

Olympiades de physique  
2003-2004






## Elèves participants:

-  **Deles Mathias**
-  **Duffé Angélica**
-  **Gely Nicolas**
-  **Levrat Flore**
-  **Martinez Yoann**
-  **Serme Gabriel**

## Enseignants et aide technique:

-  **Boudey Benoît**
-  **Eustache Marc**
-  **Fauvel Thierry**

## Partenaires scientifiques:

-  **Marcillat Jacques**  
directeur de recherche CNRS du LMSNM  
Modélisation numérique  
Marseille
-  **Maresca Christian**  
directeur de recherche CNRS du LABM  
Grande soufflerie de Luminy  
Marseille
-  **Provansal Michel**  
directeur du département génie thermique et Energie  
IUT  
Marseille

## ? **Introduction**

Le problème de la ressource énergétique est une question d'actualité car la France utilise principalement l'énergie nucléaire pour produire son électricité alors que les directives européennes ont fixé un objectif de 22% d'énergie verte à l'horizon 2010.

Dans le cadre du développement des énergies renouvelables, notre choix s'est porté sur l'emblème de la région d'Avignon, non pas son palais, ni le pont du Gard, ni le Lubéron mais son Mistral.

Le moyen de convertir le vent en énergie est d'utiliser les éoliennes, qu'elles soient à axe horizontal ou à axe vertical.

Le mistral atteint couramment les 100km/h, ce qui aurait pu constituer une bonne source d'énergie, seulement il n'est pas régulier et on ne pouvait pas compter sur lui tous les jours.

Nous avons donc décidé de fabriquer une soufflerie. Pour cela, nous nous sommes renseignés auprès d'experts scientifiques.

**Monsieur Marcillat** nous a apporté des conseils scientifiques et techniques.

**Monsieur Maresca** nous a accueilli une journée à la grande soufflerie de Luminy.

**Monsieur Provensal** est venu au lycée nous présenter des notions d'écoulements des fluides et le travail de ses étudiants sur les éoliennes.

Nous remercions ces trois intervenants qui nous ont été d'un immense secours.

Notre aventure débute à Donzère avec la visite d'un parc éolien.

### **1. Sortie à la ferme éolienne de Donzère**

Cette expédition nous a apporté des surprises mais surtout d'importantes informations sur les éoliennes.

#### **1.1 Les surprises**

La première a concerné la taille des éoliennes : 50 mètres de haut pour un diamètre des pales de 43 mètres. IMPRESSIONNANT !!!

Il y avait aussi la vitesse de rotation lente, malgré un rendement élevé, mais aussi un petit détail fort amusant : le bout des éoliennes tourne afin de stopper la rotation pour éviter que les machines tombent par vent trop fort.

Il faut préciser que sous les éoliennes le vent est très fort. Cependant, il n'y a aucun bruit, alors que c'est un argument souvent utilisé pour empêcher le développement de cette énergie propre.



#### **1.2 Les informations**

La mairie nous a procuré un fascicule nous exposant leur projet futur.

Le plus intéressant a été notre rencontre avec une guide qui nous a expliqué leur choix pour le site. En effet, il se situe entre deux montagnes et bénéficie de l'effet Venturi.

Les différentes caractéristiques des éoliennes nous ont été données, ce qui nous a fourni des idées pour réaliser nos prototypes.

**Pour conclure , cela a été une journée fort intéressante et nous a permis de nous aérer.**

## 2. Notre dispositif expérimental

### 2.1 La soufflerie

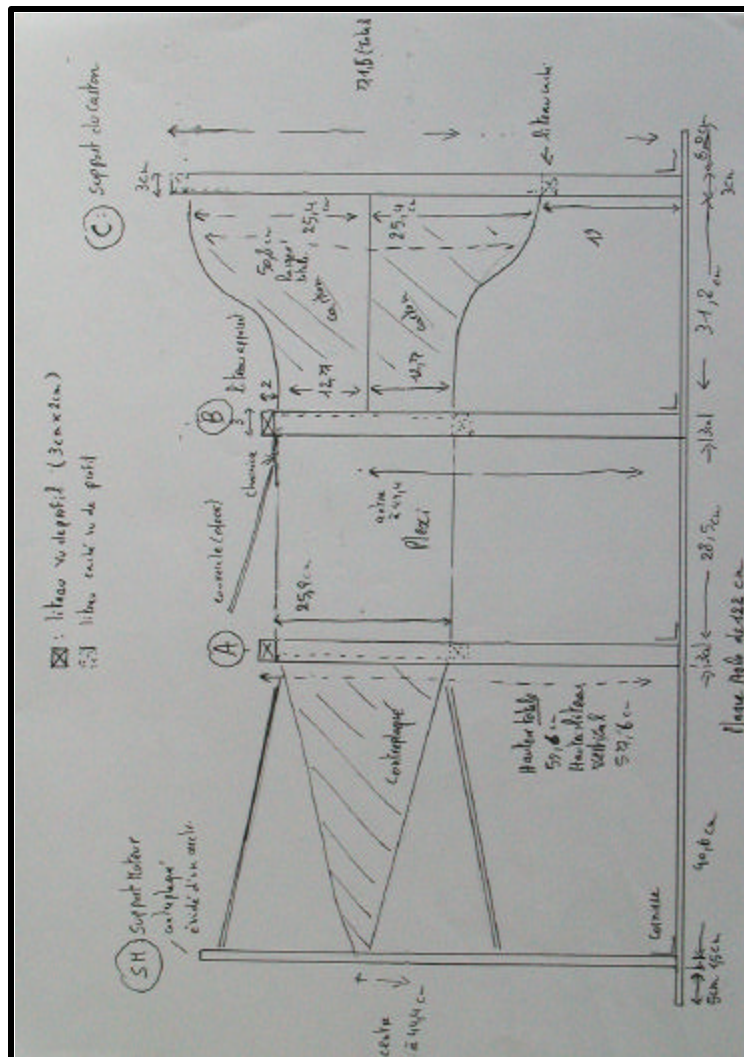
#### 2.1.1 Plan

Pour construire cette soufflerie, nous nous sommes tout d'abord inspiré des conseils de Messieurs Marcillat et Maresca. Vu le budget dont nous disposions, nous ne pouvions pas espérer égaler les performances de la grande soufflerie de Luminy. Le problème le plus important était la taille de la pièce dans laquelle nous allions laisser la soufflerie. Celle-ci mesurant 8 mètres, notre soufflerie devait être de faible dimension avec un divergent assez court, ce qui n'améliore pas la qualité de la soufflerie.

