e+05 velocity 20.0kts

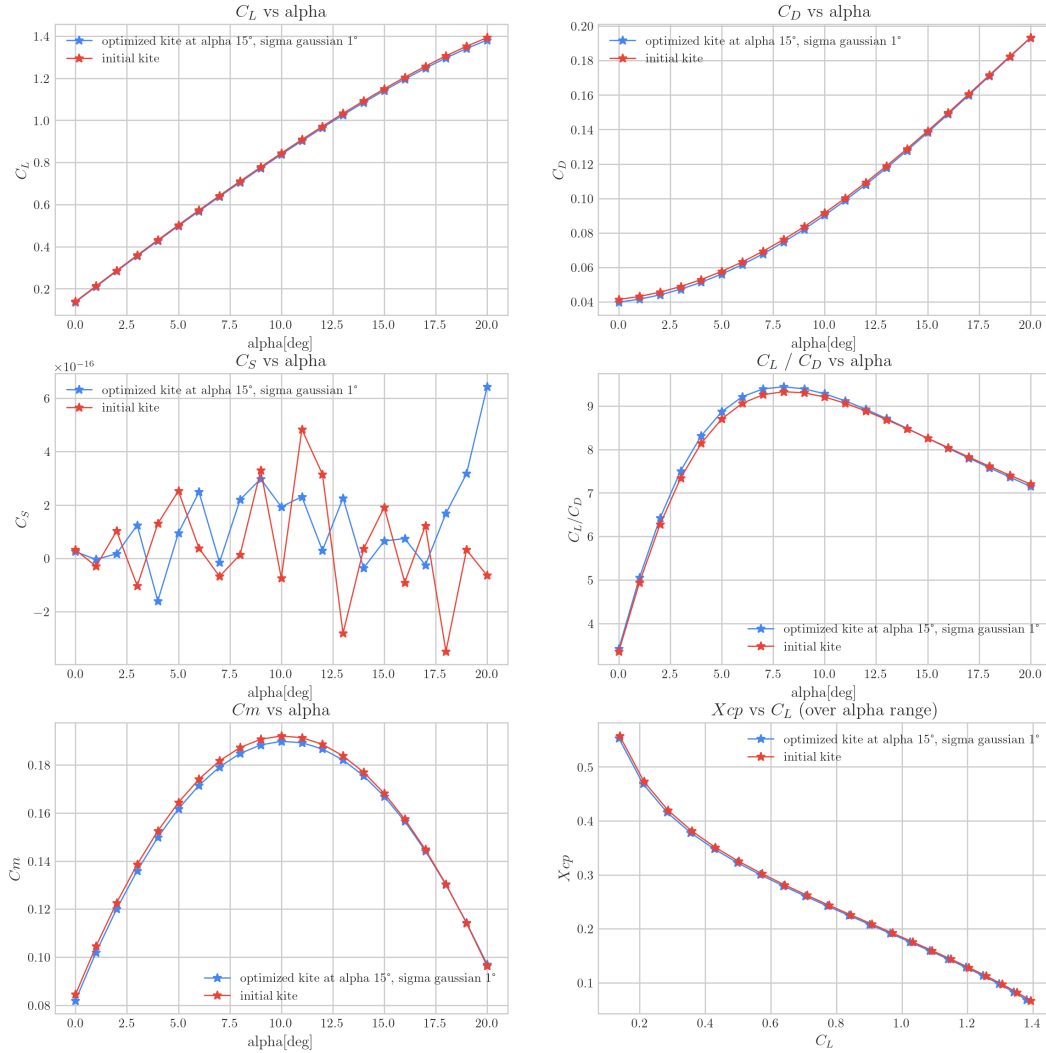


Figure 4.5: Polaire de comparaison

Pour le prochain prototype de SK5 (12/2024) on propose de choisir un $(\delta t, \delta k)$ qui permette d'optimiser la polaire autour de $\alpha = 15^\circ$

