

**ESTIMATION PAR LA MÉTHODE DE LIGNE  
PORTANTE DE L'EFFET D'UN VIRAGE SUR LA FINESSE :  
APPLICATION AUX CERFS-VOLANTS DE TRACTION  
POUR LA PROPULSION AUXILIAIRE DES NAVIRES**

**ESTIMATION OF THE EFFECT OF ROTATION ON THE  
DRAG ANGLE BY USING THE LIFTING LINE METHOD:  
APPLICATION TO TOWING KITES FOR AUXILIARY  
PROPULSION OF VESSELS**

R. Leloup<sup>1,2,\*</sup>, K. Roncin<sup>2</sup>, G. Blès<sup>2</sup>, J.-B. Leroux<sup>2</sup>, C. Jochum<sup>2</sup>, Y. Parlier<sup>1</sup>

<sup>1</sup> OCEA, rue des Terres Neuves, BP 21, 33322 Bègles Cedex, [www.parlier.org](http://www.parlier.org)

<sup>2</sup> LBMS (EA 4325) ENSTA - Bretagne, F - 29806 Brest, France

\* Contact ([richard.leloup@ensta-bretagne.fr](mailto:richard.leloup@ensta-bretagne.fr))

**Résumé**

L'utilisation de cerfs-volants de traction (kites) comme moyen de propulsion auxiliaire permet de diminuer la consommation de pétrole des navires. Ces pourquoi les kites ont fait l'objet de nombreuses études ces dernières années. Mais la complexité de leur modélisation pousse à développer des modèles simples tels que le modèle « zero-mass ». Cependant, la variation des caractéristiques aérodynamiques du kite n'y est pas prise en compte. C'est pourquoi l'étude de l'influence du virage aux extrémités d'une trajectoire en « 8 » a été réalisée afin de l'intégrer au modèle « zero-mass ». Pour ce faire, la méthode de ligne portante a été utilisée pour la modélisation du kite en rotation.

**Summary**

The use of kites as auxiliary propulsion device is more and more considered nowadays to reduce the oil consumption of vessels. Kites have been studied in many papers during the last ten years. But the complexity of kites' simulation encouraged the development of simple models such as the "zero-mass" model. However, existing models don't take into account the variation of aerodynamic characteristics of the kite during the flight. Thus, the influence of the curve at the ends of an "8" trajectory was studied in order to integrate it in the "zero-mass" model. The lifting line method was used to model the rotating kite and results are presented.

**Nomenclature**

Symbole	Signification	Unité	R <sub>a</sub>	Résultante aérodynamique	N
a <sub>0</sub>	Pente de la courbe de coefficient de portance en fonction de l'incidence	rad <sup>-1</sup>	S	Surface du kite (intégrale de la loi de corde le long de la génératrice)	m <sup>2</sup>
b	Envergure de l'aile	m	t	Epaisseur relative maximale d'un NACA 4 digits (100*t : 2 derniers digits)	[-]
c	Corde d'une section d'aile	m	T	Tension dans les suspentes	N
C <sub>D</sub>	Coefficient de traînée total de l'aile	[-]	U <sub>∞</sub>	Vitesse du vent apparent au centre du kite	m.s <sup>-1</sup>
C <sub>L</sub>	Coefficient de portance total de l'aile	[-]	V <sub>a</sub>	Vitesse du vent apparent pour le kite	m.s <sup>-1</sup>
C <sub>L 2D</sub>	Coefficient de portance d'une section d'aile	[-]	V <sub>a 2D</sub>	Vitesse du vent apparent d'une section	m.s <sup>-1</sup>
D	Trainée total de l'aile	N	V <sub>eff</sub>	Vitesse du vent effectif	m.s <sup>-1</sup>
l <sub>T</sub>	Longueur des suspentes	m	V <sub>K</sub>	Vitesse du kite	m.s <sup>-1</sup>
L <sub>2D</sub>	Portance d'une section d'aile	N.m <sup>-1</sup>	V <sub>TW</sub>	Vitesse du vent réel	m.s <sup>-1</sup>
L	Portance totale de l'aile	N	w <sub>ind</sub>	Vitesse induite par les tourbillons	m.s <sup>-1</sup>
m	cambrure relative maximale d'un NACA 4 digits (100*m : 1 <sup>er</sup> digit)	[-]	y	Position le long de l'aile	m
n	Nombre de sections de l'aile	[-]	α <sub>0</sub>	Angle de portance nulle	rad
p	Position de la cambrure maximale d'un NACA 4 digits (10*p : 2 <sup>ème</sup> digit)	m	α <sub>2D</sub>	Angle d'incidence d'une section	rad
r <sub>K0</sub>	Vitesse de rotation de l'aile autour de l'axe z <sub>K0</sub>	rad.s <sup>-1</sup>	α <sub>eff</sub>	Angle d'incidence effectif d'une section	rad
			α <sub>géom.</sub>	Angle d'incidence géométrique	rad

$\alpha_{ind}$	Angle d'incidence induite	rad		
$\Gamma$	Circulation	$m^2 \cdot s^{-1}$	<b>Repères</b>	
$\gamma_a$	Pente aérodynamique (terme d'aéronautique)	rad	$R_a (K, \vec{x}_a, \vec{y}_a, \vec{z}_a)$	Repère aérodynamique
			$R_{a,i} (K_i, \vec{x}_{a,i}, \vec{y}_{a,i}, \vec{z}_{a,i})$	Repère aérodynamique local
$\chi_{VK}$	Azimut cinématique	rad	$R_{K0} (K, \vec{x}_{K0}, \vec{y}_{K0}, \vec{z}_{K0})$	Repère position du kite
$\varepsilon$	Angle de finesse totale de l'aile	rad	$R_{TW} (O, \vec{x}_{TW}, \vec{y}_{TW}, \vec{z}_{TW})$	Repère vent réel
$\theta_s$	Élévation en coordonnées sphériques	rad	$R_b (K, \vec{x}_b, \vec{y}_b, \vec{z}_b)$	Repère lié au kite
$\rho_{air}$	Masse volumique de l'air	$kg \cdot m^{-3}$	$R_{b,i} (K_i, \vec{x}_{b,i}, \vec{y}_{b,i}, \vec{z}_{b,i})$	Repère local par section
$\varphi$	Position le long de l'aile	rad	$\vec{x}_{VK}$	Direction de la vitesse du kite
$\varphi_s$	Azimut en coordonnées sphériques	rad		

## **I –Introduction**

Les contraintes imposées par les réductions des émissions de CO<sub>2</sub> et l'augmentation du prix du pétrole affectent toutes les industries du transport et en particulier l'industrie maritime. Les systèmes de propulsion des navires doivent être continuellement repensés et dans ce contexte, tirer profit du vent en utilisant des cerfs-volants (kites) pour aider à la traction des navires est une voie en plein essor. Ainsi, le projet « Beyond the sea<sup>®</sup> » du navigateur Yves Parlier s'inscrit dans cette voie et est mené en partenariat avec le laboratoire LBMS de l'ENSTA Bretagne et la DGA. D'autres projets semblables sont développés comme le projet Kitepower de l'Université Technologique de Delft [1,2,3,4,5,6], le projet KiteGen de l'Université de Turin [7], le projet KiteShip en Californie et le projet européen Kiwigen. On peut également citer différentes Universités qui s'intéressent aux kites parmi lesquelles on trouve notamment l'Université de Southampton en Angleterre [8,9,10], de Tampere en Finlande [11], de Constanta en Roumanie [12], de St Petersburg en Russie [11] et d'Auckland en Nouvelle Zélande [13]. Un tel intérêt se justifie par les avantages que peuvent présenter l'utilisation des kites en termes d'économie de carburant, de sécurité et de polyvalence que ce soit pour la traction des navires ou pour la production d'électricité. En particulier, ce type de concepts ambitionne d'utiliser des kites de très grandes tailles à des altitudes plus élevées, là où le vent est plus fort et plus stable qu'au niveau du sol ou de la mer. A propos de la production d'électricité, Ockels [4] montre qu'un kite de 1000 m<sup>2</sup> arriverait à produire plus de 50 MW, contre 1.6 MW en moyenne en France pour une éolienne terrestre actuelle [14]. Concernant la propulsion des navires, les kites peuvent être utilisés comme moyen auxiliaire de traction pour réduire la consommation de carburant dans le cas de cargos. Wellicome [10] démontre que l'utilisation des kites est 2 à 4 fois plus efficace, en termes d'extraction de l'énergie du vent, qu'un quelconque autre système de propulsion éolien. De plus, Naaijen [3] propose un prédicteur de performances annonçant des économies de carburant pouvant aller jusqu'à 50% avec un kite de 500m<sup>2</sup> pour un tanker de 50 000 DWT.

