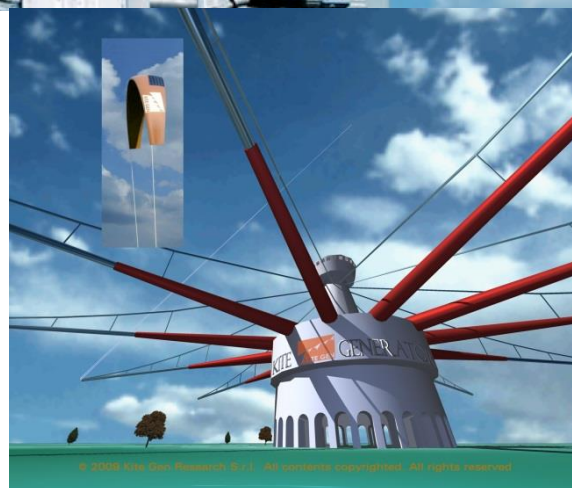


Récupération de l'énergie éolienne par des ailes de kites

Projet option Océan



Vincent Arnal
Quentin Renaud
Charles Spraul

Encadrant : Baptiste Labat

Sommaire

Introduction	3
I. Point sur les technologies actuellement étudiées.....	4
I.1. Turbines aéroportées.....	4
I.2. Génératrice située au sol	5
I.2.1) Le Ladermill.....	5
I.2.2) Développement actuel	6
I.3. Carrousel	6
I.4. Autres technologies	6
II. Définition des repères	7
III. Estimation de l'énergie récupérable avec une aile de kite	9
III.1. Chariot sur un rail rectiligne infini	9
III.1.1) Vent arrière	10
III.1.2) Optimisation pour différentes directions du vent.....	10
III.1.3) Profil vertical du vent.....	11
III.2. Carrousel.....	12
III.2.1) Utilisation des résultats pour un rail infini	12
III.2.2) Prise en compte de la vitesse du kite.....	15
IV. Conclusion	16
Annexe 1 - Caractéristiques de l'aile	17
Annexe 2 - Table des figures.....	19
Annexe 3 - Bibliographie.....	20

Introduction

L'éolien est sans doute l'un des secteurs des énergies renouvelables qui suscite actuellement le plus d'engouement. En effet les technologies ont atteint un degré de maturité suffisamment élevé pour que les projets se développent au niveau industriel. Ils se basent cependant tous sur le modèle de l'éolienne à mât. Or il se trouve que la principale difficulté technique et une part importante du coût de ces éoliennes sont liées à ce mât.

Celui-ci doit supporter une nacelle pesant jusqu'à plusieurs centaines de tonnes ainsi que des efforts en flexion (en MN) et un moment de basculement dus à la force du vent sur les pales. Des pales qui elles-mêmes mesurent entre 100 et 160 mètres de long, pèsent 20 tonnes et dont seules les extrémités sont réellement efficaces pour capter l'énergie du vent. Dans ce contexte, l'émergence d'une technologie s'affranchissant du mât et rentabilisant mieux sa surface utile de prise au vent pourrait encore accroître l'intérêt des acteurs industriels pour le secteur de l'éolien.

L'utilisation de cerfs-volants pour tirer des charges remonte à plusieurs siècles mais l'étude détaillée des autres applications est relativement récente (G. Pocock en 1825 (1)). Pourtant, cette technologie semble prometteuse puisqu'elle permet de s'affranchir des contraintes énoncées plus haut pour les éoliennes classiques. La génératrice située au sol ainsi que le fait que le système soit relié au sol par un simple câble plutôt qu'un mât (pour la majorité des systèmes) ferait grandement diminuer les coûts de production. De plus, la ressource en vent est supérieure quand on s'éloigne du sol et le cerf-volant peut couvrir en se déplaçant une surface importante donc rentabiliser au mieux sa surface portante. Ces constats poussent à développer cette technologie afin de la rendre mature et de lui permettre d'offrir une alternative solide aux éoliennes classiques. La Figure 1 met en exergue cet avantage concurrentiel :

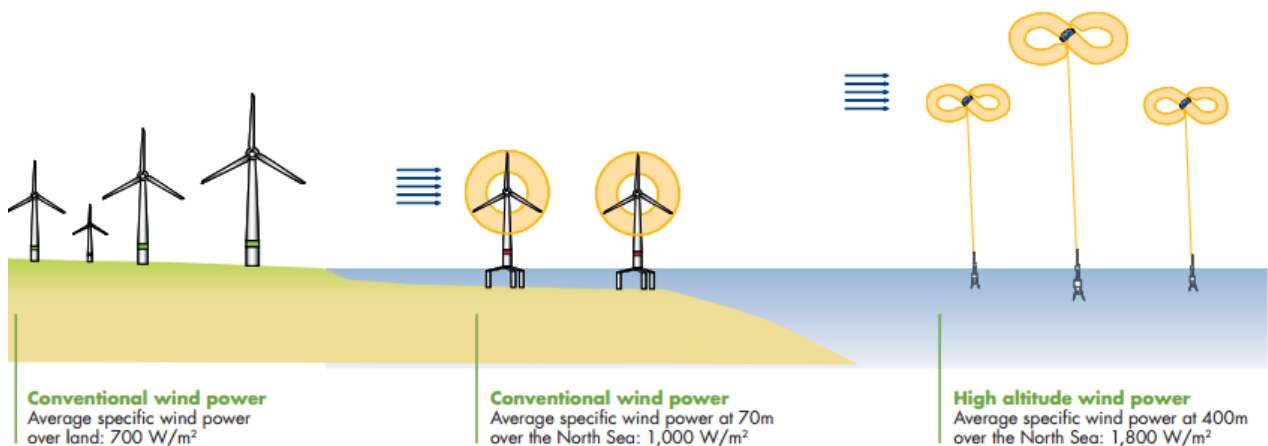


Figure 1 Comparaison kite/éolien classique

L'airborne wind energy, ou récupération de l'énergie éolienne par des systèmes aéroportés, est un secteur actuellement en plein développement, avec de plus en plus de laboratoires de recherche impliqués à travers le monde (on peut citer l'université de Delft aux pays bas (T.U Delft) ou l'université de Leuven en Belgique (KU Leuven) précurseurs dans le domaine) ainsi que la consolidation de plusieurs entreprises commençant à commercialiser le système.

D'un point de vue historique, les problèmes d'ingénierie liés aux kites ont eu une période faste au début du XX^{ème} siècle, puis une période de creux jusqu'à l'article de l'ingénieur Américain Miles Lloyd en 1980 (1), « Crosswind Kite Power » qui démontre l'intérêt d'une génération d'électricité grande échelle grâce

aux kites. Mais ce n'est que dans les années 2005-2007 que les laboratoires de recherche et les entreprises (Kitegen, Makani power,...) se lancent dans l'aventure « Airborne Wind Energy ».

C'est l'entreprise **Skysails** qui, la première, est parvenue à développer un système de traction des paquebots grâce à des ailes de kites. Les problématiques entre la traction des navires et la génération de puissance sont assez similaires, surtout sur la partie contrôle de la trajectoire. Le développement de l'une des filières servirait ainsi l'autre.

Dans ce contexte notre projet a pour objectifs : d'une part de dresser un état de l'art des technologies actuellement à l'étude, et d'autre part de produire un code simple en Python permettant d'estimer rapidement la quantité d'énergie récupérable par un tel système. La première partie de notre rapport rend donc compte de notre travail de recherche sur les études actuelles. La seconde partie décrit notre démarche dans l'élaboration du code Python, nos hypothèses de calcul ainsi que les résultats que nous avons pu obtenir.

I. Point sur les technologies actuellement étudiées

De nombreuses technologies utilisant toutes des kites mais très différentes les unes des autres ont vu le jour ces dernières années, chacune possédant ses avantages et inconvénients. Nous allons en détailler les caractéristiques principales ci-dessous.

I.1. Turbines aéroportées

Il s'agit du concept le plus proche des éoliennes classiques développées aujourd'hui puisque le kite sert de support à des hélices, ces dernières transformant l'énergie du vent en énergie mécanique. Cela permet de capter un vent plus puissant et régulier qu'avec une éolienne traditionnelle. En effet, la longueur du câble autorise une altitude bien supérieure à la hauteur d'un mât d'éolienne. En outre, le mouvement du kite peut être utilisé afin d'optimiser la régularité et la puissance moyenne du vent perçu par les hélices.