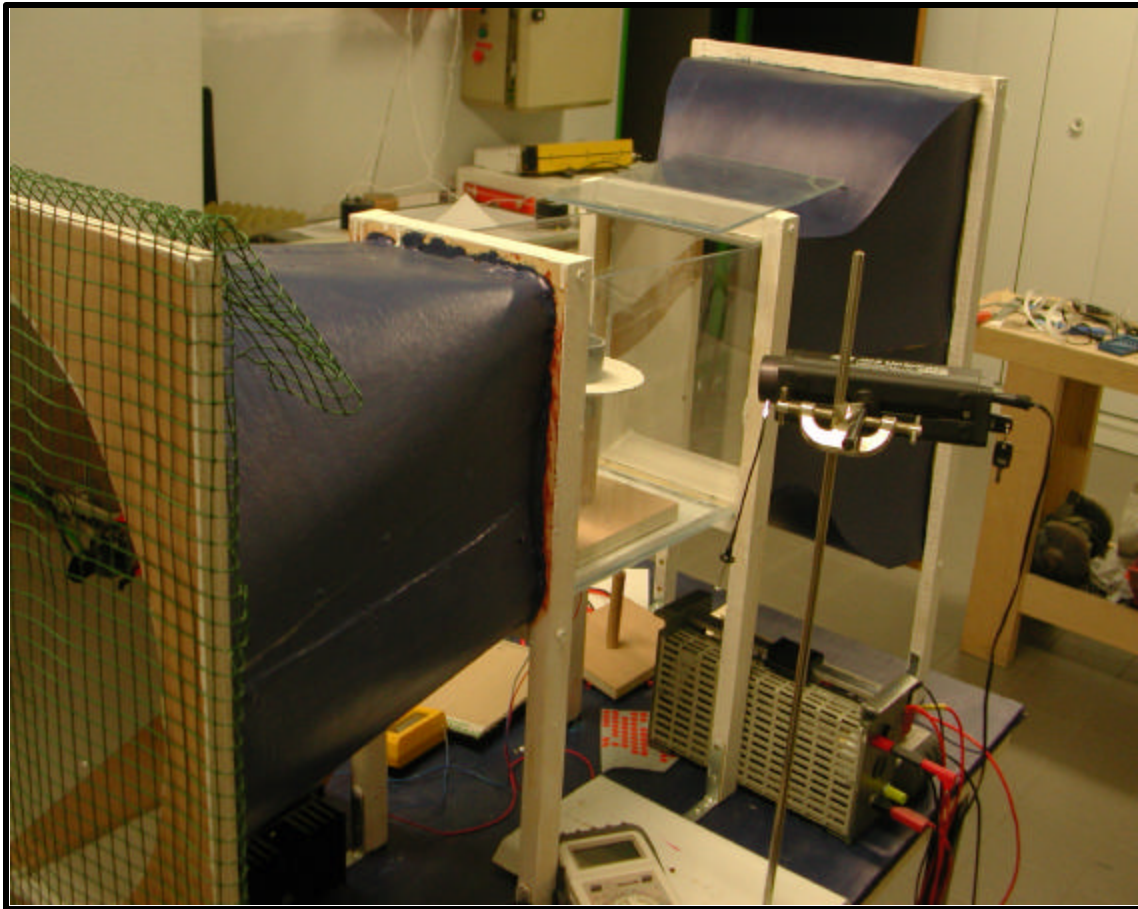
Nous nous sommes alors mis à la recherche de plans sur internet. Nous avons trouvé un plan sur un site américain. Du coup, il a fallu s'attaquer au texte en anglais et surtout convertir les « inch » en quelque chose de compréhensible. Pas facile !

**Plan d'origine: <http://www.aerorocket.com/tunnel/WindTunnelPlans.pdf>  
(voir annexe)**

Après cette première épreuve de taille, le plus dur restait à faire: construire cette soufflerie.



**Et voilà !  
Plus facile à dire qu'à faire!**



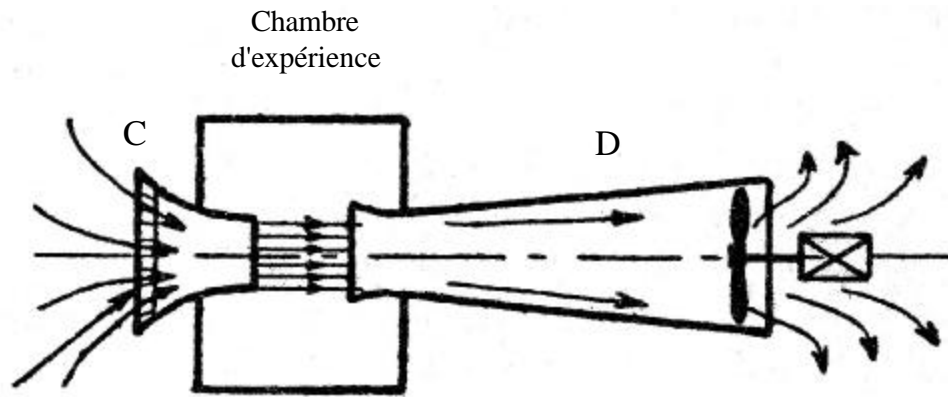
### **2.1.2 Principe**

Le ventilateur, en tournant, créé sur sa face antérieure une dépression; par suite, l'air de la pièce se trouve aspiré par le **convergent C**, appelé collecteur. Comme les sections sont progressivement décroissantes, la vitesse de l'air croît graduellement ; elle devient maximale dans la section contractée à l'extrémité aval du collecteur.

L'air traverse la **chambre d'expérience** sous la forme d'une veine fluide comme un jet bien calibré et pénètre dans le **divergent D** qu'on appelle diffuseur. Les sections étant croissantes, la vitesse diminue graduellement, l'air est évacué dans la pièce.

La taille de la pièce doit être grande devant la taille de la soufflerie pour que l'air qui est expulsé ne soit pas perturbé à l'entrée du collecteur.

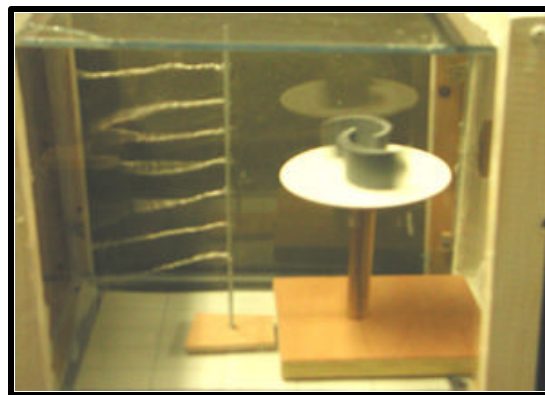
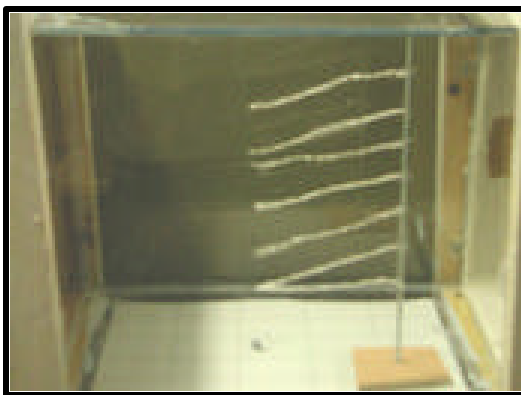
L'utilisation d'une grille d'entrée aurait entraîné une trop grande perte de charge, il a fallu donc faire un compromis entre vitesse et perturbation.