Depuis 2002 l'entreprise allemande Skysails [15] développe des ailes à caisson pour tracter des cargos. Celles-ci ont une forme très proche des parafoils qui ont fait l'objet d'études de la part de la NASA [16] car elles sont utilisées comme parachute lors de l'atterrissage d'engins spatiaux. Différentes études ont porté sur le comportement dynamique des parafoils par la mise en place d'un couplage Fluide-structure comme cela est présenté dans les travaux de Chalot [17]. Il propose plusieurs niveaux de modélisation, du calcul potentiel en hypothèse de corps rigide jusqu'au couplage fluide-structure en éléments finis avec la résolution des équations de Navier Stokes pour la partie fluide. La comparaison des résultats aux essais en soufflerie effectués à l'installation S1 Modane de l'ONERA sur un parafoil à l'échelle 1/2 de 71 m<sup>2</sup> avec différents angles d'incidence est satisfaisante au niveau des caractéristiques globales du parafoil.

Quoi qu'il en soit force est de constater que, depuis une dizaine d'années, l'étude des kites s'est intensifiée et de nombreux articles commencent à traiter des aspects tels que la dynamique du vol [2,5], le contrôle du vol [7], la déformation du kite [1] ou la modélisation des efforts aérodynamiques [3,6]. L'une des premières études sur les kites et leur capacité à produire de l'énergie remonte à 1980 [18]. Dans cette étude, la puissance fournie par le kite dans le cas d'un vol stationnaire est comparée à celle obtenue par la mise en place d'un vol dynamique. Wellicome [10], compare l'efficacité d'un vol stationnaire et d'un vol dynamique mais pour la traction d'un navire avec le modèle « zero-mass ». Le kite étant considéré

comme un objet sans masse, Dadd [8,9] applique alors le principe fondamental de la dynamique en ne considérant que les efforts aérodynamiques et la tension dans les suspentes. Au moyen d'un paramétrage de la trajectoire en forme de « 8 » présentée à la figure 3 pour un vol dynamique, le modèle de Dadd permet de calculer la vitesse du vent apparent ainsi que la tension dans les suspentes à partir de la vitesse du vent réel et de la position dans la fenêtre. La comparaison avec des mesures expérimentales [8] semble assez satisfaisante.

Néanmoins, des approches plus fines permettent de réaliser un calcul dynamique à partir des équations de Lagrange [5] ou du principe fondamental de la dynamique (PFD) [2]. Dans cette dernière étude, Groot applique le PFD à l'ensemble « kite(s) + suspentes » en prenant en compte les inerties en translation et en rotation grâce à la géométrie des masses. Enfin, Breukels [1] propose la méthode la plus aboutie à l'heure actuelle en termes de modélisation du kite en vol en prenant en compte la déformation de l'aile. Celle-ci est modélisée à partir d'un couplage fluide-structure simplifié entre un code Navier Stokes (Fluent) et une modélisation dynamique multi corps de la structure (MSC Adams).

Dans la littérature, la modélisation des efforts aérodynamiques sur le kite a été initialement abordée de façon macroscopique [8,9,10]. L'aile est représentée par ses caractéristiques globales : surface, coefficient de portance, finesse. Les coefficients aérodynamiques sont simplement postulés [11,18,10] ou peuvent être identifiés avec des essais [8]. Les premiers calculs de coefficients aérodynamiques sont effectués à partir de calculs 2D sur des profils d'ailes [1,3], les effets tridimensionnels étant évalués avec une simple formule d'allongement [9] ou une méthode de ligne portante [3]. Des calculs directs sur une géométrie 3D ont également été menés [17,7,6]. Cette géométrie peut être postulée [7] ou mesurée à partir d'essais réalisés en soufflerie [17,6]. Les calculs peuvent être réalisés en potentiel couplé avec une couche limite intégrale [3] ou en résolvant les équations de Navier Stokes pour rendre compte des effets de la viscosité [17,7,6].

Breukels [1] semble donner l'étude la plus aboutie à ce jour car il traite de façon équilibrée les aspects dynamiques, fluide et structure. Cependant, les ressources informatiques et les temps de calculs associés à ce type de simulation, laissent encore actuellement une place aux développements de modélisations du vol plus simples, telles que celles fondées sur des modèles de type « zero-mass » repris par exemple en 2011 par Dadd [8,9]. Malgré tout, plusieurs points clefs restent à intégrer dans ce modèle, sans compromettre excessivement sa rapidité de mise en œuvre. On peut par exemple citer, en vue de la simulation d'un vol dynamique, la prise en compte de la géométrie tridimensionnelle du kite, sa déformation, la modification de la répartition des efforts sur le kite, la variation des caractéristiques aérodynamiques le long d'une trajectoire.

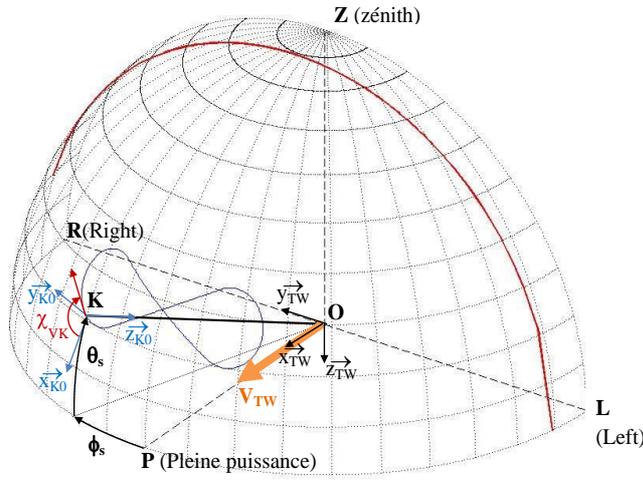
Dans le cas d'un vol dynamique, on considère que le kite réalise une figure en forme de « 8 », alternant grands cercles au voisinage du centre du « 8 » et petits cercles, ou demi-tours, aux extrémités. Dans ces virages qui peuvent présenter des rayons de courbure réduits, les caractéristiques aérodynamiques du kite sont nécessairement modifiées du fait de la dissymétrie du chargement. Ce phénomène n'étant pas modélisé dans les études précédentes [8,9], on se propose d'étudier l'influence du virage sur les caractéristiques aérodynamiques d'un kite afin de l'intégrer au modèle « zero-mass ».

## **I – Calcul de la vitesse du kite dans le modèle « zero-mass »**

### **I – 1 Mise en place des équations du modèle**

On considère la figure 1 montrant le kite dans la fenêtre de vol correspondant au quart de sphère présenté. Afin d'exprimer la position du kite dans la fenêtre de vol, le paramétrage représenté aux figures 1 et 2 est utilisé. Le point O correspond au point d'attache des suspentes au sol ou sur le pont d'un navire. Le repère orthonormé direct  $R_{TW}$  est fixé en ce point et orienté de manière à ce que  $\vec{x}_{TW}$  soit dans la même direction que le vent réel (ou le vent apparent dans le cas d'un navire en mouvement).  $\vec{z}_{TW}$  est orienté selon la verticale dans le sens de l'accélération de la pesanteur. Le kite est situé au point K auquel le repère  $R_{K0}$  est fixé. Ce repère est obtenu par une rotation d'angle d'azimut  $\phi_s$  autour de  $\vec{z}_{TW}$  puis d'angle d'élévation  $\theta_s - \pi/2$  autour de  $\vec{y}_{K0}$  (colinéaire à  $\vec{y}_{TW}$ ). Le vecteur unitaire  $\vec{x}_{VK}$  correspond à la direction de la vitesse du kite et est obtenu à partir du vecteur  $\vec{x}_{K0}$  par une rotation d'angle  $\chi_{VK}$

$\in [0, 2\pi[$  autour de l'axe  $\vec{z}_{K0}$ .  $\chi_{VK}$  est déterminé par la trajectoire imposée au kite (tracée ici en pointillés) paramétrée d'après les travaux exposés par Wellicome [10] puis Dadd [9].



