



# L'éolienne a le vent en poupe

Sébastien CHÉRY

Nino MORVAN-HECKEL

Encadré par Romain DARDEVET

Lycée Henri Loritz

29 Rue des Jardiniers





## Table des matières :

<b>I. DESCRIPTION DE L'EOLIENNE .....</b>	<b>2</b>
1. INFORMATION SUR L'EOLIENNE SAVONIUS : .....	2
<b>II. REALISATION DES PREMIERES MAQUETTES .....</b>	<b>2</b>
1. CREATION DE LA SOUFFLERIE .....	2
2. CREATION DES EOLIENNES .....	3
<b>III. EXPERIMENTATION .....</b>	<b>3</b>
1. PROPORTIONALITEE ENTRE VITESSE DE VENT ET TENSION D'ALIMENTATION .....	3
2. MESURE DU RENDEMENT .....	5
<b>IV. ÉVOLUTION DE L'EOLIENNE .....</b>	<b>7</b>
1. PRESENTATION DE LA MAQUETTE .....	7
2. REALISATION DU ROTOR A PARTIR D'AIMANTS .....	7
3. REALISATION DES BOBINAGES STATORIQUES .....	11
4. TENSION GENeree .....	12
5. RENDEMENT ENERGETIQUE.....	15
<b>CONCLUSION GENERALE : .....</b>	<b>19</b>

### Introduction :

Qui n'a jamais été étonné de voir une éolienne tourner dès que le vent se lève. Celle-ci convertit par sa rotation l'énergie cinétique du vent en électricité.

Se soulèvent alors quelques questions : quelle énergie peut être récupérée de cette rotation. Quelles données physiques peuvent-être étudiées? Comment est produite l'énergie électrique des éoliennes ?

Dans le cadre de ce projet nous avons choisi le modèle d'éolienne Savonius hélicoïdal qui de par sa forme et ses dimensions permet une analyse dans des souffleries en laboratoire plus aisée.

Tout d'abord en élaborant un protocole afin d'établir un rendement, puis en tentant de produire de l'électricité à l'aide d'un alternateur artisanal.

### Remerciement :

Nous tenions à remercier monsieur Dardevet qui nous a suivi tout au long de notre projet. Nous voulions aussi remercier Madame Mathieu qui nous a proposé de participer initialement aux défis de la physique pour le XXI<sup>ème</sup> siècle. Enfin nous remercions le personnel du lycée qui nous a rendu possible l'accès aux installations techniques et aux laboratoires du lycée.



## I. Description de l'éolienne

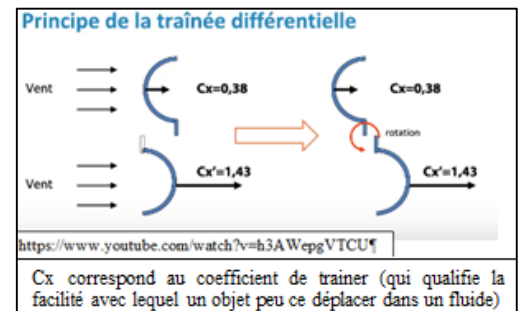
### 1. Information sur l'éolienne savonius :



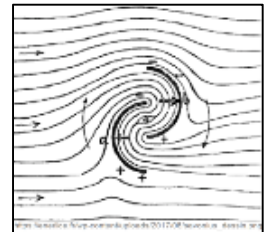
L'éolienne Savonius est constituée schématiquement de deux ou plusieurs godets demi-cylindriques légèrement désaxés. Son faible encombrement lui permet d'être facilement inséré sur les bâtiments. Cette éolienne a été inventée par Sigurd Savonius en 1924 (annexe I). Il existe aujourd'hui différents types d'éoliennes Savonius comme par exemple l'éolienne Savonius hélicoïdale qui fait l'objet de notre étude.

#### A. Fonctionnement

Elle fonctionne sur le principe de la traînée différentielle : la partie convexe a une force de trainée (force s'opposant au mouvement du vent) inférieure à la force de trainée de la partie concave. Cette différence entre les forces crée un couple qui met en rotation l'éolienne.



L'espace laissé entre les deux demi cercles permet de laisser s'insérer un filet d'air afin de faciliter la rotation de l'éolienne et d'améliorer son rendement. L'espace optimal entre les godets doit être de 1/6 du diamètre de l'éolienne.



#### B. Savonius hélicoïdale

Ce type d'éolienne est une amélioration de l'éolienne Savonius : elle repose sur les mêmes principes hormis que les « godets » sont vrillés hélicoïdalement autour de l'axe de rotation. Cela permet d'avoir une meilleure prise au vent, de façon continue en fonction de l'angle de rotation, ce qui permet d'augmenter le rendement de l'éolienne (annexe2 : Entreprise fabricant des éolienne Savonius hélicoïdale)

#### C. Limite de Betz

Albert Betz, physicien allemand, montre en 1919 que la puissance mécanique maximale pouvant être récupérée par une éolienne est égale à 16/27 soit 59% de la puissance cinétique du vent dirigée sur l'éolienne.



## II. Réalisation des premières maquettes

### 1. Création de la soufflerie

Dans le but de tester les éoliennes il a fallu créer du vent. Pour cela une soufflerie a été créée. Après avoir étudié différents systèmes, notre choix s'est porté sur une soufflerie d'habitable de voiture. Nous l'avons alimenté à l'aide d'une alimentation de laboratoire en courant continu.

Une fois le système qui génère le vent choisi et testé ; nous avons modélisé un tunnel afin de canaliser le flux d'air généré, sous format informatique grâce à un modèleur. Les différentes pièces ont été découpées à la découpeuse laser dans du plexiglas. Celles-ci ont été assemblées pour former le tunnel.

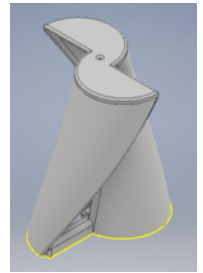
Enfin, à l'aide de supports de tuyaux fixés à la soufflerie, nous avons maintenus deux moteurs à courant continu pour générer l'énergie électrique et pour mesurer la vitesse de rotation.



## 2. Création des éoliennes

### A. Modélisation

L'étude de l'éolienne Savonius hélicoïdale étant le prolongement d'une partie de notre T.P.E. des modèles informatiques de celle-ci avaient précédemment été réalisés. Ils ont pu être réinvestis afin de matérialiser facilement des maquettes par impression 3D. Cependant ils ont dû être modifiés à plusieurs reprises afin de correspondre au besoin des expérimentations (plan technique annexe 3).



### B. Evolution de la taille de l'éolienne

Avant de trouver la bonne taille d'éolienne nous avons testé différentes dimensions. Les dimensions ont évolué de manière croissante pour répondre au besoin de maintien et de récupération d'énergie.



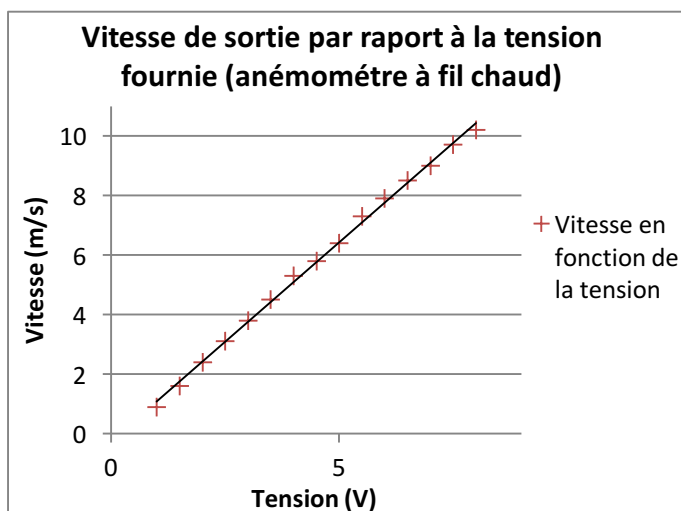
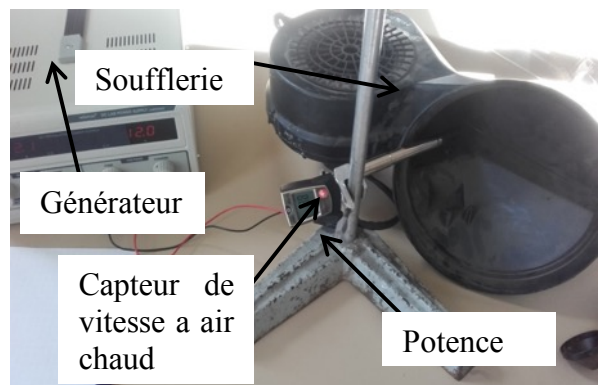
## III. Expérimentation

### 1. Proportionalité entre vitesse de vent et tension d'alimentation

#### A. Mesure de la vitesse de vent généré (sans tunnel)

Nous avons souhaité tester la soufflerie d'habitable avant de l'incorporer au tunnel afin de comparer les résultats. Dans un premier temps nous avons testé la soufflerie en l'alimentant progressivement de 0 à 12V en faisant un relevé à l'aide d'un capteur à fil chaud d'après le montage suivant :

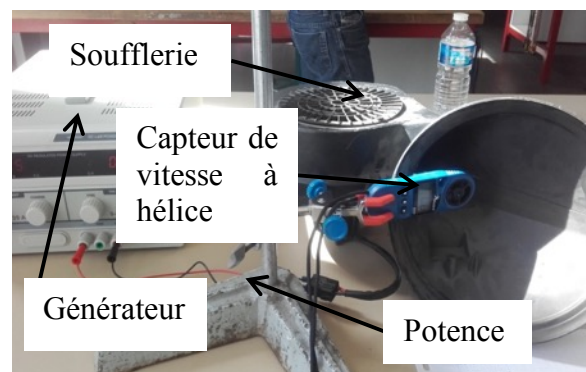
Cela nous a permis d'obtenir une courbe exprimant la vitesse du vent en mètre par seconde par rapport à la tension fournie

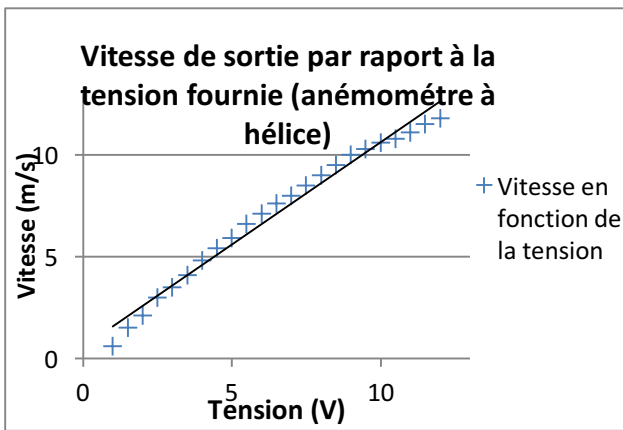


Avec ce montage on obtient une seconde courbe représentant la vitesse en fonction de la tension

Cependant le capteur est limité à une vitesse maximum de 10 m/s ce qui était insuffisant par rapport à la vitesse atteinte.

