

IUT GTE

## TP EOLIENNE



### Objectifs du TP :

Acquérir des connaissances sur l'origine et l'utilisation actuelle de l'énergie éolienne.

Comprendre et mettre à l'épreuve le fonctionnement d'une éolienne, à travers l'observation de son comportement et la quantification de ses performances.

Ce TP a été réalisé par les étudiants Pierre Boscq, Baptiste Dumortier, Aurore Dutin et Kevin Friry durant leur projet de fin d'études 2005/2006.

**DOCUMENT DISPONIBLE SUR L'INTRANET**

# Table des matières

<b>1 L'éolien</b>	
<b>Données historiques et économiques</b>	<b>5</b>
1.1 L'histoire de l'éolienne . . . . .	5
1.1.1 Des moulins à vent aux éoliennes modernes . . . . .	5
1.1.2 L'éolien aujourd'hui . . . . .	7
1.2 Evolution de l'énergie éolienne en quelques chiffres . . . . .	8
1.2.1 Evolution mondiale depuis 1995 . . . . .	8
1.2.2 Etude de l'année 2005 . . . . .	9
1.2.3 La France . . . . .	11
<b>2 Rappels théoriques et techniques</b>	<b>13</b>
2.1 Principes de bases . . . . .	13
2.1.1 Les capteurs à axe vertical . . . . .	14
2.1.2 Les capteurs à axe horizontal . . . . .	16
2.2 Présentation générale du système . . . . .	17
2.2.1 Capteur d'énergie . . . . .	17
2.2.2 Transmission mécanique . . . . .	18
2.2.3 Convertisseur . . . . .	18
2.2.4 Systèmes de régulation . . . . .	18
2.2.5 La charge . . . . .	19
2.2.6 La structure support . . . . .	20
2.3 Les méthodes de quantification des performances d'une éolienne . . . . .	21
2.3.1 L'énergie disponible . . . . .	21

2.3.2	L'énergie récupérable . . . . .	22
2.3.3	La théorie de BETZ . . . . .	22
2.3.4	La limite de BETZ . . . . .	24
<b>3</b>	<b>Manipulation</b>	<b>25</b>
3.1	Questions de culture générale . . . . .	25
3.2	Travail pratique : Quantifier les performances de l'éolienne . . . . .	26
3.2.1	Protocole expérimental . . . . .	26
3.3	Annexe : Caractéristiques de l'éolienne RUTLAND 503 . . . . .	28

# Chapitre 1

## L'éolien

### Données historiques et économiques

#### 1.1 L'histoire de l'éolienne

L'utilisation de la force du vent pour suppléer l'énergie humaine ou animale n'est pas nouvelle : on a retrouvé la trace de systèmes fixes de conversion du vent qui remontent à 2000 ans avant J-C, et l'utilisation du vent pour la navigation date peut-être de 5000 ans. Certains pays ont depuis le Moyen-Age largement fait usage de ce type d'énergie par le biais de moulins à vent ou d'éoliennes dites américaines que ce soit pour moulinier le grain ou pomper l'eau. Les années 1970 à 2000 ont vu une importante évolution à la fois de leur utilisation par le monde et de leur conception, bénéficiant des progrès technologiques et scientifiques dans les domaines de l'aérodynamique, la structure, les matériaux, l'électronique, etc. : l'accroissement de nos besoins énergétiques suscite en effet leur développement et leur mise en œuvre. De par notre mode de vie, nous avons créé une forte demande d'énergie ; de plus, confrontés aux réductions des réserves, aux augmentations des coûts et aux impacts écologiques des énergies traditionnelles, nous sommes amenés à proposer des alternatives intéressantes et renouvelables pour compléter ces sources traditionnelles, et l'éolienne constitue une source d'énergie adéquate car fiable, inépuisable et sans conséquences indésirables sur l'environnement, s'inscrivant notamment dans l'effort global de réduction des émissions des gaz à effet de serre.

