



Conception d'un mur à vent

MASTER EN SCIENCES DE L'INGÉNIEUR INDUSTRIEL

DETERVILLE GUILLAUME
LEONARD MAXIME
PIERRET CYRIL
SZABLOT MARTIN
THONNARD MARC

Responsable UE : LENAERTS
VINCENT
Intervenants : ERNST PIERRE
GIBAULT-NOWAK
ARNAUD-AYMERCI
RAUSIN BERNARD

Table des matières

1	Introduction	5
2	Cahier de charge et adaptation	6
2.1	Cahier de charge	6
2.2	Problématique	6
3	Contexte	7
3.1	Spécifications non-fonctionnelles	7
3.2	Spécifications fonctionnelles et faisabilité	7
3.2.1	Introduction	7
3.2.2	Méthodes de quantification des performances d'une éolienne - Énergie disponible .	7
4	Choix et justification du concept	9
4.1	Installation et dimensions	9
4.2	Installation électrique	11
4.3	sécurité	13
5	Réalisation d'un plan d'ensemble	14
6	Notes de calcul	16
6.1	Essais virtuels	16
6.2	Puissance récupérable par le vent	17
6.3	Vitesse angulaire	17
6.4	Rendement de l'hélice	17
6.5	Rendement du moteur	18
6.6	Rendements	18
6.7	Mise en série des génératrices	19
6.8	Schéma électrique équivalent	19
7	Choix des composants	21
7.1	L'hélice	21
7.2	La génératrice	21
7.3	Câbles électriques	22
7.4	Raccordement entre les modules	22
7.5	Régulateur de tension	22
7.6	Batterie de 12	23

8 Construction et test d'un module	24
8.1 Interprétation des résultats	27
9 Un plan de maintenance	28
10 Budget	29
11 Conclusion	30
I Annexes	31
12 Boîte à idée	31
12.1 Récupération de ventilateurs	31
12.2 connexion magnétique	32
12.3 Convertisseur AC / DC	32
12.4 aimant permanent	33
12.5 matériaux	34
13 Étude TRIIP	35
13.1 Introduction	35
13.2 MPV : Main Parameter of Value	35
13.2.1 Les clients potentiels	35
13.2.2 Les paramètres	36
13.3 Réseau de problèmes	38
13.4 Les problèmes techniques à résoudre	39
13.5 Les conditions minimales de réussite	39
13.6 Matrice multi-écrans	40
13.7 Etude systémique et fonctionnelle des 9 écrans de la matrice	40
13.7.1 Passé	40
13.7.2 Présent	41
13.7.3 Futur	41
13.8 RIF	42
13.9 Méthode des six chapeaux	42
13.9.1 Chapeau blanc	43
13.9.2 Chapeau rouge	43
13.9.3 Chapeau noir	43

13.9.4 Chapeau jaune	44
13.9.5 Chapeau vert	44
13.10 les lois de l'évolution	46
13.10.1 loi d'évolution statique	46
13.10.2 loi d'évolution cinématique	46
13.10.3 loi d'évolution dynamique	47
13.11 Méthode des contradictions	47
13.11.1 Première contradiction : Sécurité	47
13.11.2 Seconde contradiction : Nombre de pales	48
13.11.3 Troisième contradiction : Orientation des pales	49
13.12 Matrice des 40 principes	50
13.12.1 40 principes inventifs	50
13.13 Inspiration de la technologie fournie par la nature	50
 14 Introduction de la "directive machine"	 55
14.1 Moteurs électriques	55
14.2 Rupture en service	55
14.3 Chutes ou éjections d'objets	55
14.4 Éléments mobiles	55
14.5 Mouvements non commandés	55
14.6 Électricité	55
14.7 Réduction des émissions de bruit	55
 15 Analyse de risque Kinney	 56
15.1 Introduction	56
15.2 Risque de rupture des pales	57
15.3 Risque de projection d'éléments	57
15.4 Risque d'incendie	57
15.5 Risque de court-circuit	58
15.6 Risque de blessures	58
 16 Plans de détail	 59
16.1 chaîne de cote	61

17 Théorie de Betz	63
17.0.1 Emplacement	66
17.1 Ressources	67
18 Time-sheet	68
19 Diagramme de Gantt	69
20 Réalisation d'un folder	70
21 Listes des figures	71

1 Introduction

Depuis l'automne 2021, la reprise économique mondiale due à la sortie du Covid-19, a fait grimper le prix des matières premières. Peu de temps après, le conflit entre la Russie et l'Ukraine en Mars 2022, a gravement amplifié cette inflation des prix. L'énergie fossile est devenue un enjeu géopolitique entre l'Union européenne, les États-Unis et les pays orientaux.

La crise énergétique actuelle oblige notre société à réfléchir, à innover, à inventer de nouveaux dispositifs capables de créer de l'énergie. De plus, l'espace éolien On-shore a déjà grandement été exploité et la Belgique se tourne vers de la production Off-shore afin de tripler sa production d'ici 2030.

Cependant, depuis des années, des ingénieurs réfléchissent à trouver une solution pour continuer d'exploiter l'espace belge. Un ingénieur en particulier propose un "*prove of concept*" qui permettrait de transformer de simples palissades ou de haies en dispositif de production énergétique. Il a appelé ce concept le **mur à vent**.

Le but de ce projet est de réaliser une structure modulable permettant de récupérer l'énergie du vent afin de la transformer en énergie électrique, utilisable directement ou en différé. L'objectif de ce mur à vent, serait de fournir une source d'énergie à des particuliers comme à des entreprises. Cela permettrait de faire diminuer la demande sur le réseaux et ainsi, faire diminuer la facture d'électricité. Un atout majeur au vu de la crise énergétique et économique à laquelle nous faisons face. Dans cette optique, l'esthétisme et la capacité d'adaptation joue un rôle important.

2 Cahier de charge et adaptation

2.1 Cahier de charge

1. Adaptation du cahier de charge (établi en accord avec les enseignants).
2. Étude TRIIP.
3. Introduire la "*Directive machine*" dès le début de la conception.
4. Choix et justification du concept.
5. Réalisation d'un plan d'ensemble.
6. Notes de calcul du type avant-projet.
7. Choix et intégration des composants.
8. Analyse de risque Kinney.
9. Un plan de maintenance lié à la formation suivie.
10. Plans de détail.
11. Réalisation d'un *folder* de présentation (taille A4 ou A3 : voir annexe).

2.2 Problématique

La structure du mur devrait respecter les critères suivants :

1. La structure doit être semblable à une haie (au niveau des mensurations). Un module doit avoir une hauteur et une longueur de 1m et au maximum une profondeur de 50cm.
2. La modulabilité et donc le principe "*LEGO*"¹ est primordial.
3. Le mur doit être "esthétiquement acceptable".
4. Les éléments du mur doivent être fixes.
5. L'industrialisation de celui-ci doit être envisagée, il faut donc avoir une idée de son coût et de sa rentabilité.
6. L'utilisation de matériaux *locaux*² pour cette réalisation serait un plus.
7. Il faut pouvoir procéder à une maintenance aisément.
8. La structure du mur ne doit pas poser de problème au niveau urbanistique.
9. Le mur ne doit pas poser des problèmes de sécurité.

1. Principe de plusieurs modules emboîtables entre eux par leur forme.

2. On entend par là que l'on privilégiera l'utilisation de matériaux produits (au mieux) ou au moins achetés en Belgique

3 Contexte

3.1 Spécifications non-fonctionnelles

Dans un premier temps, nous avons eu l'occasion d'avoir un entretien avec M. Renson. Celui-ci nous a fait part que ce projet, qui consiste en la conception et modélisation d'un mur à vent, est en réalité le rêve de sa vie.

En effet Monsieur Renson imagine un dispositif passif permettant la récupération de l'énergie du vent dans des endroits stratégiques (emplacement de palissades, de clôtures, ...).

Il évoque également l'idée du recyclage de composés d'ordinateurs usagés. Il voudrait réutiliser les hélices de ces différentes pièces dans le but de permettre la réalisation de ce mur. Globalement, l'idée générale serait donc d'utiliser des matériaux de récupération.

3.2 Spécifications fonctionnelles et faisabilité

3.2.1 Introduction

Comme dit précédemment, le projet du mur à vent a pour but de permettre une conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique laquelle est ensuite, le plus souvent, transformée en énergie électrique. Dans ce cas, il est impossible de parler de l'énergie éolienne sans calculer la limite de Betz. La limite de Betz est une loi théorique qui exprime que la puissance maximale développée par un capteur éolien est égale à $\frac{16}{27}$ (environ 60 %) de la puissance incidente du vent qui traverse l'éolienne. Pour tous les calculs qui suivront, nous nous baserons donc sur ce principe.

3.2.2 Méthodes de quantification des performances d'une éolienne - Énergie disponible

On considère une colonne d'air de longueur dl , de section S , de masse volumique ρ animée d'une vitesse V conformément à la figure 1 :

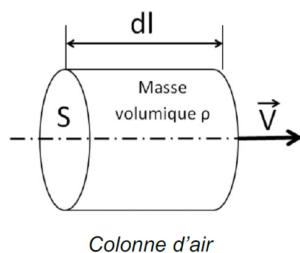


FIGURE 1 – Colonne d'air

L'énergie cinétique de cette colonne d'air est donc

$$dW_c = \frac{1}{2} \cdot dm \cdot V^2$$

avec $dm = \rho \cdot S \cdot dl$

Or, nous savons que :

$$V = \frac{dl}{dt} \implies dl = V \cdot dt$$

D'où :

$$dW_c = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \cdot dt [J]$$

On en déduit ainsi l'expression de la puissance instantanée disponible :

$$P_d = \frac{dW_c}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 [W] \quad (1)$$

Ainsi que la puissance disponible par m^2 :

$$P_d^* = \frac{P_d}{S} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 [W \cdot m^{-2}] \quad (2)$$

Pour l'exemple d'un mur dont la surface du capteur est de $1m^2$, et avec un $\rho = 1,29 [Kg \cdot m^{-3}]$ et avec une vitesse moyenne de vent de $5 [m \cdot s^{-1}]$, on aurait une puissance disponible théorique de :

$$P_d = \frac{dW_c}{dt} = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \cdot 1 \cdot 5^3 \approx 80 [W \cdot m^{-2}] \quad (3)$$

A titre d'exemple, le tableau 1 affiche plusieurs ordres de grandeurs de puissance disponible en fonction de la surface.

Nom de la structure	Surface [m ²]	Puissance disponible [W]
Module de base	0.09	7.256
Module demandé	1	80.625
Palissade	10	806.25
Muret	15	1209.375
Clôture	20	1612.5
Haie	25	2015.625
Mur	50	4013.25

TABLE 1 – Puissance disponible pour différentes surfaces

4 Choix et justification du concept

4.1 Installation et dimensions

Nous partons donc sur des boîtiers modulables, inspirés des *Lego*, de dimension 300mm x 300mm. L'avantage de cette installation est de permettre une utilisation très libre de ce système. En effet, le but premier du mur à vent est de pouvoir l'intégrer aussi bien dans des lieux publics que chez des particuliers. Le but recherché est donc un produit assez neutre qui peut facilement se fondre dans le décor et qui peut prendre toutes sortes de formes.

Pour ce qui est du raccordement électrique, nous nous basons sur le principe des panneaux photovoltaïques : des sources électriques mises en série pour former des *strings* et augmenter la tension, puis en parallèle pour augmenter le courant.

Pour la mise en série, nous avons prévu un espace pour laisser passer les fils électriques au sein du *Casing*. Les fils électriques de chaque module sont reliés entre eux via des passages horizontaux dans ce que l'on appelle des *prise mâle* comme la figure 2 le représente.

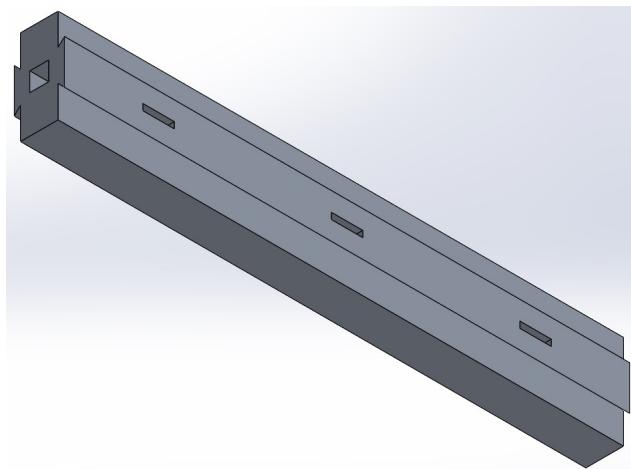


FIGURE 2 – Prise mâle

Pour la mise en parallèle, nous utilisons également les *prises mâles* percées sur l'entièreté de la hauteur ce qui permet le passage des câbles.

Concernant le boîtier, à savoir l'ensemble composé de l'hélice et du stator, il est composé d'une enveloppe qui permet le maintien de celui-ci. Le matériau utilisé doit permettre une certaine résistance mais aussi une certaine légèreté. Ce caisson est pensé pour créer un effet venturi. En effet, l'énergie récupérée étant quelque chose de primordiale, nous voulons augmenter autant que possible la puissance disponible de notre système. Le principe d'une éolienne étant la conversion de l'énergie cinétique du vent en une énergie électrique, l'augmentation de la vitesse du vent permet d'augmenter, en vertu du principe de conservation du débit, la puissance disponible de notre système.

L'hélice au centre du boîtier est l'élément principal. Sa réalisation a été pensée principalement pour la maximisation du rendement. Son grand nombre de pales permet un début de production d'énergie même à faible puissance de vent contrairement aux bipales ou tripales qui demandent une plus grande vitesse d'amorçage.

Devant l'hélice, nous avons positionné un *PowerCone* inspiré du *Martin-pêcheur* qui permet d'augmenter le rendement. En fait, ce *PowerCone* a pour but d'orienter l'air qui permet de diminuer le coefficient de traînée des pales principales en agissant sur les turbulences mais également de récupérer de l'énergie au niveau de la surface plane du rotor là où il n'existe aucune récupération du vent auparavant. Cet élément est également pensé avec une utilisation écrou-contre écrou de manière à fixer l'hélice et le *PowerCone* durablement dans le temps malgré les contraintes de rotation sur la tige filetée de la génératrice.

Pour réduire le bruit des ventilateurs qui pourrait être source de désagrément sonore, nous avons pensé à confectionner les pales principales avec une terminaison irrégulière comme les ailes du hiboux qui permettent de le rendre furtif.

L'ensemble du ventilateur à savoir le boîtier et l'hélice a donc été pensé pour le rendre performant (le rendement) mais aussi pratique (l'esthétique et le bruit). L'inconvénient à cela, c'est que ça rend l'ensemble (notamment l'hélice) un peu plus complexe à fabriquer.

4.2 Installation électrique

Nous choisissons de nous baser sur le principe de fonctionnement d'une autre source d'énergie dite *verte* qui est le panneau photovoltaïque. Dans sa forme la plus simple, un panneau photovoltaïque est composé d'une cellule comprenant une photodiode. L'onde électromagnétique amène une quantité d'énergie capable de franchir la barrière de potentiel créée par le dopage des matériaux. L'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction et devient un *électron libre* ce qui permet le déplacement des charges dans les matériaux. Ici, nos matériaux semi-conducteurs sont simplement remplacés par nos ventilateurs.

Constitution

D'après la documentation technique, un ventilateur 12V tournant à une vitesse nominale pourra fournir un courant électrique d'environ 90mA. Ces valeurs sont insuffisantes pour alimenter des charges classiques. Nous allons donc placer plusieurs ventilateurs en série et en parallèle pour augmenter ces valeurs.

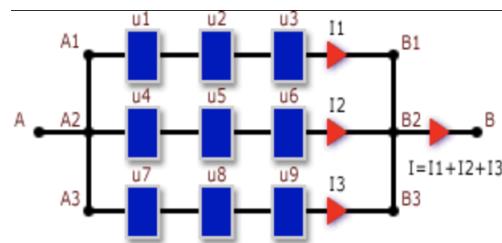


FIGURE 3 – String de ventilateurs

Chaque ventilateur est siège d'une fem induite. En créant des string de ventilateurs, nous allons augmenter la tension aux bornes d'une string. Idéalement, il faudrait que l'on place au moins 13 ventilateurs en série pour créer une alimentation de 230V. Cependant, notre mur à vent dépend fortement de l'installation. Un dimensionnement est à faire pour chaque client potentiel.

Nous sommes donc partis sur le principe de stocker cette énergie dans des batteries 12V afin de permettre au client plus de liberté dans son installation.

Résolution des problèmes électriques à l'aide de l'électronique

Pour pouvoir être utilisés comme des cellules photovoltaïques il est nécessaire que chacun de nos ventilateurs viennent à produire un courant DC avec une tension stable pour éviter de venir endommager les appareils en aval de notre système. Nous envisagerons donc le principe équivalent à celui d'une éolienne domestique. Notre ventilateur crée du courant alternatif monophasé, cependant pour la plupart des appareils contenu dans une maison, ces derniers ont besoin d'un courant alternatif triphasé 220V stable.

A la sortie de notre hélice (AC) nous implémenterons une électronique qu'est le pont redresseur, il s'agit d'un composant contenant 4 diodes en son sein permettant de redresser la tension de manière à obtenir une tension d'une unique alternance. Malheureusement ce n'est pas tout puisque cette tension n'est pas stable du tout et varie toujours entre une tension $|V_{max}|$ et une tension nulle comme le montre la figure 4.

Ensuite pour pouvoir être utilisé de manière domestique, il est nécessaire que cette tension soit lissée pour obtenir une tension bien plus stable. Pour cela il est nécessaire d'utiliser un composant que l'on appelle

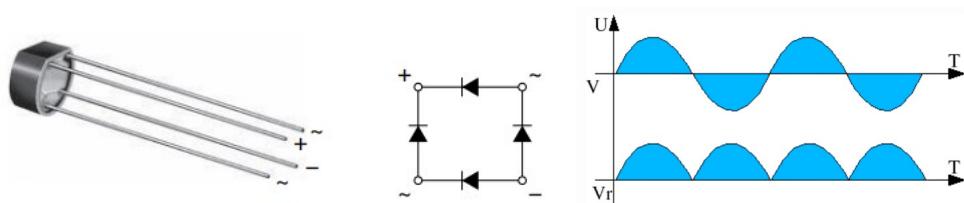


FIGURE 4 – Application d'un pont redresseur

un régulateur comme le montre la figure 5³.

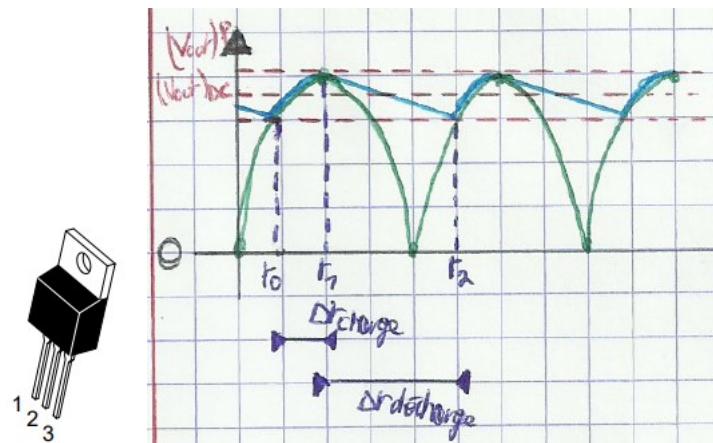


FIGURE 5 – Application d'un condensateur et régulateur

On peut apercevoir sur la courbe le signal vert redressé et le signal légèrement régulé⁴ obtenu en sortie. Le signal de sortie est encore légèrement ondulé et c'est pour cela qu'il est souvent ajouté à cela un condensateur en entrée pour éliminer les oscillations non-désirées et en sortie, le régulateur dont nous avons parlé représenté à la figure 5 de gauche.