### 2.1.3 Tests de la qualité

On a effectué deux tests pour évaluer la qualité de la soufflerie:

- ? un test qualitatif: visualisation de fils de laine très légers
- ? un test quantitatif: acquisition continue des relevés de l'anémomètre

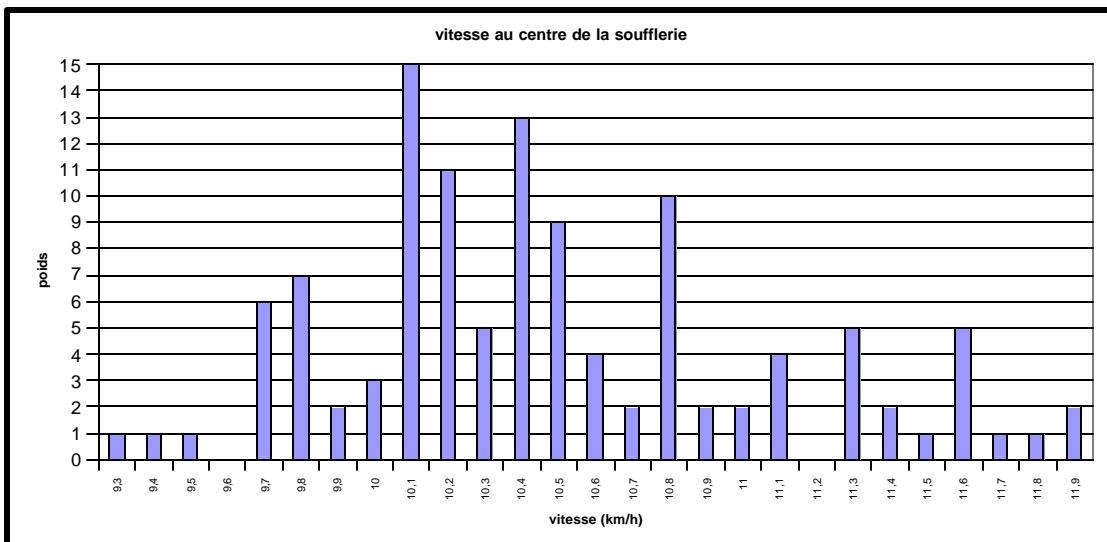


- ? **Observation qualitative:** Le mouvement des fils de laine est très stable en l'absence d'éolienne. On vérifie qu'en présence d'une éolienne, les fils sont perturbés au niveau de l'éolienne.

- ? **Observations quantitative:**

On a placé l'anémomètre au centre de la soufflerie puis filmé pendant 2 minutes l'affichage de l'anémomètre. On a ensuite analysé cette vidéo et obtenu le graphique ci-dessous:

- ? **Répartition statistique des vitesses**



Moyenne: 10,5

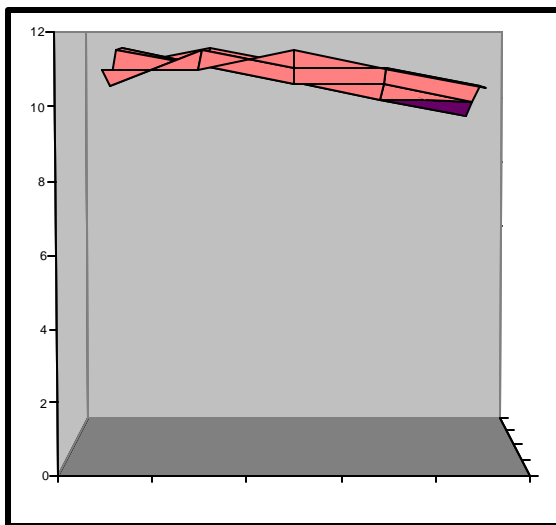
Écart type: 0,6

**Conclusion:** On a trouvé un écart type de 0,6 pour une valeur moyenne de 10,5. On a donc estimé notre incertitude à 6%.

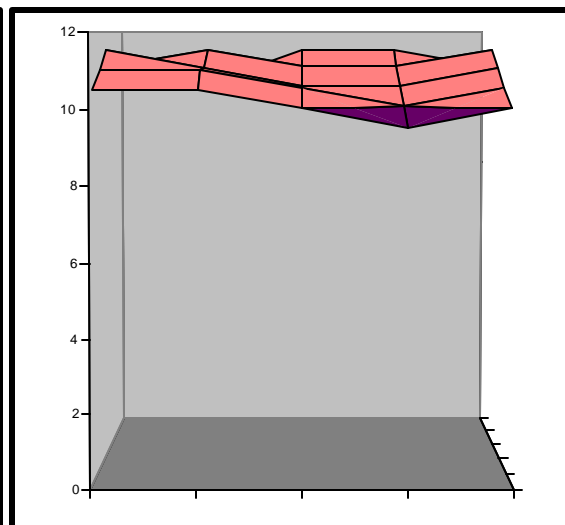
Par la suite, on a adopté la démarche suivante pour la lecture des vitesses. Lorsque l'affichage de l'anémomètre fluctue, on a évalué rapidement le domaine de ses variations, calculé la moyenne puis appliqué sur cette valeur une précision de 6% .

? **Mesure des vitesses dans un plan horizontal à mi-hauteur:**

Sur le même principe, on a effectué des mesures dans un plan horizontal au milieu de la soufflerie, ce qui correspond à la zone d'étude des éoliennes. Les acquisitions ont été moins longues que pour la mesure au centre mais on a gardé la précision de 6%.



Vent vers le fond



Vent vers la droite

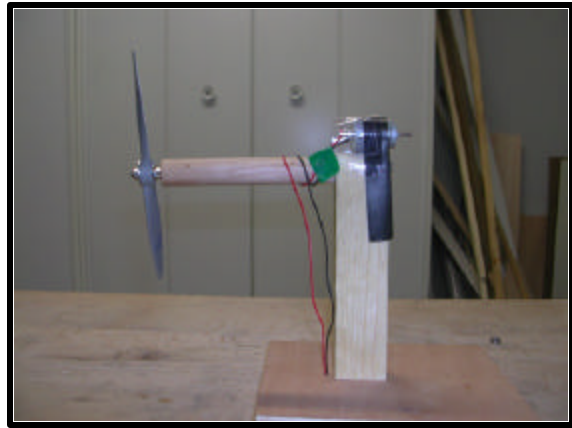
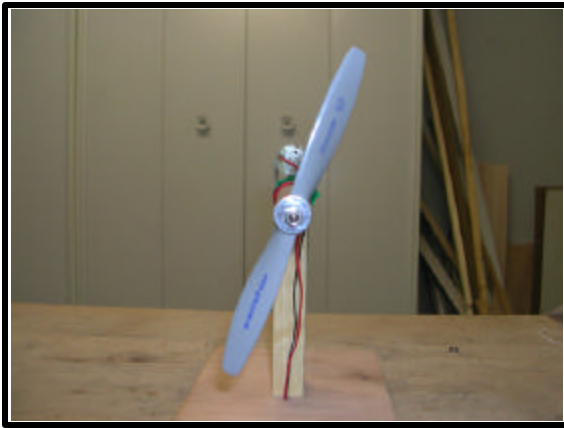
A la vue de l'incertitude choisie, c'est à dire 0,6 km/h , on n'a pas une variation significative de la vitesse dans la soufflerie.



## 2.2 Les éoliennes

On a choisi d'étudier deux types d'éoliennes: les éoliennes à axe horizontal, les plus courantes, et les éoliennes à axe vertical, beaucoup plus rares.