##### 1.1.1 Des moulins à vent aux éoliennes modernes

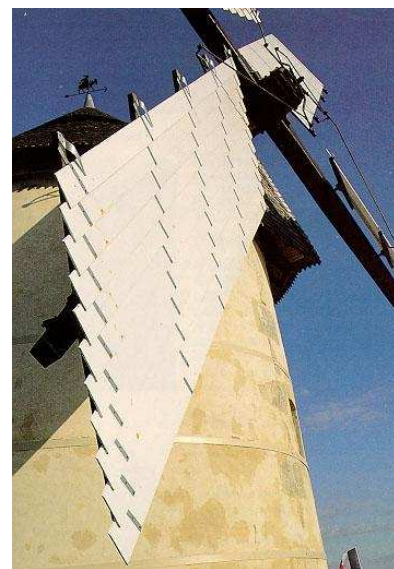
L'énergie éolienne tire son nom d'Eole, le nom donné par les anciens Grecs au dieu produisant le vent.



Il y a bien longtemps que les hommes ont imaginé des moyens pour exploiter les vents : on a par exemple trouvé des roues à aubes que le vent faisait tourner chez les perses. Mais c'est vers le 12ème siècle qu'apparaissent en Europe les premiers moulins à vent.

Vers le début du 13ème siècle, les moulins étaient constitués d'une solide tour ronde et les ailes ressemblaient à des échelles sur lesquelles on accrochait des toiles. Vers la fin du 14ème siècle on améliora les mécanismes, en permettant par exemple au chapeau du moulin de tourner pour orienter les pales vers le vent pour une utilisation plus intensive. Puis les moulins pivot sont apparus, dont le bâtiment était suspendu sur un axe central, permettant de l'orienter dans la direction du vent.

Vers 1845, les meuniers étant fatigués de devoir en permanence monter dans les ailes pour faire varier la surface de voilure, on remplaça le tissu des ailes par un ingénieux système de planches mobile. Nous devons cette amélioration à un inventeur français, du nom de Berton. Nos hélices modernes à pas variable ne constituent finalement qu'une modeste amélioration de ce mécanisme. La dernière évolution marquante a été l'adoption de profils semblables à des ailes d'avion.



Ce sont sans doute les films du Far West qui ont fait découvrir au grand public l'éolienne moderne, tournant et grinçant dans la ferme américaine traditionnelle. Plusieurs milliers furent installées aux Etats-Unis, en particulier en Californie, servant au pompage de l'eau dans les élevages.

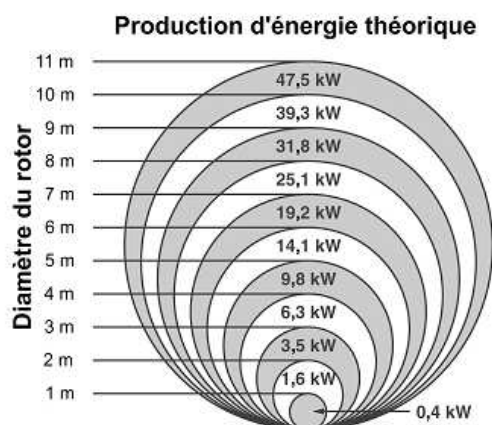


Des moulins massifs et trapus d'autrefois nous avons aujourd'hui évolué vers des structures légères, aériennes et élégantes. Le système de production électrique occupe en effet peu d'espace : il s'agit d'une hélice branchée sur un alternateur. Les principes qui gouvernent les rotors de ces machines s'apparentent ou sont issus de ceux des hélices ou des rotors d'hélicoptères.

## 1.1.2 L'éolien aujourd'hui

Le Sommet de la Terre, à Rio en 1992, a marqué la prise de conscience internationale du risque de changement climatique. Les états les plus riches, pour lesquels une baisse de croissance semblait plus supportable et qui étaient en outre responsables des émissions les plus importantes, y avaient pris l'engagement de stabiliser en 2000 leurs émissions au niveau de 1990. C'est le Protocole de Kyoto, en 1997, qui traduit en engagements quantitatifs juridiquement contraignants cette volonté.

