

Institut National des Sciences Appliquées

Science et Technique Pour l'Ingénieur 2

UC Projet de Physique P6

Projet de Physique

-

Conception Assistée par Ordinateur d'une éolienne 2 MW à axe horizontal

ANFRAY Julie
CAMPAGNA Kevin
DEYBACH Théo
HILAL Bahaeddine
MAIQUES Arthur
RUHNAU Fiona

Didier LEMOSSE

- Date remise du rapport : **15/06/2020**
- Référence du projet : **STPI/P6/2020/12**
- Intitulé du projet : **Modèle CAO précis d'une éolienne classique à axe horizontal**
- Objectifs du projet : **Comprendre et modéliser les éléments technologiques d'une éolienne à axe horizontale via les fonctionnalités du logiciel SolidWorks**
- Mots-clés du projet : **aérodynamisme, calculs, modélisation, SolidWorks, prototypage**

Remerciements

Nous souhaitons remercier Monsieur Didier LEMOSSE pour l'aide qu'il nous a apporté tout au long du projet. Nous souhaitons le remercier pour toutes les ressources qu'il a mis à notre disposition pour pallier au contexte sanitaire dans lequel s'est déroulé notre projet.

Nous souhaitons aussi remercier le service informatique de l'INSA qui nous a permis d'obtenir une licence SolidWorks Premium afin de poursuivre notre projet à distance dans les meilleures conditions.

Table des matières

Remerciements	2
Table des matières	3
Introduction	5
La pale d'éolienne	7
Forme de la pale, aérodynamisme et aéroélasticité	7
Aérodynamisme	7
Détermination de ces coefficients	9
Choix du profil	11
L'épaisseur relative	11
La flèche	11
Aéroélasticité des pales	12
Forces auxquelles sont soumises les pales	12
Efforts inertiels :	12
Force centrifuge	13
Chargements gravitationnels :	13
Les matériaux qui composent la pale	14
Modélisation de la pale d'éolienne	15
Profil 100% symétrique	15
Profil réel et adaptatif	16
Rendu réaliste de la pale	19
Le système de Yaw	20
L'intérêt du Yaw system	20
Focus sur le motoréducteur (Yaw Drive)	20
Fonctionnement d'un motoréducteur	20
Les différentes conditions sur les engrenages du motoréducteur	21
Modélisation CAO du Motoréducteur:	22
Le Yaw système dans son ensemble	24
Le mouvement de lacet, composants et mise en oeuvre technique	24
Les roulements à rouleaux coniques	24
Figure 2.10 : Roulement à rouleaux cylindriques	25
Les freins de lacet	25
Modélisation CAO des éléments du Yaw System	27
Le coeur de l'assemblage	27
La nacelle "bedplate" et ses composants	27
Les roulements à rouleaux coniques	28
Assemblage global	30
Améliorations envisageables	31

Le Tip-Brake ou frein aérodynamique	32
L'intérêt des freins aérodynamique	32
Le danger d'une éolienne trop rapide	32
Lien avec les freins mécaniques	32
Les différents types de freins aérodynamiques	33
Pas fixe (Par effet Stall)	33
À pas variable (Mise en drapeau)	33
Par la force centrifuge	33
Fonctionnement du tip-brake	34
Etude des forces s'exerçant sur le tip brake (calculs)	35
Fonctionnement théorique d'un tip-brake à déclenchement mécanique	35
Modélisation CAO du tip brake	37
Présentation du brevet	37
Présentation de la conception de quelques pièces	39
Points délicats du projet et libertés prises par rapport au brevet	43
Animations du tip brake	43
Améliorations envisageables	44
Prototypage du tip brake	45
Schéma du prototypage	45
Matériel utilisé	45
Présentation	45
Etude dynamique du prototype	47
Conclusion	50
Bibliographie	51
Crédits d'illustrations	52
Annexes	53

Introduction

Aujourd'hui, l'éolien représente de grandes opportunités de produire de l'énergie renouvelable. Dans ce monde où le contexte environnemental n'a jamais été si compliqué et où les ressources énergétiques fossiles se font de plus en plus rare, les énergies renouvelables sont alors les énergies de demain.

Si le vent est utilisé depuis des décennies pour produire de l'énergie, on voit, depuis quelques années, un développement phénoménale des éoliennes. Ces dernières deviennent de plus en plus technologiques pour assurer différents objectifs de résistance et de rentabilité. En effet, il est nécessaire pour l'éolienne de capter les faibles vents pour produire de l'électricité dans toutes les conditions mais aussi de résister aux conditions extrêmes comme des vents violents. Tout le monde connaît aujourd'hui le corps d'une éolienne mais connaissons nous les éléments qui la composent?



C'est ce que nous allons chercher à expliquer dans ce rapport et dans la modélisation que nous proposons. Pour ce faire, nous allons nous focaliser sur différents éléments technologiques de l'éolienne afin d'en comprendre les fonctionnements et le travail d'innovation qui se cache derrière leur conception. Premièrement, nous allons étudier les différents profils aérodynamiques de la pale d'éolienne, ses caractéristiques, les matériaux qui la composent et sa modélisation. Ensuite, nous allons parler du système de Yaw et des moto-réducteurs associés qui permettent la rotation de la nacelle sur le mât. Enfin, nous aborderons le Tip-Brake ou frein aérodynamique en s'appuyant sur son fonctionnement, sa conception et ses caractéristiques mécaniques.

Il est important que l'on définisse la position et le rôle principal de chaque élément technologique que nous allons étudier dans ce rapport. Pour ce faire, voici une définition et une photo de tous les composants qui vont suivre dans ce rapport :

La pale d'éolienne :

Elles sont la plupart du temps au nombre de 3. Elle permettent de capter le vent. Grâce à leur profil aérodynamique, elles s'opposent à la force du vent ce qui entraîne une rotation autour de l'axe du moyeu produisant ainsi de l'énergie mécanique transformée par un alternateur en énergie électrique alternative.



Le système de Yaw :

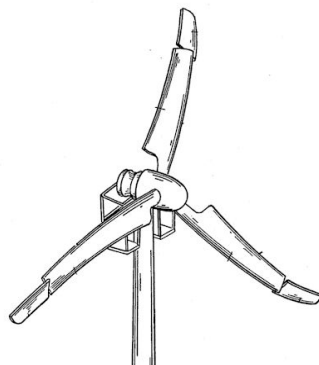
Il est situé en dessous de la nacelle, en haut du mât. C'est système d'engrenages et de moto-réducteurs, qui permettent de faire tourner la nacelle afin d'adapter le sens des pales en fonction de la direction du vent. On peut ainsi augmenter le rendement électrique de l'éolienne.



© 1998 www.WINDPOWER.org

Le Tip-brake ou frein aérodynamique :

On le place au bout de la pale d'éolienne. C'est un système mécanique qui permet de dissocier le bout de la pale de son corps afin de briser le voile d'air aérodynamique lorsque les forces d'inerties deviennent trop importantes. On peut ainsi ralentir la pale pour limiter les risques de décrochage et de casse.



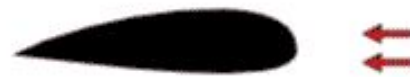
La pale d'éolienne

Forme de la pale, aérodynamisme et aéroélasticité

Aérodynamisme

Pour déterminer la forme des pales, on définit premièrement les forces et vitesses auxquelles sont soumises les pales.

L'industrie éolienne moderne emprunte beaucoup de ses procédés à l'industrie aéronautique, mais en a aussi des propres, du fait des changements de direction et de vitesse fréquents du vent.

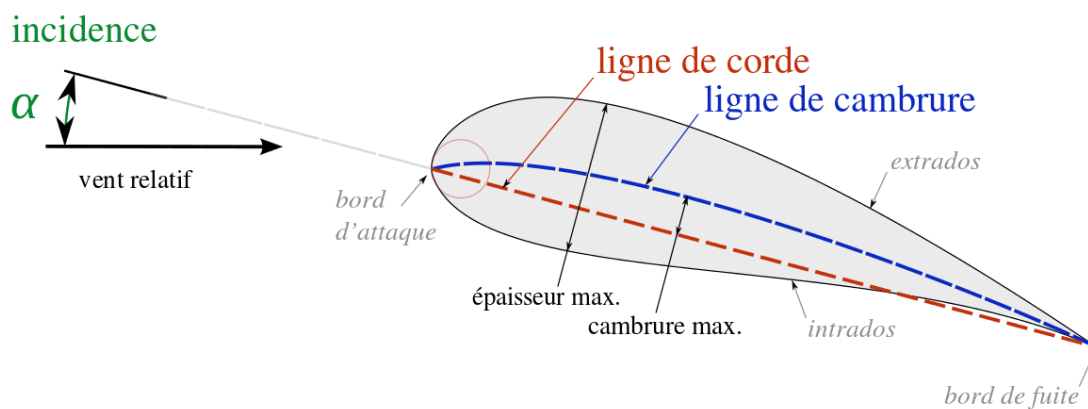


© 1998 www.WINDPOWER.dk

Figure 1.1 : Profil de l'aile d'avion

Lorsqu'on regarde le profil de l'aile d'un avion (coupe transversale), on constate que l'écoulement d'air est plus rapide sur l'extrados (dessus de l'aile) que sur l'intrados (dessous de l'aile). La dépression qui en résulte sur l'extrados crée une force qui permet de soulever l'avion vers le haut, c'est ce qu'on appelle la portance. Ce même principe est appliqué aux pales.

Figure 1.2 : Schéma d'un profil de pale d'éolienne



Il existe une autre force, qui tend à faire reculer la pale, car elle offre une surface qui s'oppose à l'écoulement de l'air. Il s'agit de la force de traînée.

Dans le cas des éoliennes, le vecteur vitesse (V_R) réellement vu par le profil est la résultante de la composition de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation. (Voir schéma ci-après). La portance est perpendiculaire à la direction du vecteur de la vitesse relative.

De même, la composition des forces orthogonales de traînée (F_x) et de portance (F_z) fait apparaître une force relative (F_R). On observe aussi un moment M autour de l'axe de la corde moyenne du profil. α est l'angle d'incidence, entre la direction de la vitesse incidente V_R et la corde moyenne du profil.

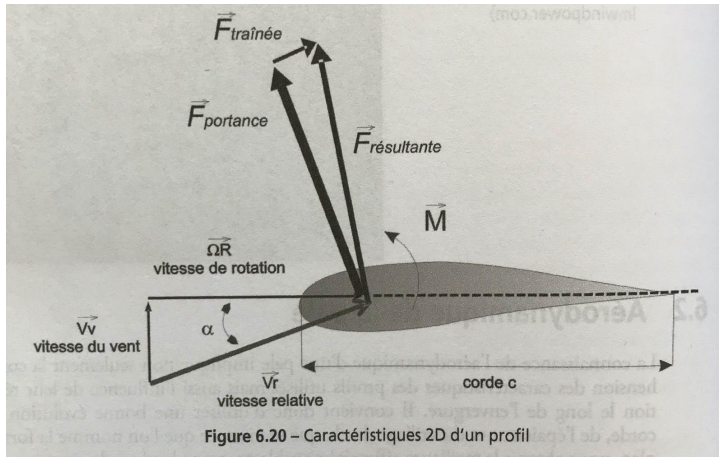


Figure 1.3 : Caractéristiques 2D d'un profil

$$F_z = 1/2 \rho C_z A V_R^2$$

$$F_x = 1/2 \rho C_x A V_R^2$$

$$M = 1/2 \rho C_M A c V_R$$

Avec A , surface de l'élément de profil et C_z , C_x , C_M , les coefficients respectivement de portance, de traînée et de moment, fonctions de l'incidence.

On représente l'évolution des coefficients C_z , C_x , C_M en fonction de α par ce qu'on appelle des polaires 2D d'un profil. Ces coefficients sont dits 2D car ils supposent que l'écoulement est uniforme en amont du plan étudié.

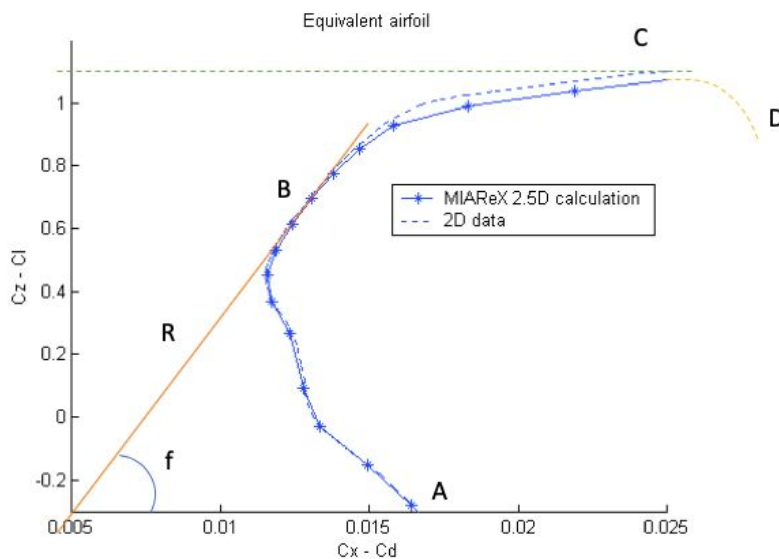


Figure 1.4 : Polaire 2D d'un profil NACA

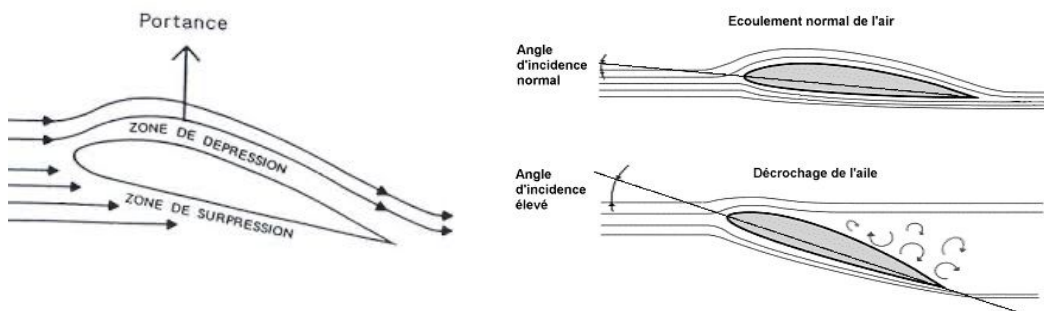
- A : incidence correspondant à une portance nulle ($C_x=0$)
- B : Finesse_{MAX} (C_z/C_x)_{max} : point admettant une tangente passant par l'origine.
- C : angle de décrochage = tangente horizontale= plus grand coefficient de portance

D : Lorsque C_x augmente mais C_z diminue, il y a décrochage.

R : le rayon correspond à l'intensité de la résultante aérodynamique.

f : formé par le vecteur représentatif de la force de portance et celui représentatif de la résultante aérodynamique

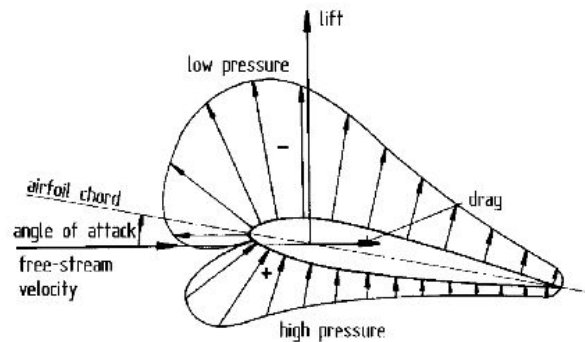
Comme on peut le voir sur ces polaires, la courbe de portance est linéaire, avant d'atteindre sa valeur maximale pour l'angle de décrochage α_d . Si on augmente trop l'incidence, on passe d'un régime dit attaché (le flux d'air reste attaché au profil), à un régime décollé (l'air s'arrête de suivre la surface de l'aile régulièrement), lorsque $\alpha > \alpha_{dec}$. On parle alors de décrochage aérodynamique. Les tourbillons créés sur l'extrados sont des turbulences. Les caractéristiques de portance résultant de la dépression de l'extrados de l'aile, s'écroulent. Au-delà de α_d , le coefficient de traînée augmente sensiblement. Le décrochage peut aussi avoir lieu si la pale de l'éolienne présente des imperfections à la surface, si elle n'est pas complètement lisse.



Figures 1.5 : Champ des lignes de courant autour du profil d'une aile

Enc 9

Figure 1.6 : Champ de pression autour du profil d'une aile



Détermination de ces coefficients

Ces coefficients sont déterminés par mesure en soufflerie ou par calcul. Des conditions stables d'écoulement sont attendues avant de relever les efforts résultants. L'incidence est alors augmentée et par étapes stabilisées successives pour obtenir une polaire complète, dite stationnaire. Ce ne sont pas les conditions réelles auxquelles seront exposées les pales dans leur environnement de fonctionnement.

Dans la réalité, les variations des conditions extérieures dues au mouvement du profil entraînent une constante évolution de l'incidence. Contrairement au modèle précédent, les conditions ne se stabilisent pas. On parle alors d'aérodynamique instationnaire. Ces variations peuvent, sous certaines conditions modifier grandement le comportement aérodynamique du profil au voisinage du décrochage. En effet, on observe un angle de décrochage supérieur à l'angle statique

$\alpha_{\text{déc}}$, et le coefficient maximum de portance augmente, on parle alors de surportance. Pour retrouver les caractéristiques de portance, le profil doit retrouver un angle d'incidence inférieur à $\alpha_{\text{déc}}$ initial, en suivant une courbe hystérésis, voir figure ci-après.

Par définition, l'hystérésis est la propriété présentée par un système dont les propriétés à un instant donné dépendent de toute son évolution antérieure et pas seulement des paramètres décrivant le système à cet instant.¹

Mathématiquement, on parle d'hystérésis lorsque la courbe de $E=f(C)$ obtenue pour C croissant ne se superpose pas avec la courbe $E=f(C)$ obtenue pour C décroissant.²

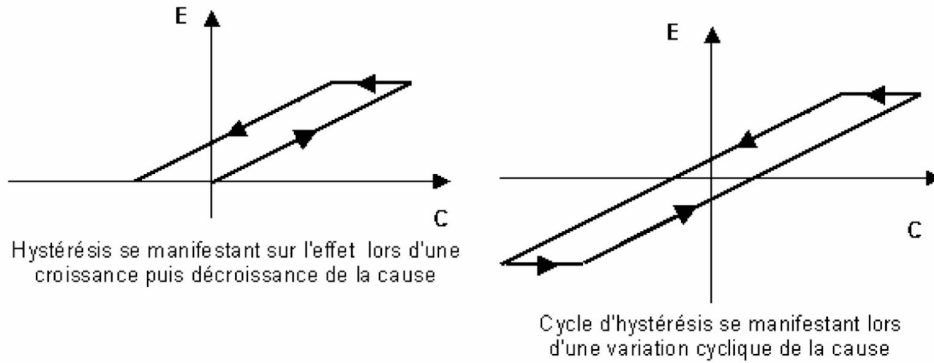


Figure 1.7 :
courbes
hystérésis
schématisées

Dans le cas des pales d'éoliennes, les courbes hystérésis sont de la forme :

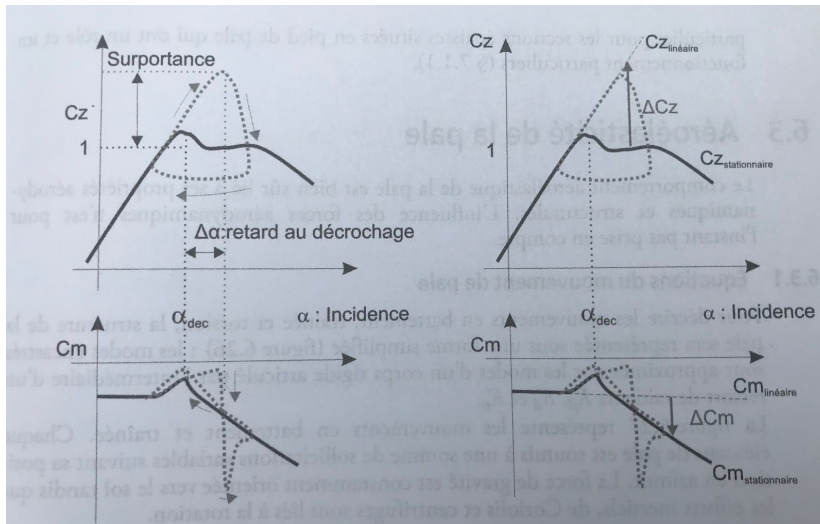


Figure 1.8 : schématisation
du phénomène de
décrochage (courbes
hystérésis)

Le même type d'observations est effectué pour les coefficient de traînée C_x et de moment C_M . Cela se traduit physiquement par le flux d'air qui ne se rattache pas immédiatement lorsque le

¹ <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/hystérésis/41296>

² <https://fr.wikipedia.org/wiki/Hystérésis>

profil retrouve une incidence inférieure. Pour que les flux d'air se raccrochent au profil, il faut revenir à une incidence plus faible.

