

2008
2009

Dans le vent !



DANIEL Nahom,
FORESTIER Hadrien,
BOUILLOUX-LAFONT Arthur
Lycée Hoche, Versailles
2008 2009
<http://apelh.free.fr>

Sommaire	2
Résumé	3
Introduction	4
1 Présentation du banc d'essai et des maquettes	5
1.1 Le banc d'essai :	5
1.1.1 Outils et appareils utilisés :	6
1.2 Les maquettes	7
2 Induction électromagnétique	10
2.1 Mise en évidence	10
2.2 Notion de flux magnétique	11
2.3 Lois de l'induction	12
2.3.1 Loi de Faraday	12
2.3.2 Loi de Lenz	12
2.4 Cas précis de l'éolienne Savonius	13
3 Les paramètres jouant un rôle sur le fonctionnement de l'éolienne	18
3.1 La vitesse du vent	18
3.2 La fréquence et la vitesse angulaire	19
3.3 La tension aux bornes des bobines : f.é.m. induite	20
3.4 L'influence du nombre de spires	21
4 Optimisation	22
4.1 Etude énergétique de l'éolienne	22
4.2 Les différents rendements	22
4.2.1 Le rendement total R_{total}	22
4.2.2 Les rendements intermédiaires	24
4.3 Influence de la géométrie	25
4.3.1 Définition de Ra	25
4.3.2 Protocole expérimental et résultats obtenus	26
4.4 Etude des deux rendements intermédiaires pour Ra optimal	28
4.4.1 Rappel des deux rendements intermédiaires	28
4.4.2 Calcul de R₁ et R₂	28
4.5 Influence du nombre de spires sur la tension induite	32
Conclusion	34
5 Bibliographie	35
6 Remerciements	35
7 Annexe	36

Résumé

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui se développera sans doute dans le futur. Les éoliennes sont des machines qui transforment l'énergie du vent en une énergie utilisable par l'homme. Citons les éoliennes qui produisent de l'électricité ou encore celles qui permettent de pomper de l'eau. Il existe de nombreux modèles d'éoliennes, le plus souvent inconnus du grand public.

Ce rapport se propose d'étudier le modèle Savonius. L'étude a pour objectif l'optimisation du modèle Savonius à travers une étude paramétrique de plusieurs maquettes d'éoliennes de type Savonius produisant de l'électricité. On définit alors l'efficacité d'une maquette par son rendement énergétique (la puissance électrique de sortie sur la puissance cinétique du vent d'entrée). Les paramètres étudiés sont variés : configuration géométrique du rotor, influence de la vitesse du vent, influence du nombre de spires des bobines dans le générateur,... L'étude a été réalisée par l'intermédiaire d'un souffleur (mode inverse d'un aspirateur), d'un oscilloscope, d'un stroboscope, d'un anémomètre à fil chaud et de résistances réglables.

L'étude a permis de montrer l'influence de la configuration géométrique sur le rendement énergétique. En effet, un rapport e/D aux alentours de 0,3 semble présenter les meilleures performances en termes de rendement énergétique. En ce qui concerne les autres paramètres, l'influence de la vitesse du vent sur la fréquence de rotation, l'influence du nombre de spires sur la f.é.m. induite,... il semble qu'il n'y ait pas de critères optimaux car ils dépendent intrinsèquement des caractéristiques de la maquette étudiée. Alors que le rapport « optimal » trouvé peut être généralisé à d'autres maquettes (de toutes les tailles).

L'un des défauts du modèle Savonius est son rendement relativement bas. Ce défaut se confirme car les rendements obtenus avec les maquettes étudiées sont faibles. Sachant que les rendements calculés sont le rapport de la puissance électrique de sortie sur la puissance cinétique fournie par le vent, il est intéressant de savoir quelles transformations énergétiques (transformation de l'énergie du vent en énergie mécanique de rotation, et transformation de l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique) entraînent des rendements si faibles. Malheureusement les conclusions de cette étude ne sont pas encore prêtes pour ce rapport écrit.

Introduction

L'énergie éolienne est sujette d'une attention particulière en ces temps de crise climatique. L'éolienne la plus connue est celle à axe horizontal, mais il en existe beaucoup d'autres souvent méconnues du grand public.

Dans ce rapport nous allons justement étudier une de ces éoliennes : celle de type Savonius. Ce dernier se décompose en deux études majeures. Premièrement, il convient d'analyser et de bien comprendre le fonctionnement de notre éolienne, et particulièrement comment parvient-on à obtenir de l'énergie électrique.

La deuxième partie de ce rapport sera centrée sur l'optimisation du modèle et comprendra une série de mesures et d'expérimentations.

Dans la mesure où le modèle Savonius ne peut être utilisé pour produire de l'énergie à très grande échelle, les études à son sujet sont peu nombreuses et relativement datées. Tout en étant loin d'être inintéressantes ou de mauvaise qualité, elles sont cependant bien plus générales tandis que ce rapport traite exclusivement de maquettes de type Savonius produisant de l'électricité.

Pourtant, le thème des énergies propres est à la mode. Et dans ce domaine, on ne peut nier que le modèle Savonius possède certains avantages que les autres éoliennes n'ont pas forcément : le mécanisme se met en route même avec un vent très faible, et surtout, ce dernier peut venir de toutes les directions. Il n'est alors pas déraisonnable de penser qu'il puisse être efficace dans le cas de petites installations personnelles.

Comment l'éolienne Savonius fonctionne-t-elle exactement et Comment la rendre la plus efficace possible ? En essayant de répondre à ces interrogations, nous avons voulu fournir des résultats à la fois intéressants et utiles. Si nous n'avons pas du tout la prétention d'optimiser à la perfection l'éolienne Savonius, nous allons tenter, avec les moyens que nous avons, de proposer un rapport le plus complet et précis possible.

1 Présentation du banc d'essai et des maquettes

1.1 Le banc d'essai :

L'étude des maquettes s'est déroulée sur un banc d'essai constitué d'un souffleur et d'une règle permettant le déplacement des maquettes selon un axe défini.



En effet, la puissance du souffleur ne peut pas être modifiée donc les maquettes doivent être déplacées afin de simuler un changement de la vitesse de l'air les traversant. Ne pouvant savoir exactement quel type d'écoulement se produisait, l'hypothèse d'un écoulement unidimensionnel et uniforme dans un plan orthogonal à la direction du vent a été retenue.



1.1.1 Outils et appareils utilisés :

Oscilloscope : l'oscilloscope nous permet de mesurer en temps réel la tension aux bornes des maquettes (qui sont des génératrices d'électricité). Ces données sont nécessaires lors du calcul des rendements et lors de l'établissement des relations entre la vitesse du vent, la fréquence et l'amplitude de la tension produite. L'oscilloscope nous permet aussi de mesurer indirectement la fréquence de rotation des rotors car il suffit de diviser la fréquence de la tension par un facteur 4 pour trouver la fréquence de rotation. (Cf. II)

Stroboscope : le stroboscope est aussi un moyen de mesurer la fréquence de rotation d'un objet. Cependant la fréquence de rotation des maquettes n'étant pas rigoureusement constante pour une vitesse du vent donnée, le stroboscope ne permet qu'une approximation de celle-ci. Mais le stroboscope nous a aussi permis de vérifier qu'il y avait bien un facteur 4 entre la fréquence de la tension observée à l'oscilloscope et celle de la rotation de l'éolienne.

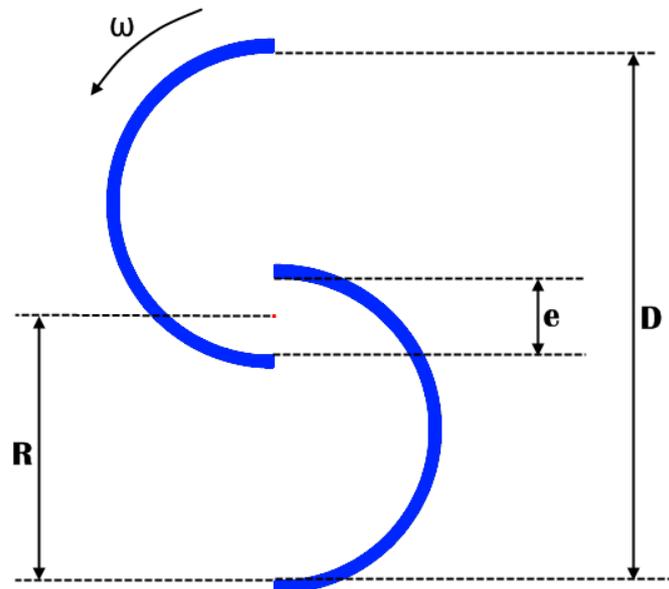
Anémomètre à fil chaud : l'anémomètre à fil chaud est un appareil permettant de mesurer la vitesse du vent. Au contraire des anémomètres traditionnels, il ne s'appuie pas sur un mouvement mécanique engendré par le vent.

Le principe de l'anémomètre à fil chaud repose sur le changement de température dans l'espace que provoque un vent plus ou moins fort. L'anémomètre à fil chaud est constitué d'un capteur et d'un appareil de lecture des mesures. Le capteur est formé par un fil métallique au sein duquel circule un courant électrique. La température de l'air autour du fil métallique influence la résistance électrique de celui-ci. Ainsi lorsque le vent souffle fort sur le capteur, le fil métallique est refroidi et par conséquent la résistance diminue. Ce qui permet à l'appareil de mesure de nous fournir la vitesse du vent.

Dynamomètre : le dynamomètre permet de mesurer des forces. Cependant la force exercée par le vent sur nos maquettes est faible (de l'ordre 0,3 N). Or nous n'avons à notre disposition que de dynamomètres à ressort imprécis. Cela amène à de grandes incertitudes et des résultats difficilement exploitables. (Cf. Annexe : Force du vent sur l'extrémité d'un rotor en fonction de la vitesse du vent).

1.2 Les maquettes

Les notations utilisées par la suite sont explicitées sur le schéma ci-dessous montrant la configuration d'un rotor à deux demi-cylindres (coupe transversale) :



Nous avons été amenés à fabriquer deux maquettes de rotor différentes :

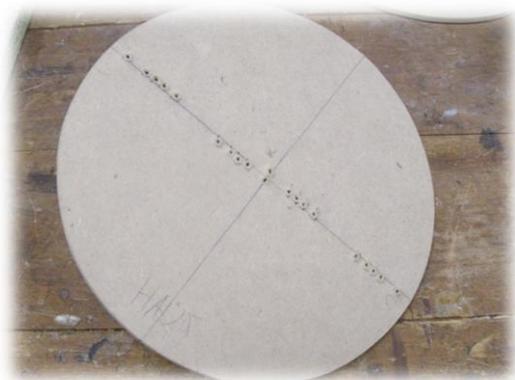
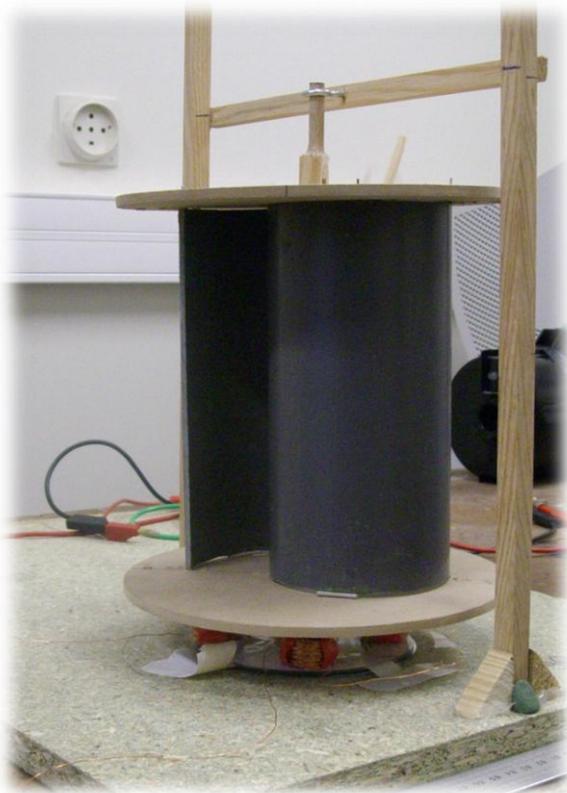
Maquette n°1 (M1) : le rotor de cette maquette est constitué de deux demi-bouteilles cylindriques en plastique et d'une base circulaire en carton. Sur ce carton sont disposés quatre aimants qui en tournant vont induire une tension aux bornes des bobines se trouvant sur la planche de la structure complète.



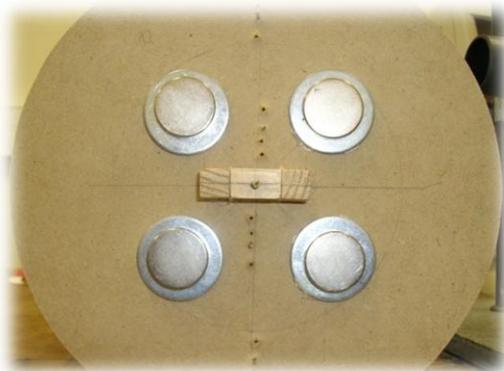
La fabrication de ce type de rotor pose quelques problèmes : d'une part le temps de fabrication est important et d'autre part le plastique peut se déformer à haute vitesse, ce qui nous amène encore une fois à des incertitudes.

Nous avons fabriqué deux rotors de ce type ayant des rapports e/D différents : $1/6$ pour l'un et $1/3$ pour l'autre. Ces maquettes nous ont permis surtout d'étudier l'influence de la vitesse du vent sur la fréquence de rotation, sur la tension produite et l'influence du nombre de spires dans les bobines sur l'amplitude de la tension produite. En ce qui concerne une étude de la configuration géométrique du rotor il nous a semblé plus pertinent de fabriquer une nouvelle maquette dont on pouvait régler les rapports e/D afin d'étudier l'influence de ceux-ci sur le rendement énergétique.

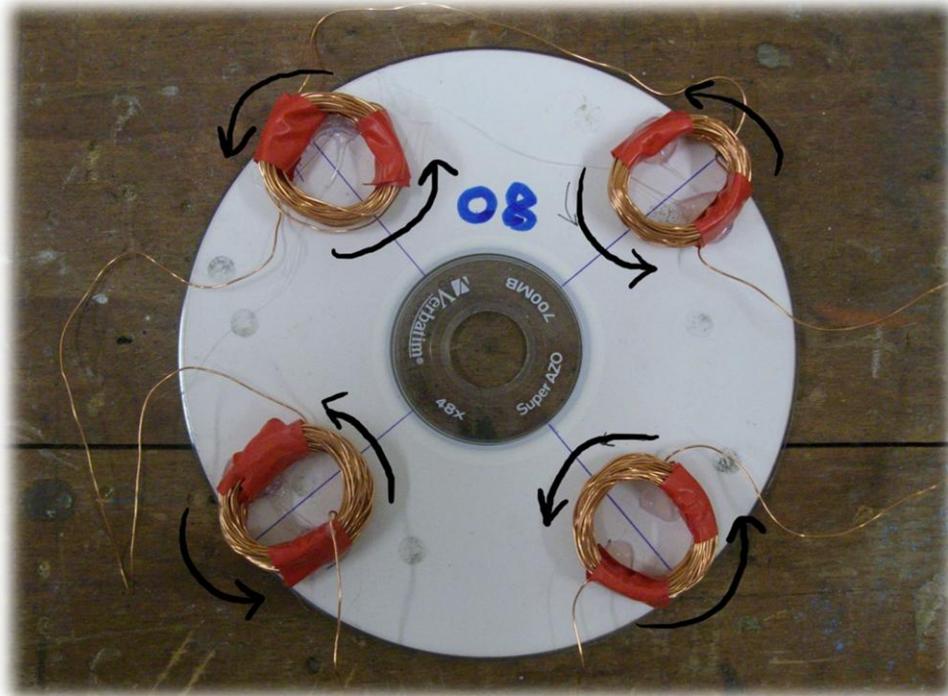
Maquette n°2 (M2) : le rotor de cette nouvelle maquette est d'une part plus rigide et d'autre part réglable. Il est constitué de bases en bois et de deux demi-cylindres en PVC. Nous avons aussi pu concevoir un système de trous dans les bases nous permettant de placer les deux demi-cylindres aux rapports voulus.



Ce nouveau type de rotor nous a alors permis d'étudier les rapports $e/D = 0$, $e/D = 0,135$, $e/D = 0,220$, $e/D = 0,305$, et $e/D = 0,480$. En ce qui concerne les aimants, nous avons conservé la même disposition que dans le rotor de la première maquette.



Bobines et aimants : le système {bobines} est constitué d'un seul fil de cuivre, couvert d'un vernis isolant, disposé de la façon suivante.



Il est important de noter que le sens de l'enroulement des quatre bobines est le même. (Cf. II)

Les aimants utilisés sont des aimants permanents en terres rares constitués de Néodyme, de Fer et de Bore : $Nd_2Fe_{14}B$. Ils ont la forme d'un disque de 2.5cm de diamètre et 0.4cm de hauteur. Leur champ magnétique B est de l'ordre de 1.3 Tesla. De la même manière que pour le sens d'enroulement des bobines, les aimants doivent être disposés selon une condition : les pôles des aimants faisant face au système {bobines} doivent être les mêmes.