De nombreux industriels ont alors pris conscience qu'une réelle ouverture s'opérait dans le domaine éolien.



Il existe ainsi de nos jours une large palette d'éoliennes différentes, surtout utilisées pour la production électrique. Le « petit éolien » par exemple, utilisé par les particuliers, délivre des puissances de quelques dizaines de Watts pour des surfaces d'une cinquantaine de centimètres de diamètre balayées par l'hélice. Le « gros éolien » se tourne plutôt vers la production d'électricité nationale, qui est directement injectée sur le réseau de distribution ; des puissances de 5 000 kiloWatts peuvent ainsi être obtenue pour des éoliennes de 80 mètres de diamètre.

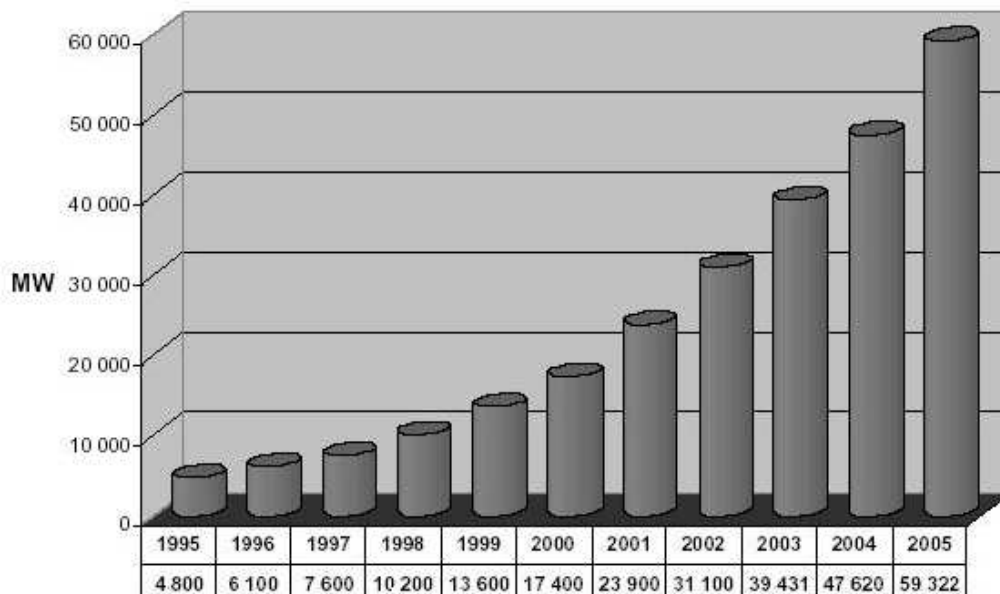
Des projets actuels se tournent vers des parcs maritimes en haute mer, aussi appelés parcs en « offshore », car bien que le coût du kWh produit soit plus élevé que sur le continent, la production y est plus stable et plus importante du fait de la présence quasi constante de vent.

Les sommets de Bonn en juillet 2001 et de Johannesburg en septembre 2002 ont permis de définir la mise en œuvre du protocole de Kyoto et de réaffirmer l'objectif de réduction des gaz à effet de serre. Le développement des énergies renouvelables est alors un enjeu primordial, puisque la France s'est engagée à produire 21% de son électricité à partir d'énergies propres d'ici 2010, au lieu de 15% actuellement (comprenant déjà l'énergie hydraulique fournie par les barrages).



## 1.2 Evolution de l'énergie éolienne en quelques chiffres

### 1.2.1 Evolution mondiale depuis 1995



Capacité totale installée dans le monde (entre 1995 et 2005) ; source GWEC<sup>1</sup>

La capacité totale mondiale installée fin 2005 était de 59 322 MW, ce qui représente une progression de 25% par rapport à l'année 2004. Comme l'indique le graphique ci-dessus, la puissance installée augmente chaque année. Ainsi l'allure générale de la droite passant par le sommet de chaque cylindre est similaire à celle d'une exponentielle ce qui traduit avec quelle rapidité la capacité éolienne installée croît.