On peut aussi déterminer les coefficients en régime instationnaire en soufflerie. A la différence des coefficients en régime stationnaire, on n'attend pas des conditions stables, c'est-à-dire que l'écoulement soit stabilisé. Au contraire, on provoque un mouvement d'oscillation avec plus ou moins d'amplitude. Si on anime le profil initialement à une incidence proche de $\alpha_{\text{déc}}$, on provoque l'apparition du décrochage, et on obtient avec les différentes valeurs obtenues, la courbe hystérésis. La fréquence et l'amplitude du mouvement exercés sur le profil modifient la forme de la courbe hystérésis.

Ces essais en soufflerie permettent ensuite de déterminer par le calcul d'équations différentielles, les efforts aérodynamiques globaux F_x F_z M . En effet, les efforts sont tous sensiblement de la même forme :

Soit un effort appelé Q : $Q=Q_1+Q_2$, on a :

Q_1 : provient de la première équation différentielle de premier ordre, représente l'effort en l'absence de décrochage et dépend de Q_s , l'effort hors décrochage en régime stationnaire.

Q_2 : provient de la deuxième équation différentielle du second ordre et désigne ce qu'il faut ajouter à Q_1 pour obtenir l'effort réel, c'est la composante instationnaire. La différence entre la valeur statique linéaire, extrapolée dans le domaine décroché et sa valeur réelle mesurée à l'incidence considérée, contrôle le passage en zone décrochée. On a alors la variable $\Delta Q=Q_l-Q_s$, qui convient pour la description d'un grand nombre de profils.

Choix du profil

C'est la première étape de la conception d'une pale.

L'épaisseur relative

$$\text{Epaisseur}_{\text{RELATIVE}} = \text{épaisseur}_{\text{MAX}} / \text{corde}$$

Si l'épaisseur_{RELATIVE} est importante, alors la surface de l'aile exposée au vent relatif est plus importante, ce qui entraîne plus de frottements. On en déduit que l'épaisseur_{RELATIVE} a une influence sur le coefficient de traînée C_x , mais pas sur le coefficient de portance C_z . On aurait alors tendance à souhaiter diminuer l'épaisseur_{RELATIVE} afin d'obtenir une vitesse plus élevée. Il faut garder à l'esprit que la résistance de l'aile est très affaiblie si l'épaisseur_{RELATIVE} est trop peu élevée. Une forte épaisseur permet de tenir les efforts en flexion et torsion, notamment de direction hors du plan du rotor. Augmenter l'épaisseur permet ainsi d'augmenter l'inertie de section dans le sens du battement.

La flèche

La flèche est la distance entre la corde et la ligne moyenne et détermine le caractère plus ou moins creux du profil.

La taille de la flèche agit principalement sur le coefficient de portance. Une grande flèche implique une différence de longueur significative entre l'intrados et l'extrados. Cela induit donc une portance plus considérable.

Une portance élevée à faible vitesse, c'est à dire un haut coefficient de portance, sera favorisé par un bord d'attaque à grand rayon, une forte cambrure et une couche limite turbulente.

Utiliser plusieurs profils différents est préférable, pour pouvoir profiter d'une grande épaisseur au niveau de la racine, qui se réduit vers le bout de la pale.

Les premiers profils d'éolienne à avoir été utilisés étaient des profils d'avion, de type NACA par exemple. Ces profils étant sensibles à la rugosité en étant utilisé à faible vitesse, ont très vite vu leur performance diminuer du fait de la saleté à la surface de la pale. Dans les années 1980, l'éolien voit naître des familles de profils spécialement dédiées au domaine (et non plus de l'aéronautique). Aujourd'hui, ce sont notamment des profils développés par le NREL (National Renewable Energy Laboratory) qui sont utilisés au Etats-Unis. En Europe, c'est le Danemark le pays dominant dans le domaine de l'éolien. En effet, l'université de technologie de Delft et le centre de recherche rattaché à l'université de technologie du Danemark (RISØ), ont elles-mêmes chacune développé leur famille de profils (Fuglsang et Bak en 2004 par exemple).

Aéroélasticité des pales

Forces auxquelles sont soumises les pales

Lorsqu'elles sont en rotation, les pales sont soumises à des déformations suivant deux directions. Le mouvement de battement, lié au vent, est une déformation de la pale vers l'arrière, lorsqu'on se place face au rotor. Le mouvement de traînée quant à lui, est une déformation dans le plan du rotor qui s'oppose au sens de rotation, voir schéma ci-après

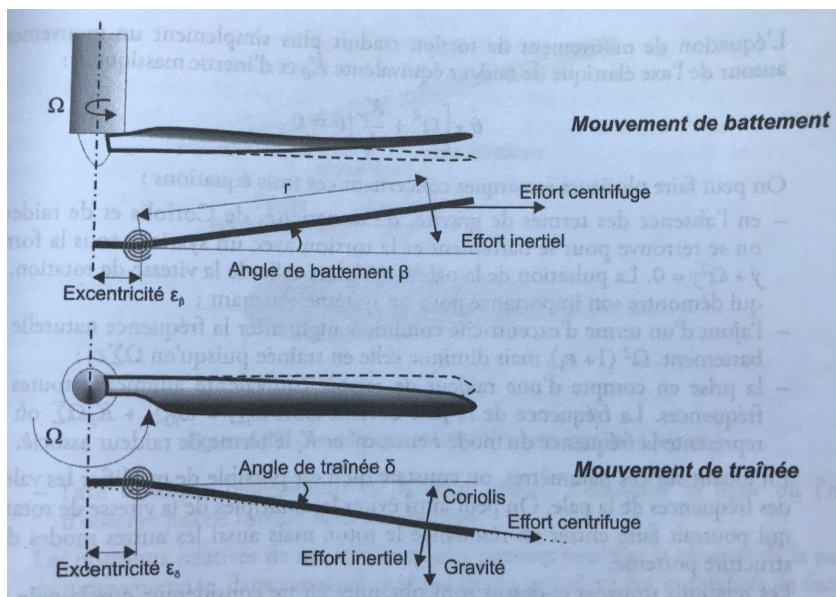


Figure 1.9: Schéma mouvements de battement et de traînée

- La force de gravité, toujours dans la même direction, vers le sol
- Efforts inertiels (liés à la rotation)
- Efforts de Coriolis (liés à la rotation)
- Efforts centrifuges (liés à la rotation)

Efforts inertiels :

Une définition simple de l'inertie énonce qu'il s'agit de la résistance des corps au mouvement, résistance proportionnelle à leur masse.³ Dans les efforts inertiels on peut nommer le chargement axial dans la pàle causé par la force centrifuge. On peut aussi citer la flexion hors du plan engendré par la combinaison de la force centrifuge et de la conicité du rotor (angle entre la pale et le plan de rotation, dont la visée est d'éloigner la pale du mât.⁴

Force centrifuge

Elle n'agit pas de la même façon selon que l'on considère la traînée ou le battement. En effet, en considérant le battement, la force centrifuge est parallèle au plan du rotor. Si l'on considère en revanche la traînée, la force centrifuge agit pratiquement dans le prolongement de la pale.

Chargements gravitationnels :

Ils s'appliquent dans le plan du rotor. Ils sont cycliques car leur fréquence est égale à la fréquence de rotation du rotor. Plus la taille de la pale est grande, plus ces chargements sont importants. Il est donc important d'en tenir compte dans la conception des pales.

La somme de ces sollicitations est variable en fonction de l'azimut de la pale, c'est-à-dire de sa position dans l'espace.

³ https://fr.wikipedia.org/wiki/Force_d%27inertie

⁴ https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/639/7/FORCIER_Louis-Charles.pdf

Les matériaux qui composent la pale

La pale d'éolienne est un véritable condensé technologique tant dans sa forme que dans les matériaux qui la compose. En effet, la pale doit assurer un excellent rapport poids et résistance pour permettre de capter le plus d'énergie possible tout en garantissant une résistance dans le temps. C'est pourquoi les matériaux de la pale d'éolienne ne cessent d'évoluer et qu'il est important de comprendre leur composition et leurs atouts.

Afin de garantir les différents objectifs dans la conception d'une pale d'éolienne, il est important de respecter un certain nombre de critères qui garantissent le rendement et la pérennité de la pale. Les pales doivent répondre à plusieurs exigences :

- légèreté
- non déformables
- homogènes
- résistance à la fatigue mécanique, vibrations
- résistance à la corrosion et à l'érosion (plus particulièrement dans le cas des éoliennes offshore)
- mise en œuvre et usinage simple
- faible coût

Dans l'histoire, les matériaux qui composent l'éolienne n'ont cessé d'évoluer. Si on commence par concevoir des pales en bois, cela ne durera pas en vue de la non résistance du bois aux conditions extérieures. Ensuite, les pales seront construites majoritairement en métal mais la conception en restait très compliquée et la pale était beaucoup trop lourde pour pouvoir durer dans le temps. Aujourd'hui, les matériaux composites composent majoritairement la pale. Dans un souci de rendement et d'éco-conception, de nombreuses recherches sont effectuées pour assurer un meilleur rendement (légèreté, résistance, déformation possible...) et une meilleure pérennité (résistance au cycle gel/dégel, écoulement de la pluie, résistance à la foudre, meilleure élasticité...).

La pale d'éolienne se compose donc aujourd'hui de 4 matériaux : du bois pour la structure et le renforcement et une alternance de couche de composites triaxial, uniaxiale et de balsa selon l'organisation suivante :

C'est l'alliance de ces trois matériaux qui va permettre à la pale de résister tant à la flexion, qu'à la torsion. De plus la pale sera alors plus légère et son aérodynamisme donc son rendement électrique ne sera qu'augmenter

Modélisation de la pale d'éolienne

La modélisation de la pale s'est faite en deux étapes. Une première étape de modélisation d'un profil 100% symétrique sur tout le long de la pale a permis une compréhension plus facile du principe de CAO et de la méthode à employer. Une deuxième étape avec un profil adapté à la hauteur nous a permis d'obtenir un modèle qui se rapproche au mieux de la réalité.

Nous avons à notre disposition le fichier **DTU_10MW** (cf. annexe: DTU_10MW) qui nous permettait de connaître les différents paramètres de la pale suivant la hauteur du plan selon l'axe z (les rotations du profil, la corde, l'épaisseur, les pitches...). Cependant ce fichier est adapté à une éolienne de 89 m de long or l'éolienne que nous étudions ne mesure que 44 m. Il était donc nécessaire de proportionner les valeurs que ce fichier nous apportait pour modéliser notre pale d'éolienne aux bonnes proportions. C'est pourquoi nous avons multiplié toutes les valeurs en mètre par 44/89 afin d'obtenir un nouveau fichier de valeur (cf. annexe : DTU_10MW proportionné).

Nous avons ensuite fait le choix de sélectionner dans ce nouveau fichier 10 sections à modéliser sur SolidWorks. En effet, prendre moins de sections n'aboutirait pas à une modélisation correcte de la pale mais plus de sections induirait une déformation sur la modélisation. Nous avons donc pu extraire les valeurs nécessaires à la modélisation de nos profils via le DTU extrait suivant:

	hauteur du plan(mm)	Rotation autour de z (°)	Corde (mm)	Epaisseur (en mm)	Pitch X (mm)	Type de profil
Section 1	0	0,0	2660	2660	1330	Cercle
Section 2	6870	-13,9	2900	2117	1363	ffaw3600
Section 3	8330	-12,6	3000	1830	1320	ffaw3480
Section 4	11340	-8,9	3070	1320	1197	ffaw3360
Section 5	15960	-6,4	2890	925	1040	ffaw3301
Section 6	20530	-4,7	2570	694	900	ffaw3241
Section 7	26280	-2,3	2090	522	731	ffaw3241
Section 8	32480	0,1	1600	384	560	ffaw3241
Section 9	40880	2,6	1000	240	350	ffaw3241
Section 10	44080	3,4	300	72	105	ffaw3241

Profil 100% symétrique

Le profil NACA le plus simple à comprendre et à modéliser est le symétrique. On peut obtenir ce profil via l'application de la formule suivante:

$$y_t = \frac{t}{0,2} \left[0,2969 \sqrt{\frac{x}{c}} - 0,1260 \left(\frac{x}{c}\right) - 0,3516 \left(\frac{x}{c}\right)^2 + 0,2843 \left(\frac{x}{c}\right)^3 - 0,1015 \left(\frac{x}{c}\right)^4 \right]$$

avec y_t la demi épaisseur du profil, t l'épaisseur maximale du profil, c la corde du profil et x la position le long du profil.

En choisissant comme valeurs de x les deux extrémités et trois points intermédiaire puis par symétrie nous avons alors pu obtenir les coordonnées de 10 points de chaque section de la pale. Et obtenir le dimensionnement suivant :

Une fois que le dimensionnement était obtenu, nous avons commencé la conception sur ordinateur en suivant la méthodologie suivante:

- Créer un plan coplanaire à la distance z de la section donnée par l'extrait du DTU
- Ouvrir une esquisse sur ce plan

- Ajouter un trait de construction le long de l'axe x et un point à l'origine
- Placer les points selon les coordonnées données par le dimensionnement via la fonction cotation intelligente
- Relier les points par l'outil courbe spin et rendre cette courbe pilotée par les tangentes avec une tangente à 90° au niveau du pitch en x
- Quitter l'esquisse
- Dans Outils, Outils d'esquisse, Modifier l'esquisse afin de la faire tourner le long de l'axe z de la valeur indiquée sur le DTU extrait

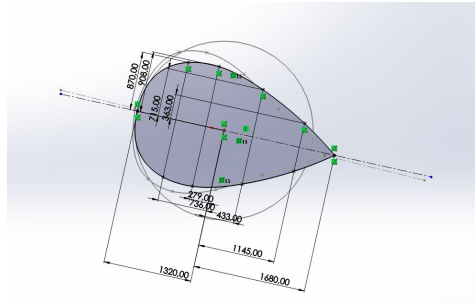


Figure 1.10: Esquisse d'un profil de pale

Il faut ensuite répéter cette opération sur chaque section de la pale données par le DTU extrait afin d'obtenir nos 10 sections. Ensuite, via la fonction bossage base lisée, il suffit de relier toutes les esquisses afin de créer la pôle complète. On obtient alors la modélisation suivante :

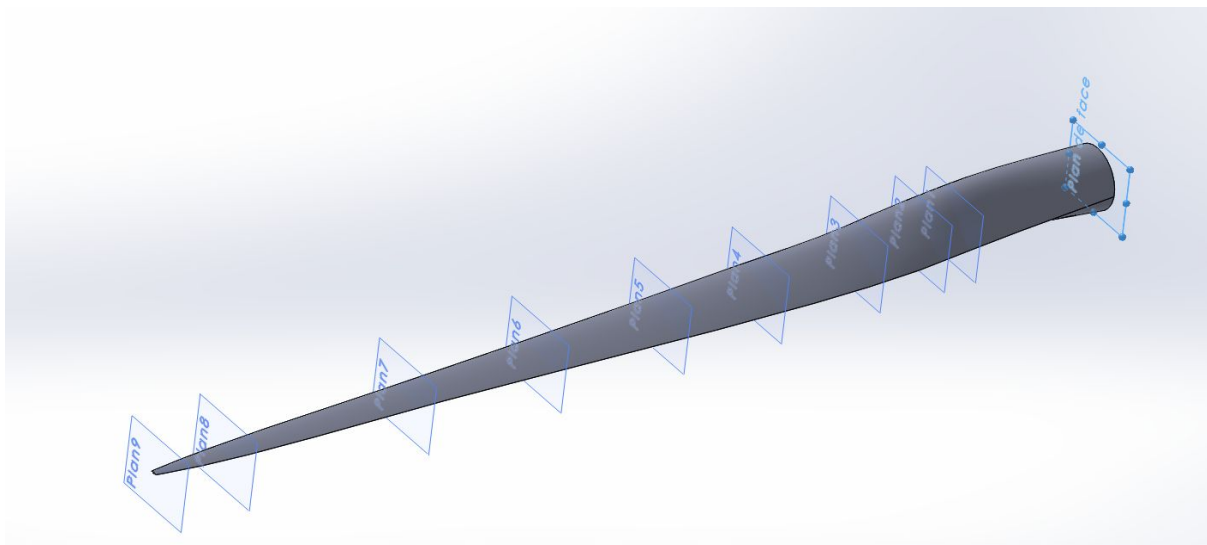


Figure 1.11: Modélisation de la pale symétrique avec plans apparents

Profil réel et adaptatif

Après avoir compris le principe et la stratégie à adopter dans la modélisation de la pôle, il était alors plus simple de procéder à une représentation réaliste des différents profils de la pale d'éolienne. En effet, contrairement à la modélisation ci-dessus, le profil est adapté à la hauteur par rapport au moyeu. En effet, les dernières sections ne sont pas soumises aux mêmes efforts que celles proches du moyeu.