Nous avons donc effectué un deuxième test avec un capteur à hélice dans les mêmes conditions.





Nous avons constaté qu'au maximum à vide (sans le tunnel) la soufflerie soufflait à 12 m/s ce qui correspond environ à nos besoins car la vitesse du vent est rarement aussi élevée.

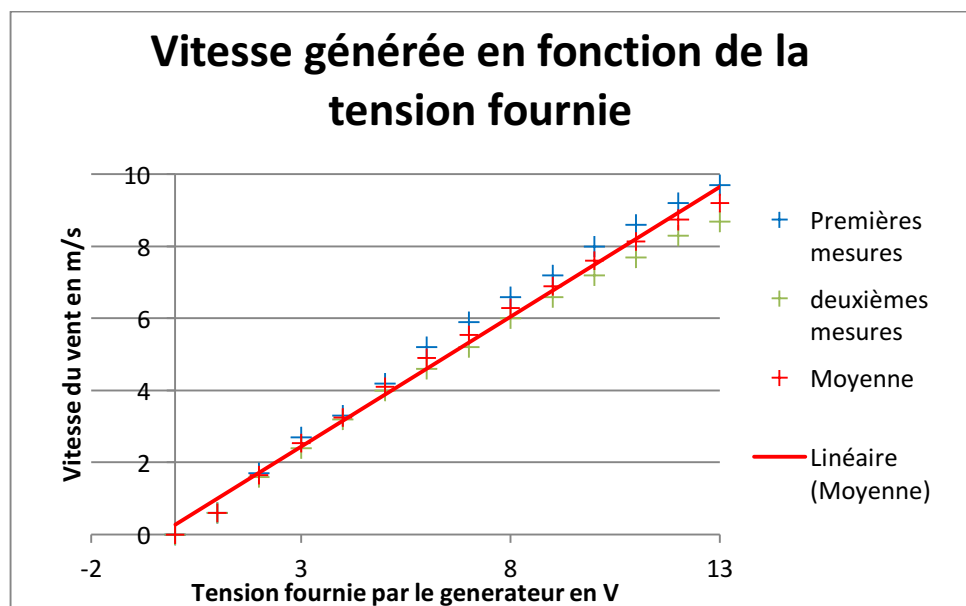
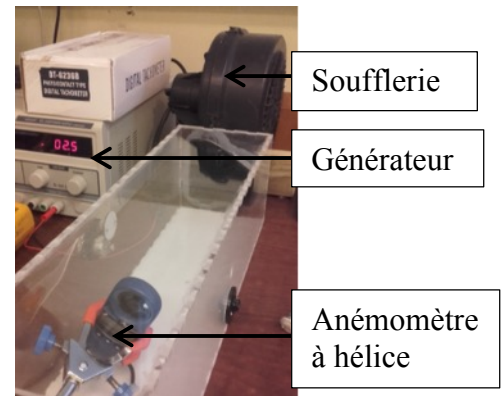
Cependant en comparaison à la première courbe nous avons pu constater que le capteur à hélice était moins précis car dans les mêmes conditions il fournit des valeurs plus petites. Le capteur à fil chaud est limité à un vent de moins de 10 m/s, c'est donc un anémomètre à hélice qui sera utilisé durant le reste des expérimentations.

## B. Mesure de la vitesse de vent fournie (avec tunnel)

Nous avons réalisé des mesures entre la tension fournie et la vitesse du vent dans la soufflerie, une fois le tunnel mis en place. Pour cela nous avons effectué le montage suivant :

Il a permis d'effectuer deux séries de mesures en relevant la vitesse du vent à deux endroits différents et en augmentant progressivement la tension fournie par le générateur dans le but d'obtenir la vitesse moyenne du vent dans la soufflerie pour différentes tensions.

Nous avons à partir des mesures tracé la vitesse générée en fonction de la tension fournie :



On constate que les valeurs obtenues sont inférieures aux mesures précédentes car le vent à la sortie de la soufflerie est reparti dans tout le volume du tunnel ce qui induit une diminution de la vitesse du vent. Cependant les vitesses obtenues correspondent avec les vitesses de vent les plus courantes. Par ailleurs la représentation linéaire montre qu'il y a une proportionnalité entre la tension fournie et la vitesse du vent.



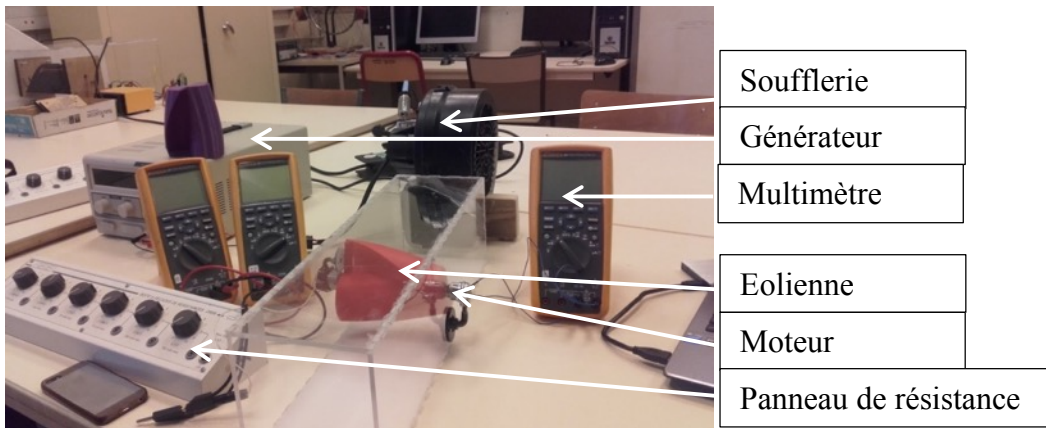
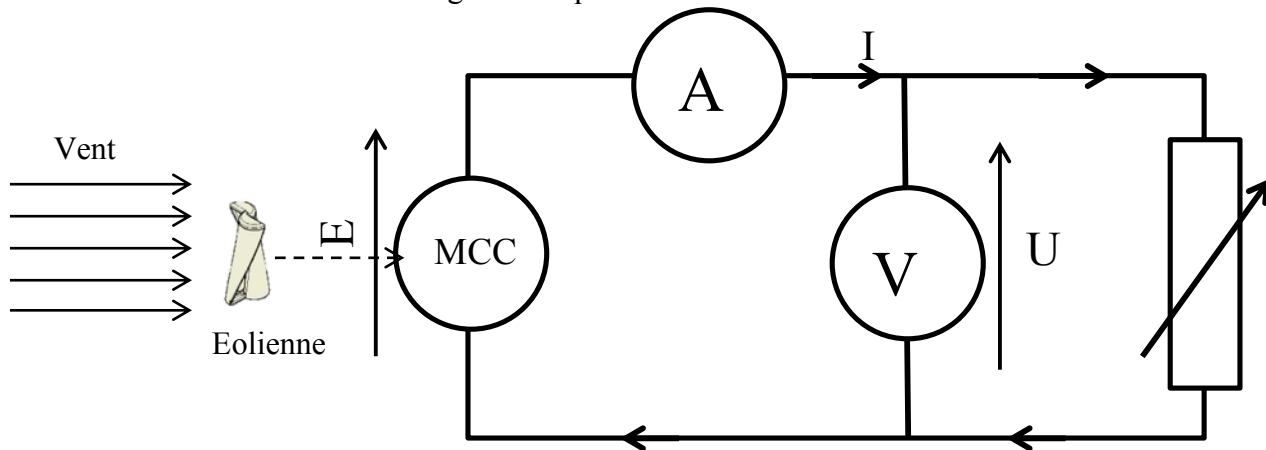


## 2. Mesure du rendement

Pour mesurer le rendement de l'éolienne, nous avons cherché à mesurer la puissance électrique générée afin de la comparer à la puissance cinétique du vent.

### A. Mesure de la puissance

Pour faire varier la valeur de la puissance récupérée nous avons fait varier la charge constituée d'une résistance à l'aide du montage électrique.