### 2.2.1 Axe horizontal

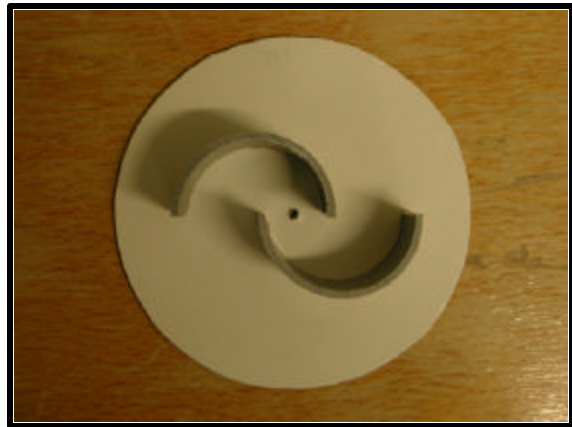
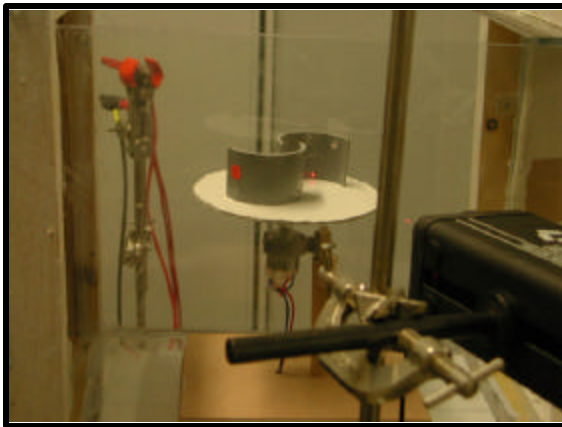


Ces éoliennes classiques sont constituées de pales montées sur un axe à roulement à billes afin de minimiser les frottements.

On a choisi de fixer les pales sur un axe horizontal suffisamment éloigné du support vertical afin de minimiser l'influence de celui-ci.

Note: Les différentes hélices testées ont été achetées dans un magasin d'aéromodélisme.

### 2.2.2 Axe vertical



Le choix des éoliennes à axe vertical s'est porté sur un type particulier que l'on nomme éoliennes Savonius du nom de son inventeur l'ingénieur finnois Sigurd Savonius qui les a imaginées en 1924.

L'avantage de ce modèle est la facilité de construction à moindre coût. Cela nous a permis de réaliser différents modèles et d'en tester les propriétés.

## 2.3 Moyens de mesure et d'observation

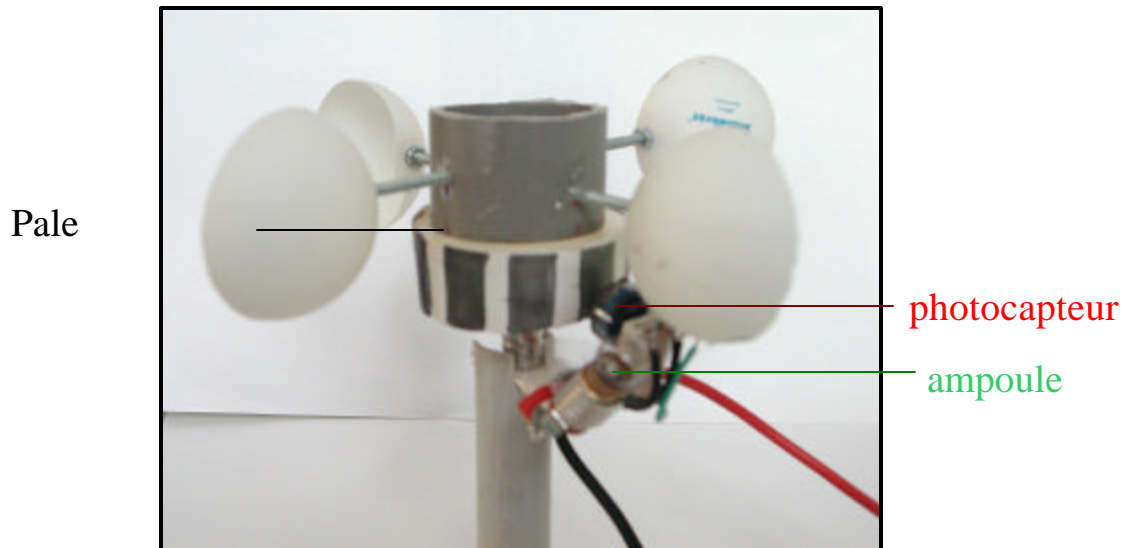
### 2.3.1 L'anémomètre

Il nous fallait un moyen pour déterminer les vitesses du vent à l'intérieur de la soufflerie: le principal inconvénient était les faibles vitesses obtenues.

Nous avons donc orienté notre recherche sur des appareils sensibles au vent et notamment les anémomètres.



On a réalisé un premier modèle de principe de l'anémomètre à l'aide de balles de ping-pong, d'une photorésistance et d'un peu de bricolage.



L'anémomètre possède une bande bicolore permettant à la lumière de plus ou moins se réfléchir. L'acquisition nous donne une succession de pics et de creux correspondant aux bandes noires et blanches.

Ce premier modèle nous a permis de constater qu'il était possible de mesurer des vitesses d'écoulements relativement faibles. Cependant la taille de cet anémomètre était trop importante pour notre soufflerie, nous avons donc fait le choix d'acheter un anémomètre suffisamment petit, sensible et dont la forme ne perturberait pas trop l'écoulement de l'air.



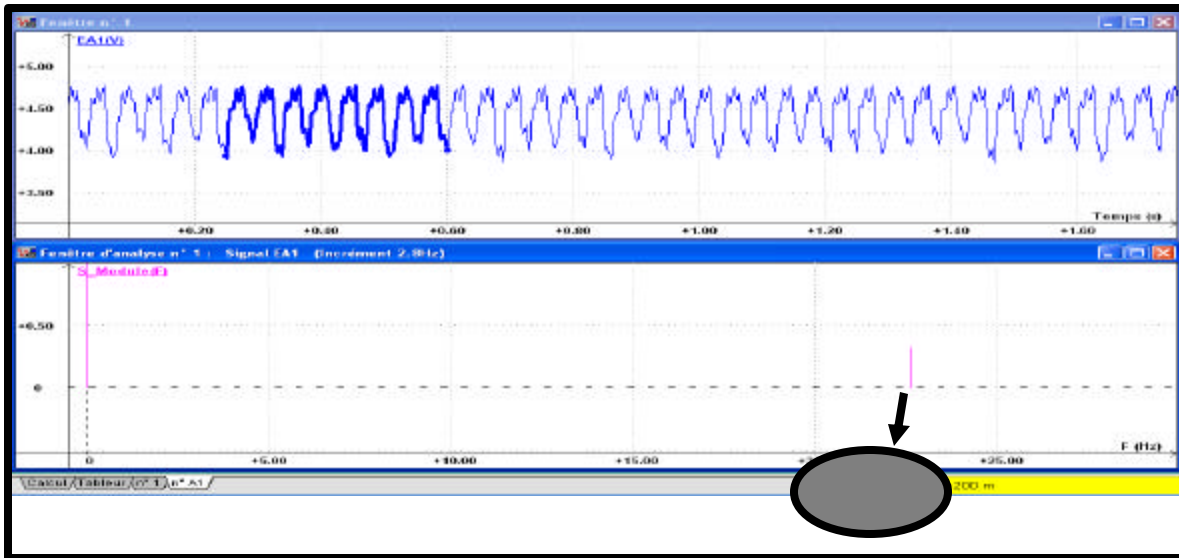
### 2.3.2 Le compte tours

L'étude des éoliennes s'est attachée principalement à déterminer les vitesses de rotation dans différentes conditions. Il nous fallait un moyen rapide et précis pour connaître les vitesses.