Le fichier **DTU_10MW_RWT_AeroDynamisme** nous a permis de créer des intervalles de validité pour chaque type de profil. Ainsi, en comparant avec le DTU proportionné, nous avons pu définir chaque type de profil en fonction de la hauteur suivant l'axe z :

- De 0 m à 5 m le profil est de type **cylindrique**
- De 5 m à 7,5 m le profil est de type **ffaw3600**
- De 7,5 m à 10 m le profil est de type **ffaw3480**
- De 10 m à 14 m le profil est de type **ffaw3360**
- De 14 m à 20 m le profil est de type **ffaw3301**
- De 20 m à 44 m le profil est de type **ffaw3241**

Nous avons ensuite choisi 10 points du profil (les deux extrémités et 8 points intermédiaire) pour chaque section. En multipliant la corde et l'épaisseur de profil souhaité par les coordonnées normalisé donnés par les fichiers ressources des profils, nous avons pu obtenir les coordonnées des 10 points de nos profils afin de pouvoir les modéliser sur SolidWorks.

$$X_{cao} = X_{normalisé} \cdot \text{corde}$$

$$Y_{cao} = Y_{normalisé} \cdot \text{épaisseur}$$

Pour finir, nous avons décalé ces coordonnées pour les faire correspondre avec le pitch en x donné par le DTU extrait. Nous avons alors obtenu le dimensionnement suivant:

Section 1	Section 2		Section 3		Section 4		Section 5		Section 6		Section 7		Section 8		Section 9		Section 10	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
	1537	0	1680	0	1873	0	1850	0	1670	0	1359	0	1040	0	650	0	195	0
	957	-169	1080	-37	1259	-26	1272	-8	1156	-3	941	-3	720	-2	450	-1	135	0
	377	-444	510	-220	676	-119	723	-65	688	-35	544	-26	416	-19	260	-12	78	-4
	-203	-614	-150	-403	0	-211	87	-129	102	-89	84	-52	64	-38	40	-24	12	-7
	-783	-572	-720	-403	-814	-224	-490	-129	-412	-89	-334	-52	-256	-38	-160	-24	-48	-7
	-1383	0	-1320	0	-1197	0	-1040	0	-900	0	-731	0	-560	0	-350	0	-105	0
	957	296	1080	165	1259	92	1272	48	1156	28	941	21	720	15	450	10	135	3
	377	509	510	311	676	158	723	92	688	56	544	42	416	31	260	19	78	6
	-203	635	-150	421	0	224	87	129	102	63	84	64	46	40	29	12	9	9
	-783	592	-720	439	-614	238	-490	129	-412	76	-334	57	-256	42	-160	26	-48	8

Nous avons pu ensuite suivre la méthodologie suivante afin de modéliser la pôle entière en nous basant sur ce dimensionnement de profils adaptés et réels suivant la hauteur du plan z :

- Créer un plan coplanaire à la distance z de la section donnée par l'extrait du DTU
- Ouvrir une esquisse sur ce plan
- Ajouter un trait de construction le long de l'axe x et un point à l'origine
- Placer les points selon les coordonnées donnés par le dimensionnement via la fonction cotation intelligente
- Relier les points par l'outil courbe spin et rendre cette courbe pilotée par les tangentes avec une tangence à 90° au niveau du pitch en x
- Quitter l'esquisse
- Dans Outils, Outils d'esquisse, Modifier l'esquisse afin de la faire tourner le long de l'axe z de la valeur indiquée sur le DTU extrait

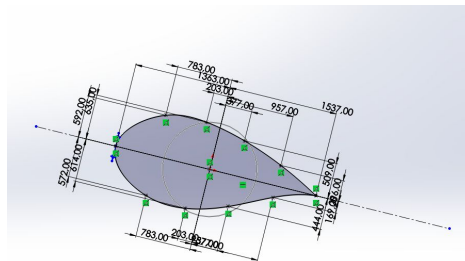


Figure 1.12: Esquisse d'un profil avec adaptation

Il faut ensuite répéter cette opération sur chaque section de la pale données par le DTU extrait afin d'obtenir nos 10 sections. Ensuite, via la fonction bossage base lissée, il suffit de relier toutes les esquisses afin de créer la pale complète. On obtient alors la modélisation suivante :

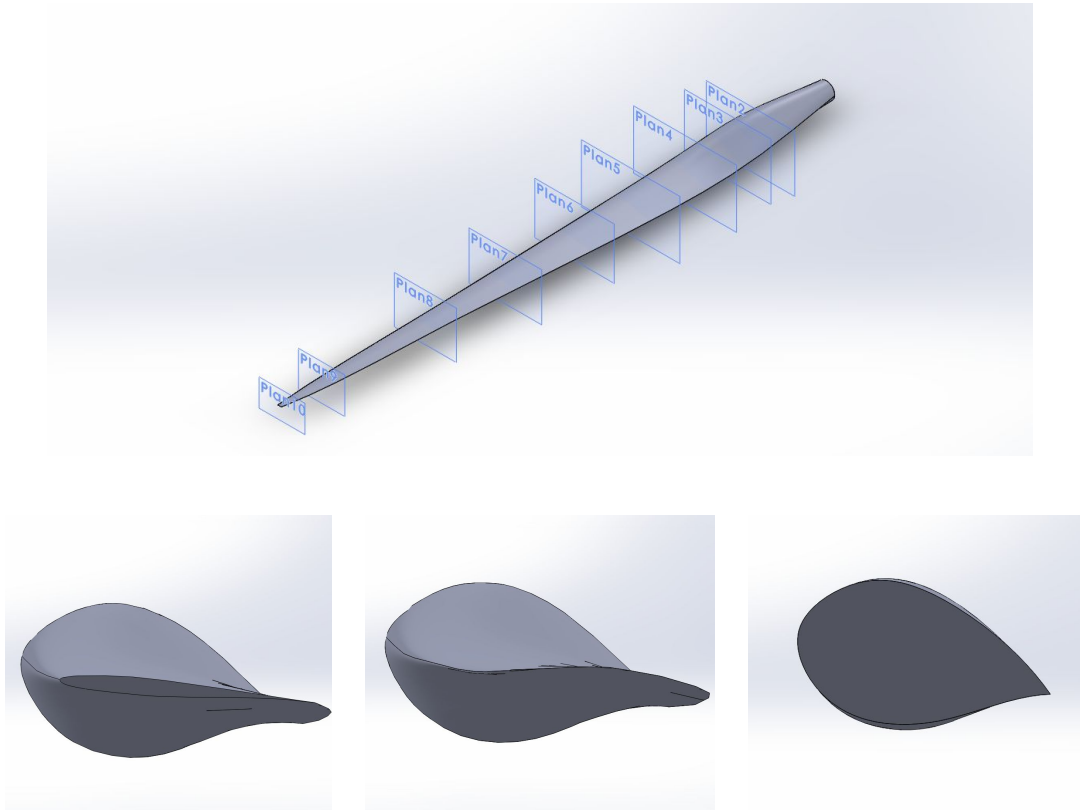


Figure 1.13: Modélisation de la pale d'éolienne à profil réel et adaptatif

Rendu réaliste de la pale

En appliquant une scène avec 3 éclairage et une apparence de peinture semi-brillante blanche, on peut obtenir un rendu réaliste de la pale dans son aspect extérieur:

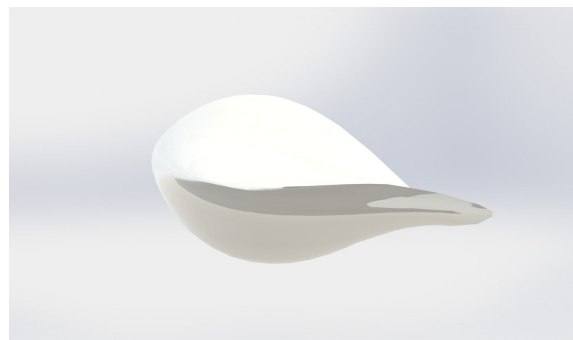
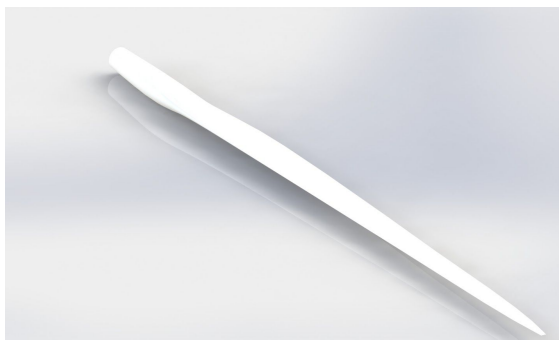
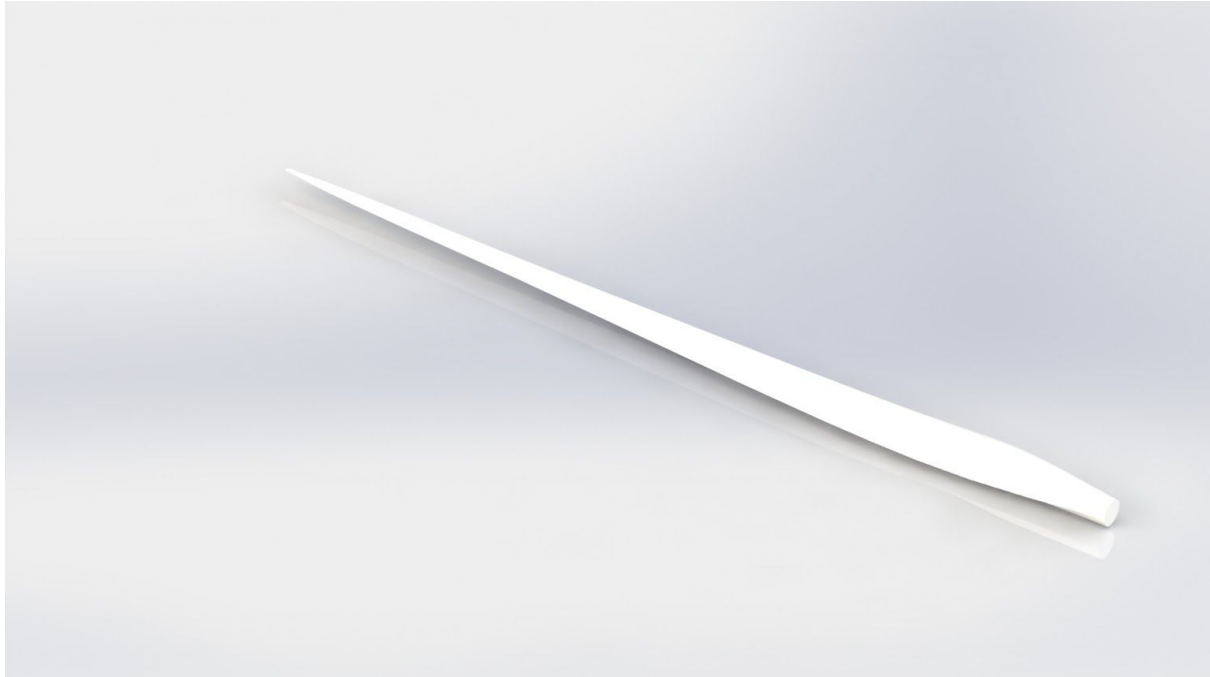


Figure 1.14: Rendu réaliste de la pale à profil réel et adaptatif

Le système de Yaw

L'intérêt du Yaw system

On a ici modélisé le système qui permet le mouvement de lacet de l'éolienne. En anglais "Yaw", le lacet est le mouvement de rotation de l'éolienne selon l'axe vertical, l'axe du mât. Le système de yaw se trouve à la base de la nacelle, à la jonction entre le mat et celle-ci.

Ce mouvement permet de réorienter l'éolienne pour qu'elle soit toujours parfaitement en face du vent incident.

Il est primordial dans la réalisation d'une éolienne car il garantit son efficacité. En effet, sans ce mouvement de rotation les pales ne prendraient qu'une portion de la force du vent et l'énergie convertie serait moindre.

Le yaw est composé de 5 pièces principales : les motoréducteurs (yaw drive), les freins, le bas de la nacelle, la couronne et les roulements.

Focus sur le motoréducteur (Yaw Drive)

Fonctionnement d'un motoréducteur

Le motoréducteur "Yaw Drive" est équipé d'un moteur électrique, d'un système réducteur et d'un pignon denté qui engrène directement avec la couronne fixée au mât.

Le système réducteur est le composant le plus important dans un motoréducteur, en effet il est munie de 3 à 5 d'étages de trains épicycloïdaux en série tel que dans chaque étage la vitesse à la sortie est réduite par un facteur de réduction tout en multipliant le moment fournie par le même facteur, ce dispositif permet alors de générer une force de moment adéquate à la rotation de la nacelle tout en réduisant la vitesse de cette dernière .

Un train épicycloïdal est principalement composé d'un arbre en entrée liée à un pignon central appelé **soleil** qui vient s'engrener avec des **satellites** autour de son axe ,ces dernières engrènent aussi avec une roue dentée fixée appelée **couronne** et sont connecté par un **porte-satellite** qui sert à récupérer l'énergie mécanique de rotation , on pourrait résumer les liaisons mécaniques entre les composants par le schéma ci dessous:

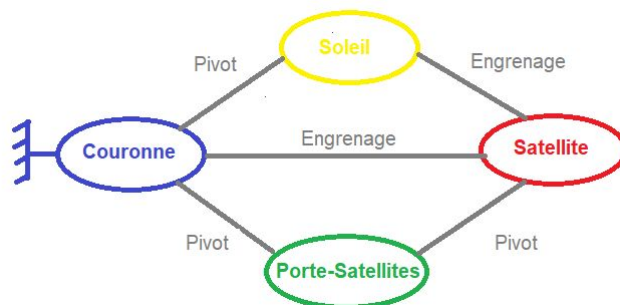


Figure 2.1 : Graphe des liaisons d'un train épicycloïdal

Cette configuration permet aux satellites d'avoir un mouvement épicycloïdal qui est composé d'une rotation global autour du soleil et d'une rotation propre autour de l'axe du satellite au sens inverse de la rotation global , ceci nous donne ainsi le rapport de réduction suivant

$$i = \frac{1}{\frac{Z_{Couronne}}{Z_{Soleil}} + 1} \quad Z : \text{nb de dents}$$

Les différentes conditions sur les engrenages du motoréducteur

Pour assurer le fonctionnement correct du train épicycloïdal , il est nécessaire de respecter certaines conditions d'assemblage :

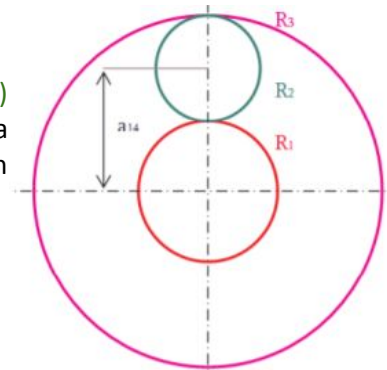
- **Condition sur le module:**

Deux roues ne peuvent engrener que si elles partagent le même module , donc la couronne le soleil et les satellites doivent tous avoir un module commun :

$$m_{couronne} = m_{soleil} = m_{satellites} \quad \text{avec} \quad \text{module} = \frac{\text{Diamètre}}{\text{Nb de Dents}}$$

- **Condition sur les entraxes:**

Afin d'assurer le bon fonctionnement de l'assemblage, les satellites (R2) doivent pouvoir s'insérer entre le soleil (la roue intérieur R1) et la couronne (la roue extérieur R3). On peut donc résumer cette condition par la relation suivante:



$$D_{couronne} = D_{soleil} + 2D_{satellite} \Leftrightarrow Z_{couronne} = Z_{soleil} + 2Z_{satellite}$$

D : Diamètre primitif

Figure 2.2: Schéma des entraxes

- **Condition sur le nombre de dents (Règle du haricot)**

Pour que les satellites puissent engrener correctement à la fois avec le soleil et la couronne sans interférence des dents, il faut que le nombre de dents comptées sur le contour jaune soit un nombre entier.

Cette condition s'écrit :

$$\frac{Z_{soleil} + Z_{couronne}}{\text{Nb de satellites}} \in \mathbb{N}$$

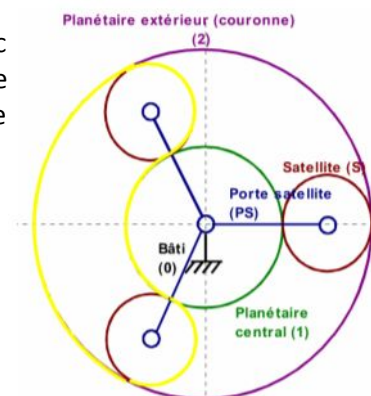


Figure 2.3: Schéma de la règle d'haricot

- **Condition de non contact des satellites:**

Afin d'éviter la collision de deux satellites adjacents successifs, l'équation suivante doit être vérifiée:

$$Z_{satellite} + 2 < (Z_{soleil} + Z_{satellite}) \times \sin\left(\frac{\Pi}{nb \text{ satellites}}\right)$$

Modélisation CAO du Motoréducteur:

Avant de commencer notre modélisation CAO , on a réalisé un programme en Pascal afin de trouver une configuration adéquate au système réducteur du YAW qui respecte bien évidemment les condition mentionnées ci-dessus. On a donc choisi, grâce au programme, une configuration d'un rapport de réduction de **1:2016** composée de quatre étages de trains épicycloïdaux dont chaque étage est constitué d'un soleil, trois satellites, une couronne et un porte-satellites.

	Rapport Reductio	Module	Dents Soleil	Dents Satellites	Dents Couronne
Etage 1	8	0,5	28	86	200
Etage 2	7	1	20	55	130
Etage 3	6	2	20	40	100
Etage 4	6	3	20	40	100
Rapport Total	2016				

Figure 2.4 : Tableau des dimensions des pièces

L'esquisse du système réducteur est simplement composée de cercles qui représentent le cercle primitif de chaque engrenage tel que le cercle présent au milieu de chaque étage est le soleil, les trois cercles autour de ce dernier sont les satellites et finalement le cercle extérieur représente la couronne.

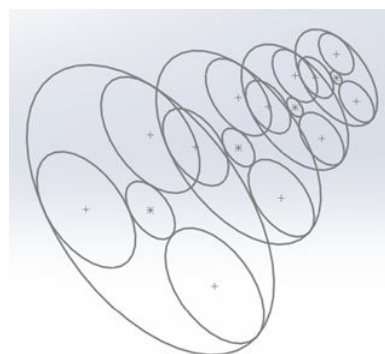


Figure 2.5 : Esquisse de l'assemblage

On place ensuite nos engrenages réalisés par la fonctionnalité **ToolBox** présente dans la version **"SolidWorks Premium"** grâce à la contrainte « coaxiale » qu'on supprimera ultérieurement pour les satellites afin qu'ils puissent tourner autour du soleil et la contrainte « coïncidente » avec le plan de chaque étage :

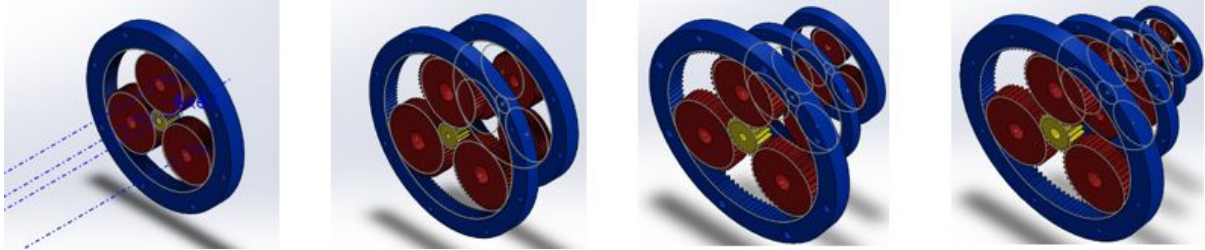


Figure 2.6: Les différents étages du motoréducteur

On applique ensuite une contrainte d'engrenages sur nos différents engrenages pour assurer qu'ils s'engrènent correctement. Pour cela, il faut réaliser 4 contraintes dont une est entre le soleil et un des satellites tel que le ratio est " $Z_{Soleil} : Z_{Satellite}$ " et les autres entre la couronne et chacun des satellites avec un ratio de " $Z_{Couronne} : Z_{Satellite}$ ".