2 Induction électromagnétique

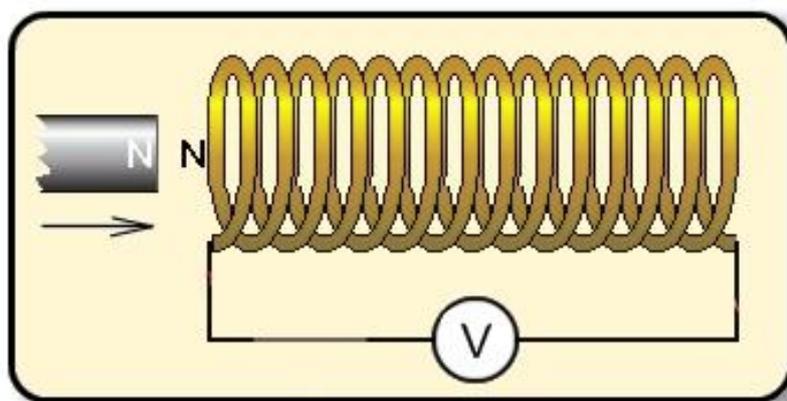
Dans cette partie nous allons étudier un aspect fondamental du fonctionnement de notre éolienne. Nous allons voir comment cette dernière est à l'origine d'un courant électrique.

Comment expliquer l'obtention d'une tension aux bornes d'un fil de cuivre n'étant relié à aucun générateur électrique ?

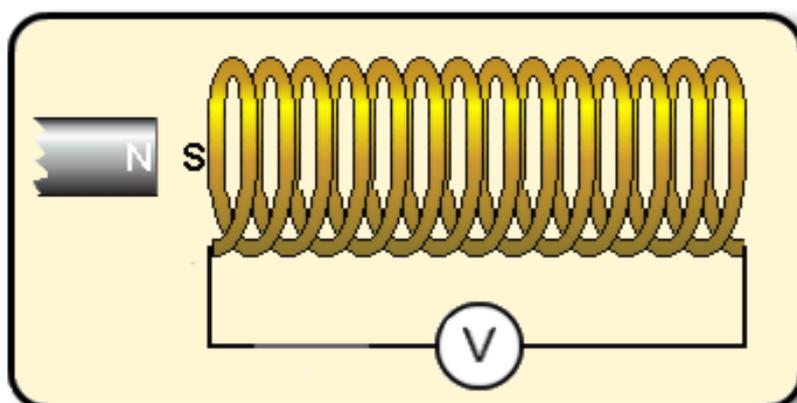
Cela est dû au phénomène d'induction électromagnétique, véritablement découvert et étudié par Faraday en 1831. Ce dernier observa qu'un champ magnétique pouvait être à l'origine d'une tension que l'on appellera f.é.m. induite (pour Force Electromotrice).

2.1 Mise en évidence

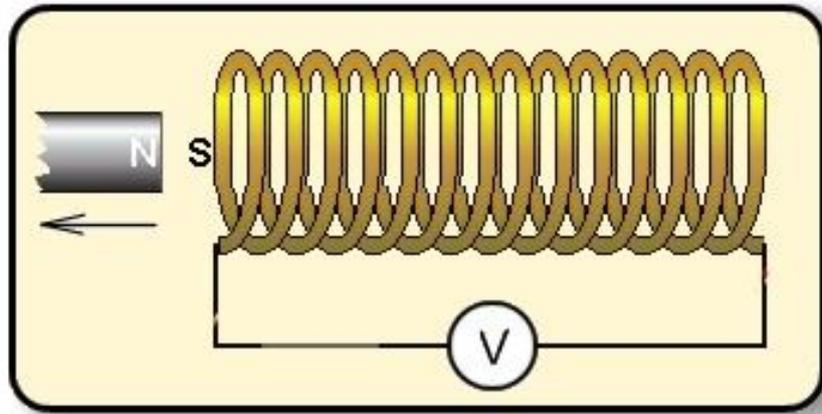
Le phénomène d'induction est aisément observable à l'aide d'expériences simples :



On approche un pôle Nord d'une bobine de cuivre. Le voltmètre indique l'obtention d'une f.é.m.



L'aimant est proche de la bobine mais ne bouge pas : pas de tension induite.



On retire subitement l'aimant : obtention de nouveau d'une f.é.m. induite

Ces expériences montrent que la f.é.m. induite ne dépend pas des caractéristiques du champ magnétique (noté B, en Tesla) mais de la variation de celui-ci.

A noter que la f.é.m. induite est d'autant plus grande que le mouvement de l'aimant est rapide. Ainsi, un aimant produisant un champ magnétique faible, mais déplacé rapidement peut induire une f.é.m. plus grande qu'un aimant plus puissant déplacé lentement.

2.2 Notion de flux magnétique

En refaisant les expériences précédentes avec des bobines de diamètre moindre, des f.é.m. plus petites sont obtenues. Ainsi, la valeur de la f.é.m. induite dépend également de la surface S traversée par les lignes de champ du champ magnétique B.

On définit le flux magnétique, exprimé en Wb ($T \cdot m^2$) par :

$$\Phi_m = \vec{B} \cdot \vec{S} \quad (\Phi_m = \int \vec{B} \cdot \vec{dS})$$

En somme, plus que la variation de B, c'est celle du flux qui est importante.

Variation de flux → F.é.m. induite.

2.3 Lois de l'induction

2.3.1 Loi de Faraday

Des résultats précédents découlent la relation suivante, donnant la tension induite (f.é.m.) ξ :

$$\xi = - \frac{d\Phi_m}{dt}$$

Dans le cas où le circuit est constitué de N spires de surface identique S (à l'image de nos propres bobines), on a : $\Phi_m = NBS \cos \theta$. Soit :

$$\xi = -N \frac{d\Phi_m}{dt}$$

Ce qui est tout à fait cohérent dans la mesure où chaque spire est le siège d'une f.é.m. induite. C'est cette équation qui est connue sous le nom de « Loi d'induction de Faraday ».

Nous avons que : **La f.é.m. induite est l'opposé du taux de variation du flux total à travers le circuit.**

2.3.2 Loi de Lenz

D'après ce que nous venons de voir, la variation du flux peut être due à plusieurs raisons : le champ peut être, réduit, augmenté, de même que la surface traversée peut être modifiée. Cependant, quoiqu'il adienne, la f.é.m. possède toujours une polarité bien définie. La loi de Faraday, en liant la polarité de la f.é.m. induite à la variation du flux (signe négatif dans l'équation), traduit l'idée de Lenz formulée en 1834 et connue désormais sous le nom de Loi de Lenz :

La f.é.m. induite s'oppose par ses effets aux causes qui lui ont donné naissance.

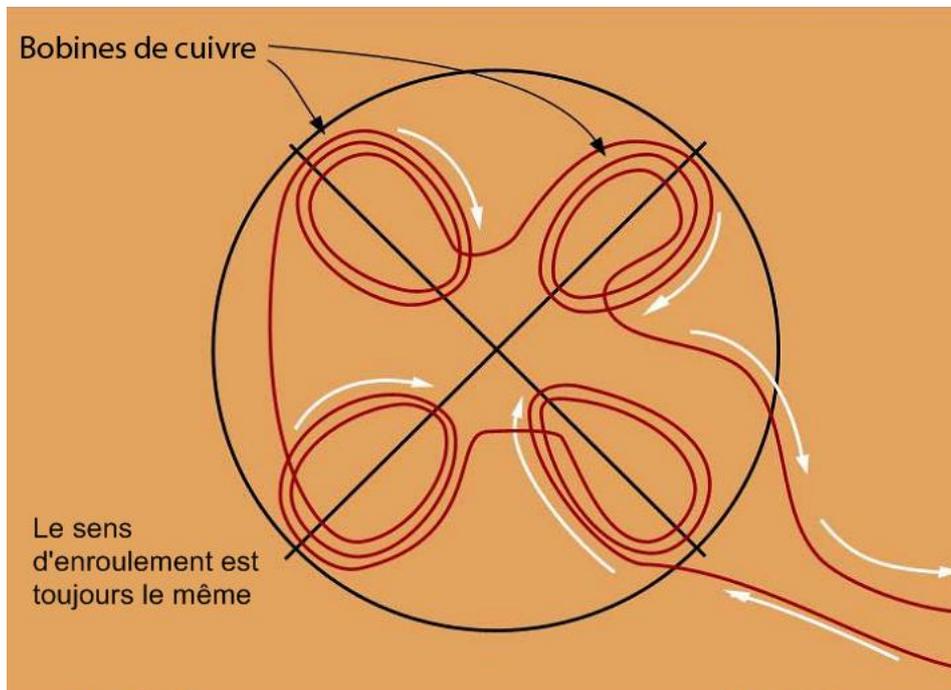
En prenant l'exemple d'un circuit fermé simple : la f.é.m. induite produit à son tour, un courant induit, responsable de l'apparition d'un champ magnétique induit (B'). Ce champ va s'opposer non pas particulièrement à B, mais à la variation (l'augmentation ou à la diminution, selon le cas) du flux, car c'est bien la variation du champ magnétique et non la valeur du champ magnétique lui-même qui engendre une f.é.m.

Voyons maintenant comment se traduisent ces résultats dans le cas de notre éolienne.

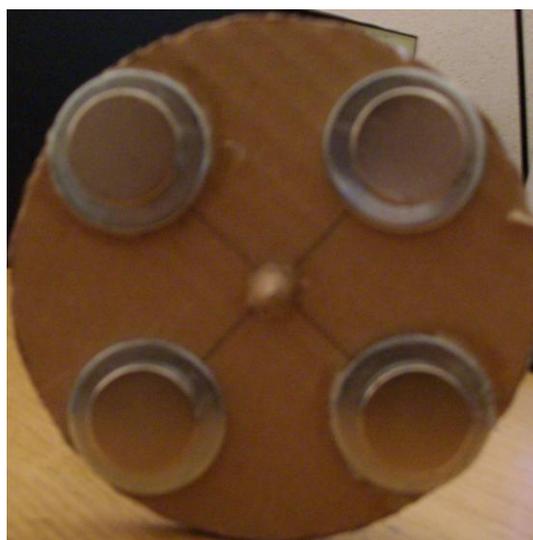
2.4 Cas précis de l'éolienne Savonius

Que se passe-t-il exactement pour l'éolienne Savonius ?

Cette dernière est composée de 4 bobines semblables à celles étudiées précédemment, et toutes enroulées dans le même sens (nous verrons pourquoi) :



Sous le socle des pâles sont fixés quatre aimants, tous orientés de la même façon (tous les pôles nord vers le haut par exemple). Le cas où l'un des aimants serait orienté différemment des autres serait problématique, nous verrons pourquoi également.

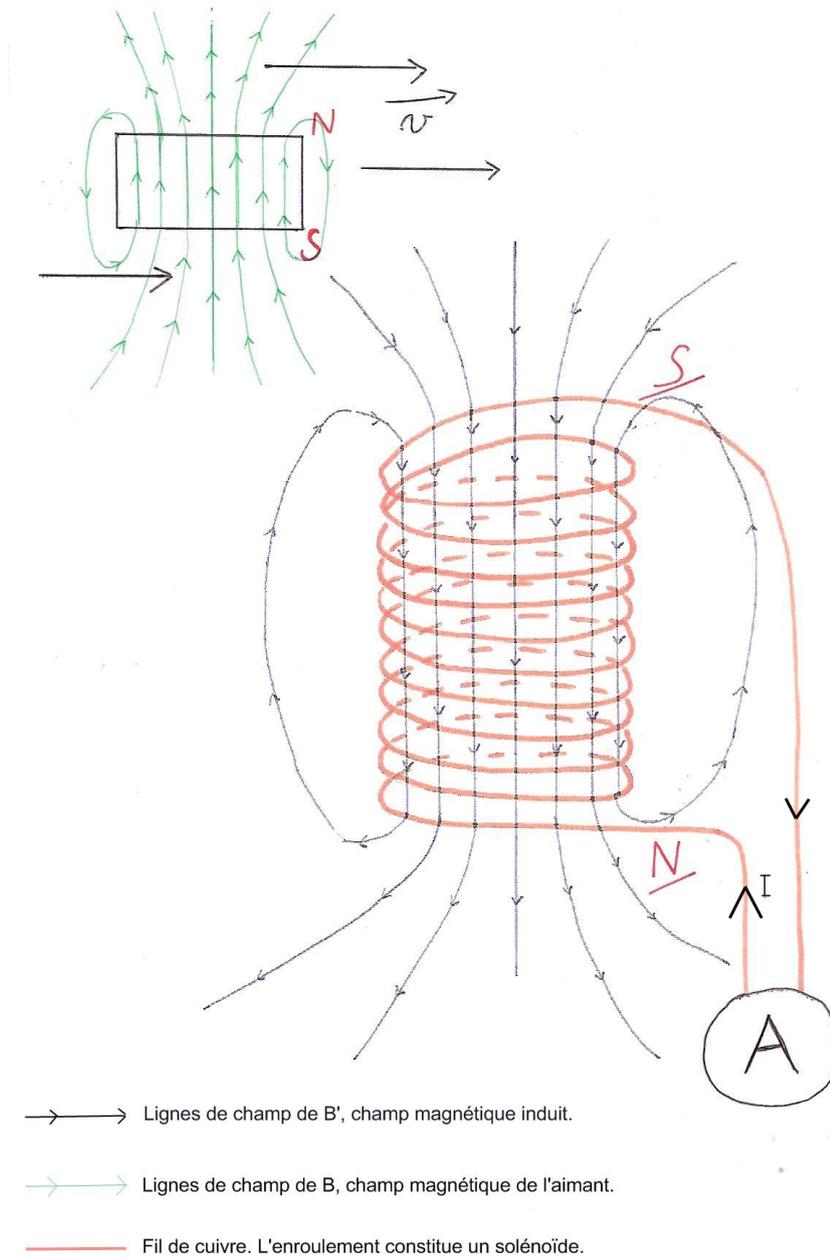


La rotation de l'éolienne permet donc un déplacement constant des aimants, ce qui fait varier le flux magnétique en permanence (indispensable, donc, pour générer un courant dans les bobines).

Voyons précisément ce qui se passe au niveau de chaque bobine lors de l'arrivée d'un aimant. Mettons que c'est le pôle Sud de l'aimant qui s'en approche.

Le champ de l'aimant sort du pôle Nord et entre par son pôle Sud. L'arrivée plus ou moins rapide de l'aimant provoque immédiatement une augmentation du flux magnétique. Il y a alors une f.é.m. induite dans la bobine, qui produit à son tour un courant induit. Ce courant produit un champ magnétique induit (B') qui va s'opposer à l'augmentation du flux de B (Loi de Lenz), il va donc s'opposer à B . Le flux à travers la bobine vaut alors : $\Phi_{total} = NS(B - B')$

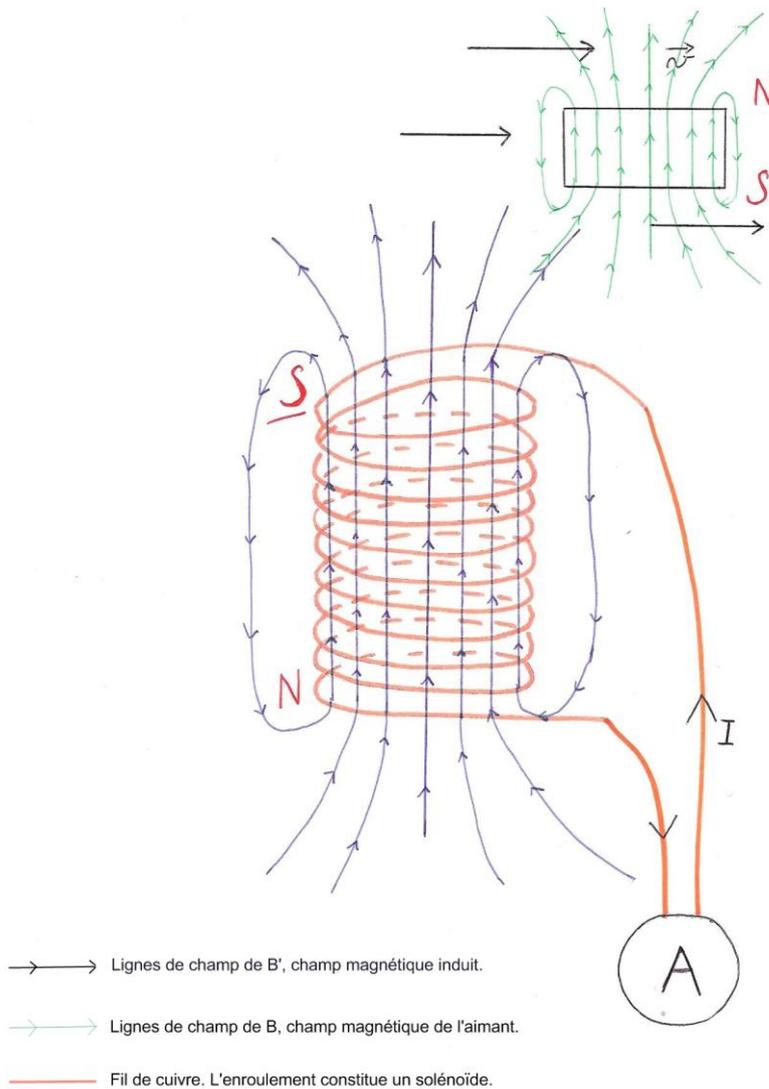
Nous avons déterminé le sens des lignes de champ de B' et nous pouvons donc en déduire sa polarité : un pôle Sud se forme au niveau de la partie haute de la bobine. Enfin, une fois la polarité obtenue, et considérant le sens d'enroulement de la bobine, nous en déduisons le sens du courant. C'est d'ailleurs pour cela que toutes les bobines doivent être enroulées dans le même sens.



- L'arrivée de l'aimant provoque une augmentation de ϕ_m
- L'augmentation de ϕ_m induit un courant (le circuit est fermé)
- Ce courant entraîne l'apparition d'un champ induit B'
- B' s'oppose à B
- Du sens des lignes de champ, on déduit la polarité
- De la polarité, on déduit le sens du courant.

Voici ensuite ce qui se passe lors de l'éloignement de l'aimant.

Là encore, le mouvement de l'aimant provoque une variation du flux magnétique, seulement, ce n'est plus une augmentation mais une diminution. Le champ magnétique induit, B' va par définition s'opposer à cette diminution, il va donc, cette fois, être **dans le sens de B** . La polarité de l'aimant se voit donc inversée (donc le sens du courant également) ; le nord se retrouve au niveau de la partie haute de la bobine. Il y a donc cette fois une force d'attraction exercée par la bobine sur l'aimant.