Tous ces composants l'un à la suite de l'autre vont modifier finalement le signal comme la figure 6 le représente.

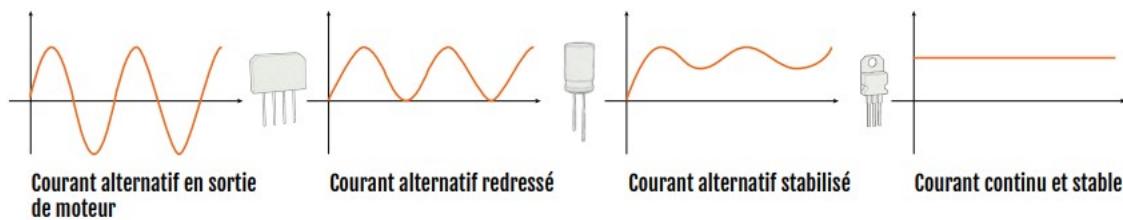


FIGURE 6 – Étape d'obtention d'un signal DC à partir d'un signal AC

3. Composant électronique permettant de lisser un signal par l'action de "combler les creux par les maximums surplus du signal d'entrée".

4. Pour déjà obtenir un signal d'une tension plus constante nous plaçons un condensateur en sortie en parallèle par rapport au pont de diode

Il existe également des appareils "tout installé" possèdant ces 3 composants et dimensionnés de manière à pouvoir accepter une certaine puissance selon l'application.

Selon les conseils de Mr. Gabriel la tension ne devrait pas varier tellement d'un "*Lego*" à l'autre ce qui nous permet d'utiliser un unique convertisseur AC/DC en fin d'installation, ce dernier acceptant une puissance bien plus importante que si l'on avait placé un petit convertisseur sur chacun de nos modules. Ce choix nous permet également d'augmenter la fiabilité de chacune de nos installations étant donné qu'il n'existe plus plusieurs composants risquant de claquer ou de brûler sur chacun des "*Lego* mais un unique appareil électronique en bout de ligne aisément remplaçable.

4.3 sécurité

Sur les éoliennes classiques, un frein moteur freine l'hélice pour éviter de cramer l'alternateur. Nous n'avons pas besoin de composants électroniques ou électriques tel qu'un transistor ou contacteur.

En effet la géométrie de notre hélice plafonne la rotation à une vitesse acceptable pour le moteur et donc nous n'atteindrons jamais un seuil critique. Ce qui ne nécessite pas de système de freinage.

D'autant plus que la force contre électromotrice freinera naturellement l'hélice au plus la vitesse de rotation est élevée.

5 Réalisation d'un plan d'ensemble

Lors de la réalisation de notre plan d'ensemble et à l'aide de notre étude TRIIP réalisée au préalable nous sommes sortis avec l'idée d'une turbine axiale composée de nombreuses pâles et d'un boîtier muni d'un rétrécissement de section de manière à créer un effet venturi en amont de notre turbine augmentant ainsi la vitesse du vent.

La turbine en elle-même est dotée de 3 technologies issues du monde naturelle, la technologie issue de la feuille de sycamore n'étant pas utilisée pour la simple et bonne raison qu'une unique pâle ne garanti aucune intimité.

Pour un meilleur visuel de ces technologies, nous avons fait un zoom sur l'hélice. Nous y observons que la technologie issue de la peau de requin ne peut être représentée par le logiciel *SolidWorks* que nous utilisons, qui est limité en texture de matière. En ce qui concerne les 2 autres technologies, nous pouvons remarquer la dentelure sur la trace de chacune des pâles ainsi que le *PowerCone* adapté à nos nombreuses pâles.

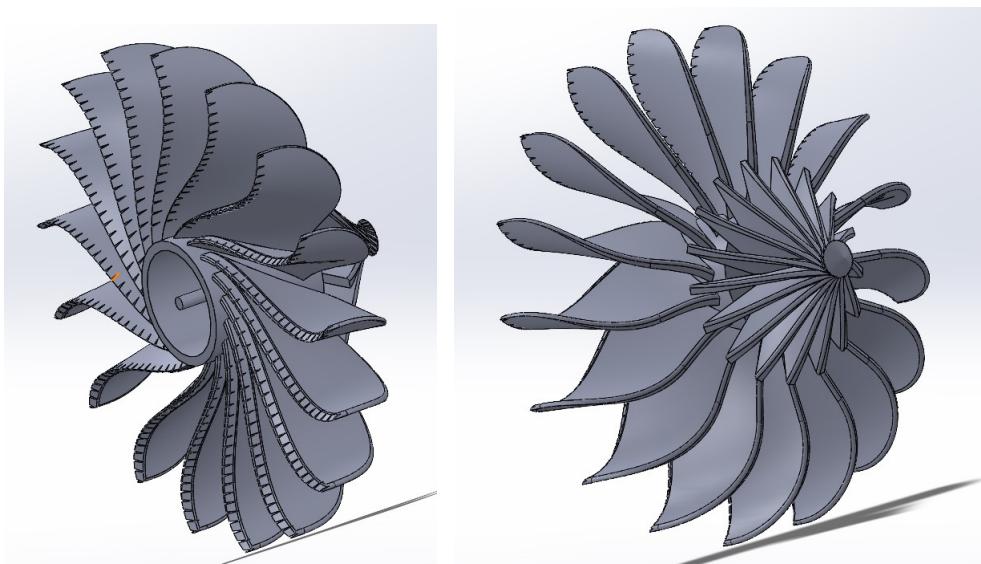


FIGURE 7 – Modélisation 3D de la turbine

Nous en sommes donc arrivé au résultat suivant de la turbine et de son casing qui se trouve ci-dessous. Dans cette vue éclatée, nous y avons fait ressortir le moteur avec sa tige filetée permettant de fixer l'hélice ainsi que le *PowerCoin*.

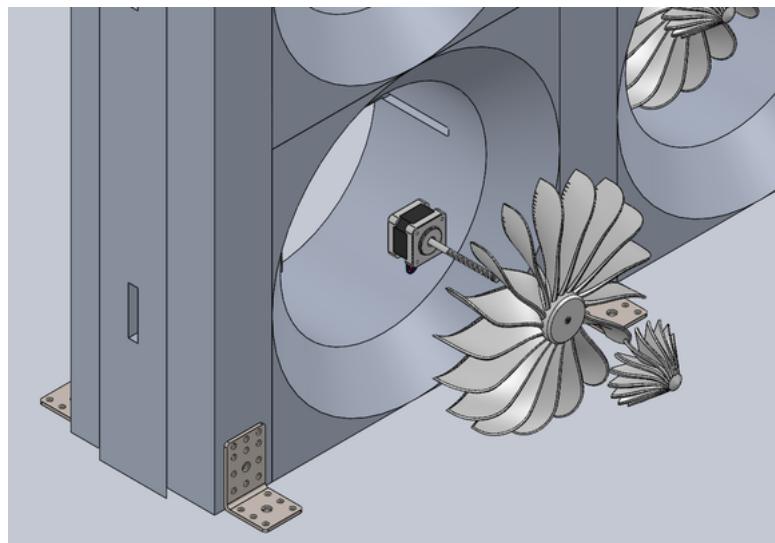


FIGURE 8 – Vue éclatée d'un bloc

Pour revenir au principe même du mur à vent, à savoir un système modulable de type *Lego* permettant une grande liberté dans son installation, voici une représentation ci-dessous d'un ensemble de 3x3 modules fixés entre-eux à l'aide de prises mâles et munis d'équerres permettant une fixation au niveau du sol. La disposition 3x3 permet d'obtenir une surface d'1 m².

On peut aussi voir une vue en coupe de notre module.

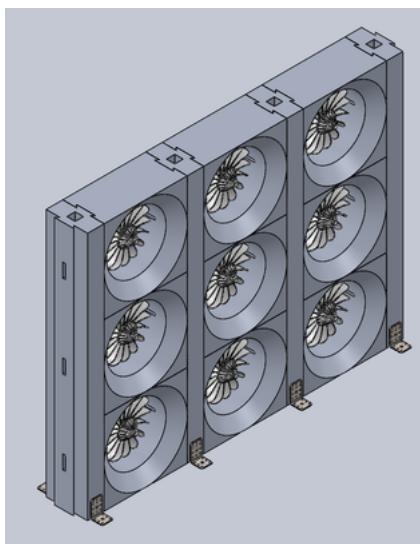


FIGURE 9 – Vue éclatée du mur à vent

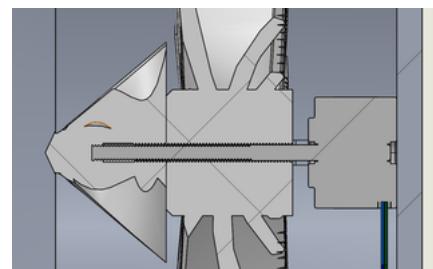


FIGURE 10 – vue en coupe

6 Notes de calcul

C'est la partie dans laquelle nous allons calculer la puissance et la tension en sortie de notre mur à vent.

6.1 Essais virtuels

Nous avons effectué une simulation, grâce à l'extension *flow simulation* offerte par *Solidworks*. Pour un vent de 5, nous obtenons grâce au tube venturi un vent en entrée de 17 comme le montre la figure 11. Nous pouvons confirmer cette valeur du vent avec nos expériences réalisées en laboratoires. Nous n'avons

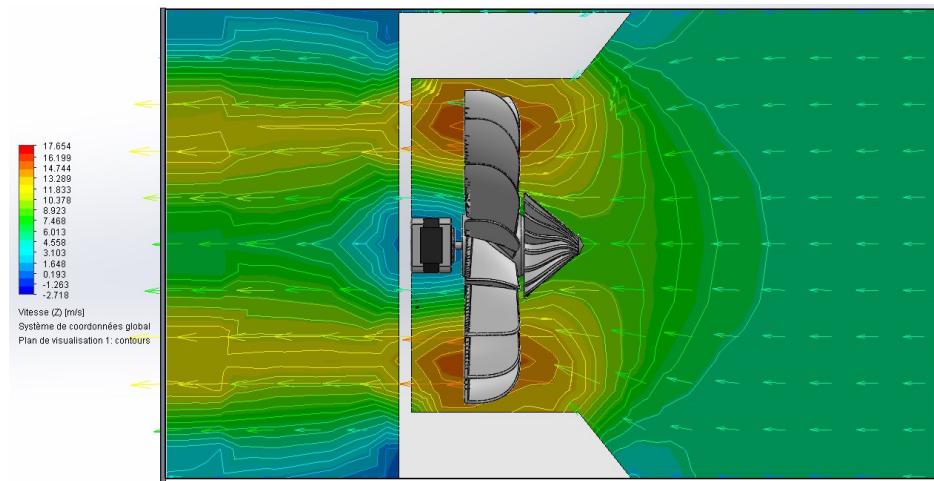


FIGURE 11 – Simulation à l'aide de l'outils *flow simulation* sur le logiciel SolidWorks.

pas pu augmenter la vitesse jusqu'à 5 m/s car c'était trop dangereux de dépasser une fréquence de 50 Hz avec le variateur contrôlant l'hélice mais nous obtenons en entrée de tube à 4 m/s une vitesse $V_{out} = 10$ m/s en sortie du tube venturi.

Ces essais virtuels nous ont également permis de déterminer le meilleur compromis entre une section d'hélice importante et l'effet venturi. En effet Augmenter la surface de l'hélice permet de récupérer plus de vent mais cela au détriment de l'effet venturi qui quant-à lui augmente la vitesse de ce vent par sa géométrie. Nous avons donc réalisé plusieurs cas d'études virtuelles comme le montre la figure 12 et il en est ressorti que le meilleur compromis était donc un diamètre d'hélice de 210mm.

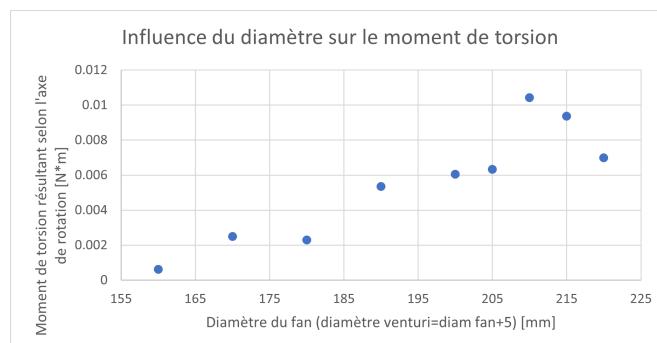


FIGURE 12 – Optimisation de la géométrie

6.2 Puissance récupérable par le vent

$$P_{cinétique} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_{turbine}^3$$

Avec :

- $V_{turbine}$: la vitesse du vent en entrée de turbine [$m \cdot s^{-1}$] ($V_{turbine} = 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)
- ρ : masse volumique de l'air (air atmosphérique sec) [$kg \cdot m^{-3}$] ($\rho = 1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
- S : surface projetée du capteur éolien [m^2] ($S = 0,0346 \text{ m}^2$)

Ce qui donne :

$$P_{cinétique} = 109,65$$

6.3 Vitesse angulaire

La vitesse angulaire ω , aussi appelée fréquence angulaire ou pulsation, est une mesure de la vitesse de rotation en radians par seconde.

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

Avec :

- ω : vitesse angulaire (en rad/s)
- f : fréquence de rotation du rotor en s^{-1}

Nous avons effectué des tests sur un prototype de notre éolienne grâce au banc d'essai du labo de turbomachine. Nous avons effectué une mesure de la vitesse de rotation de notre hélice et ce, pour différentes vitesses de vent. Pour une vitesse $V_{in} = 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ on obtient **415 tour · min⁻¹**. Nos données expérimentales se trouvent ici 8

6.4 Rendement de l'hélice

Il faut maintenant convertir la P_{vent} en couple qui s'exerce sur l'arbre de la génératrice. Les données étant expérimentales, nous allons tenter de continuer notre bilan énergétique à l'aide de mesures prises et d'ordres de grandeur existant déjà. Nous savons que la puissance d'entraînement de l'arbre est égale au produit de la puissance disponible par le rendement de l'hélice. L'ordre de grandeur du rendement d'une éolienne américaine (qui est le modèle qui se rapproche le plus de la nôtre) étant de 30%, nous estimons la puissance d'entraînement de notre arbre à $P_{entraînement} \approx 0,3 \cdot 110 \approx 33W$

Grâce à l'égalité :

$$P_{entraînement} = C \cdot \omega \quad (4)$$

Nous obtenons un couple de

$$C = \frac{P_{\text{entrainement}}}{\omega} \approx \frac{33}{\frac{2 \cdot \pi \cdot 415}{60}} \approx 0,75 N \cdot m$$

6.5 Rendement du moteur

Conformément à la datasheet du moteur nous avons un rendement $\eta_{\text{moteur}} = 0,87$

Le rendement est calculé en fonctionnement moteur, nous pouvons considérer qu'il est valable pour le fonctionnement génératrice. Ceci n'est vrai que lorsqu'on est proche de la tension nominale, c'est-à-dire lorsque le moteur génère une tension de 12V. Lorsqu'on s'éloigne de la tension nominale le rendement chute. D'après M. Gabriel, prendre un rendement de 50% serait une bonne approximation pour ce type de moteur.

En sortie de chaque modules, nous avons donc...

$$\begin{aligned} P_{\text{module}} &= 0,5 \cdot 33 \\ &= 16,5 W \end{aligned}$$

Parlons justement de rendement...

6.6 Rendements

- L'hélice (expérimentale) : $\eta = 30\%$
- la génératrice continue (théorique) : $\eta = 50\%$
- Le redresseur : $\eta = 90\%$
- Les batteries : $0,7 < \eta < 0,8$
- Les pertes de lignes (estimation) : $\eta = 95\%$

Les rendements de chaque élément varient avec le régime de fonctionnement lié à la vitesse de rotation de l'hélice, ce qui, en dehors du régime nominal, diminue encore le rendement global du dispositif.

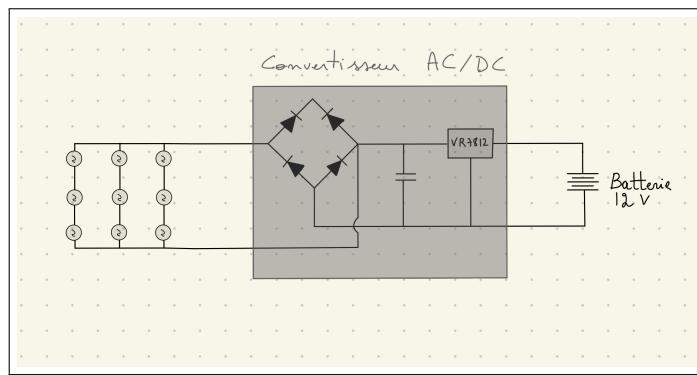


FIGURE 13 – Schéma électrique du mur à vent

6.7 Mise en série des génératrices

Nos modules font 300×300 . Nous avons 3 strings mis en parallèle où chaque string représente une mise en série de 3 modules. Voici le schéma de notre mur :

Dans un circuit électrique, que les récepteurs soient associés en série ou en parallèle, la puissance (et donc l'énergie) fournie par le générateur est égale à la somme des puissances (ou des énergies) reçues par les récepteurs.

Et donc, pour la mise en série :

$$\begin{aligned} P_{string} &= 3 \cdot 16,5 \\ &\approx 50W \end{aligned}$$

Ce qui donne, avec la mise en parallèle :

$$\begin{aligned} P_{totale} &= 3 \cdot 50W \\ &= 150W \end{aligned}$$

6.8 Schéma électrique équivalent

Toujours selon la datasheet du moteur 2, la résistance interne de celui-ci est de 15. La résistance interne de notre source est donc de :

$$R_i = \frac{3 \cdot 15}{3} = 15$$

C'est cette résistance interne qui va nous donné une limite en courant. Pour ce qui est de la tension, nous sommes de nouveau confrontés à un problème. Nous savons, par la relation

$$E = k \cdot N \cdot \phi$$

que la tension aux bornes du moteur est proportionnelle à la vitesse de rotation. Cette relation est vraie pour un moteur **donné**, et ne permet pas d'extrapoler une tension pour un autre moteur (le coefficient

k étant propre au moteur). La mesure de la tension en fonction de la vitesse de rotation doit se faire expérimentalement et comme les essais que nous avons réalisés ont été effectués à l'aide d'un **moteur DC de 5V**, nous ne sommes pas capable de connaître la tension de sortie du moteur.

