

Développement d'un modèle 3D CAO paramétré d'éolien de petite puissance dans la continuité de l'outil OpenAFPM

Stage Assistant ingénieur 2^{ème} année

Filière Mécanique et Energétique, ENSE3

Etudiant : PARPAILLON Richard



Eolienne Piggott 2m40 installée sur le toit de l'ENSE3 par l'association ACE

Table des matières

Abstract	2
French	2
English	3
I Contexte du stage.....	4
Le petit éolien Piggott et les différents acteurs	4
But du Stage	4
II Travail préliminaire à la paramétrisation	5
Description de l'éolienne	5
Types d'éoliennes.....	6
Les outils développés par RurERG : MagnAFPM et FurlingTool.....	8
Inputs du modèle paramétré	9
Points importants à respecter	10
III Le modèle Freecad	10
Paramétrisation à base de fiches de calculs.....	10
Type 1 : T Shape.....	12
Type 2 : H Shape	16
Type 3 : Star Shape	17
Bobineurs et types de bobines.....	19
Le Safran	20
III Applications du modèle paramétré.....	21
Notice de calcul	21
Découpage laser	22
Implémentation avec les outils développés par RurERG	22
Conclusion	23
Références.....	23
ANNEXE	24
Annexe 1 : Tutorial	24
Annexe 2 : Example Spreadsheet Recipe	27
Annexe 3 : Fichier CSV – Input du modèle Freecad.....	28

Abstract

Français

Le développement d'éolien Piggott de petite puissance est étudié. Cet éolien s'inscrit dans une démarche low-tech, et de ce fait on suit un manuel « The wind turbine recipe book » pour chaque nouvelle construction. De manière habituelle, seulement 5 éoliennes de tailles différentes allant de 500W à 2kW peuvent être construites de cette manière. Un modèle paramétré de l'éolienne a été développé ici, permettant d'en construire une de n'importe quelle taille. Des éoliennes de puissances supérieures à 2kW ont aussi été fabriquées et modélisées.

Dans le modèle paramétré on distingue trois grands types de génératrices en fonction de leur taille : T Shape, H Shape et Star Shape. Tout est paramétré pour que l'éolienne fonctionne le mieux possible et soit la plus simple à construire. Le modèle paramétré est complémentaire à deux outils développés par RurERG qui lui donnent ses paramètres d'entrée.

Au final après chaque nouvelle paramétrisation, une fiche de calcul comportant toutes les dimensions nécessaires est disponible. Cette fiche, couplée au livre « The wind turbine recipe book » permet de construire l'éolienne. De plus, tout le modèle est paramétré dans le logiciel de CAO FreeCAD, qui sort toutes les pièces aux bonnes dimensions. Ces pièces peuvent ensuite être exportées pour être ensuite fabriquées par découpe laser.

Cela permettra aux futurs constructeurs d'avoir un modèle fiable, fonctionnel et facilement constructible d'éolienne adaptée au mieux à leurs conditions (Vitesse de vent, matériaux utilisés, puissance voulue...).

English

Manufactured Piggott wind turbine development is studied. « The wind turbine recipe book » is followed for each new construction. Usually, only five wind turbines, from 500W up to 2kW are constructed that way. A parametrized model of the wind turbine that will allow any construction of any size has been developed here. Turbines with greater power (above 2kW) has also been constructed and modeled.

Three different categories of generators are presented in this model, classified by size : T Shape, H Shape, Star Shape. The parametrization was made in order to make the construction of the wind turbine easier and allow it to work the best. This model is complementary with the design tools developed by RurERG, which give it his inputs.

After each parametrization, a spreadsheet that includes all the dimensions needed is available. Coupled with the book « The wind turbine Recipe Book », it is possible for anyone to build the turbine. Moreover, all the model is parametrized in Freecad (CAO software) which gives all the pieces of the turbine with the right dimensions. This pieces can therefore be used with a laser cut machine.

Finally, this model will allow futur constructors to easily build the most suitable windturbine for their location, while being reliable.

I Contexte du stage

Le petit éolien Piggott et les différents acteurs

Hugh Piggott, un paysan écossais et n'ayant pas accès au réseau électrique, a développé il y a 40 ans et après de nombreuses tentatives, un modèle d'éolienne de petite puissance. Ces éoliennes s'inscrivent dans une démarche « OpenSource » et « Low Tech » (par opposition à High Tech) et peuvent ainsi être construites en utilisant majoritairement des éléments de récupération, disponibles partout et à moindre coût.

Il en a écrit un livre « A wind turbine recipe book », détaillant la construction de ce type d'éolienne. Ce livre a inspiré des personnes sur tout le globe et pendant 40 ans un réseau mondial s'est créé, cherchant continuellement à développer et améliorer ce modèle de petit éolien.

WindEmpowerment est un réseau mondial constitué de différents acteurs aux compétences multiples. On peut y retrouver des laboratoires de recherche, des entreprises, des associations, des ONG et toutes les personnes qui travaillent sur ce modèle. Globalement les acteurs du réseau cherchent à développer et faire connaître l'éolien de petite puissance, organisent des formations partout sur la planète, font des études de marchés, de la R&D. En France le réseau officiel s'appelle Tripalium et fait partie de WindEmpowerment.

A l'Ense3 notamment, l'association « **Aire de Conception Energétique** » (ACE), qui fait partie de ces 2 réseaux, forme chaque année des dizaines d'étudiants ingénieurs à la création et la fabrication de ce type d'éolien, ajoutant ainsi un savoir pratique et manuel aux notions d'électricité ou de mécanique vues en cours. Elle s'est étendue à l'étranger avec notamment une éolienne fonctionnelle installée dans une école au Maroc.

Le stage se déroule au **RurERG** "Rural Electrification Research Group", un laboratoire de recherche faisant de la NTUA (National Technical University of Athens). Comme son nom l'indique, il travaille sur l'électrification hors réseau et a une division, dirigée par **Kostas Latoufis** (chercheur en mécanique des fluides et en électricité) qui travaille sur l'éolien Piggott. Le laboratoire délivre des formations à la construction d'éoliennes, a construit une éolienne de plus grande puissance que celle habituellement construite et a développé des outils de dimensionnement de la génératrice et du safran de l'éolienne.

But du Stage

Dans son livre, Hugh Piggott détaille 6 éoliennes de tailles différentes, avec des génératrices allant de 200W à 2kW. Ce sont des modèles faciles d'accès, tous testés sur le terrain et fonctionnels. Même si toutes les formules nécessaires au dimensionnement sont présentes, dès que l'on s'éloigne

des conditions du livre, il faut repasser par des pages de calculs pour redimensionner l'éolienne, avec potentiellement des erreurs pouvant au final provoquer la destruction de la génératrice.

Par exemple la génératrice est dimensionnée à partir d'un certain type d'aimant avec un champ magnétique spécifique. Si ce champ est différent, toute la génératrice doit changer (nombre de tours dans les bobines du stator etc...). C'est ce qui arrivé à l'association ACE à Casablanca au Maroc. Autrement dit, si on a la volonté de dimensionner parfaitement une éolienne et sa génératrice par rapport à une zone donnée (vitesse de vent connue avec précision), ou encore de construire des éoliennes plus puissantes que celles dans le livre (supérieur à 2kW), il faut aussi adapter la génératrice.

Un **modèle paramétré de l'éolien Piggott** doit donc être construit. L'objectif de ce stage va donc être de construire un modèle paramétré en CAO (Conception Assistée par Ordinateur). Pour cela on partira du travail de Fabien Pris, qui pour son stage ingénieur de 2^{ième} année en 2017 a créé un modèle CAO d'une éolienne, et des outils développés par le laboratoire RurERG (MagnAFPM et le Furling Tool) qui s'occupent du dimensionnement électrique et du safran.

Dans une optique open source, le modèle paramétré sera fait avec le logiciel de CAO libre de droit : FreeCAD. Tout le monde pourra donc avoir accès au modèle gratuitement.

II Travail préliminaire à la paramétrisation

Description de l'éolienne

Une éolienne est composée de 3 grandes parties : le mât, la nacelle avec la génératrice et les pales. Le mât étant relativement indépendant, il ne sera pas paramétré. Les pales de l'éolienne, dépendant de la puissance de la génératrice et de la quantité d'énergie du vent que l'on souhaite capter ne sont pas non plus incluses dans le modèle paramétré. On peut justifier cela par leur méthode de fabrication différente. Construites à la main, un modèle CAO n'est pas nécessaire. Des scans 3D existent pour les modèles existant du livre mais ils ne sont pas encore paramétrables et ce n'est pas l'objet de ce présent travail.

On peut toutefois noter que l'on peut connaître la longueur de pale nécessaire à puissance et vent

donnés par la formule :

$$P_{max} = \frac{16}{27} \cdot P_{cinétique} = \frac{8}{27} \cdot \rho S \cdot v^3$$

Ainsi le modèle paramétré inclus :

-**la génératrice**, composée de 2 rotors avec des aimants permanents collés sur des disques en acier et d'un stator composé de bobines fixées dans de la résine.

-**la nacelle**, composée de différentes pièces métalliques permettant de soutenir la génératrice et d'un moyeu permettant la rotation des rotors.

-**le safran**, permettant d'orienter l'éolienne face au vent et faisant office de protection mécanique (mise en drapeau) en cas de vents violents.

Ci-dessous on peut observer une vue éclatée à but éducatif de l'éolienne Piggott développée par Fabien Pris.

On peut observer les différentes parties (de gauche à droite) : premièrement les pales, ensuite le **premier rotor** (disque en métal, puis disque de résine-en blanc- puis les 12 aimants), le **stator** (avec les 9 bobines et la résine), le **2nd rotor**, puis le **moyeu** (avec la fusée) accroché à la **structure métallique**. Au dessus on peut voir le **safran**.