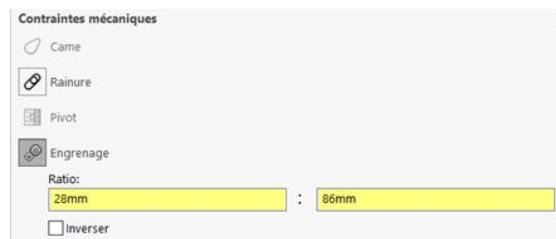


Figure 2.7 : La fonctionnalité Contrainte - Engrenage sur Solidworks

On a ensuite conçu un porte satellite qui se place entre chaque étage tel que son arbre de sortie se lie avec le soleil de l'étage suivant et ses trois arbres d'entrée se lient avec les satellites de l'étage précédent. Cet assemblage a été réalisé par les contraintes « coaxial » et « verrouiller » entre les arbres et les engrenages:

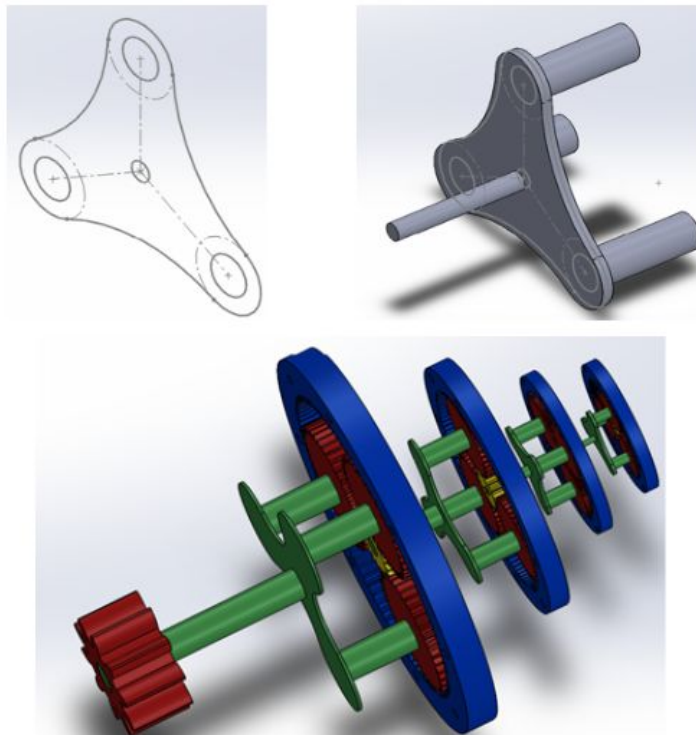


Figure 2.8 : Modélisation CAO du porte-satellite et de l'assemblage final

Le Yaw système dans son ensemble

Le mouvement de lacet, composants et mise en oeuvre technique

Comme évoqué précédemment, le yaw a pour but d'assurer la connexion entre le mât et la nacelle mais également la rotation selon l'axe du mât entre les deux. La liaison mât/nacelle est donc une liaison à un degré de liberté en rotation et zéro degré de liberté en translation : une liaison pivot.

La rotation entre mat et nacelle n'est pas totalement libre, si elle l'était, la nacelle se placerait systématiquement de biais par rapport au vent, dans la position où l'effort sur la structure serait le plus faible. Le but de l'éolienne étant de capter l'énergie du vent, il faut que cette nacelle se tourne et se place là où l'effort est au contraire le plus grand.

La rotation se fait par un système d'engrenage à contact intérieur.

La roue est représentée dans notre modèle par la couronne et le pignon qui engrène sur elle sont les motoréducteurs.

La couronne est fixée sur le mât et les motoréducteurs à la nacelle. Lorsque les motoréducteurs se lance en mouvement autour de la couronne ils entraînent avec eux la nacelle où ils sont fixés.

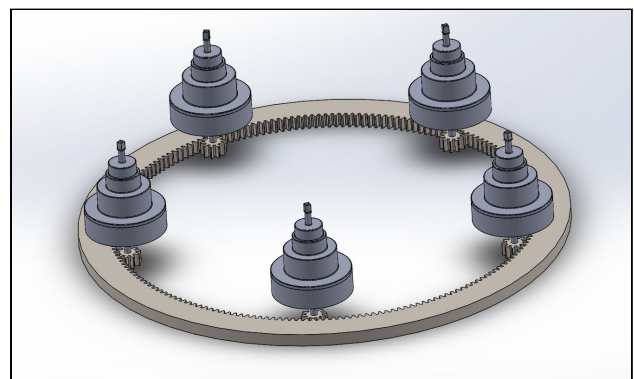


Figure 2.9 : Système d'entraînement du Yaw

Les roulements à rouleaux coniques

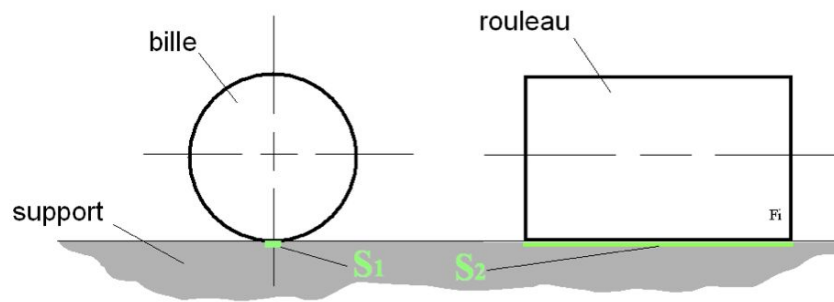
Le repositionnement de la nacelle doit s'effectuer rapidement et à moindre coût. Cela veut dire que l'énergie dépensée pour faire la rotation doit être minimale. On peut jouer sur deux paramètres : le poids de la nacelle et la dissipation d'énergie par le frottement.

Les deux paramètres sont liés car plus les frottements sont minimisés plus les moteurs actionnant les engrenages peuvent être de puissance faible et donc plus légers.

Les roulements sont donc indispensables dans ce genre de système car ils remplacent le frottement par du roulement ce qui réduit très fortement l'énergie dissipée par contact. Les frottements sont environ 100 fois moins importants qu'en contact direct entre les pièces.

Il faut ensuite choisir le type de roulement qui correspond le mieux à notre système mécanique.

Le roulement au niveau du Yaw est soumis à des forces très importantes, le poids de la nacelle et des pales étant de plusieurs dizaines de tonnes au minimum. Le roulement doit pouvoir absorber ce poids sans trop se déformer. On va donc utiliser des roulements à rouleaux plutôt que des roulements à bille car leur surface de contact est très grande, le poids est bien réparti et admet donc une plus grande charge.



Cependant, les forces appliquées au roulement ne sont pas toutes verticales. La pression appliquée par le pitch sur la nacelle due à la force du vent incident est horizontale. Des roulement à rouleaux droits ne sont pas faits pour absorber une force radiale. On utilisera donc des roulement à rouleaux coniques.

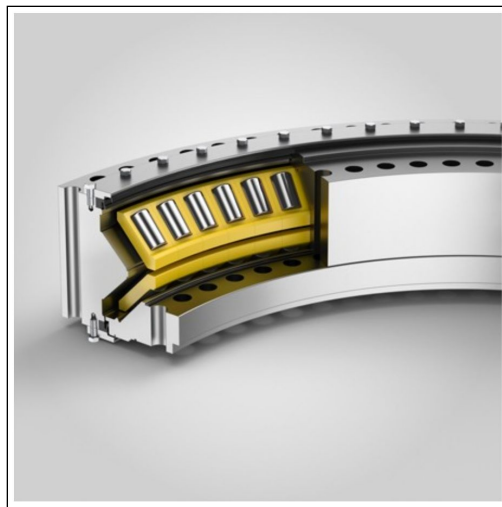


Figure 2.10 : Roulement à rouleaux cylindriques

Les freins de lacet

Le jeu résiduel entre la couronne et les pignons d'entraînement des motoréducteurs ne permet pas à la nacelle d'être entièrement contrainte lorsqu'elle est à l'arrêt. La force du vent n'étant pas constante et unidirectionnelle ce léger jeu provoquera une oscillation faible de toute la structure, endommageant les systèmes sur le long terme.

Les freins sont donc là pour entièrement contraindre la plateforme et gommer ce jeu.

Il existe différents types de freins de lacet.

Les plus courants sont les freins à disque. Ils sont composés d'un disque de frein fixé au mât et d'un ensemble (pistons, étrier, plaquettes de frein) fixé à la nacelle. Le principe est assez commun ; les pistons appliquent une pression sur les étriers qui viennent à leur tour presser les plaquettes contre le disque. Le freinage s'effectue par contact.

Les pistons peuvent être actionnés hydrauliquement mais cela requiert une installation plus compliquée. De plus les fuites potentielles du fluide à l'intérieur du système peuvent entraîner des

pollutions massives de l'environnement. La plupart du temps on préférera donc un système de freinage électrique.

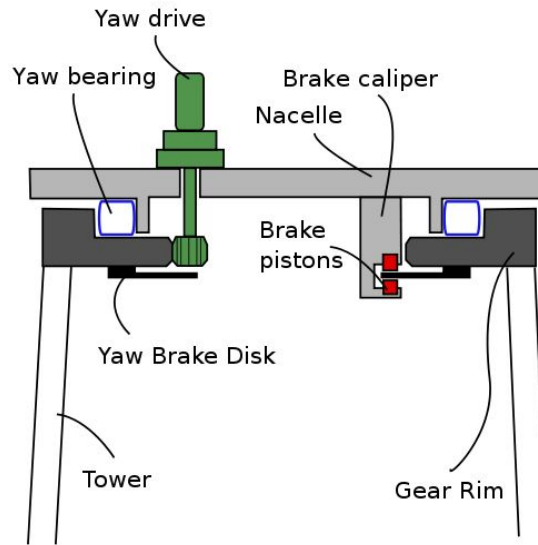


Figure 2.11 : Système de freinage de lacet par freins à disque

Une alternative est le freinage par pression. Un pneumatique circulaire, surmonté par une gigantesque plaquette de frein en forme de disque, est placé sur la partie horizontale du système comme montré sur le schéma ci-contre. Lorsque le pneumatique est gonflé la plaquette de frein va venir se coller contre le disque de frein initial. C'est un système très efficace car la surface de contact est très importante. Autrement dit, on peut donc avoir une force de freinage très importante avec des pressions sur le système relativement faibles (6-10 bars).

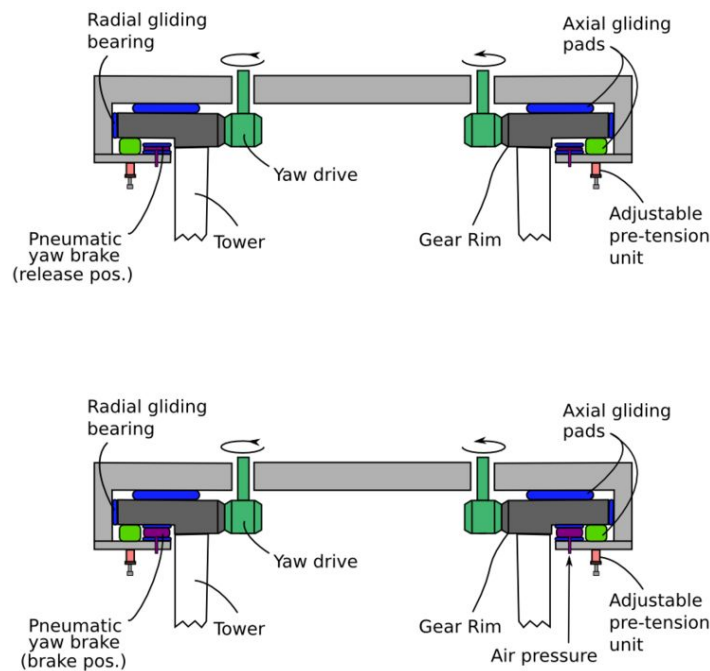


Figure 2.12 : Système de freinage de lacet par pneumatique

Modélisation CAO des éléments du Yaw System

Le coeur de l'assemblage

Nous avons commencé notre assemblage par les liaisons entre motoréducteurs et la couronne car ce sont les pièces qui permettent le mouvement de rotation de la nacelle.

On suit le même principe que pour assembler les train d'engrenage épicycloïdaux du motoréducteur. On commence par une esquisse des cercles primitifs de la couronne et des pignons de sortie des motoréducteurs pour placer les pièces par la suite.

Ensuite, on contraint les pièces avec "coaxial" et "coincident" et enfin on applique les contraintes d'engrenage.

La nacelle "bedplate" et ses composants

Il y avait un grand nombre de composants à fixer sur la nacelle. Nous nous sommes dit qu'il serait donc préférable de modéliser la base de la nacelle séparément de la coque pour pouvoir fixer les éléments plus facilement, sans s'encombrer d'une énorme structure superflue.

La nacelle "bedplate" est une pièce circulaire conçue pour réceptionner les motoréducteurs et les freins.

Nous avons en premier créer un cylindre plein que nous avons ensuite creusé pour que le mécanisme d'engrenage soit visible. Il a fallu ensuite créer des emplacements pour chaque motoréducteur et chaque frein. Nous avons créé une de chaque et les avons ensuite répétés avec la commande "répétition circulaire d'entité" et avons choisi arbitrairement que 5 motif de chaque serait le plus représentatif du phénomène.

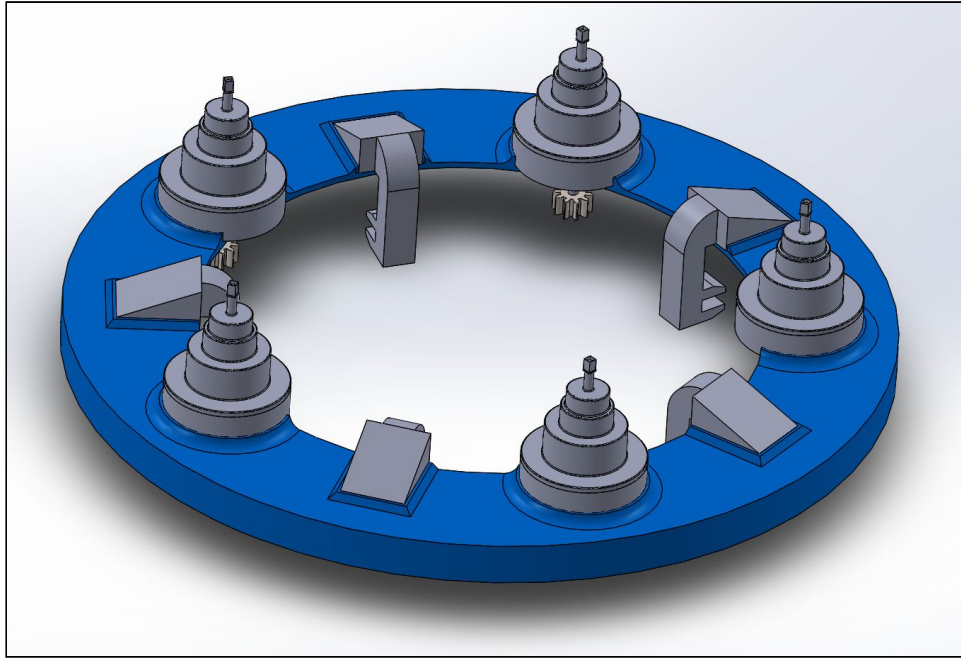


Figure 2.13 : Modélisation de la nacelle "bedplate" et ses composants

L'assemblage des différents éléments sur la nacelle "bedplate" s'est fait simplement, via les commandes "coaxial" et "coïncident". Le but de créer les emplacements était en partie pour faciliter l'assemblage.

Il n'est pas utile de s'attarder sur la conception des freins car ils ne sont pas fonctionnels. On peut néanmoins dire qu'ils représentent le système de frein à disque ; nous avons choisi de modéliser le système de freinage le plus courant.

Les roulements à rouleaux coniques

Nous avons décidé de modéliser les roulements du système de lacet très tard dans l'avancée du projet. Ils ne sont donc qu'esthétique et non fonctionnels.

La modélisation s'est faite en trois parties. La bague interne, la bague externe, et les cages de roulement. N'ayant aucune dimension, la difficulté a été de faire correspondre toutes les pièces aux formes des autres. Nous avons décidé de partir de la cage de roulement qui était la pièce la plus sophistiquée pour ensuite faire correspondre les deux autres.

La cage de roulement :

Devant le manque de temps nous avons décidé que les rouleaux et la cage ne serait qu'une seule et même pièce, le but esthétique étant quand même assuré.

La réalisation commence par la création de la cage. On esquisse la forme souhaitée, création d'une autre esquisse avec un cercle du diamètre de la cage, puis on fait un "bossage base balayée" qui nous permet de répéter la forme initiale à l'ensemble du cercle.

On reprend ensuite le plan de l'esquisse initiale pour créer le rouleau (bossage base de révolution). On finit par une "répétition circulaire d'entité" pour avoir le nombre de rouleau souhaité. Dans notre cas : 240.

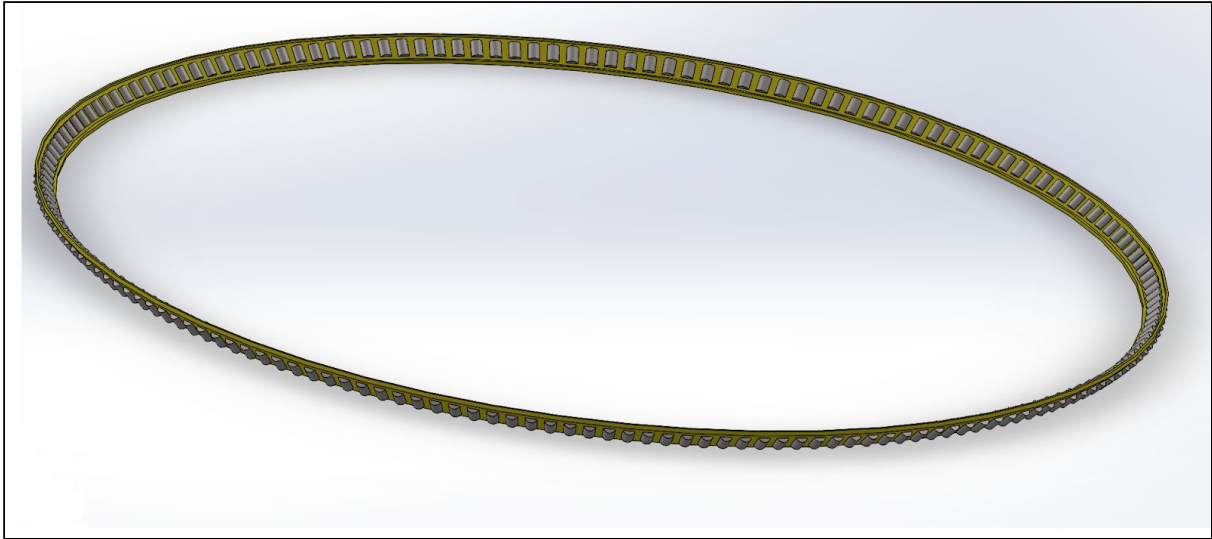


Figure 2.14 : Cage de roulement et rouleaux

Les bagues :

La bague extérieure n'était pas très compliquée à réaliser, le seul problème étant de trouver les dimensions, l'emplacement et l'inclinaison de la pente où serait posés les roulements. C'est la partie qui nous a pris le plus de temps car il s'est avéré très difficile d'obtenir ces mesures, étant partis de la cage.