Nous devons dès lors faire une nouvelle estimation. Qu'à cela ne tienne.. allons-y... Comme les puissances mises en jeu sont du même ordre de grandeur, nous estimerons par une simple règle de 3 la tension de sortie de notre moteur. Nous sommes évidemment conscients que pour obtenir des valeurs précises c'est un exercice, dans la pratique, à ne pas réaliser mais il aura au moins le mérite de nous fournir une base de calcul pour la suite de notre bilan énergétique : si pour un moteur de 5V, une vitesse de rotation de 415rpm nous a donné 1,5V, nous considérons une tension de sortie de 3,6V/hélice. Mis en série, la tension de sortie de notre *module 3x3* est de :

$$U_{équivalente} = 3 \cdot 3,6 = 10,8V$$

On sort donc une Puissance à l'entrée du convertisseur AC/DC de 150 et une tension de 10,8 : ce qui correspond à la plage de tension admise par notre convertisseur L7812, lequel est muni d'un pont de diode pour redresser la tension alternative, d'une capacité de filtrage pour transformer notre signal électrique périodique en signal DC et d'un régulateur de tension continue de 12V pour stabiliser la tension de sortie. La tension de sortie de notre système est donc de 12V DC (suffisant pour recharger une batterie de 12V) et une puissance d'environ 150W (à un terme de rendement de convertisseur près)⁵.

5. le datasheet de notre convertisseur ne fournit pas son rendement mais, pour ce type de composant, nous avons un rendement compris entre 0,9 et 0,97

7 Choix des composants

Pour ce mur nous avons besoin de plusieurs composants. Certains sont normalisées, alors que l'hélice a été pensée par nous-même.

Les critères de choix des principaux composants sont :

- Le type de matériau, on crée de l'énergie verte, il faut donc choisir correctement les matériaux
- Le rendement des composants, qui en ont un
- Le coût des composants
- Leur longévité (résistance)

7.1 L'hélice

On va commencer par le plus important, l'hélice. Elle a été désignée sur SolidWorks et est unique. Au niveau du choix du **matériau**, c'est un réel défi. En effet, nous n'avons pas le choix que d'imprimer cette hélice en 3D au vu de sa géométrie complexe. Nous choisissons le frittage sélectif par laser. Il avantageux pour créer de petites séries de pièces plastique, mais aussi pour le prototypage. Cette technologie permet également beaucoup de liberté dans le design, ainsi qu'un haut niveau de détail. Les géométries complexes et les objets aux parois fines sont adaptés à cette technologie.

Concernant le matériau utilisé pour l'impression, notre choix s'est porté sur la PLA et ce, pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, le filament PLA est le plastique le plus facile à imprimer. En effet, il fond à basse température (en règle général entre 190 et 220°C), et est peu sujet au warping qui provoquerait des défauts dans notre pièce. Il offre un rendu de surface lisse et propre, ce qui nous permet d'avoir un meilleur rendement, et à un caractère biodégradable.

Le post-traitement des pièces imprimées en PLA est très facile. Il se ponce facilement et la colle cyanoacrylate permet des assemblages aisés.

Un point important est que le PLA est également peu coûteux, la moyenne de prix d'une bobine de filament PLA 1kg est d'environ 25€.

7.2 La génératrice

De base, nous voulions faire nous même notre génératrice avec des aimants et des bobines. Mais après discussion avec Monsieur Rausin nous nous compliquons la vie. Le choix du moteur est caractérisé par la V_{max} et $\frac{A}{ph}$. On préfère un moteur avec un grand nombre de pas, ainsi la vitesse de rotation est diminuée mais en gardant une tension correcte. Nous avons choisi un moteur 12 V 30 W.

Le prix de la génératrice est de 70€. Il y en aura une dans chaque module soit 9 sur $1m^2$.



FIGURE 14 – Moteur 12V / 600 rpm / 30 W

Tension nominale [°]	12
Courant sans charge [A]	0.8
Couple de décrochage [N · m]	0.08
Poids [Kg]	1.2
Rendement [/]	87%
Dimension [mm]	146 x 60 x 60
RMP [tour / min]	600

TABLE 2 – Caractéristiques du moteur

7.3 Câbles électriques

Des câbles électriques classiques type H05 VK seront utilisés pour les raccordements.

7.4 Raccordement entre les modules

Le raccordement entre les modules se fera avec des sucres qui connecterons les câbles entre eux.

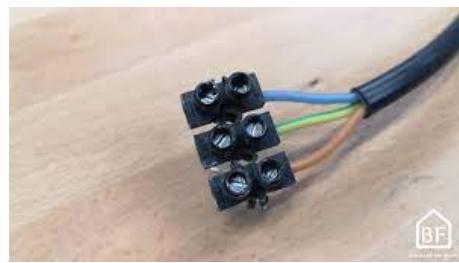


FIGURE 15 – sucres électriques

7.5 Régulateur de tension

On alimente des batteries 12 donc il faut au moins 14 en sortie de mur. Le redresseur est un vs-elec - L7812 régulateur de tension filtre redresseur module 12V 1.5A.



FIGURE 16 – Convertisseur AC/DC

7.6 Batterie de 12

Nous prenons une Batterie LiFePO4 12v 3,8Ah de la marque *Solise* référence RNS B12003L. Son prix est de 75.€ Voici sa datasheet :

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES

Référence : B12003L
Technologie : LiFePO4
Tension nominale : 12,8V
Capacité minimum : 3,8Ah
Énergie : 48Wh
Tension de charge : 14,4V
Courant de charge standard : 2A
Courant de charge rapide : 3A
Courant de décharge continue : 3A
Courant de décharge pulse : 6A (maxi 1minute)
Autodécharge : <3% /mois
Température de fonctionnement : -20°C à 60°C
Température de charge : 0 à 45°C
Nombre de cycles : 2000 à 1C 100% DOD

Connexion :
fils avec connecteur Anderson PP30 de longueur 30cm
Poids : 380g
Dimensions (L x l x h) : 107 x 78 x 27mm
IP 50 (Pas de protection contre les chutes d'eau)

FIGURE 17 – Datasheet Batterie Solise

8 Construction et test d'un module

Pour apporter un défi supplémentaire à ce projet de mur à vent, nous avons pris la décision de réaliser un prototype à l'image de notre modèle Solidworks. Pour cela, nous avons imprimé notre hélice et notre PowerCône en PLA (remplissage 90%). Nous avons ensuite modélisé un tube de venturi adapté à la construction de prototype ; 4 morceaux qui peuvent s'emboîter les uns dans les autres. Une fois modélisé, nous avons lancé l'impression des différentes parties du venturi. Afin de fixer l'ensemble sur un cadre en bois, nous avons coupé 2 carré en bois de 340x340 et avons fais deux trous, respectivement de $\Phi 300$ et de $\Phi 180$. Nous avons écarté les 2 plaques en bois de la profondeur du venturi et avons fixé les 2 plaques ensemble. Une fois celles-ci fixées, nous pouvions y attacher les 4 morceaux composant le venturi.

La deuxième phase de constructiuon du prototype était d'assembler les différents éléments de l'arbre ensemble et de les fixer au trépied réalisé au préalable. Pour cela, nous avons connecté le fan à un arbre de $\Phi 4$. Sur cet arbre, nous avons placé une boite (rectangle noir sur la figure 18) imprimé en 3D dans laquelle deux roulements sont présents. Après cette boite à roulement, l'élément suivant est un coupleur mécanique, également imprimé en 3D, qui permet de lier la tige sortant de l'hélice à celle du moteur car ces dernières ont un diamètre différent.

Pour finir, il a suffit de fixer le trépied au caisson en alignant minutieusement la turbine au centre des trous coupé à la scie sauteuse. Enfin, pour montrer que le prototype est fonctionnel, une led a été ajoutée et s'allume lorsque la turbine est en rotation.

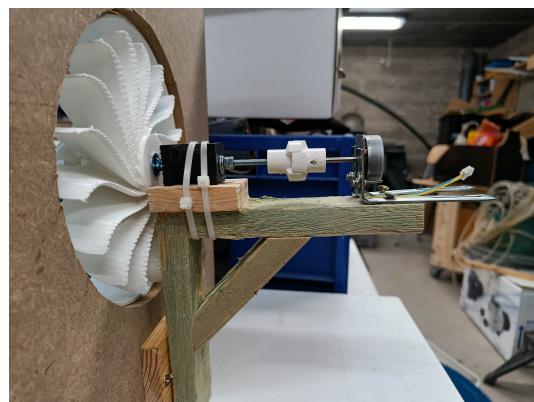


FIGURE 18 – Connexion hélice - moteur



FIGURE 19 – Tube Venturi

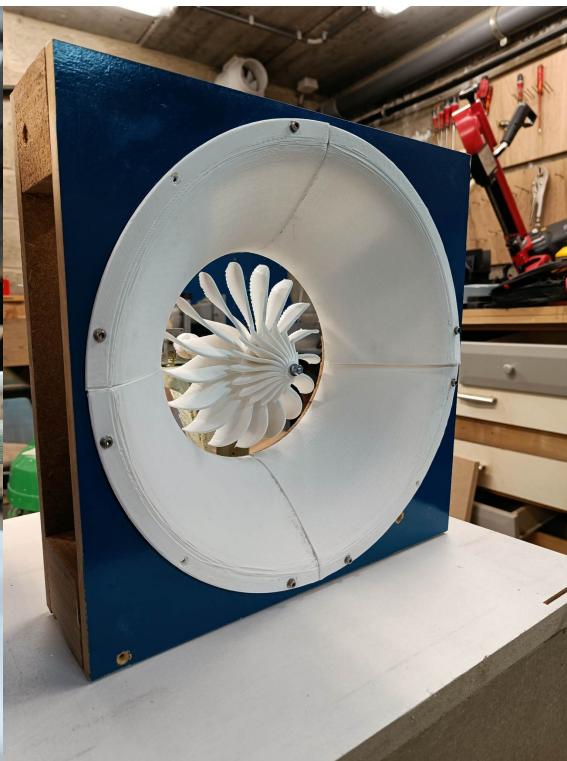


FIGURE 20 – Module final

Au laboratoire de Turbomachine nous avons fait tourner l'hélice grâce à une soufflerie afin de prendre des mesures. Nous avons remarqué que notre tube venturi fonctionnait en multipliant la vitesse du vent jusque 3. Nous avons mesuré tous les 5 Hertz la vitesse du vent avant venturi, après venturi et les rotations par minute.

Nous sommes assez contents de nos résultats. Premièrement, c'est intéressant de voir un projet que nous avons façonné, fonctionner, et pouvoir le tester est vraiment une plus value. On remarque qu'il existe un monde entre la théorie et la pratique. Nous avons dû d'ailleurs modifier des pièces et des plans après avoir fait nos calculs.



FIGURE 21 – Test du module au laboratoire

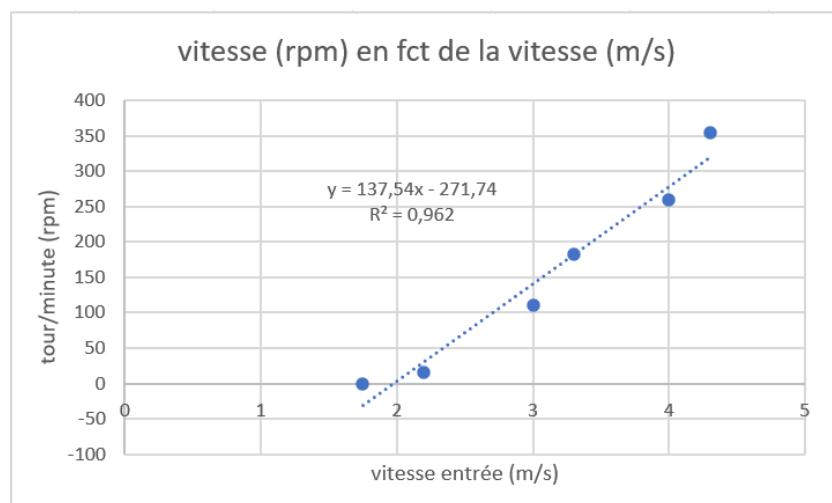


FIGURE 22 – Résultat obtenu au laboratoire de Turbomachine

8.1 Interprétation des résultats

Nos résultats et mesures effectués au laboratoire de turbomachines sont discutables.

Premièrement, l'hélice utilisée au labo mesure 0,16 de ϕ alors que dans nos calculs, elle mesure 0,19 .

Ensuite, le raccordement mécanique entre le moteur et l'hélice s'est avéré plus compliqué que prévu. Nous avons perdu beaucoup d'énergie là dedans ainsi que dans les vibrations. Notre hélice, de ce fait, bougeait beaucoup durant la simulation. Le venturi n'est pas bien raccordé et donc pas optimisé. La soufflerie du labo est aussi assez aléatoire, il y a beaucoup de turbulences dans le tube et notamment un effet tourbillon dû à la position de son moteur⁶.

Toutes ces raisons font que nos mesures sont encore approximatives et qu'il faut être conscient que cela reste de l'expérimentation.

fréquence [Hz]	vitesse en entrée [m/s]	vitesse en sortie [m/s]	vitesse de rotation [rpm]
25	1.75	4.2	0
30	2.2	5	15
35	3	6	110
40	3.3	6.7	182
45	4	8	260
50	4.3	9	354

TABLE 3 – résultats du test en laboratoire

6. Selon Mr Maréchal le tube devrait être équipé d'un diaphragme et d'ensuite un diffuseur permettant au vent d'atteindre un écoulement laminaire dans le tube.

9 Un plan de maintenance

L'idée du mur à vent est d'implanter un système de récupération d'énergie éolienne chez des particuliers ou dans des services publiques en guise de remplacement de haies ou de clôtures par exemple.

Dans cette optique, une maintenance minime est nécessaire et c'est pourquoi notre système a été conçu de cette façon.

L'utilité d'une maintenance préventive est de permettre d'éviter un panne qui bloquerait la production d'énergie à moment non voulu.

Le but consiste donc à vérifier l'état des composants durant leur état de fonctionnement afin de prévenir d'un éventuel problème.

Voici une liste de vérifications à faire :

- - état de la génératrice et convertisseur AC/DC
- - vérifier l'isolation
- - vérification du roulement de la génératrice
- - vérification du serrage
- - nettoyage des pâles, tube de venturi

Concernant les réparations du système, celles-ci ont pour but de pouvoir être réalisées par toutes personnes un minimum manuelles.

Dans un premier temps, pour remplacer l'hélice ou le *PowerCône*, il suffit de dévisser ces derniers et de les remplacer.

Dans un second temps, si le problème vient du *casing*, comme il s'agit d'un élément modulable et emboîtable, il suffit alors de le remplacer sans devoir toucher aux autres modules présents dans l'installation.

Un des problèmes rencontré pourrait venir de la disposition en *string* de nos modules. Pour palier à cela, nous avons connectés nos modules par de simples câbles reliés entre-eux par des sucres électriques. Si un de ces modules devait à être changé, en attendant son remplacement, une connexion temporaire pourrait alors être réalisée.

Pour faciliter la maintenance, un système de led pourrait être affecté à nos modules ce qui permettrait de savoir lequel disfonctionne.

Cependant, au vu de la faible puissance que nous sortons, la consommation d'une led à chaque module n'est pas négligeable et c'est pourquoi, ce système n'est pas encore été intégré.

10 Budget

Nous avons mis un point d'honneur à créer un mur le moins cher possible. Voici le prix détaillé de notre mur.

- Batterie : 75s €elon Batterie Solise
- Régulateur : 5s €elon Amazon
- Moteur : 70s €elon Site de l'électronique
- Hélice : 5s €elon le prix du PLA le 19/12/22
- Cadre en ALU : 3s €elon le prix de l'aluminium

Le prix d'un module comprend un moteur, un cadre d'aluminium inoxydable et une hélice. Nous estimons donc un module à 80. € A cela, il faut rajouter 40d €e fixation. Le coût global du mur est estimé à 720. € Cependant, dans ce prix, la main d'oeuvre n'est pas prise en compte.

Nous sommes contents de réaliser un produit peu chers dans son ensemble. Certes nous n'alimenterons pas l'entièreté de la ville de Liège mais au moins nous avons réussi, dans un budget relativement correct, à réaliser un mur viable et capable de charger une batterie de 12 [V].

11 Conclusion

En conclusion de ce projet, nous pouvons dire plusieurs choses. Tout d'abord, il nous a permis d'en apprendre plus sur l'éolien. Nous étions 4 étudiants GED donc ce projet a eu du sens pour nous. Nous avons pu faire appel à des compétences acquises durant notre bachelier à Gramme. La réalisation de plans SolidWorks, le dimensionnement électrique, l'étude TRIIP, la résistance des matériaux,...

Ce qui nous a le plus marqué dans ce projet, c'est le gap entre la théorie et la pratique. Nous avons réalisé un module de notre mur à vent et nos calculs se sont avérés plus ou moins exacts. Cependant, nous avons dû modifier des plans car dans la pratique ça ne fonctionnait pas. C'est la meilleure leçon que nous tirons de ce projet, à savoir designer des projets viables.

D'un point de vue personnel, le mur à vent ne nous a pas réellement convaincu. En effet, c'est beaucoup d'heures de travail, de calculs et de mise en place pour quelques dizaines de watts. Cependant, une optimisation plus poussée pourrait sans doute faire de lui un bonne source d'énergie secondaire.

Première partie

Annexes

12 Boîte à idée

12.1 Récupération de ventilateurs

Après discussion avec Monsieur Renson, il nous a fait part de son étude préliminaire d'un mur de $1m^2$, composé de ventilateurs d'ordinateurs comme la figure 23, relié entre eux.



FIGURE 23 – Ventilateur d'ordinateur

Les caractéristiques d'un tel ventilateur sont résumées dans le tableau 4 ci-dessous.

Caractéristiques	Valeurs
Dimensions	120 x 120 x 25 [mm]
Vitesse de rotation	1500 [tour/min]
Débit d'air	87 [m^3/h]
Tension d'entrée	12 [V]
Poids	0,14 [Kg]
Puissance absorbée	1,08 [Watt]

TABLE 4 – Caractéristiques d'un ventilateur d'ordinateur

Les résultats dévoilent une puissance calculée de 1500 watts, ce qui n'est pas négligeable : si le mur à vent produit pendant une heure, une énergie de 1 kWh, il est possible de réaliser des tâches demandant une certaine consommation d'énergie. Voici quelques ordres de grandeur donnés par le site de EDF :

- avec 1 kWh, on peut regarder la TV entre 3 et 5 h selon la taille et la technologie de son téléviseur.
- On peut aussi laisser son lecteur DVD ou son décodeur en marche pendant une semaine. Par contre, on ne peut jouer qu'une journée avec sa console de jeux ;
- avec 1 kWh, on peut faire fonctionner son réfrigérateur pendant une journée et son congélateur de 200 litres pendant 2 jours. On peut aussi cuire un poulet au four à pyrolyse et faire fonctionner une plaque vitrocéramique ou un four à micro-ondes pendant 1h ;

- avec 1 kWh, on peut s'éclairer entre une journée et une journée et demie. Cela dépend si l'on habite en maison ou en appartement. Il faut bien veiller au choix des luminaires car avec 1 kWh, on fait fonctionner une lampe à halogène pendant seulement 2h alors qu'on peut s'éclairer pendant 7h avec 7 lampes à basse consommation ;
- avec 1 kWh, on peut travailler une demi-journée avec un ordinateur fixe contre une journée et demie avec un ordinateur portable. Un modem ADSL fixe consomme 1 kWh en 8h, qu'il soit en marche ou en veille.

Notre idée de base était donc de récupérer des ventilateurs d'ordinateur ce qui nous permettait d'avoir une base sur laquelle travailler. La récupération était une bonne idée, aussi bien d'un point de vue économique qu'écologique mais que nous avons finalement décidé d'abandonner pour diverses raisons (récupération d'énergie du vent trop faible, une machine électrique de trop faible puissance,...).