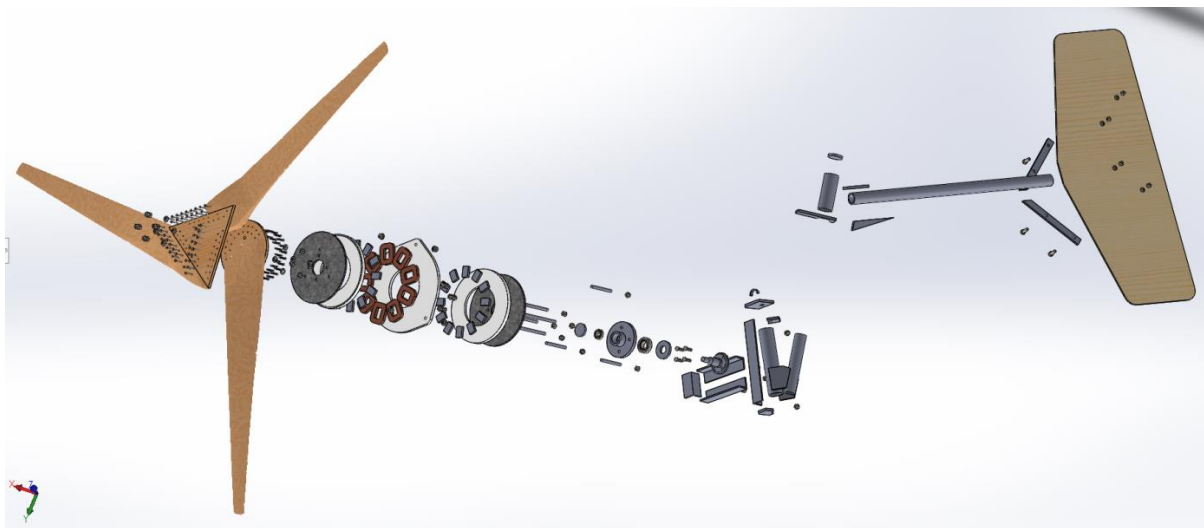


Figure 1 : Vue éclatée d'une éolienne Piggott 2m40 sous Solidworks

On peut noter que le stator est accroché aux extrémités de la nacelle (3 points d'accroche ici) et que les rotors sont accrochés à la nacelle par l'intermédiaire du moyeu, qui permet la rotation (roulement à baguettes). Le moyeu est lui-même fixé au milieu de la nacelle.

Types d'éoliennes

a) Depuis le livre « a wind turbine recipe book »

Selon la taille de la génératrice, la forme générale de celle-ci et de la structure métallique vont être modifiées. On peut définir 2 grands types : la « **T shape** » et la « **H shape** », noms qui viennent de la forme de la structure métallique comme on peut le voir ci-dessous :

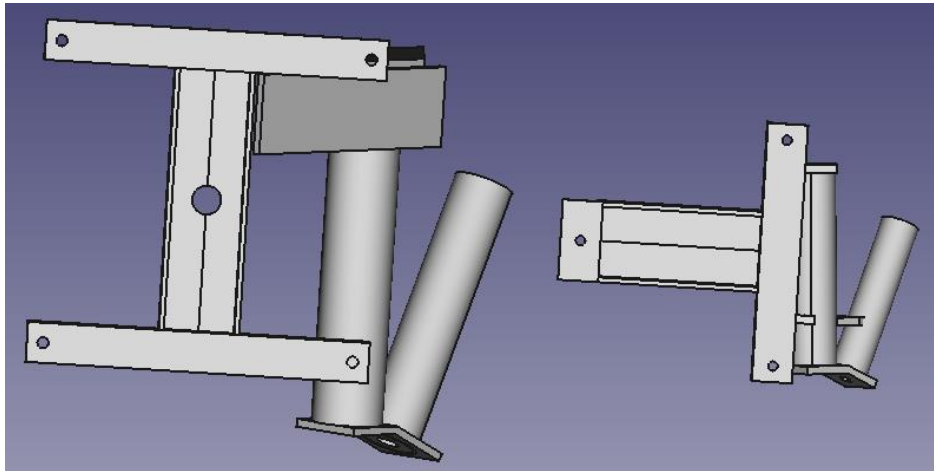


Figure 2 : H Shape à gauche, T Shape à droite

La « T Shape » a 3 points d'ancrage pour le stator alors que la « H Shape » en a 4. Ainsi la forme « T Shape » est pour les plus petites éoliennes alors que la « H Shape » est pour les plus grandes. Dans son livre, Hugh Piggott détaille la fabrication de 5 éoliennes : 2 « H Shape » (diamètre parcouru par les pales 3m60 et 4m20) et 3 « T Shape » (1m80, 2m40 et 3m60).

b) Autres éoliennes

Les membres du réseau Windempowerment ont travaillé sur des modèles d'éoliennes plus grandes et plus puissantes. Des prototypes allant jusqu'à des puissances de 5kW et des diamètres de pales de plus de 6m ont vu le jour en Europe, aux Etats-Unis et en Argentine. Le laboratoire RurERG a construit une génératrice de 5kW. Ces éoliennes, beaucoup plus massives vont donner un 3^{ième} groupe que l'on va appeler « **Star Shape** ». Elles ont 6 points d'attache pour le stator, pour pouvoir supporter leur poids.

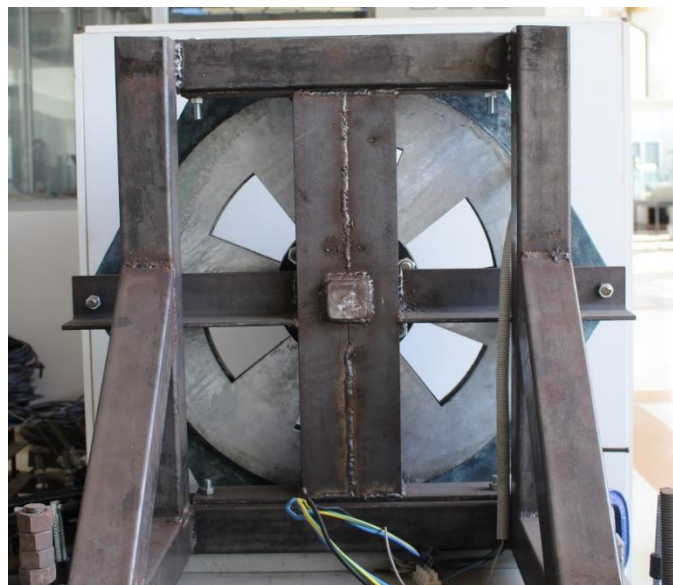


Figure 3 : Génératrice « Star Shape » de 5kW de RurERG

c) Conclusion

Nous avons donc 3 grandes types d'éoliennes à modéliser, chaque type devant être proprement paramétré :

- Diamètre de pales inférieur à 3m30 : T Shape
- Diamètre des pales [3m30 – 4m80] : H Shape
- Diamètre des pales supérieur à 4m80 : Star Shape

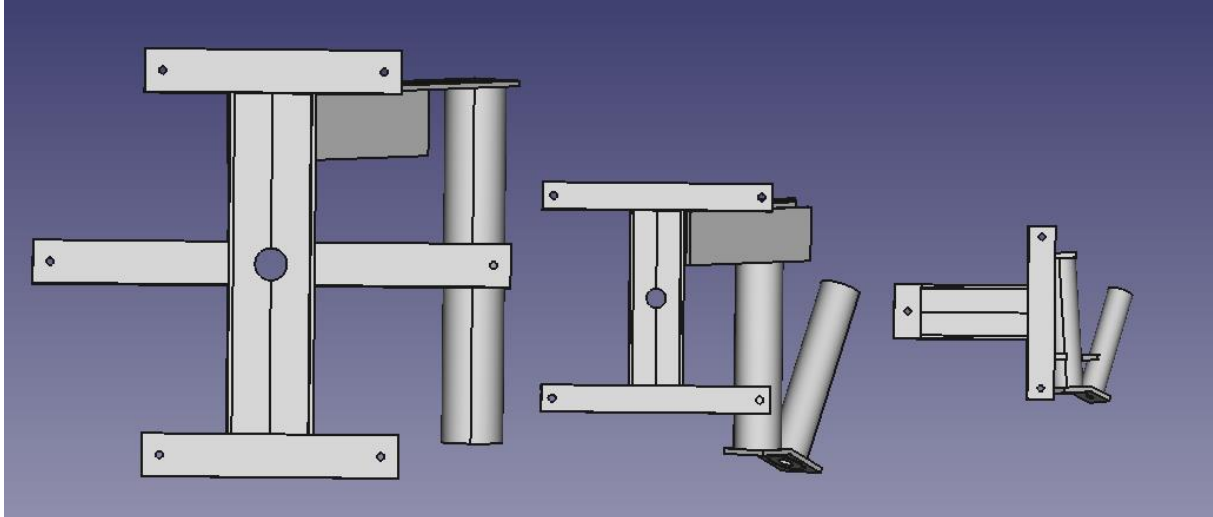


Figure 4 : Modèle Freecad de 3 types de nacelles donnant leur nom aux 3 types d'éoliennes

Les outils développés par RurERG : MagnAFPM et FurlingTool

MagnAFPM est un outil qui permet à l'utilisateur, en fonction de différents paramètres d'entrée, de paramétrer la génératrice. A partir des aimants qu'il possède, de la vitesse de vent dans sa zone, de la taille de ses pales et de la tension voulue, MagnAFPM va dimensionner électriquement toute la génératrice : placement des aimants, nombre de tours dans les bobines et donc leur taille. MagnAFPM calcule aussi le diamètre nécessaire du disque des rotors (et donc de la distance des aimants par rapport au centre). En effet, si les aimants sont trop proches, les champs magnétiques peuvent se recouvrir et s'annuler, faisant baisser le rendement de l'éolienne (pour avoir du courant alternatif les aimants, 2 aimants à la suite sont de pole opposé).

Furling Tool est un outil qui dimensionne le safran en fonction des mêmes paramètres d'entrée que MagnAFPM. Le safran n'a pas pour unique but de diriger l'éolienne face au vent, il permet de la protéger contre des vents violents. Le centre de la génératrice est décentré par rapport au mât, ainsi un couple (proportionnel à la vitesse du vent) va apparaître lorsque l'éolienne tourne, ce qui va avoir tendance à faire sortir l'éolienne du vent.

Le safran, doté d'un certain poids, espacé d'un certain bras de levier du centre, va exercer un couple qui va permettre à l'éolienne de rester face au vent. Cependant pour des valeurs de vent trop élevées, le couple exercé par la génératrice va être plus important que celui du safran, et celui-ci, en liaison pivot avec la nacelle va pivoter et donc sortir la génératrice du vent. On appelle cela « la mise en drapeau » de l'éolienne.

Au final ces outils vont nous donner des valeurs en sortie, valeurs qui seront des entrées de notre modèle paramétré.