On peut noter que Google s'intéresse de près à cette technologie et a même acheté l'entreprise Makani Power (2) qui a réalisé de belles avancées dans le domaine. Leur système ressemble à un planeur supportant jusqu'à 6 turbines dont une version de 600 kW est déjà en phase de test (Figure 2).

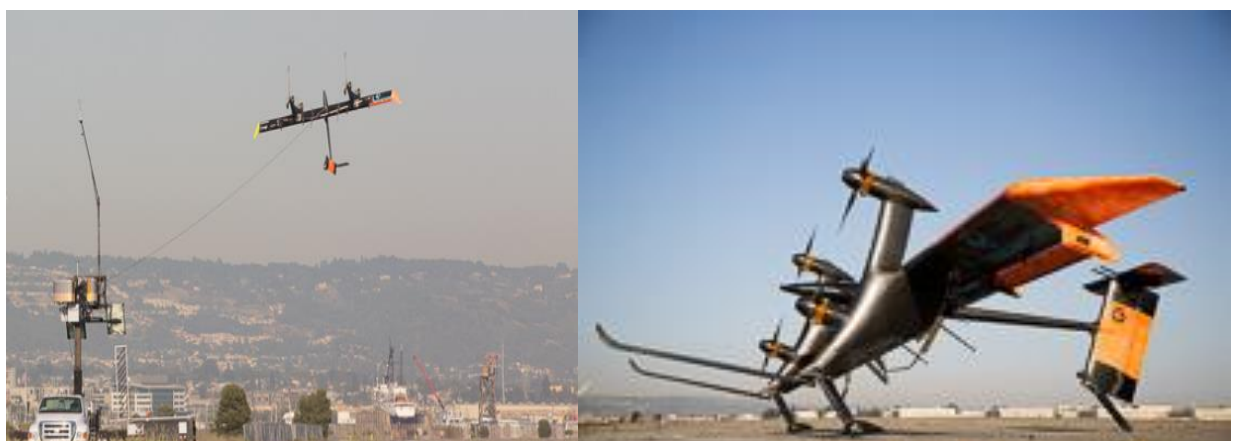


Figure 2 Système de Makani Power

1.2. Génératrice située au sol

Ce système utilise un cerf-volant relié à un tambour (Figure 3) au sol qui entraîne un générateur lorsque le câble se déroule. L'énergie étant produite au sol, le coût important engendré par un long câble électrique d'extraction de puissance est évité. La liaison entre l'aile et le sol a alors pour seule fonction d'assurer le contrôle en position (et en attitude) de l'aile. Les ailes utilisées peuvent être souples, à l'instar des ailes de kite-surf, réalisées en fibres synthétiques. Les câbles sont eux aussi en fibres synthétiques (habituellement du polyéthylène de masse molaire très élevée, comme le Dyneema). L'avantage principal de ce système réside dans la légèreté de l'aile et la simplicité relative des câbles la reliant au sol. L'objectif est à terme de créer des champs de Kites pour la génération d'électricité en mer (meilleure ressource en vent et place disponible). De la même manière que les fermes éoliennes offshore, on peut imaginer des fermes de Kites sur support flottant, reliées à des plateformes pour exporter l'électricité. (Figure 4)

Le fonctionnement de ce type de systèmes repose sur l'alternance entre des phases de montée et des phases de descente. On ne produit de l'énergie qu'au court des premières, dites actives, lorsque le câble se déroule. Lors des phases de descente, dites "passives", l'aile est ramenée à sa position initiale et le câble est enroulé à nouveau en consommant de l'énergie. L'électricité est donc produite de façon discontinue.



Figure 4 Système avec déroulement du câble



Figure 3 Tambour et génératrice de 20 kW

1.2.1) Le Ladermill

Le ladermill est le premier système de ce type à avoir été étudié (3). Son nom vient de la disposition d'un grand nombre de cerfs-volants le long d'un câble donnant l'impression d'une échelle (Figure 5).

L'originalité de ce système est d'employer plusieurs ailes sur un même câble, et donc sur le même enrouleur. Avec un seul système de contrôle et une seule génératrice pour plusieurs ailes, ce système prévoyait de rentabiliser au mieux le coût des appareils au sol. Les développeurs actuels ont cependant préféré des systèmes se limitant à une seule aile car son contrôle est plus aisé et c'est en altitude que l'on peut récupérer le plus d'énergie.



Figure 5 Vue d'artiste du ladermill

1.2.2) Développement actuel

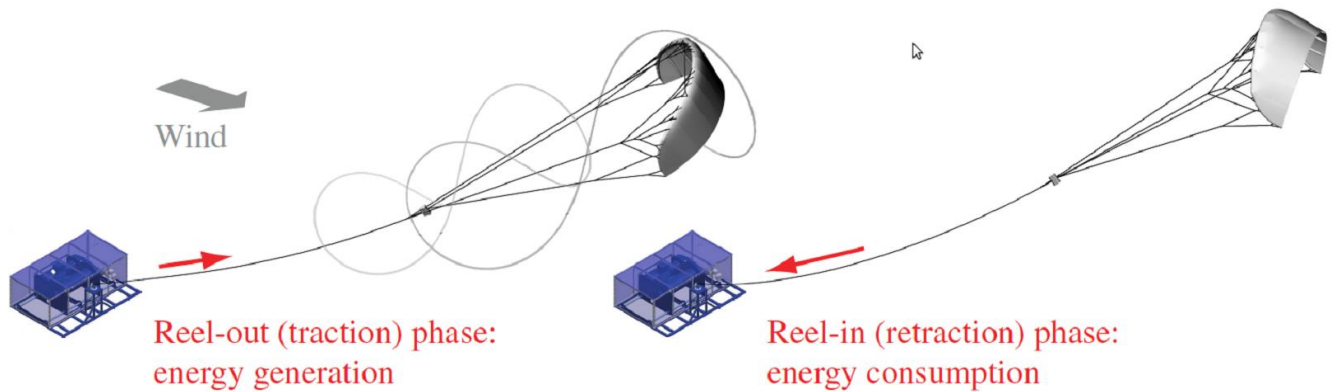


Figure 6 Système de type "yo-yo" (3)

Les configurations actuellement envisagées s'inspirent du ladermill (Figure 6), notamment pour la conversion d'énergie. Les configurations de contrôle actuelles prévoient d'imposer des trajectoires en 8 pour couvrir une plus grande surface de vent.

L'université de Delft aux Pays-Bas mène d'importants travaux sur ce système et a construit un prototype comportant tous les éléments nécessaires au contrôle du kite et de la génération (station au sol, câble, kite, contrôleurs et capteurs).

1.3. Carrousel

Comme précédemment ce système prévoit que la génératrice soit située au sol. Cependant pour éviter les phases passives, plusieurs cerfs-volants contrôlés indépendamment sont utilisés pour mettre la génératrice en mouvement. Les kites sont attachés à une grande roue horizontale qui tourne autour de son axe afin de générer de l'électricité. Un kite se retrouve donc alternativement en position de génération et en position de retour. Lors de cette phase passive il est tiré par la roue, elle-même entraînée par les kites en traction. On retrouve donc le concept de l'éolienne actuelle dont des modèles à axe vertical sont en cours d'étude pour les mêmes raisons, c'est-à-dire l'absence de grand mât devant supporter une génératrice qui représente une masse importante.



Figure 7: Vue d'artiste d'un carrousel

Aucun système de ce type n'existe encore car il nécessiterait un contrôle parfait des kites. Ce pourrait cependant être la prochaine étape dans l'utilisation des kites pour la production d'énergie.

1.4. Autres technologies

Pour la plupart des technologies mentionnées précédemment, le positionnement de plusieurs kites sur une même ligne est souvent étudié dans le but d'augmenter la puissance reçue, à l'instar du ladermill.

Il existe en outre des systèmes très similaires mais fonctionnant sous l'eau puisque les principes de récupération de l'énergie sont globalement les mêmes (Figure 8).