Finalement, nous avons trouvé les dimensions adéquates et la réalisation de la pièce est un "bossage base balayée" similaire à celui de la cage.

Même problématique et même résultat pour la bague intérieure.



Figure 2.15 : Bague extérieure



Figure 2.16 : Bague intérieure

Assemblage du roulement :

Si la réalisation des pièces s'est avérée si compliquée, c'est parce que leur complexité permettait de faire un assemblage des pièces facile avec des contraintes de base.

On assemble les différentes pièces via "coaxial" et "coïncident".

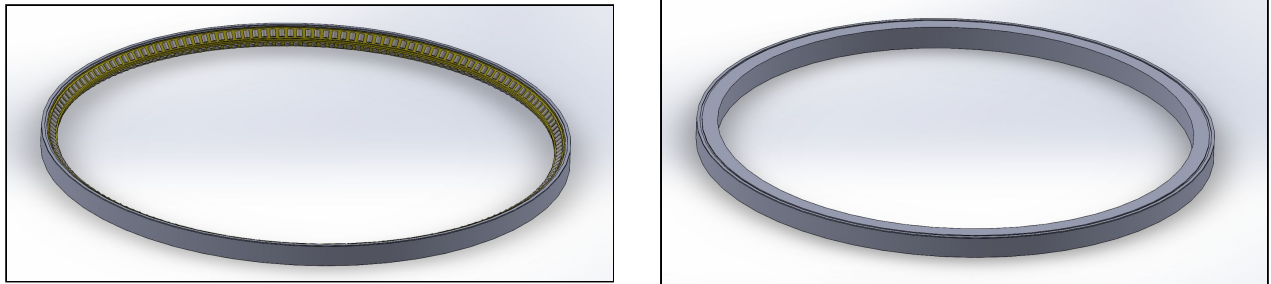


Figure 2.17 : Modélisation finale du roulement sans et avec bague interne

Assemblage global

Tout le système est assemblé à partir de la nacelle bedplate et de la couronne. La nacelle vient se poser sur la nacelle bedplate ; le mât se fixe sur la couronne ; les roulements se fixent au mât et à la nacelle bedplate.

Le mât et la Nacelle ne sont que des pièces figurantes, il n'est pas nécessaire de détailler leur conception.

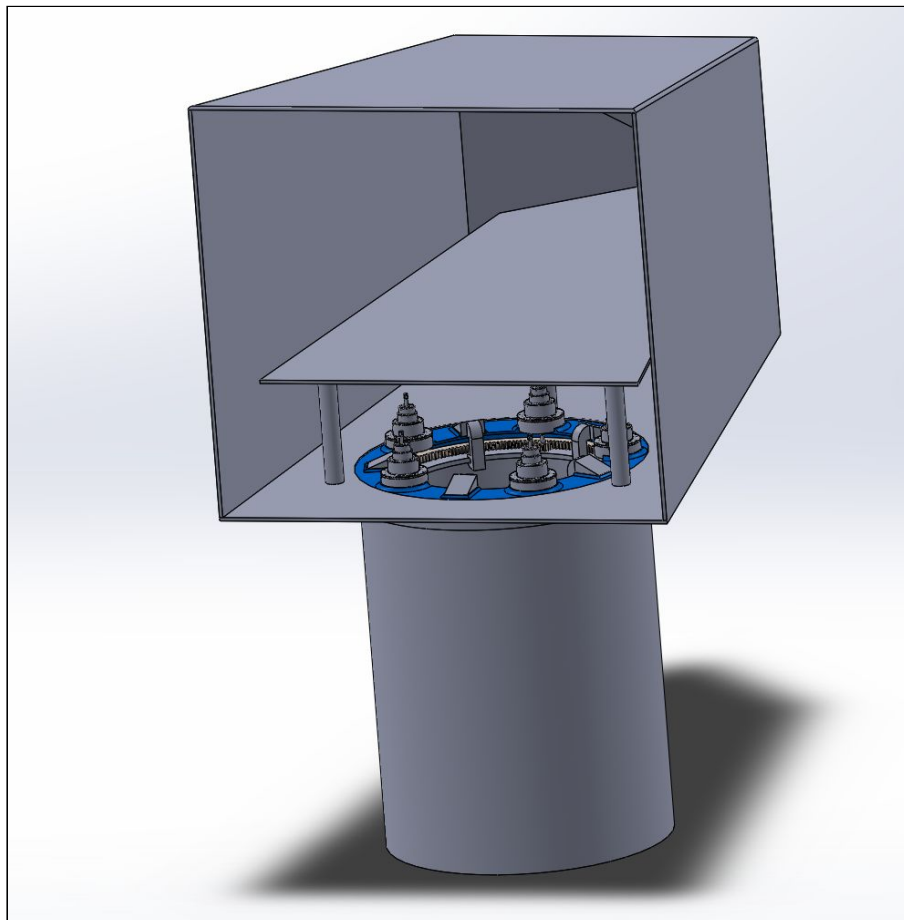


Figure 2.18 : Modélisation complète du système de lacet de l'éolienne

Améliorations envisageables

Le système du Yaw que nous avons modélisé est précis et détaillé. Il y a cependant certaines pièces qui pourraient l'être encore d'avantage. Premièrement, la cage et les rouleaux dans le roulement devraient être dissociés. Pour un roulement réaliste, il faudrait également que la bague intérieure soit en deux parties pour bien modéliser le phénomène d'ajustement lors du serrage pour gommer le jeu interne du système. Deuxièmement, les freins n'ont pas du tout été traités. Il serait intéressant de modéliser de vrais freins avec les plaquettes, les étriers et les pistons.

Une autre amélioration réside dans les dimensions du motoréducteur. En effet, notre modèle ne prend pas en compte l'effort appliqué sur les engrenages. Il serait donc impossible de déterminer si les trains épicycloïdaux résisteraient à la charge à laquelle ils seraient soumis.

Faire une étude plus poussée sur les forces appliquées aux dents des engrenages, leurs direction, permettrait de calculer précisément l'épaisseur nécessaire au fonctionnement du Yaw Drive et également des matériaux à utiliser.

Le Tip-Brake ou frein aérodynamique

L'intérêt des freins aérodynamique

Le danger d'une éolienne trop rapide

Les éoliennes ne tournent pas tout le temps, elles ne tournent pas pour un vent trop faible, moins de 10 km/h, et pour un vent trop fort, plus de 90 km/h. Dans le premier cas, il y a tout simplement pas assez de vent pour faire tourner l'éolienne, dans le second cas, des systèmes de freins doivent arrêter l'éolienne pour éviter de l'endommager. En effet, des vents trop fort pourraient endommager la structure et compromettre la durée de vie de l'éolienne. Il faut alors, diminuer les contraintes mécaniques sur la machine en cas de survitesse du rotor. Un autre problème se pose, le rotor tourne à une vitesse d'une dizaine de tour par minute, les pales d'une éoliennes mesurant de 30 à 60 mètres, la vitesse au bout des pales est donc très élevée. Il ne faut surtout pas que cette vitesse dépasse celle du son (340 m/s) cela provoquerait un "bang" et conduirait à la destruction de l'éolienne. Les systèmes de freins dans une éolienne ont une importance capitale: pour la sécurité de l'appareil, du voisinage et pour la garantie la durabilité de l'engin.

Lien avec les freins mécaniques

Chaque éolienne possède un système de frein mécanique (frein à disque) situé dans la nacelle au niveau du rotor. Celui-ci permet de freiner les pâles et le rotor pour éviter d'endommager la structure de l'éolienne. Cependant une éolienne est très dure à arrêter à cause de son poids et de sa vitesse. Un frein mécanique qui serait soumis à de telles forces perdrait toute capacité de freinage à cause de la chauffe que provoque cet effort. Il faut coupler le freinage mécanique avec un autre système de freinage pour avoir un freinage efficace. Les freins aérodynamiques sont utilisés pour freiner l'éolienne pour qu'ensuite le frein mécanique prenne le relai.

Les différents types de freins aérodynamiques

Pas fixe (Par effet Stall)

Le pas fixe, aussi appelé **stall control**, est un système de régulation aérodynamique passif. Les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Ce système empêche les pales, qui sont conçues spécialement pour subir des décrochages, d'accélérer en utilisant l'effet Stall qui agit comme un frein par le décrochage aérodynamique au niveau de la pale du rotor. Ce système de freinage a l'avantage d'être simple et économique. En effet, il ne nécessite pas de systèmes ou mécanismes supplémentaires. L'inconvénient principal provient d'une répartition de profil qui est figée à la conception pour permettre le décrochage et qui peut donc engendrer des pertes d'efficacité au démarrage et dans les grandes vitesses de vent.

À pas variable (Mise en drapeau)

Le pas variable, aussi appelé **pitch control**, est un système de régulation aérodynamique actif. Ce système consiste à faire varier l'angle d'incidence, ou de calage, des pales sur le moyeu à l'aide de vérins hydrauliques ou de ressorts autour d'un axe longitudinal pour profiter au maximum du vent et limiter la puissance pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale. La variation de l'angle de calage entraîne une diminution ou une augmentation de la portance de la pale, donc du couple moteur.

Ce système à pas variable permet donc :

- d'arrêter l'éolienne ou en limiter la puissance afin de la protéger des vents violents en plaçant les pales en drapeau (c'est-à-dire parallèle au vent) et réduisant ainsi la prise au vent,
- de maximiser l'énergie absorbée par l'éolienne pour la faire démarrer : généralement les pales pivotent de quelques degrés à chaque variation de la vitesse du vent de manière à ce que les pales soient toujours positionnées avec un angle optimal par rapport à la direction du vent pour en extraire la puissance maximale.

Pour modifier l'angle d'incidence des pales deux méthodes sont utilisées :

- à l'aide d'un moteur et de vérins hydrauliques déclenchés par contrôle de vitesse
- à l'aide de ressorts qui se détendent au-delà d'une certaine vitesse

Ce système est de loin la manière la plus courante pour limiter la vitesse de rotation et la puissance fournie. En effet, c'est le système le plus efficace car il permet une régulation constante et presque parfaite de la rotation du générateur en bout de ligne.

Par la force centrifuge

Il existe un autre type de régulation de la vitesse d'une éolienne basée sur la force centrifuge. En effet, lorsque la vitesse des pales augmente, la force centrifuge augmente aussi. Lorsque cette dernière est trop élevée, deux systèmes de freins peuvent être déclenchés :

- Les volets : ils s'ouvrent automatiquement, si la vitesse du vent devient excessive ou si un problème est décelé. Ils ralentissent les pales ou diminuent leur portance en provoquant un décrochage aérodynamique.

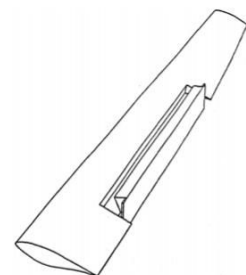


Figure 3.1 : Vue d'un volet déployé

- Les spoilers (ou Tip Brake) : aussi appelés freins aérodynamiques ou aérofreins, ils sont encastrés dans le bord d'attaque des pales. Chaque spoiler est maintenu dans son logement par un ressort de rappel. À partir d'une certaine vitesse linéaire, la force centrifuge provoque l'éjection de tous les spoilers au même moment modifiant ainsi le profil aérodynamique de la pale. Les spoilers peuvent être déclenchés :

- mécaniquement : c'est-à-dire à l'aide d'un système aimant-ressort par exemple (comme dans le brevet utilisé dans les parties suivantes). Lorsque la force centrifuge devient supérieure à la somme des forces de l'aimant et du ressort, le spoiler est déclenché.
- électroniquement : à l'aide de capteurs qui mesurent la vitesse du vent et des pales.

Les spoilers sont très efficaces mais onéreux.

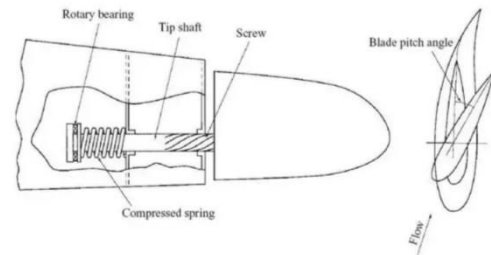
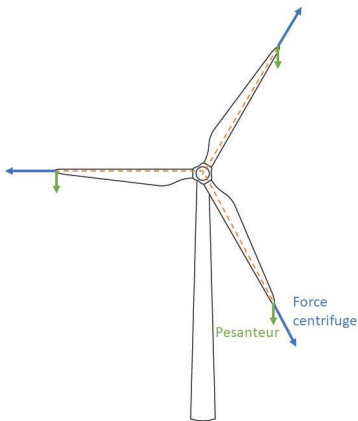


Figure 3.2 : Différentes vues d'un tip-brake et de son mécanisme

Fonctionnement du tip-brake

Etude des forces s'exerçant sur le tip brake (calculs)



Plusieurs forces s'exercent sur le bout d'une pale d'éolienne, il y a comme on l'a vu précédemment la portance et la traînée, mais il y a aussi la pesanteur et la force centrifuge qui s'exercent sur la pale d'une éolienne. Nous allons négliger la pesanteur dans les calculs que nous allons faire pour comprendre le fonctionnement du tip-brake.

La force centrifuge est proportionnelle au carré de la vitesse et est proportionnelle à la distance au centre d'inertie.

$$F_{\text{cen}} = m \cdot \omega^2 \cdot R = \frac{m \cdot v^2}{R}$$

Dans le brevet que nous avons étudié pour comprendre le fonctionnement du tip-brake, il est expliqué que le tip-brake se déclenche à une force centrifuge équivalente à 1200 pounds (~544,3 kg). Nous avons voulu vérifier si cette force de déclenchement est

cohérente avec notre éolienne d'étude.

$$F_{\text{Déclenchement}} = 21\,329\,N$$

avec $m = 6500/44 = 147,7\,kg$ (on considère que le tip-brake fait environ 1m) $v_{\text{max rotor}} = 17,3\,tour/min$ et $R = 44\,m$

Cette force correspond à un déclenchement pour une force équivalente à 2 340 kg. Notre résultat est nettement supérieur à la force de déclenchement indiquée dans le brevet. Cela est dû au fait que nous n'avons pas pris en compte la pesanteur dans notre calcul, que nous avons considéré le poids de l'éolienne comme uniforme sur toute la pale et surtout que les tip-brake sont utilisés dans des plus petites éoliennes qui ne sont conçues pour subir de gros efforts.

Fonctionnement théorique d'un tip-brake à déclenchement mécanique

Le tip-brake que nous avons étudié se déclenche mécaniquement lorsque la vitesse et donc la force centrifuge dépasse un certain seuil. Le mécanisme du tip-brake peut se réduire à un aimant et un ressort. L'aimant peut supporter une plus grande force que le ressort, dans le brevet, il y a un aimant de 1000 pounds et un ressort de 200 pounds. Ce système permet d'avoir le seuil de déclenchement plus grand que le seuil de retour du tip-brake. En clair, le tip brake va se déclencher pour freiner l'éolienne à une force équivalente à 1200 pounds, mais le tip-brake ne va revenir à la normal qu'à une force équivalente de 200 pounds. La force de retour est inférieure à la force de déclenchement pour ralentir complètement le rotor et éviter que l'éolienne ne fasse des cycles d'accélération puis de freinage qui pourraient endommager la structure et le mécanisme.

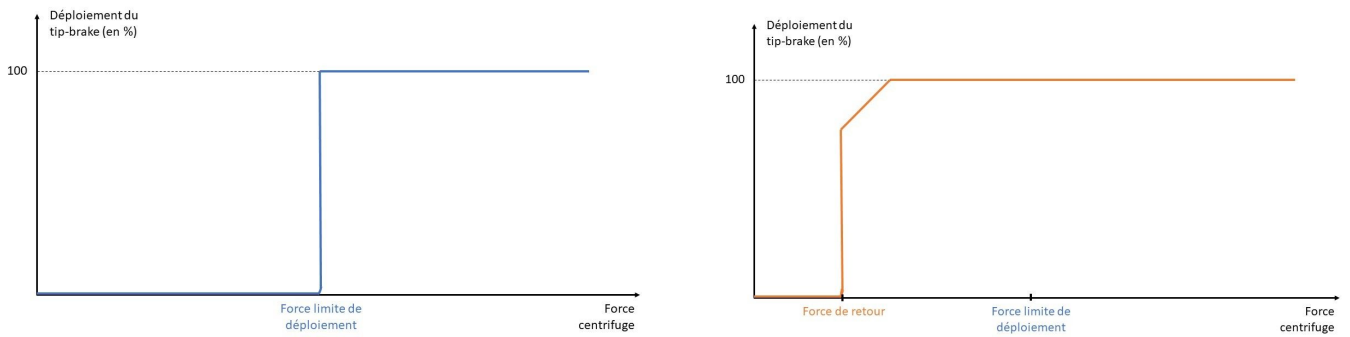


Figure 3.4 : Graphiques explicatifs du déploiement du tip-brake en fonction de la force centrifuge.
A droite, le retour et à gauche, le déploiement

La force de retour est plus faible que la force de déploiement grâce à l'aimant qui agit proportionnellement à l'inverse du carré de la distance, c'est-à-dire que plus l'aimant est loin du système moins il attire le système vers lui. Ainsi lorsque le tip brake est déployé, la force d'attraction de l'aimant est négligeable et seul le ressort agit sur le système, or celui-ci a une force équivalente plus faible. Le retour du système ne va pas se faire tant que la force limite du ressort n'a pas été atteinte. Le ressort va alors petit à petit se déployer de manière linéaire (loi de Hooke), jusqu'à atteindre une distance où l'aimant va avoir un effet non négligeable. A partir de là, le tip-brake va revenir à la normal. Ceci peut être illustré par les schémas suivants.

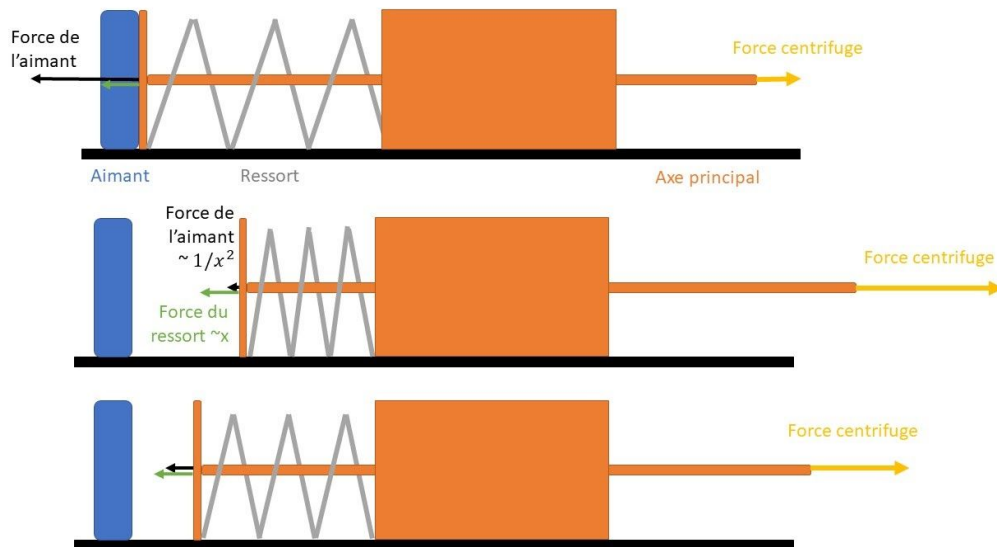


Figure 3.5 : Schéma explicatif du fonctionnement du tip-brake

Modélisation CAO du tip brake

Présentation du brevet

En cherchant sur internet, on a trouvé un brevet nommé "Tip Brake Mechanism for a wind generator blade" datant du 28 Août 1990. L'inventeur de ce Tip Brake est Richard A. Widseth venant du Minnesota, et le cessionnaire de ce brevet est *Pohenix Industries of Crookston Ltd.*, de Crookston dans le Minnesota.