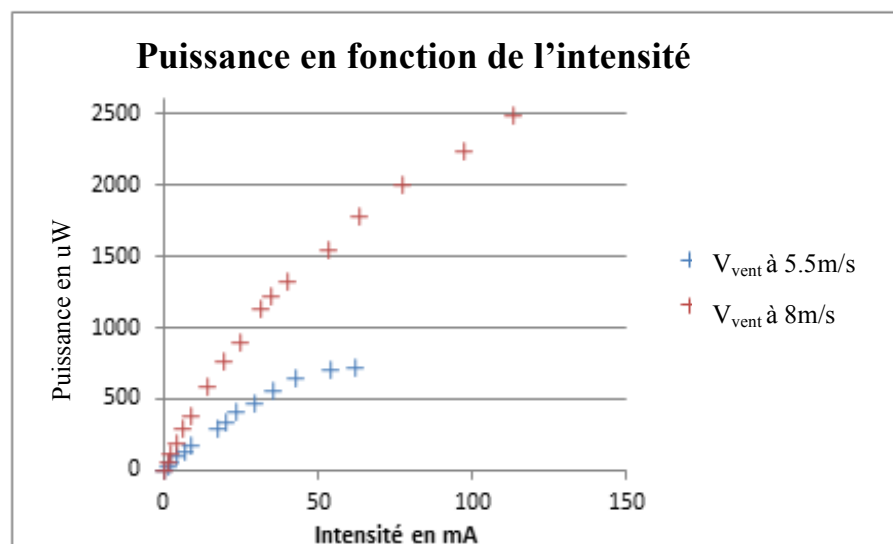
Deux séries de mesures pour deux vitesses de vent différentes ont été réalisées:

Les expérimentations ont permis d'obtenir les courbes suivantes (données compilées en annexe 4)

$$P = U \times I$$

Avec  $P$  en Watt(W),

$U$  en volt(V) et  $I$  en ampère(A)

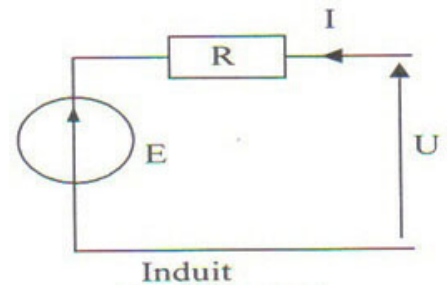




Nous n'avons pas réussi à obtenir une représentation complète de la courbe c'est à dire une retombée de la puissance à 0 lorsque le courant devient important et que le moteur est mis en court-circuit.

On relève tout de même, pour la suite de nos calculs, les valeurs des maximum de puissance :

- Pour 5,5 m/s la puissance maximale est de **0,721 mW**
- Pour 7.6 m/s la puissance maximale est de **2,486 mW**



### A. Calcul de la puissance cinétique du vent

On détermine la puissance cinétique du vent à partir du débit d'énergie cinétique (démonstration en annexe 5). On montre que

$$P_{C_{vent}} = \frac{1}{2} \times \rho_{air} \times S \times V^3$$

Soit pour un vent de 5,5m/s :  $P_{C_{vent}} = \frac{1}{2} \times 1,225 \times 3.2 \times 10^{-3} \times 5.55^3 \approx \mathbf{0.33 W}$

Soit pour un vent de 7,6 m/s :  $P_{C_{vent}} = \frac{1}{2} \times 1,225 \times 3.2 \times 10^{-3} \times 7,6^3 \approx \mathbf{0.86 W}$

### B. Calcul du rendement global

Le rendement est défini par :  $\eta_{global} = \frac{P_{recuper}}{P_{C_{vent}}}$

Soit pour un vent de 5,5m/s :  $\eta_{global} = \frac{0.721 \times 10^{-3}}{0.33} \approx \mathbf{0.218\%}$

Soit pour un vent de 7,6 m/s :  $\eta_{global} = \frac{2.486 \times 10^{-3}}{0.86} \approx \mathbf{0.28\%}$

Le rendement global est très faible. Cela est dû à de nombreuses pertes par frottement engendrées au niveau des moteurs et aux pertes électriques dans les moteurs.

Pour la suite de nos expérimentations nous avons fait le choix de créer nous même une génératrice adaptée afin de diminuer les pertes au niveau du générateur et les pertes par frottement.



## IV. Évolution de l'éolienne

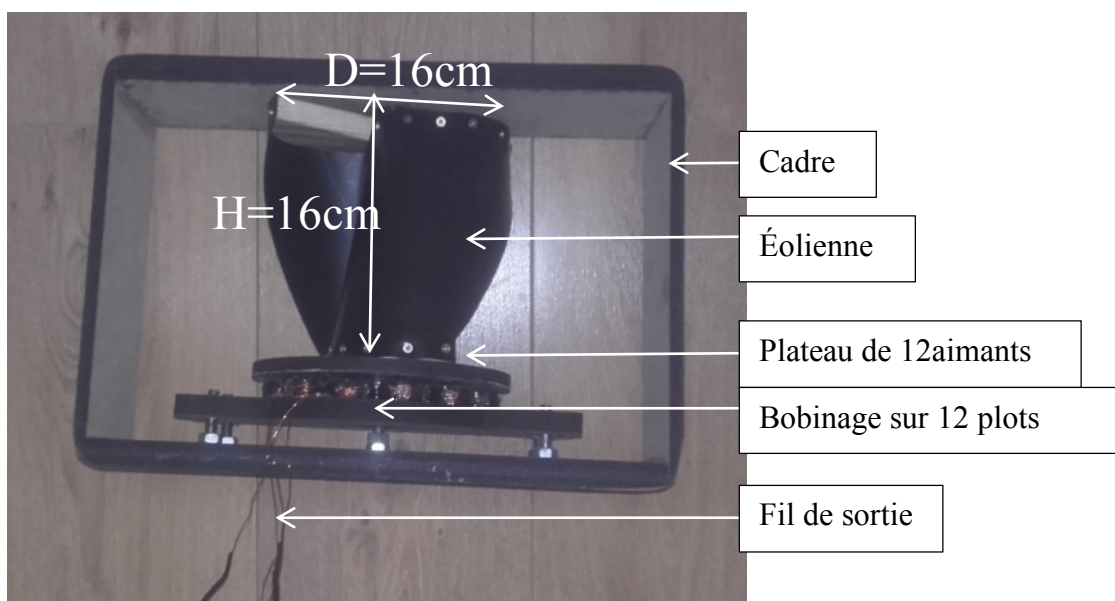
Nous avons réalisé une éolienne de plus grande dimension afin de faire des mesures différentes et de tenter de récupérer de l'énergie en plus grande quantité. Cette éolienne sera testée dans une soufflerie de taille supérieure à la précédente qui a été mise à notre disposition. Pour récupérer plus d'énergie et élargir le champ de l'expérimentation nous avons décidé de réaliser un alternateur artisanal et adapté à l'éolienne.



### 1. Présentation de la maquette

*Cette maquette a évolué tout au long des expérimentations qui ont suivi.*

Voici sa description :

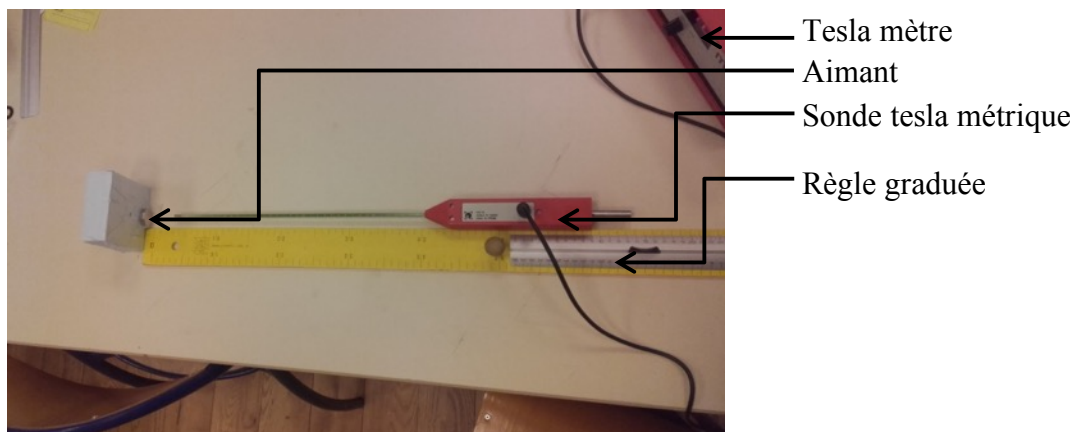


Remarque : le cadre permet de maintenir l'éolienne et d'assurer la solidarité avec la soufflerie.

### 2. Réalisation du rotor à partir d'aimants

#### A. Mesure du champ magnétique créé par un aimant

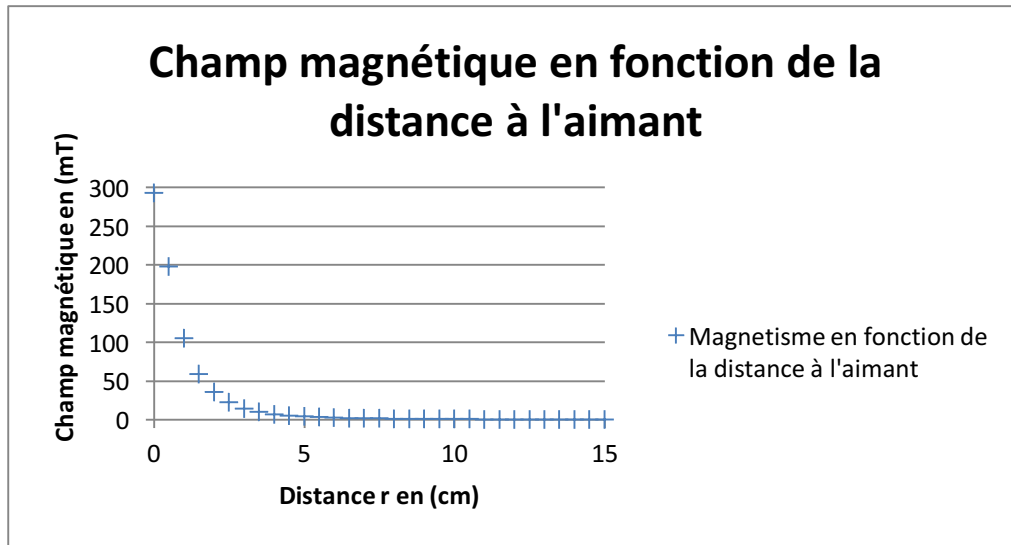
Afin de réaliser l'alternateur, nous avons acheté des aimants. Nous avons commencé par mesurer le champ magnétique créé par un seul aimant en fonction de la distance à l'aide d'un tesla-mètre:







Nous avons obtenu le champ magnétique en fonction de la distance :

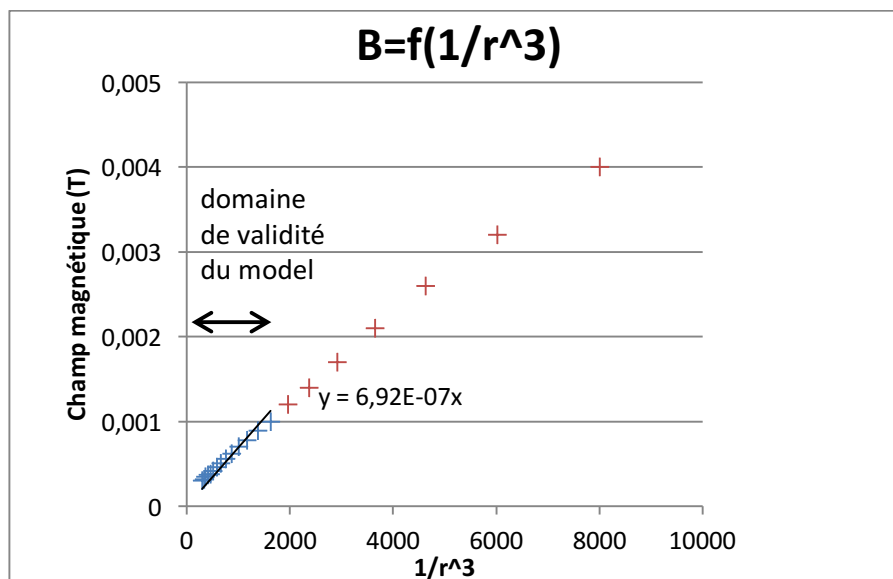


Le champ magnétique créé par un dipôle magnétique et la distance sont liés par la relation :

$$B(r) = \frac{\mu_0 M}{2\pi} \times \frac{1}{r^3}$$

$M$ : Moment magnétique de l'aimant en  $A.m^2$ ,  $r$  distance avec l'aimant en m et  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$  la perméabilité magnétique du vide

Cette relation n'est valable qu'à grande distance comme le montre la courbe suivante :



On constate qu'il y a bien une proportionnalité pour une distance à l'aimant assez grande soit  $\frac{1}{r^3}$  très petit. En outre nous prenons en compte ici les points au-delà de 8 cm.

À partir du coefficient de la droite il est possible de retrouver la valeur du moment magnétique en mesurant la pente :

$$\frac{\mu_0 M}{2\pi} = 6.9 \times 10^{-7} \text{ donc } M = \frac{2\pi \times 6.9 \times 10^{-7}}{\mu_0} \approx 3.5 A.m^2$$



Pour avoir un point de comparaison nous avons calculé la valeur du moment magnétique à partir des données du constructeur. Nous avons utilisé des aimants au néodyme S-25-07-N de chez Supermagnete.com.

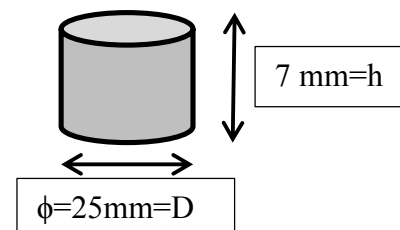
Le champ magnétique rémanent moyen fourni par le constructeur est  $B_r = 1.3\text{T}$ . Il est lié au moment magnétique  $M$  par

$$B_r = \mu_0 \times \frac{M}{V}$$

Avec  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ,  $V$  volume.

Le volume de l'aimant est le suivant :

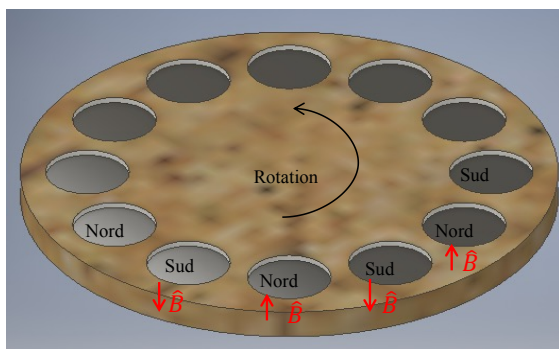
On a ainsi :  $V = \frac{\pi D^2}{4} \times h$  Soit  $V = 1,37 \times 10^{-4} \text{ m}^3$



Au final on peut calculer le moment magnétique :  $M = \frac{B_r \times V}{\mu_0} = \frac{1,3 \times (25 \times 10^{-3})^2 \times \pi \times 7 \times 10^{-3}}{4\pi \times 10^{-7} \times 4} = 3,55 \text{ A.m}^2$

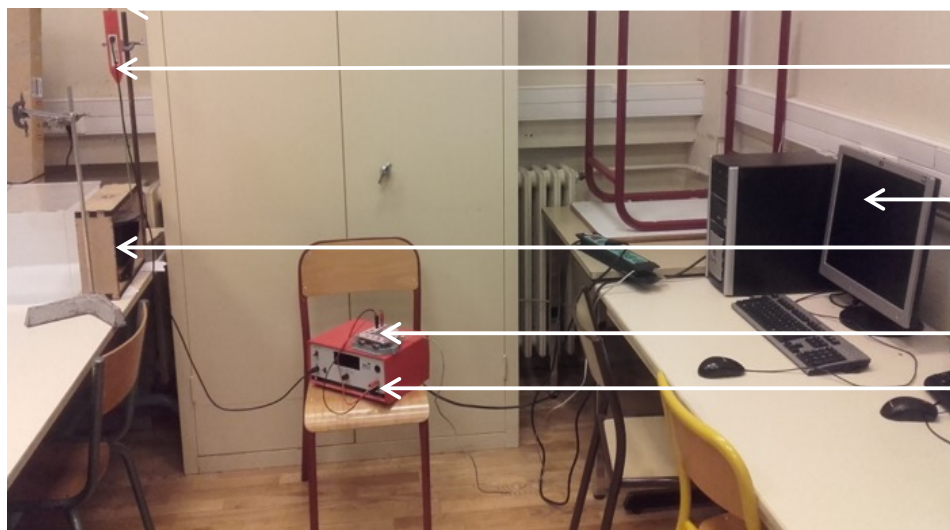
En comparaison aux données du constructeur la valeur trouvée de l'aimantation est cohérente. Par ailleurs on retiendra que plus on s'éloigne du dipôle plus le champ magnétique diminue. De cette constatation nous pouvons en tirer que nous devons rapprocher les bobinages le plus possible des aimants afin de générer une tension maximale.

## B. Champ magnétique créé par le rotor en rotation devant une bobine



Les aimants choisis ont été mis en place sur un plateau de manière circulaire afin d'être fixé sur l'éolienne.

Afin de savoir si les 12 aimants étaient correctement alternés (pôles nord, puis sud) nous avons mesuré le champ magnétique du plateau lorsque celui-ci était en légère rotation. Pour cela nous avons fixé un tesla-mètre au-dessus de l'éolienne et nous avons mis en rotation celle-ci.



Sonde  
teslamétrique

Ordinateur

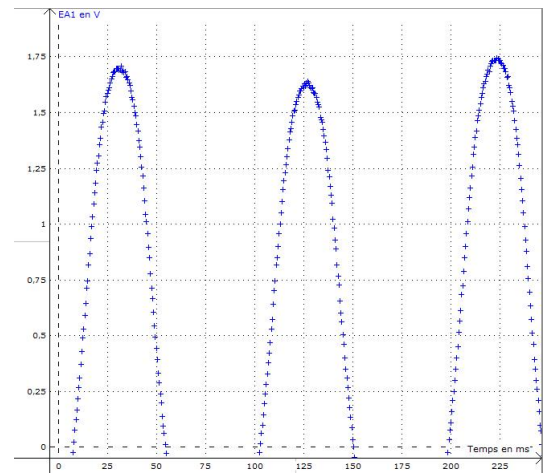
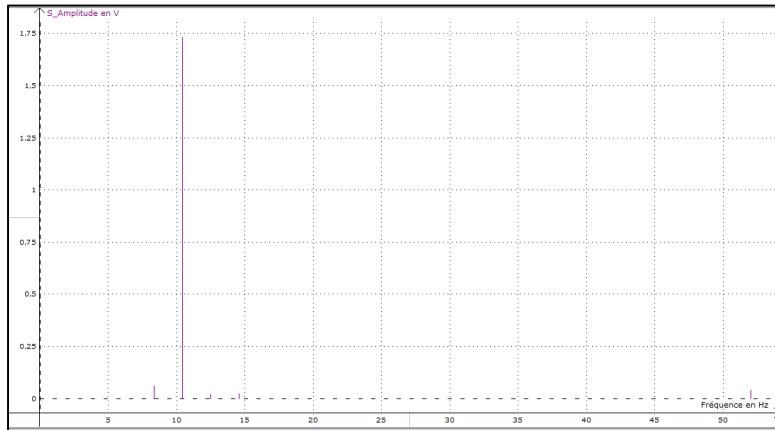
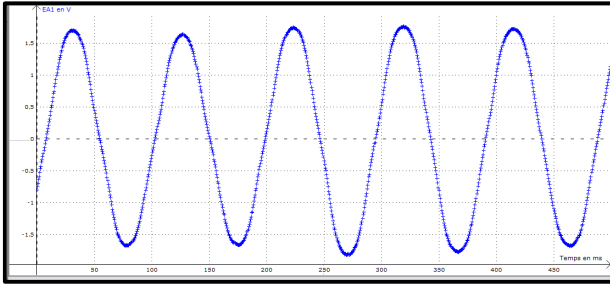
Maquette

Carte d'acquisition

Teslamètre



Nous avons obtenu une sinusoïde : les aimants sont donc correctement positionnés afin d'avoir une alternance de pôle nord et de pôle sud. On remarque aussi que le champ magnétique créé est quasi-sinusoïdal.