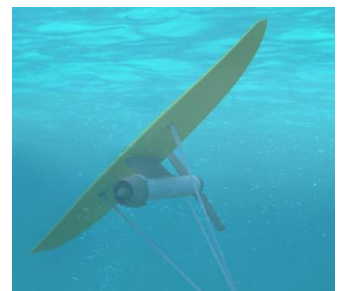


Figure 8 Système sous-marin

II. Définition des repères

On considère dans la suite du rapport un chariot se déplaçant avec une vitesse U selon l'axe \vec{x} , l'axe \vec{z} étant vertical. On définit enfin l'axe \vec{y} afin d'avoir une base directe $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$.

Les angles permettant de repérer les différentes vitesses sont définis dans ce repère avec U_{wind} la vitesse du vent, U la vitesse du chariot (selon l'axe \vec{x}) et U_{app} la vitesse du vent apparent (Figure 9).

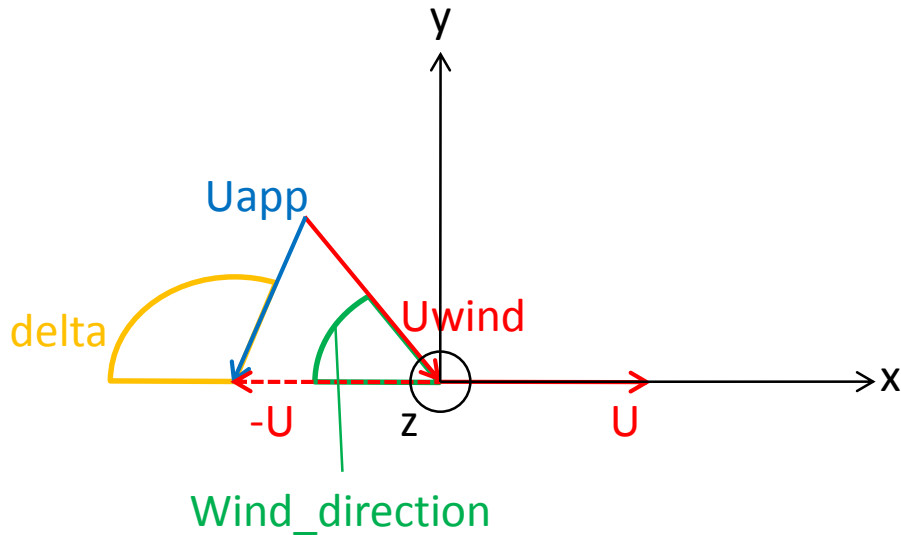


Figure 9: Définition des repères

Les angles delta et Wind_direction sont donc respectivement les angles entre la direction du vent apparent et l'axe \vec{x} et la direction du vent apparent et l'axe \vec{x} .

On définit également l'élévation : l'angle de la ligne du kite par rapport à l'horizontale (Figure 10).

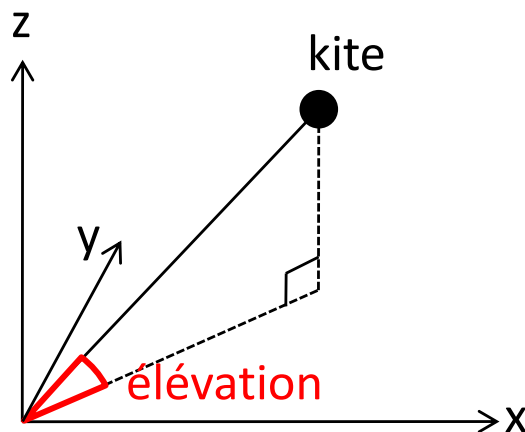


Figure 10: définition de l'élévation

On se place maintenant dans un repère fixe par rapport au centre de gravité du kite, les axes de ce repère sont dirigés grâce à la vitesse du vent apparent (en bleu sur la Figure 11).

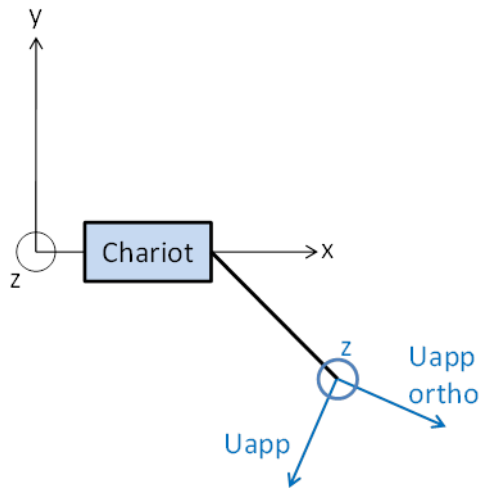


Figure 11: repère du kite

Dans la suite de l'étude on suppose que le bord d'attaque du kite est toujours perpendiculaire à la vitesse du vent apparent (hypothèse de stabilité en lacet) et on a ainsi dans le repère $(U_{app}, U_{app_ortho}, z)$, l'angle β qui est défini tel que sur la Figure 12.

Pour finir, nous avons aussi besoin de l'angle α , angle d'incidence de l'aile avec le vent apparent (Figure 13).

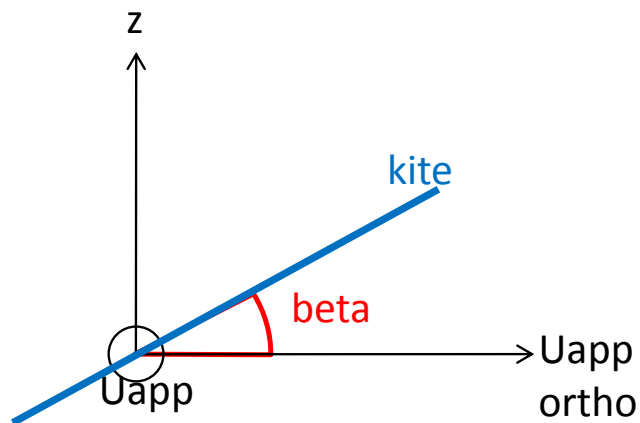


Figure 12: définition de Beta

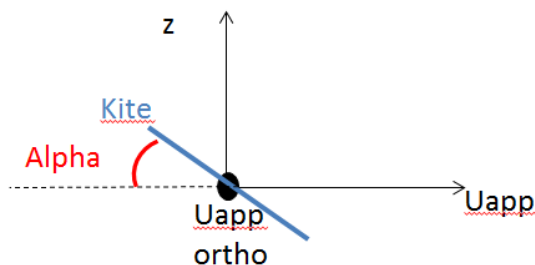


Figure 13: définition d'alpha

III. Estimation de l'énergie récupérable avec une aile de kite

Cette partie présente notre travail visant à quantifier la quantité d'énergie éolienne récupérable en utilisant des ailes de kites. Il nous a été demandé de produire un code de calcul simple en Python renvoyant une estimation de la puissance en fonction de divers paramètres tels que la forme et la surface de l'aile. Ne disposant que de très peu de données expérimentales, nous avons dû faire de nombreuses hypothèses simplificatrices que nous détaillerons par la suite.

III.1. Chariot sur un rail rectiligne infini

Nous considérons pour commencer un cas très simple qui sert de base pour la suite de notre travail, et va nous permettre de définir ici nos principales hypothèses de calcul.

Un chariot, tiré par une aile dans un vent constant et uniforme, se déplace sur un rail rectiligne infini. Un système récupérant l'énergie mécanique du chariot lui impose une vitesse constante.

Nous nous affranchissons ainsi des phases de manœuvres et pouvons faire l'hypothèse d'un problème statique dans le repère lié au chariot. Le chariot est relié à l'aile par un câble tendu et rectiligne. La masse du câble ainsi que les efforts aérodynamiques qu'il pourrait subir sont ignorés. La masse de l'aile est également négligée. Les efforts aérodynamiques du vent sur l'aile sont donc directement transmis au chariot. Le déplacement de celui-ci étant imposé, il est alors facile de calculer la puissance fournie au chariot par le vent.

Les efforts du vent sur l'aile sont déterminés en utilisant les coefficients aérodynamiques de trainée (drag) et de portance (lift) respectivement notés C_d et C_l qui dépendent fortement de la géométrie de l'aile et de l'angle d'incidence (α) entre la corde de l'aile et la direction du vent.

La trainée est la composante de ces efforts parallèle à la direction du vent. La portance est orthogonale à la direction du vent et orthogonale à la direction du bord d'attaque (Figure 14).