**Figure 1 : Quart de sphère contenant l'ensemble des positions possibles pour le kite (fenêtre de vol)**

D'après le théorème de la résultante du Principe Fondamental de la Dynamique appliqué au kite situé au point K, en considérant que la masse du kite est nulle, on obtient :

$$\vec{T} + \vec{R}_a = 0 \quad (1)$$

La résultante aérodynamique est donc opposée à la tension dans les suspentes à tout instant et ces deux forces sont alignées sur le même axe qui va du point d'accroche O au kite K. De plus, dans le cas d'un vol dynamique, c'est-à-dire dans le cas où le kite va être manœuvré sa vitesse, notée  $V_K$ , pourra être calculée à partir de l'expression du PFD et du vent apparent. Ainsi, la deuxième équation qui régit le mouvement du kite est l'équation du vent apparent qui s'écrit de la manière suivante :

$$\vec{V}_a = \vec{V}_{TW} - \vec{V}_K \quad (2)$$

### I – 2 Formulation en un point quelconque K de la sphère

Par définition de la résultante aérodynamique, on a :

$$\vec{R}_a = \vec{L} + \vec{D} \quad (3)$$

En projetant sur le plan  $(\vec{x}_a, \vec{z}_a)$  on obtient la configuration représentée sur la figure 2 . On peut écrire également, en projetant l'équation (3) selon les axes correspondants :

$$-R_a \vec{z}_{K0} = -L \vec{z}_a + -D \vec{x}_a \quad (4)$$

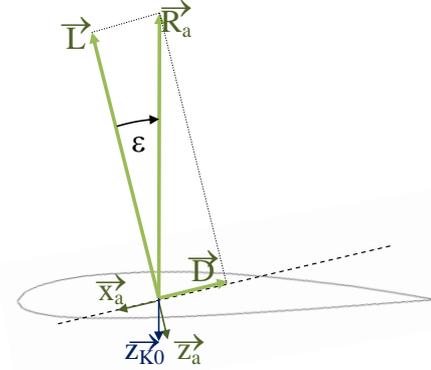
Avec,

$$\begin{cases} L = \frac{1}{2} \rho_{air} S V_a^2 C_L \\ D = \frac{1}{2} \rho_{air} S V_a^2 C_D = L \tan \varepsilon \\ R_a = \frac{L}{\cos \varepsilon} \end{cases} \quad (5)$$

Par ailleurs, l'équation définissant le vent apparent sur le kite peut également s'écrire, en projetant selon les axes correspondants :

$$-V_a \vec{x}_a = V_{TW} \vec{x}_{TW} - V_K \vec{x}_{VK} \quad (6)$$

En faisant le produit scalaire de (6) avec  $\vec{z}_{K0}$ , on obtient :



**Figure 2 : Représentation vectorielle des efforts aérodynamiques**

$$V_a = - \frac{V_{TW} \vec{x}_{TW} \cdot \vec{z}_{K0}}{\sin \varepsilon} \quad (7)$$

De plus, en utilisant les propriétés du produit scalaire, pour l'équation (2), on peut écrire :

$$V_a^2 = V_{TW}^2 + V_K^2 - 2 V_{TW} V_K (\vec{x}_{TW} \cdot \vec{x}_{VK}) \quad (8)$$

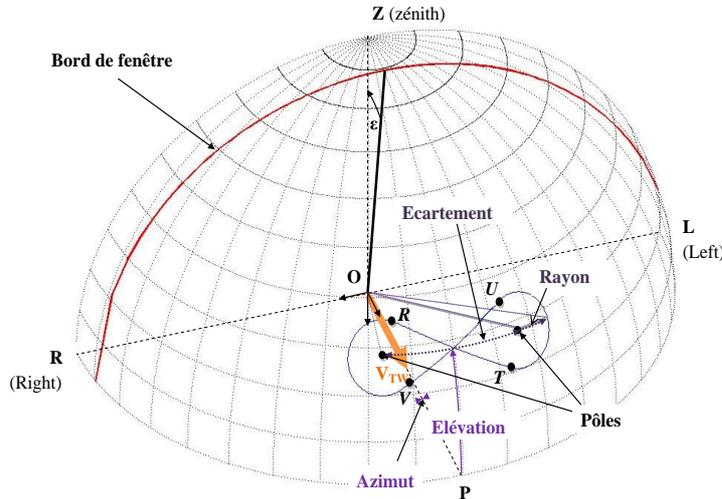
On en déduit une expression de la vitesse du kite après résolution de l'équation et en utilisant l'expression de  $V_a$  obtenue dans l'équation (7) :

$$V_K = V_{TW} \left[ \vec{x}_{TW} \cdot \vec{x}_{VK} + \sqrt{(\vec{x}_{TW} \cdot \vec{x}_{VK})^2 + \frac{(\vec{x}_{TW} \cdot \vec{z}_{K0})^2}{\sin^2 \varepsilon} - 1} \right] \quad (9)$$

La vitesse du kite n'est réelle que si :

$$|\vec{x}_{TW} \cdot \vec{x}_{VK}| \geq \sqrt{\left| 1 - \frac{(\vec{x}_{TW} \cdot \vec{z}_{K0})^2}{\sin^2 \varepsilon} \right|} \quad (10)$$

La condition (10) d'existence de la vitesse du kite permet de délimiter une zone dite « manœuvrante » en dessous de la ligne rouge sur la figure 3, dans laquelle le kite peut se diriger dans toutes les directions. Sur cette ligne ou au-dessus, le kite ne peut remonter dans la fenêtre et ne peut donc pas aller au-delà de cette limite qui correspond à ce qui est appelé « bord de fenêtre ».



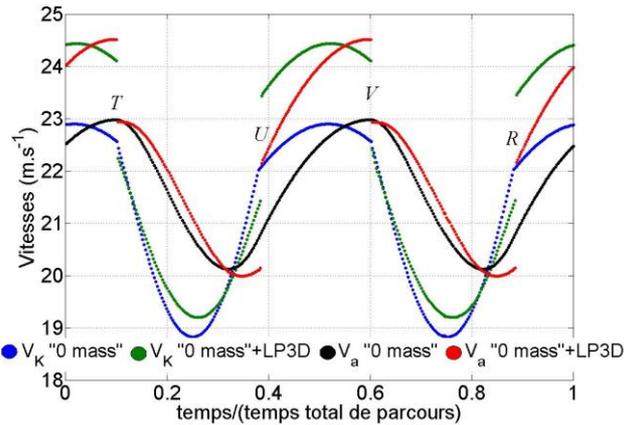
<b>Surface S</b>	3.51 m <sup>2</sup>
<b>Longueur des suspentes l<sub>T</sub></b>	35 m
<b>Coefficient de portance C<sub>L</sub></b>	0.776 [8]
<b>Angle de finesse ε</b>	9.55° [8] (finesse : 5.94)