Cela correspond à $(\delta t, \delta k) = (-0.0067, -0.0111)$ et une répartition en envergure

:

- t : 0.0866 0.0845 0.0838 0.0821 0.0800 0.0781 0.0767 0.0760 0.0759 0.0760
0.0767 0.0781 0.0800 0.0821 0.0838 0.0845 0.0866
- k : 0.0433 0.0423 0.0534 0.0575 0.0611 0.0641 0.0689 0.0689 0.0689 0.0689
0.0689 0.0641 0.0611 0.0575 0.0534 0.0423 0.0433

A comparer avec le kite initial:

- t : 0.0849 0.0912 0.0905 0.0888 0.0867 0.0847 0.0834 0.0826 0.0826 0.0826
0.0834 0.0847 0.0867 0.0888 0.0905 0.0912 0.0849
- k : 0.0425 0.0500 0.0645 0.0686 0.0722 0.0752 0.08 0.08 0.08 0.08 0.08 0.0752
0.0722 0.0686 0.0645 0.0500 0.0425

La polaire associée est présente sur la figure 4.5

Si on trace l'évolution de $(\delta t_{opti}, \delta k_{opti})$ en fonction de α sans moyenner par une Gaussienne :

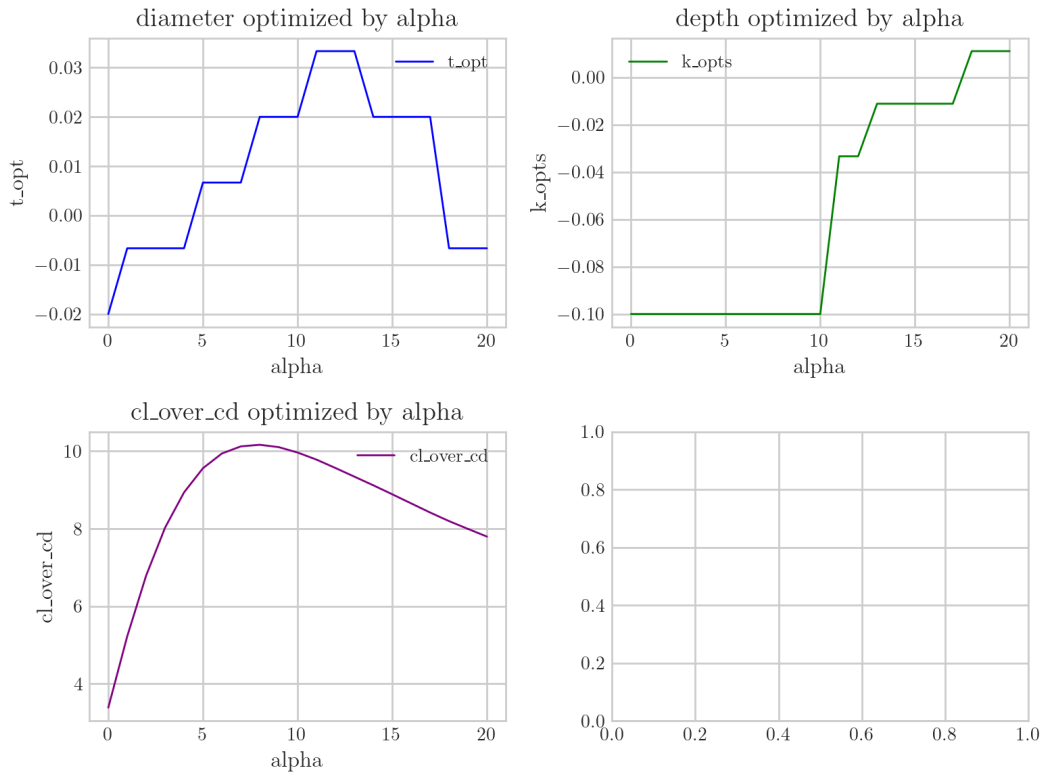
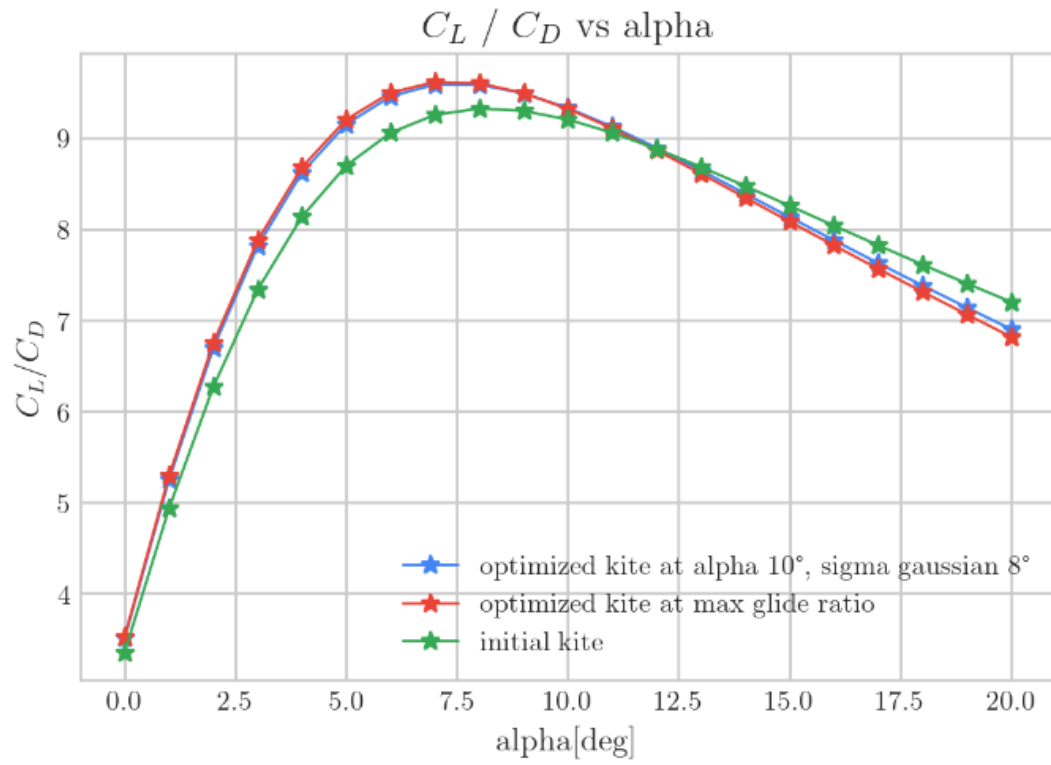