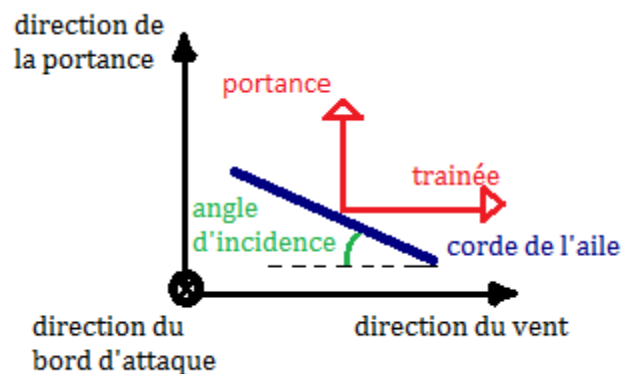


Figure 14 Définition des forces aérodynamiques

Si le bord d'attaque est supposé être toujours orthogonal à la vitesse du vent (hypothèse de stabilité en lacet), il est en revanche libre de s'éloigner de l'horizontale. Nous avons donc défini l'angle β (roulis) tel que présenté Figure 12.

Nous pouvons ainsi déterminer les efforts aérodynamiques sur l'aile en fonction des coefficients aérodynamiques (et donc de la géométrie de l'aile et de l'angle d'incidence), de la surface de l'aile, de l'angle β et de la vitesse relative du vent par rapport à l'aile.

Cette vitesse est aisément déterminée à partir de la vitesse réelle du vent, de sa direction et de la vitesse du chariot.

La principale difficulté a été d'obtenir des coefficients aérodynamiques réalistes pour différentes géométries d'ailes en fonction de l'angle d'incidence (Annexe 1 - Caractéristiques de l'aile). Il est important de noter que les coefficients que nous avons utilisés ne dépendent pas de la vitesse de l'écoulement et du nombre de Reynolds qui ont pourtant une influence non négligeable.

III.1.1) Vent arrière

Dans ce premier modèle (Figure 15), le vent est considéré horizontal de direction $O\vec{x}$, de module constant au cours du temps et quelle que soit l'altitude du kite. On se rapproche donc d'un char à voile et la position du kite n'est pas étudiée ici, on cherchera uniquement à calculer la puissance instantanée reçue par celui-ci à l'aide du principe fondamental de la dynamique appliqué à l'ensemble kite + chariot :

$$P = F_{drag} \cdot U \text{ où } F_{drag} = \frac{1}{2} \rho S C_d (U_{wind} - U)^2$$

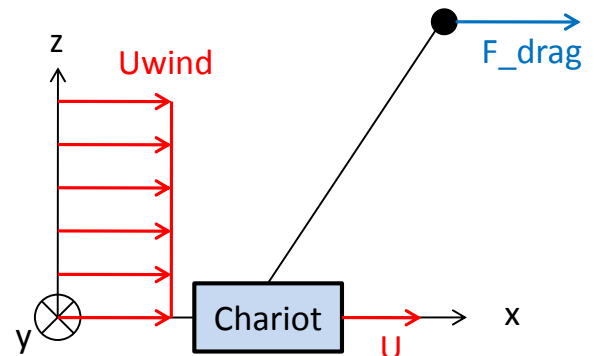


Figure 15 : modèle vent arrière

On cherche à optimiser l'angle d'attaque α ainsi que la vitesse U du chariot afin de maximiser la puissance instantanée reçue par le kite.

Dans ce cas simple, on peut déterminer analytiquement la valeur optimale de la vitesse du chariot en considérant que par vent arrière le kite ne peut pas aller plus vite que le vent. Ainsi $U = \frac{U_{wind}}{3}$, la puissance récupérable est donc $P = \frac{2}{27} \rho S C_d U_{wind}^3$ d'où $C_p = \frac{4}{27} C_d(\alpha)$. L'angle α est optimisé pour avoir la finesse la plus grande possible, pour le profil DU40_A17 (Annexe 1 - Caractéristiques de l'aile), l'angle α optimal est de 18° , ce qui permet d'avoir $C_d = 0,33$ et donc $C_p = 5\%$.

Ce modèle très simple nous a surtout permis de bien appréhender le problème, les résultats pouvant être déterminés analytiquement. Le coefficient de puissance n'est pas très élevé mais on sait que ce n'est pas par vent arrière que la puissance récupérable est maximale.

III.1.2) Optimisation pour différentes directions du vent

On cherche ensuite à étudier la puissance reçue par le kite pour différentes allures, toujours en considérant celui-ci uniforme sur tout le domaine. Etant donné que l'algorithme d'optimisation de l'orientation du kite cherche à maximiser la force suivant l'axe \vec{x} nous ajoutons une condition permettant de ne pas avoir un kite au niveau du sol. L'expression de la puissance est maintenant :

$$P = \cos(\delta) F_{drag} + \sin(\delta) \sin(\beta) F_{lift}$$

Avec $F_{drag} = \frac{1}{2} \rho S C_d U_{app}^2$, $F_{lift} = \frac{1}{2} \rho S C_l U_{app}^2$ et

$$U_{app} = \sqrt{(\cos(Wind_{direction}) * U_{wind} - U)^2 + (\sin(Wind_{direction}) * U_{wind})^2}$$

On cherche ici à optimiser la vitesse du chariot, l'angle d'attaque α du kite ainsi que l'angle β de « roulis ».

La Figure 16 décrit les résultats pour une aile de 5 m^2 de profil DU40 et un vent de 10 m/s .

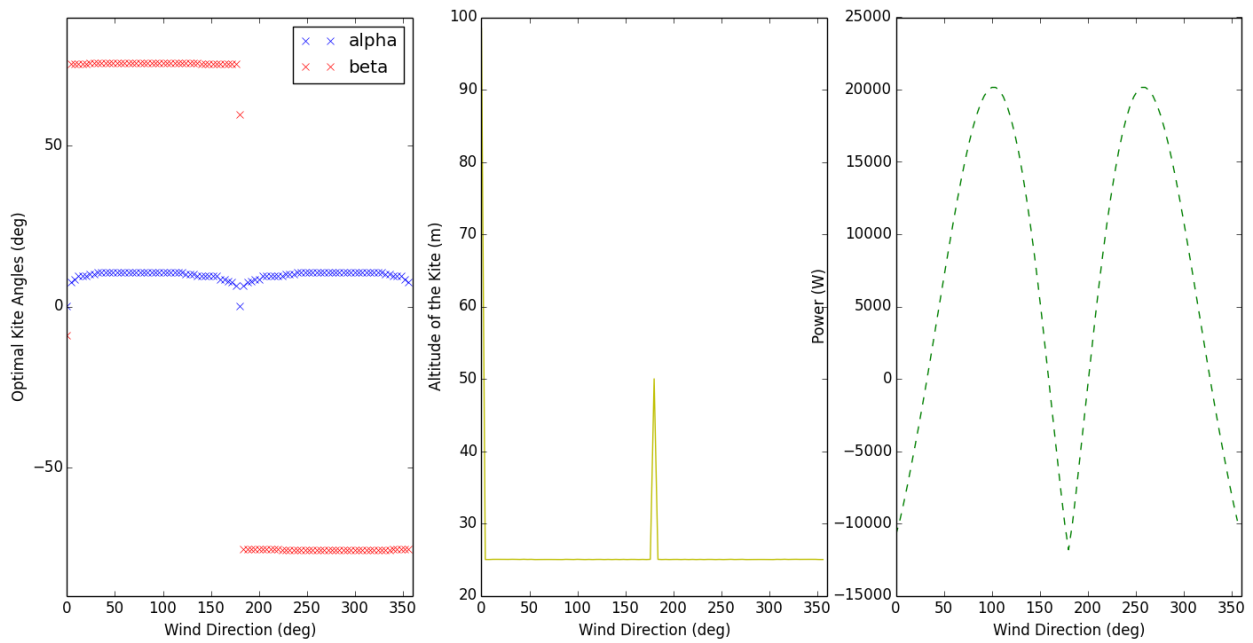


Figure 16 Résultats pour différents allures

La puissance maximale obtenue est d'environ 20500 W pour une direction du vent incident autour de 102 degrés. La vitesse optimale du chariot est de 27.6 m/s.

Cette simulation donne donc une puissance maximale de 4 kW/m² pour un vent de 10 m/s.

Concernant l'altitude du Kite, les résultats sont assez étonnants, car le poids n'est pas pris en compte.