Pour compléter l'étude nous pouvons réaliser le spectre de  $B(t)$ . Celui-ci comporte une seule raie, le signal est donc bien sinusoïdal.

On relève  $\hat{U}=1.75\text{V}$  ce qui correspond à  $\hat{B}=175\text{ mT}$ .

Il est alors possible de modéliser le champ magnétique créé par la fonction mathématique :

$$B(t) = \hat{B} \cos(\omega \times t)$$

Avec:  $\omega = p \times \Omega$  (rad/s) ou en fréquence  $f = \frac{\omega}{2\pi} = p \times n$  où  $n = \frac{\Omega}{2\pi}$  est la fréquence de rotation du disque (en tr/s)

Avec  $p = \frac{N}{2}$  paires de pôles (Nord-Sud) sachant que  $N=12$  aimants

Au final on a donc :  $B(t) = \hat{B} \cos(6 \times \Omega \times t)$  avec  $\hat{B}=175\text{ mT}$

Cette alternance de pôles est primordiale car c'est elle qui assure une variation du champ magnétique nécessaire pour induire des courants dans un circuit électrique qui sera le stator (partie statique), notre générateur.



### 3. Réalisation des bobinages statoriques

#### A. Évaluation du nombre de spires

On cherche le nombre de spires nécessaires à l'obtention d'une tension de sortie de 9 V efficace

Pour calculer le nombre de spires nous avons utilisé la Loi de Lenz-Faraday qui exprime la tension générée aux bornes d'une bobine lorsque le champ magnétique qui la traverse varie :

$$E(t) = -\frac{d\phi}{dt}(t)$$

$E(t)$  est la tension générée par induction (force électromotrice induite)

Et  $\phi$  le flux du champ magnétique  $B(t)$  à travers le bobinage tel que :

$$\phi(t) = N \times S \times B(t)$$

Où  $N$  est le nombre de spires et  $S$  la section de la bobine.

Nous avons vu que notre rotor générerait un champ magnétique

$$B(t) = \hat{B} \cos(6 \times 2\pi \times n \times t)$$

$p = 6$  Le nombre de paires de pôles (nord-sud),  $t$  Le temps en seconde,  $n$  la fréquence de rotation en tr/s et  $\hat{B} \approx 100 \text{ mT}$  la valeur max du champ magnétique à quelque mm des aimants.

**Au final on a donc :**

$$E(t) = \underbrace{(N \times S \times 6 \times 2\pi \times n \times \hat{B})}_{U_{\max}} \times \sin(6 \times 2\pi \times n \times t)$$

**Sachant que :**

$$U_{\max}$$

$$(N \times S \times 6 \times 2\pi \times n \times \hat{B}) = U_{\max}$$

$$S = \pi R^2 \text{ avec } R = \frac{25 \text{ mm}}{2}, \quad n = 16 \text{ tr/s}$$

**Le nombre nécessaire de spires est donc :**

$$N = \frac{U_{\max}}{\hat{B} \times S \times 6 \times 2\pi \times n} = \frac{9\sqrt{2}}{0.175 \times \pi \times \left(\frac{25 \times 10^{-3}}{2}\right)^2 \times 12\pi \times 16} \text{ Soit } N = 246 \text{ spires}$$

#### B. Calcul de la résistance électrique du bobinage

Lors de notre première expérimentation nous avons rencontré un problème avec la résistance électrique de la génératrice. Dans le but d'être sûr de ne pas être à nouveau confronté à ce problème nous avons tout d'abord calculé puis mesuré la résistance du bobinage.

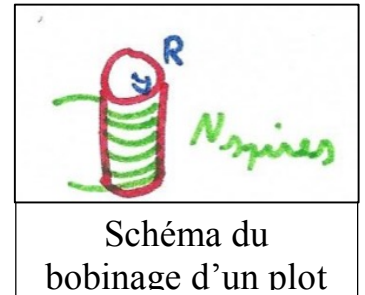
La résistance électrique d'un conducteur cylindrique se calcule par la formule suivante :  $R = \rho \times \frac{L}{S}$

Avec :  $\rho = 1.7 \times 10^{-8}$  la résistivité du cuivre

$$S = \pi \times R^2, \text{ section du conducteur, du fil avec } 2R = 0.6 \text{ mm d'où } S = \pi \times \frac{D^2}{4} = 2.82 \times 10^{-7}$$

$L = \text{nombre de plot} \times \text{nombre de spires par plot} \times 2\pi \times \text{rayon d'un plot}$

$$L = 12 \times 20 \times 2\pi \times 13 \times 10^{-3} = 19.6 \text{ m la longueur de fil}$$





**Au final nous avons donc :**

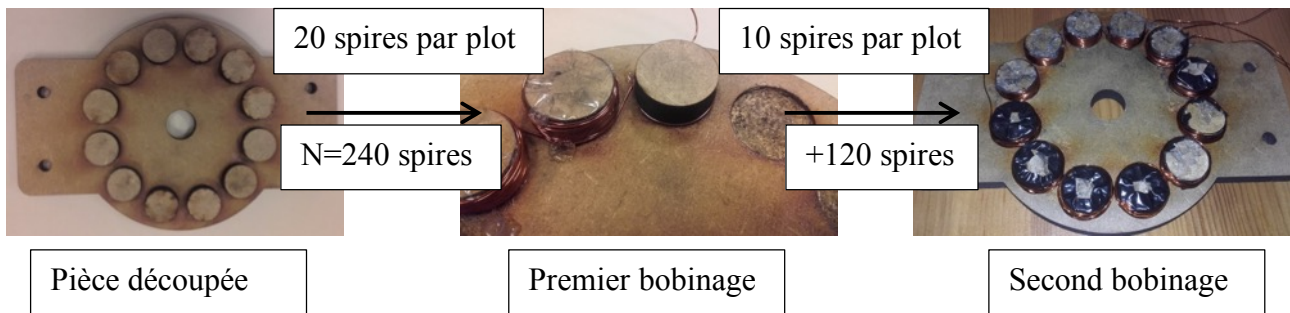
$$R = 1.7 \times 10^{-8} \times \frac{19,6}{2.82 \times 10^{-7}} = 1.2 \Omega$$

Donc théoriquement la valeur de la résistance du câble utilisé est de  $1,2 \Omega$ . Nous avons obtenu ici une valeur théorique de la résistance. En pratique nous avons réalisé  $20+10=30$  spires par plot, donc si l'on refait les calculs on trouve une résistance de  $R = 1.7 \times 10^{-8} \times \frac{29}{2.82 \times 10^{-7}} = 1.7 \Omega$

### C. Réalisation des bobines

Nous avons réalisé le bobinage qui permet de générer l'énergie électrique. Nous avons disposé 12 plots bobinés dans la même configuration que les aimants. Les n plots sont reliés en série.

Voici les différentes étapes du bobinage :



(C'est après les expérimentations qui ont suivi que nous avons réalisé le second bobinage.)

### D. Mesure de la résistance induite

Afin de vérifier les valeurs théoriques, nous avons mesuré à l'ohmmètre une résistance de  $1,36 \Omega$  ce qui est très proche de la valeur théorique. Avec le deuxième bobinage, placé en série avec le premier, la résistance totale est de  $2.8 \Omega$  ce qui reste relativement peu élevé et relativement proche de la valeur théorique. Les valeurs expérimentales sont plus élevées en raison des soudures et de la connectique. Nous pouvons tirer de cette mesure que les pertes par effet Joule dans la bobine seront limitées.



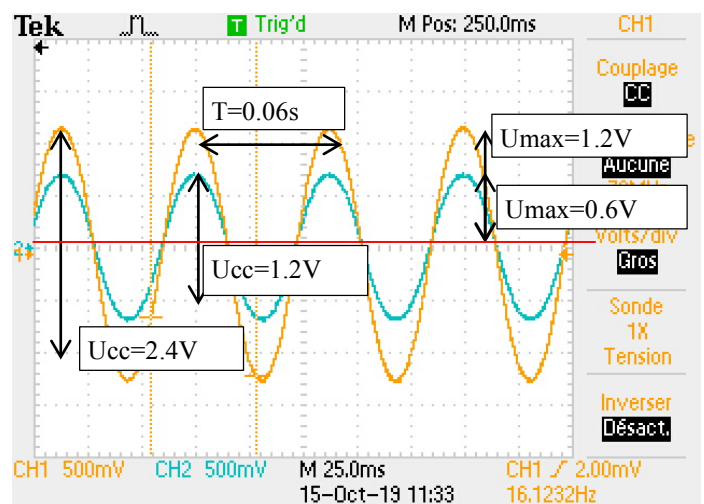
Prise de la  
résistance induite  
dans les bobines

## 4. Tension générée

Une fois l'ensemble rotor-stator réalisé et monté avec l'éolienne dans la soufflerie, des premiers essais ont été réalisés afin de vérifier les prédictions théoriques.

### A. Visualisation de la tension générée

Pour observer la tension générée nous avons branché les deux bobines sur un oscilloscope. Nous avons ainsi obtenu la courbe suivante (vitesse de rotation d'environ  $2,6 \text{ tr/s}$ ). La seconde bobine fournit environ la moitié de la tension fournie par la première bobine ce qui est logique car elle comporte moitié moins de spires.







## B. Mesure de la tension générée et comparaison avec la prédiction théorique

Nous avons effectué une mesure de tension afin de la comparer aux prédictions théoriques.

La valeur obtenue, à une vitesse de rotation de 16 tr/s soit une vitesse de vent de 6,4 m/s, est de 6V efficace environ ce qui ne correspond pas au 9 V efficace défini au début du dimensionnement.

Pourquoi existe-t-il un tel écart ?