Le graphique suivant illustre la capacité installée dans le monde au cours de chaque année.

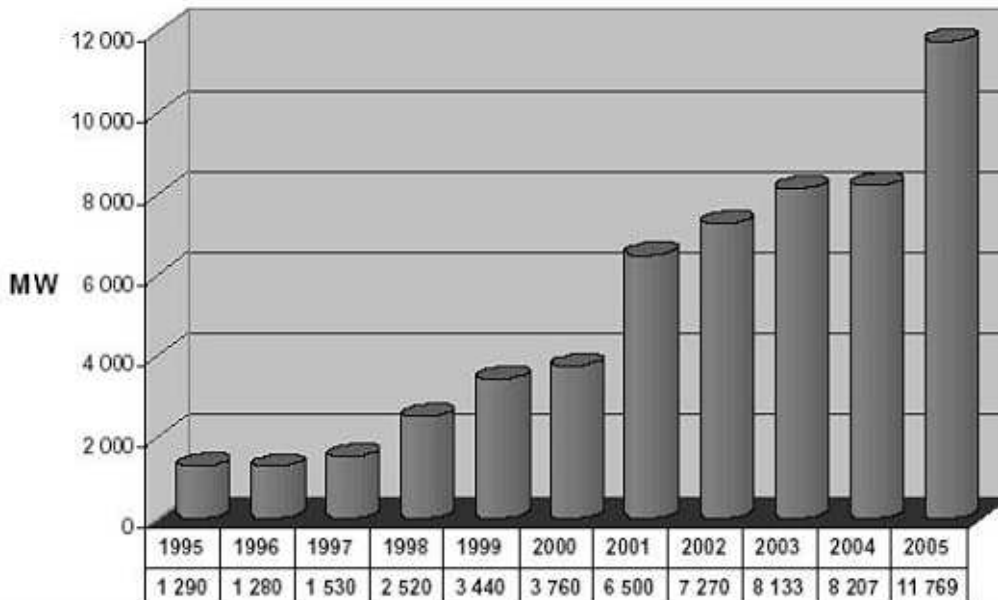
---

<sup>1</sup>GWEC : General Wind Energy Council (Conseil Général de l'Énergie Éolienne)

Les membres de cette association viennent de plus de cinquante pays différents, ils représentent :

- Plus de 1500 entreprises, associations ou institutions.
- La majorité des grands constructeurs d'éolienne.





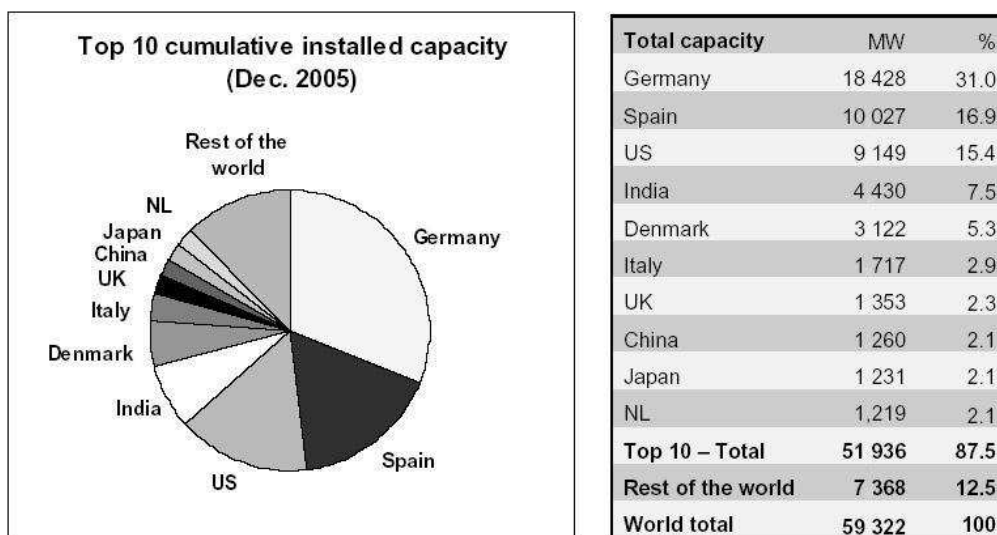
Capacité installée dans le monde pour chaque année (source GWEC)