**Figure 3 : Représentation de la barrière dite « bord de fenêtre » que le kite ne peut franchir**

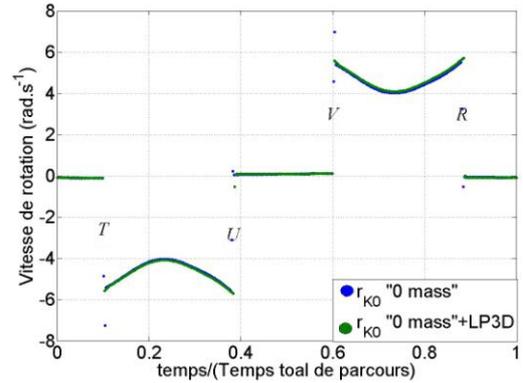
**Tableau 1 : Caractéristiques du kite étudié**

### I – 3 Evolution de la vitesse du kite sur une trajectoire donnée

En considérant la trajectoire donnée par la figure 3 (Elévation : 25°, Azimut : 0°, Ecartement des pôles : 30°, Rayon des demi-tours : 7°) et un vent réel  $V_{TW}$  de 4.1 m.s<sup>-1</sup> (8nds), le tracé de l'évolution de la vitesse du kite obtenue à partir de l'équation (9) est alors représenté sur la figure 4 avec le modèle « zero mass » seul dans un premier temps. Le kite utilisé est de type F-one Revolt dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 1. Pour les caractéristiques aérodynamiques on a repris en première approche celles mesurées par Dadd [8]. On peut observer deux parties de courbes pour la vitesse. L'une correspond au parcours des arcs de cercle extrémité du kite entre V et R et entre T et U (figure 3). L'autre partie correspond aux grands cercles entre R et T et entre U et V.



**Figure 4 : Evolution de la vitesse du kite et du vent apparent sur une trajectoire**



**Figure 5 : Evolution de la vitesse de rotation, autour de l'axe  $\vec{z}_{K0}$ , au cours du temps**

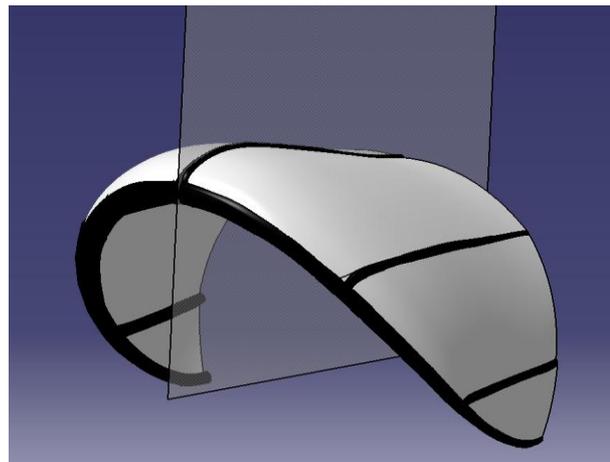
L'évolution de la vitesse de rotation est tracée sur la figure 5. On voit bien apparaître les deux parties de la trajectoire. Dans la suite de l'étude, on s'intéressera à l'évolution de la finesse du kite pour les vitesses de rotations obtenues sur ce type de trajectoire.

## II – Calcul des caractéristiques aérodynamiques d'un profil d'aile

### II – 1 Définition du profil



**Figure 6: Système de scan 3D Gom en phase d'acquisition de la géométrie tridimensionnelle du kite F-one Revolt**



**Figure 7 : reconstruction du kite en 3D à l'aide du logiciel de CAO Catia**

Afin de réaliser un calcul de ligne portante sur une aile, il est nécessaire de connaître les caractéristiques aérodynamiques du profil correspondant à une section 2D de l'aile. Pour cela dans le cas de l'aile de kite, le profil est obtenu à partir de la reconstruction en 3D d'un kite Revolt de surface 4m<sup>2</sup> de la marque F-one. Le même profil a été utilisé pour toute l'aile.

La reconstruction en 3D du profil du kite est basée sur l'obtention d'un nuage de points au moyen d'un système de scan 3D ATOS Compact Scan de la société Gom, par numérisations successives de la surface (figure 6). Pour cela, le kite a été placé en suspension dans une position la plus proche possible de sa position en vol. Il a été possible de construire numériquement des lignes sur les coutures du kite scanné afin de remonter ensuite à la géométrie en 3D du kite à l'aide du logiciel de CAO Catia. Le résultat est représenté sur la figure 7. Le profil de la section est obtenu par un simple plan de coupe du kite reconstruit sous Catia. Toutefois la section obtenue nécessite d'être lissée afin d'obtenir plus facilement la convergence des calculs aérodynamiques.

## II – 2 Lissage du profil

La formule analytique du NACA 4 digit est utilisée comme fonction de lissage pour obtenir l'extrados. Les valeurs du tableau 2 sont obtenues par régression quadratique (moindres carrés), pour les 3 paramètres correspondants aux 4 digits d'un foil de type NACA [19,20].

Paramètre	Valeur
<b>m</b>	$-5.1269.10^{-2}$
<b>p</b>	$7.3507.10^{-1}$
<b>t</b>	$33.8323.10^{-2}$

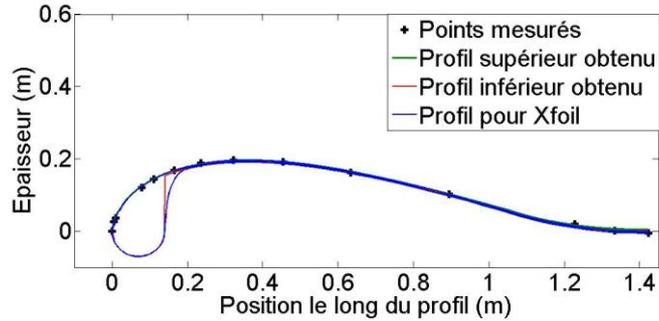


Tableau 2 : Paramètres obtenus par régression

Figure 8 : Tracé du profil mesuré et du profil obtenu par régression

L'écart moyen entre le profil lissé et la mesure est de 2.2mm (0.17% de la corde) sur la latte centrale. Il vaut 1.19% et 2.58% pour les deux autres lattes. Bien que ces écarts puissent sembler importants, on privilégie dans cette étude la simplicité de la démarche en choisissant un profil constant sur toute l'envergure de l'aile. La valeur négative de la cambrure s'explique par la forme concave du profil au niveau du bord de fuite. Les paramètres obtenus ici ne sont pas des entiers mais correspondent malgré tout à la définition mathématique d'un profil NACA. La figure 8 montre la superposition du profil mesuré et du profil obtenu par régression quadratique, qui est tout à fait acceptable.

Pour l'intrados, un demi-cercle permet de modéliser le boudin de bord d'attaque. Puis le profil de l'extrados est décalé d'une distance représentant l'épaisseur de la toile du kite. Cependant, on observe derrière le boudin une forte discontinuité de la géométrie (courbe rouge figure 8). Le maillage a donc été lissé afin de faire converger les calculs des coefficients de portance et trainée sous Xfoil (courbe bleue).

## II – 3 Calcul des coefficients de portance et de trainée avec XFOIL

Xfoil permet de modéliser l'écoulement autour de profils 2D en prenant en compte la viscosité par une méthode de couplage potentiel-couche limite intégrale [21]. L'emplacement des transitions à l'intrados et à l'extrados a été forcé à 10% de la corde. La courbe de coefficient de portance en fonction de l'incidence présentée dans la figure 9 pour différentes valeurs de Reynolds permet alors de déterminer  $a_0$  et  $\alpha_0$  pour le calcul de ligne portante.  $a_0$  correspond à la pente de la courbe de portance dans la partie linéaire et  $\alpha_0$  au point d'intersection entre la courbe et l'axe des abscisses.