Notre première observation a été effectuée à l'aide d'un stroboscope mais la précision des mesures et la fatigue provoquée par l'utilisation des flashes à une fréquence basse nous a fait abandonner cette première idée.

Nous avons alors opté pour l'ensemble laser et photorésistance. Il a fallu tout d'abord s'affranchir des oscillations du néon en protégeant au maximum la photorésistance.

Les mesures relevées au fréquencemètre ont été doublées d'une acquisition à l'ordinateur: le signal périodique obtenu a été décomposé en ses harmoniques, nous permettant une lecture facile et précise de la fréquence de rotation.



### 3. Eoliennes à axe horizontal

La plus grande partie des éoliennes que l'on rencontre aujourd'hui sont construites avec des pales dont le profil ressemble aux ailes d'avion. Ces pales sont fixées sur un rotor qui convertit le mouvement linéaire du vent en énergie rotative susceptible d'entraîner une génératrice.

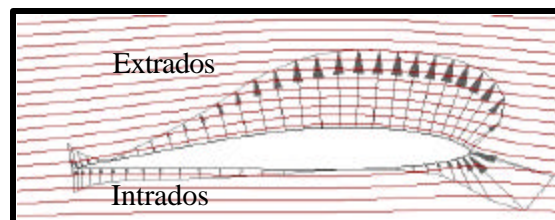
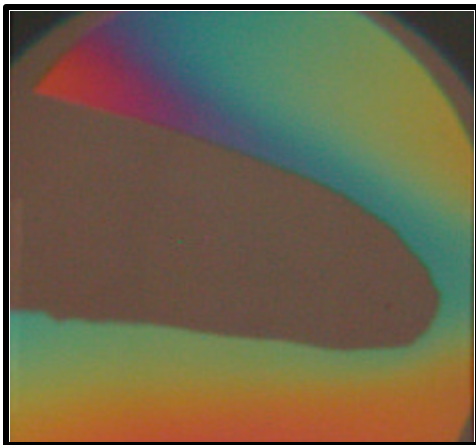
Nous avons donc commencé par étudier le profil des ailes d'avion.

#### 3.1 La portance

##### 3.1.1 Définition

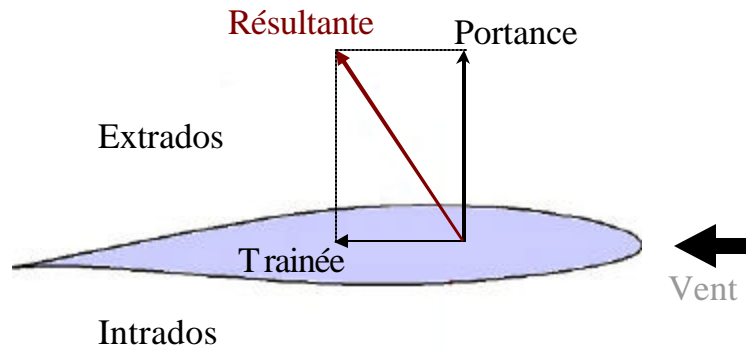
La portance est une force provoquée par une différence de pression de part et d'autre d'une pale.

On a découpé un petit profil dans du balsa, et on a observé l'écoulement de l'air autour de ce profil.



La force qui en résulte, la portance, est dirigée vers l'extrados:

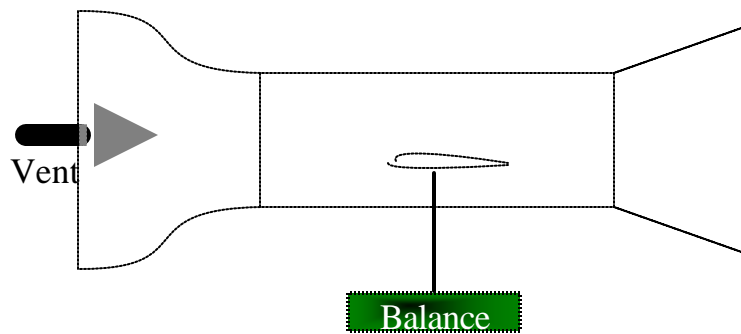
On note également l'apparition d'une autre force, la traînée.



### 3.1.2 Mesures de la portance

Nous avons fabriqué un profil d'aile et étudié la portance et la traînée produites pour différents angles d'inclinaison de l'aile par rapport à la direction du vent.

Mode opératoire:

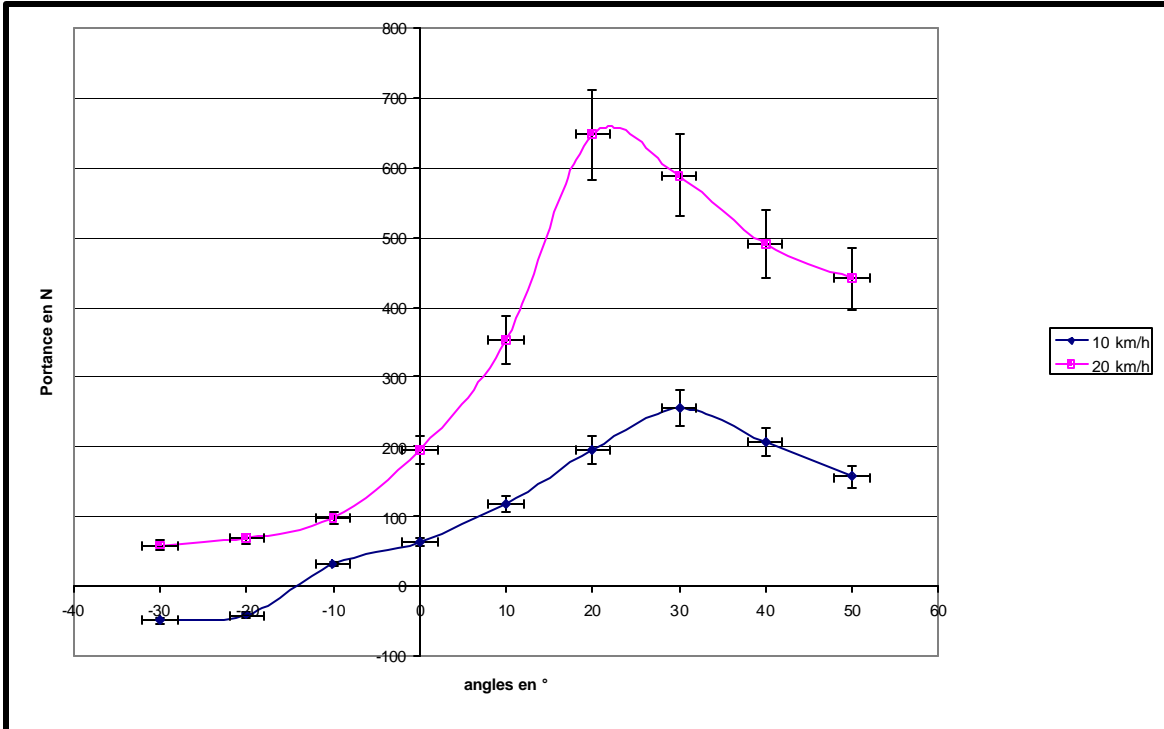


L'objet étudié se trouve sur une balance. La tare ayant été effectuée lorsque le vent est nul, la force appliquée verticalement sur l'aile se traduit directement par une variation de l'indication de la balance. Lorsque l'indication de la balance est négative, la portance est bien dirigée vers le haut et inversement.