- Cette fois, l'éloignement de l'aimant entraîne une diminution de ϕ_m
- Cette variation du flux entraîne un courant induit.
- Ce courant crée un champ induit B'
- B' est dans le sens de B : il s'oppose à sa diminution.
- D'où la polarité
- D'où le sens du courant.

Si nous avons choisi de rapprocher un pôle Nord des bobines, on observerait le même phénomène à ceci près que les lignes de champ de l'aimant se verraient inversés, entraînant le changement de sens de tout le reste : les lignes de champ de B', la polarité et le courant induit. Mais de ce fait, l'aimant se verrait toujours repoussé par la bobine lors de son rapprochement (un pôle Nord se crée au sommet de la bobine) et attiré lors de son éloignement (formation d'un pôle Sud). On comprend désormais pourquoi chacun des quatre aimants doivent être orientés de la même façon.

Ainsi, dans n'importe quelle situation, le phénomène d'induction électromagnétique s'oppose à la rotation de l'éolienne, mais permet d'obtenir une f.é.m. aux bornes des bobines.

Regardons maintenant les résultats obtenus à l'oscilloscope.



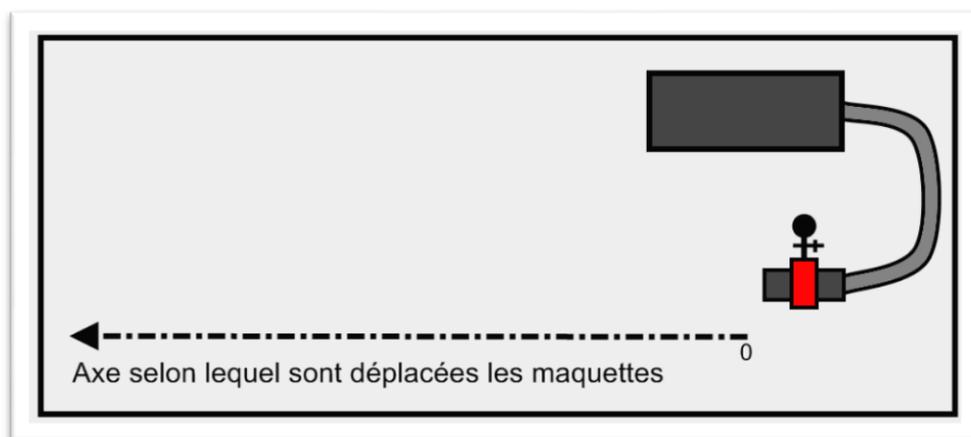
On peut voir que la courbe a une forme sinusoïdale. L'oscilloscope nous renseigne sur la valeur de la tension obtenue ainsi que sur la fréquence de rotation de l'éolienne. Pour connaître cette fréquence, il faut diviser par quatre la valeur donnée par l'oscilloscope. Expliquons pourquoi :

Notons A1, A2, A3, et A4 nos aimants et B1, B2, B3 et B4 nos bobines, de telle sorte qu'à t donné, l'aimant A1 se trouve au dessus de B1, A2 au dessus de B2 et ainsi de suite. Une période T s'est écoulée lorsque chaque aimant a fait un tour et puis est revenu au dessus de la bobine qui lui correspond. Seulement, les quatre aimants étant strictement identiques, c'est le temps qui s'écoule entre le passage de l'aimant A1 jusqu'à la bobine B2 qui sera perçu par l'oscilloscope comme une période. La vraie période T est obtenue en multipliant par quatre la valeur donnée par l'oscilloscope. La fréquence étant l'inverse de la période, cela revient à diviser par quatre la fréquence donnée par l'appareil.

3 Les paramètres jouant un rôle sur le fonctionnement de l'éolienne

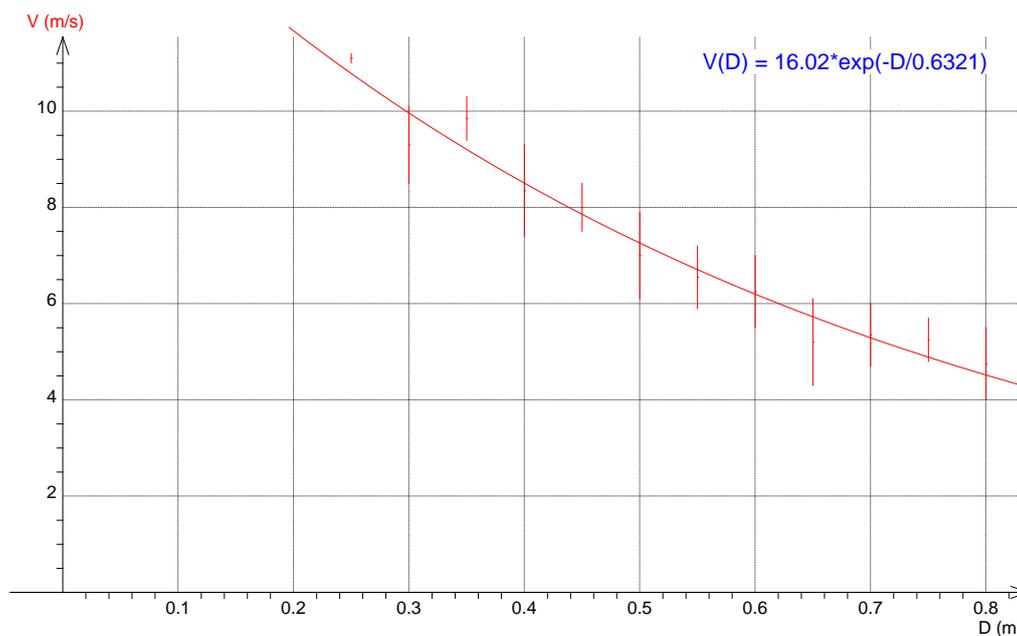
3.1 La vitesse du vent

La vitesse du vent est bien sûr un des paramètres extérieurs les plus importants de nos maquettes. Le souffleur, étant un aspirateur en mode inverse, ne peut être réglé afin de souffler de l'air à une vitesse donnée. Par conséquent il a été décidé d'étudier les maquettes en les plaçant à des distances choisies du souffleur, permettant ainsi de faire varier la vitesse du vent qui traverse les rotors.



La première étape a été de mesurer la vitesse du vent lorsque l'on s'éloigne de plus en plus du souffleur. Pour ce faire, nous nous sommes servis d'un anémomètre à fil chaud que l'on a placé à plus endroits sur l'axe de déplacement des maquettes.

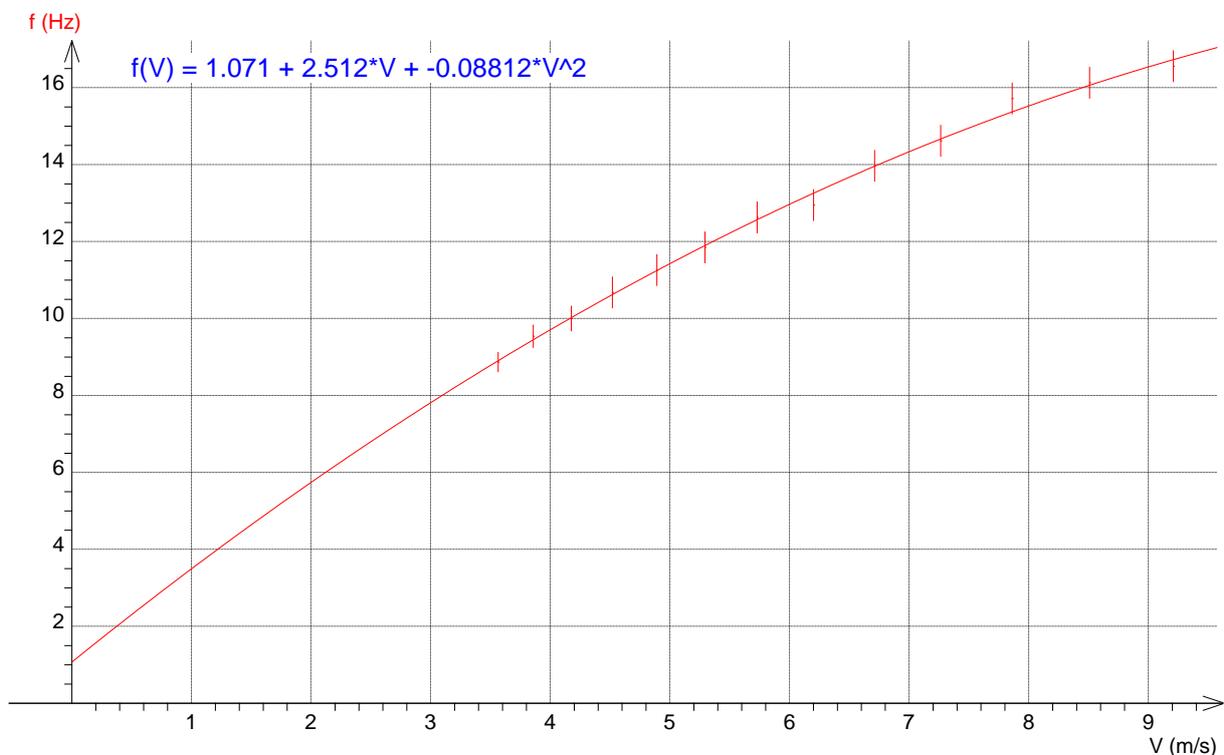
Ainsi nous avons obtenu cette courbe montrant la vitesse du vent en fonction de la distance :



Malgré l'utilisation d'un anémomètre à fil chaud des incertitudes de mesures allant de 4.5% à 17.3% subsistent. C'est pourquoi l'étude des paramètres suivants est faite en fonction du modèle choisi pour la vitesse du vent en fonction de la distance : $V(D) = 16.02 * \exp\left(-\frac{D}{0.6321}\right)$.

3.2 La fréquence et la vitesse angulaire

L'étude de l'influence de la vitesse du vent sur la fréquence de rotation, et par conséquent sur la vitesse angulaire des rotors, a été réalisée sur la maquette M1 avec le rotor de rapport $Ra = 1/3$.



Les mesures montrent donc que la fréquence des rotors n'est pas proportionnelle à la vitesse du vent. Les forces de frottements fluides se modélisent suivant $f = Kv^x$, la puissance x dépendant de la vitesse de l'écoulement fluide. Ainsi plus la vitesse du vent est élevée et plus les forces de frottements fluides sont grandes.

La déduction de la vitesse de rotation des rotors se fait alors simplement :

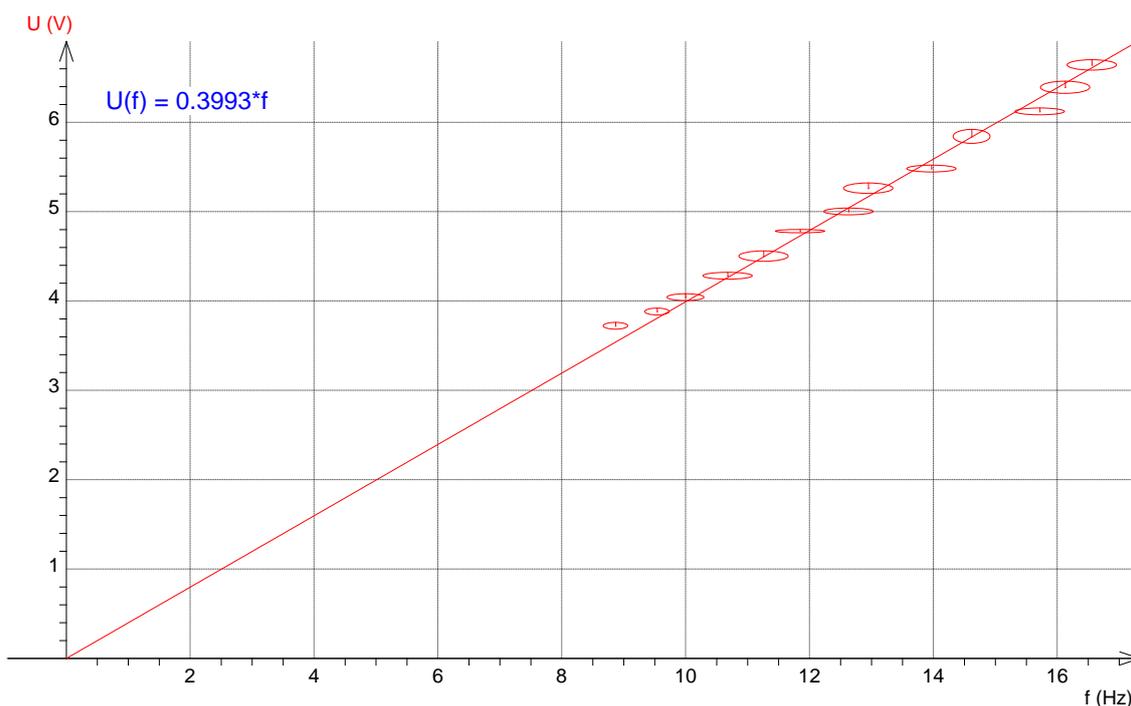
$$\omega = 2\pi f$$

Avec ω : vitesse de rotation (rad/s)

Et f : fréquence de rotation (Hz)

3.3 La tension aux bornes des bobines : f.é.m. induite

La deuxième partie de ce rapport a montré qu'un phénomène d'induction électromagnétique se manifeste lorsque le rotor des maquettes tourne. En effet, à la base du rotor sont disposés quatre aimants tandis que sur la planche de la structure est disposé un système de quatre bobines. Lorsque le rotor tourne, le flux magnétique traversant les spires des bobines varie et induit aux bornes du système de bobines une f.é.m. Nous avons alors mesuré l'amplitude de la f.é.m. induite en fonction de la fréquence de rotation du rotor (maquette M1, rapport Ra = 1/3) :



D'après les résultats obtenus, la f.é.m. est proportionnelle à la fréquence de rotation. Cela est d'ailleurs conforme à la loi de Faraday :

Simplifions le problème et considérons le champ magnétique variable $B(t)$ directement au dessus d'une bobine. La puissance de ce champ magnétique varie de façon périodique au dessus de la bobine, nous pouvons donc supposer que celui-ci vérifie une équation de la forme :

$$B(t) = A \cos(\omega t) + B$$

Nous obtenons alors un flux magnétique dans la bobine de la forme suivante :

$$\phi(t)_B = \vec{B} \cdot \vec{S} = (A \cos(\omega t) + B) * S * \cos(0) = S A \cos(\omega t) + B S$$

La loi de Faraday permet alors d'écrire :

$$\xi = - \frac{d\phi}{dt} = S A \omega \sin(\omega t) = k \omega = k 2\pi f$$

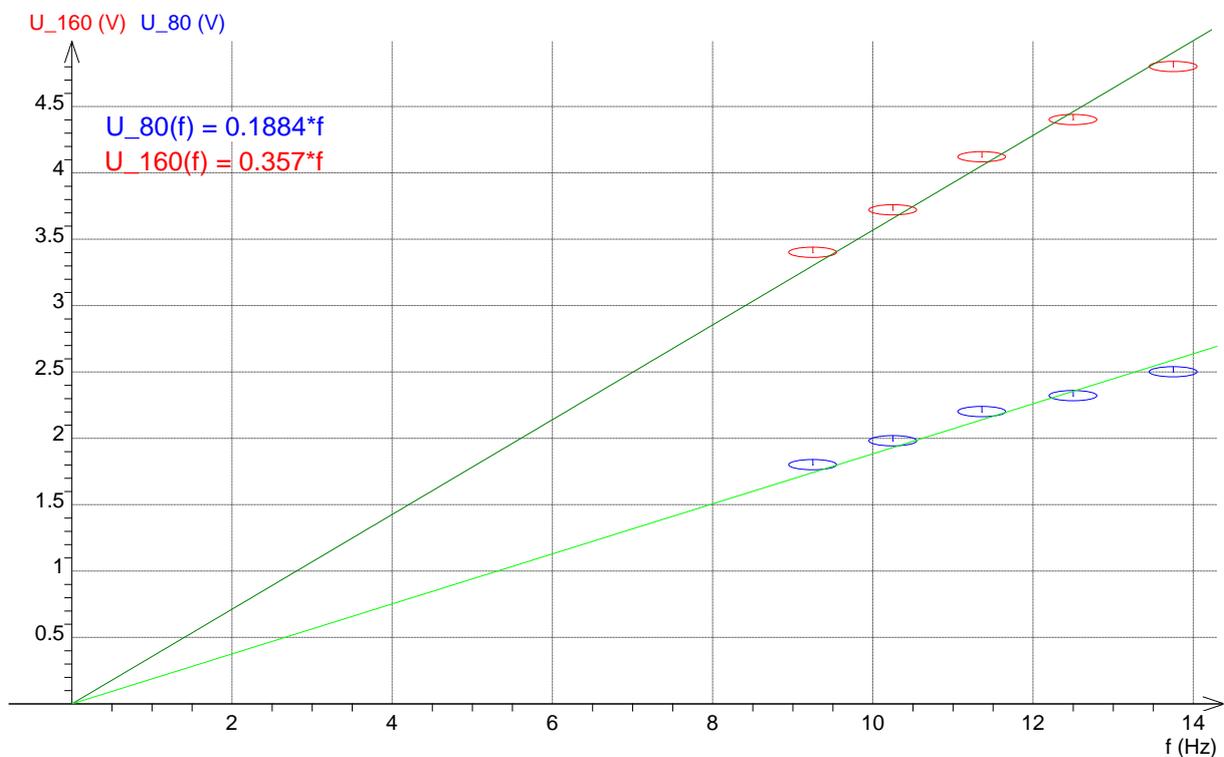
La relation proportionnalité entre la f.é.m. induite et la fréquence établie expérimentalement est en accord avec la loi de Faraday.