Inputs du modèle paramétré

Au total 30 inputs seront nécessaires au modèle paramétré : 10 venant de MagnAFPM, 11 du Furling Tool et 9 paramètres utilisateurs. Ils permettent de décrire entièrement l'éolienne.

Inputs from MagnAFPM		Inputs from FurlingTool		User	
Rotor Radius	150	Angle	20	Hub Holes Placement	50
Disk Thickness	10	BracketLength	300	Rotor Inner Circle	32,5
Magnet Length	46	BracketWidth	30	Holes	7
Magnet Width	30	BracketThickness	5	MetalLengthL	50
Magnet Thickness	10	BoomLength	1000	MetalThicknessL	6
Number Magnets	12	BoomPipeRadius	24,15	FlatMetalThickness	10
StatorThickness	13	BoomPipeThickness	5	YawPipeRadius	30,15
CoilInnerWidth1	30	VaneThickness	6	PipesThickness	5
CoilInnerWidth2	30	VaneLength	1200	ResineRotorMargin	5
CoilLegWidth	22,5	VaneWidth	500		
		Offset	125		

Figure 5 : Inputs du modèle Freecad

L'un des inputs les plus importants est le « **Rotor Radius** », qui est celui qui définit la taille du disque en acier du rotor et donc la taille de la génératrice. Dans la suite du modèle, le choix du type d'éolienne va être défini par ce paramètre et non plus par le diamètre des pales.

En effet, pour un même diamètre de pale, si on utilise non pas des aimants néodymes (choix par défaut) mais des ferrites moins puissantes, le diamètre du « Rotor Radius » va devoir être plus grand et la génératrice sera donc plus grande. Ainsi c'est ce paramètre qui va être le plus déterminant dans le choix du type d'éolien.

La catégorie « **User** » correspond aux caractéristiques des pièces métalliques comme les différents tubes, équerres et barres en acier utilisés. Tous ces inputs ont des valeurs par défaut qui dépendent du type de l'éolien (par exemple la largeur d'une équerre de métal vaut 50mm pour H Shape et 80mm pour Star Shape, ce qui permet de mieux supporter les contraintes mécaniques dues à une génératrice de grande taille). Ce sont des valeurs standards de pièces métalliques, trouvables partout. Cependant l'utilisateur a la possibilité au cours du processus de dimensionnement de changer ces valeurs par celles du matériel dont il y a disposition.

Points importants à respecter

Dans la paramétrisation, si certains choix seront arbitraires ou sans importance sur le rendu final, d'autres peuvent avoir des impacts beaucoup plus importants.

Pour avoir un rendement optimal au niveau de la génératrice, il faut que les aimants passent exactement au milieu des bobines. La forme du stator doit pouvoir inclure toutes les bobines (celles-ci sont fixées dans de la résine).

La génératrice est reliée en 2 endroits à la nacelle par des tiges métalliques : les rotors au centre par l'intermédiaire du moyeu et le stator aux extrémités. Ainsi la position des trous entre la structure en métal et la génératrice doivent concorder, de même que la position des centres. Un non-respect de ces impératifs peut rendre l'éolienne non assemblable, ou causer des vibrations supplémentaires par excentricité.

La nacelle doit pouvoir supporter le poids, les chargements, couples, et variations brutales de mouvement de l'éolienne en cas de vents turbulents.

Enfin le positionnement de la génératrice et du safran par rapport au mât (c'est-à-dire leur bras de levier) sont définis pour protéger efficacement l'éolienne.

III Le modèle Freecad

Freecad est un logiciel de CAO open source et donc accessible à tout le monde. Si pour la conception de pièces plus ou moins complexes le logiciel est très fonctionnel, il ne prend pas en compte les variables globales, et l'atelier d'assemblage ne gère pas des contraintes compliquées. Malgré quelques bogues, le projet est arrivé à son terme, et des tutoriaux ont été écrits pour comprendre le fonctionnement, ou déboguer si nécessaire.

Paramétrisation à base de fiches de calculs

L'éolienne comporte un nombre importants de pièces qui sont réparties par **catégories**. On peut compter :

- La partie **rotor** qui comporte le disque en métal, les aimants, la résine et les moules
- La partie **stator** qui comporte les bobines, la résine et les moules
- La partie **nacelle** qui comporte différentes pièces métalliques qui vont soutenir la génératrice (3 à 6), 1 tube relié au mat, un tube relié au safran et 2 pièces qui définissent le bras de levier entre la génératrice et le mât

- La partie **safran** comportant la plaque de bois, 1 tube faisant office de bras de levier, un autre permettant le raccord à la nacelle, différentes pièces pour maintenir le tout et 2 stops permettant de limiter la rotation du safran sur son axe
- La partie **bobineur** (outil permettant de faire les bobines aux bonnes dimensions)

Chaque pièce possède sa propre **fiche de calcul « spreadsheet »** et l'intégralité des dimensions CAO (longueur, angle, nombre d'éléments etc...) sont référencées dans la fiche de calcul.

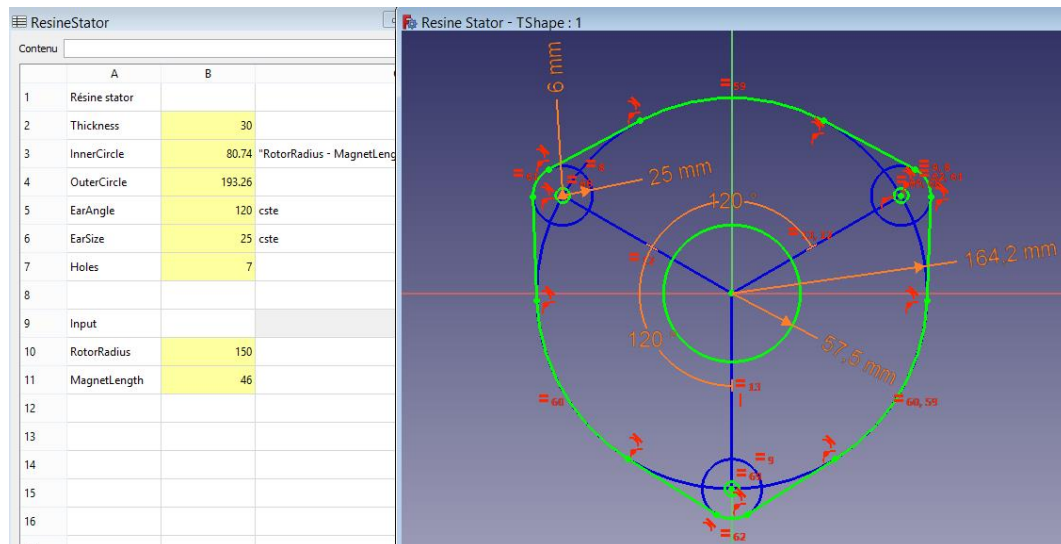


Figure 6 : Fiche de calcul liée au dessin ; résine stator – T shape

Par catégorie (Rotor, Stator etc..) on peut trouver une fiche de calcul nommée « Master *nomdelacatégorie* » qui contrôle les fiches de calculs de chaque pièce. Enfin, une fiche de calcul générale, nommée « Master of All », contrôle toutes les fiches Master un peu comme l'anneau unique qui gouverne tous les autres.

Cette utilisation de fiches de calculs successives permet de passer outre le fait que Freecad n'accepte pas de variables globales. Ou plutôt c'est une méthode pour simuler des variables globales.

Ci-dessous une arborescence permet de s'en représenter le fonctionnement. Les fichiers master sont en rouges, les cases bleues correspondent aux pièces faisant partie de l'éolienne installée et les cases blanches sont les pièces permettant la construction de certaines parties de l'éolienne.

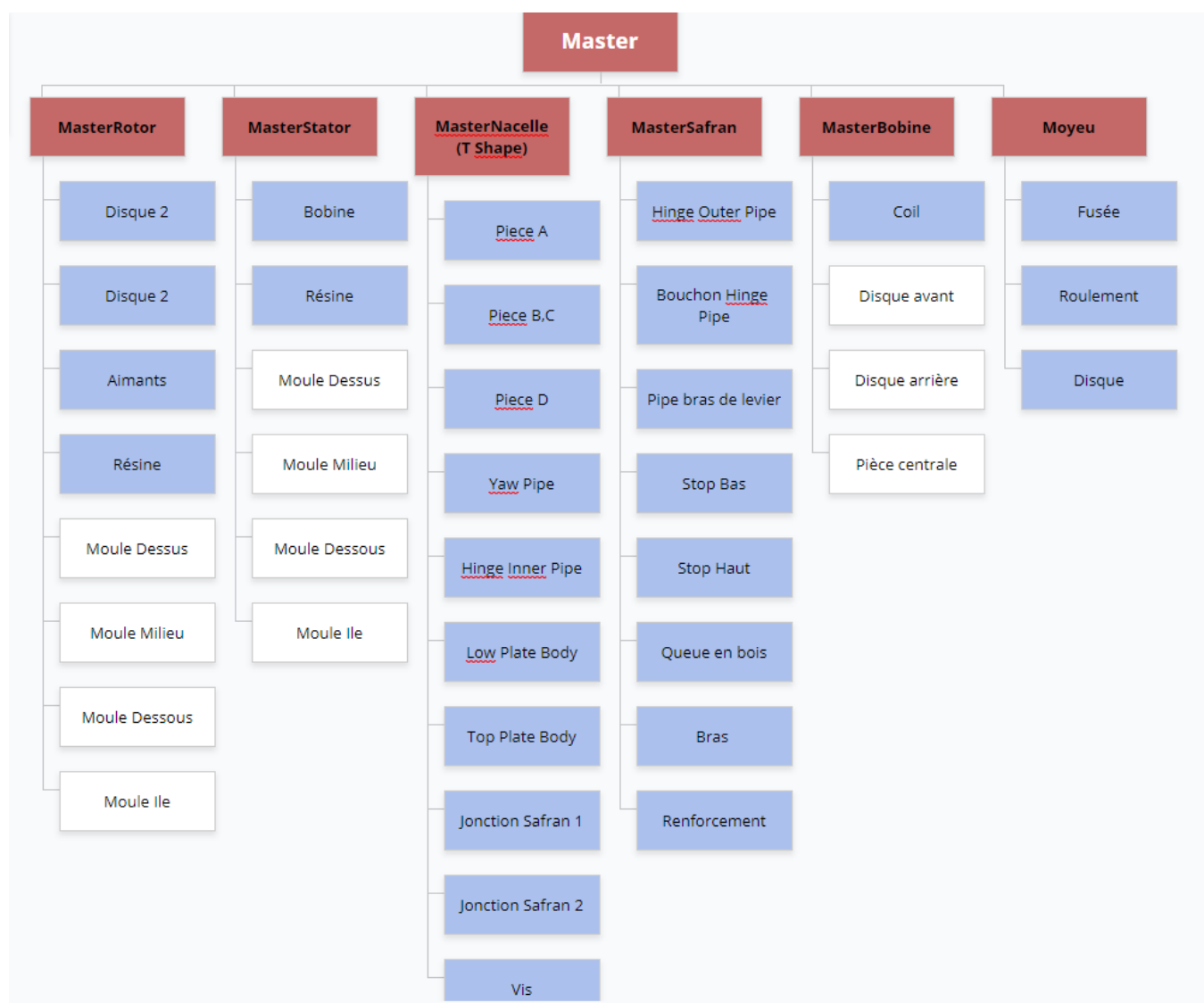


Figure 7 : Arborescence du contrôle des différentes pièces par les fiches de calculs