III.1.3) Profil vertical du vent

On considère maintenant un profil logarithmique pour le vent (Figure 17) :

$$V(Z) = V(Z_{ref}) \frac{\text{Log}(\frac{Z}{Z_0})}{\text{Log}(\frac{Z_{ref}}{Z_0})} \text{ avec } Z_0 \text{ la rugosité}$$

de la surface choisie. Dans notre cas : une technologie amenée à être utilisée en mer, donc dans un environnement de faible rugosité, on prend $Z_0 = 0,055 \text{ m}$. Les gammes de vents que l'on considère dans cette étude sont ceux habituellement rencontrés dans le cas de l'éolien, soit de 7 m/s à 15 m/s. Les équations à résoudre restent les mêmes, seule l'expression du vent change.

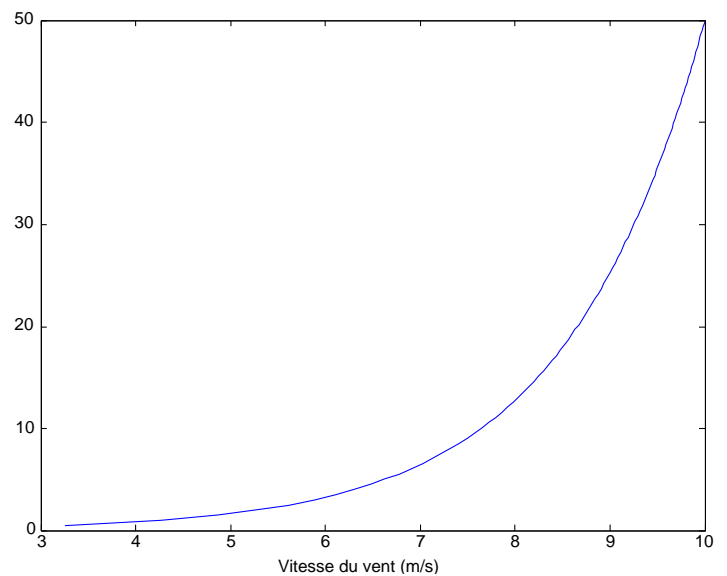


Figure 17 Profil logarithmique de la vitesse du vent (V(Zref)=10 m/s)

On obtient alors les résultats présentés Figure 18.

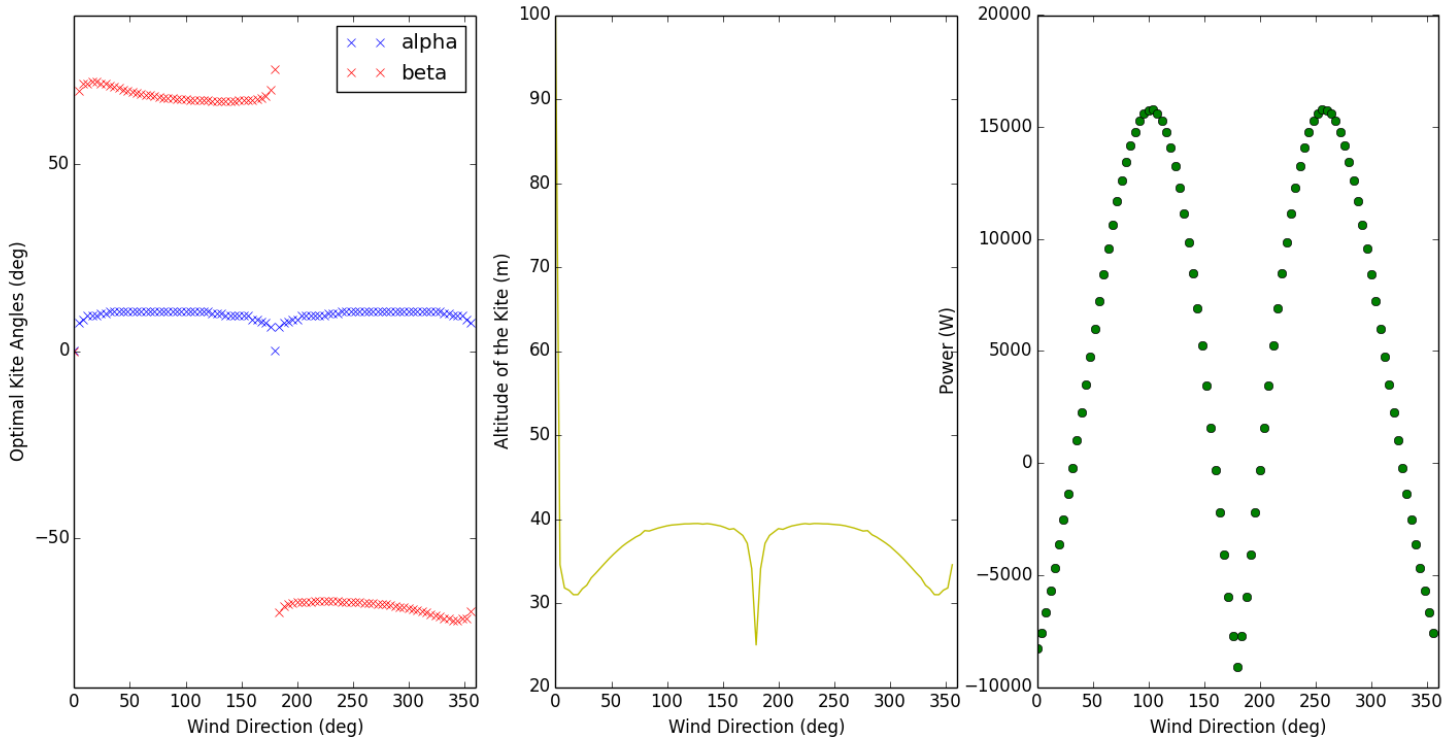


Figure 18 Polaire pour un profil logarithmique du vent

Cette fois-ci la puissance maximale obtenue est d'environ 15800 W, pour un angle d'incidence de 102°, et une vitesse optimale du chariot de 25.5 m/s.

III.2. Carrousel

On cherche maintenant à étudier un carrousel comportant plusieurs kites sur son pourtour. Le nombre de kites va simplement augmenter la puissance reçue puisqu'on ne prend pas en compte les interactions aérodynamiques entre ces derniers.

III.2.1) Utilisation des résultats pour un rail infini

A partir de la polaire calculée dans le cas du rail infini on étudie directement le comportement d'un kite en considérant pour chaque angle θ un simple changement de repère pour déterminer sa position. On considère que les kites vont tous à la même vitesse lorsqu'ils parcourent le carrousel, on cherche donc en premier lieu à déterminer la vitesse optimale que doit avoir un kite sur toute la durée de la rotation. Pour cela, on étudie l'aire sous la courbe de puissance obtenue à l'aide de la théorie du rail infini. On trouve une vitesse optimale proche de trois fois celle du vent, les angles α et β de chaque kite étant toujours optimisés pour chaque position par rapport au vent.

a) Trajectoires

On suppose que la trajectoire du kite dans le repère local lié au chariot ne dépend pas du rayon du carrousel, ce qui est une hypothèse très forte. En effet, cette hypothèse ne peut être valide que pour une longueur de câble l très petite par rapport au rayon

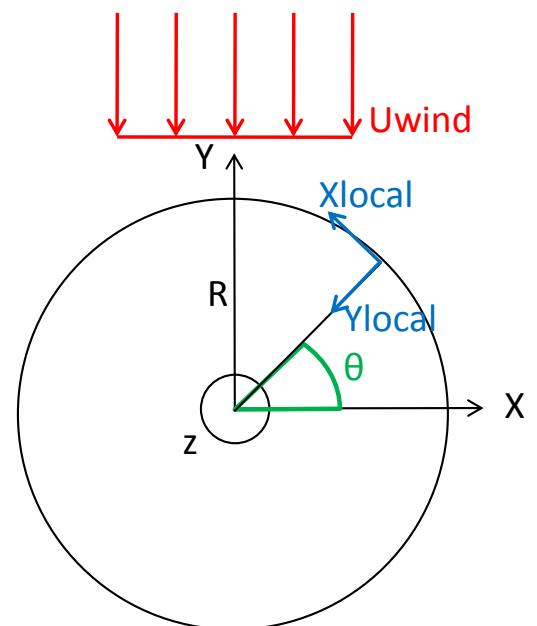


Figure 19 Repère local dans le cas du carrousel

R du carrousel.