La encore nous remarquons que l'installation d'éoliennes est en constante et forte augmentation ces dernières années, l'année 2005 a ainsi été celle durant laquelle le plus de capacité a été installée avec près de 12 000 MW au niveau mondial. Ces chiffres quantifient les efforts effectués par plusieurs pays pour augmenter la part de production électrique via des énergies propres.

## 1.2.2 Etude de l'année 2005

L'Europe dispose de 40 500 MW de capacité installée (fin 2005) ce qui représente 69% de la capacité mondiale. Avec cette capacité, l'Europe a d'ores et déjà atteint l'objectif de 2010 imposé par la Commission européenne (l'objectif étant de 40 000 MW).

D'ici 2010 l'énergie éolienne permettra à elle seule de diminuer d'un tiers le dégagement des gaz à effet de serre imposé à l'Union Européenne par le traité de Kyoto.



Dix premiers pays en terme de capacité installée, décembre 2005 (source GWEC)

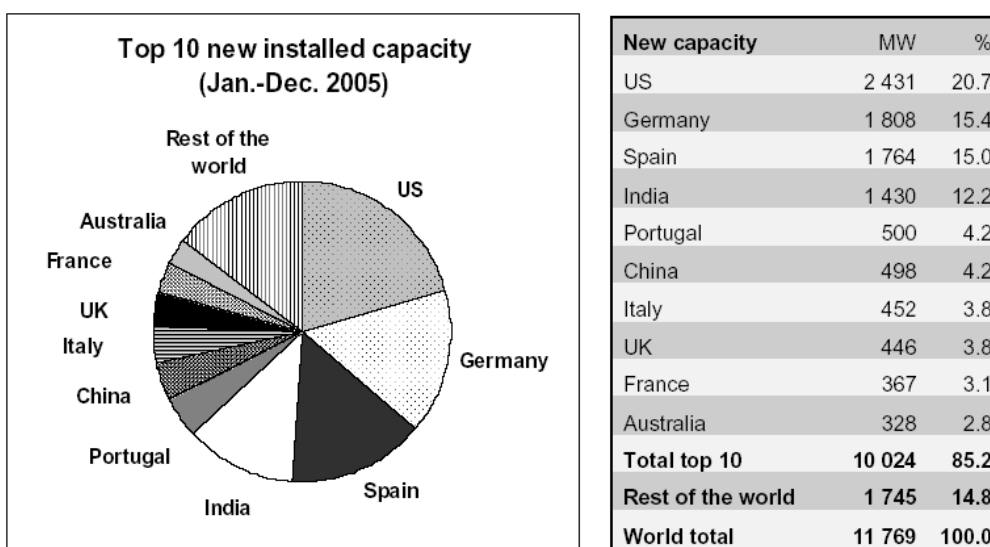
Le graphique présenté ci-dessus fait apparaître les dix pays ayant les plus grandes capacités installées à la fin de l'année 2005.

L'Allemagne avec près du tiers de la capacité totale installée dans le monde figure bien évidemment en tête de ce classement. Derrière nous retrouvons l'Espagne et les États-Unis avec respectivement 16.9% et 15.4% de la capacité mondiale. Figurent ensuite des pays comme l'Inde avec 7.5% et le Danemark avec 5.3%.