Type 1 : T Shape

Pour cette première forme, le point de départ a été le travail de Fabien Pris. Ainsi comme vu à la figure1, il a dû dessiner et créer toutes les pièces pour éolienne de 2m40 de diamètre. Chaque dimension de chaque pièce de son travail a ensuite été reliée par des fonctions aux paramètres d'entrée. De cette manière quelles que soient les tailles d'éoliennes, le modèle va suivre les changements de manière logique et les points importants soulevés dans la partie précédente vont être respectés.

Il serait trop long et inutile de détailler chaque dimension paramétrée dans le modèle mais prenons quelques exemples importants.

a) Paramétrisation du stator et aimants face aux bobines

Pour maintenir les bobines entre elles, on va les couler dans de la résine. Pour cela on utilise des moules qui vont donner leur forme au stator. Les 2 pièces les plus importantes du moule sont l'ilot en bois et la partie du milieu du moule car ce sont elles qui vont donner la forme du stator.

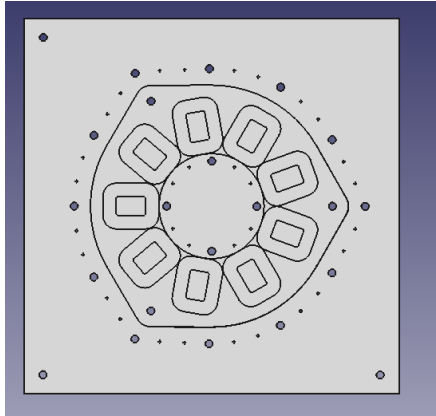


Figure 8 : moule stator

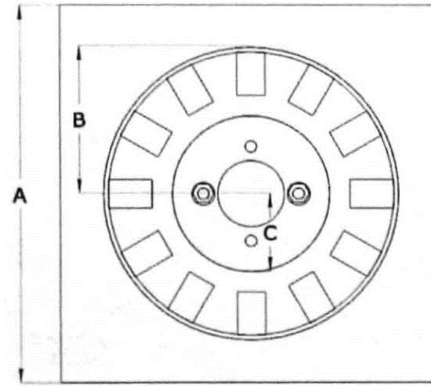


Figure 9 Rotor avec aimants

Ilot au centre
Résine du stator avec les 9 bobines
Moule autour du stator

Aimants situés à l'extrémité du disque du rotor

Les bobines 'touchent' l'ilot central du stator ainsi le rayon de l'ilot va être égale à :
 $\text{Rayon Rotor} - (\text{Longueur Aimant} + \text{Epaisseur bobines})$

Si on fait l'assemblage de la génératrice, on observe bien que les aimants passent au milieu de bobines. (L'aimant est en vert sur les images)

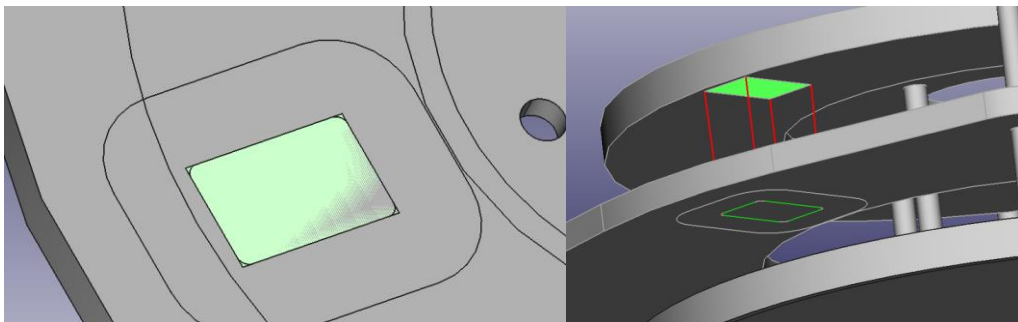
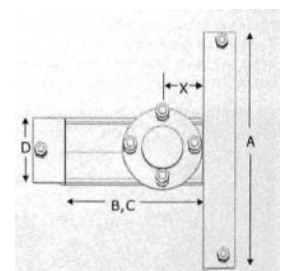


Figure 10 : Assemblage aimants en face des bobines

b) Structure métallique et position de trous dans la génératrice

Pour pouvoir bien assembler la génératrice avec la nacelle, il faut que celle-ci soit suffisamment grande et les trous de fixation bien placés. La forme T shape possède 4 différents morceaux de métal (A, B C et D) comme cela :

Le paramètre d'entrée va être *StatorHolesRadius* qui correspond au cercle sur lequel sont placés les trous du stator. Ensuite la position du centre du cercle est



importante (distance X), elle fait partie du bras de levier entre la génératrice et le mât comme vu précédemment. A partir de là, de la simple géométrie avec des triangles rectangles nous donne les distances A, B et D et la position des trous.

c) Utilisation de fonctions issues de la littérature

Dans certains cas, des valeurs ou paramètres ne peuvent pas être définis à partir des combinaisons d'input ou de géométrie. Dans ces cas précis, on va utiliser le livre « the windturbine recipe book ». Une fonction (linéaire ou quadratique) va être déduite des valeurs du livre en fonction de l'input *RotorRadius*.

Exemple dans la nacelle : les 2 pièces faisant la jonction entre la partie métallique soutenant la génératrice et le tuyau accroché au mât.

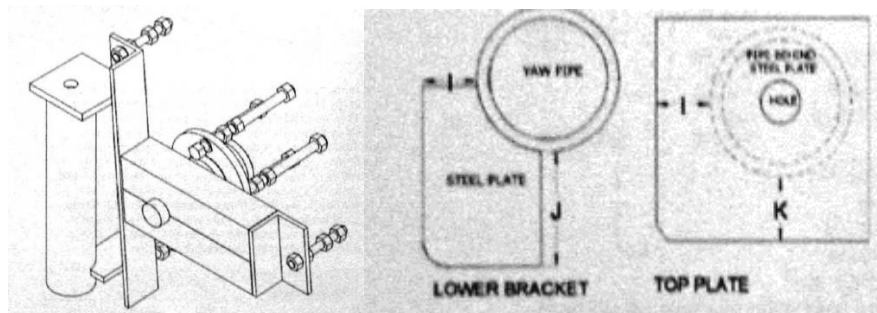


Figure 11 : I, J et K

Ces 2 pièces ont un rôle dans le bras de levier du mât (distance I) mais garantissent aussi un angle de 4° entre la génératrice et le tuyau. De cette manière on peut exprimer K en fonction de J et de l'angle.

Finalement I et J sont définis comme des fonctions de *RotorRadius* en se basant sur les résultats du livre.

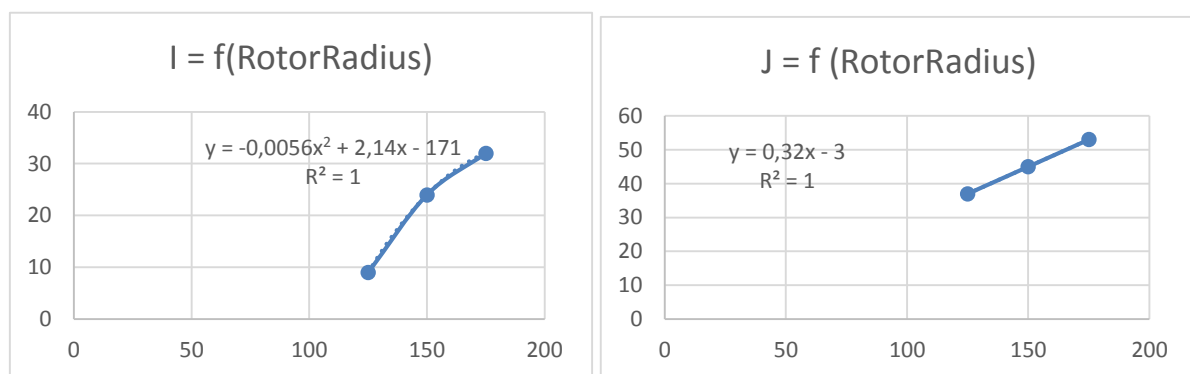


Figure 12 : I et J = f(RotorRadius)

d) Assemblages et résultats

Après que chaque pièce ait été paramétrée individuellement, un assemblage a été créé pour vérifier le bon agencement dans l'espace. Comme vu précédemment, le bon positionnement des trous, aimants et bobines a été vérifié. De plus des assemblages avec les données des 3 éoliennes du livre ont été effectués. Cela permet de comparer avec des prototypes réels.