Pour $R=0,4$ l (Figure 1821) on observe une trajectoire qui n'est pas réaliste du tout, le kite remonte trop dans la direction du vent pour $\theta \in [\pi; 2\pi]$.

La trajectoire paraît déjà plus réaliste physiquement dans le cas 2 (Figure 1920), on n'observe plus de remontée impossible du kite dans la direction du vent.

Enfin la Figure 22 vérifie la condition énoncée ci-dessus, on est en effet dans un cas où le rayon du cercle est tellement important par rapport à la longueur des câbles que la variation de vitesse apparente due à la rotation est négligeable.

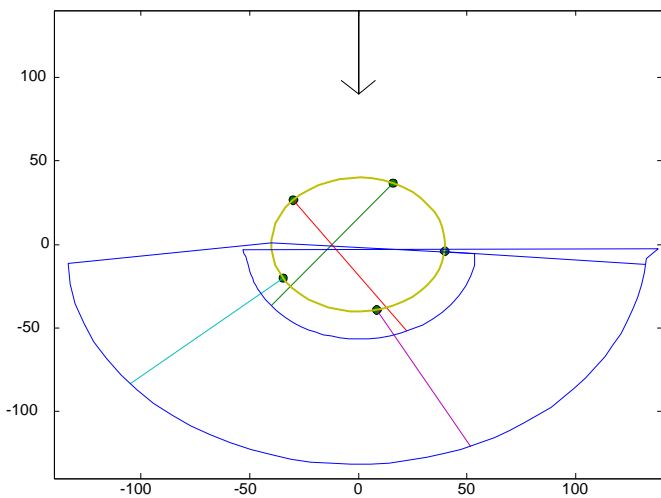


Figure 21: Carrousel $R=0.4l$

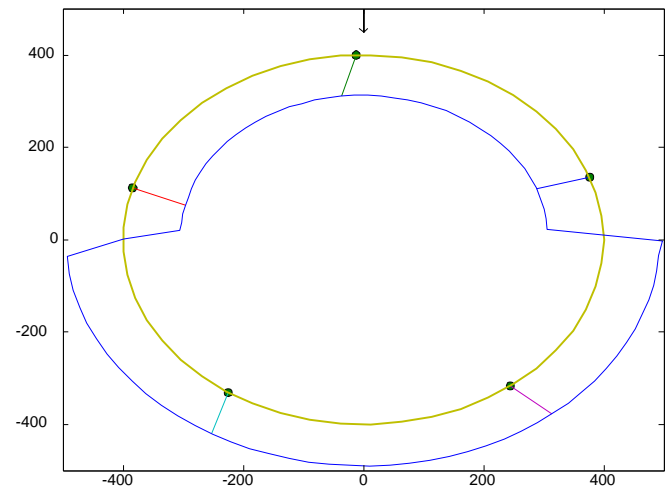


Figure 20 Carrousel : $R=4l$

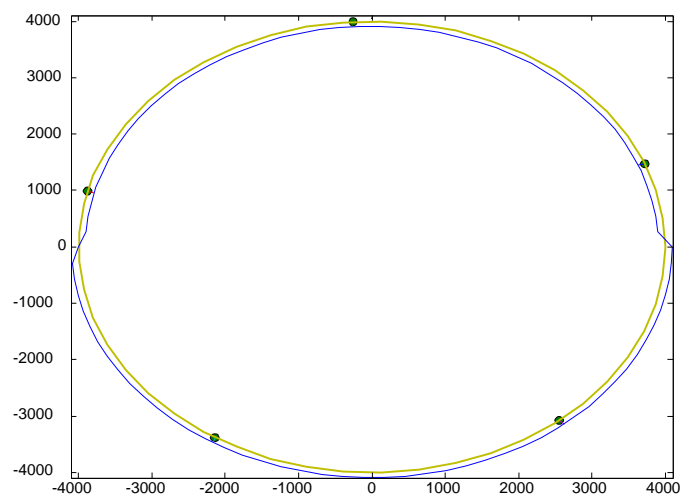


Figure 22: Carrousel, $R=20l$

b) Puissance récupérée

La puissance récupérée grâce au carrousel évolue avec le cube de la vitesse du vent (Figure 23) à l'altitude de référence (50 m), ce résultat est similaire aux courbes de puissance d'une éolienne classique. Cependant notre algorithme renvoie une valeur toujours croissante de la puissance lorsque la vitesse augmente et on n'observe donc pas le palier typique des courbes de puissance des éoliennes. Mais ce résultat n'est vraisemblablement dû qu'à nos hypothèses et à notre algorithme, pas à la réalité physique du problème.

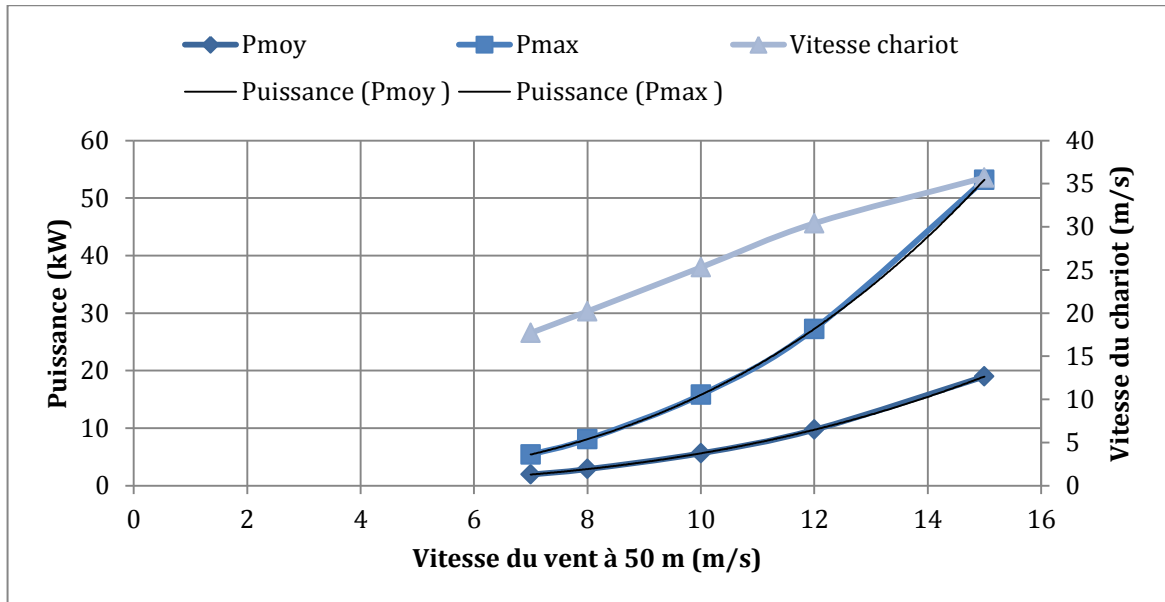


Figure 23 Puissance récupérable grâce au carrousel

Contrairement à ce à quoi on pouvait s'attendre, la puissance récupérée n'évolue pas linéairement avec la surface des ailes utilisées (Figure 24). Ceci est peut-être dû à l'optimisation de l'angle d'attaque et de la position du kite pour chaque position qui dépend, à priori, des valeurs des forces aérodynamiques. Si nos résultats sont réalistes, il paraît donc assez intéressant d'augmenter la surface des ailes. Evidemment, une limitation existe quant à la maniabilité de systèmes de trop grande taille puisqu'on cherche à avoir des systèmes automatisés capables d'être lancés et récupérés sans intervention humaine.