Bien que les chiffres aient évolués depuis l'année 2003, l'ordre mondial est resté sensiblement le même. Voici donc à titre indicatif ce que représentait la production d'électricité assurée par l'énergie éolienne par rapport à la production totale de chacun des pays suivants pour l'année 2003 :

- Danemark : 25 %
- Espagne : 16 %
- Allemagne : 15 %
- Inde : 2,5 %
- États-Unis : 0,7 %

Le croisement des informations du graphique avec ces dernières met en évidence un aspect important, la capacité installée de chaque pays par rapport à celle mondiale n'est pas révélatrice de la politique de production d'énergie de ce même pays. En effet bien que le Danemark occupe la cinquième place mondiale en terme de capacité installée, sa production électrique est issue à 25% de l'énergie éolienne. A l'opposé, les États-Unis ne produisent que 0.7% de leur électricité à partir de l'éolien alors qu'ils occupent le troisième rang mondiale en terme de capacité installée.

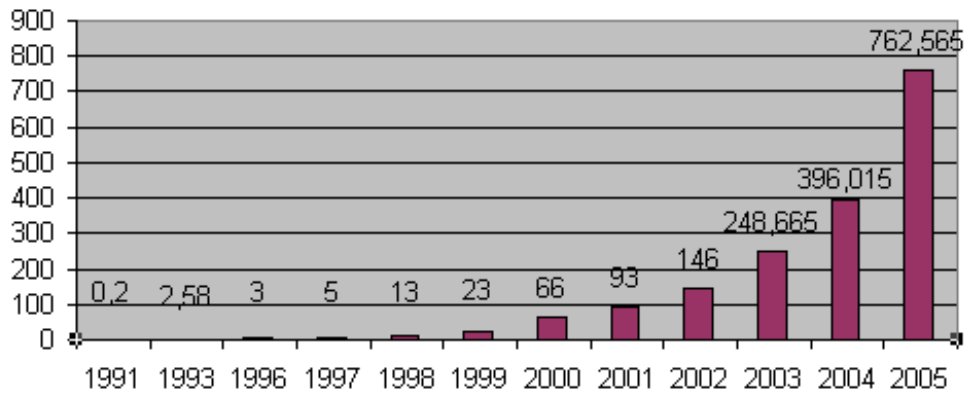


Les dix premiers pays en terme de capacité installée au cours de l'année 2005 (GWEC)

Le graphique et le tableau précédent font apparaître les pays qui ont installés le plus de puissance éolienne au cours de l'année 2005. Les États-Unis ont ainsi installé près de 21% de la capacité mondiale, les efforts de l'Allemagne, l'Espagne et l'Inde sont également à souligner. La France apparaît au neuvième rang mondial pour l'exercice 2005 avec 367MW installés.