Dans un premier temps, on aurait pu penser que ce brevet était assez ancien (datant de 1990) et que ce mécanisme était dépassé, mais il s'avère que cette innovation est toujours d'actualité et que ce mécanisme reste très intéressant à étudier. En effet, comme on l'a expliqué dans la partie précédente, ce dispositif lie à la fois un aimant à un ressort. Ainsi, lorsque la force centrifuge des pâles de l'éolienne dépasse la somme des deux forces limites de ces outils (aimant et ressort), le Tip Brake se déclenche et effectue, simultanément, un mouvement de translation et un mouvement de rotation, comme montré ci-après.

Voici quelques aperçus des plans de ce brevet qui nous ont aidés à réaliser la modélisation CAO de ce Tip Brake.

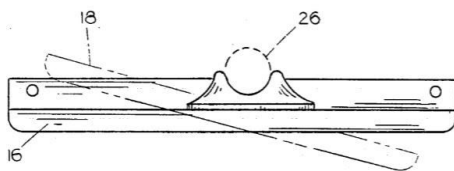


FIG. 7

Figure 3.6 : Vue longitudinale de la pale et de son extrémité en rotation

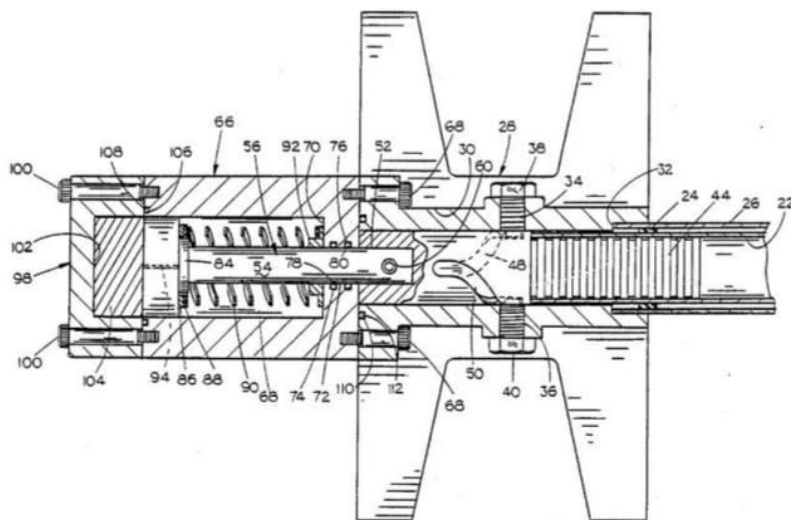


Figure 3.7 : Vue en coupe du tip-brake

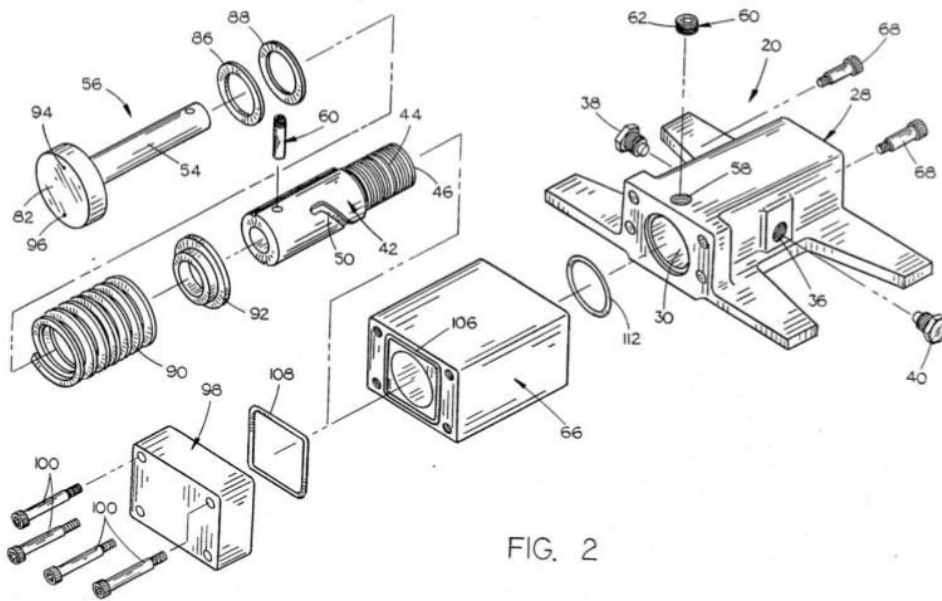


Figure 3.8 : Vue en perspective éclatée du tip-brake

A partir de ces plans, nous avons choisi de séparer ce mécanisme en trois parties plus faciles à modéliser sur Solidworks : la partie jaune qui correspond au ressort, la partie verte qui correspond à l'arbre lié au bout de la pale en mouvement de rotation et de translation, et la partie bleue qui correspond au bâti du Tip Brake.

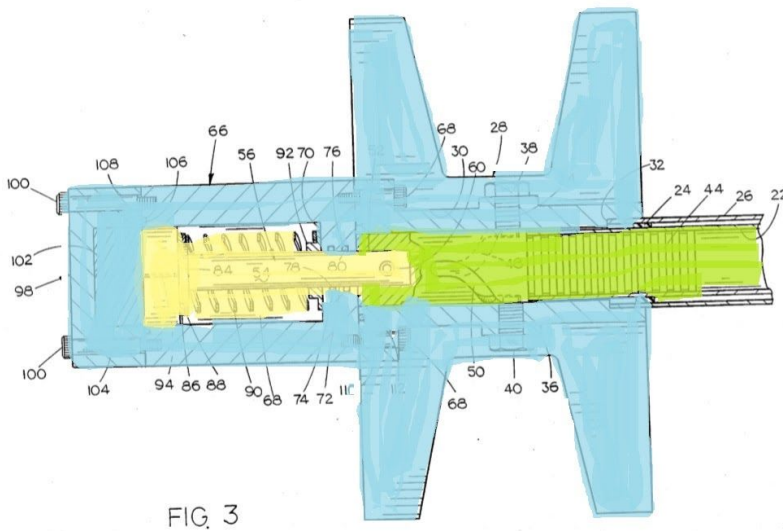


Figure 3.9 : Tip-Brake divisé en trois parties

A partir de là, nous nous sommes répartis les différentes pièces à modéliser et avons mis en commun les différentes côtes du Tip Brake pour qu'à la fin nos pièces puissent s'assembler les unes aux autres.

Présentation de la conception de quelques pièces

Ici, le Tip Brake est un assemblage de 3 classes d'équivalences, soit de 3 pièces sur solidworks. La première est la partie considérée comme la bâti du Tip Brake.

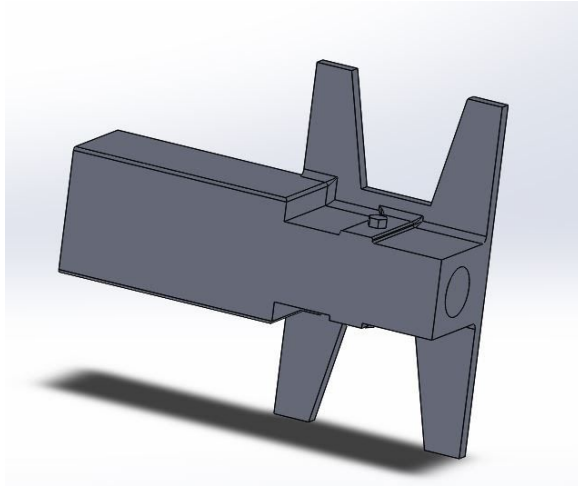


Figure 3.10 : Le "bâti" du Tip-Brake

La stratégie mise en place pour concevoir cette pièce a, d'abord, été de créer le contour afin de modéliser la coque de ce bâti. Cette coque a été séparée en deux parties. La première est celle en forme d'aile qui sera fixée à l'intérieur de la pale de l'éolienne. La deuxième partie correspond à la "coque", c'est-à-dire la partie qui va loger le ressort et l'arbre lié au bout de la pale. Pour ces deux parties, on a d'abord créé l'esquisse du contour que l'on a extrudé pour avoir la forme générale du bâti du Tip Brake en 3D.

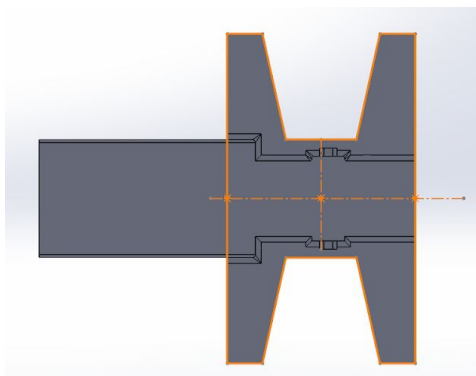
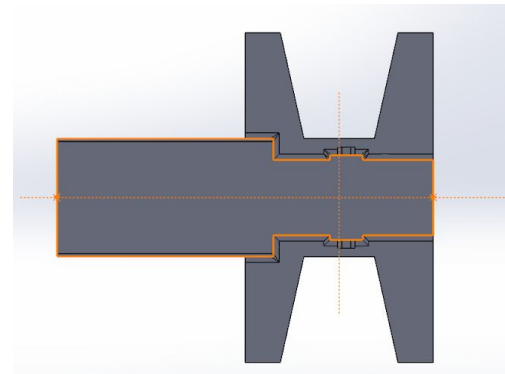
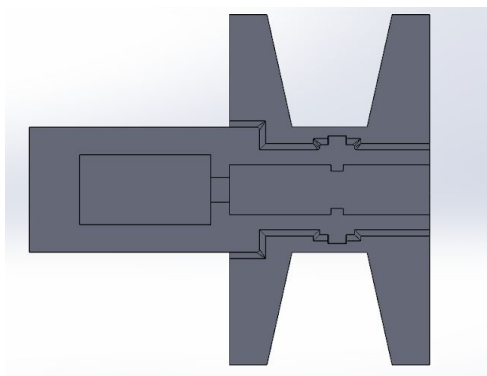


Figure 3.11 :
Les 2 parties
composant la
coque du bâti



Ensuite, nous avons enlevé de la matière à l'intérieur afin de former les espaces cylindriques dédiés au ressort et à l'arbre.



La photo ci-contre est en vue de coupe afin de voir à l'intérieur du bâti les espaces cylindriques creux.

Figure 3.12 : Vue de coupe du bâti

Enfin, nous avons modélisé deux vis qui iront se loger dans des rainures de l'arbre afin d'apporter le mouvement de rotation et de translation.

La deuxième partie de ce Tip Brake est la partie comprenant le ressort.

Nous avons dû réaliser deux ressorts différents parce que nous avons rencontré des difficultés lors de l'assemblage avec le premier ressort.



Pour réaliser le premier ressort, il a fallu utiliser la fonction "Hélice/Spirale" qui, à partir d'une esquisse, de cercle nous permet de créer une spirale en donnant son pas, sa révolution et sa hauteur. Ensuite, avec la fonction "Bossage/Base balayé", nous avons pu donner du volume à cette spirale. Enfin, il ne restait plus qu'à créer les différents cylindres grâce à la fonction "Bossage/Base extrudé".

Figure 3.14 : Modélisation du demi-ressort

Figure 3.13 : Modélisation du premier ressort

Pour réaliser la conception CAO du deuxième ressort, nous avons d'abord conçu un demi-ressort en esquissant un cercle et en utilisant la fonction "Révolution".



Ensuite, nous avons pu créer un ressort constitué de plusieurs demi-ressorts dans un assemblage. Pour cela, nous avons utilisé les contraintes "coïncidence" et "parallèle". En effet, nous avons mis bout à bout les demi-ressorts grâce à la contrainte "coïncidence", et nous avons pu créer un mouvement semblable à celui d'un vrai ressort (entre tous ces demi-ressorts) grâce à la contrainte "parallèle" entre les différents plans de ces demi-ressorts.

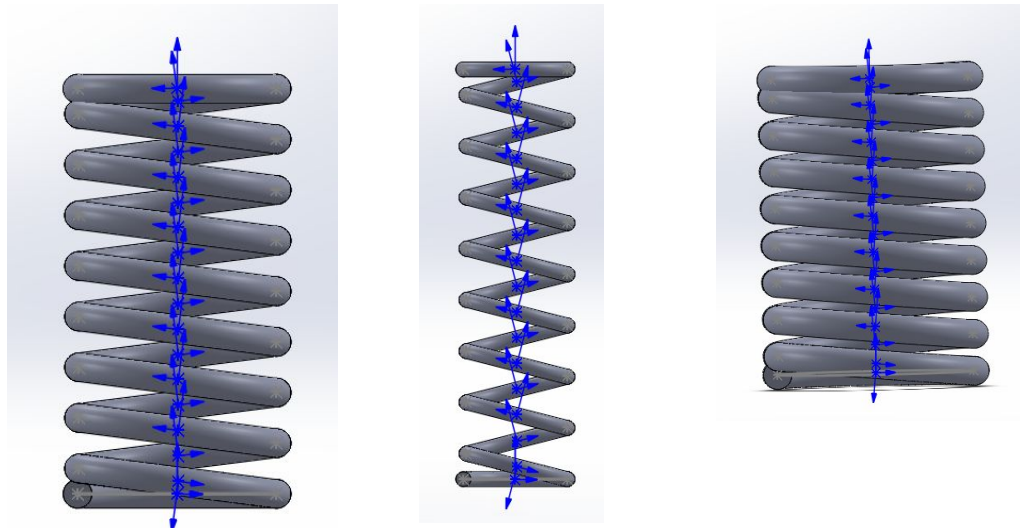
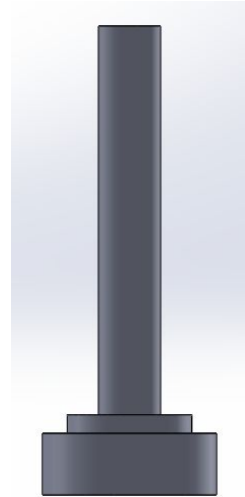


Figure 3.15 : Modélisation du deuxième ressort (assemblage des demi-ressorts)

Une fois ce ressort construit, il ne restait plus qu'à concevoir le support du ressort grâce à la fonction "Bossage/Base extrudée".

Figure 3.16 : Modélisation du support du ressort



La troisième partie de ce Tip Brake est l'arbre lié au bout de la pale qui a un mouvement de rotation et de translation.

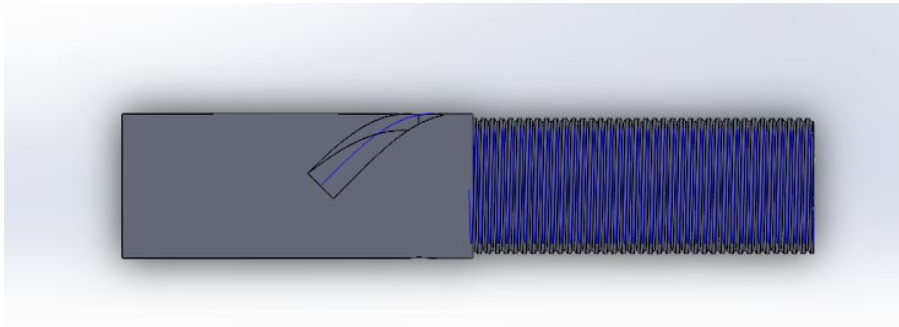
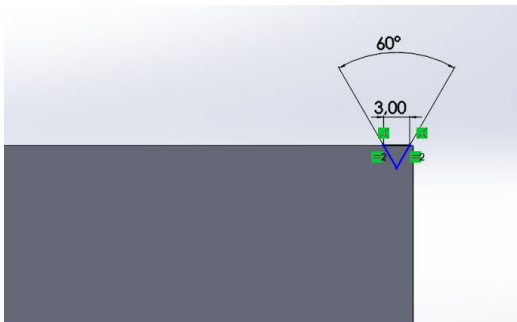


Figure 3.17 : Modélisation de l'arbre du Tip-Brake

Il a, d'abord, fallu construire les deux parties cylindriques de cet arbre. Ensuite, pour représenter la partie hélicoïdale de l'arbre, nous avons utilisé la fonction "Hélice/Spirale" afin de créer la spirale autour de l'arbre. Après, nous avons esquissé un petit triangle.



A partir de ce triangle, nous avons utilisé la fonction "Enlèvement de matière balayé" qui a permis d'enlever de la matière (de la forme de ce triangle) sur la surface du cylindre en suivant la spirale dessinée autour du cylindre.

Figure 3.18 : Triangle utilisé par la fonction "Enlèvement de matière balayé"

Enfin, nous avons modélisé deux rainures sur la deuxième partie de l'arbre pour permettre aux vis du bâti de suivre leur trajectoire et donc, de créer ce mouvement de rotation et de translation. La

stratégie pour concevoir ces deux rainures est sensiblement la même que celle expliquée juste avant pour créer la partie hélicoïdale. Nous avons donc utilisé la fonction “Hélice/Spirale” afin de créer la trajectoire et l’allure de la rainure. Seulement, ici, nous avons mis un pas beaucoup plus grand et une faible révolution afin d’avoir ce type de spirale.

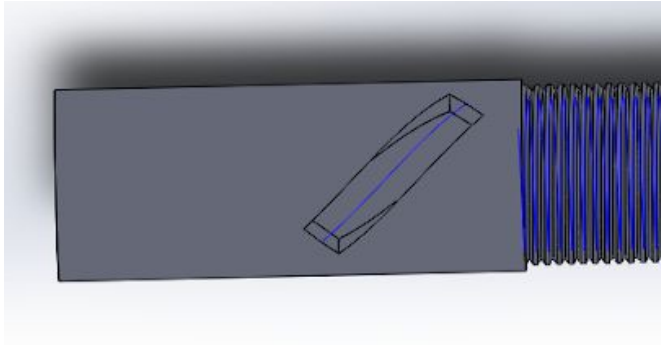
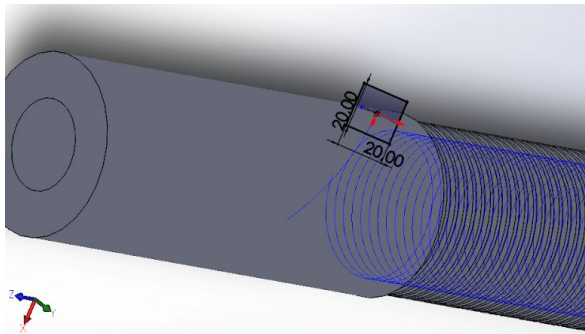


Figure 3.19 : Spirale à la base de la rainure

Ensuite, nous avons, sur le même principe que le petit triangle d’avant, esquissé un carré qui dessinera la forme de la rainure.