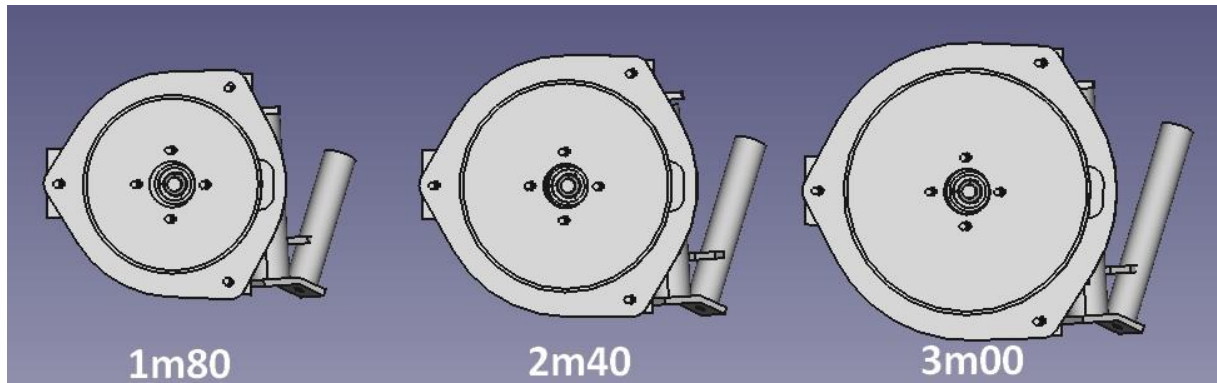


Figure 13 : Assemblages T Shape

Les quantités, distances et positionnement sont bien respectés pour les 3 modèles. Le modèle paramétré colle à la réalité et fonctionne bien pour toute cette gamme d'éolienne.

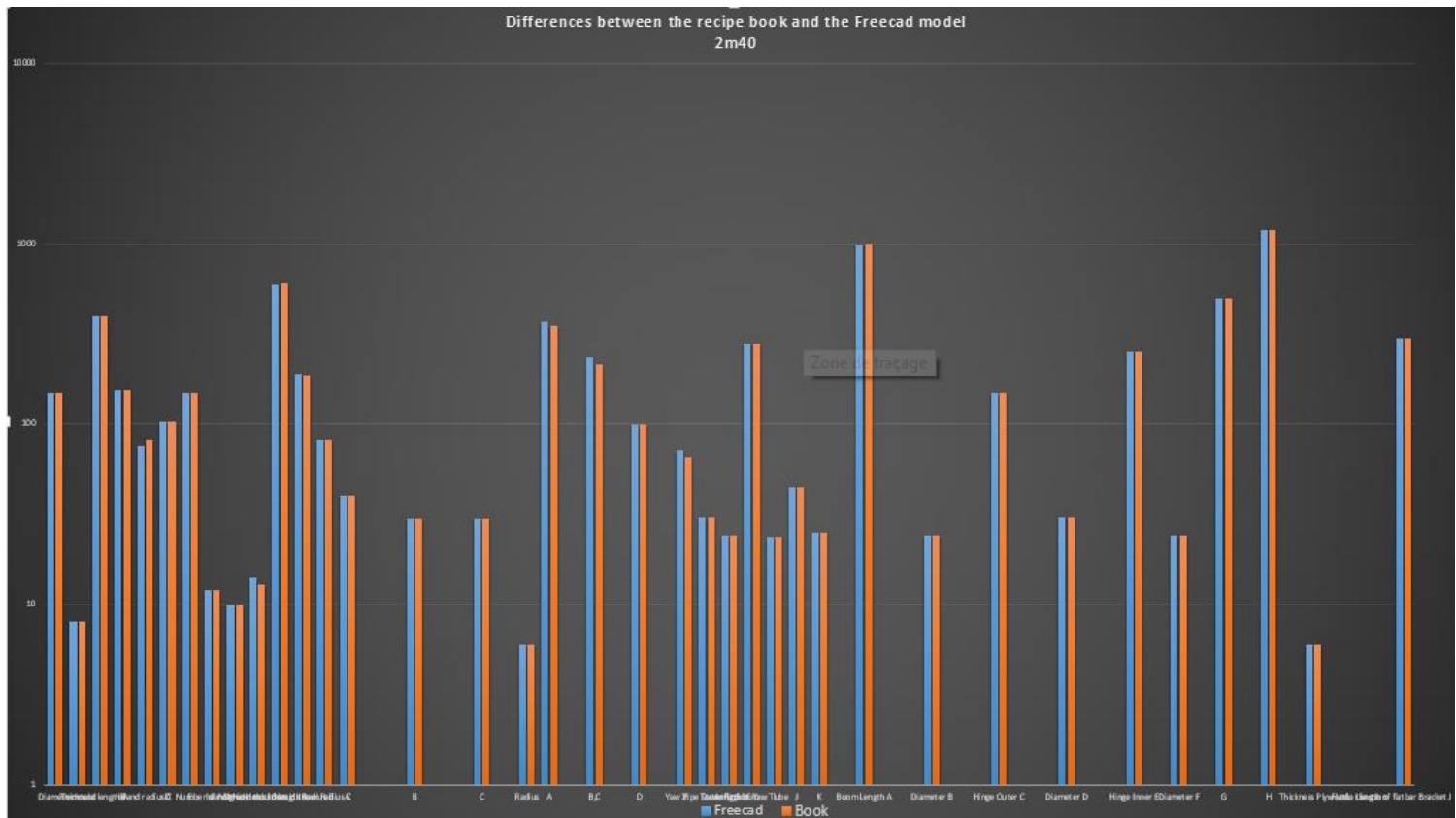


Figure 14 : Différences entre le modèle Freecad et le livre pour une éolienne de 2m40

Le modèle paramétré défini est très proche du modèle réel. Les faibles différences viennent de la manière dont le modèle a été paramétré.

Type 2 : H Shape

H Shape correspond à des éoliennes de taille et puissance plus importante. Par rapport au T Shape, le stator et la nacelle sont modifiés. En effet le stator, plus imposant a besoin de 4 points d'ancrage, la forme de la nacelle suit. Le moyeu est plus grand et les rotors ont 5 points de fixations au lieu de 4. Dans ce cas, les pièces ont d'abord été créées avant d'être paramétrées.

a) Nouvelles Pièces

On peut observer ci-dessous les différences majeures avec la T Shape. Sur la figure 15 on peut observer la nouvelle forme de stator dans son moule, qui permet de maintenant contenir 12 bobines contre 9 précédemment. La taille du moule est définie de façon à ce que les bobines rentrent toujours dedans. A droite, on peut voir la forme en H, qui délimite une surface en forme de carré. Le trou au milieu permet de laisser passer une partie du moyeu (qui sera soudé dessus).

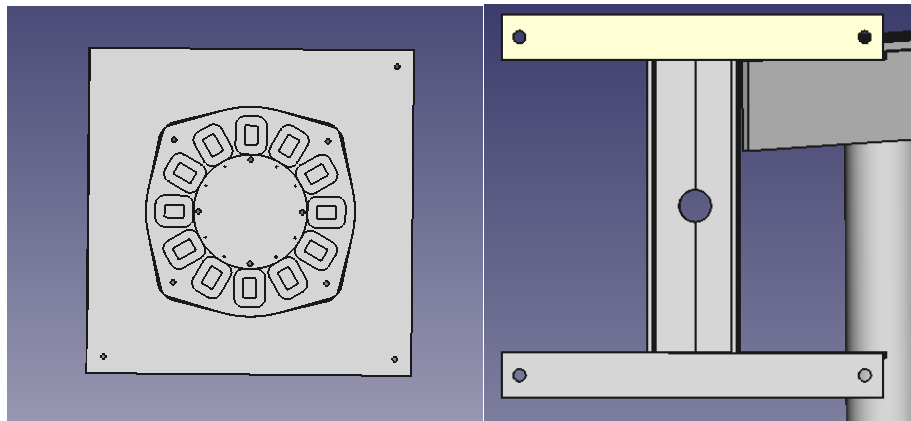


Figure 15 : Stator à gauche, nacelle à droite – H Shape

Ci-dessous on peut observer que la liaison entre la partie en H et le tube qui va se fixer sur le mât est différente de la T Shape. En effet, l'éolienne devenant plus grande, ses pales également, on va donc chercher à les éloigner du mât pour ne pas qu'elles le touchent en cas de vent violent. Il y a donc un bras de levier plus important (qui devra être compensé par le safran), d'où les 2 nouvelles pièces permettant la jonction.

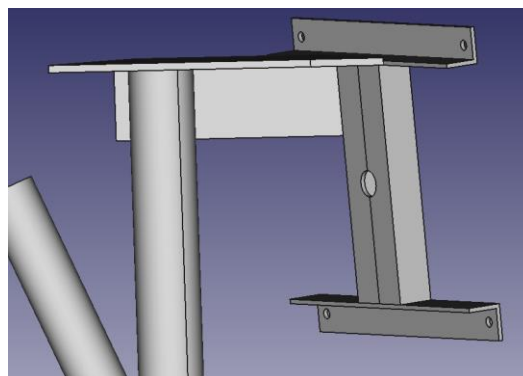


Figure 17 : H Shape / Yaw Pipe

b) Paramétrisation

La paramétrisation est sensiblement similaire à celle vue précédemment. Toutes les mêmes considérations ont été prises pour la génératrice. La forme du « H » est définie par trigonométrie.

c) Assemblage et résultats

Pour observer le bon fonctionnement, on a aussi réalisé un assemblage avec les valeurs correspondant aux 2 exemples du livre « the windturbine recipe book ». Tout concorde et l'éolienne est fonctionnelle dans toute cette gamme de fonctionnement.

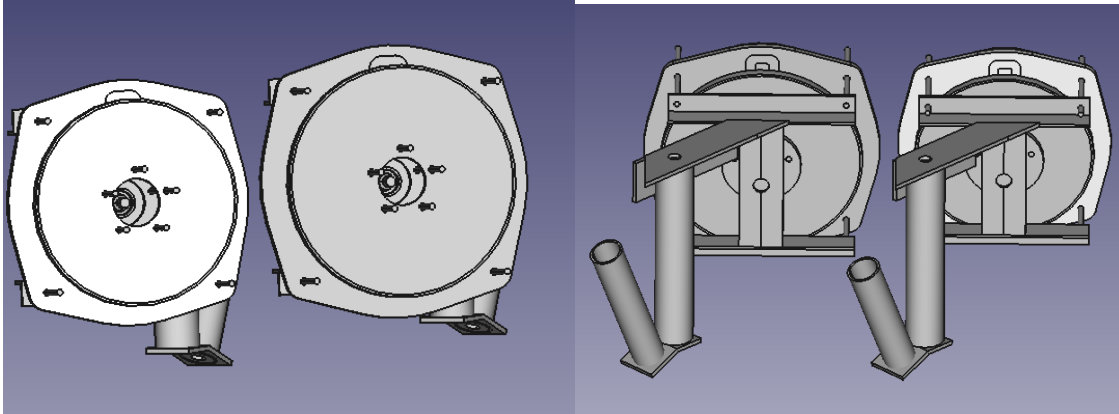


Figure 18 : H Shape - 3m60 à gauche, 4m20 à droite

Type 3 : Star Shape

La **Star Shape** correspond aux éoliennes Piggott de plus grandes tailles. Elles ne font pas partie du livre « The windturbine recipe book » mais plusieurs ont été construites partout sur la planète par divers acteurs du réseau Windempowerment. Ainsi chacune est unique et peut avoir une conception différente (la plus grande à ce jour fait 7m de diamètre). Ce modèle se base sur un nombre d'éoliennes réelles (et donc de test) beaucoup moins conséquent que les 2 autres, même si une bonne partie des retours ont été pris en compte. Le modèle de base pour la paramétrisation est celui développé par le laboratoire RurERG, de 5kW avec des pales de 6m (encore non construites).