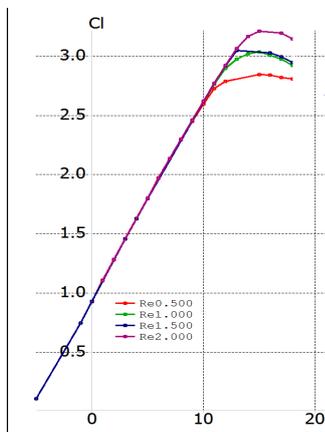


Figure 9 : Evolution du coefficient de portance en fonction de l'angle d'incidence

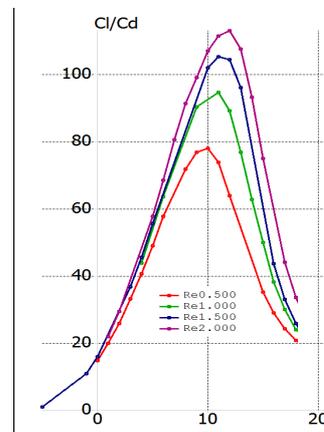


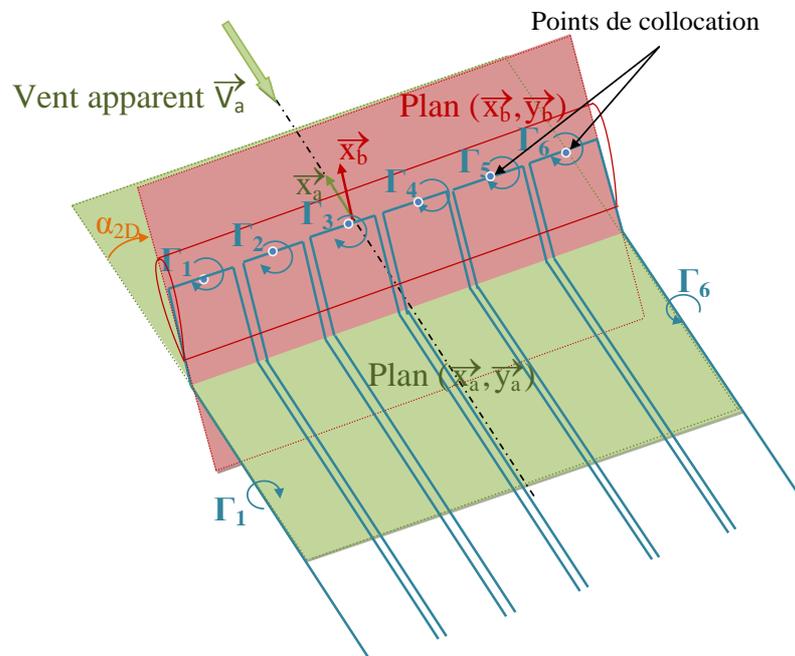
Figure 10 : Evolution de la finesse en fonction de l'angle d'incidence

L'évolution du coefficient de trainée 2D est également obtenue et permet de tracer la courbe de finesse en fonction de l'incidence pour une section donnée. On observe sur la figure 10 que la finesse atteint des valeurs proches de 120 ce qui correspond à un angle  $\varepsilon$  proche de  $0.5^\circ$ . Ces finesesses ne sont pas réalistes dans le cas d'une aile de faible allongement comme le kite étudié ici car les effets 3D ont une forte influence sur les caractéristiques aérodynamiques puisque Dadd [8] mesure un angle  $\varepsilon$  de  $9.55^\circ$  sur le même type d'aile.

### **III – Etude d'une aile de kite en rotation**

#### **III – 1 Modélisation de l'aile.**

L'écoulement autour d'une aile d'envergure finie en incidence est tridimensionnel. En effet, au voisinage des extrémités de l'aile la différence des pressions intrados (surpression) et extrados (dépression) induit un mouvement de fluide de l'intrados vers l'extrados. Qualitativement, un écoulement secondaire selon l'envergure se superpose à l'écoulement principal selon la corde. Il est d'autant plus intense que l'extrémité de l'aile est approchée. En effet, le bout d'aile est à l'origine de la déviation des lignes de courant vers l'intrados et vers l'emplanture à l'extrados. La discontinuité de vitesse au bord de fuite qui résulte du phénomène est naturellement source de vorticités qui se convectent et se diffusent dans le sillage de l'aile.



**Figure 11 : Modélisation de l'aile par une série de tourbillons fer à cheval disposés côte à côte**

La théorie de la ligne portante de Prandtl [22], fondée sur ces constats, propose alors de modéliser l'aile par deux systèmes tourbillonnaires. Une ligne tourbillonnaire liée le long de l'envergure, dont intensité variable, modélise la portance des sections. Une nappe de lignes tourbillonnaires libres alignées sur l'écoulement modélise le sillage. L'intensité des lignes tourbillonnaires libres est directement liée à celle de la ligne tourbillonnaire liée via les théorèmes généraux de conservation de la circulation (Lagrange, et Kelvin-Helmholtz). La figure 11 présente un exemple de discrétisation d'une telle modélisation dans le cas d'une aile droite en translation [23].

Pour l'étude d'une aile de kite en rotation, nous proposons deux méthodes de résolution. La première est fondée directement sur la théorie classique de Prandtl pour l'aile droite en translation avec un sillage plan aligné sur l'écoulement relatif uniforme amont. Les formules de cette théorie seront directement appliquées au cas présent. La géométrie du kite est projetée sur son plan moyen, et la rotation est prise en compte seulement par les variations qu'elle induit sur le vent apparent au droit de chaque section. Avec cette première approche [24], adaptée aux ailes soumises à un mouvement de lacet de petite amplitude, la géométrie tridimensionnelle du kite ainsi que le vrillage du sillage du à la rotation sont négligés.

La seconde méthode est plus générale. Elle considère une ligne tourbillonnaire liée tridimensionnelle, selon la génératrice du kite, et un sillage constitué d'une nappe alignée sur le champ de vitesse de vent apparent en chaque point de collocation. Cette seconde méthode, également approchée, prend en compte la géométrie tridimensionnelle du kite et une approximation du vrillage du sillage induit par le mouvement de rotation.

### III – 2 Influence de la rotation sur le vent apparent pour chaque section j

On associe au kite le repère  $R_b$  qui définit son orientation dans l'espace. Ce repère est fixé à  $1/4$  de la corde dans le plan de symétrie du kite. Ce point correspond approximativement au centre d'application des efforts aérodynamiques. On suppose qu'il correspond également au centre de rotation du kite. Ici, on considère que le vent apparent donné par le modèle « zero-mass » est situé dans le plan de symétrie. Sa norme est obtenue par la formule (7). Dans la section centrale, située dans le plan de symétrie du kite, la vitesse due à la rotation est nulle. La section centrale se trouve donc dans la configuration de la figure 12. La pente aérodynamique  $\gamma_a$  est égale à  $-\varepsilon$ , qui est l'opposé de l'angle de finesse utilisé dans le modèle « zero-mass ». Cependant, cet angle que l'on cherche à calculer par la ligne portante n'est pas connu au départ. Une boucle non linéaire est donc nécessaire. L'angle d'incidence géométrique  $\alpha_{\text{géo}}$  est contrôlé par les suspentes arrières du kite.

$$\alpha_{2D} = \alpha_{\text{géo}} - \gamma_a \quad (11)$$

On associe ensuite à chaque section j un repère local lié au kite  $R_{b,j}$  (figure 13 ). La rotation  $r_{K0}$  du kite autour de l'axe  $\vec{z}_{K0}$  crée une vitesse relative en chaque section. Cette vitesse relative va alors créer un vent « vitesse » opposé en direction qui vient s'ajouter au vent apparent vu par la section centrale du kite d'après la loi de composition des vitesses. La rotation  $r_{K0}$  du kite va donc avoir deux effets sur le vent apparent pour chaque section de l'aile [24] :

- Une modification de sa norme
- Une modification de sa direction, et par conséquent de l'incidence de la section

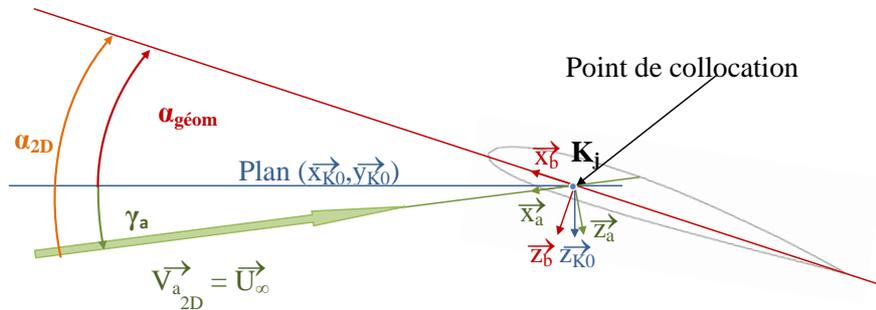


Figure 12 : Représentation géométrique de l'angle  $\alpha_{2D}$  au centre du kite

Par projection sur le plan de la section considérée  $(\vec{x}_{b,j}, \vec{z}_{b,j})$ , on obtient la vitesse du vent apparent de la section  $V_{a2D}$  et son incidence  $\alpha_{2D}$ .