A partir de ce carré, nous avons utilisé la fonction “Enlèvement de matière balayé” qui a permis de former la rainure (ayant pour base ce rectangle).

Figure 3.20 : Carré utilisé par la fonction “Enlèvement de matière balayé”

Une fois que toutes ces pièces ont été modélisées, il ne nous restait plus que l’assemblage et la mise en place des contraintes entre les pièces.

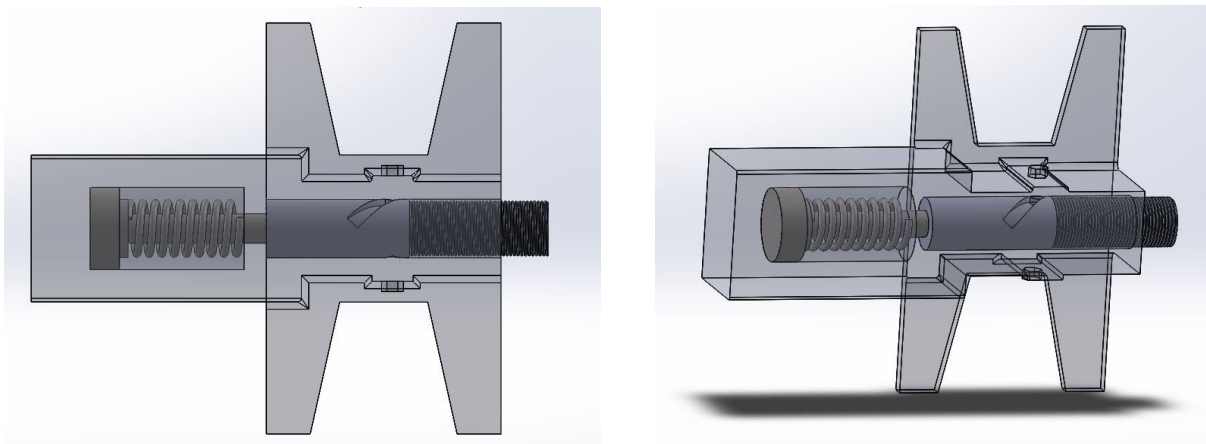


Figure 3.21 : Modélisation de l’assemblage final de toutes les composantes du Tip-Brake.

Points délicats du projet et libertés prises par rapport au brevet

Le premier point délicat du projet, et plus précisément de la conception CAO, est l'assemblage de toutes les pièces. En effet, dans un premier temps, il a fallu que l'on s'organise et que l'on se mette d'accord sur les différentes cotes et mesures de ce Tip Brake, afin de pouvoir assembler les pièces les unes avec les autres. Pour cela, on a estimé arbitrairement une première côte qui nous semblait réaliste. Ensuite, grâce à l'échelle trouvée de cette première côte, nous avons pu en déduire les autres mesures que nous avons schématisées sur un plan.

La deuxième partie délicate de cette conception CAO est la mise en place des bonnes contraintes afin d'avoir un assemblage dynamique et mobile reflétant le mécanisme décrit dans le brevet. La principale difficulté de cet assemblage réside au niveau de la contrainte rainure entre le bâti (pièce bleue) et l'arbre (pièce verte). En effet, nous avons, dans un premier temps, cherché à modéliser les rainures sur l'arbre de différentes façons et avec différents outils tels que la fonction "rainure", la fonction "enroulement" ou bien "courbe projetée". Ces méthodes n'étant pas concluantes et ne permettant pas la modélisation du mécanisme, nous avons donc choisi de modéliser ces rainures grâce à la fonction "Enlèvement de matière balayé" comme expliqué dans la partie précédente. A cause de cette méthode, nous avons donc pris la liberté de simplifier la forme des rainures. Ensuite, après avoir essayé d'utiliser la contrainte "trajectoire", nous nous sommes finalement contentés de la contrainte "Hélicoïdale". En paramétrant cette contrainte avec les mêmes valeurs que celles de l'hélice des rainures, nous arrivons à modéliser, à la fois, ce mouvement de translation et de rotation.

Ensuite, une autre difficulté résidait dans la modélisation du mouvement du ressort. Comme expliqué précédemment, nous avons d'abord créé un ressort "statique". Malheureusement, nous ne savions pas comment utiliser *l'étude de mouvement* de solidworks pour modéliser le mouvement de ressort. Nous avons donc contourné le problème en créant un ressort qui était déjà mobile et dynamique.

Animations du tip brake

A l'aide de contraintes telles que "Hélicoïdale", ou "Distance limite", nous avons réussi à modéliser le mouvement mécanique général du Tip Brake. Lorsque le support du ressort se décolle de la surface du bâti du Tip Brake, le ressort se replie sur lui même et l'arbre (lié au bout de la pale) effectue alors un mouvement hélicoïdale, c'est-à-dire à la fois un mouvement de rotation et de translation. Ce mouvement de rotation et de translation fera tourner le bout de la pale à 90 degrés, ce qui ralentit la vitesse des pales de l'éolienne.

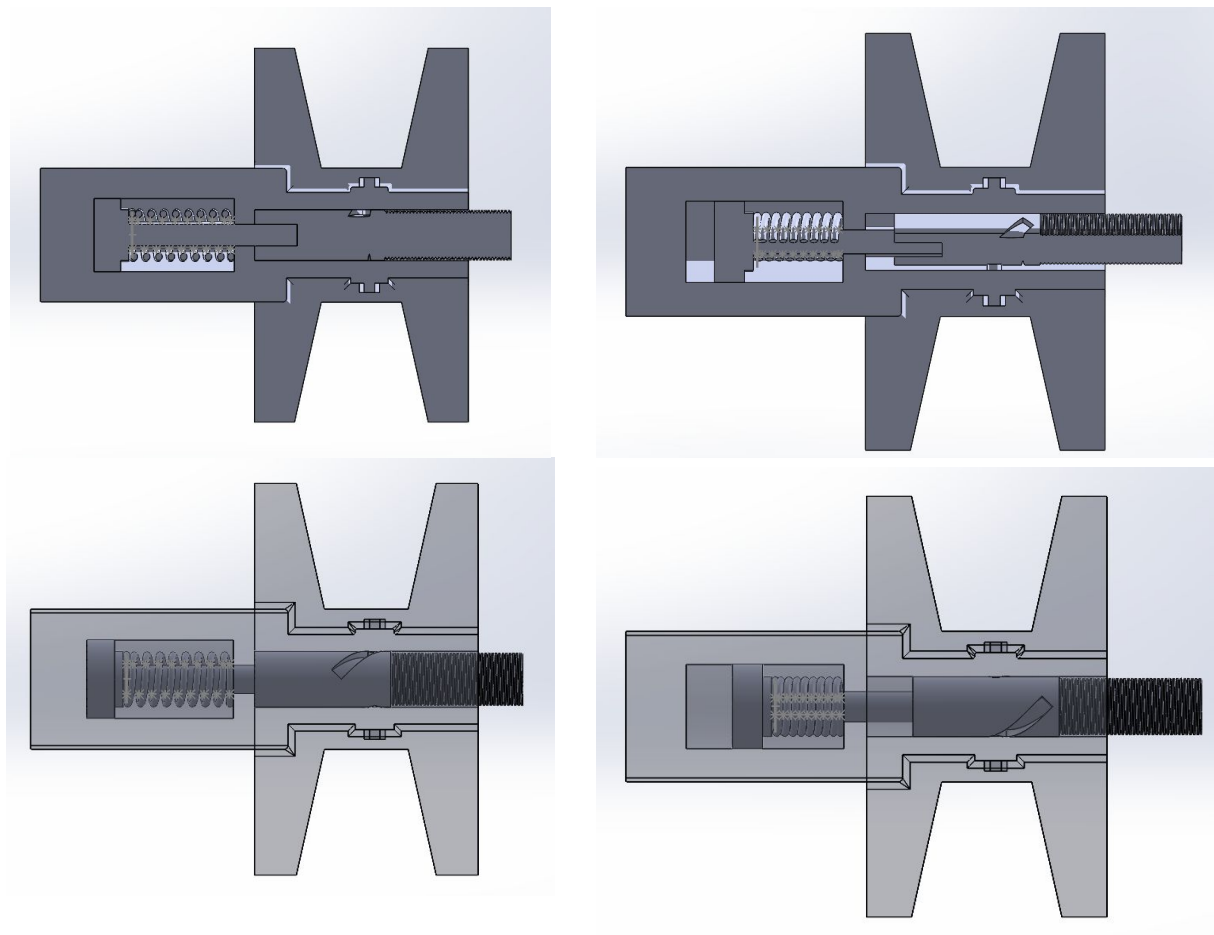


Figure 3.22 : Différentes positions et vues du Tip-Brake

Améliorations envisageables

La conception CAO du Tip Brake modélise de façon générale le mécanisme fonctionnel présenté dans le brevet. Cependant, nous pouvons effectuer quelques améliorations afin de rendre cette conception plus réaliste. Dans un premier temps, nous avons décomposé ce Tip Brake en trois parties ou classes d'équivalence pour simplifier la réalisation CAO. Toutefois, pour apporter plus de réalisme et de précisions au projet, nous pouvons également le diviser en un plus grand nombre de parties. Ainsi, nous aurions un arbre de conception plus complet et complexe avec le détail de toutes les pièces.

Ensuite, nous pourrions également travailler sur l'esthétique : c'est-à-dire sur le choix des cotes, le choix des matériaux et sur l'augmentation de fonctions liées à l'esthétique telles que "congé", "chanfrein", "filetage", etc ... En effet, n'ayant pas plus de précisions sur le brevet au niveau des côtes, nous avons pris la liberté de les choisir arbitrairement. Donc, ces côtes sont plus ou moins approximatives, et reflètent plus ou moins la réalité.

De plus, nous pourrions également retravailler les liaisons et contraintes liant les différentes pièces ensemble afin de complexifier notre assemblage. En effet, ici nous avons pris quelques libertés par rapport au brevet, notamment au niveau des rainures afin de simplifier la modélisation. Cependant, nous pourrions modifier ces contraintes afin d'avoir la vis du bâti du Tip Brake qui suit vraiment les rainures en utilisant les contraintes "trajectoire" ou "rainure" par exemple.

Prototypage du tip brake

Schéma du prototypage

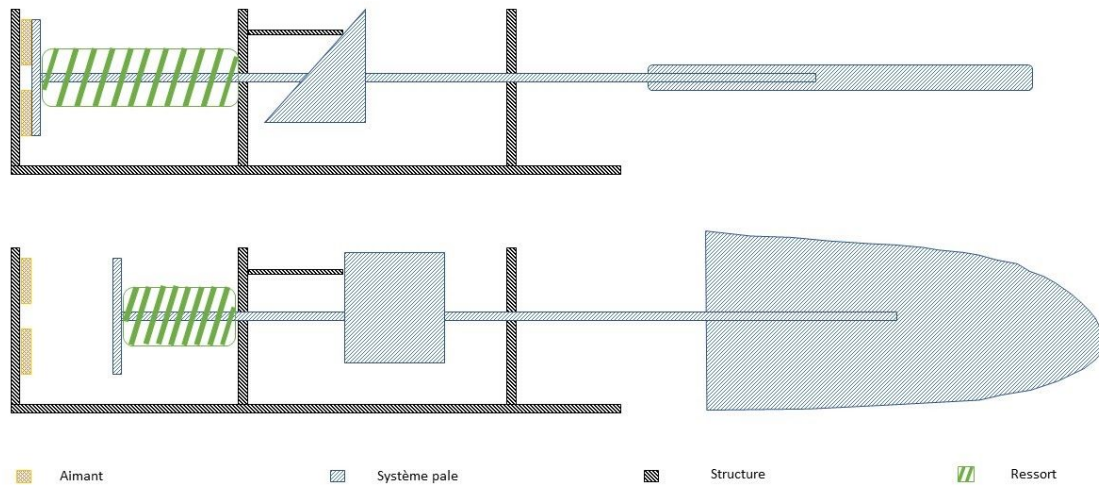


Figure 3.24 : Schéma du prototypage du tip-brake

Matériel utilisé

Tous les matériaux utilisés sont issus de chute de bois et de la réutilisation d'objets. Ils ne sont donc pas tout à fait optimaux pour représenter au mieux le tip-brake d'une éolienne, cependant ce prototypage donne une bonne idée du fonctionnement du tip brake.

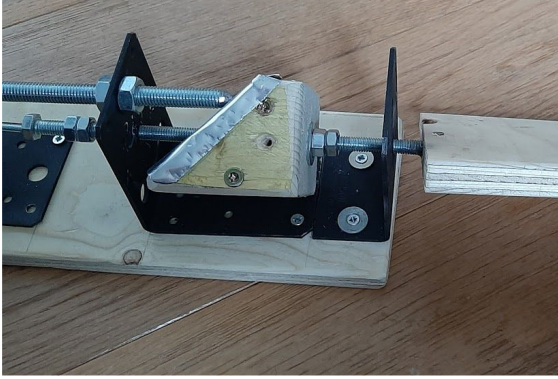
- **La structure/le bâti :**
 - Une planche de 3 plis de 15 mm
 - 4 équerres en acier
 - Deux écrous et une vis
- **L'aimant**
 - Aimant néodyme rond trouvé dans une enceinte
 - Force de l'aimant ~ 1400 g (d'après expérience)
- **Le ressort**
 - Ressort linéaire de suspension de voiture téléguidée
 - Raideur du ressort $k \sim 5$ N/m (d'après expérience)
- **Le système pale**
 - Tige fileté de 30 cm (diamètre = 8 mm)
 - Plaque d'acier (qui est en contact avec l'aimant)
 - Pièces en bois collée

Présentation

Lors de la conception et de la construction du prototype trois problèmes se sont posés.

1) Comment faire tourner et avancer en même temps la pale ?

Créer une glissière avec les ressources disponibles paraissait impossible. Il fallait être très précis pour avoir une glissière qui ait un parcours circulaire idéal et cela était très gourmand en matériel. Après réflexion, l'idée d'un prisme triangulaire en buté contre un doigt paraissait une bonne idée. Après quelques tests pour vérifier si cela pouvait fonctionner, le prisme triangulaire semblait la



solution la plus intéressante : mise en place simple, ajustement facile grâce à un doigt amovible. Cependant la prisme avait un gros défaut les frottements générés entre le doigt et le prisme. Ces derniers seront diminués grâce à une plaque métallique apposée sur le prisme en bois.

Figure 3.25 : Photo du prototypage du prisme et du doigt métallique

2) Comment mettre en relation le ressort et l'aimant ?

Accrocher un ressort à une plaque en métal n'est pas facile, n'ayant pas à disposition un poste à souder et sachant que le collage n'aurait pas été efficace. Garder le support originel en plastique semblait la meilleure solution. Il a fallu fixer cette plaque métallique au support. En réalité, la plaque est coincée grâce à deux bouts de métal pour que le système soit démontable.

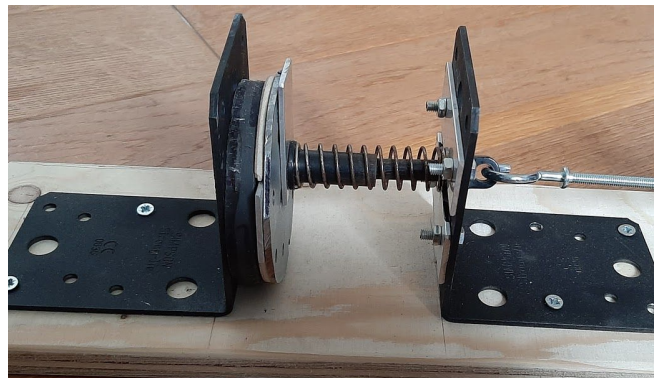


Figure 3.26 : Photo du prototypage du ressort et aimant

3) Comment relier le ressort avec l'axe principal de la pôle ?

Le support originel gardé, il fallait relier le support à l'axe et mettre une nouvelle buté au ressort. Après avoir percé l'équerre, le ressort pouvait y être inséré de telle façon que le support pouvait passer à travers l'équerre mais pas le ressort. Enfin le support est accroché à l'axe principal grâce à un crochet.

La construction de ce prototype de tip-brake a une visée pédagogique. Les frottements entre le prisme et le doigt empêchent une rotation homogène. De plus le filetage de la tige cause aussi des problèmes de frottements avec les équerres.

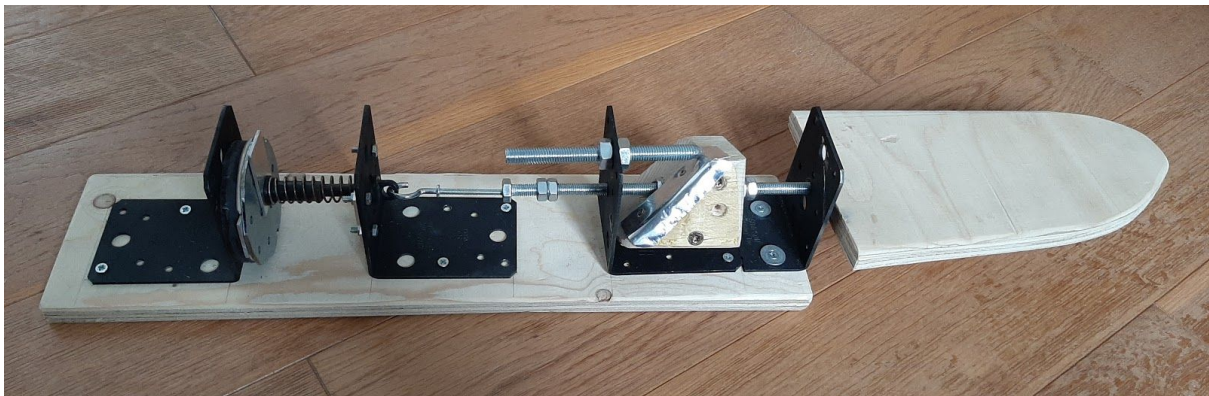


Figure 3.27 : Photo générale du prototypage du tip-brake

Etude dynamique du prototype

Il semblait intéressant de tester le comportement de notre prototype pour pouvoir le comparer à notre étude théorique et pour observer le fonctionnement d'un tip-brake. Pour que l'étude soit la plus proche de la réalité, il a fallu limiter un maximum les frottements. La plus grande source de frottements est le frottement du doigt métallique sur le prisme en bois, nous avons décidé de mettre le tip-brake à la verticale pour éviter qu'il tourne et donc que le doigt touche le prisme.



Figure 3.28 : Installation de l'étude expérimentale

Le but:

Une fois le tip-brake à la verticale, le but est d'ajouter petit à petit du poids sur le bout du tip-brake et d'étudier le déplacement de l'axe principale qui s'éloigne de l'aimant, puis d'enlever le poids petit à petit pour observer la force de retour.



Figure 3.29 : Photo présentant la distance x

La réalisation:

- Un sac en plastique est positionné au bout du tip brake pour accueillir l'eau.
- L'eau est ajoutée, 50 mL par 50 mL.
- La distance entre l'aimant et l'axe principale est relevé à chaque ajout de l'eau.
- Une fois le décrochage observé, la même opération est réalisé mais en enlevant l'eau.
- L'eau est enlevée du sac plastique, 50 mL par 50 mL, grâce à un système de syphon (tuyau d'aquarium et verre doseur)
- La distance entre l'aimant et l'axe principale est relevé à chaque opération.