12.2 connexion magnétique

Avant de partir sur un câblage classique pour connecter électriquement nos modules, nous étions partis sur une connexion magnétique. Le principe était le même avec lequel nous rechargeons nos montres connectées.



FIGURE 24 – Montre connectée

L'idée était de travailler avec un système d'induction magnétique qui formait un couple de prises mâles-femelles. C'est à dire des fiches disposées sur chaque boîtiers qui, avec un système de ressorts, permettaient une certaine pression pour maintenir le contact électrique entre celles-ci. Ce système avait pour avantage sa grande liberté au niveau de sa configuration. Les boîtiers pouvaient être ainsi connectés au niveau de leur 2 côtés. Pourquoi 2 côtés, car on travaille par string. Cela permettait notamment d'éviter une trop grande dépendance entre les modules si un problème électrique survenait. On évitait aussi les fils/câbles. Cette technique était aussi beaucoup plus esthétique ce qui n'est pas négligeable en sachant qu'une de ses utilisations premières est l'apport d'énergie chez le particulier.

12.3 Convertisseur AC / DC

Sur les conseils de Monsieur Gibault, nous voulions utiliser un convertisseur AC / DC de la marque XP POWER modèle VCE12 dont voici les caractéristiques :

Type	AC/DC
Format	40x19.1x19.1
Tension d'entrée	[85 V -305 V]
Tension de sortie	12V DC

TABLE 5 – Résumé du convertisseur AC-DC

Ce composant se trouve facilement et à un prix unitaire de 12,63 euros selon ([1]). Ce qui n'était tout de même pas négligeable. Cependant, il fallait aussi prendre en compte que par la suite, nous aurions dû assembler l'entièreté de ces composants (pont de diode/condensateur/régulateur).

Après discussion avec Monsieur Rausin, nous avons plutôt opté pour un redresseur et onduleur unique qui viendrait se placer en bout de mur à vent.

12.4 aimant permanent

L'idée de base était d'utiliser un aimant permanent afin d'induire un courant lors de la rotation de notre hélice. Nous devions dans ce cas prévoir une génératrice.

La génératrice est munie d'une partie fixe (le stator) et d'une partie mobile (le rotor). Ces deux parties sont séparées par ce que l'on appelle l'entrefer pour éviter les frottements.

Le rotor de la génératrice est entraîné par l'arbre mis en rotation par la force du vent et génère un champ magnétique tournant puisque les aimants sont fixés au rotor. Si l'on place des conducteurs électriques à proximité de ce champ magnétique variable (spatialement), une force électromotrice induite (f.e.m.) apparaît aux bornes de ce conducteur par la loi de Faraday5 et créé par la suite un courant induit :

$$e = \frac{d\phi}{dt} \quad (5)$$

C'est pourquoi nous devions placer une bobine (bobine du stator) à proximité de ce champ et le plus proche du rotor de manière à éviter au maximum le flux magnétique de fuite dans l'entrefer. Cette bobine aurait alors vu un flux variable et aurait été le siège d'une f.e.m. induite.

Si la bobine est connectée à une charge, un courant électrique va circuler.

Le courant qui circule à l'intérieur d'une bobine composée de N spires se calcule selon l'équation :

$$I = \frac{B \cdot 2 \cdot r}{\mu_0 \cdot N} \quad (6)$$

Dans laquelle :

B est le champ magnétique passant au centre de la spire. L'unité est le Tesla [T].

r est le rayon de la spire exprimé en mètres [m].

μ_0 est la perméabilité du vide dont l'unité est le [T^*m/A].

N est le nombre de spires.

12.5 matériaux

Pour imprimer notre hélice nous étions partis pour utiliser comme matière du Nylon 12. Il s'agit d'une poudre qui forme un matériau ductile, solide et flexible utilisé lorsque la durabilité et les performances sont essentielles.

Matériaux	Nylon12
Résistance à la rupture par traction	50 MPa
Module de traction	1850 MPa

Selon la référence ([2]) Au vu des caractéristiques du Nylon, une étude de résistance n'était pas nécessaire. Celui-ci aurait été suffisamment solide pour notre application.

Au niveau du **rendement**, une très légère perte de vitesse aurait été observée dû à la rugosité de l'impression. C'est pourquoi un polissage par grenailage aurait dû être fait sur chacune des hélices pour les rendre les plus lisses possible.

Le coût d'une hélice de 19 cm de diamètre en Nylon 12 est beaucoup trop cher. En effet, le volume d'une hélice est de 1,4 Kg pour un prix selon ([3]) de 100 euros/Kg. Ce qui est beaucoup trop important selon nous pour notre application. C'est pourquoi nous avons décidé de changer de matériau.

13 Étude TRIIP

13.1 Introduction

Dans le cadre du mur à vent, nous allons réaliser une étude **TRIIP**. Nous pensons que le mur à vent convient parfaitement à ce genre d'exercice. En effet, *Triz* va nous aider à développer au mieux nos idées. En accord avec lui, nous ne considéreront pas que la solution réside dans son propre domaine de compétence. Nous rechercherons la pluridisciplinarité grâce à différents outils qui nous aiderons à reformuler les problèmes différemment.

Voici les points clés de notre étude **TRIIP** complète :

- MVP
- Réseau de problème
- Matrice multi-écrans
- **RIF** : Résultat Idéal Final - Méthode des six chapeaux
- Les lois d'évolution
- Contradictions physiques et techniques
- Résolution des contradictions par les 40 principes inventifs issus de la matrice inventive
- Opérateur Dimension Temps Coût
- AskNatur

13.2 MPV : Main Parameter of Value

Il faut amener au moins une innovation. Le mur à vent est un concept unique qui n'existe pas, ou du moins nous n'en avons jamais entendu parlé.

$$P * V * R > \omega$$

où..

P correspond aux problèmes prioritaires

V correspond à l'ambition du projet

R représente les critères de réussite

ω correspond au client

13.2.1 Les clients potentiels

- les entreprises énergétiques
- les consommateurs d'énergie (particuliers)
- les concepteurs du mur à vent

- les services publiques
- les revendeurs
- SPF environnement
- les fabricants d'hélices
- les recyparcs

13.2.2 Les paramètres

- la cinétique du vent
- la conversion d'énergie en électricité
- le dimensionnement du mur à vent
- l'emplacement du dispositif
- le stockage de l'énergie
- le rendement global de l'installation
- le coût
- L'orientation des pâles, le bruit des pâles

Ensuite, on peut représenter les paramètres et les associer selon leur importance à chaque client, voir tableau ci-dessous :

Ce tableau récapitulatif nous permet d'en sortir les MPV, et d'établir nos objectifs.

- Vision : amélioration de tous les MPV
- Réussite : amélioration des MPV les plus conséquents selon le tableau 13.2.2

angle=90

	cinétique du vent	conversion énergie	dimensionnement	emplacement	stockage	rendement
entreprises énergétiques	X	XXX	XX	X	XXX	XXX
consommateurs d'énergie	X	XXX	XXX	XX	XXX	XXX
concepteurs du mur à vent	XXX	XXX	XXX	X	XX	XXX
services publiques	X	XX	XX	XXX	X	XX
revendeurs	X	XXX	XX	X	XX	XXX
SPF Environnement	XX	X	X	XXX	X	XX
recyparcs	X	X	X	X	X	X
fabricants hélices	XXX	X	XXX	X	X	XXX
total	13	17	17	13	14	20

En analysant le tableau ci-dessus, on remarque que 2 MPV sortent du lot. Il s'agit du rendement ainsi que la conception des pales. Ces deux paramètres étant fortement liés, il n'est pas surprenant de les voir tous les deux à ce niveau. De plus, dans le cas de notre mur à vent, on part sur l'idée de petites structures modulables qui fourniraient de l'énergie à partir d'une faible vitesse du vent. Le rendement paraît donc quelque chose d'essentiel car il s'agira d'une faible production d'énergie.

Ensuite, 3 autres MPV suivent de peu les deux premiers. Il s'agit du coût, du dimensionnement et de la conversion d'énergie. Il est évident que le coût est quelque chose d'essentiel mais ce n'est pas sur cela que nous allons travailler en priorité. Nous allons plutôt travailler sur le dimensionnement de notre "ventilateur" ainsi que sur la conversion d'énergie car ces deux paramètres vont justement permettre l'amélioration du rendement de notre installation.

Nous allons aussi juste dire un petit sur le client potentiel recyparc. De base, l'idée que nous avions grâce à Monsieur Renson, étaient de travailler avec de petits ventilateurs récupérés d'ordinateurs. Les recypars nous auraient donc permis d'en obtenir. C'est pourquoi ce client intervient que très peu dans les MPV.

13.3 Réseau de problèmes

Le réseau de problèmes à la figure 25 est une cartographie des problèmes techniques à résoudre (rouge) et les solutions envisagées aboutissant peut-être à un(des) nouveau(x) problème(s) (jaune) ou une solution (en vert).

Étant donné l'inaccessibilité du logiciel qu'est *xPERT-O⁷*, nous utiliserons le logiciel *PowerPoint* dans le but d'illustrer notre réseau de problème de la plus explicite des manières.

Nous utiliserons la couleur bleue pour représenter les sujets de questionnements, couleur rouge pour représenter les problèmes, la couleur jaune pour représenter des solutions menant à d'autres problèmes, et enfin la couleur verte pour les solutions finales.

Nous ne jouerons pas sur la taille des différentes "bulles" pour représenter la taille plus importante d'un problème comparé à un autre.

⁷. En effet lors de la conception du réseau de problème lorsque l'on se redirige ce dernier nous renvoie vers une URL douteuse

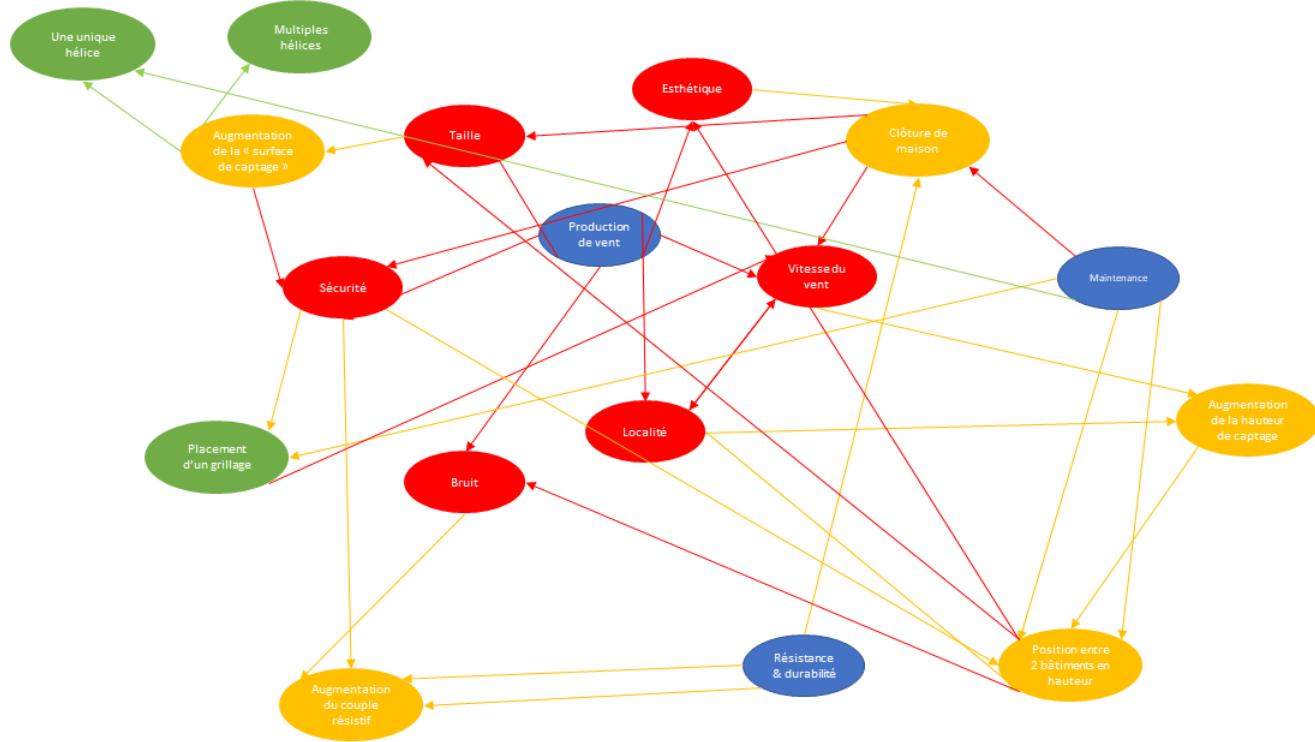


FIGURE 25 – Réseau de problèmes

13.4 Les problèmes techniques à résoudre

- La conversion d'énergie éolienne en énergie mécanique puis en électricité.
- Le stockage d'énergie (à déterminer si c'est possible).
- Avoir un bon rendement en tenant compte de la limite de betz.
- Le dimensionnement du produit dans son ensemble en tenant compte du fait qu'il doit être modulable.
- La conception des pales.

13.5 Les conditions minimales de réussite

- L'énergie que le vent peut nous fournir est de 80 Watts comme calculé à l'équation 3. De la, nous sommes limités par la limite de Betz, le rendement mécanique du rotor et le rendement électrique du générateur.
- la conception de modules de tailles raisonnables (30x30x15cm) pour permettre un assemblage polyvalent.
- Pouvoir obtenir un puissance d'une centaine de Watts
- un dispositif déjà fonctionnel à partir d'un vent de 3m/s.

13.6 Matrice multi-écrans

Voici notre matrice multi écran du mur à vent. On a essayé de représenter au mieux les différents systèmes et sous systèmes.

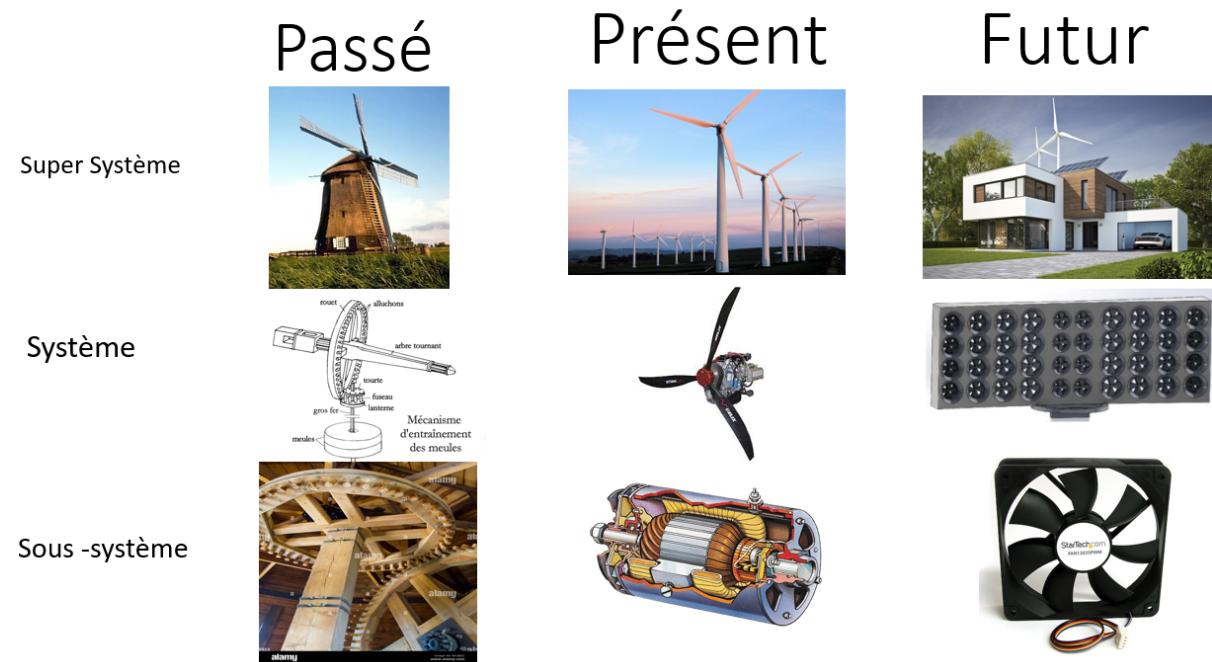


FIGURE 26 – Matrice multi-écran

13.7 Etude systémique et fonctionnelle des 9 écrans de la matrice

13.7.1 Passé

a) Système

Systémique : engrenages, pignons, crémaillères, arbres, dentures, axes, roues

Fonctionnel : entraîner, broyer, moudre

Explications : Les pales du moulin en tournant entraîne un axe composé d'engrenages qui permet de faire tournée une roue. Cette roue broie alors les grains de blé ce qui permet d'en faire de la farine

b) Sous-système

Systémique : ailes, axes, système de rotation, pales

Fonctionnel : tourner, orienter, pivoter

Explications : Le vent présent dans la nature fait tourner les ailes du moulin ce qui permet d'entraîner un axe. Cet axe comme décrit ci-dessus va permettre de moudre le blé.

c) Super-système

Systémique : Moulin-tour, ailes, vent, bâtiment, calotte orientable, toiture, pivot

Fonctionnel : moudre, broyer, tourner

Explications : Le moulin à vent est un dispositif qui transforme l'énergie éolienne en mouvement rotatif au moyen d'ailes ajustables. Il permet de moudre des céréales ou d'actionner une pompe.

13.7.2 Présent**a) Système**

Systémique : Arbre, rotor, alternateur, convertisseur, transformateur, dynamo, génératrice

Fonctionnel : Tourner, produire, convertir

Explications : Le vent permet de faire tourner des pales qui elles-mêmes font tourner un rotor. Celui-ci entraîne un arbre lié à un alternateur. Ce dernier produit un courant alternatif.

b) Sous-système

Systémique : électricité, générateur, courant continu, énergie mécanique, induction

Fonctionnel : Produire, convertir, induire

Explications : La dynamo convertit de l'énergie mécanique en énergie électrique en utilisant l'induction électromagnétique. C'est une machine électrique à courant continu.

c) Super-système

Systémique : Axe, rotor, pales, mât, nacelle

Fonctionnel : Transformer, tourner, générer, produire

Explications : Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, laquelle est ensuite le plus souvent transformée en énergie électrique.

13.7.3 Futur**a) Système**

Systémique : Mur, alvéoles, ventilateurs, venturi, modules, prises mâles et femelles, vent, haies, clôture, courant d'air

Fonctionnel : Assembler, produire, générer

Explications : Le mur à vent est un ensemble de modules qui permet de récupérer l'énergie cinétique du vent pour la transformer en électricité. Ce dispositif a pour but de pouvoir se placer n'importe où.

b) Sous-système

Systémique : hélices, turbines, vent, courant d'air, dynamo, énergie cinétique,mécanique,électrique

Fonctionnel : Produire, générer, convertir

Explications : Il s'agit d'un module qui compose le mur à vent. Comme ce dernier, il récupère l'énergie cinétique du vent pour la transformer en électricité.

c) Super-système

Systémique : Maison, décor, mur, électricité, indépendant,

Fonctionnel : ne pas dépendre, générer, fournir

Explications : Le but de ce super-système serait que grâce au mur à vent ainsi qu'à d'autres énergies vertes, un bâtiment puisse être indépendant d'un point de vue énergétique.