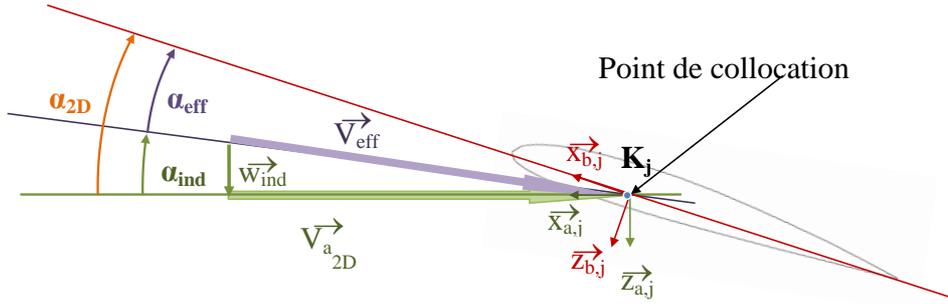
### III – 3 Mise en équations de la ligne portante

La combinaison de la vitesse induite et de la vitesse du vent apparent sur une section de l'aile  $V_{a2D}$  produit une vitesse relative locale, différente selon la section qu'on examine. L'angle d'attaque réel subit également l'influence de la vitesse induite ; on parle d'incidence induite ( $\alpha_{\text{ind}}$  par rapport au vent apparent  $V_{a2D}$ ) et d'incidence effective  $\alpha_{\text{eff}}$  [23,26] comme cela est représenté sur la figure 13 . L'incidence effective s'écrit de la manière suivante :

$$\alpha_{\text{eff}} = \alpha_{2D} - \alpha_{\text{ind}} \quad (12)$$

Avec

$$\alpha_{\text{ind}} = - \text{Arctan} \left( \frac{W_{\text{ind}}}{V_{a2D}(y)} \right) \approx - \frac{W_{\text{ind}}}{V_{a2D}} \quad (13)$$



**Figure 13 : Mise en évidence des angles d'incidence d'une section 2D de l'aile**

On peut alors généraliser ce résultat au cas des profils cambrés en considérant l'évolution du coefficient de portance linéaire par rapport à l'incidence effective. La pente de la courbe du coefficient de portance en fonction de l'incidence effective a pour valeur

$$a_0 = \frac{dC_{L\ 2D}}{d\alpha_{\text{eff}}} \text{ et l'angle de portance nulle est } \alpha_0. \text{ On obtient donc}$$

$$C_{L\ 2D} = a_0 (\alpha_{\text{eff}} - \alpha_0) = a_0 (\alpha_{2D} - \alpha_0 - \alpha_{\text{ind}}) \quad (14)$$

Par ailleurs, le coefficient de portance est par définition :

$$C_{L\ 2D} = \frac{L_{2D}}{\frac{1}{2} \rho_{\text{air}} c V_{a_{2D}}^2} \quad (15)$$

Or, d'après la relation de Kutta-Joukowski, la portance d'une section en 2D de l'aile (en considérant que  $L_{2D} = \frac{dL}{dy}$ ) s'exprime ainsi:

$$L_{2D} = \rho_{\text{air}} V_{a_{2D}} \Gamma \quad (16)$$

On en déduit l'expression du coefficient de portance :

$$C_{L\ 2D} = \frac{2 \Gamma}{c V_{a_{2D}}} \quad (17)$$

L'incidence effective peut donc se mettre sous la forme

$$\alpha_{\text{eff}} = \frac{2 \Gamma}{c V_{a_{2D}} a_0} + \alpha_0 \quad (18)$$

En remplaçant les  $\alpha_{\text{eff}}$  et  $\alpha_{\text{ind}}$  par leurs expressions tirées de (18) et (13) dans l'équation (12), et après réarrangement, on obtient l'équation de Prandtl:

$$\Gamma - \frac{c a_0}{2} w_{\text{ind}} = \frac{c V_{a_{2D}} a_0}{2} (\alpha_{2D} - \alpha_0) \quad (19)$$

### III – 4 Résolution avec la méthode de la ligne portante classique:

Dans la méthode classique utilisée pour les ailes planes, on remplace la coordonnée  $y$  définissant la position le long de l'aile par une coordonnée  $\varphi$  telle que

$$y = \frac{b}{2} \cos(\varphi) \quad (20)$$

Avec  $\varphi \in [0 ; \pi]$ . On considère ensuite que la loi de distribution de circulation liée peut se mettre sous la forme d'une série de Fourier [26,24,25] de la forme :

$$\Gamma(\varphi) = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(k \varphi) \quad (21)$$

Le sillage étant supposé plan ici, il est alors possible d'exprimer la vitesse induite au droit de chaque section en fonction des coefficients  $A_k$ , sous la forme d'une série également [26,24,25]. Le report de ces développements en série dans l'équation (19) conduit à l'équation (22) valable en tout point le long de la génératrice. La réduction de cette équation à N modes et son écriture en N sections particulières conduit à un système linéaire. La résolution permet d'obtenir une approximation de la distribution de circulation en envergure.

$$\sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(k \varphi) \left( \sin(\varphi) + k \frac{c(\varphi) a_0}{4b} \right) = V_{a_{2D}}(\varphi) \sin(\varphi) \frac{a_0 c(\varphi)}{2} \alpha(\varphi) \quad (22)$$

### III – 5 Résolution avec la méthode de la ligne portante tridimensionnelle:

Avec la méthode tridimensionnelle, on calcule la vitesse induite par tous les tourbillons en chaque point de collocation. Les tourbillons sont considérés comme un assemblage de segments de tourbillons [23]. La vitesse induite en un point de collocation  $j$  s'écrit de la manière suivante :

$$w_{ind_j} = b_{j1} \Gamma_1 + b_{j2} \Gamma_2 + b_{j3} \Gamma_3 + \dots + b_{jn} \Gamma_n \quad (23)$$

Pour simplifier l'écriture, on peut réécrire l'équation sous la forme matricielle  $(w_{ind}) = [B].(\Gamma)$ . L'équation (19) devient donc :

$$\left( I_n - \frac{c a_0}{2} [B_{ji}] \right).(\Gamma_j) = \frac{c V_a a_0}{2} (\alpha_{2D} - \alpha_0) \quad (24)$$

La résolution de ce système permet alors d'obtenir la circulation de chaque tourbillon.

### III – 6 Calcul des grandeurs caractéristiques du problème

Une fois le système résolu, on connaît la circulation en chaque point de collocation. On peut ensuite calculer la portance et le coefficient de portance en chaque point à partir de (16) et (15). La portance totale est obtenue en intégrant la portance locale sur toute l'envergure. La traînée induite totale est également obtenue par intégration de la traînée induite par les tourbillons. La traînée visqueuse est obtenue en fonction de l'incidence effective à partir des calculs réalisés sous Xfoil pour le profil considéré. On peut enfin calculer l'angle de finesse  $\varepsilon$  de toute l'aile :

$$\varepsilon = \text{Arctan} \left( \frac{D}{L} \right) \quad (25)$$

## **IV – Résultats**

### IV – 1 Comparaison des deux méthodes pour une vitesse de rotation nulle

Les deux méthodes de ligne portante décrites précédemment ont été implémentées et testées sur une aile de kite, dont les caractéristiques sont décrites dans le tableau 3. Pour le calcul tridimensionnel, la géométrie du kite est reconstituée à partir des mesures réalisées sur le kite F-one Revolt. Pour la ligne portante classique plane, on considère la projection du kite sur un plan horizontal. La traînée est calculée en considérant le kite entier.