Figure 19 : RurERG big windturbine sur son banc de test

a) Nouveautés

Le **stator** a une nouvelle forme et un nouveau moule. Il a 6 points de fixations sur la nacelle qui a donc une forme en « étoile ». Pour pouvoir supporter les contraintes mécaniques imposées par une génératrice beaucoup plus lourde et imposante, la taille des pièces métalliques composant la nacelle a augmenté (8mm d'épaisseur au lieu de 6mm et 80mm de largeur au lieu de 50mm). Ce sont des paramètres recommandés et mis par défaut mais l'utilisateur est libre de les changer en fonction du matériel qu'il possède (comme vu dans la partie « inputs »). Les **rotors** sont reliés à un moyeu beaucoup plus imposant et à 6 points de fixations. Pour limiter le poids des disques des rotors, des ouvertures y ont été percées.

b) Paramétrisation

La paramétrisation s'est faite d'une manière sensiblement similaire aux précédentes. Le « **RotorRadius** » va définir le placement des bobines et donc la taille et forme du stator. L'emplacement des trous du stator est ainsi défini. Avec l'emplacement des trous, combinés à de la trigonométrie simple, la longueur et l'agencement des pièces de métal composants « l'étoile » sont déterminés. Enfin la taille des ouvertures dans les rotors est définie comme la moitié de la surface parcourue mais cette valeur peut être facilement réduite dans les paramètres. On obtient au final :

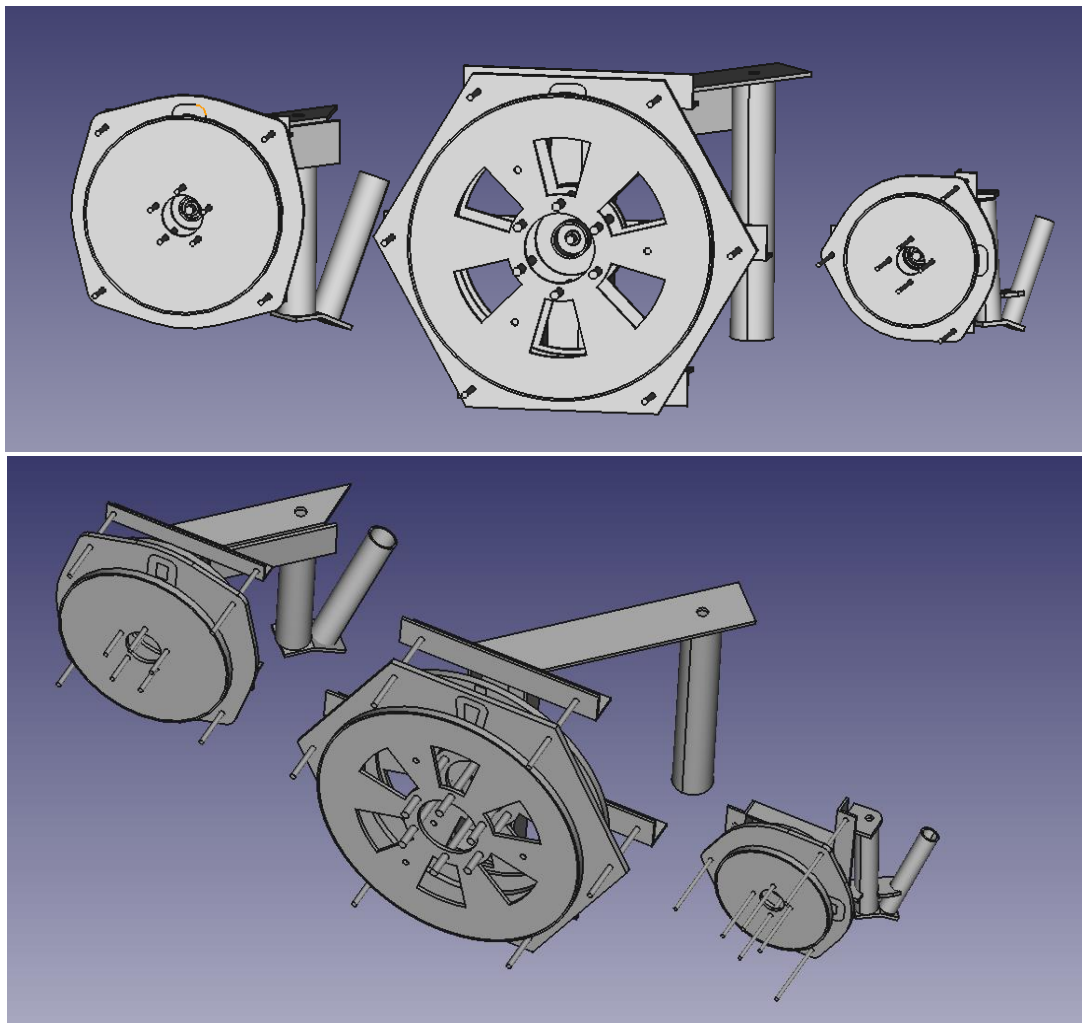


Figure 20 : Assemblage Freecad des 3 types d'éoliennes

Bobineurs et types de bobines

Initialement l'utilisateur a le choix d'utiliser **3 types de formes de bobines** différentes : forme **rectangulaire**, forme **clé** (ou trapèze) et forme **triangulaire**. Dans certains cas, pour de plus hautes puissances, les bobines peuvent prendre trop de place et ne pas rentrer dans le stator tout en restant en face des aimants. Dans ce cas on peut augmenter l'épaisseur des bobines mais il y a une limite (si elle augmente trop, les aimants des disques opposés risquent d'être trop éloignés les uns des autres et on va avoir une baisse de rendement). L'autre option est de changer la forme.

Le bobineur possède la forme ci-dessous et est composé de 2 disques de bois, d'une pièce au milieu les séparant, de 4 clous maintenant le tout et d'une tige de métal permettant la rotation. La pièce la plus importante est la pièce du milieu. C'est elle qui va définir la forme des bobines de même que leur épaisseur. Cette pièce est entièrement définie par les inputs et dépend du type de bobine et de la taille des aimants.

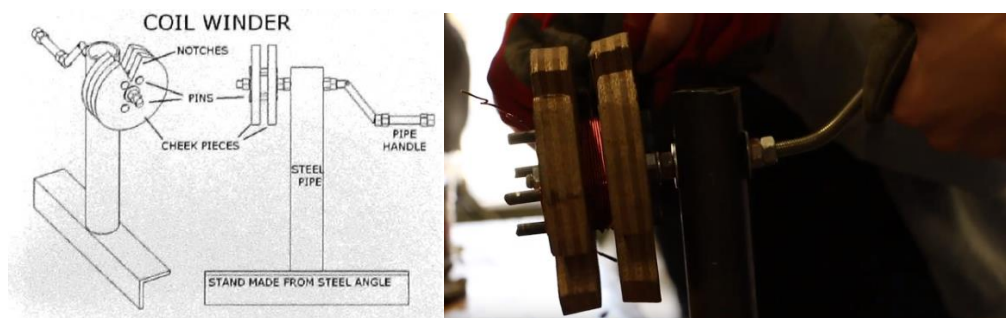


Figure 21 : Le bobineur

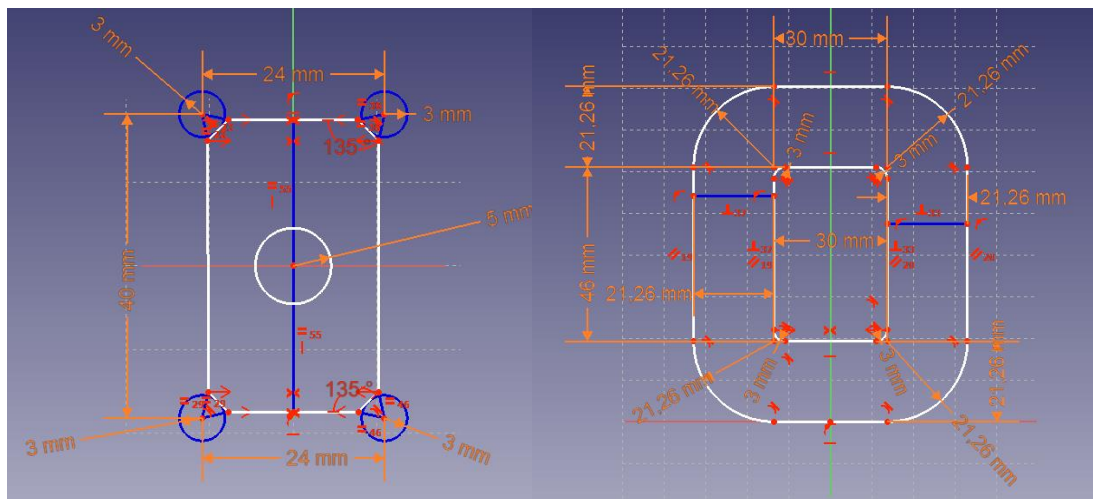


Figure 22 : Bobineur pièce milieu rectangulaire

A gauche le dessin de la pièce du milieu du bobineur. Les ronds bleus correspondent aux clous qui maintiennent le bobineur. On voit que le positionnement des clous va donner la forme de la bobine de droite et que la partie centrale va parfaitement correspondre à la taille des aimants.