Prise de la tension fournie

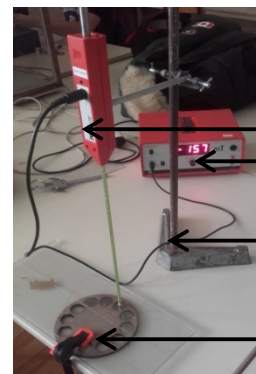
## C. Analyse des différences entre valeur théorique et valeur réelle

### a) Influence du nombre d'aimants

Le dimensionnement (calcul du nombre de spires) ayant été effectué à partir de l'étude du champ magnétique créé par un seul aimant nous nous sommes demandé quelle influence a la juxtaposition des aimants sur l'amplitude du champ magnétique créé par l'ensemble des aimants.

Pour mettre en évidence cela, nous avons mesuré le champ magnétique en fonction de la distance dans l'axe d'un des aimants du plateau.

Par comparaison avec l'étude réalisée pour un seul aimant, on constate que le champ magnétique est plus faible lorsque les aimants sont côte à côte, en particulier à très faible distance, cas de notre étude. Cela explique en partie la différence obtenue entre la tension générée expérimentale et la prévision théorique.

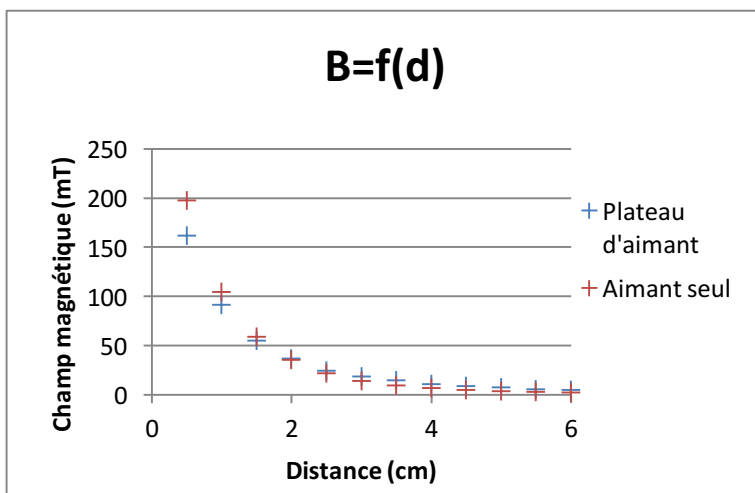


Sonde tesla  
métrique

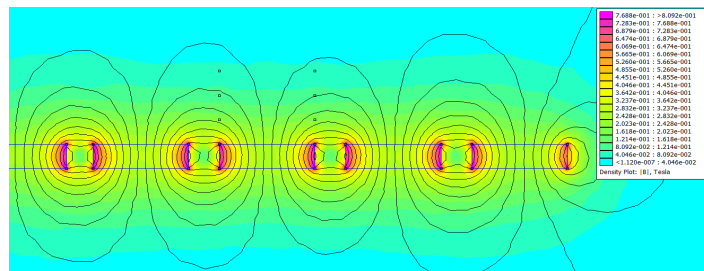
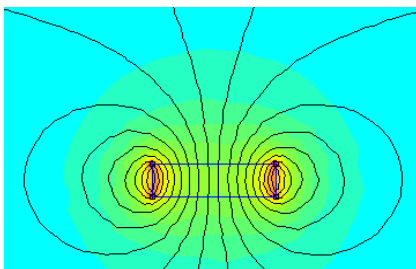
Tesla mètre

Potence

Plateau d'aimant



Cela se vérifie aussi par simulation numérique où l'on constate qu'à distance équivalente le champ magnétique est plus faible pour les aimants côte à côte.



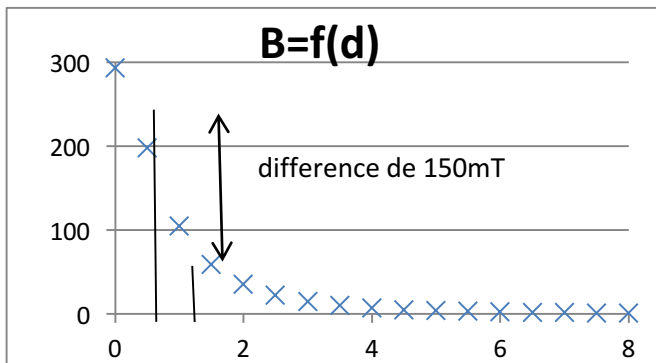
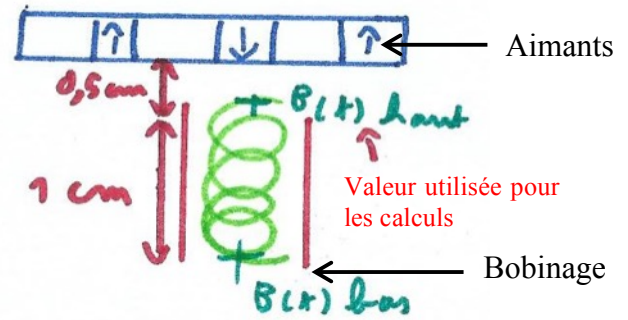


### b) Influence de la hauteur des bobines

D'autre part nous avons pensé que les écarts observés étaient peut-être dus aussi au fait que nous n'avions pas tenu compte de la hauteur du bobinage lors du dimensionnement et donc de la diminution du champ magnétique en fonction de la distance.

Comme le montre le schéma la distance aux aimants n'est pas la même en haut et en bas du bobinage. Or nous avons vu précédemment que le champ magnétique est fonction de la distance aux aimants.

Donc la tension générée sur les spires du haut est différente de celle générée sur les spires du bas.

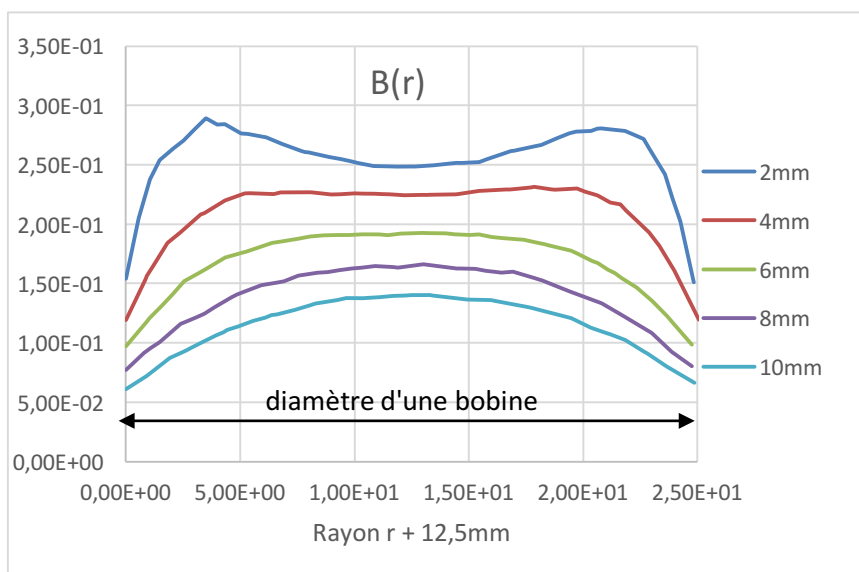
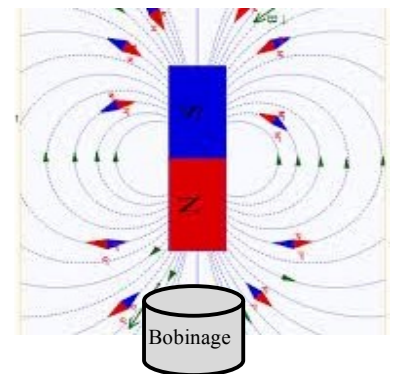


Sur le graphique on constate une différence de 150 mT entre les deux extremums ce qui peut justifier les écarts entre valeur théorique et valeur mesurée. Pour obtenir un résultat plus proche de la réalité nous aurions pu utiliser la valeur du champ magnétique moyen soit :  $\hat{B}_{moyen} = \frac{\hat{B}_{haut} + \hat{B}_{bas}}{2}$

### c) Répartition du champ non uniforme sur la surface des spires

Un autre point qui n'a pas été pris en compte est l'évasement des lignes de champ. Comme le montre le schéma, le champ magnétique n'a pas la même valeur sur toute la surface de la bobine.

Nous avons aussi analysé les simulations numériques pour voir l'évolution de l'amplitude du champ magnétique sur la surface.



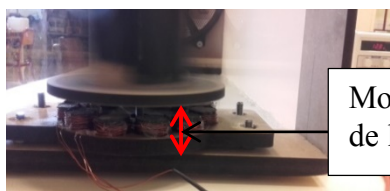
On constate que le champ magnétique n'est pas uniforme sur la surface des spires et on retrouve que plus on s'éloigne, plus le champ diminue.



En conclusion, pour minimiser les effets de la distance entre les aimants et les spires du bobinage, nous avons essayé de minimiser l'espacement entre le stator (bobines) et le rotor (aimants) sans que cela génère des frottements. Celui-ci est ajusté afin d'être de l'ordre de quelques millimètres.

Nous ne pouvions pas diminuer plus la distance entre les aimants et le bobinage. C'est pour cela que nous avons augmenté le nombre de spires en réalisant un deuxième bobinage. Avec les deux circuits en série, la tension obtenue est de 9 V efficace.

#### d) Conclusion : influence de la distance bobinages-aimant



Modification  
de la distance

En conclusion, nous avons fait varier la distance des bobinages et mesuré la tension générée sur le dispositif complet.