Les résultats

Les résultats permettent de très bien comprendre le fonctionnement du tip-brake. Lors de l'expérience, le décrochage de l'aimant a été très visible.

Résultats du déclenchement du tip brake:

Poids (g)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	
x (cm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Poids (g)	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900	1950	2000	2050	2100	2150	2200	2250	2300	
x (cm)	0	0	0	0	0	0	1,4	1,6	1,7	1,9	2,1	2,1	2,2	2,3	2,3	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	

Figure 3.30 : Tableau des résultats expérimentaux du déclenchement du tip-brake

Résultats pour la force de retour:

Poids (g)	2150	2100	2050	2000	1950	1900	1850	1800	1750	1700	1650	1600	1550	1500	1450	1400	1350	1300	1250	1200	1150	1100	1050
x (cm)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,4	2,4	2,3	2,2	2,2	2,2	2,1	2	1,9	1,8	1,6	1,5	1,4	1,2	1,1	1	1
Poids (g)	1000	950	900	850	800																		
x (cm)	0	0	0	0	0																		

Figure 3.31 : Tableau des résultats expérimentaux du retour du tip-brake

Distance plaque-aimant en fonction du poids soumis au tip brake

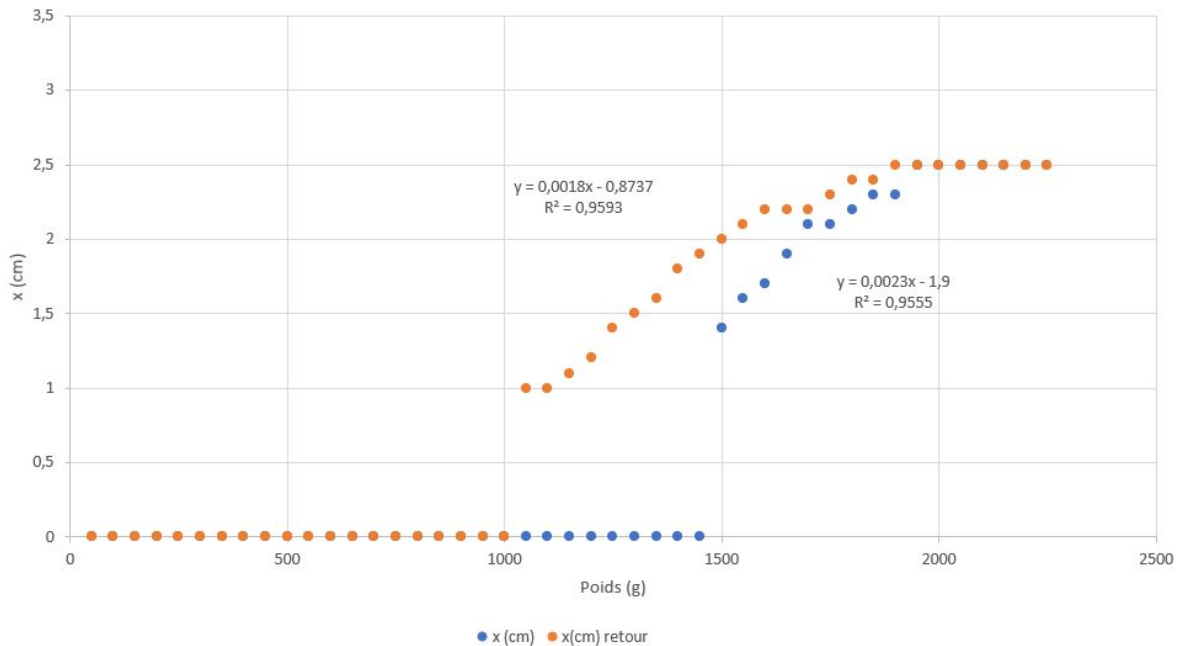


Figure 3.32 : Graphique de la distance plaque-aimant en fonction du poids soumis au tip-brake

Interprétation des résultats

A l'aller, on observe le décrochage de l'aimant à 1500 g, puis une partie linéaire, et enfin une partie horizontale. Cela correspond respectivement : au décrochage de l'aimant qui a une force proportionnelle à l'inverse de la distance au carré ($1/x^2$), puis du ressort qui suit la loi de Hooke la force est proportionnelle à la distance ($F=kx$), puis du parcours maximum du ressort.

Au retour on observe exactement la même chose, sauf que le poids où l'aimant raccroche est inférieur à celui où il s'est décroché. C'est exactement ce que l'on voulait observer et ce que l'on avait prédit dans la partie théorique. C'est ce qu'on appelle hysteresis, les propriétés du système dépendent de son évolution antérieure.

Critique des résultats:

Premièrement, on observe que les deux parties linéaires qui correspondent au poids soumis uniquement au ressort ne se superposent pas comme elles devraient le faire. En effet, ces parties

linéaires qui ont pour coefficient directeur la raideur k du ressort, sont presque parallèles mais sont décalées. Cela doit être dû au frottement de l'axe principal qui est une tige fileté.

Deuxièmement, ces parties linéaires ne devraient être présentes que dans la force retour, car dans le brevet et dans les tip-brake en général, le ressort supporte beaucoup moins de force que l'aimant. Dans ce cas, le ressort devrait s'écraser entièrement dès que l'aimant décroche. Dans le cas de ce prototypage, le choix du ressort et de l'aimant était très limité, d'où ce manque de réalisme.

Conclusion

Pour conclure, ce projet de P6 fût une belle expérience tant bien au niveau des compétences et connaissances acquises, qu'au niveau de la gestion et de la coordination des tâches. En effet, ce projet a pu nous permettre de compléter et d'approfondir nos compétences sur les éoliennes, l'aérodynamisme, l'énergétique mais également sur la mécanique et les différents fonctionnements des éléments constituant une éolienne. En plus de ça, il a permis d'accroître nos compétences en modélisation et CAO (conception assistée par ordinateur) pour certains, et pour d'autres de les initier de manière assez rapide et concrète à Solidworks.

De plus, la plupart des membres de ce groupe étaient intéressés par les spécialités "Mécanique" et "Energétique et Propulsion". Ce projet sur les éoliennes, liant à la fois l'énergétique, l'aérodynamisme, les matériaux et la mécanique a donc permis d'affiner notre choix, et de nous montrer grâce à un exemple concret (les éoliennes) les différentes analyses et études possibles en fonction des thématiques abordées.

Au delà de nous engager chacun à apporter diversement nos qualités à ce projet formateur, ce dernier nous a aussi et surtout amené à nous adapter aux façons de travailler de chaque membre du groupe et aux conditions particulières dans lesquelles s'est déroulé le projet. L'enseignement principal tiré de cette expérience est la réflexion à plusieurs sur des problématiques de conception et de modélisation. Ce fût en outre l'un des apprentissages majeurs de ce projet, que de planifier son avancement et de le respecter tout au long de cette entreprise.

Bibliographie

Aérodynamique des pales :

<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/hystérésis/41296>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Hystérésis>

https://fr.wikipedia.org/wiki/Force_d%27inertie

Marc Rapin, Jean-Marc Noël. *L'énergie éolienne, du petit éolien à l'offshore*. Edition DUNOD. Février 2019.

Choix du profil de la pale

https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/639/7/FORCIER_Louis-Charles.pdf

Régulation de la vitesse d'une éolienne :

<https://eolienne.ooreka.fr/astuce/voir/434493/regulation-de-la-vitesse-d-une-eolienne>

Régulation aérodynamique sur les pales :

<https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89olienne>

Tip-Brake :

<http://ele.aut.ac.ir/~wind/en/tour/wtrb/safety.htm>

<http://ele.aut.ac.ir/~wind/en/tour/wtrb/powerreg.htm>

Motoréducteur :

<http://5lair.free.fr/Teachings/Files/CM%20Mecanique.pdf>

<https://www.neugart.com/en/planetary-gearbox/multi-stage-gearbox/>

Frein de Lacet :

https://fr.qwe.wiki/wiki/Yaw_system

Système YAW :

<http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/fr/tour/wtrb/yaw.htm>

Spoilers / Volets :

https://eolienne.f4jr.org/systeme_de_regulation_et_de_protection

Crédits d'illustrations

Figure 1.1 : Profil de l'aile d'avion

<http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/fr/tour/wtrb/lift.htm>

Figure 1.2 : Schéma d'un profil de pale d'éolienne

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Wing_profile_nomenclature_\(fr\).svg](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Wing_profile_nomenclature_(fr).svg)

Figure 1.4 : Polaire 2D d'un profil NACA

<https://scherrer.pagesperso-orange.fr/matthieu/aero/miarex.html>

Figures 1.5 : Champ des lignes de courant autour du profil d'une aile

<http://tpe-dylan-romain.e-monsite.com/pages/aile-d-un-avion.html>

<http://ericaeromodelisme974.unblog.fr/2011/07/23/le-decrochage/>

Figure 1.6 : Champ de pression autour du profil d'une aile

<http://hmf.enseiht.fr/travaux/CD0708/beiere/2/html/tr2%20eol%20generalites.xhtml>

Figure 1.7 : courbes hystérésis schématisées

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Hystérésis>

Figure 1.3 : Caractéristiques 2D d'un profil

Figure 1.8 : schématisation du phénomène de décrochage (courbes hystérésis)

Figure 1.9: Schéma mouvements de battement et de traînée

Marc Rapin, Jean-Marc Noël. *L'énergie éolienne, du petit éolien à l'offshore*. Edition DUNOD. Février 2019.

Figure 2.2 : Schéma des entraxes

<http://5lair.free.fr/Teachings/Files/CM%20Mecanique.pdf>

Figure 2.3 : Schéma de la règle d'haricot

<http://5lair.free.fr/Teachings/Files/CM%20Mecanique.pdf>

Figure 2.10 : Roulement à rouleaux cylindriques

<https://www.liebherr.com/fr/fra/produits/composants/roulements-de-grandes-dimensions/roulements-principaux-pour-eoliennes/roulements-principaux-pour-eoliennes.html>

Figure 2.11 : Système de freinage de lacet par freins à disque

https://fr.qwe.wiki/wiki/Yaw_system

Figure 2.12 : Système de freinage de lacet par pneumatique

https://fr.qwe.wiki/wiki/Yaw_system

Figure 3.1 : Vue d'un volet déployé

<https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/22253.pdf>

Figure 3.2 : Différentes vues d'un tip-brake et de son mécanisme

<https://wind.nrel.gov/forum/wind/viewtopic.php?f=4&t=2356>

Figure 3.6 : Vue longitudinale de la pale et de son extrémité en rotation

<https://patentimages.storage.googleapis.com/30/3a/35/a0f016e4863ca8/US4952119.pdf>

Figure 3.7 : Vue en coupe du tip-brake

<https://patentimages.storage.googleapis.com/30/3a/35/a0f016e4863ca8/US4952119.pdf>

Figure 3.8 : Vue en perspective éclatée du tip-brake

<https://patentimages.storage.googleapis.com/30/3a/35/a0f016e4863ca8/US4952119.pdf>

Annexes

Axe X (en m)	Axe Y (en m)	Axe Z (en m)	Rot X (en °)	Rot Y (en °)	Rot Z (en °)	Corde (en m)	Epaisseur (en % de corde)	Pitch X (en % de corde)	Pitch Y (en % de corde)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,50	0,00
0,00	0,00	2,80	0,00	0,00	-14,50	5,38	1,00	0,50	0,00
0,00	0,00	5,44	0,00	0,00	-14,50	5,38	0,99	0,50	0,00
0,00	0,00	8,17	0,00	0,00	-14,50	5,38	0,95	0,50	0,00
0,00	0,00	10,99	0,00	0,00	-14,43	5,45	0,86	0,49	0,00
0,00	0,00	13,89	0,00	0,00	-13,89	5,63	0,73	0,47	0,00
0,00	0,00	16,85	0,00	0,00	-12,56	5,86	0,61	0,44	0,00
0,00	0,00	19,88	0,00	0,00	-10,62	6,07	0,50	0,41	0,00
0,00	0,00	22,94	0,00	0,00	-8,90	6,18	0,43	0,39	0,00
0,00	0,00	26,04	0,00	0,00	-7,81	6,20	0,38	0,38	0,00
0,00	0,00	29,15	0,00	0,00	-7,03	6,14	0,35	0,36	0,00
0,00	0,00	32,28	0,00	0,00	-6,39	6,02	0,32	0,36	0,00
0,00	0,00	35,39	0,00	0,00	-5,78	5,85	0,30	0,35	0,00
0,00	0,00	38,48	0,00	0,00	-5,23	5,65	0,29	0,35	0,00
0,00	0,00	41,53	0,00	0,00	-4,68	5,43	0,27	0,35	0,00
0,00	0,00	44,54	0,00	0,00	-4,10	5,19	0,26	0,35	0,00
0,00	0,00	47,49	0,00	0,00	-3,50	4,95	0,26	0,35	0,00
0,00	0,00	50,36	0,00	0,00	-2,90	4,70	0,25	0,35	0,00
0,00	0,00	53,16	0,00	0,00	-2,31	4,46	0,25	0,35	0,00
0,00	0,00	55,87	0,00	0,00	-1,75	4,23	0,24	0,35	0,00
0,00	0,00	58,49	0,00	0,00	-1,22	4,00	0,24	0,35	0,00
0,00	0,00	61,00	0,00	0,00	-0,73	3,79	0,24	0,35	0,00
0,00	0,00	63,41	0,00	0,00	-0,28	3,59	0,24	0,35	0,00
0,00	0,00	65,70	0,00	0,00	0,12	3,40	0,24	0,35	0,00
0,00	0,00	67,89	0,00	0,00	0,49	3,23	0,24	0,35	0,00
0,00	0,00	69,96	0,00	0,00	0,81	3,07	0,24	0,35	0,00
0,00	0,00	71,93	0,00	0,00	1,11	2,92	0,24	0,35	0,00
0,00	0,00	73,78	0,00	0,00	1,38	2,78	0,24	0,35	0,00
0,00	0,00	75,52	0,00	0,00	1,63	2,65	0,24	0,35	0,00
0,00	0,00	77,15	0,00	0,00	1,86	2,54	0,24	0,35	0,00
0,00	0,00	78,68	0,00	0,00	2,07	2,43	0,24	0,35	0,00
0,00	0,00	80,11	0,00	0,00	2,28	2,33	0,24	0,35	0,00
0,00	0,00	81,45	0,00	0,00	2,47	2,23	0,24	0,35	0,00
0,00	0,00	82,69	0,00	0,00	2,64	2,13	0,24	0,35	0,00
0,00	0,00	83,84	0,00	0,00	2,80	2,02	0,24	0,35	0,00
0,00	0,00	84,91	0,00	0,00	2,94	1,91	0,24	0,35	0,00
0,00	0,00	85,90	0,00	0,00	3,07	1,78	0,24	0,35	0,00
0,00	0,00	86,82	0,00	0,00	3,18	1,63	0,24	0,35	0,00
0,00	0,00	87,66	0,00	0,00	3,27	1,44	0,24	0,35	0,00
0,00	0,00	88,45	0,00	0,00	3,36	1,18	0,24	0,35	0,00
0,00	0,00	89,17	0,00	0,00	3,43	0,60	0,24	0,35	0,00

Annexe 1: DTU original éolienne 100MW d'envergure 89m

Axe X (en m)	Axe Y (en m)	Axe Z (en m)	Rot X (en °)	Rot Y (en °)	Rot Z (en °)	Corde (en m)	Epaisseur (en m)	Pitch X (en % de corde)	Pitch Y (en % de corde)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	2,66		1,00	0,50
0,00	0,00	1,38	0,00	0,00	-14,5	2,66		1,00	0,50
0,00	0,00	2,69	0,00	0,00	-14,5	2,66		0,99	0,50
0,00	0,00	4,04	0,00	0,00	-14,5	2,70		0,95	0,50
0,00	0,00	5,43	0,00	0,00	-14,4	2,79		0,86	0,49
0,00	0,00	6,87	0,00	0,00	-13,9	2,90		0,73	0,47
0,00	0,00	8,33	0,00	0,00	-12,6	3,00		0,61	0,44
0,00	0,00	9,83	0,00	0,00	-10,6	3,06		0,50	0,41
0,00	0,00	11,34	0,00	0,00	-8,9	3,07		0,43	0,39
0,00	0,00	12,87	0,00	0,00	-7,8	3,04		0,38	0,38
0,00	0,00	14,41	0,00	0,00	-7,0	2,98		0,35	0,36
0,00	0,00	15,96	0,00	0,00	-6,4	2,89		0,32	0,36
0,00	0,00	17,49	0,00	0,00	-5,8	2,79		0,30	0,35
0,00	0,00	19,02	0,00	0,00	-5,2	2,68		0,29	0,35
0,00	0,00	20,53	0,00	0,00	-4,7	2,57		0,27	0,35
0,00	0,00	22,02	0,00	0,00	-4,1	2,45		0,26	0,35
0,00	0,00	23,48	0,00	0,00	-3,5	2,32		0,26	0,35
0,00	0,00	24,90	0,00	0,00	-2,9	2,21		0,25	0,35
0,00	0,00	26,28	0,00	0,00	-2,3	2,09		0,25	0,35
0,00	0,00	27,62	0,00	0,00	-1,7	1,98		0,24	0,35
0,00	0,00	28,91	0,00	0,00	-1,2	1,87		0,24	0,35
0,00	0,00	30,16	0,00	0,00	-0,7	1,77		0,24	0,35
0,00	0,00	31,35	0,00	0,00	-0,3	1,68		0,24	0,35
0,00	0,00	32,48	0,00	0,00	0,1	1,60		0,24	0,35
0,00	0,00	33,56	0,00	0,00	0,5	1,52		0,24	0,35
0,00	0,00	34,59	0,00	0,00	0,8	1,44		0,24	0,35
0,00	0,00	35,56	0,00	0,00	1,1	1,37		0,24	0,35
0,00	0,00	36,47	0,00	0,00	1,4	1,31		0,24	0,35
0,00	0,00	37,33	0,00	0,00	1,6	1,25		0,24	0,35
0,00	0,00	38,14	0,00	0,00	1,9	1,20		0,24	0,35
0,00	0,00	38,90	0,00	0,00	2,1	1,15		0,24	0,35
0,00	0,00	39,61	0,00	0,00	2,3	1,10		0,24	0,35
0,00	0,00	40,27	0,00	0,00	2,5	1,05		0,24	0,35
0,00	0,00	40,88	0,00	0,00	2,6	1,00		0,24	0,35
0,00	0,00	41,45	0,00	0,00	2,8	0,94		0,24	0,35
0,00	0,00	41,98	0,00	0,00	2,9	0,88		0,24	0,35
0,00	0,00	42,47	0,00	0,00	3,1	0,80		0,24	0,35
0,00	0,00	42,92	0,00	0,00	3,2	0,71		0,24	0,35
0,00	0,00	43,34	0,00	0,00	3,3	0,59		0,24	0,35
0,00	0,00	43,73	0,00	0,00	3,4	0,30		0,24	0,35
0,00	0,00	44,08	0,00	0,00	3,4	0,00		0,24	0,35

Annexe 2: DTU proportionné pour éolienne 2MW de 44m d'envergure