3.4 L'influence du nombre de spires

Le système bobine est constitué quatre bobines à N spires chacune. Or, nous avons vu que selon la loi de Faraday, la f.é.m. induite aux bornes d'une bobine est proportionnelle au nombre de spires constituant cette bobine :

$$\xi = -N \frac{d\phi}{dt}$$

Nous avons donc voulu vérifier cette loi en mesurant la f.é.m. induite aux bornes d'un système {bobines} à 80 spires par bobine et aux bornes d'un autre système à 160 spires par bobine.



Afin de vérifier la relation de proportionnalité entre le nombre de spires par bobine et la f.é.m. induite, il suffit alors de faire le rapport du coefficient directeur de $U_{160}(f)$ sur celui de $U_{80}(f)$:

$$\frac{0.357}{0.1884} = 1.89 \sim 2$$

Théoriquement si on double le nombre de spires par bobine, on double aussi la f.é.m. induite. Ce facteur 2 est bien retrouvé expérimentalement à moins de 6% d'erreur, ce qui compte tenu des incertitudes est satisfaisant. Par la suite, nous étudierons d'autres systèmes {bobines} afin de s'assurer de la validité de la relation de proportionnalité entre le nombre de spires et la f.é.m. induite.

4 Optimisation

4.1 Etude énergétique de l'éolienne

Une éolienne transforme l'énergie cinétique contenue dans le vent en énergie mécanique de rotation. Cette énergie peut alors être transformée en énergie électrique si un générateur électrique est couplé à l'éolienne. Le générateur électrique, à son tour, va transformer l'énergie mécanique fournie par l'éolienne en énergie électrique. Cette transformation est rendue possible grâce au phénomène d'induction électromagnétique étudié dans la partie II de ce rapport. Ainsi nous obtenons le bilan énergétique suivant :



Nous définissons alors l'efficacité énergétique de nos maquettes comme étant le rapport de l'énergie électrique de sortie sur l'énergie cinétique d'entrée du système {Maquette}. Nous nous intéressons donc aux différentes transformations énergétiques et surtout leur rendement pour optimiser les maquettes.

4.2 Les différents rendements

Définissons tout d'abord les trois différents rendements :

4.2.1 Le rendement total R_{total}

Puissance du vent : Les maquettes étudiées sont traversées par un volume d'air en mouvement. Nous considérons que le vent émis par le souffleur est un fluide en écoulement parfait, stationnaire, incompressible et unidimensionnel. La première étape du calcul de R_{total} commence donc par le calcul de la puissance du vent.

Rappelons la formule de l'énergie cinétique :

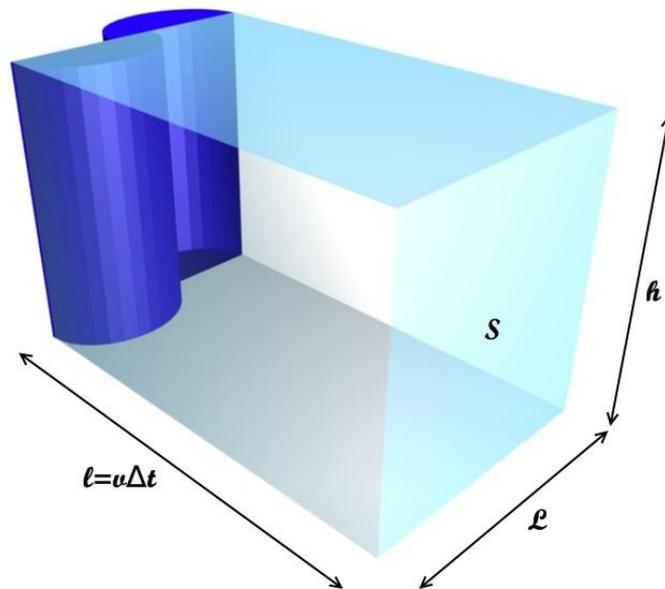
$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

E_c : énergie cinétique (J)

m : masse de l'objet (Kg)

v : vitesse de l'objet (m/s)

Considérons le volume d'air traversant le rotor suivant :



Il y a N particules d'air de masse m , dans ce pavé, arrivant sur le rotor de l'éolienne pendant une durée Δt . La masse volumique de ce cylindre est alors égal à :

$$\rho = \frac{N \cdot m}{V}$$

ρ : masse volumique ($kg \cdot m^{-3}$)

N : nombre de particules

m : masse d'une particule (kg)

V : volume du cylindre (m^3)

$$\text{Or } V = S \cdot l = S \cdot v \cdot \Delta t$$

S : surface (m^2)

Δt : durée (s)

$$\text{Donc nous obtenons : } V \cdot \rho = N \cdot m \Leftrightarrow S \cdot v \cdot \Delta t \cdot \rho = N \cdot m$$

$$\text{Donc : } N = \frac{S \cdot v \cdot \Delta t \cdot \rho}{m}$$

Puisque ces particules sont en mouvement, on leur associe une énergie cinétique :

$$E_{c_totale} = N \cdot \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{S \cdot v \cdot \Delta t \cdot \rho}{m} \cdot m \cdot v^2$$

$$\text{Donc : } E_{c_totale} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot \Delta t$$

Dès lors que l'énergie du vent est connue, le calcul de la puissance du vent est aisé. La puissance est la quantité d'énergie fournie au rotor par unité de temps. C'est donc un débit d'énergie.

$$P = \frac{\text{énergie reçue}}{\text{durée}}$$

$$\text{Donc : } P_{\text{vent}} = \frac{E_{c.\text{totale}}}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot \Delta t$$

$$\text{Donc : } P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3$$

On a ainsi l'expression de la **puissance du vent** en fonction de la vitesse du fluide (le vent) et de la surface du rotor.

Puissance électrique : Pour connaître la puissance électrique fournie par l'éolienne, il faut brancher le système {bobines} à une résistance afin de fermer le circuit et faire débiter l'éolienne.

Dans un circuit électrique, on a :

$$P_{\text{électrique}} = U \cdot I$$

$P_{\text{électrique}}$: puissance électrique (W)

U : tension (V)

I : intensité (A)

Expression du rendement total :

On peut maintenant calculer le rendement total :

$$R_{\text{total}} = \frac{P_{\text{électrique}}}{P_{\text{vent}}}$$

C'est à partir de ce rendement que nous allons pouvoir optimiser et conclure sur l'efficacité des maquettes.

4.2.2 Les rendements intermédiaires

Nous pouvons aussi nous intéresser aux deux rendements correspondant aux transformations de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation et de l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique. Ces rendements sont définis ainsi :

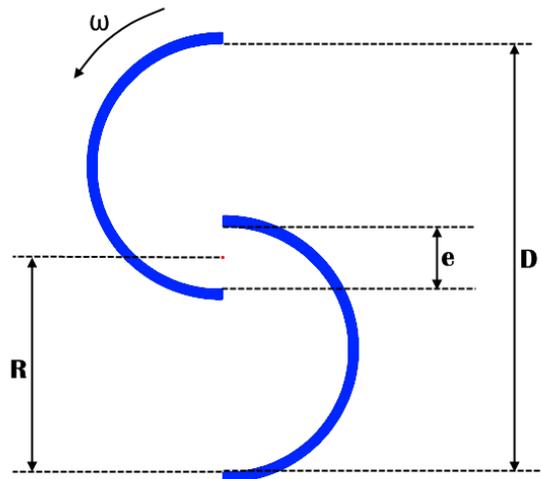
$$R_{\text{rotor / vent}} = \frac{P_{\text{rotor}}}{P_{\text{vent}}}$$

$$R_{\text{électrique / rotor}} = \frac{P_{\text{électrique}}}{P_{\text{rotor}}}$$

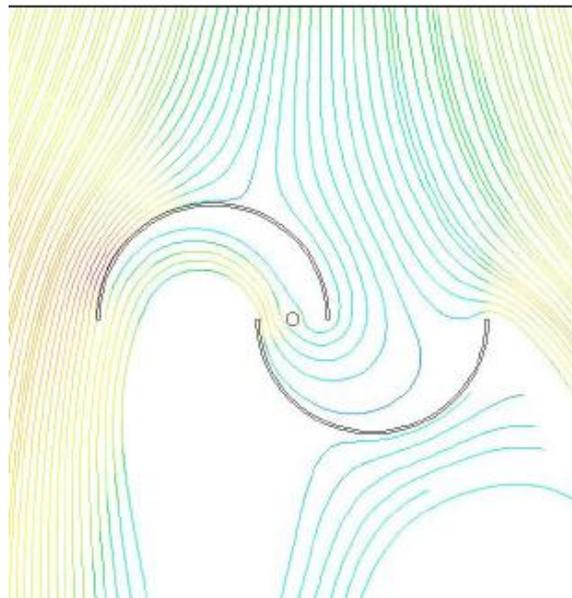
4.3 Influence de la géométrie

4.3.1 Définition de Ra

Comme vous avez pu le voir, l'éolienne de type Savonius est caractérisée par la configuration géométrique de son rotor (et plus précisément par le rapport entre l'écart e et le diamètre D du rotor).



Cet écart permet à l'air de circuler entre les deux demi-cylindres et d'exercer une force sur l'autre demi-cylindre, mais toujours dans le sens du mouvement.



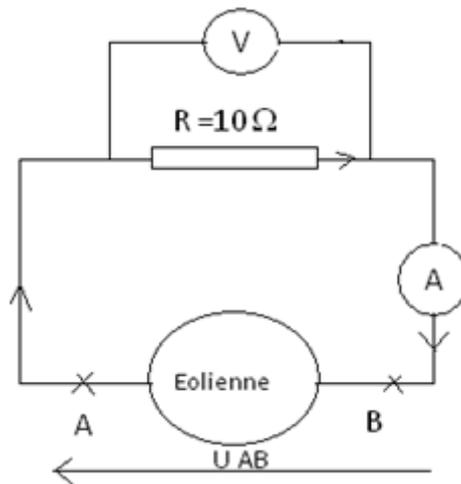
L'influence de ce phénomène, illustré ci-dessus, sur le rendement énergétique ne pouvant être directement établie, à cause de nos limitations techniques, nous nous sommes proposés d'étudier le rendement R_{total} en fonction des rapports $Ra = \frac{e}{D}$.

La maquette M2, construite spécialement pour cette étude géométrique nous a permis d'étudier les rapports : $Ra = 0$; $Ra = 0.135$; $Ra = 0.220$; $Ra = 0.305$; $Ra = 0.480$.

4.3.2 Protocole expérimental et résultats obtenus

Les expériences réalisées consistent à faire varier le rapport Ra de la maquette M2 et calculer le rendement total pour chaque rapport. Cette maquette a été faite de telle manière qu'un minimum de paramètres autre que les rapports varient entre les différents tests. L'éolienne a été placée à une distance fixe de la soufflerie lors de ces tests, afin de garder la même vitesse de vent traversant le rotor.

Puissance électrique :



Pour déterminer la puissance électrique fournie par la maquette M2, nous avons fermé le circuit électrique en branchant une résistance réglable aux bornes du système {bobines}. Ce système a une résistance de l'ordre de 6Ω . Afin de déterminer à quelle valeur nous allions régler la résistance du conducteur ohmique, nous avons mesuré l'intensité du courant induit en fonction de la valeur de la résistance. Ainsi nous avons décidé de travailler avec $R = 10\Omega$.

Puissance du vent : A l'aide d'un anémomètre à fil chaud, nous avons mesuré la vitesse du vent à la distance choisie pour placer la maquette du souffleur.

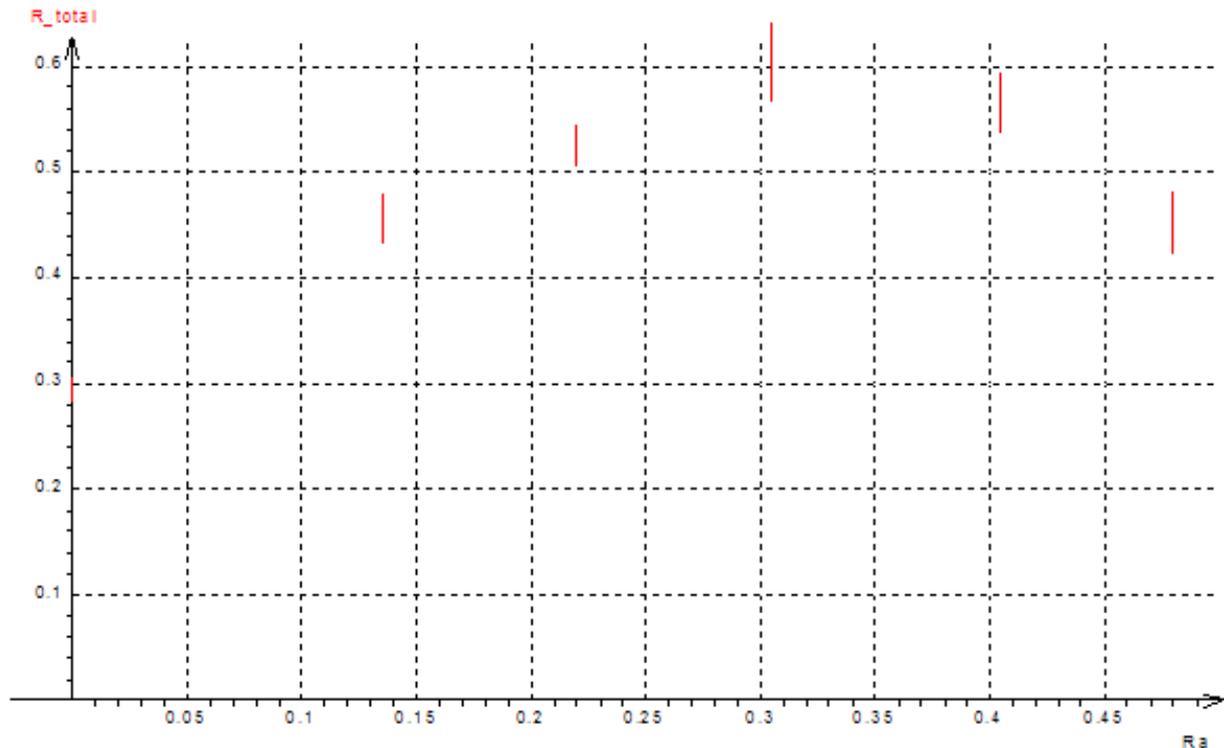
En utilisant les notations du schéma dans 3. i nous pouvons exprimer la surface du rotor traversée par le vent.

$$S = D \cdot h = (2R - e) \cdot h \quad \text{Ainsi} \quad P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (2R - e) \cdot h \cdot v^3$$

R : rayon du rotor (m)

D : diamètre du rotor (m) et h : hauteur du rotor (m)

En calculant les différentes surfaces pour chaque rapport et en mesurant la vitesse du vent à la distance fixée, nous obtenons la puissance du vent. Le graphique ci-dessous montre le rendement R_{total} en fonction des différents rapports :



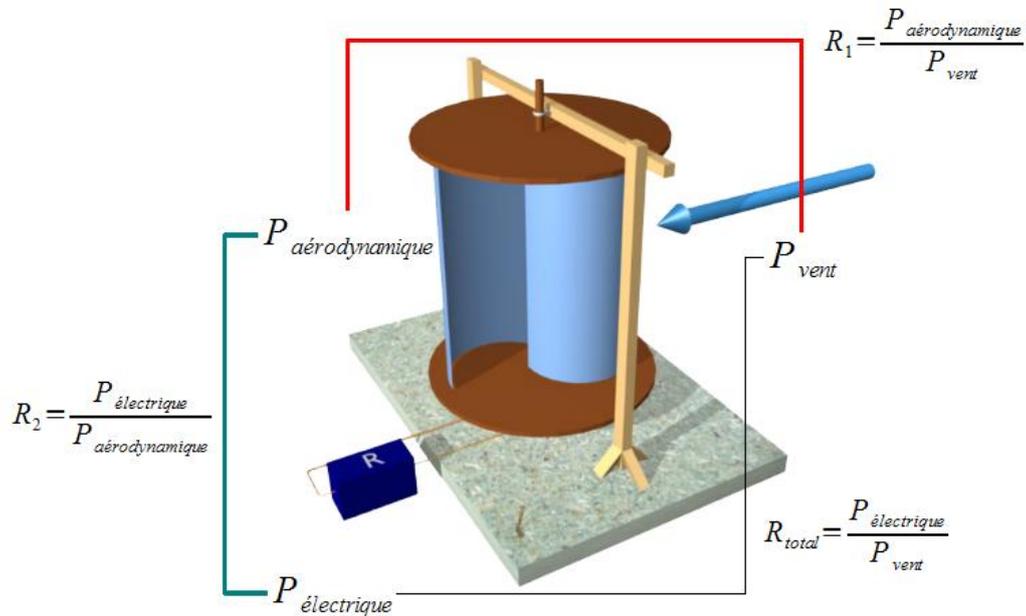
Remarque : Nous avons fait une série de mesures pour chaque rapport afin s'assurer de la validité des mesures.

Nous pouvons ainsi conclure à partir de ce graphique sur l'influence des rapports Ra sur le rendement énergétique. Un rotor de rapport Ra aux alentours de 0,3 semble présenter un rendement total supérieur à tout rotor de rapport Ra supérieur ou inférieur à 0,3. Lors de la construction d'une éolienne de type Savonius, un rapport Ra aux alentours de 0,3 donnera donc les meilleurs résultats en terme de rendement énergétique total.

Ainsi nous avons pu optimiser la configuration géométrique du rapport Ra de la maquette M2. Cependant nous remarquons que le rendement énergétique maximal est faible, en dessous de 0,6%. Il est à présent nécessaire de s'intéresser aux différentes transformations énergétiques afin de déterminer la transformation qui entraîne le plus de pertes et la possibilité d'optimisation de ces transformations. Les transformations sont au nombre de deux, et cela implique donc deux rendements énergétiques à étudier.