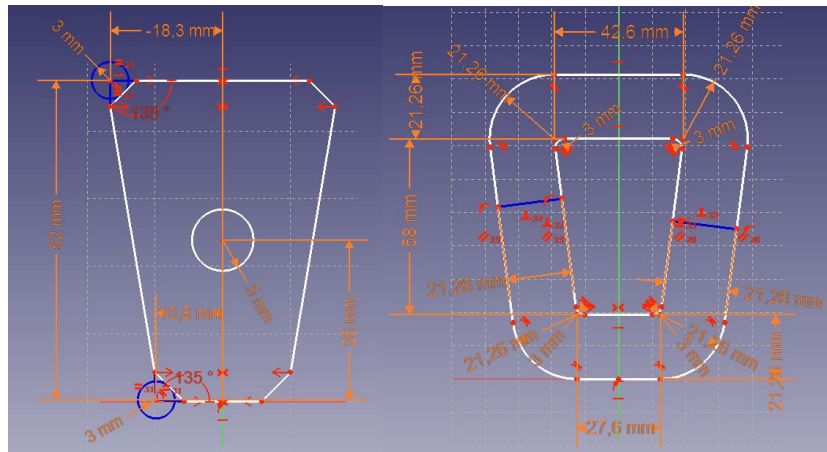


Figure 23 : Bobineur pièce milieu trapèze

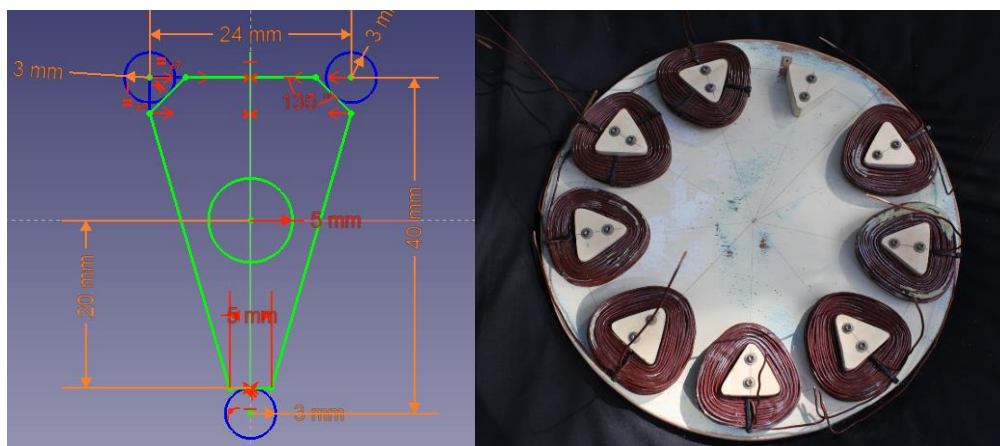


Figure 24 : Bobineur pièce milieu triangle

Le Safran

Pour la partie du safran, le modèle paramétré est le même pour les 3 types d'éoliennes. Comme vu au début il est défini par les inputs qui viennent de l'outil « **the Furling Tool** ». De manière générale il a cette forme-là :

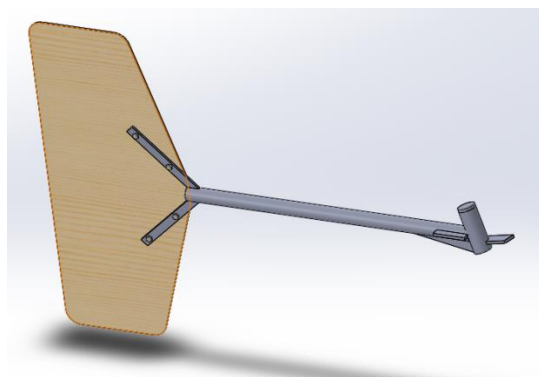


Figure 25 : Safran

Pour les éoliennes de plus grande taille (Star Shape), un deuxième tuyau est nécessaire pour soutenir la partie en bois. En effet dans ces cas, les longueurs peuvent atteindre plusieurs mètres.

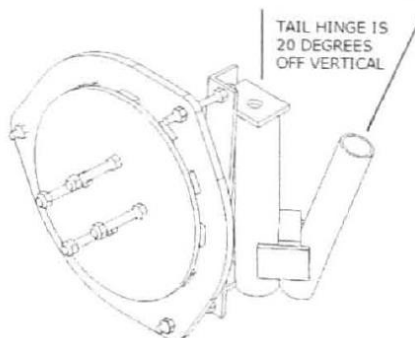


Figure 26 : Angle du safran par rapport à la verticale

Enfin cet **angle de 20°** doit être pris en compte dans la création et l'assemblage. C'est un input (il est donc variable) et il va influencer le frein mécanique qu'exerce le safran. De manière générale pour une génératrice avec aimants néodymes il va être de 20°. Avec des aimants ferrites, on se place plutôt vers 13°, ce qui a tendance à diminuer le couple du safran.

III Applications du modèle paramétré

Le modèle paramétré est composé de différents fichiers freecad et de spreadsheets, le tout regroupé dans un fichier zip. Un **tutorial** expliquant l'agencement du dossier pour l'utilisateur est présent. Un 2nd tutorial présentant la logique de la paramétrisation et la manière d'en faire une nouvelle est aussi disponible (disponible en *Annexe 1*), de même que un dernier tutorial sur la partie assemblage.

Notice de calcul

La construction classique de ce type d'éolienne requiert au minimum 3 personnes expérimentées pendant 2 jours ou une dizaine de personnes pendant 3 à 5 jours dans le cadre d'une formation. Dans tous les cas, les valeurs et côtes du livre « The windturbine recipe book » de Hugh Piggott sont utilisés tout au long de la construction comme « référence ». On peut retrouver les différentes côtes des disques, les tailles des moules, les longueurs des pièces de métal etc...

Pour les éoliennes paramétrées, à partir de tous les inputs, une feuille de calcul « **Spreadsheet Recipe** » donne toutes les valeurs nécessaires à la construction, suivant un schéma similaire au livre de Hugh Piggott. Ainsi, ce livre (qui donne les explications, la manière de construire)

couplé à la feuille de calcul « Spreadsheet Recipe » permet de construire n'importe quelle éolienne de n'importe quelle taille. Un exemple est disponible en *Annexe2*.

Découpage laser

Dans un schéma de construction classique de ce type d'éolienne tout est construit « à la main ». Dans une optique de précision et de gain de temps, on peut utiliser la **découpe laser** pour obtenir nos différentes pièces. En effet toutes les pièces en bois et en métal peuvent être prédécoupées au laser. Utiliser la découpe laser, malgré un prix plus élevé, permet de diviser par 2 le temps de construction de l'éolienne.

Après avoir effectué une nouvelle paramétrisation, il suffit d'exporter toutes les pièces au format DXF puis de les regrouper en seul fichier comme présenté ci-dessous :

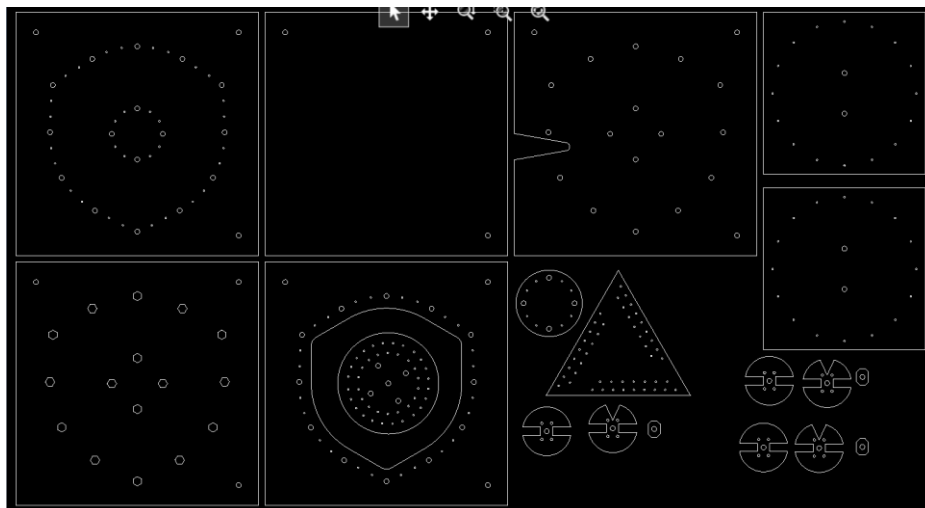


Figure 27 : Exemple fichier DXF pour découpe laser (Fabien Pris)

Implémentation avec les outils développés par RurERG

Le but initial du modèle paramétré est d'être utilisé dans la continuité des outils développés par RurERG que sont « MagnAFPM » et « The furling Tool ». Dans ce cadre, l'utilisateur entrera ses paramètres initiaux correspondant à l'éolienne voulue (Vitesse vent, puissance génératrice...). Les 2 outils seront lancés avec ces paramètres et vont donner en output un fichier .csv qui va pouvoir être lu par FreeCAD. Ce fichier csv correspond à l'input du modèle paramétré FreeCAD. A ce niveau, des demandes seront faites à l'utilisateur pour savoir s'il veut utiliser les valeurs standards pour les pièces métalliques ou mettre les siennes (comme vu dans la partie II – Inputs).

Modèle de fichier csv en Annexe3.

Le modèle FreeCAD avec ces valeurs est ensuite lancé et l'utilisateur obtient toutes les pièces aux bonnes dimensions.

Tout le schéma logique étant effectué, le lien entre le modèle FreeCAD et les 2 outils sera

concrètement codé sous Python en Septembre 2018 par un informaticien de la NTUA. L'outil sera ainsi complet.

Conclusion

Le modèle paramétré FreeCAD est fonctionnel et optimisé. Il s'inscrit dans un schéma plus grand et est inclus avec d'autres outils conçus par le laboratoire RurERG. Dans le monde du petit éolien Piggott il est maintenant possible de construire rapidement et simplement une éolienne de toute taille optimisée pour chaque site.

Cependant pour des raisons de tenue mécanique des matériaux, le modèle est limité à des éoliennes de taille inférieure à 10 m de diamètre (diamètre de la surface balayée par les pales). Pour des tailles supérieures, une conception différente doit être envisagée. De même, les pales ne sont pas prises en compte dans le modèle. Ce sont deux pistes d'évolution envisageable dans le futur.