13.8 RIF

13.9 Méthode des six chapeaux

La méthode des chapeaux consiste à étudier le problème de différentes visions de manière à trouver des solutions et d'approfondir les problèmes.

De manière à illustrer cette démarche, la figure 27 ci-dessous explique chacun de ces 6 chapeaux.

Il existe 6 différentes couleurs de chapeaux cependant seulement 5 sont amenées à une certaine réflexion.



FIGURE 27 – Explications de la démarche des 6 chapeaux

En effet la couleur du chapeau bleu est utilisée pour mener au but le processus et ainsi éviter que le groupe ne viennent à dévier de sa trajectoire.

13.9.1 Chapeau blanc

Description : Ce couvre-chef représente la neutralité. L'objectivité est le maître mot dans le seul but d'énoncer les informations qui sont à disposition. Généralement lorsque l'on énonce des faits, nous pouvons nous référer à des statistiques ou des données.

Analyse : Grâce à l'étude menée au point 3.2 nous pouvons évaluer notre projet sur base de résultats chiffrés. Nous avons déjà appliquer le principe physique de l'effet venturi augmentant la pression par l'augmentation de la vitesse du vent.

Nous expliquons également qu'il est impossible physiquement, par la limite de Betz de récupérer 100% de l'énergie du vent⁸.

13.9.2 Chapeau rouge

Description : Le chapeau rouge met en avant l'émotionnel. C'est désormais la subjectivité qui prend le dessus sur l'objectivité, les différentes informations que l'on apporte seront toutes apportées avec des sentiments.

Analyse : Dans un contexte énergétique aussi conséquent que celui dans lequel nous nous trouvons, aucune perte d'énergie ou petites sources de production n'est à négliger, c'est pour cela qu'une conception à l'aide de matériaux recyclés et la réutilisation sont à nouveau favorisés. Étant donné notre orientation en énergie durable, il va de soi que nos choix seront guidés par notre sentiment de protection et de conservation de la planète. Nous placerons au centre la protection et conservation de l'environnement lors de notre réflexion.

13.9.3 Chapeau noir

Description : Ce type de chapeau apporte l'unique version négative de ce projet, aux yeux du chapeau noir, il n'existe rien de positif, ce qui fait ressortir l'entièreté de la face caché que le concepteur peut se cacher à lui-même.

Analyse : Selon le cahier des charges et suite à une réunion en compagnie de Monsieur Renson nous nous sommes rendus compte de la difficulté esthétique et en matière de sécurité à laquelle nous faisons face. Puisque notre générateur doit être utilisé tel une clôture, il va de soi que pour que ce dernier soit vendu, son aspect visuel est primordial Un simple bloc de plastique avec une hélice est inconcevable.

De plus, le composant rotatif est un danger pour toutes les personnes qui circulent aux alentours. A une vitesse de rotation élevée il représente un risque pour l'utilisateur et les usagers du trottoir. Avec une météo variable il se pourrait que nos hélices soient abîmées, voir même détruites si il vient à grêler. Il est nécessaire de prévoir une sorte de "parapluie" aux différentes intempéries pour éviter toutes destructions.

Avec une installation en mode "LEGO", la panne d'un des modules peut entraîner l'arrêt de l'ensemble de l'installation.

8. Dire que l'on récupère 100% de l'énergie du vent serait abérant car cela signifierait que le vent posséderait une vitesse nulle, et donc que ce dernier viendrait à s'arrêter après son passage au travers de l'hélice

Des animaux tels que des oiseaux peuvent se blesser et venir endommager le dispositif. Enfin la vitesse de rotation implique une pollution sonore, au plus cette dernière sera importante et au plus les décibels [dB]⁹ augmentent.

13.9.4 Chapeau jaune

Description : Ce chapeau apporte uniquement la vision idéliste du projet qu'importe ce qui peut se placer sur son chemin. Il représente l'optimisme, comme si n'importe quelle invention peut être menée à bout parfaitement sans embûches.

Analyse : Ainsi placer dans un endroit idéal où le vent s'engouffre, la puissance que pourra générer ce ventilateur de récupération sera équivalente à celle qu'il aurait consommé de manière inverse en moteur et non générateur. Le vent serait également de passage dans ce rétrécissement avec une vitesse constante ce qui permettrait de générer une puissance constante et maximale.

Le ventilateur possède également une masse insignifiante ce qui signifierait que l'inertie de rotation est négligeable et donc l'entièreté de l'énergie récupérée grâce au vent serait entièrement utilisée dans la production de l'énergie électrique.

Le dispositif fournit de l'énergie électrique à partir d'un vent de quelques dixièmes de km/h. Il n'a pas besoin d'un vent minimale pour son amorçage.

Le mur à vent a une résistance infinie. Il n'a pas besoin de maintenance, les pièces ne s'usent pas, ne cassent pas.

La météo en Belgique est idéal. Le vent est constant et parfait pour notre ventilateur. Il n'y a pas d'intempéries ni de conditions extrêmes pouvant poser des problèmes à notre dispositif.

Le coût de l'installation est minime ce qui entraîne de grands bénéfices.

Il n'y a aucun animal qui peut dégrader le mur à vent.

13.9.5 Chapeau vert

Description : Le chapeau vert sort de l'ordinaire à l'aide de sa créativité. Pour ce dernier chapeau il faudrait "adopter l'esprit d'un enfant" innocent de toutes notions mais qui est pourtant une mine d'or lorsque l'on s'intéresse à son imagination. En effet ce chapeau adapte la solution au problème sous différents angles. Pour cela nous pouvons utiliser la "technique des petits bonshommes", les "*Smart Little People*".

Analyse : L'esthétique peut s'envisager autrement que comme une clôture. Il existe bien d'autres surfaces utilisables sur une habitation que pour uniquement se concentrer sur une clôture qui de plus n'est pas apprécié par tous les utilisateurs.

La production peut être conçue par une éolienne à axe horizontal ou vertical. Chacune présentant ses avantages et ses inconvénients, il sera de notre devoir de décider quelle piste nous explorerons pour réaliser ce projet.

9. Unité utilisée pour quantifier l'intensité sonore.

Dans un premier temps, nous pourrions imaginer qu'une infinité de petits bonshommes soufflent de manière homogène sur notre éolienne de manière optimisée (une vitesse de vent pour un rendement maximale, inférieure à celle de décrochage¹⁰).

Ensuite, nous pourrions également envisager les *smart little people* comme des petites batteries qui emmagasinent l'énergie récupérée. Dans cette optique, on peut imaginer que l'énergie disponible est moins "importante" puisque celle produite est stockée dans les petits bonshommes. Lorsque la demande en énergie est plus importante, les petits bonshommes n'ont plus qu'à renvoyer cette énergie. De plus, les différents constituants de la machine (pâles, arbre, roulements,...) sont fabriqués à l'aide de ces petites créatures considérées parfaitement lisse et comme de parfaits conducteurs (absence de frottements, pas de pertes par effet Joule dans les câbles,...). Ainsi, le rendement global de la machine est uniquement limité par la physique du problème (limite de Betz) et donc, l'énergie récupérée est maximale, soient exactement $\frac{16}{27} \approx 59,3\%$.

Le principe d'une turbomachine est de récupérer de l'énergie par modification du triangle des vitesses. A cet effet, les pâles subissent un effort de torsion plus ou moins importante selon la taille de celles-ci. Dans notre cas, l'éolienne étant assez petite, il n'est pas nécessaire de calculer cet effort et en déterminer l'impact sur la résistance des matériaux, mais tant qu'à faire, puisque nous avons à disposition une infinité de *smart little people*, ceux-ci vont se pousser pour créer une force reprenant l'effort.

Pour capter un maximum d'énergie nous pourrions également imaginer que des petits bonshommes dirigent les pales pour que ces dernières soient positionnées dans la même direction que le vent tel une girouette. C'est ce qui se fait dans une vraie éolienne : une girouette est placée sur la nacelle et est reliée au SCADA (système de contrôle électronique qui adaptent différents paramètres de la machine en fonction des signaux reçus par les capteurs) qui va ajuster l'orientation de la nacelle face au vent.

Enfin, une des difficultés pour quantifier les quantités d'énergie mises en jeu dans notre machine est de pouvoir mesurer l'énergie récupérée de manière théorique. En effet, le rendement d'une machine est très dépendant de la mécanique de l'installation. Ainsi, pour mesurer une énergie récupérée, il faut calculer la vitesse de vent avant l'éolienne et après l'éolienne (détermination du C_p). Ensuite, mesurer la puissance électrique récupérée qui est, de nouveau, une proportion du C_p . Une fois que les petits bonshommes auront été remplacés par des vraies pâles, vrais dispositifs mécaniques, nous pourrions imaginé un "banc d'essai" grâce à eux : puisque l'énergie récupérée est leur seul alimentation, il suffit de les faire courir jusqu'à leur dernier soupir (oui, c'est cruel mais bon!) et relever l'énergie dépensée sur leur *Apple watch*.

10. Ce que nous appelons vitesse de décrochage, c'est la vitesse maximale que les composants mécaniques peuvent supporter avant d'être endommagés

13.10 les lois de l'évolution

Les lois d'évolutions des systèmes techniques constituent une synthèse des principes TRIZ. Ces lois sont au nombre de 8 et sont classées selon 3 catégories : les lois statiques (3), les lois cinématiques (3) et les lois dynamiques (2). Afin d'utiliser ces lois, nous en avons choisi une de chaque catégorie en essayant de la relier directement à un élément clé de notre projet.

13.10.1 loi d'évolution statique

La loi d'évolution statique que nous avons choisie est celle de la conductibilité énergétique d'un système. Cette dernière dit que pour qu'un système fonctionne, l'énergie doit pouvoir circuler librement et sans pertes entre l'élément moteur, l'organe de transmission, l'organe de travail et l'organe de contrôle.

Cette loi va donc nous conduire à examiner la chaîne de transmission énergétique depuis l'entrée jusqu'à la sortie du système et nous permettre de tirer des conclusions sur les sous-systèmes ou les liens entre ces derniers.

Le but est donc de maximiser le rendement en sachant d'une part que d'après la loi de betz, le rendement maximum possible n'est déjà pas de 100 pourcents. Il faudra ensuite analyser les différentes pertes que l'on a dans le processus qui permet de transformer l'énergie éolienne en électricité. Les pertes principales que l'on peut rencontrées sont sans doute :

- Au niveau des câbles qui acheminent l'électricité créée vers le réseau de la maison par exemple ou le moyen de stockage.
- Au niveau de l'onduleur qui transforme le courant continu en courant alternatif utile pour le réseau domestique.
- Au niveau du générateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

13.10.2 loi d'évolution cinématique

La loi d'évolution cinématique que nous avons décidé de mettre en avant, est la loi du développement inégal des parties d'un système. Cette dernière dit que les différentes parties d'un système technique peuvent évoluer indépendamment et de manière inégale. Cette loi consiste à déterminer le maillon faible d'un système et de l'optimiser afin qu'il ne nuise pas à la qualité de ce système.

Dans ce système, les diverses parties qui le composent peuvent évoluer différemment. Il est donc indispensable de travailler sur les parties qui tirent le système global vers le bas.

La partie sur laquelle nous pensons qu'il faut travailler le plus, en dehors du rendement global, est la vitesse du vent. En effet, pour délivrer une puissance, d'après la formule décrite au début du document, celle-ci est élevée au cube. De plus, étant donné que la loi de Betz nous limite déjà dans le rendement, il en va de soi que nous devons travailler là-dessus. L'approche venturi nous permet déjà d'imaginer une optimisation de la vitesse du vent mais il existe sans doute de quoi améliorer le système en se penchant peut-être d'avantages sur le ventilateur à proprement parler. On peut penser à la forme des hélices par exemple.

Un point sur lequel on doit sans doute travailler aussi est le stockage de l'énergie. celui-ci est quelque chose qui, d'un premier point de vue, n'est pas essentiel au projet mais qui pour nous apporterait un réel plus à l'ensemble du mur à vent. On sait à quel point le stockage de l'énergie notamment dans des dimensions raisonnables est compliqué actuellement. Il faut aussi penser au fait que dans la conception du mur à vent qui utilise une énergie propre, le recyclage des batteries n'est pas quelque chose à délaisser.

13.10.3 loi d'évolution dynamique

La loi d'évolution dynamique qui nous a permis de réaliser un lien clair et surtout de développer une idée de conception est la loi de transition d'un macro-niveau vers le micro-niveau. Cette loi se traduit notamment par la miniaturisation de nombreux composants, et par l'intégration de fonctions toujours plus nombreuses dans les systèmes techniques.

Cette loi représente déjà l'idée globale de notre projet. En effet, l'idée du mur à vent est de créer une micro-structure modulable qui permet alors différents assemblages selon l'environnement dans lequel on souhaite le mettre en place. Ces micro-structures ressemblent fortement à de petites éoliennes dont on connaît le principe de fonctionnement. L'idée est donc de partir sur le même principe que l'éolienne en modèle réduit avec des ventilateurs d'ordinateurs par exemple.

13.11 Méthode des contradictions

La méthode des contradictions exposent les points positifs et négatifs d'une contradiction avant d'être évalués.

13.11.1 Première contradiction : Sécurité

La sécurité est un point capital lors de la conception d'un nouveau produit. Il est impératif que le produit n'atteigne physiquement aucun individu se trouvant dans son entourage et pour cela nous devons être au plus proche du risque 0.

Nous envisageons de placer un grillage devant les différentes prises d'air des hélices ce qui pose la contradiction à la figure 28 pour laquelle nous comparons la vitesse du vent et l'esthétique que peut amener le grillage.

Ce qui nous intéresse selon la figure 28 est un produit utilisant pleinement l'énergie disponible du vent tout en possédant une esthétique irréprochable. En fonction de si l'utilisateur souhaite également que ça ne viennent uniquement perturber sa vision mais que au contraire l'esthétique extérieure ne l'intéresse pas cette contradiction n'en est plus une et un simple grillage utilisé comme "cover" en aval n'a aucun impact sur la vitesse du vent que peut recevoir les hélices.

Nous utiliserons la contradiction suivante :

Paramètre à conserver : Une esthétique attrayante cachant la mécanique.

Paramètre à améliorer : La vitesse du vent ne doit pas être diminuée par le grillage.

Ce qui nous ramène selon la figure 34 au croisement entre la ligne n°9 de vitesse et la colonne n°12 de forme.

Les principes résultants de ce croisement sont les principes suivants : 35,15,18,34 cités au tableau 6.

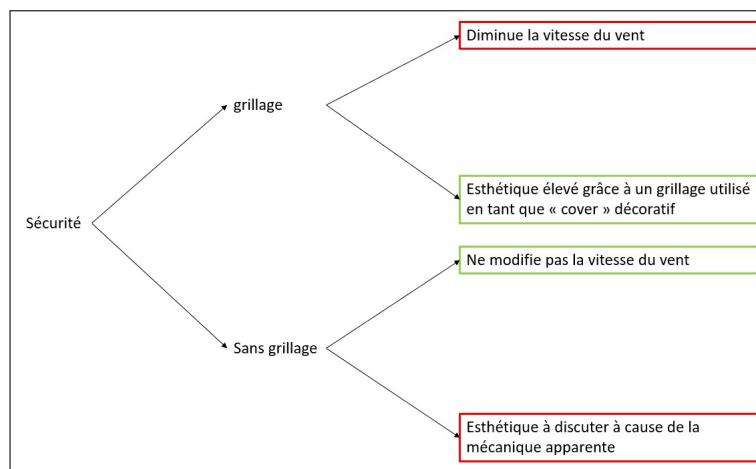


FIGURE 28 – Contradiction en matière de sécurité

18 :Vibrations mécaniques Ce principe inventif qui ressort étonnamment est une des références offerte par Monsieur RAUSIN dans une des annonces à propos d'une technologie innovante de récupération d'énergie à l'URL en note de bas de page.¹¹. Malheureusement dans l'optique d'utiliser d'anciens ventilateurs de refroidissement d'ordinateurs cela n'est pas possible.

13.11.2 Seconde contradiction : Nombre de pales

Pour cette deuxième contradiction nous mettrons face à face le nombre de pales en matière de vitesse du vent et de rendement. De manière à mieux illustrer nos propos nous utiliserons la figure 29.

Ce graphique permet de mettre en avant qu'un nombre de pales importants diminue la vitesse minimale nécessaire pour mettre en rotation les hélices¹² tandis qu'une unique hélice permet d'atteindre des rendements très important mais la vitesse nécessaire pour la mettre en rotation est également très élevée¹³.

Ce qui nous intéresse selon la figure 30 est une hélice en faible vitesse de rotation mais récupérant cependant le maximum d'énergie au vent.

Nous confrontons désormais une vitesse de rotation avec une récupération d'énergie.

Paramètre à conserver : faible vitesse de rotation.

Paramètre à améliorer : récupération d'énergie.

Ce qui nous ramène selon la figure 34 au croisement entre la ligne n°19 de vitesse et la colonne n°9 de forme.

Les principes résultants de ce croisement sont les principes suivants : 35,8 cités au tableau 6.

8 :Contrepoids Compenser le poids de l'objet par l'interaction avec son environnement. Par l'effet de portance attribué par la géométrie de la pale cela créé une pression sur l'intrados d'une pale et une dépression sur l'extrados comme le montre la figure 31. Ce principe serait également lié au principe n°4 étant la longueur d'un objet statique.

11. <https://trustmyscience.com/appareil-capable-convertir-legere-brise-electricite/?fbclid=IwAR1JyEX-zJy4hfTUCDobzerOKpPB84HZGkSYoWe7nAecVFFBSObjNkk6Kv4>

12. L'intervalle réduit de vitesse d'une telle géométrie d'éolienne implique un décrochage rapide lorsque les vitesses deviennent trop importantes.

13. Sur la figure 29 on peut remarquer que les éoliennes actuellement construites sont les éoliennes à 3 pales.

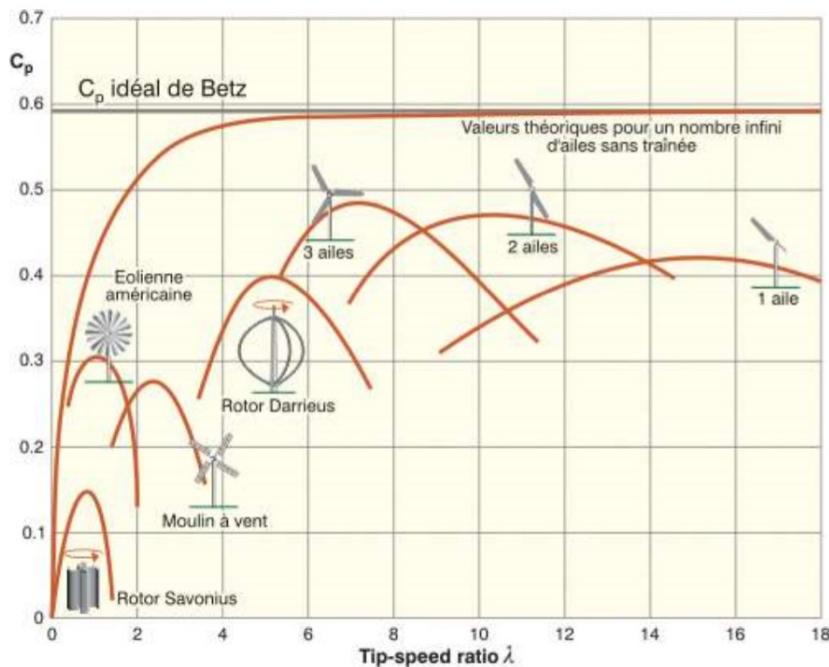


FIGURE 29 – Rendement fonction de la vitesse pour différentes géométries d'éoliennes
([4])

Nous pourrions envisager d'utiliser des pales avec une géométrie modifiée par rapport à la géométrie actuelle que propose un simple ventilateur étant donné que ces derniers sont conçus dans le but d'envoyer un débit important d'air dans l'ordinateur pour le refroidir mais ne sont pas construits dans le but de recevoir de l'énergie.