On en déduit la force verticale appliquée en divisant par  $g=9,8m.s^{-2}$ .

Nous avons effectué deux séries de mesure: une à 10km/h et une autre à 20km/h.

### 3.1.3 Résultats



On observe avec satisfaction une portance maximale pour un certain angle entre  $15^\circ$  et  $20^\circ$ , ordre de grandeur habituellement rencontré pour le type de profil choisi. Ensuite, la portance est plus importante lorsque la vitesse du vent est supérieure, ce qui semble également compréhensible.

### 3.2 Application aux éoliennes

Observons le profil d'une hélice:

On remarque que l'hélice est vrillée. Ceci est lié à la combinaison de deux phénomènes:

- ? la nécessité d'avoir un angle d'attaque de l'ordre de  $20^\circ$ ,
- ? la vitesse du vent due à l'hélice.

En plus de la vitesse du vent qu'on appelle vitesse tangentielle, il faut tenir compte de la vitesse de rotation de l'hélice qui ressent donc une composante dite radiale, plus importante à l'extrémité de l'aile.

La combinaison de ces deux paramètres fait que les hélices optimisées doivent être vrillées pour que la force appliquée soit maximale.



## 4. Etude des éoliennes à axe vertical du type Savonius

### 4.1 Etude préliminaire

#### 4.1.1 Etude préliminaire

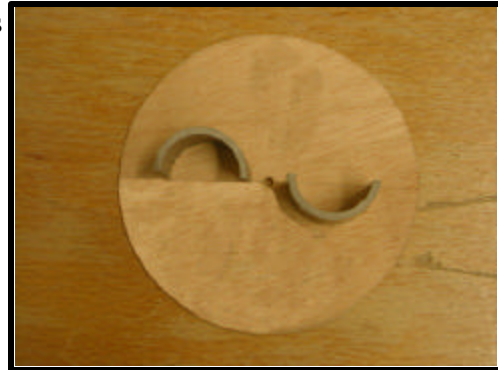
Notre première observation s'est portée sur un disque possédant des petites pâles planes du type moulin à eau. Nous nous sommes vite rendu compte que ce type de modèle ne pouvait pas fonctionner. Nous nous sommes alors dirigé vers un type d'éoliennes particulier, des éoliennes constituées de demi-cylindres décalés par rapport à l'axe de rotation.

#### 4.1.2 Modèle 1

Ce premier modèle est constitué de deux demi-cylindres décalés.

**Observation:**

Ce modèle oscille même lorsqu'on le lance, il finit par s'arrêter et oscille.



#### 4.1.3 Modèle 2

Ce modèle est constitué de 4 demi-cylindres disposés symétriquement autour de l'axe de rotation.

**Observation:**

Ce modèle tourne mais les vitesses ne sont pas exceptionnelles (4 trs/s).

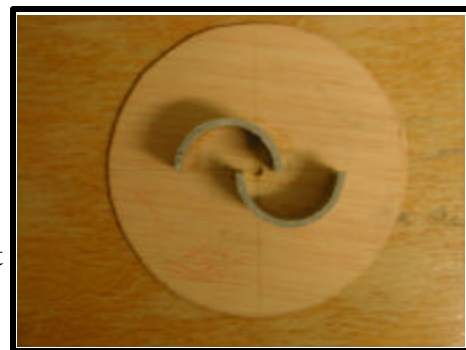


#### 4.1.4 Modèle 3

Ce modèle est constitué de 2 demi-cylindres, mais contrairement au modèle 1, les cylindres sont légèrement superposés.

**Observation:**

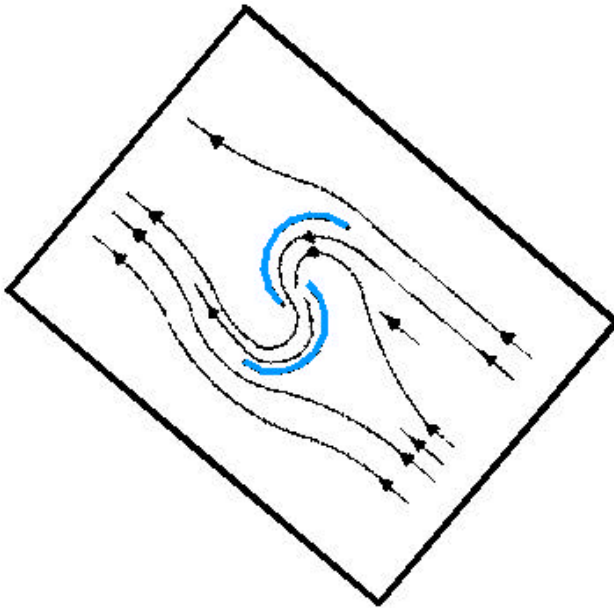
Ce modèle est le plus satisfaisant car il démarre tout seul et tourne à des vitesses de l'ordre de 10 tours/s .



A la suite de ces premières observations, on a décidé d'approfondir nos recherches sur ce troisième modèle en faisant varier quelques paramètres.

#### 4.2 Observation de l'écoulement

On observe ci-dessous la déviation du jet d'une pale vers l'autre pôle, ce qui va favoriser la rotation: cette déflexion induit un couple aérodynamique permettant la rotation.



#### 4.3 Etude aérodynamique du modèle 3 dit de type Savonius

Sur les schémas ci-dessous, on a représenté les différents paramètres que l'on a fait varier.

? l'espace  $e$  entre les deux cylindres

? la hauteur  $h$  des cylindres

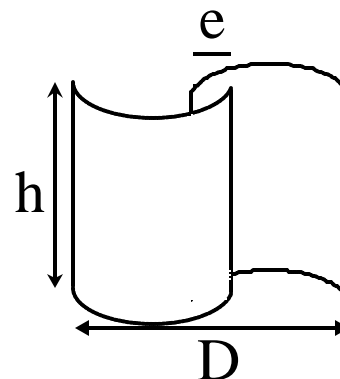
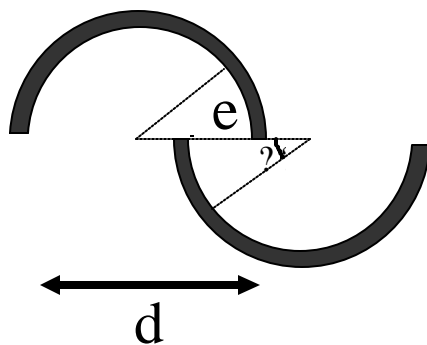
? l'angle  $\alpha$

$\alpha$

$\alpha$

Vue de dessus

Vue de face



##### 4.3.1 Etude du paramètre $e/D$

Paramètres fixes:

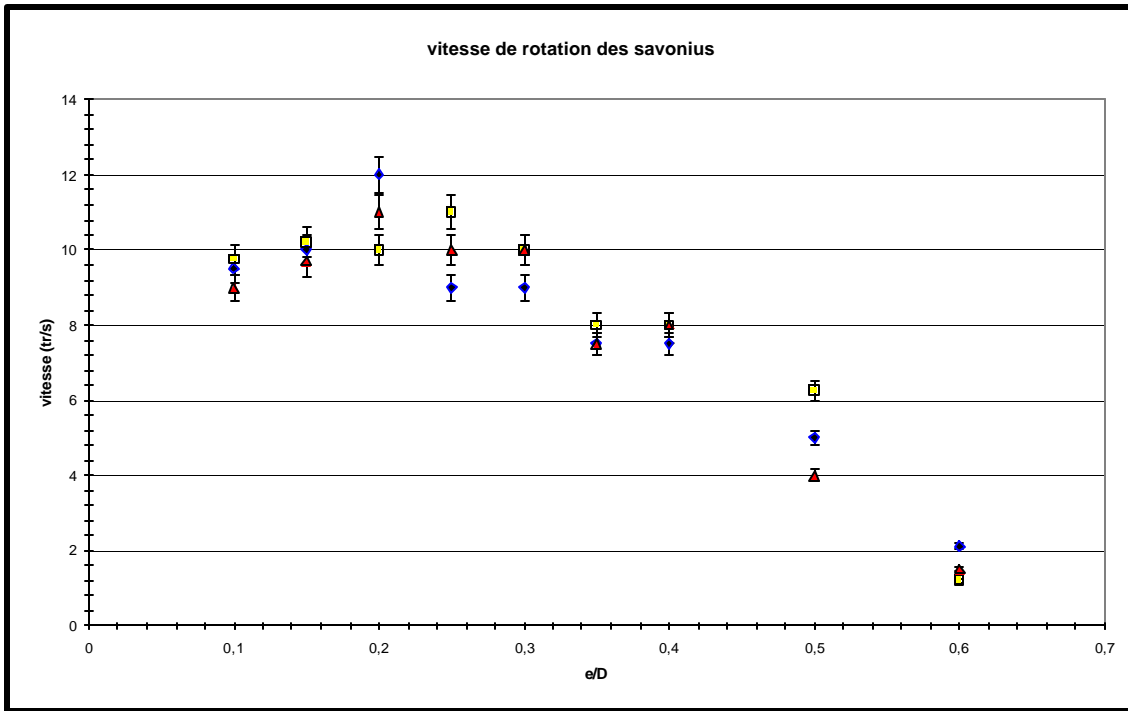
?  $d = 5,0$  cm

?  $\alpha = 0,0^\circ$

?  $h = 3,0$  cm

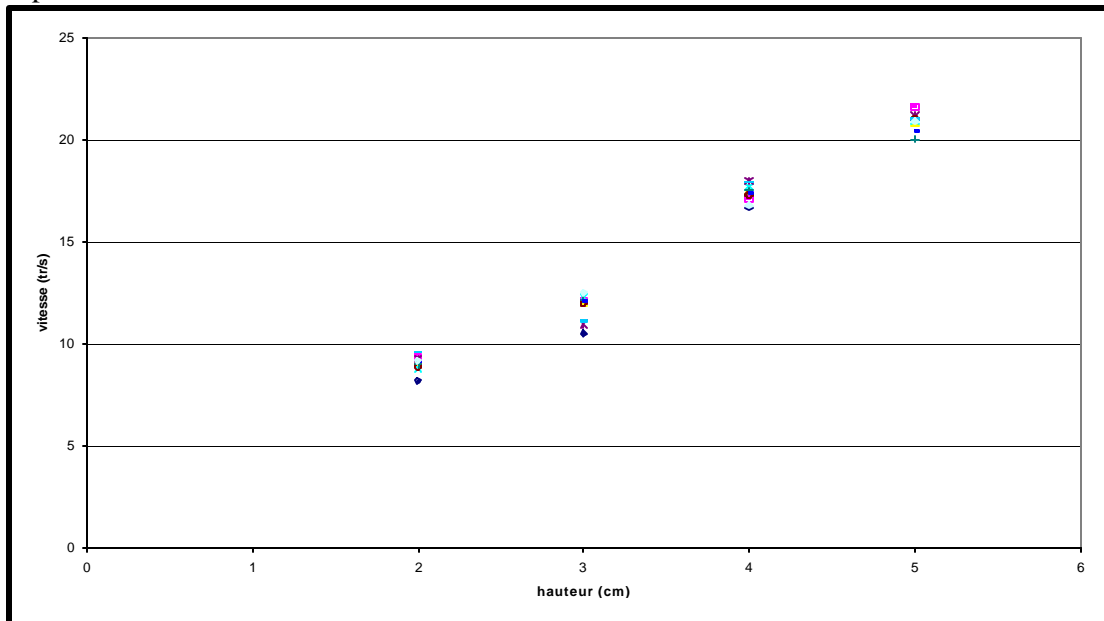
Le graphique suivant nous les vitesses de rotation de l'éolienne pour une vitesse de vent fixée

en fonction du paramètre  $e/D$ :



#### 4.3.2 Etude du paramètre $h$

On a gardé le rapport  $e/D=0,2$  puis pour une vitesse de vent donnée, on a fait varier la hauteur  $h$  des pales. Nos résultats sont les suivants:



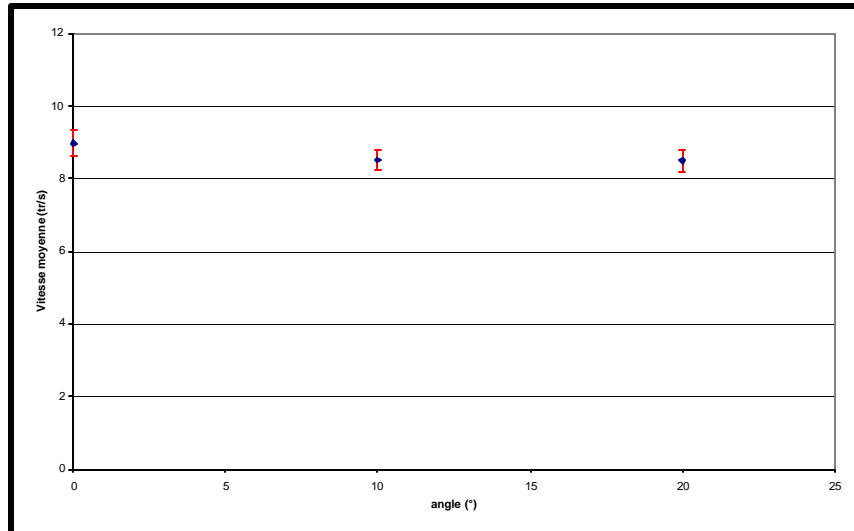
On observe que plus les pales sont hautes, plus la vitesse de rotation est importante. On n'aurait voulu faire des pales encore plus hautes mais nous ne pouvons pas à cause de la hauteur de la soufflerie.



### 4.3.3 Etude du paramètre angle

On a choisi de vérifier l'influence de la zone de reflux en tronquant les demi-cylindres d'un angle donné identique pour les deux. Les autres paramètres restant constants et la vitesse du vent également contrôlée.

Nous avons étudié trois modèles et observé aucune variation significative entre ces différents modèles. La théorie prévoit un optimum vers  $11^\circ$  mais nos résultats ne nous permettent pas d'observer une telle valeur.



5.

### Comparaison des performances des modèles d'éoliennes

Le vent a un caractère aléatoire et intermittent, l'hélice a pour effet de freiner l'air qui l'entraîne et donc de lui emprunter une partie de son énergie cinétique pour la convertir en énergie de rotation de l'arbre.