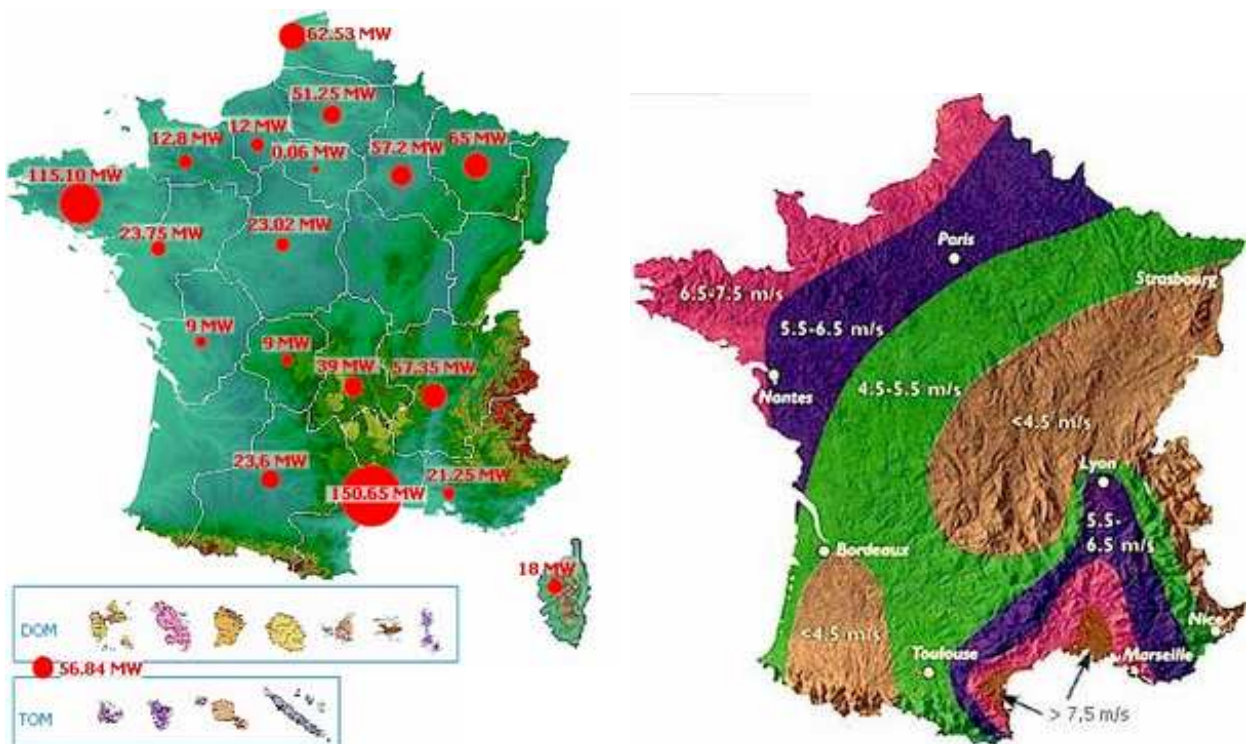
### 1.2.3 La France

Le présent graphique illustre l'évolution de la capacité de production installée en France entre les années 1991 et 2005.



Capacité de production installée annuellement en France (en MW)

La France avec ses 762.6MW représentait 1.29 % de la capacité mondiale installée et cumulée en 2005. La production d'électricité assurée par l'éolien a atteint la barre notable de 1 TWh au cours de cette même année, ce qui rapporté aux 549.2 TWh produits par l'ensemble des dispositifs de production nationaux représente 0.18%.



Localisation des différents parcs éoliens français et du potentiel territorial

Comme le montre la carte des vents ci-dessus, tout le territoire n'est pas propice à accueillir des éoliennes, il existe ainsi des disparités en terme de vitesse de vent et de fréquence. Cette carte indique la moyenne annuelle de vitesse de vent en fonction du lieu

géographique. Nous remarquons que les façades maritimes sont bien exposées alors que l'intérieur des terres ne bénéficie pas des mêmes conditions venteuses.

En ce début d'année 2006 la France compte 987 éoliennes en production réparties dans les 136 parcs éoliens. Il est aisé de constater que l'implantation de ces parcs correspond aux zones les plus favorables indiquées sur la carte des vents. L'Hérault et la Bretagne sont les zones disposant du plus de capacité installée.

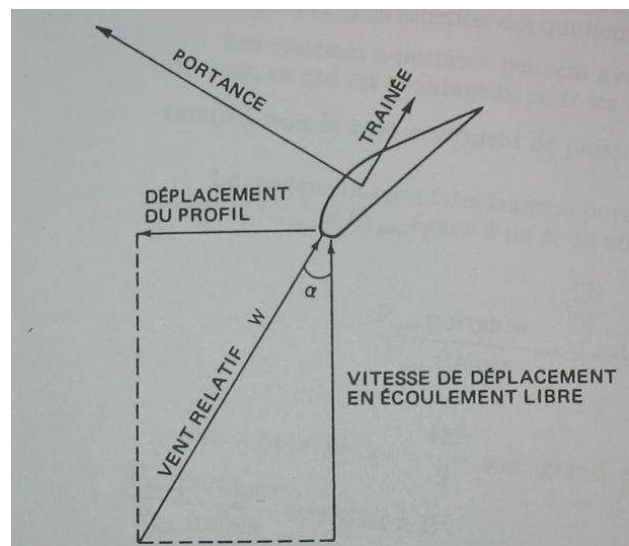
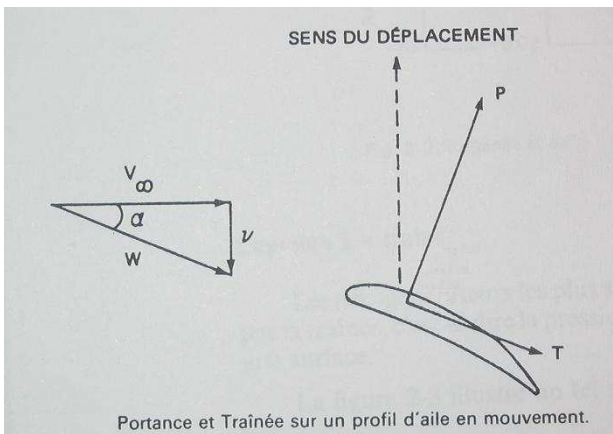
# Chapitre 2