13.11.3 Troisième contradiction : Orientation des pales

Cette contradiction intervient sur l'intimité et le rendement que peut induire l'orientation des pales. Contrairement à la contradiction précédente il ne faut pas confondre vitesse du vent et rendement comme nous pouvons l'observer à la figure 29. Ce qui nous intéresse selon la figure 32 est un produit avec un rendement important et offrant une grande intimité comme une clôture "classique" offrirait.

Paramètre à conserver : Rendement important

Paramètre à améliorer : Intimité semblable à celle que peut offrir une clôture classique.

Le croisement de ces paramètres dans la matrice Triz obtiens le croisement entre les principes inventifs n°12,2 et 29 cités au tableau 6.

29 :Pneumatique et hydraulique Également dans un second plan d'une refonte de la géométrie des pales que propose un ventilateur original, des pales remplies de gaz plutôt que d'avoir une pâle solide influençant ainsi la masse à mettre en rotation lors de la récupération de l'énergie cinétique du vent.

2 :Extraction Pour augmenter notre surface au vent nous pourrions utiliser un rotor extérieur et ainsi éviter ce cylindre au milieu de l'hélice occupant une surface non-négligeable sur un si petit appareil.

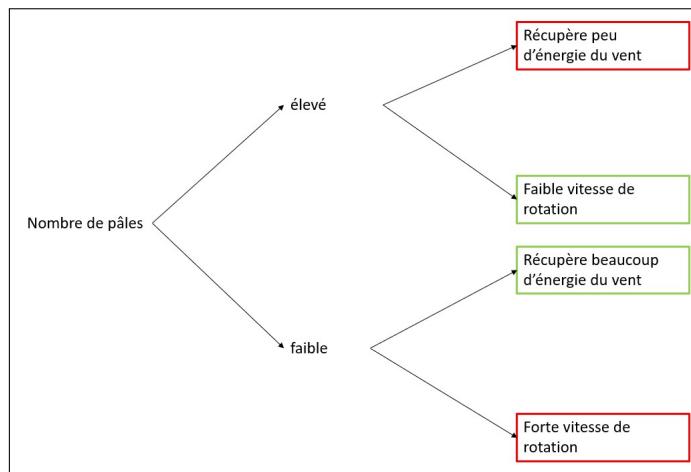


FIGURE 30 – Contradiction en matière du nombre de pales

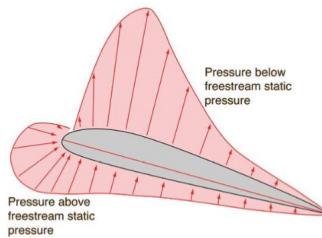


FIGURE 31 – Pression exercée sur une pale ([5])

13.12 Matrice des 40 principes

La matrice illustrée en fin d'analyse triip à la figure 34 est illustrée selon les paramètres à améliorer (la première colonne) et les paramètres à dégrader (la première ligne). Selon le paramètre que l'on désire améliorer au détriment du paramètre que l'on décide de dégrader, correspond une case contenant des numéros faisant référence aux 40 principes inventifs listés ci-après.

Nous utiliserons les différentes contradictions citées au point 13.11 pour trouver le croisement entre le paramètre à améliorer et le paramètre à dégrader pour utiliser les principes inventifs conseillés.

13.12.1 40 principes inventifs

Pour nous aider dans notre recherche des 40 principes inventifs nous utiliserons le site ([6]) offrant des exemples des solutions pour des croisements de paramètres à améliorer conserver prédéfinis.

13.13 Inspiration de la technologie fournie par la nature

Pour ce point nous utiliserons le site *AskNature* répertoriant de nombreuses innovations issues des technologies que la nature nous offre. Nous pouvons en retenir certaines pour notre application :

Sycamore technology ([7]) Inspirée de la feuille de Sycamore.

Cette technologie inspirée de la géométrie de la feuille de sycamore permettrait de créer un important

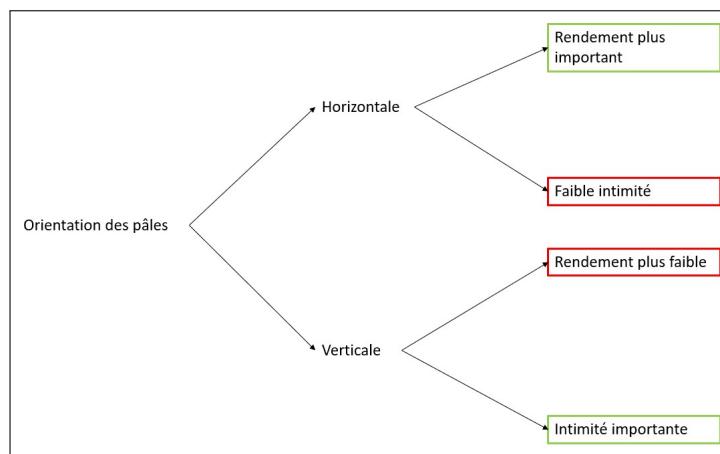


FIGURE 32 – Contradiction en matière d'orientation des pales

flux d'air et cela tout en limitant la nuisance sonore à l'aide de sa géométrie. Avec sa faible vitesse de rotation un ventilateur utilisant cette technologie permet de créer moins de turbulences au passage de la pale et donc limiter le bruit.

Owl fan technology ([8])

Inspirée de la terminaison des ailes des hiboux.

Les ailes des hiboux ont une terminaison irrégulière avec de nombreuses pointes ce qui leurs permet de rester furtives lorsque ces dernières chassent et viennent à piquer sur leur proie soudainement. La compagnie *Ziehl-Abegg AG* a ainsi inventé leur modèle de pales *FE2owlet* faisant de leur ventilateur un ventilateur extrêmement silencieux. La présentation de ce ventilateur se trouve à l'url suivante : <https://asknature.wpenginepowered.com/wp-content/uploads/2020/11/FE2owlet.pdf>

1 Segmentation	21 Grande vitesse
2 Extraction	22 Application bénéfique d'un effet néfaste
3 Qualité locale	23 Rétroaction/asservissement
4 Asymétrie	24 Intermédiaire
5 Combinaison / Synergie	25 Self-service
6 Universalité / Intégration de fonctions	26 Copie
7 "Poupée russes"	27 Éphémère et bon marché
8 Contrepoids	28 Remplacer les éléments mécaniques / Changement de camp, de principe
9 Action inverse préliminaire	29 Système pneumatiques et hydrauliques
10 Action préliminaire	30 Membrane flexible et film mince
11 Protection préliminaire	31 Matériaux poreux
12 Equipotentialité	32 Changement de couleur
13 Retourner le problème / Inversion	33 homogénéité
14 Sphéroïdale	34 Éliminer récupérer
15 Mobilité	35 Changement de paramètres / Changements de phase
16 Action partielle ou excessive	36 Transitions de phases / Phénomènes associés aux changements de phases
17 Changement de dimension	37 Dilatation thermique
18 Vibration mécanique / vibrations	38 Oxydants puissants / intensifier
19 action périodique	39 atmosphère inerte
20 Grande vitesse	40 Matériaux composites

TABLE 6 – 40 principes inventifs

Shark skin technology([9]) Inspirée de la peau des requins.

Il a été démontré que la peau du requin possède des sillons alignés dans le sens du flux de l'eau ce qui permet à ce dernier de diminuer son coefficient de résistance au frottement. Une imitation de cette peau de requin sur des rotors de turbines à permis à ces dernières de gagner jusqu'à 6% d'efficacité¹⁴. Additionné avec d'autres technologies il est possible de récupérer jusqu'à 10% d'efficacité.

En plus d'augmenter la récupération d'énergie de manière significative, ces sillons permettent également de diminuer les turbulences donc de réduire la pollution sonore à vitesse de rotation importante.

KingFisher technology([11]) Inspirée de la manière dont l'oiseau qu'est *Martin-pêcheur* plonge pour attraper sa nourriture.

Cette technologie est une solution au problème qui apparaît au niveau de la surface du rotor des éoliennes¹⁵. En effet ces derniers sont des plus en plus imposants puisque le rendement d'une machine électrique se rapproche de 99% au plus sa taille est importante. Le PowerCone permet de récupérer de l'énergie là où elle n'était pas récupérable auparavant.

De plus il a été démontré que ce dispositif permet de diminuer le coefficient de traînée des pales principales en agissant sur les turbulences de l'air comme le montre la figure ci-dessous.

14. Selon des essais réalisés en laboratoire dans un tunnel de vent([10])

15. Et donc autrement dit par la surface au centre du rotor prise par la cabine contenant la génératrice.

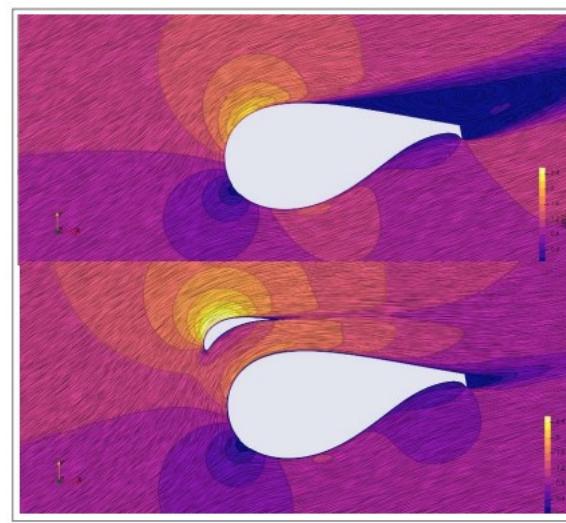


FIGURE 33 – Influence du PowerCone sur les turbulences

Paramètre qui se dégrade (PE2)		Paramètre à améliorer (PE1)		Matrice des 40 principes																																						
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
1	Poids d'un objet mobile	-	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
2	Poids d'un objet immobile	-	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
3	Longueur d'un objet mobile	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
4	Longueur d'un objet immobile	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
5	Surface d'un objet mobile	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
6	Surface d'un objet immobile	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
7	Volume d'un objet mobile	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
8	Volume d'un objet immobile	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
9	Vitesse	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
10	Force	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
11	Tension, pression	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
12	Forme	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
13	Stabilité de la structure de l'objet	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
14	Traînée mécanique	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
15	Dureté d'action d'un objet mobile	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
16	Dureté d'action d'un objet immobile	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
17	Température	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
18	Éclairement	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
19	Énergie dépensée par l'objet mobile	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
20	Énergie dépensée par l'objet immobile	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
21	Puissance	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
22	Porte d'urgence	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
23	Porte de sécurité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
24	Porte d'information	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
25	Porte de temps	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
26	Qualité de substance	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
27	Fidélité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
28	Précision de la mesure	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
29	Precision de fabrication	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
30	Frequence nulle des agressions sur l'objet lui-même	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
31	Fréquence nulle des agressions sur l'objet lui-même	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
32	Commeutte de production	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
33	Commeutte d'utilisation	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
34	Commeutte de réparation	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
35	Polychromatique, adaptabilité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17																								

14 Introduction de la "directive machine"

La directive "Machines" est un texte législatif qui décrit les exigences de santé et de sécurité au cours de l'interaction entre les hommes et les machines dans l'Union européenne.

14.1 Moteurs électriques

La présence d'un moteur électrique au sein de notre installation est à prendre en compte. Cependant, sa faible tension de sortie (12V) réduit le risque.

14.2 Rupture en service

Les dangers associés à la rupture en service peuvent être dus, par exemple, à la ruine de la machine elle-même ou de ses éléments comme l'éjection incontrôlée d'éléments de la machine en raison de la rotation par exemple.

14.3 Chutes ou éjections d'objets

Dans la mesure du possible, la conception et la construction de la machine doivent prévenir la chute ou l'éjection d'objets comme des gravillons ou des éléments de la machine en direction de personnes.

14.4 Éléments mobiles

Le contact avec des éléments mobiles de la machine comme les pâles peut provoquer des blessures ou coupures dans notre cas. Un élément de protection est sûrement nécessaire.

14.5 Mouvements non commandés

Le mouvement non commandé de nos hélices est à prendre en considération. En effet, ce mouvement dépendant du vent et ne nous permet pas une total maîtrise.

14.6 Électricité

Les principaux risques associés à l'énergie électrique sont le choc électrique dû au contact direct avec des parties sous tension ou au contact indirect. Cela peut provoquer des brûlures, des incendies ou des explosion dus à des étincelles électriques ou à une surchauffe de l'équipement électrique. Il est à nous de faire en sorte que cela ne se produise pas.

14.7 Réduction des émissions de bruit

Le bruit en dehors d'être désagréable peut provoquer des problèmes d'auditions à long terme. Dans notre cas, le peu de bruit produit par notre système ne posera sans doute aucun problème. De plus, sa conception a été pensée à cet effet.

15 Analyse de risque Kinney

15.1 Introduction

La méthode Kinney, ainsi appelée du nom de son auteur, est une méthode d'analyse de risque ou plutôt une méthode de hiérarchisation des risques.([12])

Le risque (R) est le produit de trois facteurs :

- la probabilité (P)
- l'exposition (E)
- la gravité (G) des conséquences du risque

Un certain nombre de situations de référence sont déterminées pour chaque facteur : $R = P \times E \times G$

La probabilité est le risque qu'un danger entraîne des dommages. Il faut procéder à une estimation sans tenir compte des mesures de prévention individuelles ou collectives.

Le facteur d'exposition tient compte de la durée et de la fréquence de l'exposition au danger.

Pour estimer le degré de gravité, il faut estimer les plus graves effets éventuels de l'exposition.

En multipliant les trois facteurs ($P \times E \times G$), on obtient un chiffre pour le risque (R). Le score du risque se situe sur une échelle de 1 à 5 où le 1 représente un risque très limité et le 5 un risque très élevé.

Une fois que l'on connaît les "valeurs" des différents risques d'une situation de travail, il est alors possible de les classer et de s'attaquer en premier lieu au plus important.

Le tableau regroupant tous les scores pour déterminer le chiffre du risque se trouve ci-dessous.³⁵

P x F x E	Probabilité P	0,1	à peine concevable	
		0,2	pratiquement impossible	
		0,5	concevable mais peu probable	
		1	peu probable mais possible dans des cas limites	
		3	peu courant	
		6	tout à fait possible	
		10	prévisible	
	Fréquence d'exposition F	0,5	très rare (moins d'une fois par an)	
		1	rare (annuel)	
		2	parfois (mensuel)	
		3	occasionnel (hebdomadaire)	
		6	régulier (journalier)	
		10	continu	
R	Effet E	1	petit	blessure sans perte
		3	important	blessure avec perte
		7	sérieux	blessure irréversible invalidité
		15	très sérieux	1 mort
		40	catastrophe	plusieurs morts
	Score du risque	1	R ≤ 20	risque très limité
		2	20 < R ≤ 70	risque possible
		3	70 < R ≤ 200	risque important
		4	200 < R ≤ 400	risque élevé
		5	R > 400	risque très élevé
				dégâts < 250€
				dégâts entre 250€ et 2.500€
				dégâts entre 25.000€ et 100.000€
				dégâts entre 125.000€ et 250.000€
				dégâts > 250.000€
				acceptable
				attention requise
				mesures requises
				amélioration immédiate requise
				cesser les activités

FIGURE 35 – Analyse de risque Kinney

15.2 Risque de rupture des pales

La rupture de pales pourrait être causée par différents événements comme de grands vents (tempête) ou bien un défaut lors de la fabrication.

La Belgique n'est pas un pays où la fréquence d'intempéries ou de "tempête" est élevée. Les vents ne sont généralement pas assez violents pour provoquer la rupture d'un élément, comme les pales, de notre système.

Dans notre cas, la rupture d'une pale au vu sa dimension, son emplacement et sa légèreté ne causerait aucun dégât.

probabilité	exposition	gravité	résultat	risque
1	1	1	1	1

FIGURE 36 – Score rupture de pales

Le risque R vaut 1 ce qui se situe dans la fourchette 0 à < 20 : risque peu important, sans doute acceptable. La solution serait de "fermer" notre caisson pour que la rupture d'un élément comme une pale ne puisse pas tomber sur quelque chose.

15.3 Risque de projection d'éléments

Divers éléments peuvent être projetés comme de la glace, des objets en suspension dans l'air ou qui proviennent du sol (gravillons). Il s'agit d'une exposition continue. En effet, à tout moment un élément pourrait être projeté que ça soit en journée ou pendant la nuit.

probabilité	exposition	gravité	résultat	risque
3	10	1	30	2

FIGURE 37 – Score projection éléments

Le risque R vaut 30 ce qui se situe dans la fourchette 20 à < 70 : risque possible, attention requise.

La solution serait de mettre une protection extérieure comme un fin grillage de part et d'autre de notre installation. Cela créerait sûrement des turbulences qui réduirait le rendement de notre système.

15.4 Risque d'incendie

Le risque d'incendie est réduit car l'échauffement mécaniques entre les pièces est limité et que le vent ainsi que les températures extérieures ont tendance à refroidir le système. L'exposition est toujours continue.

Le risque R vaut 5 ce qui se situe dans la fourchette 0 à < 20 : risque peu important, sans doute acceptable. Une solution serait d'apporter un système de refroidissement pour limiter ce risque ou installer un système anti-incendie qui se déclencherait en cas de feu.

probabilité	exposition	gravité	résultat	risque
0,5	10	1	5	1

FIGURE 38 – Score incendie

15.5 Risque de court-circuit

Le risque principale est peut-être celui du court-circuit. En effet, nous travaillons avec divers composants électroniques, électriques dont l'utilisation se fait à l'extérieur.

probabilité	exposition	gravité	résultat	risque
1	10	1	10	1

FIGURE 39 – Score court-circuit

Le risque R vaut 10 ce qui se situe dans la fourchette 0 à < 20 : risque peu important, sans doute acceptable.

Une protection correcte est indispensable pour éviter tout accident avec des personnes extérieures. Une protection adéquate et une installation dans les règles devraient limiter ce risque.

15.6 Risque de blessures

Le risque de coupure est lié à la vitesse de rotation importante de nos hélices. Tout objet entrant en contact avec celles-ci pourrait être endommagé. On pense principalement à des coupures/blessures que ça soit pour des animaux ou tout simplement des humains. Ce risque provient principalement du fait que notre mur à vent se situe dans lieux publics ou chez des particuliers à des endroits accessibles.

probabilité	exposition	gravité	résultat	risque
6	10	3	180	3

FIGURE 40 – Score blessures

Le risque R vaut 180 ce qui se situe dans la fourchette 70 à < 200 : risque substantiel, action nécessaire. Une solution serait d'installer une protection devant nos hélices afin de bloquer l'accès à celles-ci. Cette protection créerait cependant des turbulences qui réduirait le rendement de notre installation.