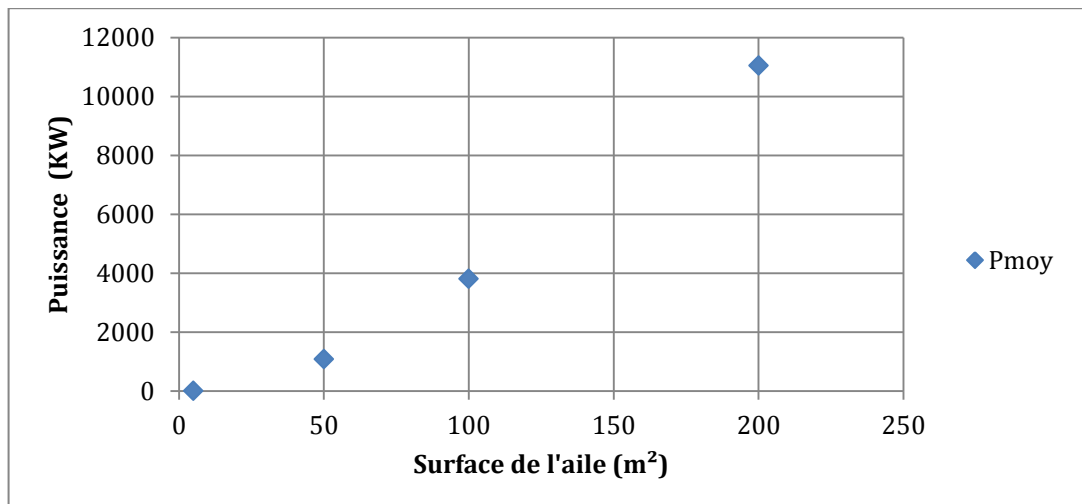


Figure 24 : Evolution de la puissance en fonction de la surface de l'aile

III.2.2) Prise en compte de la vitesse du kite

On cherche cette fois à prendre en compte la différence de vitesse entre le kite et le chariot du fait de la rotation autour de l'axe du carrousel. On mène une étude temporelle sur le pourtour de ce dernier en suivant le principe décrit Figure 25. Le pas de temps dt est lié à la discrétisation en angle (de la position du chariot) que l'on veut car on choisit une vitesse constante du chariot sur sa trajectoire circulaire. Des itérations sont réalisées pour chaque angle afin d'assurer une bonne précision de l'algorithme.

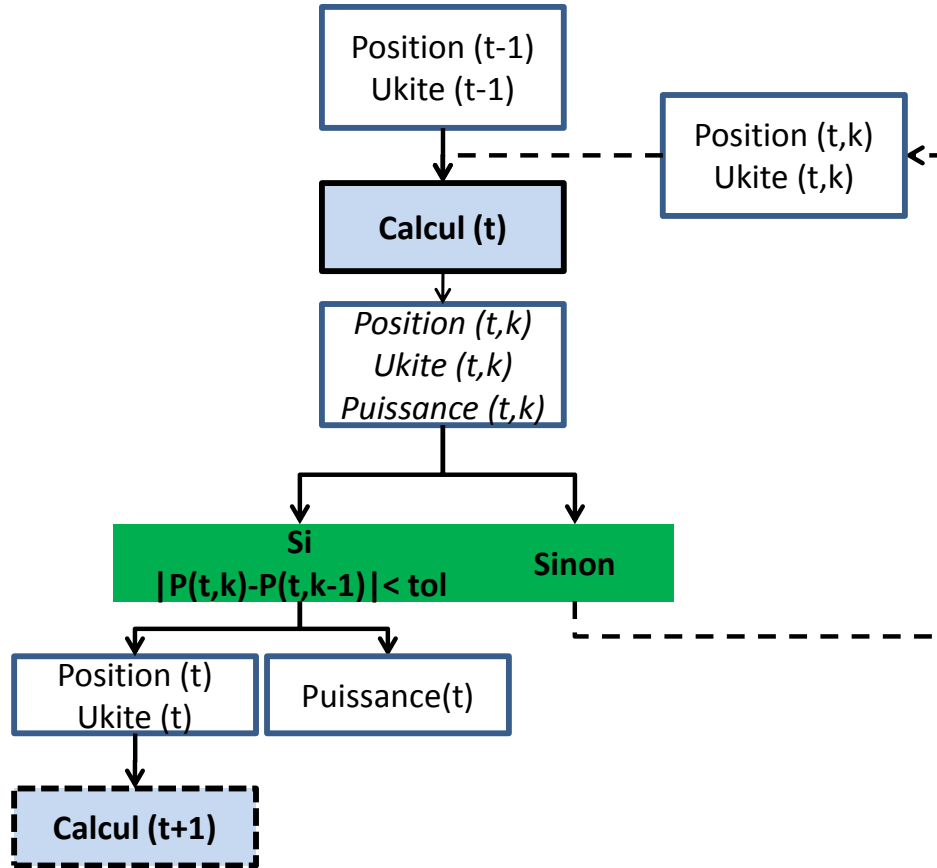


Figure 25 Algorithme prenant en compte la vitesse du kite

Nous avons malheureusement rencontré des difficultés à faire tourner cet algorithme qui ne converge pas en son état actuel.

IV. Conclusion

L'objectif de ce projet était de développer un code de calcul qui soit capable de modéliser la récupération d'énergie par des ailes de Kites, et d'en déduire les meilleures configurations à adopter (carrousel, rail rectiligne), les caractéristiques de l'aile,... ainsi que la faisabilité de tels systèmes.

Il en ressort que la puissance générée est très importante, de l'ordre de 1 à 10 kW/m² d'aile dans un vent de 10 m/s. Cependant, le modèle utilise de nombreuses hypothèses et n'est donc pas applicable sur une large gamme de configurations. En particulier, nous avons vu qu'il est peu adapté à l'étude d'un carrousel réaliste, car la cinématique n'est pas fidèle à la trajectoire réelle du kite (il a une vitesse et une trajectoire différentes de celles du chariot). De plus, pour pouvoir comparer différentes configurations, la prise en compte de la dynamique de la trajectoire est importante, et majorera les résultats obtenus.

L'autre point important et actuellement à l'état de recherche concerne les voiles de kite elles-mêmes, car Cl et Cd sont déterminants sur la position d'équilibre du kite et l'énergie générée.

Finalement, cette étude constitue une première approche de la génération d'électricité par des ailes de kites mais comporte de nombreuses approximations, et seul une approche dynamique peut permettre de rendre compte réellement du très grand potentiel de cette énergie.

Les programmes python créés permettent de tester différentes configurations d'ailes, d'observer les trajectoires simulées et les puissances récupérables. Nous n'avons pas les données précises d'ailes, mais les programmes ont été créés dans l'idée de rentrer les courbes des coefficients de portance et traînée pour une aile choisie et d'obtenir les résultats recherchés.

Annexe 1 - Caractéristiques de l'aile

Nous n'avons pas eu accès à des données aérodynamiques précises concernant les kites et nous avons donc utilisé des données relatives à des profils d'ailes ou de pales d'éoliennes étudiés pendant l'année.

La majorité des coefficients de portance et de traînée sont tirés de profils de pales d'éoliennes (Figure 26) dont toutes les données aérodynamiques sont stockées dans des fichiers textes. Nous avons donc écrit un programme permettant de lire ces données (Figure 27) et de les stocker dans des fichiers python rapidement accessibles dans nos programmes. On réalise ensuite une interpolation linéaire sur ces tables à l'aide des fonctions préexistantes de python.