Dans un premier temps, on s'intéresse aux caractéristiques aérodynamiques du kite sans vitesse de rotation. Avec la ligne portante classique, on obtient un angle de finesse de  $16.30^\circ$ . En considérant la même incidence  $\alpha_{2D}$  de  $7^\circ$  au centre du kite avec la méthode tridimensionnelle, on obtient un angle de finesse de  $8.95^\circ$ . Cette valeur est proche de l'angle de finesse mesuré expérimentalement par Dadd [8,9] sur un kite similaire ( $9.55 \pm 0.63^\circ$ ). Par ailleurs, le coefficient de portance calculé avec la méthode tridimensionnelle vaut 0.735 qui est également situé dans l'intervalle de confiance à 95% des mesures expérimentales de Dadd ( $0.776 \pm 0.05$ ).

Sur la figure 14, on a tracé l'évolution de la circulation en fonction de la position suivant l'axe  $y_b$ . On observe tout d'abord une différence d'amplitude entre les deux méthodes. Cette différence est principalement due au fait que la vitesse du vent apparent au centre du kite n'est pas la même dans les deux cas. En effet, celle-ci dépend de l'angle de finesse d'après (7) qui est différent entre les deux méthodes. Par ailleurs, on observe une

répartition de circulation différente entre les deux méthodes. Cette différence s'explique par la prise en compte de la forme tridimensionnelle du kite dans la ligne portante 3D. Cette prise en compte a ici une influence non négligeable sur les caractéristiques aérodynamiques du kite.

Caractéristique du kite mesuré	Valeur
Envergure projetée	2.2191 m
Envergure totale	3.4168
Surface projetée	2.4832
Surface totale	3.5164
$a_0$	9.35399
$\alpha_{0l}$	-5.5
$\rho_{air}$	1.014

Tableau 3 : Caractéristique du kite

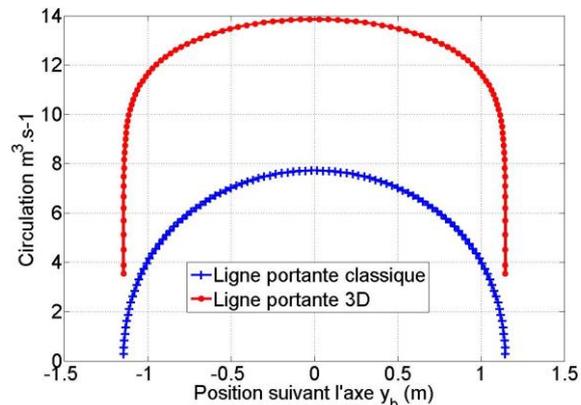


Figure 14 : Evolution de la circulation le long du kite pour une vitesse de rotation nulle

#### IV – 2 Etude du kite en rotation

Si l'on se donne une trajectoire, la valeur de la vitesse de rotation  $r_{K0}$  autour de l'axe  $\vec{z}_{K0}$  est donnée en chaque point par le modèle « zero mass » et a été tracée sur la figure 5. Les calculs de ligne portante doivent ensuite être effectués pour chaque position du kite au cours de la trajectoire. Ces calculs sont réalisés avec l'une ou l'autre des méthodes, classique ou tridimensionnelle. Par ailleurs, on a vu que la vitesse du vent apparent et l'incidence au centre du kite dépendent de l'angle de finesse. Il est donc nécessaire de reboucler jusqu'à ce que l'angle de finesse donné en entrée de la ligne portante soit le même (à  $10^{-2}$  ° près) qu'en sortie. D'après la figure 5, on observe que la vitesse de rotation maximale du kite est de  $6 \text{ rad.s}^{-1}$ . En considérant une telle vitesse de rotation, on peut tracer l'évolution des différentes grandeurs mises en jeu.

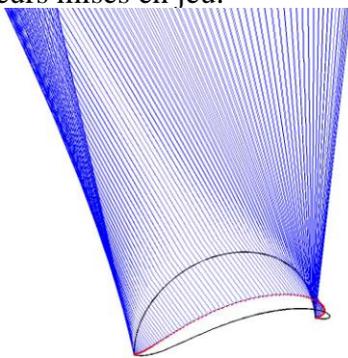


Figure 15 : Modélisation du kite pour le calcul de ligne portante tridimensionnelle pour une vitesse de rotation de  $6 \text{ rad.s}^{-1}$

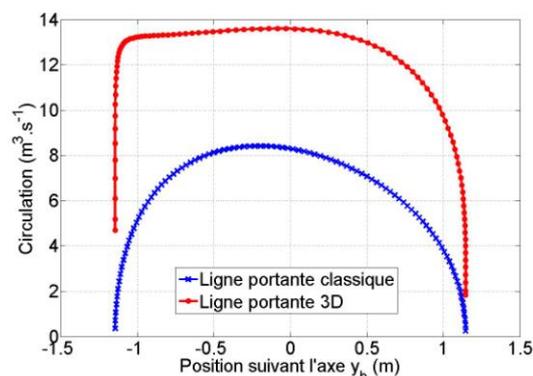
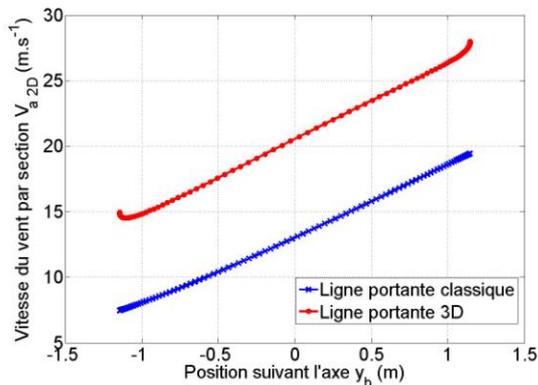


Figure 16 : Evolution de la circulation le long du kite pour une vitesse de rotation de  $6 \text{ rad.s}^{-1}$

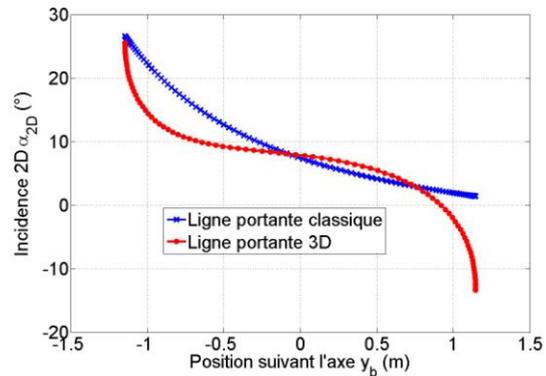
La figure 15 présente l'arrangement spatial des lignes tourbillonnaires libres et liées dans le cas de la méthode tridimensionnelle pour une vitesse de rotation de  $6 \text{ rad.s}^{-1}$ . On observe bien ici le vrillage du sillage due à la rotation du kite qui n'est pas prise en compte dans la ligne portante classique. Avant d'étudier les résultats du calcul, on s'intéresse aux données d'entrées.

On observe qu'avec les deux méthodes la vitesse du vent a augmenté dans la partie droite de l'aile et diminué dans la partie gauche de l'aile ce qui est caractéristique d'une aile en rotation. La différence d'amplitude est due là encore à la différence d'angle de finesse du kite. L'incidence de chaque section subit également des variations comme on peut le voir sur la figure 18. En effet, l'incidence augmente, avec les deux méthodes, dans la partie ralentie du kite. La différence d'allure entre les deux courbes s'explique par la prise en compte de la

forme tridimensionnelle du kite dans la méthode 3D. Enfin, on peut tracer l'évolution de la circulation le long du kite. Sur la figure 16, on observe que celle-ci a tendance à augmenter dans la partie ralentie du kite. En effet, la portance, et donc la circulation d'après la relation de Kutta-Joukowski (16), dépendent à la fois de la vitesse du vent apparent et de l'incidence en chaque section. Or, on a vu précédemment que l'incidence de la section augmente lorsque sa vitesse diminue. La perte de vitesse de chaque section est donc compensée par l'augmentation de l'incidence de celle-ci. C'est pourquoi on observe une augmentation de la circulation dans la partie ralentie du kite avec les deux méthodes. La différence d'allure est là encore, due à la prise en compte ou non de la forme tridimensionnelle du kite.