16 Plans de détail

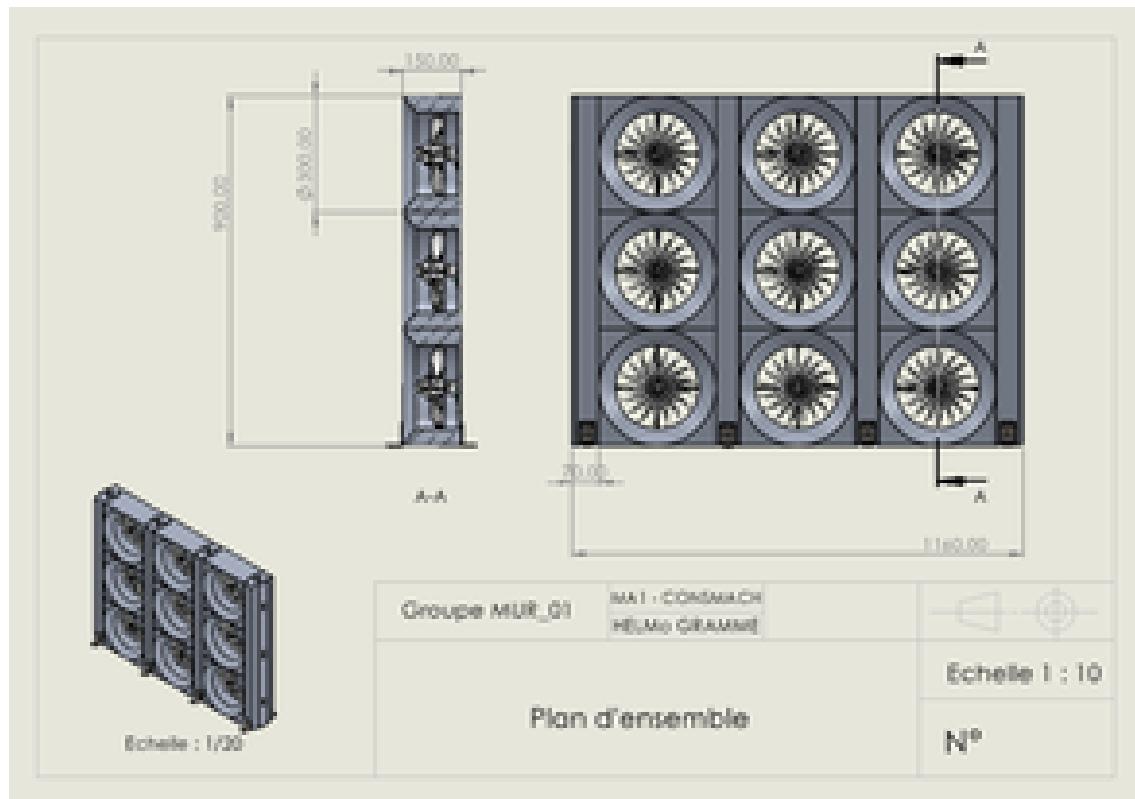


FIGURE 41 – plan d'ensemble

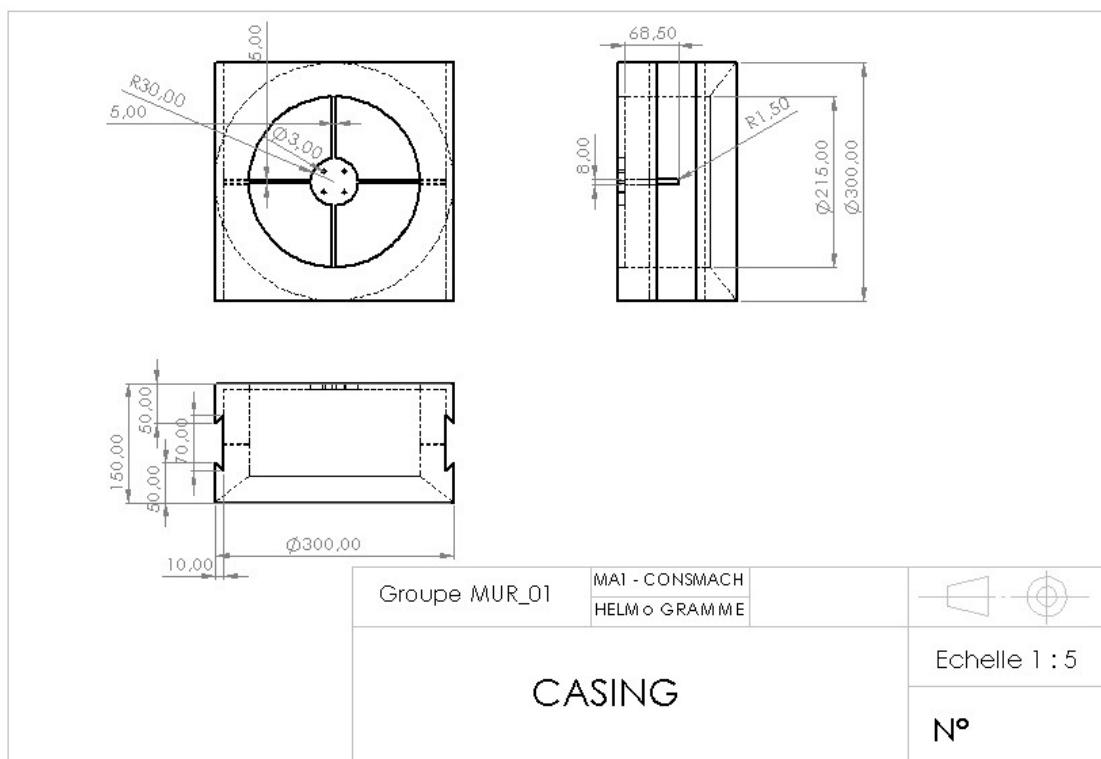


FIGURE 42 – Casing

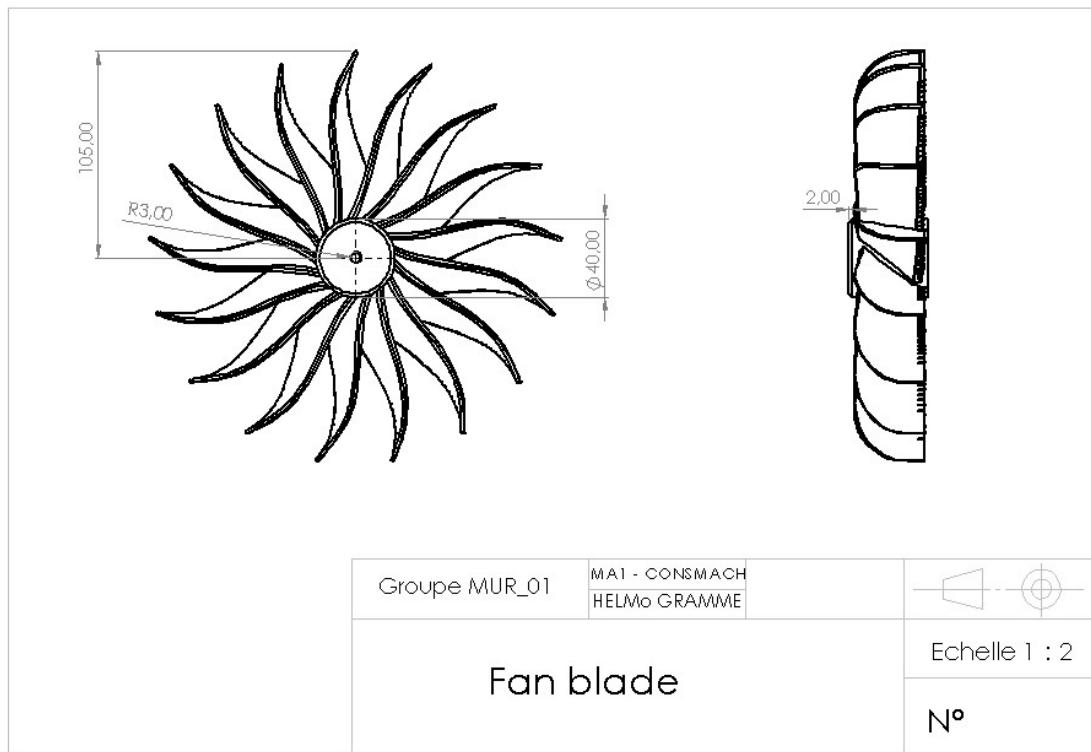


FIGURE 43 – Hélice

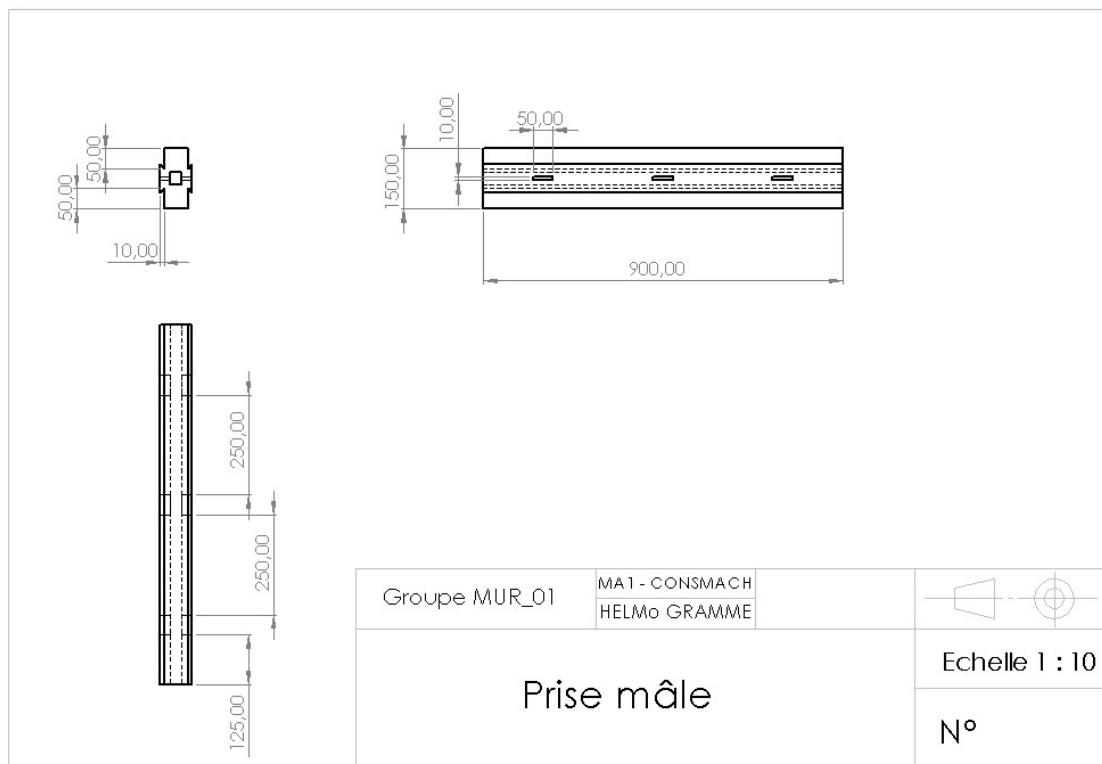


FIGURE 44 – Prise mâle

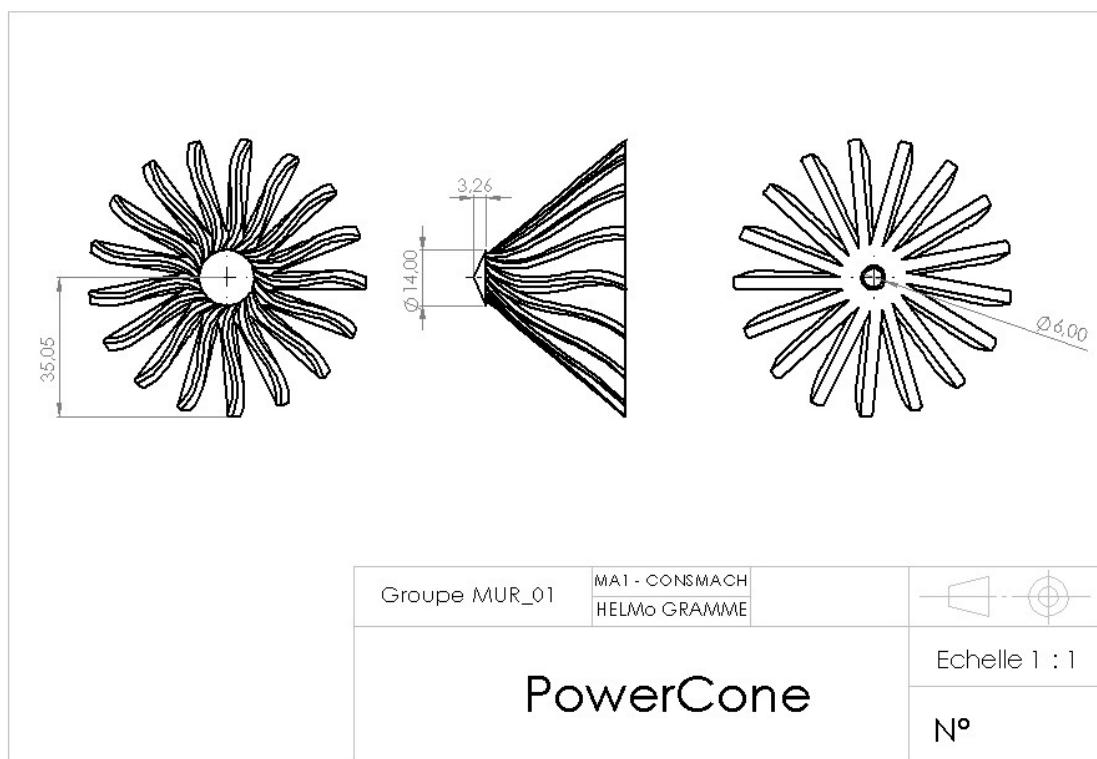


FIGURE 45 – PowerCône

16.1 chaîne de cote

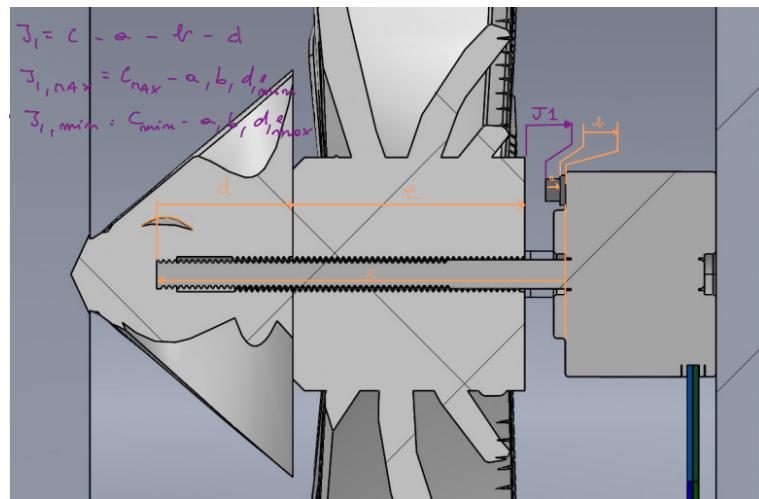


FIGURE 46 – chaîne de cote

Et les choix ont été fait selon :

côte	pièce	normalisé ?	côte min	côte max	IT
a	vis M3	✓	1,8	2,2	0,4
b	rondelette	✓	0,45	0,55	0,1
c	sortie	✗	71,9	72	0,1
d	Poivron cone	✗	28,25	28,64	0,61
e	hélice	✗	40	40,5	0,5

(1) $\bar{J}_2, \text{MAX} = C_{\text{MAX}} - a, b, d, l \text{ min}$
 (2) $\bar{J}_2, \text{min} = C_{\text{min}} - a, b, d, l \text{ max}$
 (3) $\Delta J_1 = \text{it}_a + \text{it}_b + \text{it}_d + \text{it}_l$

FIGURE 47 – jeux

(1)	1 équation \rightarrow 4 inconnues : 3 choix
\rightarrow	$C_{\text{min}} = 40 \text{ mm}$
\rightarrow	$C_{\text{MAX}} = 72 \text{ mm}$
\rightarrow	$J_{1, \text{MAX}} = 0,5 \text{ mm}$
(2)	1 équation \rightarrow 4 inconnues : 3 choix
\rightarrow	$C_{\text{MAX}} = 40,5 \text{ mm} \rightarrow \text{itc} = 0,5$
\rightarrow	$C_{\text{min}} = 71,9 \text{ mm} \rightarrow \text{itc} = 0,1$
\rightarrow	$J_{1, \text{min}} = 0,01 \text{ mm}$
\rightarrow	$d_{\text{max}} = 71,9 - 0,01 - 2,2 - 40,5 - 0,55$ $= 28,64 \text{ mm}$

FIGURE 48 – choix

17 Théorie de Betz

On définit un coefficient de performance C_p propre à chaque éolienne, comparable au rendement d'un moteur thermique, qui dépend directement des caractéristiques de l'éolienne.