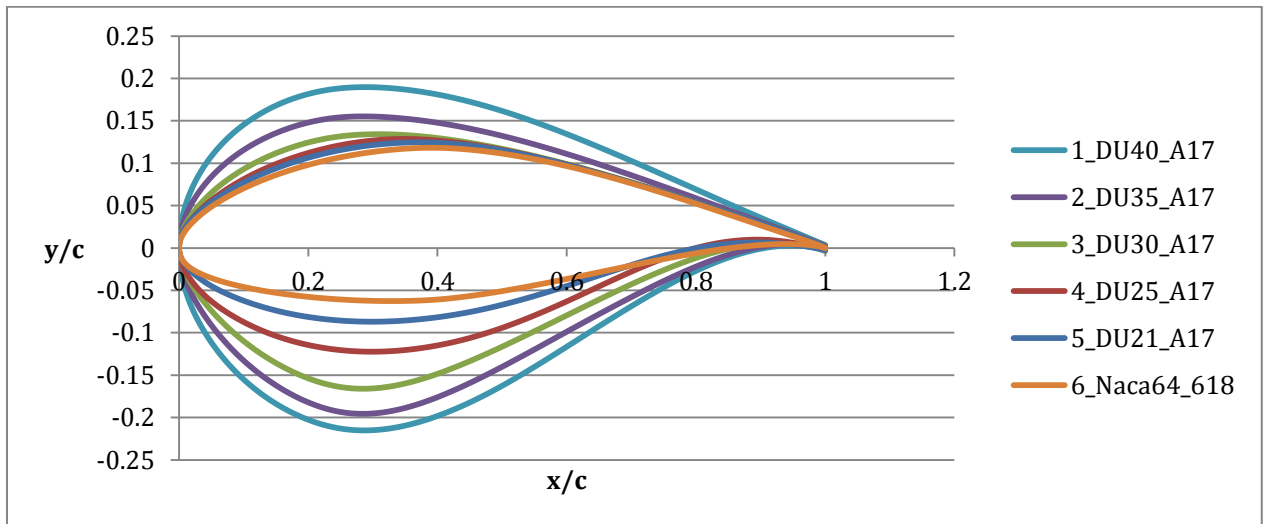


Figure 26 Profils étudiés

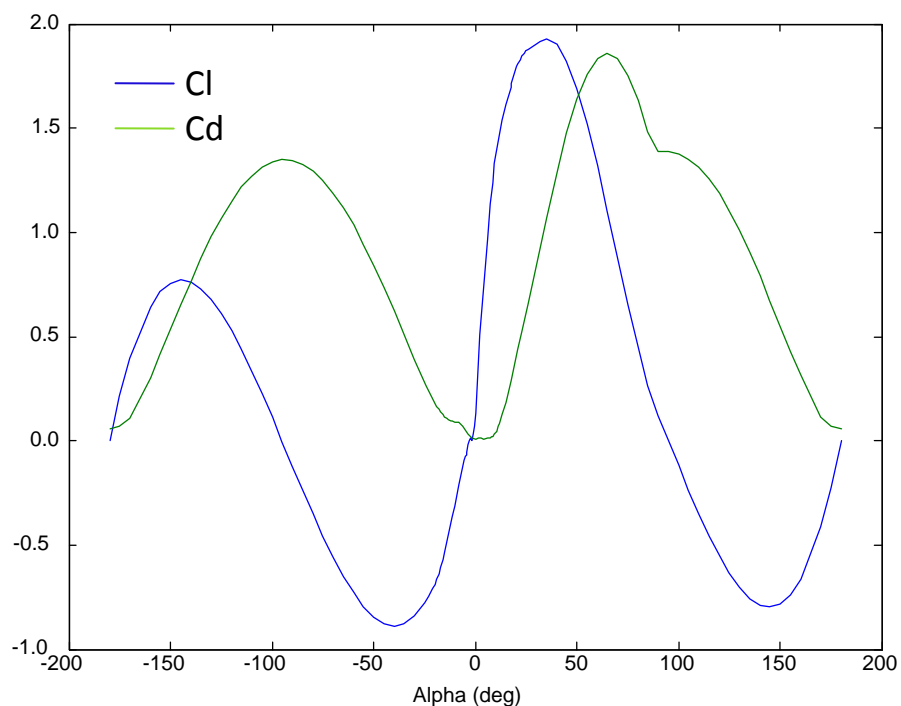


Figure 27 Coefficients aérodynamiques profil DU40_A17

Nous avons tracé la finesse de chaque profil en fonction de l'angle d'incidence (Figure 28), et nous avons choisi celui dont la finesse maximale était la plus proche de celles d'une aile de kite (aux alentours de 5-10 pour les bons kites, jusqu'à 40- 50 pour les ailes rigides). On constate donc que les données à notre disposition ne sont pas vraiment adaptées à des ailes de kites. Cependant, ces profils sont bien connus dans la bibliographie, et les constructeurs d'ailes de kites ne divulguent pas leurs données.

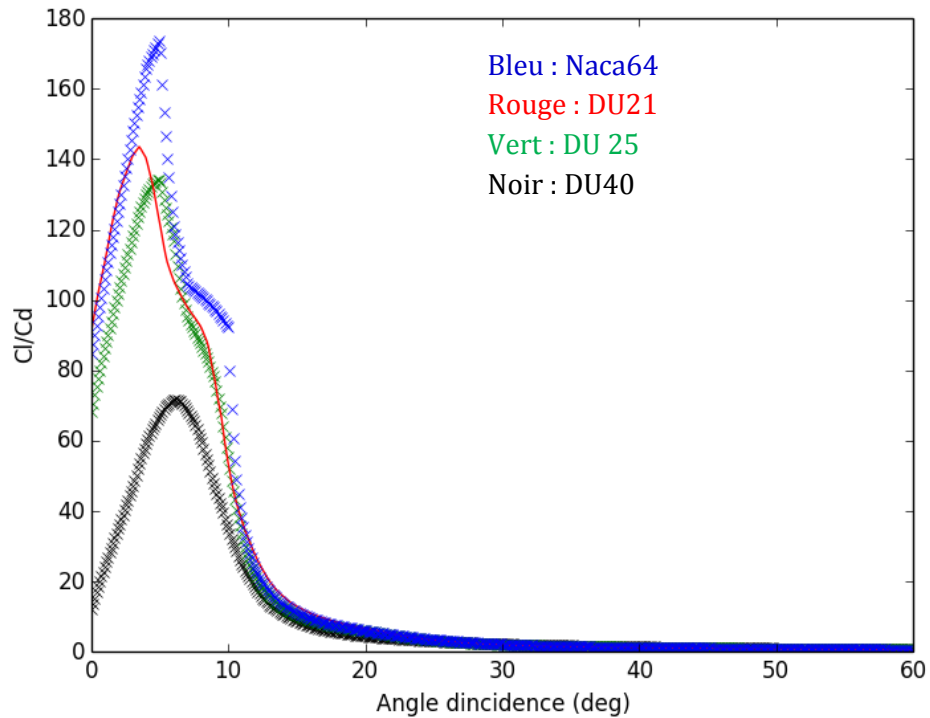


Figure 28 Finesse des profils

Nous retenons donc le profil DU40 qui est le plus proche de notre cas de simulation.

Annexe 2 – Table des figures

Figure 1 Comparaison kite/éolien classique	3
Figure 2 Système de Makani Power	4
Figure 3 Tambour et génératrice de 20 kW	5
Figure 4 Système avec déroulement du câble.....	5
Figure 5 Vue d'artiste du ladermill.....	5
Figure 6 Système de type "yo-yo" (3).....	6
Figure 7: Vue d'artiste d'un carrousel	6
Figure 8 Système sous-marin.....	6
Figure 9: Définition des repères	7
Figure 10: définition de l'élévation.....	7
Figure 11: repère du kite	8
Figure 12: définition de Beta.....	8
Figure 13: définition d'alpha	8
Figure 14 Définition des forces aérodynamiques.....	9
Figure 15 : modèle vent arrière	10
Figure 16 Résultats pour différents allures	11
Figure 17 Profil logarithmique de la vitesse du vent	11
Figure 18 Polaire pour un profil logarithmique du vent	12
Figure 19 Repère local dans le cas du carrousel	12
Figure 20 Carrousel : $R=4l$	13
Figure 21: carrousel $R=0.4l$	13
Figure 22: Carrousel, $R=20l$	13
Figure 23 Puissance récupérable grâce au carrousel	14
Figure 24 : Evolution de la puissance en fonction de la surface de l'aile.....	14
Figure 25 Algorithme prenant en compte la vitesse du kite	15
Figure 26 Profils étudiés	17
Figure 27 Coefficients aérodynamiques profil DU40_A17	17
Figure 28 Finesse des profils.....	18

Annexe 3 – Bibliographie

1. **Loyd, Miles L.** Crosswind Kite Power. Livermore, Californie, USA : Lawrence Livermore National Laboratory, novembre 8, 1979.
2. **Makani Power.** Technology. *Makani Power*. [Online] [Cited: 03 19, 2014.] <http://www.makanipower.com/what-is-airborne-wind/>.
3. **Williams, Paul, et al., et al.** *Modeling, Simulation, and Testing of Surf Kites for Power*. Honolulu : Delft University of Technology, 2008.
4. **Fechner, Uwe.** *A methodology for kite-power control design*. Delft : TUDelft, 2013.
5. **Saraceno, Eugenio.** Kitegen yoyo système et carrousel. <http://kitegen.com/>. [Online] 01 02, 2013. [Cited: 03 19, 2014.] <http://kitegen.com/>.
6. **Minesto.** Deep Green. *Technical Data*. Belfast : Minesto.
7. **SkySails Power GmbH.** Major benefits. *SkySails Power*. [Online] 2014. [Cited: 03 25, 2014.] <http://www.skysails.info/english/power/power-system/major-benefits/>.