4.4 Etude des deux rendements intermédiaires pour Ra optimal

4.4.1 Rappel des deux rendements intermédiaires



4.4.2 Calcul de R_1 et R_2

Nous avons déjà obtenu auparavant deux relations simples pour calculer la puissance du vent et la puissance électrique.

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad P_{electrique} = U \cdot I$$

Cependant le calcul de la puissance aérodynamique du rotor n'est pas aisé car il faut connaître le couple exercé par le vent sur le rotor :

$$P_{aerodynamique} = \vec{C} \cdot \vec{\omega}$$

\vec{C} : couple exercé par le vent sur le rotor ($N \cdot m$)

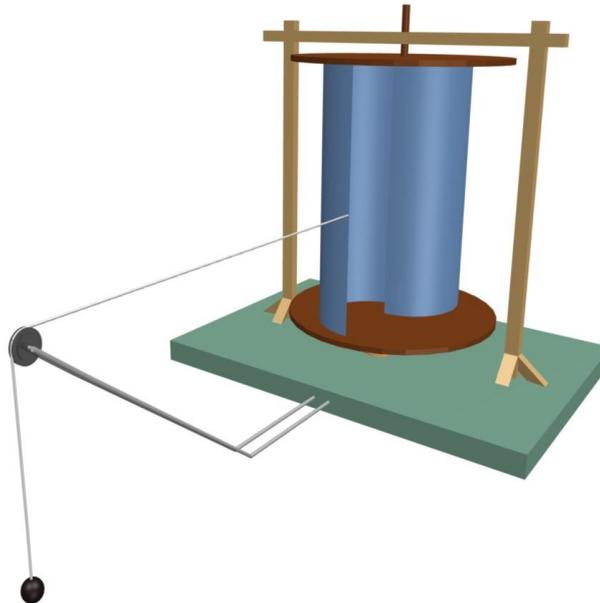
$\vec{\omega}$: vitesse de rotation instantanée du rotor (rad/s)

Pour déterminer le couple exercé par le vent sur le rotor nous avons utilisé le théorème du moment cinétique qui relie le moment d'inertie, l'accélération angulaire et la somme des couples exercés sur le rotor :

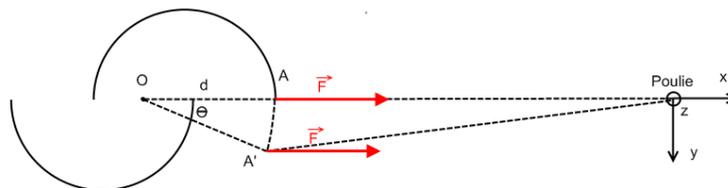
$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = \sum C_i$$

J : moment d'inertie du rotor par rapport à l'axe de rotation de vecteur unitaire \vec{z} ($kg \cdot m^2$)

Pour résoudre cette équation, un protocole expérimental a été élaboré afin de calculer le moment d'inertie du rotor autour de son axe de rotation. Le dispositif expérimental est le même que dans ce schéma :



Un objet de masse m est relié à l'extrémité des pales du rotor au moyen d'un fil et d'une poulie. Une fois cela fait, la rotation d'un angle θ puis le relâchement du rotor vont entraîner un phénomène d'oscillations. Schématisons le dispositif vu de haut :



Oz est l'axe de rotation. \vec{F} est la force exercée sur la pale due au poids de l'objet de masse m . d est la distance entre Oz est le point d'application de la force \vec{F} : A. Pour simplifier la démonstration nous allons négliger le changement de direction de la force \vec{F} . Mais nous en avons tenu compte pour nos calculs. En appliquant le théorème du moment cinétique à cette situation nous obtenons :

$$J_{Oz} \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} = M_{Oz}(\vec{F}_A)$$

On a $M_{Oz}(\vec{F}_A) = -d \cdot m \cdot g \cdot \sin \theta \vec{e}_z$. Or θ est petit donc $\sin \theta \approx \theta$. On obtient finalement :

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{d \cdot m \cdot g}{J_{Oz}} \theta = 0$$

Par analogie avec l'équation différentielle d'un oscillateur LC nous pouvons relier la période (assimilée propre) de l'oscillation au moment d'inertie J_{Oz} . En effet nous avons vu en terminale que l'équation différentielle d'un oscillateur LC est de la forme :

$$\frac{du^2}{dt^2} + \frac{4\pi^2}{T_0^2} u = 0$$

$$\text{Nous avons par conséquent : } J_{Oz} = \frac{d.m.g.T_0^2}{4\pi^2}$$

Il a suffi par la suite de mesurer avec un chronomètre la période d'oscillation du rotor et de calculer le moment d'inertie. Afin de nous assurer de la validité de notre protocole nous avons aussi calculé J_{Oz} en assimilant les différentes parties constituant le rotor à des objets géométriques simples dont le moment d'inertie est simple à calculer. Les résultats obtenus dans les deux cas concordent :

$$J_{\text{expérimental}} = 2,45.10^{-3} \text{ Kg.m}^2$$

$$J_{\text{théorique}} = 2,44.10^{-3} \text{ Kg.m}^2$$

L'écart relatif est faible : 0.41%.

Maintenant que nous connaissons J_{Oz} nous pouvons employer le théorème du moment cinétique afin de calculer le couple exercé par le vent sur le rotor. Pour ce faire le protocole suivant a été mis en place :

Nous laissons tourner le rotor à une vitesse angulaire constante. Nous obtenons alors :

$$J_{Oz} \cdot \frac{d\omega}{dt} = C_{\text{résistant}} + C_{\text{aérodynamique}} = 0$$

Au temps $t=0$, le souffleur est arrêté et le couple exercé par le vent est nul. Cependant au temps 0^- les couples $C_{\text{résistant}}$ et $C_{\text{aérodynamique}}$ se compensaient donc au temps $t = 0$ nous avons :

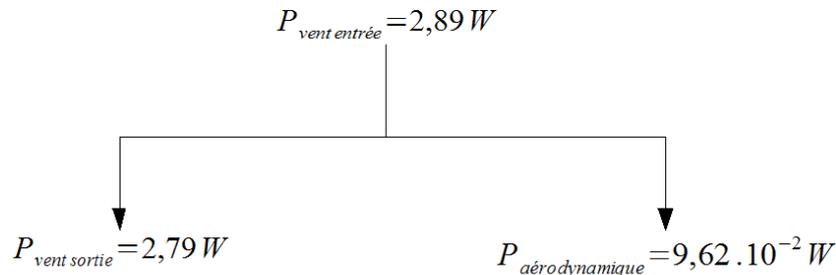
$$J_{Oz} \cdot \frac{d\omega}{dt} = -C_{\text{aérodynamique}}$$

Il suffit dorénavant de représenter la vitesse angulaire du rotor en fonction du temps afin de calculer $\frac{d\omega}{dt}$ qui est la pente de la tangente à l'origine de $\omega(t)$.

Connaissant le couple exercé par le vent sur le rotor nous pouvons procéder au calcul des rendements R_1 et R_2 .

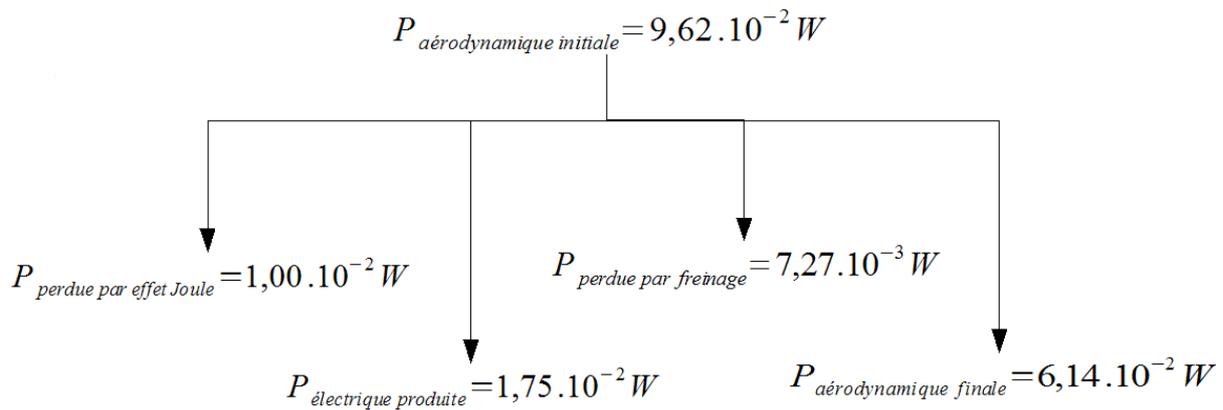
Afin d'éclairer au mieux les différentes transformations de puissances nous avons construits les arbres suivants :

Le rendement aérodynamique :



$$\text{On a donc } R_1 = \frac{P_{\text{aérodynamique}}}{P_{\text{vent}}} = 3,33 \%$$

Le rendement électrique :



$$\text{On a donc } R_2 = \frac{P_{\text{électrique}}}{P_{\text{aérodynamique initiale}}} = 18,2 \%$$

Remarque : On différencie la puissance aérodynamique initiale et finale car lorsque le circuit électrique est fermé, le rotor subit un freinage à cause du champ induit dans les bobines.

Conclusion : Il est clair que malgré une optimisation géométrique du rotor, le rendement aérodynamique est faible. Par contre le rendement électrique est meilleur. Dans les deux cas il y a une marge importante de progression dans l'optimisation. En effet les éoliennes classiques atteignent un rendement aérodynamique de l'ordre de 40%, ce qui est encore en dessous de la limite de Betz qui stipule qu'on peut récupérer au maximum 59% de l'énergie contenue dans le vent. Nous pensons que la forme géométrique des pales du rotor doit être changée afin d'augmenter le rendement. Il faut pour cela étudier les phénomènes fluides qui ont lieu ; notamment la pression différentielle qui permet la rotation du rotor. En ce qui concerne le rendement électrique, celui-ci est grandement améliorable car les générateurs modernes ont un rendement de 95%.

4.5 Influence du nombre de spires sur la tension induite

La loi de Faraday dit que la tension induite aux bornes d'une bobine est proportionnelle au nombre de spires constituant celle-ci.

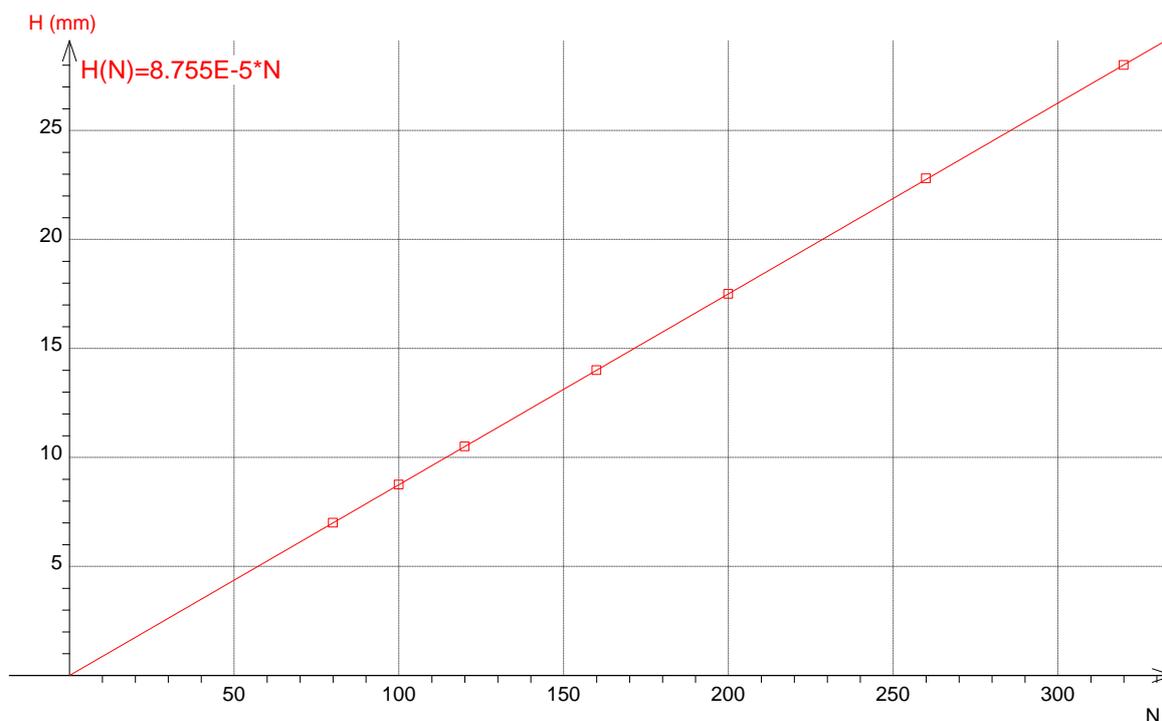
$$\xi = -N \frac{d\Phi_m}{dt}$$

N : nombre de spires

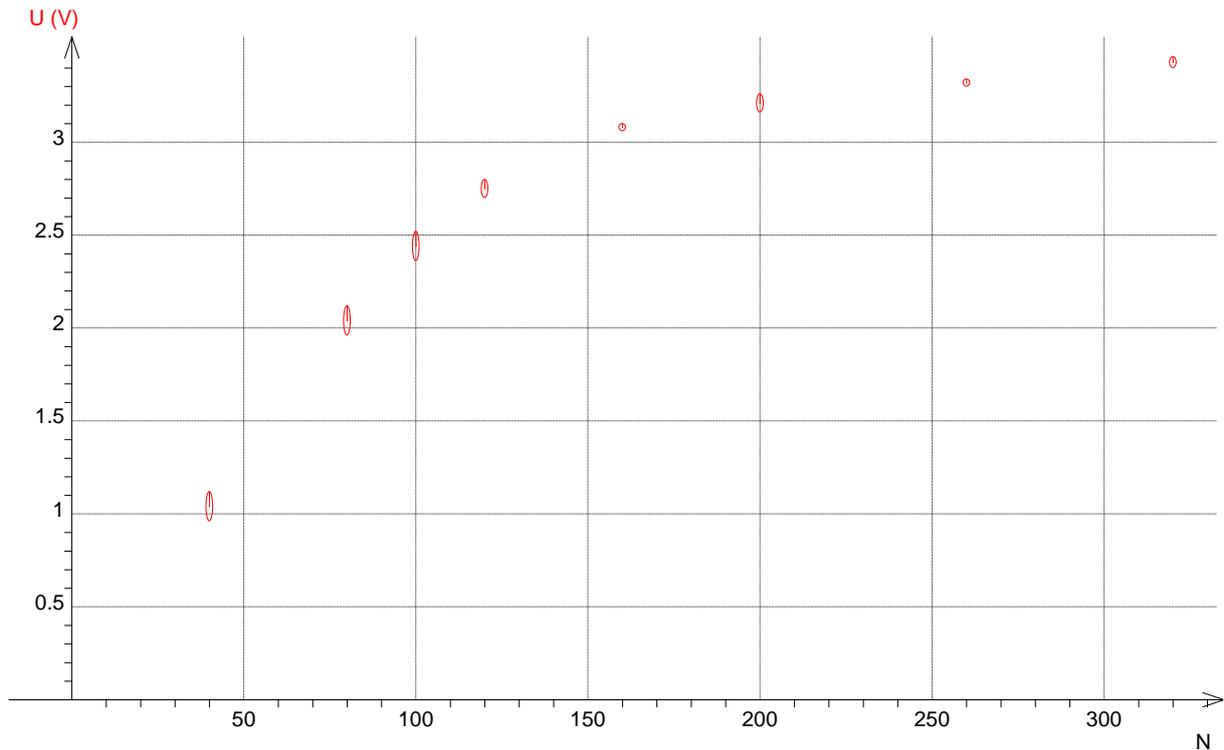
Ainsi d'après cette loi il suffit d'augmenter le nombre de spires afin d'obtenir une tension induite de plus en plus grande. Nous avons voulu d'une part vérifier la proportionnalité entre la tension induite et le nombre de spires et d'autre part conclure sur l'optimisation du système {bobines}.

Or il est aisé de comprendre que cette loi ne peut être valable au-delà d'un certain nombre de spires car la puissance du champ magnétique d'un aimant n'est pas infinie. Par conséquent on peut affirmer que toutes les spires d'une bobine est aussi haute qu'une table, par exemple, ne seront pas les sièges d'une induction électromagnétique du fait de leur éloignement de l'aimant.

Il existe donc un autre facteur important en plus du nombre de spires, à tenir en compte lors de l'optimisation du système {bobines}. Cet autre facteur important est évidemment la hauteur des bobines. Afin de comparer les bobines il faut donc garder un rapport hauteur/nombre de spires constant :



Nous pouvons à présent présenter les résultats de nos mesures :



Dans ce graphe nous remarquons une première partie linéaire lorsque le nombre de spires est compris entre 0 et 100 spires. Il semble donc que la loi de Faraday correspond à la réalité. Cependant au-delà de 100 spires nous remarquons que la tension induite ne varie plus proportionnellement.

D'après ces résultats on peut supposer l'existence d'une limite, c'est-à-dire qu'à partir d'un nombre N_0 de spires la tension induite n'augmentera plus. On peut donc parler de saturation de l'induction électromagnétique.

Lorsque nous comparons les valeurs, nous voyons qu'en doublant le nombre de spires de 160 à 320 nous n'augmentons la tension induite que de 11.6%. Ce qui représente une augmentation faible alors que nous avons doublé la quantité de bobine utilisée. Nous pouvons alors affirmer que d'un point de vue économique il est préférable d'utiliser un système {bobines} de 160 spires à un système {bobines} de 320 spires.