Distance bobinages-aimants	5mm	10mm	15mm
Tension récupéré	6V	3V	1.5V

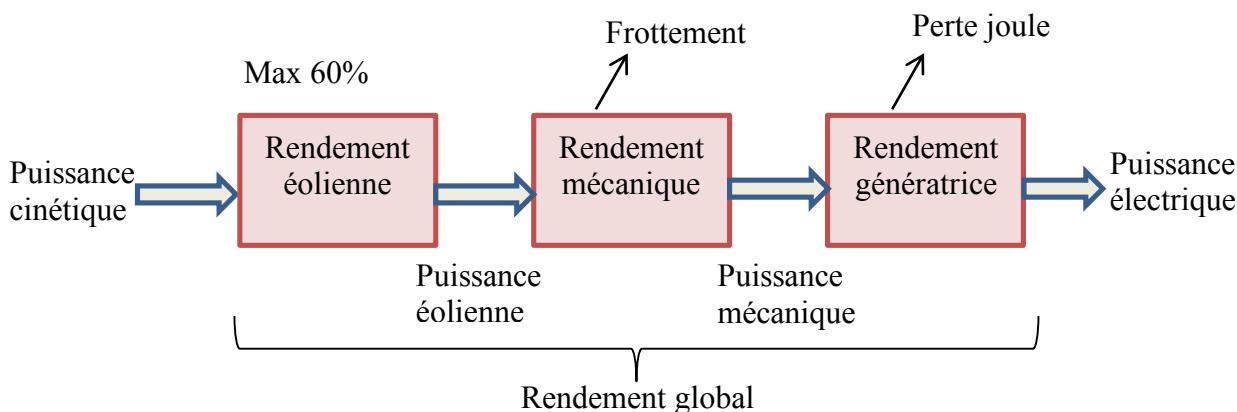
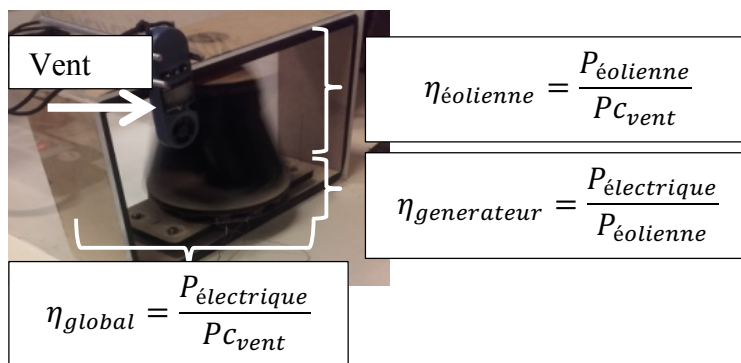
On illustre ainsi la grande dépendance entre la distance des bobinages et la tension générée.

## 5. Rendement énergétique

Nous avons voulu comparer les rendements des petites éoliennes au rendement de la grande. Pour cela nous avons suivi la même procédure.

### A. Décomposition des différents rendements

Pour réaliser le bilan énergétique, nous avons décomposé les différents rendements.



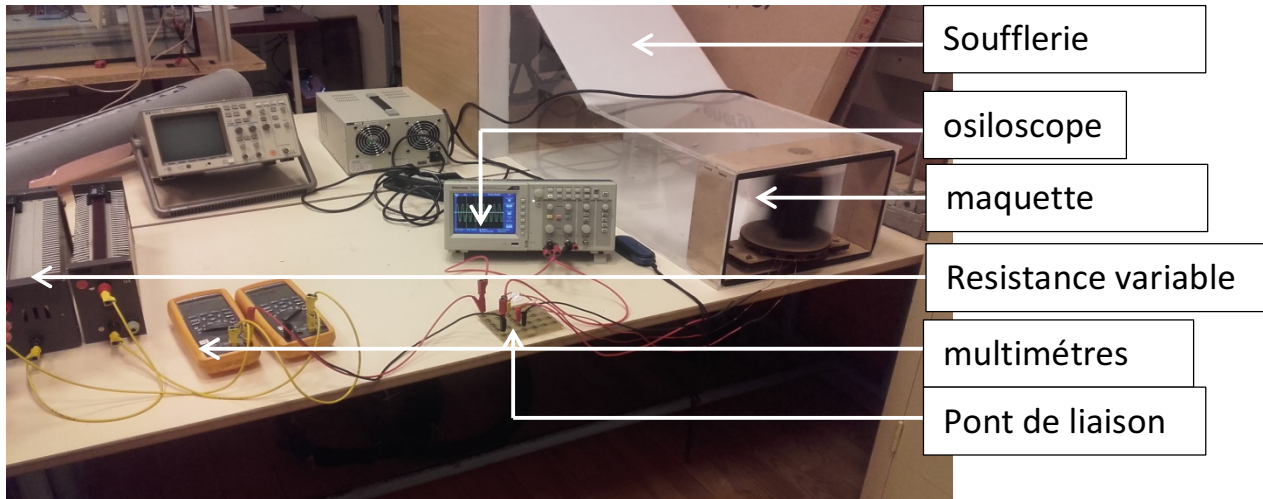


## B. Rendement global

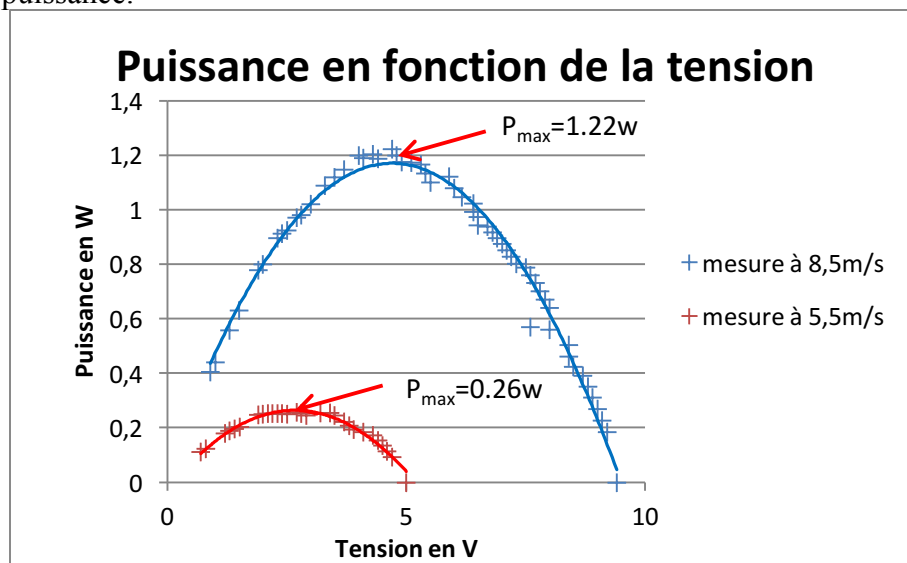
### a) Mesure de la puissance récupérée

Comme dans le cas de la première maquette, nous avons effectué deux séries de mesures à deux vitesses de vents différentes.

Voici la montage réalisé :



Cette fois-ci lors de la prise de mesure de la puissance en fonction de la tension nous avons obtenu un maximum de puissance.



Grace aux mesures nous pouvons trouver les puissances électriques maximales récupérables :

- Pour 9,5m/s la puissance maximale est de **1,22W**
- Pour 6.5m/s la puissance maximale est de **0,257W**

### b) Calcul de la puissance cinétique du vent

Par la même procédure de calcul que précédemment nous avons calculé la puissance cinétique du vent.

- Soit pour un vent de 9,5m/s :  $P_{c_{vent}} = \frac{1}{2} \times 1,225 \times 0.16^2 \times 9.5^3 \approx \mathbf{13.4 \text{ W}}$
- Soit pour un vent de 6,5m/s :  $P_{c_{vent}} = \frac{1}{2} \times 1,225 \times 0.16^2 \times 6.5^3 \approx \mathbf{4.3 \text{ W}}$



### c) Calcul du rendement global

Nous en déduisons le rendement global

$$\eta_{global} = \frac{P_{\text{électrique}}}{P_{\text{Cvent}}}$$

- Soit pour un vent de 9,5m/s :  $\eta_{global} = \frac{1.22}{13.4} \approx 9.1\%$

- Soit pour un vent de 6,5m/s :  $\eta_{global} = \frac{0.257}{4.3} \approx 5.9\%$

Le rendement est faible, cependant il est nécessaire de rappeler que la totalité de l'énergie du vent ne peut être récupérée comme vu avec la loi de Betz. Par ailleurs il est important de rappeler que l'énergie éolienne est gratuite.

### A. Calcul du rendement de la génératrice

Connaissant la puissance électrique générée par l'éolienne et la résistance des bobinages il est possible de calculer le rendement électrique de la génératrice.

Le calcul du rendement s'effectue avec le calcul suivant :

$$\eta_{generatrice} = \frac{P_{\text{électrique max générée}}}{P_{\text{électrique max générée}} + P_{\text{joule}}}$$

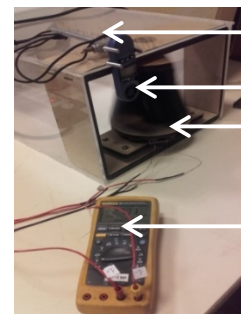
- Pour une vitesse de 6.5 m/s on a :  $\eta_{generatrice} = \frac{0.256}{0.256+0.025}$  soit  $R_{\text{générateur}} = 91\%$

- Pour une vitesse de 9.5m/s on a :  $\eta_{generatrice} = \frac{1.22}{1.22+0.18}$  soit  $R_{\text{générateur}} = 86\%$

### B. Calcul du rendement de l'éolienne seule

Pour obtenir séparément le rendement de l'éolienne et de la génératrice nous avons essayé de mesurer le couple et la vitesse de rotation en fonction de la vitesse du vent afin de calculer la puissance de l'éolienne.