**Figure 17 : Evolution de la vitesse du vent apparent le long du kite pour une vitesse de rotation de  $6 \text{ rad.s}^{-1}$**



**Figure 18 : Evolution de l'angle d'incidence le long du kite pour une vitesse de rotation de  $6 \text{ rad.s}^{-1}$**

Finalement, l'angle de finesse calculé avec une vitesse de rotation de  $6 \text{ rad.s}^{-1}$  vaut  $17.97^\circ$  avec la ligne portante classique contre  $16.30^\circ$  sans rotation. Avec la méthode tridimensionnelle, l'angle de finesse vaut  $9.88^\circ$  contre  $8.95^\circ$  sans rotation. Les deux méthodes convergent donc vers le fait que la rotation entraîne une augmentation de l'angle de finesse (9.3% avec la ligne portante classique et 9.4% avec la ligne portante 3D). Sur les figures 4 et 5, on a tracé l'évolution des vitesses au cours d'une trajectoire en intégrant la ligne portante 3D au modèle « zero mass ». On observe que la variation des caractéristiques aérodynamiques a une influence significative notamment sur la vitesse du kite au cours d'une trajectoire.

## V – Conclusion

Le kite en vol a été modélisée avec différents niveaux de complexité. Afin de limiter les temps de calculs, des modèles simples et pertinents tels que le modèle « zero-mass » ont été mis au point par exemple en 2011 par Dadd [8,9]. La réécriture de ce modèle a permis la mise en évidence d'une expression analytique de la vitesse du kite au cours d'une trajectoire. Bien que très simple de mise en œuvre, ce modèle néglige un certain nombre de phénomènes tels que la variation des caractéristiques aérodynamiques du kite au cours du vol notamment au niveau des virages. Afin d'en étudier l'influence, le kite en rotation a été modélisé à l'aide de la méthode de ligne portante classique dans un premier temps. La ligne portante tridimensionnelle a ensuite été utilisée pour prendre en compte la forme réelle du kite et la déformation du sillage. La comparaison des deux modèles montre que la forme tridimensionnelle du kite a une influence significative sur la répartition des efforts et sur la finesse du kite. Par ailleurs, les caractéristiques aérodynamiques calculées avec la ligne portante tridimensionnelle sont en bon accord avec celles mesurées expérimentalement par Dadd [8,9] sur le même type de kite. L'utilisation de la ligne portante paraît donc judicieuse dans le cadre de modélisations simples du kite. Enfin, les deux modèles s'accordent à montrer que la rotation du kite entraîne une dégradation des caractéristiques aérodynamiques de l'ordre de 10%.

Toutefois, les modèles de ligne portante développés peuvent encore être améliorés en considérant la non linéarité de l'évolution du coefficient de portance en fonction de l'incidence par exemple. Par ailleurs, pour des vitesses de rotation élevées, la déformation du sillage devient trop importante. Il semble donc nécessaire d'avoir recours à des modèles de ligne portante ou de surface portante instationnaires avec une modélisation lagrangienne du

sillage. Des calculs Navier Stokes permettraient également de modéliser ce phénomène mais la lourdeur des calculs en limiterait l'intérêt dans le cadre de modélisations simples du vol d'un kite.

### Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier tout particulièrement Frédéric Montel pour son aide précieuse lors du scan du kite ainsi que Michel Jaffrès pour la reconstruction de la CAO.

### Références

- [1] Breukels, J., An engineering methodology for kite design, Ph.D Thesis, Delft University of Technology, 2011
- [2] Groot, S.G.C. de., *Modelling the dynamics of an arc-shaped kite for control law design*, MSc Thesis, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands, 2010
- [3] Naaijen, P., Koster, V., *Performance of auxiliary wind propulsion for merchant ships using a kite*, 2<sup>nd</sup> International Conference on Marine Research and Transportation, Ischia, Naples, Italy, 2007
- [4] Ockels, W.J., *Laddermill, a novel concept to exploit the energy in the airspace*. Aircraft Design, Vol. 4, No. 2-3, pp. 81-97, 2001
- [5] Terink, E., *Kiteplane flight dynamics*, MSc Thesis, Delft University of Technology, 2009
- [6] de Wachter, A., *Deformation and Aerodynamic Performance of a Ram-Air Wing*, MSc Thesis, Delft University of Technology, 2008
- [7] Fagiano, L., *Control of Tethered Airfoils for High altitude Wind Energy generation*, Ph.D Thesis, Politecnico di Torino, 2009
- [8] Dadd G.M., Hudson D.A., Shenoï R.A., *Comparison of two kite force models with Experiment*. Journal of Aircraft, 47(1):212e24, 2010
- [9] Dadd, G.M., Hudson, D.A., Shenoï, R.A., *Determination of kite forces using three-dimensional flight trajectories for ship propulsion*, Renewable Energy, 2011
- [10] Wellicome, J.F., Wilkinson S., *Ship Propulsive kites - an initial study*, University of Southampton, 1984.
- [11] Argatov, I., Rautakorpi, P., and Silvennoinen, R., *Estimation of the mechanical energy output of the kite wind generator*. Renewable Energy, 34:1525–1532, 2009
- [12] Scupi, A.A., Dinu, D., *Numerical Analysis of the Aerodynamic Forces Acting Upon a Kite Used as Auxiliary Propulsion System*, Constanta Maritime University Annals, year XI, Vol.14, Constanta Maritime University, Romania, 2010
- [13] Jackson, P.S., *Optimum Loading of a Tension Kite*, AIAA Journal, Vol. 43, No.11, 2005
- [14] Sawyer, S., Rave, K., *Global Wind Report, Annual market update 2010*, Global Wind Energy Council (GWEC), 2010
- [15] SkySails GmbH, Veritaskai 3, 21079 Hamburg, Germany, [www.skysails.info](http://www.skysails.info)
- [16] Ware, G.M., Hassell, J.L., *Wind-Tunnel Investigation of Ram-Air-Inflated All-Flexible Wings of Aspect Ratios 1.0 to 3.0*. NASA TM SX-1923, Langley Research Center, Hampton, VA, 1969.
- [17] Chalot, F., *Etude théorique et expérimentale d'un parafoil de grande taille*, Dassault Aviation, DGT/DTA/Mod/Aéro, 1997
- [18] Loyd, M.L., *Crosswind kite power*, Journal of Energy, vol. 4, no. 3, pp. 106–111, 1980.
- [19] Abbott I.H, von Doenhoff A.E., *Theory of wing sections*, Dover Publications, 1959
- [20] Moran, J., *An introduction to theoretical and computational aerodynamics*, Courier Dover Publications, 1984
- [21] Drela, M., *Two-dimensional transonic aerodynamics design and analysis using the Euler equations*, Ph.D Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1985
- [22] Prandtl, L., *Königliche Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*. Ed. Tragflügeltheorie, 1918
- [23] Katz, J., Plotkin, A., *Low-speed Aerodynamics*, Cambridge University Press, second edition, 2001
- [24] Drela, M., *Method of Simultaneous Wing Aerodynamic and Structural Load Prediction*, Journal of Aircraft, Vol. 27, No. 8, 1990
- [25] Houghton, E.L., Carpenter, P.W., *Aerodynamics for Engineering Students*, Ed. Edward Arnold, Fourth Edition, 1993
- [26] Bertin, J.J., Smith, M. L., *Aerodynamics for engineers*, Prentice-Hall International Editions, Second edition, 1989