La puissance cinétique du vent sur la surface  $S$  en l'absence d'hélice, c'est à dire lorsque l'écoulement de l'air n'est pas perturbé a pour valeur :

$P_c = dE_c/dt$  avec  $dE_c = \frac{1}{2}(\rho * S * v * dt) * v^2$ ,  $v$  est la vitesse du vent,  $\rho$  la masse volumique de l'air et  $S$  la surface décrite lorsque l'hélice tourne.

Donc  $P_c = \frac{1}{2}(\rho * S * v^3)$ .

On définit le rendement comme le rapport de la puissance prélevée au vent par la puissance cinétique :

$$r = P_p/P_c$$

Ce rendement a pour maximum 60%, **limite de Betz**.

Les recherches sur la forme des pales et sur leur aérodynamique on pour but d'augmenter ce rendement.

**Exemple :** On veut construire une éolienne de puissance mécanique  $P_p = 10$  kW pour une vitesse moyenne du vent  $v = 6$  m.s<sup>-1</sup> avec  $\rho = 1,3$  kg.m<sup>-3</sup>. Déterminer le rayon moyen des pales.

En utilisant un rendement maximal de 60 %, on obtient  $P_c = 10^4/0,6 = 16\ 666$  W

$P_c = \frac{1}{2}(\rho * S * v^3)$ , on en déduit  $S = (2P_c)/(\rho * v^3) = (2 * 16\ 666)/(1,3 * 216) = 118$  m<sup>2</sup>

Ce qui correspond à un rayon de  $R = 6,1$  m.

? On définit le paramètre de vitesse  $\lambda = u/v$  avec  $u$  vitesse tangentielle de l'extrémité d'une pale en rotation et  $v$  vitesse du vent ;  $\lambda$  dépend du nombre de pales, de leur forme, de leur poids et de l'angle d'inclinaison par rapport à la verticale. L'extrémité d'une pale peut se déplacer à une vitesse de 483 km.h<sup>-1</sup> avec un vent soufflant à 32,2 km.h<sup>-1</sup>, le coefficient  $\lambda$  peut atteindre 15.

Caractéristique des éoliennes de Donzère :

$P_{él} = 600 \text{ kW}$

$V = 13 \text{ m.s}^{-1}$  diamètre des pales : 43m  $S = 1452 \text{ m}^2$

$\omega = 27 \text{ tr.min}^{-1}$

La puissance cinétique a pour valeur  $P_c = \frac{1}{2} * (\omega * S * v^3) = 0,5 * 1,3 * 1452 * 13^3$

$P_c = 2,3 * 10^6 \text{ W}$ . Le rapport entre la puissance électrique et la puissance cinétique est :

$r' = P_{él}/P_c = 6 * 10^5 / 2,3 * 10^6 = 0,26$  soit 26%

Le coefficient  $\lambda$  a pour valeur  $\lambda = u/v = R * \omega / v$  avec

$\lambda =$

$27 * 2 * \omega / 60 = 2,8 \text{ rad.s}^{-1}$

$u = 2,8 * 21,5 = 60 \text{ m.s}^{-1}$  soit environ 217 km.h<sup>-1</sup>.

$\lambda = 60/13 = 4,5$ .

Caractéristique de l'éolienne bipale à axe horizontal utilisée dans notre soufflerie :

$R = 7,5 \text{ cm}$  soit  $S = \omega * (7,5 * 10^{-2})^2 = 1,8 * 10^{-2} \text{ m}^2$

Pour une vitesse de vent maximale de  $v = 22 \text{ km.h}^{-1} = 6,1 \text{ m.s}^{-1}$

On a mesuré une vitesse de rotation :  $\omega = 40 \text{ tr.s}^{-1}$

Nous avons utilisé un moteur à courant continu comme génératrice. La tension aux bornes de la génératrice était  $U = 0,3 \text{ V}$  pour une intensité  $I = 100 \text{ mA}$  débitée dans une résistance  $R = 1 \Omega$ .

La puissance cinétique a pour valeur  $P_c = 0,5 * 1,3 * 1,8 * 10^{-2} * 6,1^3 = 2,65 \text{ W}$ .

La puissance électrique  $P = U * I = 0,3 * 0,1 = 30 \text{ mW}$ .

Le rapport entre la puissance électrique et la puissance cinétique est de l'ordre de :

$r' = P_{él}/P_{cin} = 0,03/2,65 = 0,011 = 1 \%$

Le coefficient  $\lambda = u/v = 3$ .

**Le faible rendement obtenu provient principalement de notre génératrice. L'utilisation de pales plus grandes permettrait d'avoir des couples plus importants et donc d'utiliser d'autres génératrices possédant un meilleur rendement.**

**6. Visite de la grande soufflerie de Luminy**

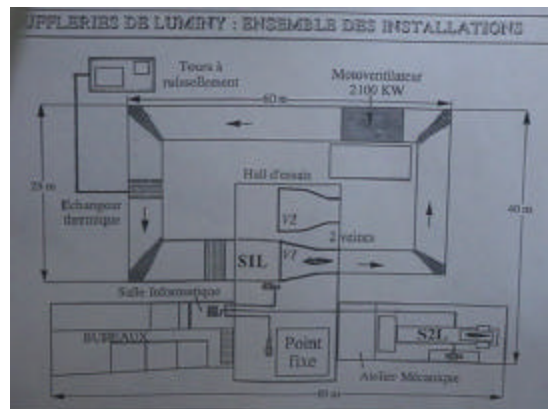
Notre seconde visite nous a permis d'apprécier une « vraie » soufflerie. C'est sur le site de Luminy, une fac de Marseille, que nous nous sommes déplacés.



Le site de la soufflerie est composé de quatre grands espaces : des locaux, un grand hangar et deux souffleries.

La première soufflerie que nous avons observée est la grande soufflerie à circuit fermé. Elle est de taille gigantesque, par rapport à notre modèle. Essayez de faire rentrer une dizaine de personnes à la fois dans la zone test !

Celle-ci possède un moteur assez puissant et a été construite de manière à rendre l'air extrêmement laminaire dans la zone de test, grâce à un grillage à alvéoles. La température était assez fraîche. Cela est dû aux circuits de refroidissement utilisés pour limiter la température de l'air surchauffé par les frottements. Nous avons eu la chance de pouvoir faire entièrement le tour du circuit de la soufflerie.



Enfin, la deuxième soufflerie est du même modèle que la notre, à circuit ouvert, mais avec une puissance bien supérieure, et une zone test beaucoup plus stable et grande.

Dans ce site, nous avons été très bien accueillis par les scientifiques et nous avons même pu assister aux tests en cours sur un retors d'hélicoptère dans la soufflerie à circuit fermé (après en être sorti, tout de même !). Nous avons donc pu voir le même genre d'expérience, mais à une échelle largement supérieure.

**Cette sortie a été très intéressante du point de vue de la comparaison de notre soufflerie et de la leur, et enfin, la voir fonctionner et pouvoir observer les conditions de travail des scientifiques était captivant.**

### **Conclusion:**

Cette étude nous a permis d'étudier et de comparer le comportement de différents types d'éoliennes. Les éoliennes à axe vertical ne sont plus utilisées actuellement à cause de leur plus faible rendement mais des chercheurs, notamment à Marseille continuent leurs investigations sur ces types de modèles.

Cette année nous a permis de rencontrer des chercheurs et de découvrir leur travail, ce qui a été très intéressant pour nous.