En ce qui concerne l'optimisation de ce paramètre, il n'existe pas de nombre de spires optimal car cela dépend de la puissance des aimants et des caractéristiques du générateur utilisé. Cependant nous pouvons établir un nombre de spires optimal si l'on tient compte du temps nécessaire à la fabrication des systèmes bobines, de la place que ces bobines occupent et de la tension induite aux bornes de celles-ci. Dans ce cas le système {bobines} de 160 tours semble être le système optimal.

Conclusion

Finalement, nous avons atteint dans une certaine mesure nos objectifs à savoir l'étude du fonctionnement de l'éolienne et son optimisation, tout en ayant des pistes de recherches et des projets pour les prochains mois.

Premièrement, une étude approfondie du fonctionnement du rotor Savonius, nous a permis de maîtriser désormais les différents mécanismes de notre éolienne et notamment le phénomène d'induction électromagnétique que nous ne connaissions pas jusqu'alors.

Enfin, notre optimisation de l'écart entre les pâles s'est finalement soldée par l'obtention d'un résultat concluant malgré de nombreux essais infructueux qui nous ont enseignés parallèlement les difficultés d'une démarche expérimentale.

Faute de temps, nous n'avons pu cependant aller au bout de notre étude, que nous aimerions poursuivre dans les semaines à venir. Nous sommes actuellement entrain d'effectuer une série d'expériences afin de déterminer quelles transformations énergétiques font perdre le plus d'énergie à nos maquettes. La localisation de ces pertes dans le processus de transformation de l'énergie nous permettra alors de savoir quels paramètres il faut étudier et optimiser.

Quoi qu'il en soit, nous ne comptons pas en rester là et espérons obtenir tout autant de résultats dans les semaines à venir.

5 Bibliographie

1. Jean-Luc Menet, Nachida Bourabaa, *Increase in the savonius rotors efficiency via a parametric investigation*, Ecole Nationale Supérieure d'ingénieurs en Informatique Automatique Mécanique Energétique Electronique de Valenciennes (ENSIAME)
2. Eugene Hecht, *Physique*, De Boeck Université, 1999, ISBN 2-7445-0018-6
3. Guy Fontaine, Jean-Claude Paul, Adolphe Tomasino, *Physique*, 1989, ISBN 2-09-174701-7
4. Pembina Institute, *Build your own turbine*, 2006
5. Ben F. Blackwell, Robert E. Sheldahl, Louis V. Feltz, *Wind Tunnel Performance Data for TWO- and Three-Bucket Savonius Rotors*, 1977

6 Remerciements

Nous tenons à remercier tout particulièrement l'ensemble des personnes qui ont aidé à la réalisation de ce projet. En tout premier lieu nos deux professeurs encadrants, Mme Larasse et M. Boisseleau, pour leur disponibilité, la qualité de leurs conseils et de leurs remarques, et leurs relectures attentives.

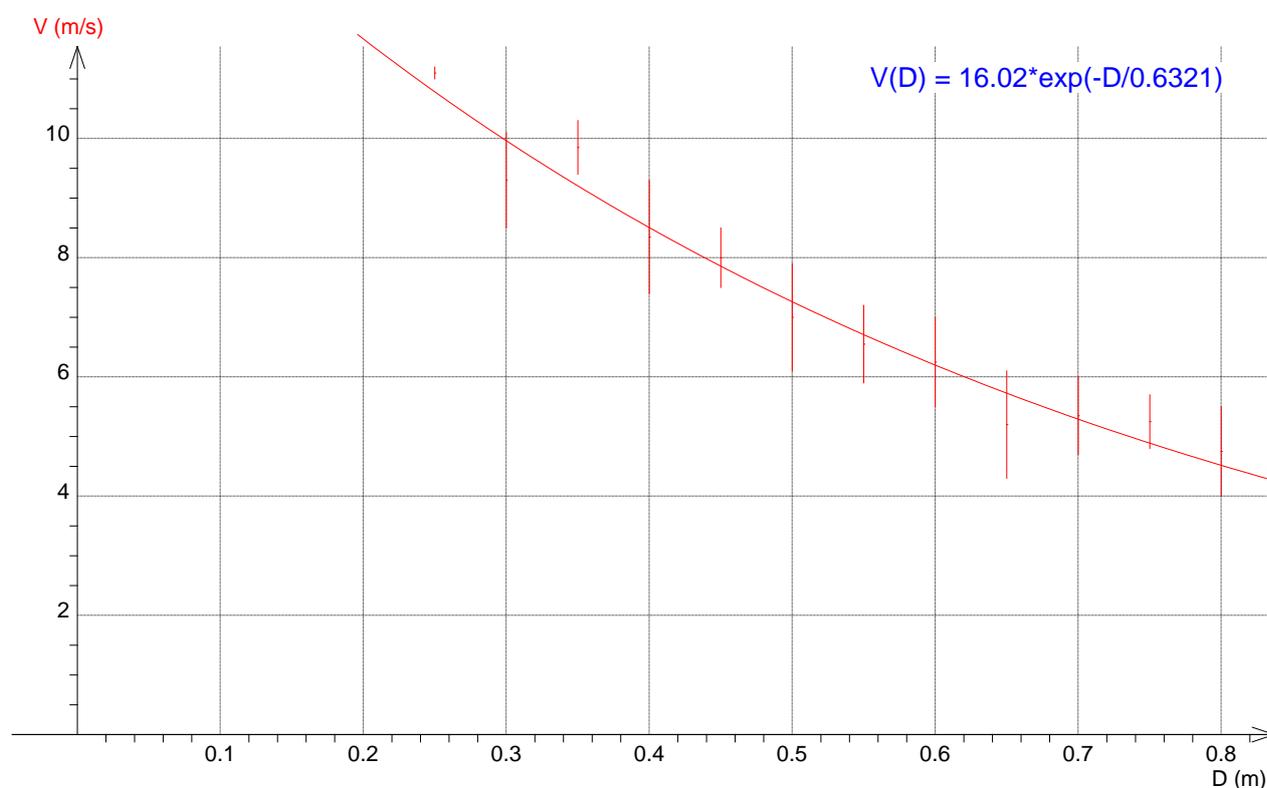
Vient ensuite notre principal contact, Maximilien Petitgenet, jamais avare d'explications et de réponses. Nous l'avons connu grâce au journal de la technopole du Futuroscope de juillet 2008. Son domaine d'expertise étant celui des éoliennes à axe vertical, il nous a été, et nous sera, d'une aide précieuse. Nous remercions également le chercheur de l'ENS Frédéric Chevy pour son aide notamment en ce qui concerne le calcul des rendements intermédiaires.

Nous remercions également tous ceux qui nous ont aidé dans une moindre mesure, qui nous ont tout de même apporté un petit plus, ce qui n'est jamais superflu et toujours bienvenu. Merci à notre professeur de Physique, merci à Maxime Thielois, professeur de technologie qui nous aide en ce moment à réaliser de nouvelles maquettes.

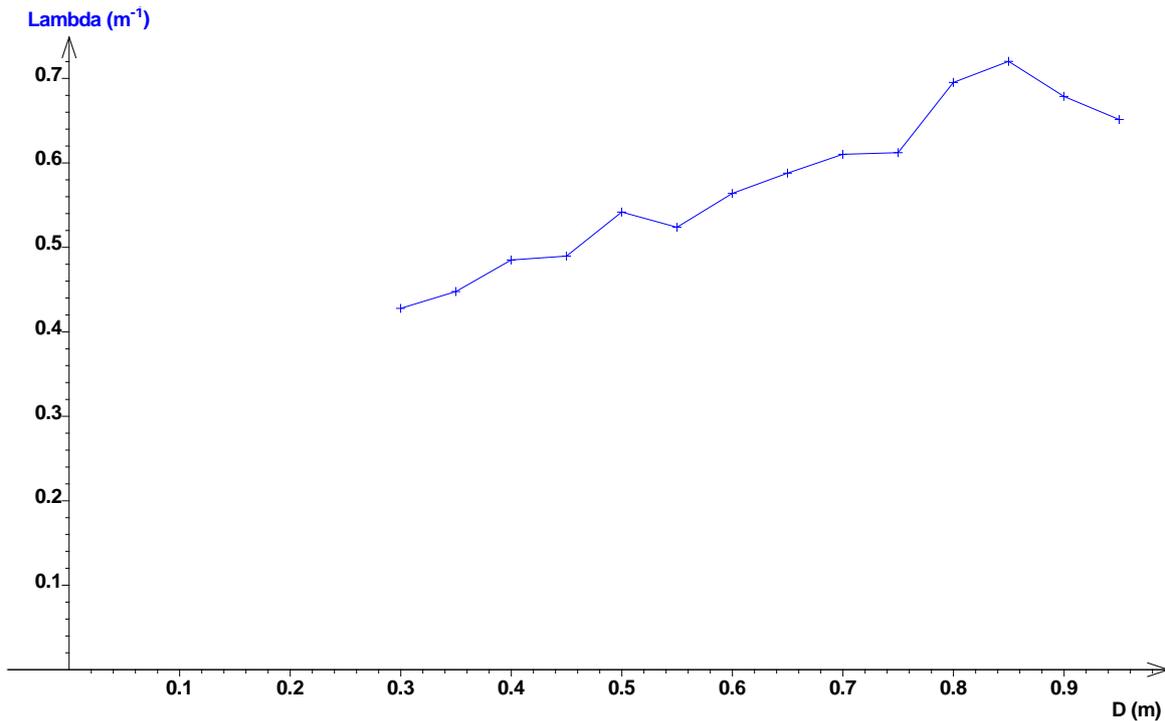
7 Annexe

Nous proposons en annexe un rapide survol (non-exhaustif) de nos mesures, de nos résultats, ainsi que de nos exploitations. Nous avons ainsi l'opportunité de présenter également tous les graphes et autres tableaux de mesures que nous n'avons pu insérer dans les grandes parties de ce dossier. En effet, comme nous l'évoquions en conclusion, nous avons parfois éprouvé quelques difficultés, tout particulièrement au début du projet, dans la mesure où nous n'arrivions pas à obtenir des résultats suffisamment précis. D'où un certain nombre de résultats que nous avons refusé de dévoiler dans le dossier.

Distance (cm)	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
Vitesse max(m/s)	11,2	10,1	10,3	9,3	8,5	7,9	7,2	7	6,1	6	5,7	5,5
Vitesse moyenne (m/s)	11,1	9,3	9,85	8,35	8	7	6,55	6,25	5,2	5,35	5,25	4,75
Vitesse min (m/s)	11	8,5	9,4	7,4	7,5	6,1	5,9	5,5	4,3	4,7	4,8	4

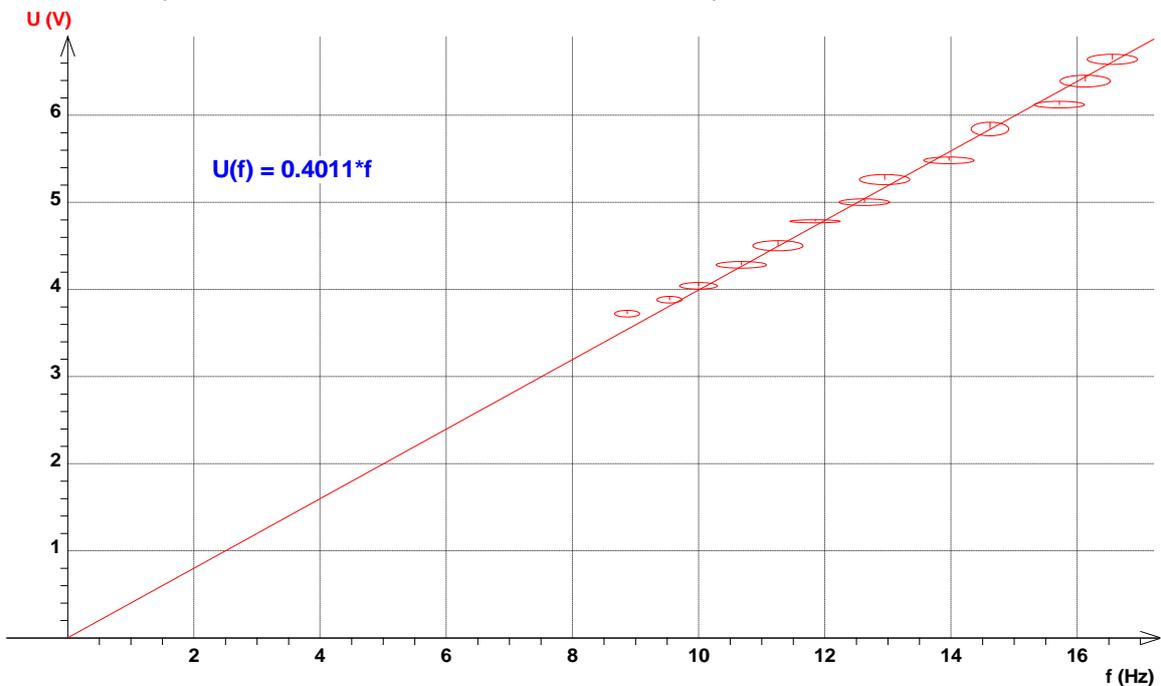


Vitesse du vent en fonction de la distance à la soufflerie



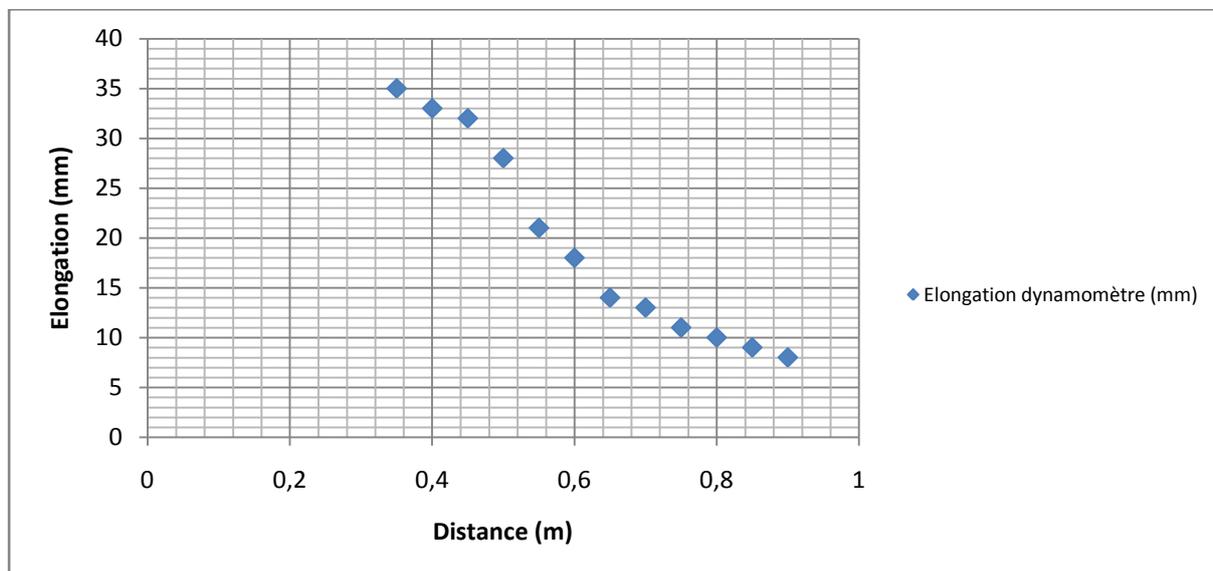
Lambda en fonction de la distance à la soufflerie. Nous avons défini lambda comme le rapport de la vitesse d'un point situé à l'extrémité d'une des pales de l'éolienne, sur la vitesse du vent au niveau de l'éolienne.