Figure 4.6: Evolution de $(\delta t_{opti}, \delta k_{opti})$ en fonction de α

Figure 4.7: Evolution de $(\delta t_{opti}, \delta k_{opti})$ en fonction de alpha

Chapter 5

Limites

5.1 Limite de la Gaussienne

Le choix de la fonction objective pour la recherche d'un optimum (moyenne pondérée par une Gaussienne) est peu justifiée. Connaître la valeurs d'un angle d'attaque pour lequel on souhaite optimiser une fonction (finesse, stabilité, portance...) permettrait d'avoir un résultat plus pertinent. **Mesurer les angles d'attaques principaux lors des essais kite, peut-être avec l'extended Karmann Filter (EKF)** fournit par Kite Power, permettrait de répondre à ce problème. Le choix de sigma et alpha center dans la Gaussienne sont, eux aussi, criticables.

5.2 A faire pour la suite

- construire $f(\text{diametre}, \text{depth}, \text{depth}_{pos}) = \text{profil}$
- Créer une base de données d'airfoils polars grâce à Aerosandbox ? qui prend en compte les 3 paramètres (diameter, x depth et depth) et les faire tourner en 2D et ou sur la VSM pour trouver le profil optimal
- Faire un chapitre de comparaison des 10m2 classiques vs Hybrid avec profil à caisson, quantifier l'impact de la double peau