Personnellement, cela m'a apporté une maîtrise dans des logiciels de CAO, plus particulièrement FreeCAD et dans une moindre mesure Solidworks. Cela m'a permis de compléter mes connaissances techniques dans l'éolien, car il est indispensable de comprendre comment l'éolienne fonctionne pour pouvoir la paramétrer. Enfin j'ai pu découvrir le travail en laboratoire, tout en développant mes capacités à travailler en autonomie et à me fixer des deadlines.

Références

"Construire Une Eolienne" Réseau Tripalium, Hugh Piggott, 2017

"A wind turbine recipe book" Hugh Piggott, 2009

"Dossier stage 2A Fabien Pris" Fabien Pris, 2017

"Furling wind turbine construction manual" Hugh Piggott, 2014

"MagnAFPM" & "The Furling Tool" RurERG, 2018

ANNEXE

Annexe 1 : Tutorial

Tutorial Parametrized design of a Piggott Windturbine in FreeCAD

All the pieces are classified by their place in the Windturbine (Rotor, Stator, Tail, Metal Parts)

Spreadsheets guide the shape of all the pieces.

Each Piece has his own Spreadsheet.

All pieces spreadsheets from a part of the windturbine (Stator, Rotor etc...) refers to a master Spreadsheet of this part.

Finally a spreadsheet, called « Master of Puppets » controls all the master spreadsheets of the parts.

The values of Mast of Puppets come from the outputs of MagnetAFPM.

-Extract the results from MagnetAFPM in a csv file

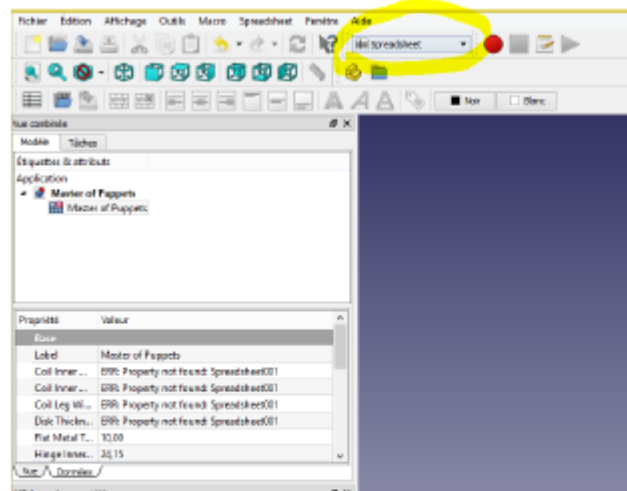
Example :

Inputs	Value
Holes	6
RotorRadius	150
DiskThickness	8
MagnetLength	46
MagnetWidth	30
MagnetThickness	10
NumberMagnet	12
HubHolesPlacement	50
RotorInnerCircle	32.5
StatorThickness	13
CoilLegWidth	21.26
CoilInnerWidth1	30
CoilInnerWidth2	30

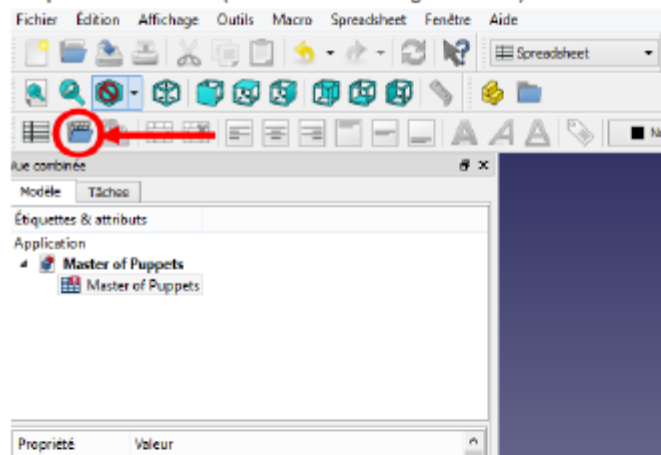
-Open FreeCAD

- Open Master_of_Puppet.FCSTD (File -> Open)

-Go into the Spreadsheet Workshop



-Import the csv file (the results of MagnetAFPM)



-Recompute (F5)

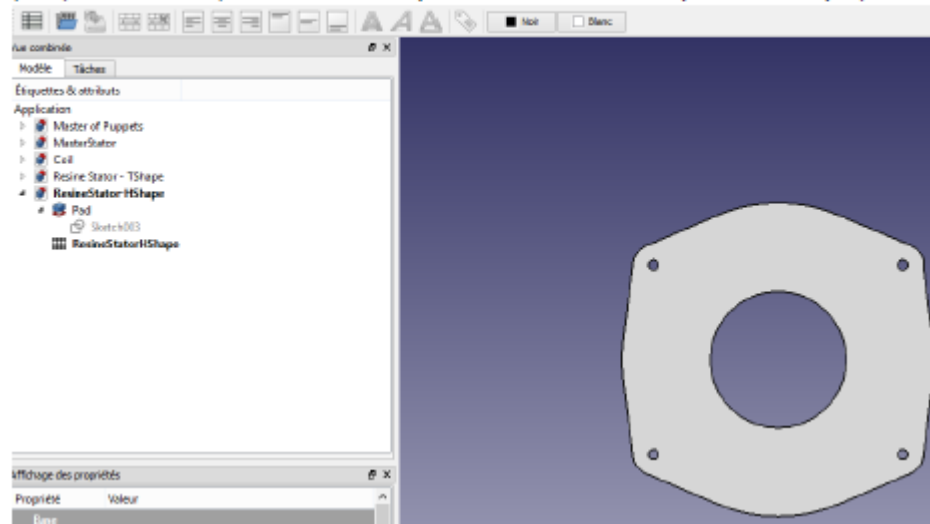
If there are still some errors, don't worry. Just go into « Master of Puppets » spreadsheet, write anything in an empty cell and push « enter ». That should actualize.

-Open the MasterFile of the part of the windturbine you want to see.

For example, for the stator, open the file « **MasterStator** »

-Then Open all the file you need for the stator

(Here, the files « Coil », « ResineStator T-Shape » and « ResineStatorHShape » has been open)



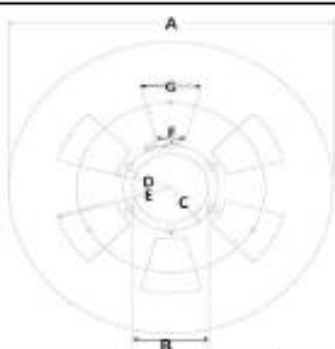
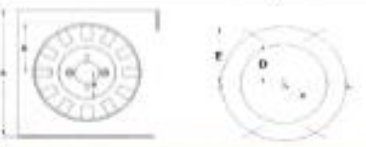

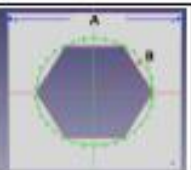
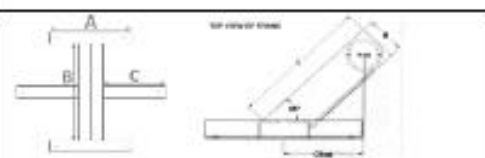
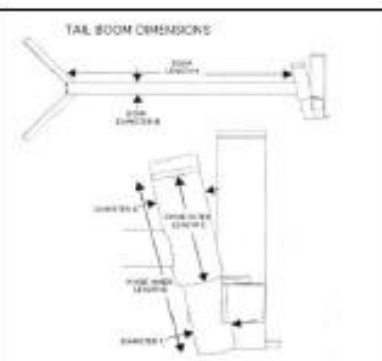
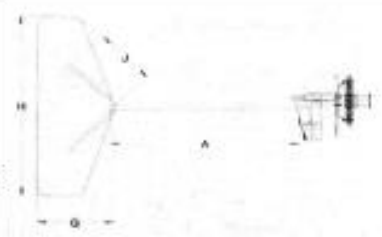
When opened, the file should be with the good new dimensions. But sometimes, it does not work, we then need to recompute ourselves :

-Click right on the file, and choose « Mark to recompute »

-F5 for recompute

NB : Noticed that for the Star Shape, there is only one masterfile « Master BigWindturbine » for all the categories.

Annexe 2 : Example Spreadsheet Recipe

Blade Diameter > 4m80			
Steel Disk Size	A	300	
	B	65	
	C	50	
	D	71	
	E	67	
	F	37,17551307	
	G	35,08111797	
	Thickness	10	
Rotor Mould	mould length A	399,9	
	B	155	
	Island radius C	79	
	D	104	
	E	150	
	Number of Magnets	12	
	Island thickness	10	
Coil Winder	A	40	
	B	30	
	C	30	
Stator Mould	Thickness mould	13	
	mould length A	577,5	
	Outside Radius B	192,5	
	Inner Radius C	81,5	
Stainless Steel Studs	Radius	7	
Frame Dimensions 65*65*8	A	213,4998855	
	B	208,9416619	
	C	131,5	
	M	100	
	L	242,2819405	
	Offset	125	
Yaw Bearing Pipe Size	Yaw Pipe Outer Radius	30,15	
	Length Yaw Pipe Tube	270	
	Tower Top Stub	24,15	
Steel Pipe Dimensions for Tail	Boom Length A	1000	
	Boom Support Length	1054,187108	
	Diameter B	48,3	
	Hinge Outer C	135	
	Diameter D	30,15	
	Hinge Inner E	240	
	Diameter F	24,15	
Tail Vane And Bracket	G	500	
	H	1200	
	Thickness Plywood	6	
	Bracket Width	30	
	Bracket Thickness	5	
	Length of flatbar Bracket J	300	

Annexe 3 : Fichier CSV – Input du modèle Freecad

```
Inputs Value
MagnAFPM
RotorDiskRadius 349
DiskThickness 10
MagnetLength 58
MagnetWidth 30
MagnetThickness 10
NumberMagnet 12
StatorThickness 13
CoilLegWidth 23.26
CoilInnerWidth1 30
CoilInnerWidth2 30
FurlingTool
Angle 20
BracketLength 300
BracketWidth 30
BracketThickness 5
BoomLength 1000
BoomPipeRadius 24.15
BoomPipeThickness 5
VaneThickness 6
VaneLength 1200
VaneWidth 500
Offset 400
User
HubHolesPlacement 81.5
RotorInnerCircle 102.5
Holes 7
MetallLengthL 80
MetalThicknessL 8
FlatMetalThickness 10
YawPipeRadius 58.15
PipeThickness 6
ResineRotorMargin 5
HubHoles 10
```