Nous avons également réalisé, dans les toutes premières semaines, le graphe suivant, qui rend compte de la tension induite en fonction de la fréquence de rotation du rotor :



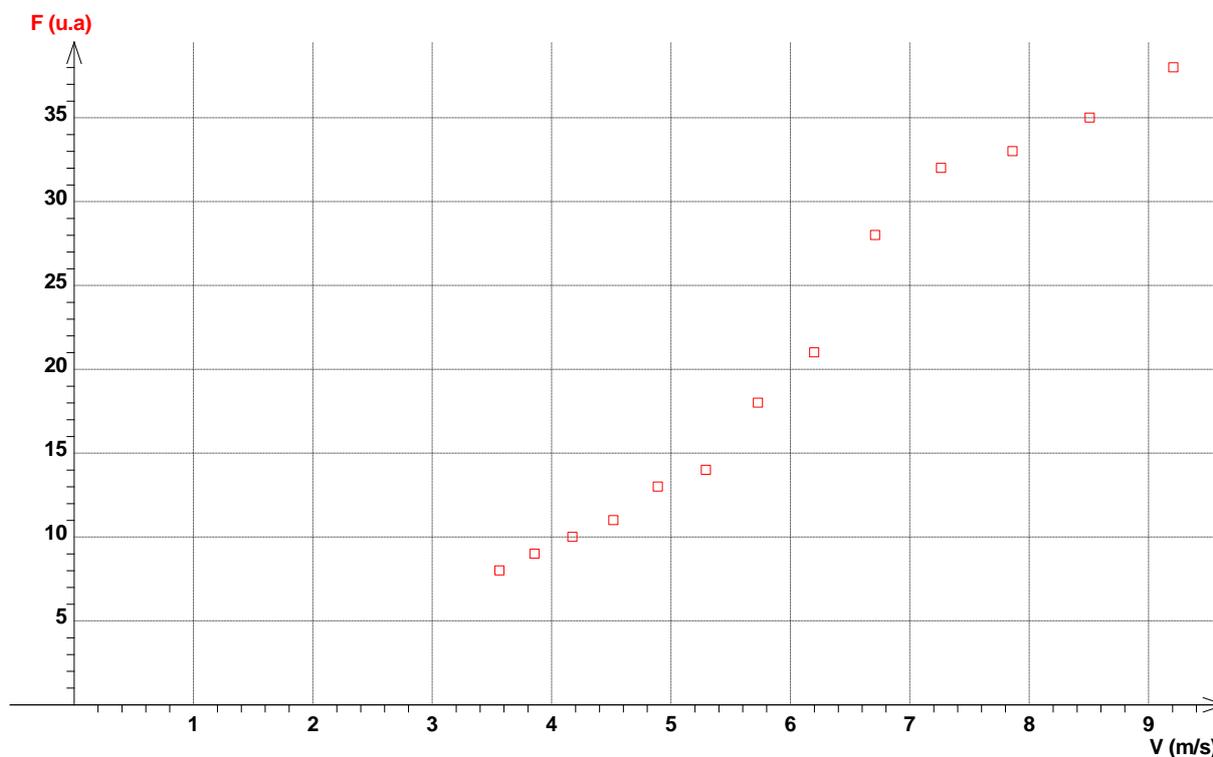
Tension induite en fonction de la fréquence (sur maquette M1,1/3)

En tenant compte des incertitudes, nous avons pu constater que l'évolution était linéaire, ce qui correspond à la relation théorique entre la tension et la fréquence du rotor (cf. Partie 3). Nous avons tenté de quantifier la force du vent à l'aide de dynamomètres :



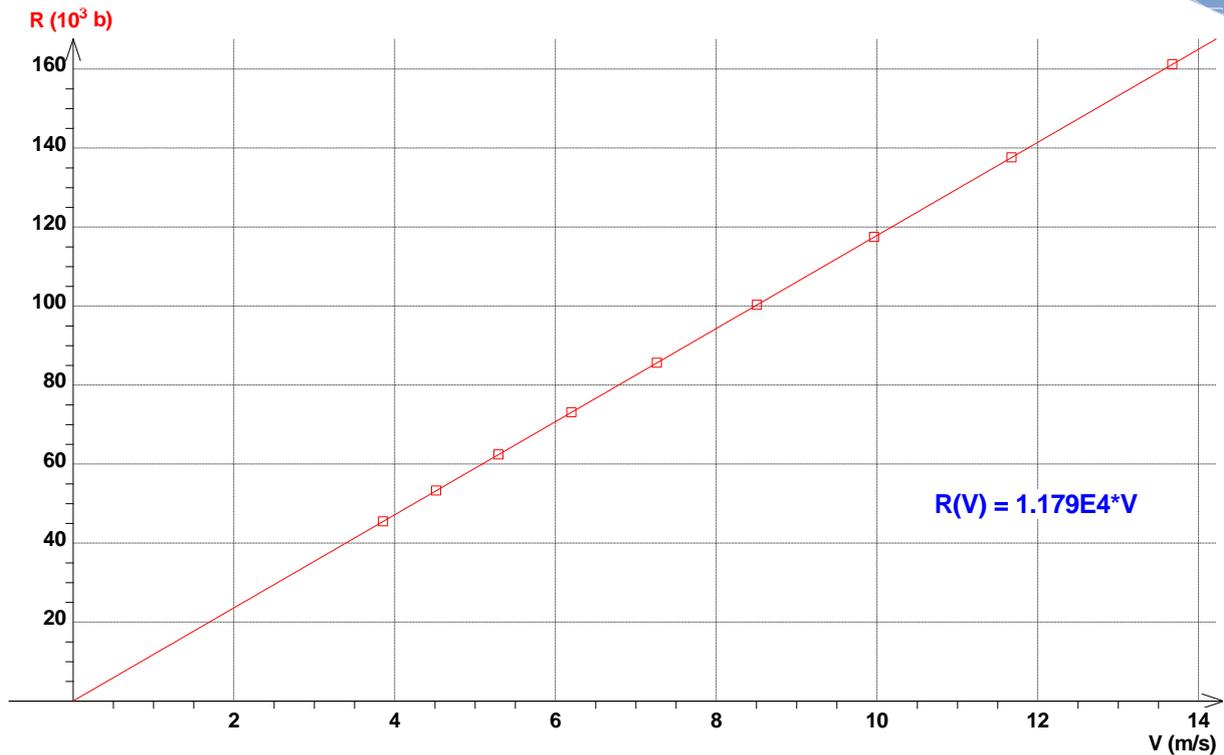
Elongation du dynamomètre en fonction de la distance à la soufflerie

Ce qui, traduit en termes de force et de vitesse, donne le graphe suivant :



Force exercée par le vent sur les pales de l'éolienne en fonction de sa vitesse

Malheureusement, l'imprécision était trop grande pour que ce graphe soit présentable. Nous avons donc continué à chercher d'autres pistes.



Nombre de Reynolds en fonction de la vitesse de rotation

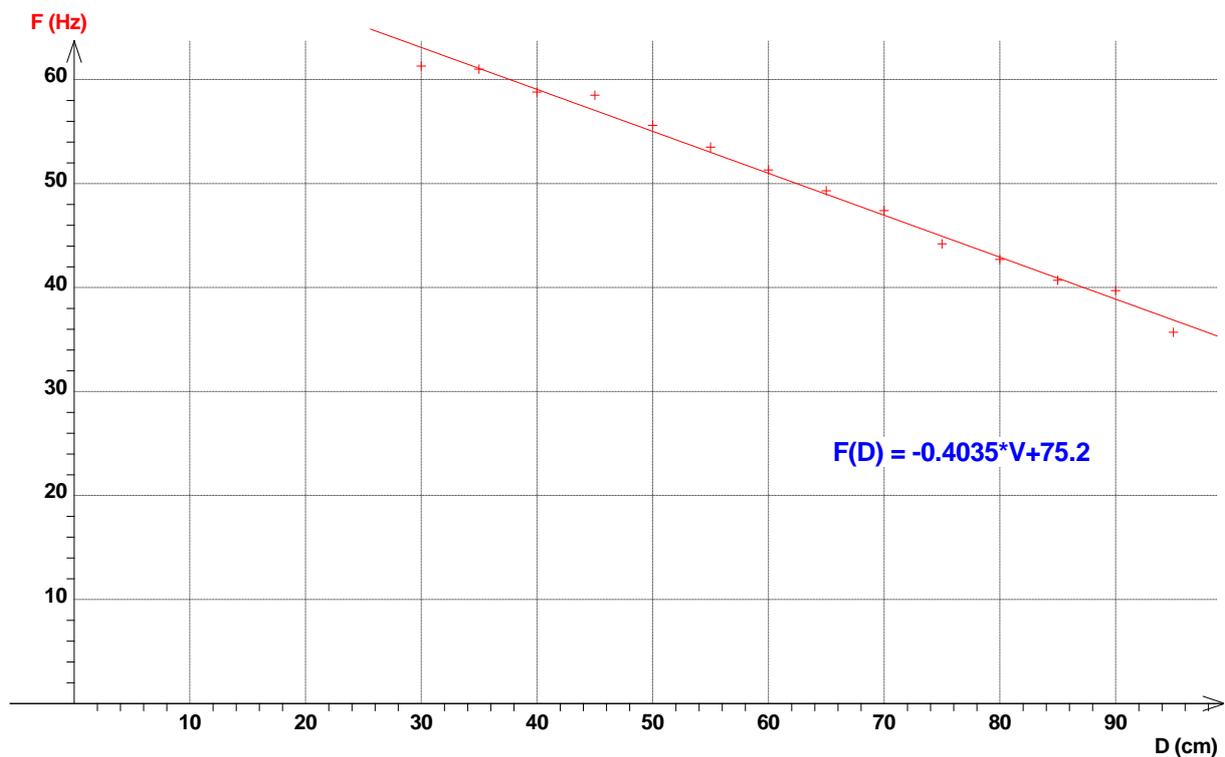
Là encore, le résultat n'est pas surprenant. Nous avons alors décidé de nous pencher sur la géométrie de l'éolienne.

Nous avons effectué une série de mesures sur deux maquettes conçues à cet effet : une de rapport $Ra = 1/3$ (M1, 1/3) et une autre de rapport $Ra = 1/6$ (M1, 1/6)

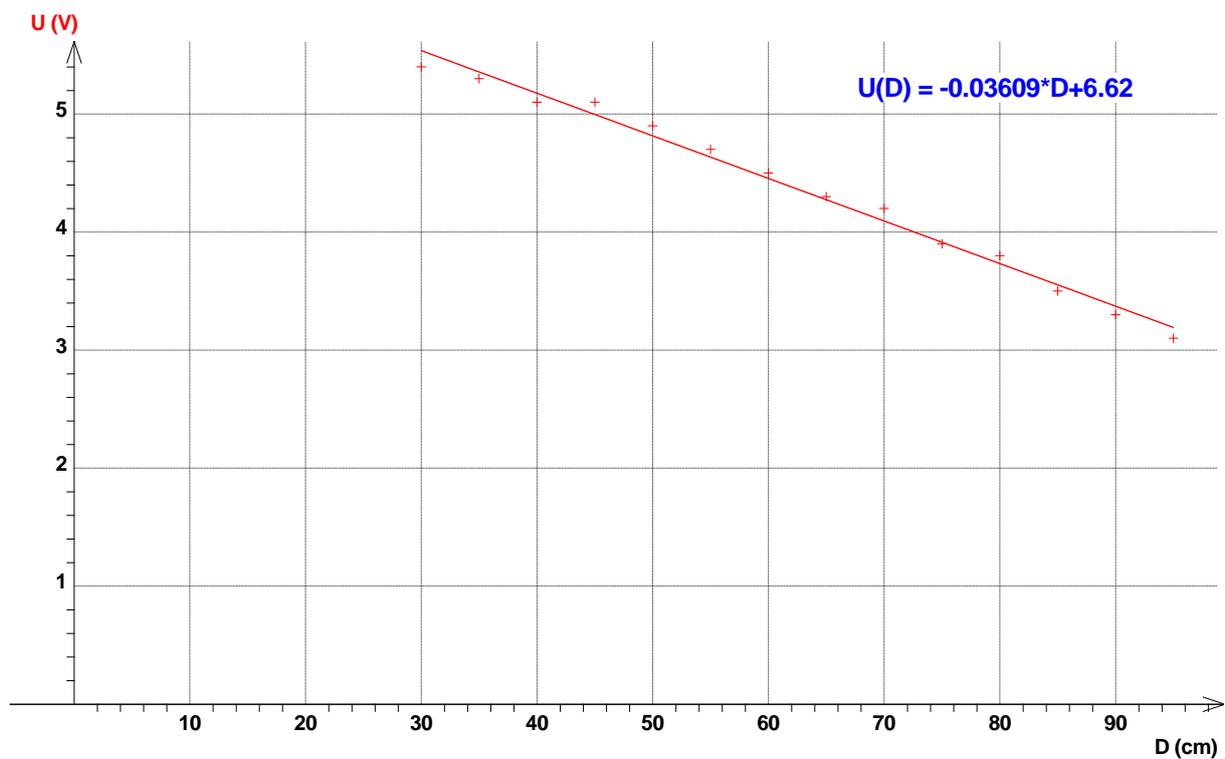
Distance soufflerie/éolienne (m)	Période (de la tension)	Fréquence (de la tension) (Hz)	Fréquence de l'éolienne (Hz)	Force du vent (en mm)	Tension (V)
0.95	0,0280	35,7	8,93	6	3.1
0.90	0,0252	39,7	9,93	6	3,3
0.85	0,0246	40,7	10,18	9	3,5
0.80	0,0234	42,7	10,68	10	3,8
0.75	0,0226	44,2	11,06	10	3,9
0.70	0,0211	47,4	11,85	12,5	4,2
0.65	0,0203	49,3	12,32	17	4,3
0.60	0,0195	51,3	12,82	19	4,5
0.55	0,0187	53,5	13,37	24	4,7
0.50	0,0180	55,6	13,89	27	4,9
0.45	0,0171	58,5	14,62	26	5,1
0.40	0,0170	58,8	14,71	25	5,1
0.35	0,0164	61,0	15,24	21	5,3
0.30	0,0163	61,3	15,34	34	5,4

Mesures effectuées sur la maquette M1, 1/6. Comme expliqué dans la partie 2, la fréquence de la tension correspond à la fréquence de l'éolienne multipliée par 4.

Ce qui nous permet de dresser les deux graphes suivants :



Fréquence (de la tension) en fonction de la distance (maquette M1, 1/6)



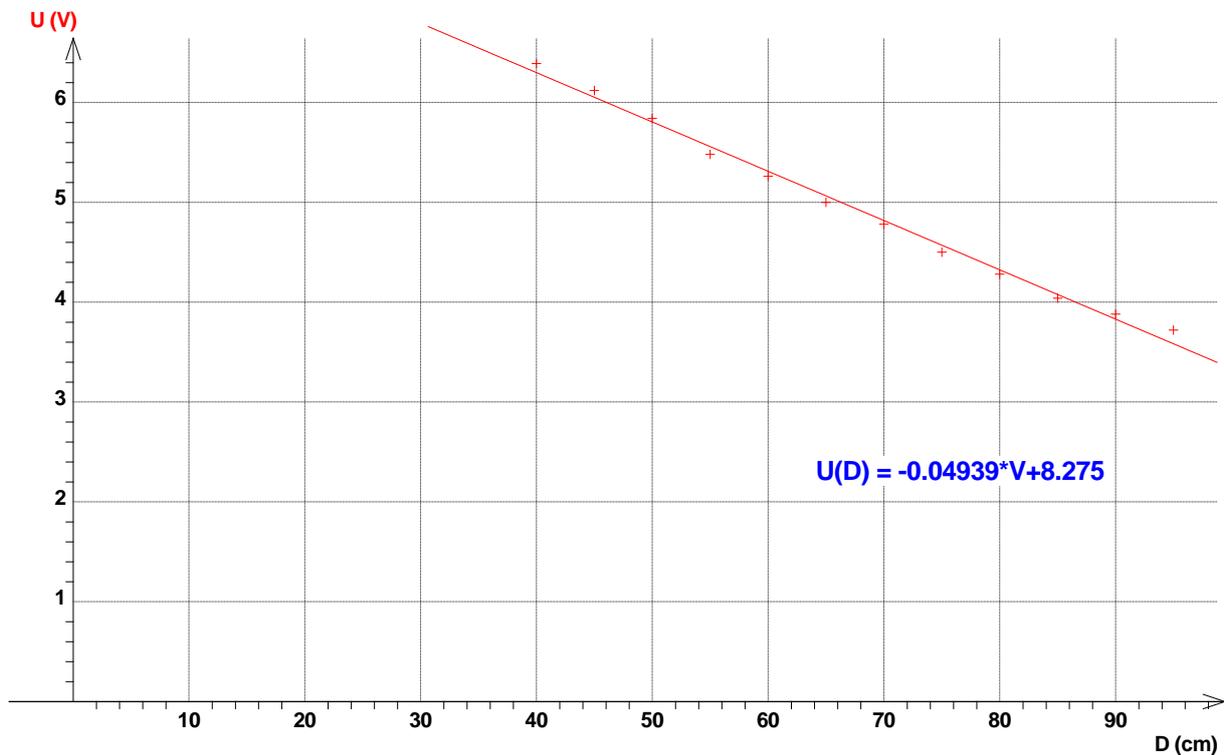
Tension induite en fonction de la distance (maquette M1, 1/6)

Et de même pour la maquette Ra = 1/3 :

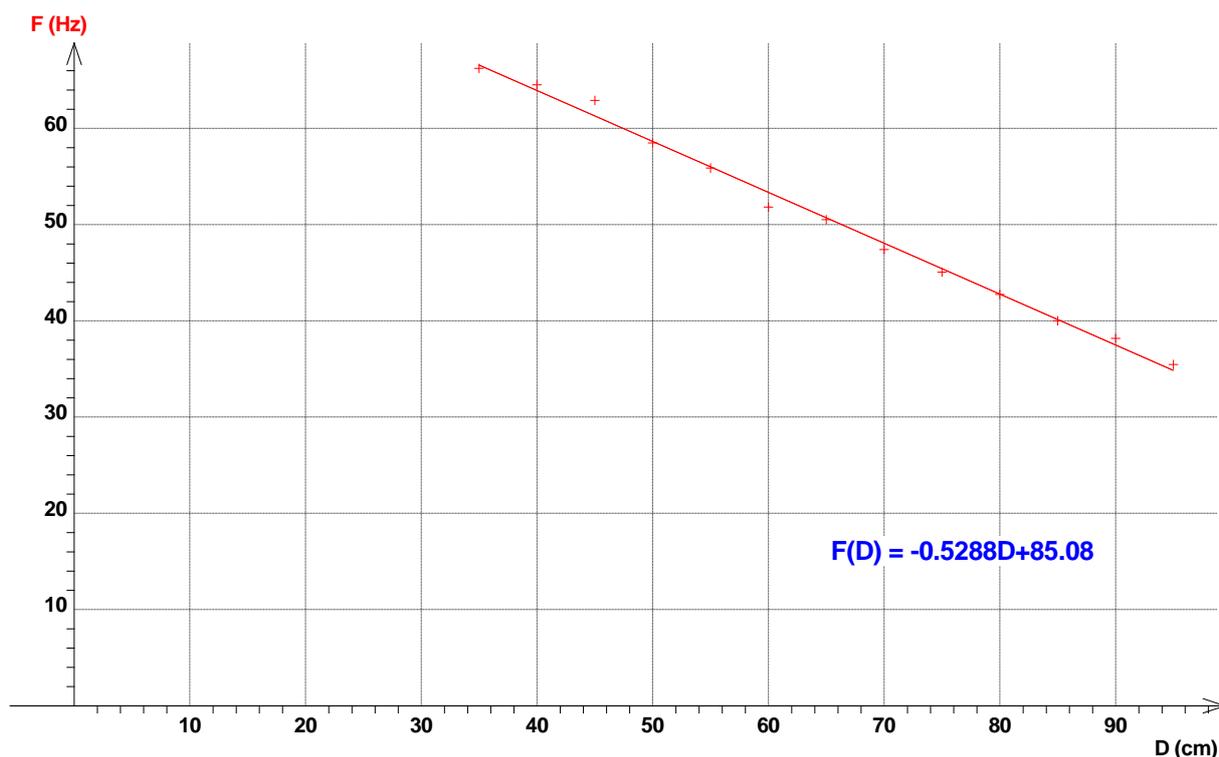
Distance (en cm)	Tension min	Tension Max	Tension moyenne	Fréquence min	Fréquence Max	Fréquence moyenne	Fréquence moyenne (du rotor)
95	3,68	3,76	3,72	35,21	35,71	35,46	8,87
90	3,84	3,92	3,88	37,88	38,46	38,17	9,54
85	4	4,08	4,04	39,68	40,32	40	10
80	4,24	4,32	4,28	42,37	43,1	42,74	10,68
75	4,44	4,56	4,5	44,64	45,45	45,05	11,26
70	4,76	4,8	4,78	47,17	47,62	47,4	11,85
65	4,96	5,04	5	50	51,02	50,51	12,63
60	5,2	5,32	5,26	51,55	52,08	51,82	12,95
55	5,44	5,52	5,48	55,56	56,18	55,87	13,97
50	5,76	5,92	5,84	58,14	58,82	58,48	14,62
45	6,08	6,16	6,12	62,5	63,29	62,9	15,72
40	6,32	6,46	6,39	64,1	64,94	64,52	16,13
35	6,58	6,7	6,64	65,79	66,67	66,23	16,56