#### a) Mesure de la vitesse angulaire de rotation



Potences
Anémomètre
Maquette
Multimètre

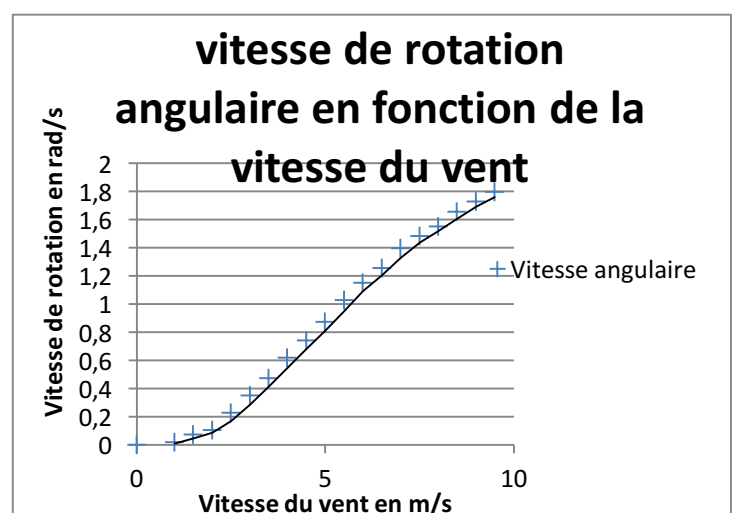
Nous avons effectué la mesure de la vitesse angulaire en observant la fréquence du signal électrique. En effet avec six paires de pôles l'éolienne effectue un tour toutes les six périodes électriques. De cette fréquence il est possible de retrouver la vitesse de rotation angulaire par la relation :

$$\omega = \frac{2\pi \times \frac{1}{f}}{30}$$

$\omega$  : vitesse angulaire (en rad/s)

$f$  : fréquence de rotation du rotor (en s<sup>-1</sup> ou Hz)

De ce relevé nous avons obtenu la valeur de la fréquence en fonction de la vitesse du vent ce qui donne :



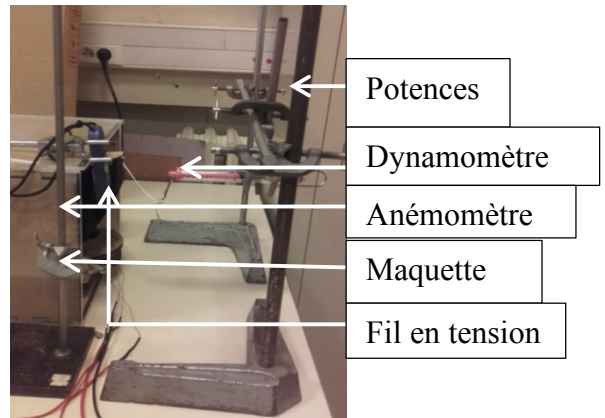




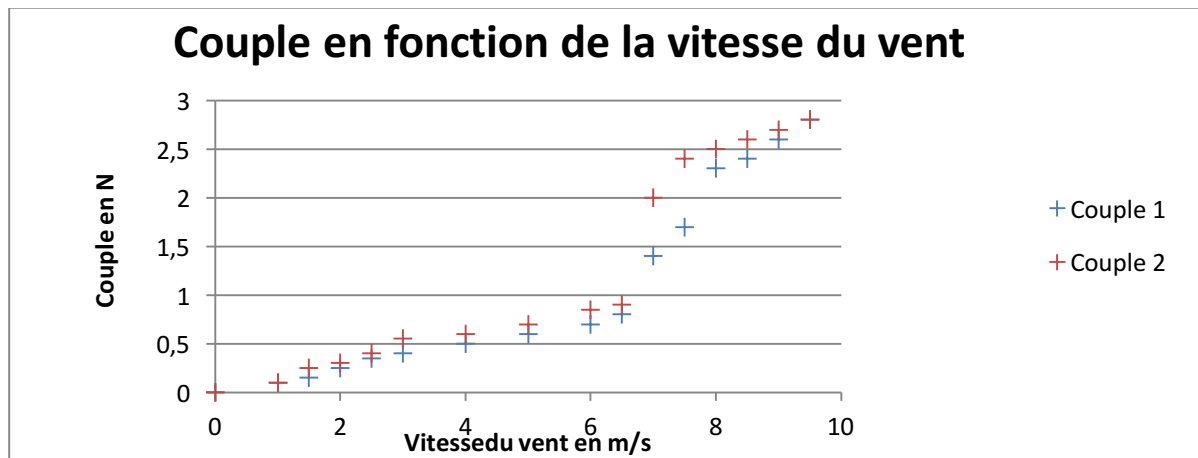
### b) Mesure du couple de l'éolienne

Afin d'obtenir le couple de l'éolienne nous avons attaché un dynamomètre sur une des pâles de l'éolienne. Nous avons réalisé le montage suivant :

Pour pallier aux possibles imprécisions des mesures, nous avons effectué deux prises de mesures.



Nous avons obtenu le couple en fonction de la vitesse du vent



### c) Calcul du rendement de l'éolienne (méthode 1)

Pour calculer le rendement de l'éolienne il est nécessaire d'avoir la puissance de l'éolienne. La puissance de l'éolienne est obtenue par la relation suivante pour une vitesse de vent donnée :

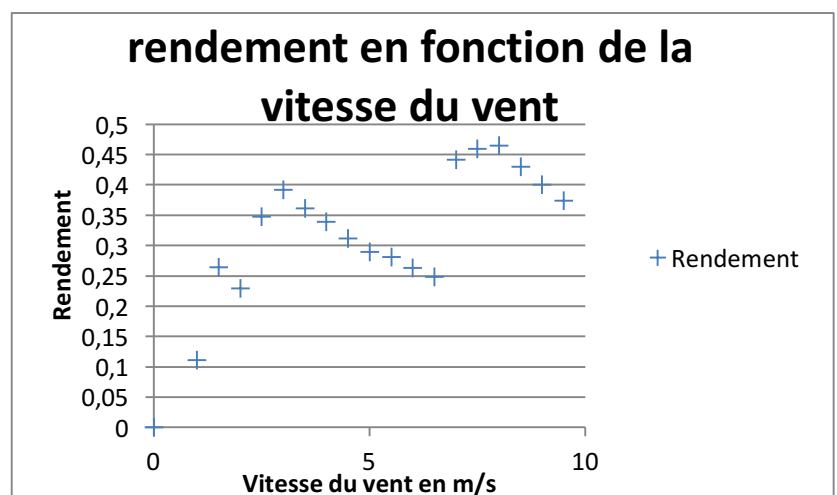
Voici la relation utilisée :

$$P = C \cdot \omega$$

$C$  : Couple exercé par le vent sur le rotor ( $N \cdot m$ )  $\omega$  : vitesse de rotation instantanée du rotor ( $rad/s$ )

Toutes les données ont été compilées dans un tableau (voir [annexe 6](#))

Nous obtenons alors le rendement en fonction de la vitesse du vent.



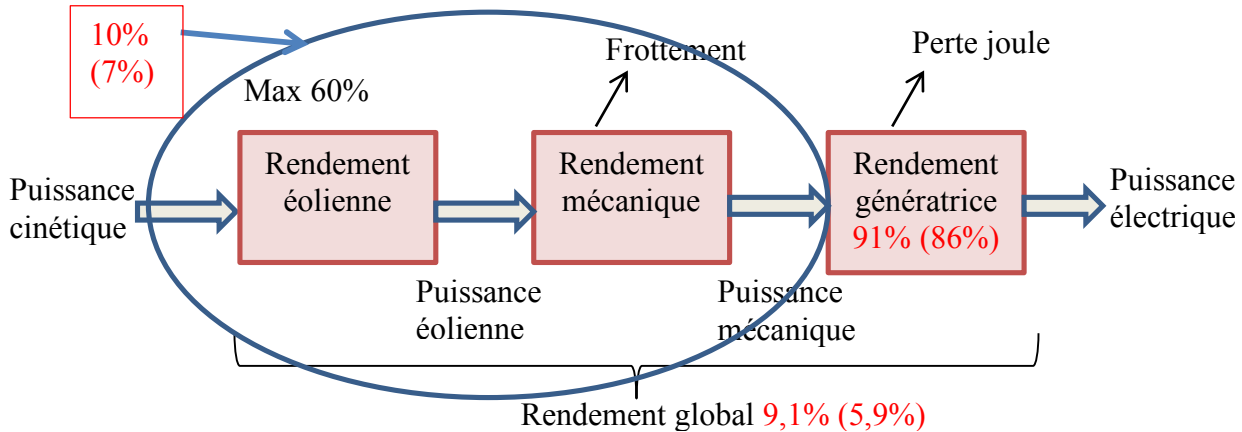
De manière plus générale le rendement de l'éolienne seule est en moyenne de 30%.



d) Calcul du rendement de l'éolienne (méthode 2 : en partant du rendement électrique)

Pour avoir un point de comparaison nous sommes partis du rendement de la génératrice pour retrouver le rendement de l'éolienne car le rendement global est égal au produit des rendements intermédiaires en négligeant les frottements.

De manière synthétique nous avons obtenu pour une vitesse de vent de 9,5 m/s (ou 6,5 m/s).



En conclusion l'éolienne a un rendement global d'environ 10%, l'éolienne a un rendement de 10 % et le générateur un rendement de 90%. Le rendement global étant le produit de rendement intermédiaire il est faible car le rendement de l'éolienne est lui-même très faible.

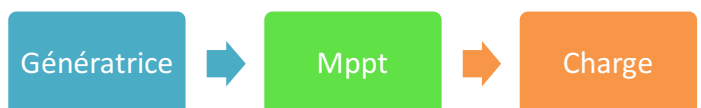
## Conclusion Générale :

Pour conclure notre étude nous pouvons dire que l'éolienne Savonius est une des solutions envisagées pour permettre la transition énergétique en particulier dans les applications domestiques. Nous avons constaté qu'elle s'insérerait facilement dans un petit espace (dans notre cas les différentes souffleries) nous avons aussi constaté que plus l'éolienne est grande plus elle génère d'énergie.

### Ouverture

Nous aurions pu imaginer pour aller plus loin dans notre démarche ajouter un convertisseur d'énergie qui modulerait la charge apparente pour l'éolienne afin de toujours travailler à la puissance maximum.

Mppp (maximum power point tracking) est le programme chargé de toujours exploiter le maximum de puissance fournie.



L'objectif final est de récupérer le maximum d'énergie possible quel que soit la vitesse du vent.