La puissance récupérable, P_r , sur l'éolienne est alors définie par :

$$P_r = C_p \cdot P_d \implies C_p = \frac{P_r}{P_d} \quad (7)$$

Pour quantifier la puissance récupérable, on représente la masse d'air par un tube de courant :

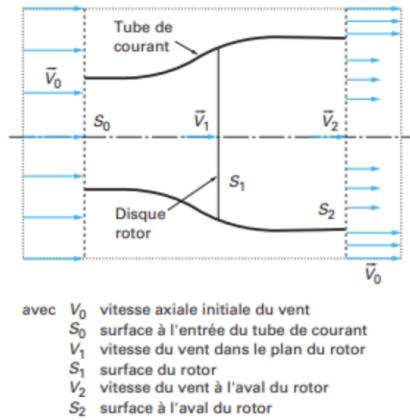


FIGURE 49 – Représentation du tube de courant ([13])

Lorsque les pales interceptent l'énergie cinétique du vent, on observe que :

$$V_0 > V_1 > V_2$$

De plus, si on suppose l'air comme étant un fluide incompressible, nous pouvons écrire la conservation du débit volumique :

$$Q_v = S_0 \cdot V_0 = S_1 \cdot V_1 = S_2 \cdot V_2 \quad (8)$$

La théorie d'Euler permet, quant à elle, d'écrire que la force F s'exerçant sur les pales de l'aéromoteur est donnée par l'expression :

$$F = \rho \cdot S_1 \cdot V_1 \cdot (V_0 - V_2)[N] \quad (9)$$

La puissance absorbée par le rotor vaut donc :

$$P = \rho \cdot S_1 \cdot V_1^2 \cdot (V_0 - V_2)[W] \quad (10)$$

De plus, la masse d'air élémentaire traversant l'éolienne pendant un temps dt est :

$$dm = \rho \cdot S_1 \cdot V_1 \cdot dt$$

La variation d'énergie cinétique de cette masse dm lorsque celle-ci passe de la vitesse V_0 à la vitesse V_2 (donc lorsqu'elle passe la plan du rotor) est définie par :

$$dW_c = \frac{1}{2} \cdot dm \cdot (V_0^2 - V_2^2)$$

La variation d'énergie cinétique de la masse d'air, par seconde, est donc :

$$P_c = \frac{dW_c}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_1 \cdot V_1 \cdot (V_0^2 - V_2^2) [W] \quad (11)$$

En appliquant le principe de conservation de l'énergie et donc, en écrivant que :

$$P_c = P$$

On obtient :

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{\frac{1}{2} \frac{V_0^2 - V_2^2}{V_0 - V_2}}{} \\ \iff V_1 &= \frac{\frac{1}{2} \frac{(V_0 - V_2)(V_0 + V_2)}{V_0 - V_2}}{} \\ \iff V_1 &= \frac{(V_0 + V_2)}{2} \end{aligned}$$

En réinjectant l'expression de V_1 dans celle de P , on trouve la puissance récupérable énoncée par la *théorie de Betz* :

$$\begin{aligned} P_r &= \rho S_1 V_1^2 (V_0 - V_2) \\ \iff P_r &= \rho S_1 \frac{V_0 + V_2}{2}^2 (V_0 - V_2) \\ \iff P_r &= \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S_1 \cdot (V_0 + V_2)^2 \cdot (V_0 - V_2) \end{aligned} \quad (12)$$

• Limite de Betz

On trouve la relation qui existe entre V_2 et V_0 pour que la puissance récupérable passe par un maximum en résolvant l'équation :

$$\frac{dP_r}{dV_2} = 0$$

En dérivant puis en développant mathématiquement, on trouve l'équation du second degré suivante :

$$-3 \cdot V_2^2 - 2 \cdot V_0 \cdot V_2 - V_0^2 = 0$$

dont la seule solution ayant un sens physique est $3 \cdot V_2$

La relation entre V_0 et V_2 est donc :

$$V_0 = 3 \cdot V_2$$

Grâce à cette relation, on peut trouver le coefficient de performance maximum d'une éolienne. Pour rappel, le coefficient correspond au rapport entre l'énergie récupérable et l'énergie disponible. Pour déterminer le

$C_{p_{Max}}$, il suffit de remplacer V_2 par la valeur qui correspond au maximum de puissance, soit $\frac{V_0}{3}$, dans l'expression de P_r on obtient :

$$C_p = \frac{P_{r_{Max}}}{P_d} \quad (13)$$

Avec $P_{r_{Max}} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S_1 \cdot (V_0 + \frac{V_0}{3})^2 \cdot (V_0 - \frac{V_0}{3}) = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S_1 \cdot \frac{32}{27} \cdot V_0^3 = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot S_1 \cdot V_0^3$
 Et $P_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_1 \cdot V_0^3$

Ce qui donne :

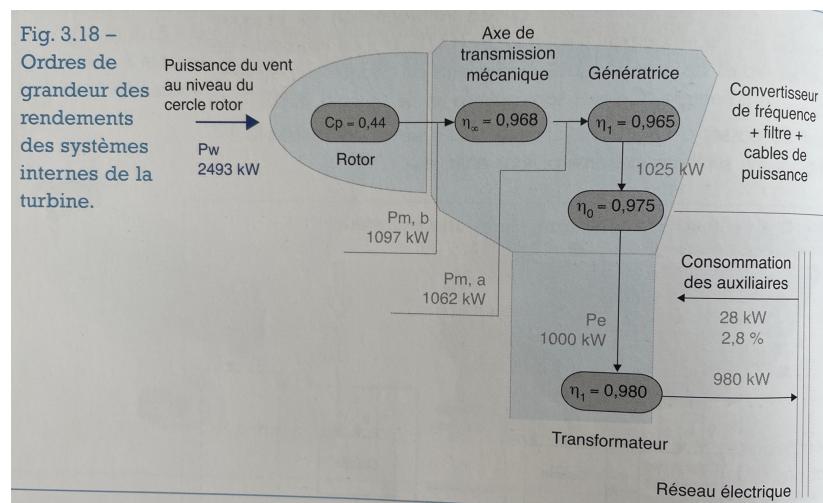
$$\begin{aligned} C_p &= \frac{\frac{8}{27} \cdot \rho \cdot S_1 \cdot V_0^3}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_1 \cdot V_0^3} \\ \iff C_p &= \frac{16}{27} \\ \iff C_p &\approx 0,593 \approx 59,3\% \end{aligned}$$

Ce qui correspond à la limite maximale théorique d'énergie cinétique qu'une éolienne peut capter.

On appelle cette limite *la limite de Betz*. Aujourd'hui, les meilleures machines se situent à environ 80% de la *limite de Betz*.

Cette limite mesure, en quelque sorte, le *rendement* d'une éolienne pour convertir une certaine quantité d'énergie en énergie mécanique de rotation. De manière générale, le rendement d'une machine modélise les différentes pertes que l'on peut retrouver au sein d'un système : la puissance en sortie est égale à la puissance en entrée diminuée des pertes et le rendement caractérise le rapport entre la sortie et l'entrée. Dans une Eolienne, on mesure la vitesse du vent et la puissance électrique que l'on dispose pour alimenter une charge électrique. Il faut donc retirer les pertes électriques pour connaître le rendement global de l'éolienne.

Pour information, la figure suivante nous propose des ordres de grandeur des différentes pertes que l'on retrouve dans une "vraie" éolienne :

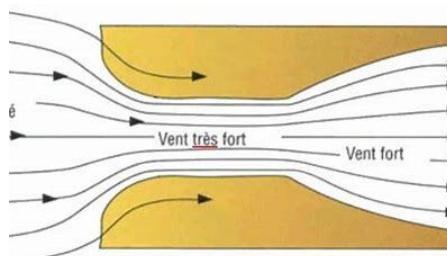
FIGURE 50 – *Ordre de grandeur des rendements des systèmes internes de la turbine*

Remarque : Le C_p est, comme dit plus haut, estimé à 75% de la limite de Betz et on a un rendement global de $\eta_{Global} = 100 \cdot \frac{980}{2493} \approx 39,3\%$.

17.0.1 Emplacement

L'idée de Monsieur Renson de placer le mur à vent au sein d'un couloir entre deux bâtiment est très intéressante. En effet, un tel positionnement permettrait au mur à vent de bénéficier d'une vitesse de vent plus grande d'après la conversion du débit.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{S_2}{S_1} \quad (14)$$



Intrant de s'écouler dans une étroiture, le vent s'accélère. C'est l'effet Venturi.

FIGURE 51 – Modélisation effet Venturi

16. <http://www.prog-paradisaea.com/Comment-une-aile-genere-t-elle-de.html>

17.1 Ressources

Au niveau des ressources, nous avons principalement notre contact, Paul Renson, dont l'idée du mur à vent nous vient. Celui-ci est prêt à rester en contact avec nous pour d'éventuelles questions.

Nous avons également à disposition nos professeurs, M. Lenaerts, M. Rausin, M. Ernst et M. Gibault qui peuvent nous partager leur expérience dans le domaine de la construction de machines.

Nous concernant, nous sommes 5 étudiants en Master ingénieur industriel et nous avons, à l'exception d'une personne, un profil assez similaire car en effet, quatre d'entre nous (Guillaume, Marc, Cyril et Martin) sont dans la section **génie énergétique durable**. Dans le cadre de ce projet, leur apport sera plutôt au niveau énergétique. Tandis que le dernier, Maxime, qui est dans la section industrie, apportera ces compétences acquises grâce aux cours d'électronique, informatique,...

18 Time-sheet

Guillaume	Maxime	Martin	Cyril	Marc
jour	heures	jour	heures	jour
22-sept	2H	22-sept	2H	22-sept
08-oct	2H	08-oct	2H	08-oct
11-oct	2H	11-oct	2H	11-oct
05-nov	2H	05-nov	2H	13-oct
24-nov	4H	20-nov	4H	16-oct
09-déc	2H	24-nov	4H	17-oct
10-déc	4H	09-déc	2H	27-oct
11-déc	3H	10-déc	4H	31-oct
17-déc	4H30	11-déc	3H	11-nov
18-déc	4H	17-déc	4H30	20-nov
19-déc	9H	18-déc	4H	28-nov
20-déc	2H	19-déc	5H	06-déc
			08-déc	30MIN
			20-déc	2H
			10-déc	2H
			11-déc	4H
			12-déc	9H
			14-déc	4H
			17-déc	4H
			18-déc	4H30
			19-déc	9H
			20-déc	4H
			17-déc	3H
			18-déc	3H
			19-déc	5H
			20-déc	2H
TOTAL	40H30	TOTAL	40H30	TOTAL
			64H30	47H45
				TOTAL
				46H

FIGURE 52 – Time-sheet

19 Diagramme de Gantt

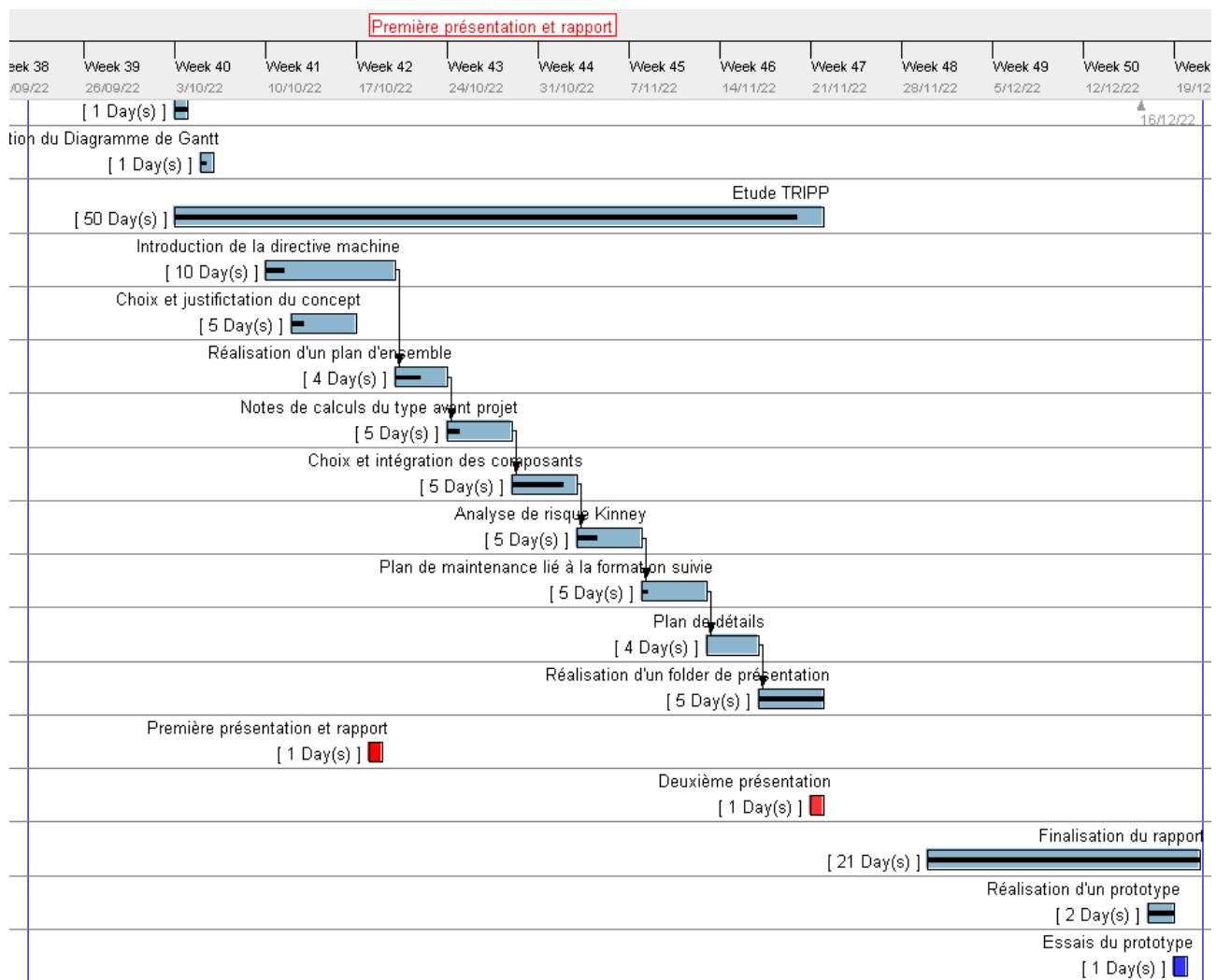


FIGURE 53 – Diagramme_{Gantt}

20 Réalisation d'un folder

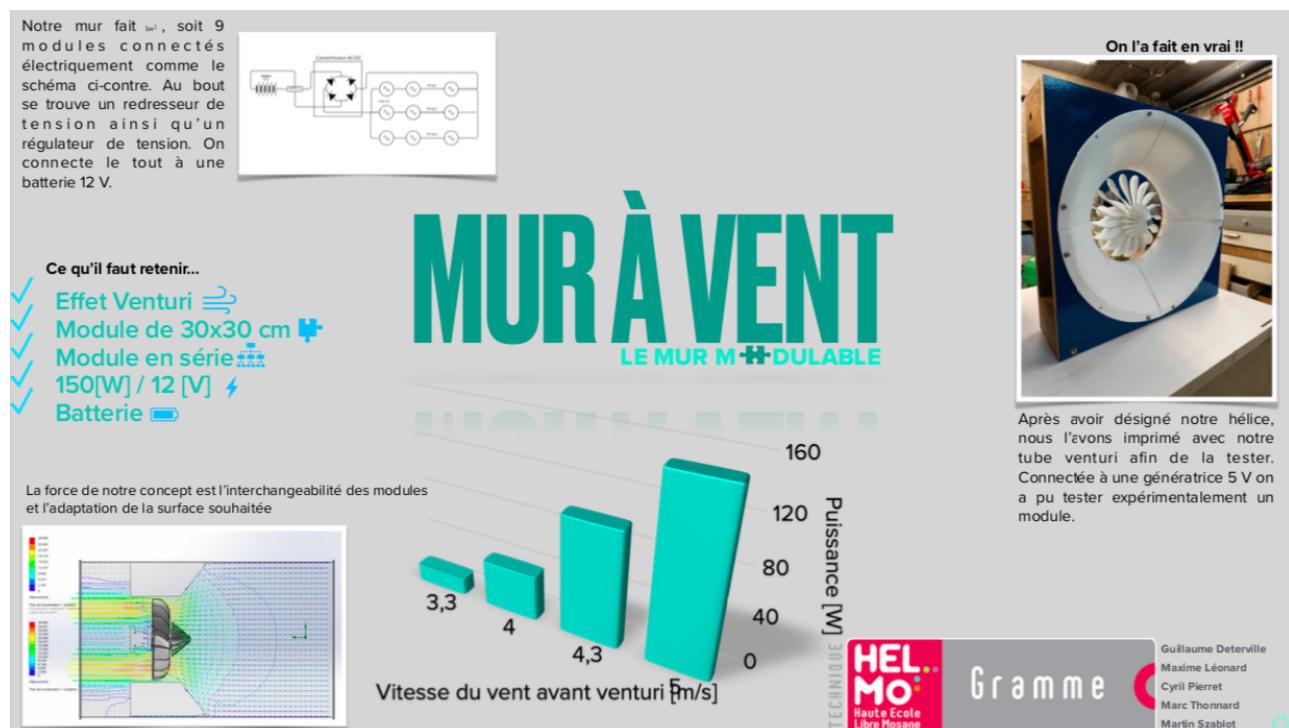


FIGURE 54 – folder

21 Listes des figures

Table des figures

1	<i>Colonne d'air</i>	7
2	Prise mâle	9
3	String de ventilateurs	11
4	Application d'un pont redresseur	12
5	Application d'un condensateur et régulateur	12
6	Étape d'obtention d'un signal DC à partir d'un signal AC	12
7	Modélisation 3D de la turbine	14
8	Vue éclatée d'un bloc	15
9	Vue éclatée du mur à vent	15
10	vue en coupe	15
11	Simulation à l'aide de l'outils <i>flow simulation</i> sur le logiciel SolidWorks.	16
12	Optimisation de la géométrie	16
13	Schéma électrique du mur à vent	19
14	Moteur 12V / 600 rpm / 30 W	22
15	sucres électriques	22
16	Convertisseur AC/DC	23
17	Datasheet Batterie Solise	23
18	Connexion hélice - moteur	24
19	Tube Venturi	25
20	Module final	25
21	Test du module au laboratoire	26
22	Résultat obtenu au laboratoire de Turbomachine	26
23	Ventilateur d'ordinateur	31
24	Montre connectée	32
25	Réseau de problèmes	39
26	Matrice multi-écran	40
27	Explications de la démarche des 6 chapeaux	42
28	Contradiction en matière de sécurité	48
29	Rendement fonction de la vitesse pour différentes géométries d'éoliennes	49
30	Contradiction en matière du nombre de pales	50

31	Pression exercée sur une pale ([5])	50
32	Contradiction en matière d'orientation des pales	51
33	Influence du PowerCone sur les turbulences	53
34	Matrice des 40 principes	54
35	Analyse de risque Kinney	56
36	Score rupture de pales	57
37	Score projection éléments	57
38	Score incendie	58
39	Score court-circuit	58
40	Score blessures	58
41	plan d'ensemble	59
42	Casing	59
43	Hélice	60
44	Prise mâle	60
45	PowerCône	61
46	chaine de cote	61
47	jeux	62
48	choix	62
49	<i>Représentation du tube de courant ([13])</i>	63
50	<i>Ordre de grandeur des rendements des systèmes internes de la turbine</i>	66
51	Modélisation effet Venturi	66
52	Time-sheet	68
53	Diagramme _{Gantt}	69
54	folder	70

Références

- [1] Datasheet et prix du vce03 ac / dc. <https://befr.rs-online.com/web/p/switching-power-supplies/1720791>, 2017.
- [2]
- [3] Caractéristiques du nylon 12. <https://formlabs.com/fr/boutique/materials/nylon-12-powder/>, 2017.
- [4] 4-aerodynamique. https://learn-technique.helmo.be/pluginfile.php/691371/mod_resource/content/1/4-aerodynamique.pdf, 2022.
- [5] 3-vent. https://learn-technique.helmo.be/pluginfile.php/689908/mod_resource/content/1/3-vent.pdf, 2022.
- [6] Site de trizz pour les 40 principes inventifs. <http://www.trizz40.com>, 2017.
- [7] Aerodynamic ceiling fan inspired by sycamore seedpods. <https://asknature.org/innovation/aerodynamic-ceiling-fan-inspired-by-sycamore-seedpods/>, 2002.
- [8] Low-noise fan inspired by owl wings. <https://asknature.org/innovation/low-noise-fan-inspired-by-owl-wings/>, 2015.
- [9] Low-noise coating for wind turbines inspired by shark skin. <https://asknature.org/innovation/low-noise-surface-coating-for-wind-turbine-blades-inspired-by-shark-skin/>.
- [10] Riblet-surfaces for improvement of efficiency of wind turbines. <https://ec.europa.eu/inea/en/horizon-2020/projects/H2020-Energy/Wind/Riblet4Wind>.
- [11] Powercone® a turbine retrofit that unlocks wind power's true potential. https://static1.squarespace.com/static/5bbcc1939b8fe86d42015bd2/t/627919dc68e5b101a01ebaf/1652103653153/Biome+Renewables_PowerCone_Tech_Brochure+V7.pdf, 2022.
- [12] Méthode « kinney ». <https://emploi.belgique.be/sites/default/files/content/publications/FR/Analyse>, 2021.
- [13] Evolution, principes de base et potentiel de conversion. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/machines-aerodynamiques-et-compresseurs-42176210/eoliennes-bm4640/>, 2017.