Mesures effectuées sur la maquette M1, 1/3

Ainsi que les graphes associés :

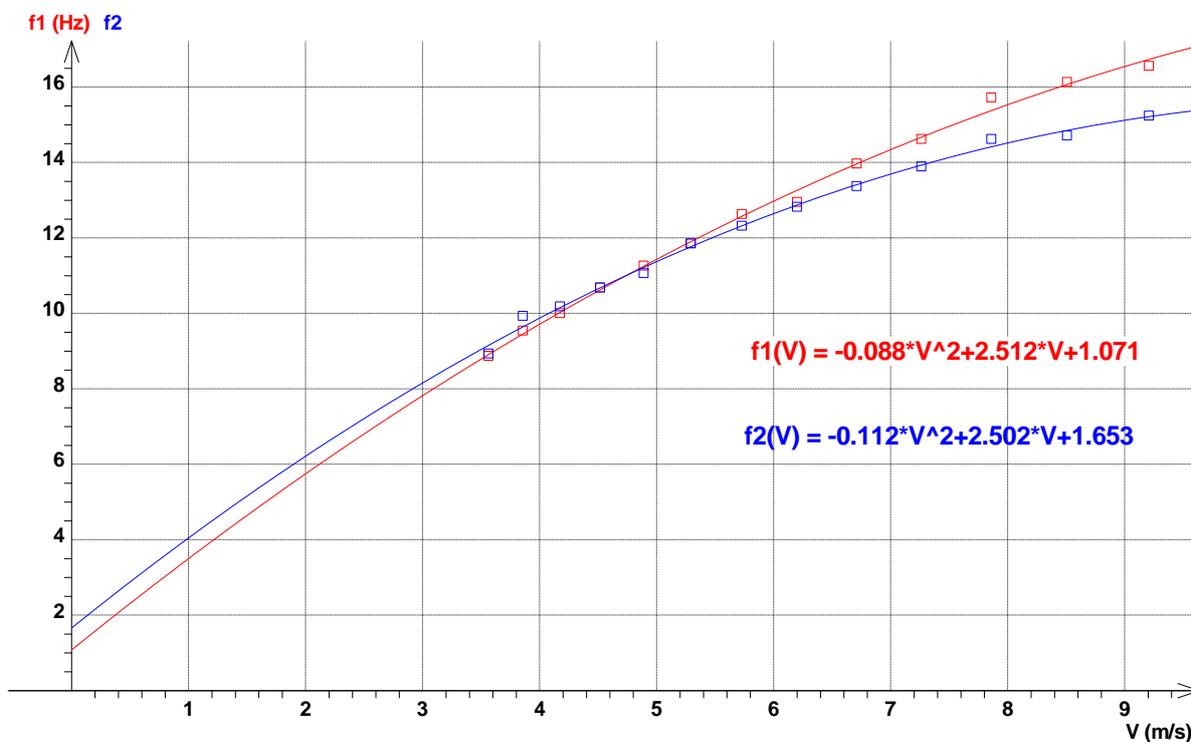


Tension en fonction de la distance (maquette M1, 1/3)



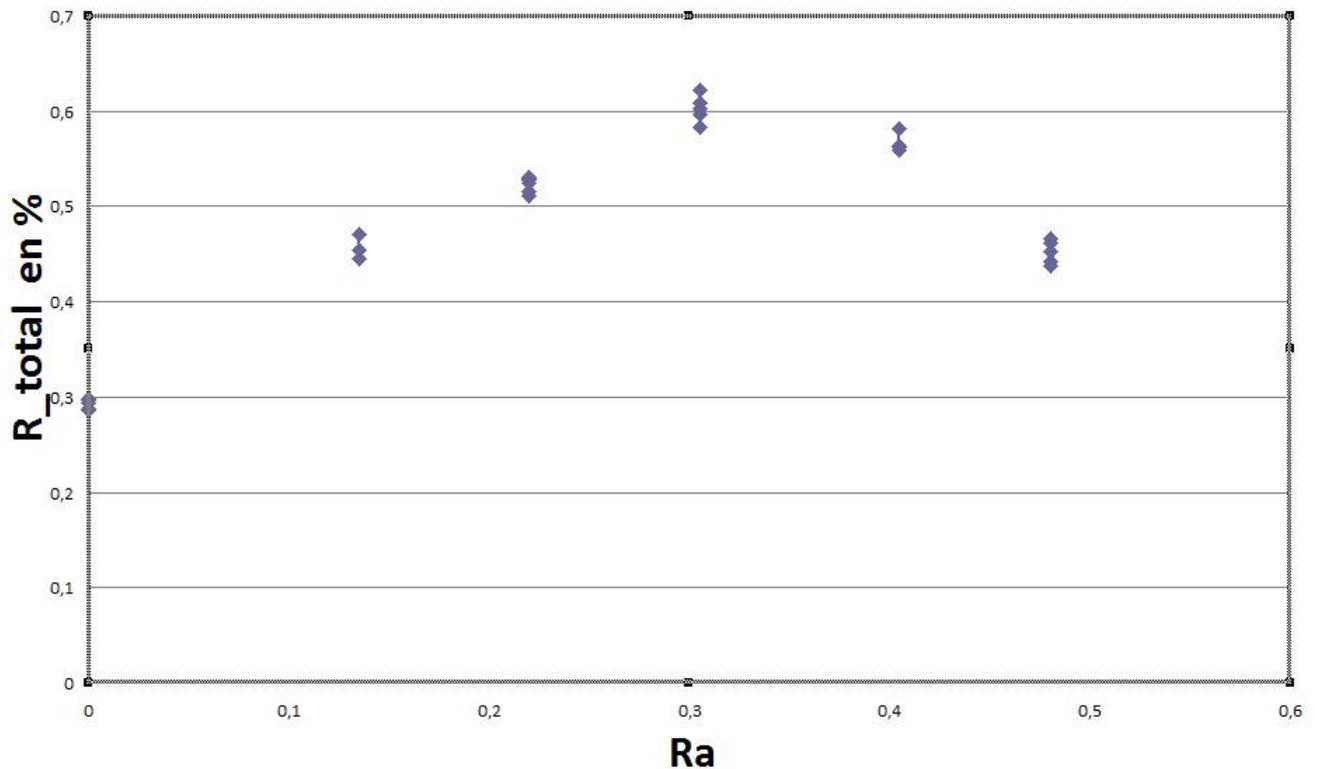
Fréquence (de la tension) en fonction de la distance (maquette M1 ,1/3)

Seulement, considérant que le facteur distance était finalement relatif à nos expériences, nous avons finalement préféré prendre pour variable la vitesse du vent, plus générale, et obtenue grâce à la courbe donnée au tout début de cette annexe. En superposant alors les deux courbes, on obtient :



Fréquence de rotation du rotor en fonction de la vitesse du vent. La courbe f1 correspond à la maquette M1, 1/3 et la courbe f2 correspond à la maquette M1, 1/6

C'est afin de pouvoir déterminer un rapport optimal que nous avons construit la maquette M2, présentée dans la première partie de ce dossier. En refaisant sur cette maquette une partie des mesures que nous venons d'exposer, et en effectuant les calculs détaillés dans la partie 4, nous sommes finalement parvenu à obtenir ce graphe :



Rendement total en fonction du rapport

Ce qui conclut l'optimisation de la géométrie de l'éolienne, juste à temps pour présenter notre travail lors des sélections académiques. Une fois ce stade passé, nous avons pu continuer notre étude en vue de la finale nationale. Nous nous sommes intéressés au système {bobine}, après avoir compris que le phénomène d'induction électromagnétique s'opposait à la rotation de l'éolienne, rendant ainsi possible un éventuel système {bobines} optimal.

Nous avons fixé la distance à 91 cm, et nous avons déterminé que la hauteur de la bobine serait proportionnelle au nombre de spire (afin de ne pas fausser nos résultats) :

Nombre de spires	Hauteur (cm)
80	0,7
100	0,875
120	1,05
160	1,4
200	1,75
260	2,275
320	2,8

Premièrement, nous avons voulu constater que cette force s'opposant à la rotation, s'exerçait bien dans notre cas. Nous avons donc réalisé une rapide expérience :

	Circuit ouvert	Circuit fermé	Puissance ouverte	Puissance fermée	Puissance cédée
Vitesse angulaire (rad/s)	41,94	38,77	1,09631	1,01345	0,08286

Maquette (M2, 0.305) Distance = 91 cm et nombre de spires N = 160

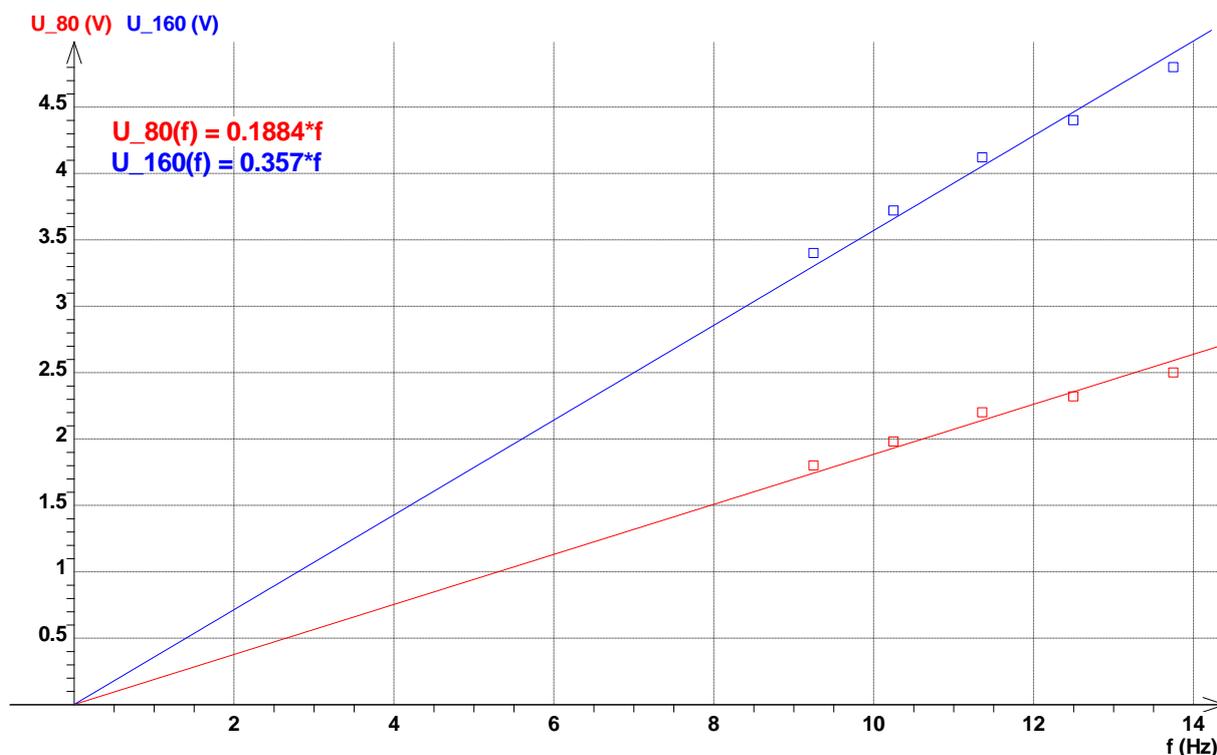
(En effet, il n'y a pas de force s'exerçant sur les pales de l'éolienne lorsque le circuit est ouvert (cf. partie 2))

Ensuite, nous avons mesuré la valeur de la tension induite en fonction du nombre de spires sur nos deux systèmes de bobines, 160 et 80 spires :

Distance (m)	Tension (V) 80 tours	Tension(V) 160 tours	Quotient
0,9	1,8	3,4	1,89
0,8	1,98	3,72	1,88
0,7	2,2	4,12	1,87
0,6	2,32	4,4	1,9
0,5	2,5	4,8	1,92

Mesures effectuées sur la maquette M1, 1/3

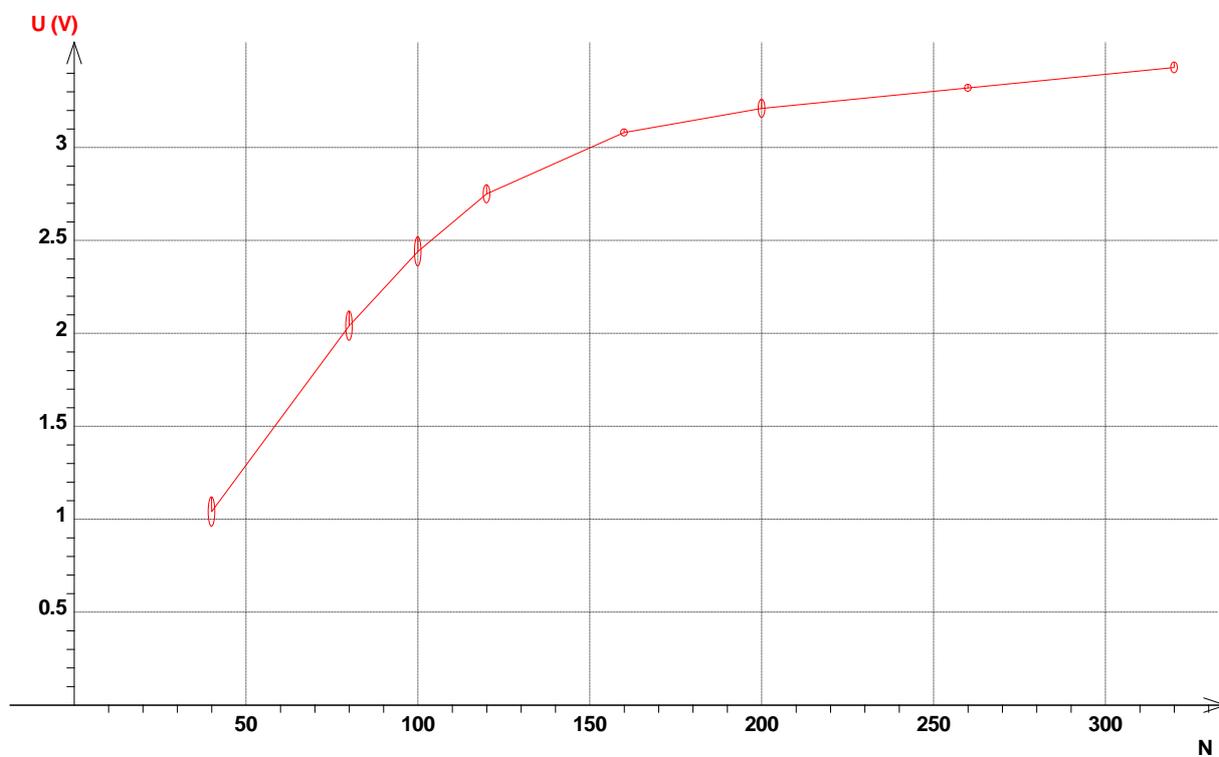
En reprenant ces valeurs sur un graphique donnant l'évolution de la tension induite en fonction de la fréquence :



Nous avons dû alors construire plusieurs autres systèmes de bobines : 40, 100, 120, 200, 260 et 230 spires. Enfin, nous avons effectué les mêmes mesures que précédemment (mais sur la maquette M2, 0.305) :

Spires (N)	Résistance du système	Amplitude tension	Fréquence	
40		2	0,98	24,75
40		2	1,12	25,25
40		2	1,06	24,75
40		2	1	25
80		3,4	2,08	25
80		3,4	2,02	25,51
80		3,4	2,06	25,77
80		3,4	2	25,71
100		4,8	2,42	25
100		4,8	2,4	25,25
100		4,8	2,46	25
100		4,8	2,48	24,75
120		5.1	2,78	25
120		5.1	2,7	24,5
120		5.1	2,74	24,75
120		5.1	2,76	25,25
160		6,5	3,08	25
160		6,5	3,06	24,75
160		6,5	3,06	24,75
160		6,5	3,1	25
200		8,4	3,26	24,1
200		8,4	3,18	24,2
200		8,4	3,18	24,3
200		8,4	3,2	24,04
260		11,2	3,32	25
260		11,2	3,34	24,75
260		11,2	3,32	24,51
260		11,2	3,32	24,75
320		13,5	3,46	24,75
320		13,5	3,44	25
320		13,5	3,42	25,25
320		13,5	3,4	25

Et nous obtenons ainsi le graphique suivant :



Tension induite en fonction du nombre de spires (maquette (M2, 0.305))