## Rappels théoriques et techniques

### 2.1 Principes de bases

Une éolienne est un générateur d'électricité fonctionnant grâce à la vitesse du vent. Elle se compose d'un rotor (hélice) qui se met en mouvement grâce à la force du vent ; c'est la première conversion qu'effectue l'éolienne : transformer l'énergie cinétique du vent en énergie de rotation. Cette rotation est ensuite convertie en électricité par une génératrice. L'efficacité maximum de l'éolienne est obtenue lorsque l'hélice est face au vent, donc perpendiculaire.

Pour appréhender correctement le fonctionnement d'une éolienne, il faut tout d'abord introduire le comportement d'une pale dans un flux d'air :



*Notations de portance et de traînée*

Le profil dans le flux d'air est soumis à deux forces : les forces de portance P et de traînée T. Ces forces varient avec la masse volumique de l'air  $\rho$ , la surface apparente de la pale S et le carré de la vitesse relative du vent W selon :

$$P = 1/2\rho W^2 S C_z$$
$$T = 1/2\rho W^2 S C_x$$

**Remarque :** La vitesse relative du vent est liée au repère relatif, celui du profil lui même : c'est la vitesse que « voit » le profil.

Les coefficients sans dimensions  $C_z$  et  $C_x$  sont respectivement les coefficients de portance et de traînée.

La puissance récupérée en exploitant la force de traînée est définie par :

$$P = TW$$

Les capteurs à « portance » sont beaucoup plus efficaces que les capteurs à « traînée ». La puissance récupérée par de tels capteurs est donnée par :

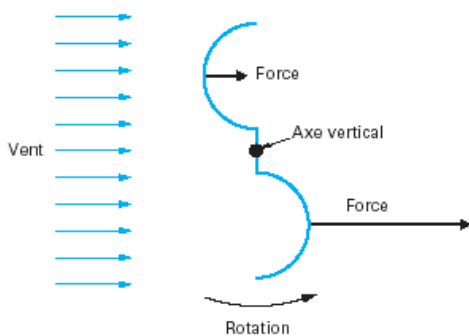
$$P = 1/2\rho V_\infty C_z S$$

où  $V_\infty$  est la vitesse de l'air en écoulement libre.

### 2.1.1 Les capteurs à axe vertical

Deux principes différents sont utilisés pour ce type de machines, à savoir la traînée différentielle ou la variation cyclique d'incidence.

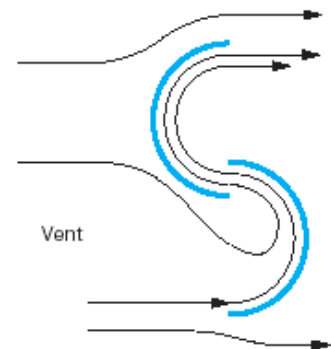
#### Capteurs a traînée différentielle



Le principe de mise en mouvement est le suivant : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte donc un couple moteur, que l'on peut utiliser pour entraîner un générateur électrique ou un autre dispositif mécanique tel qu'une pompe.

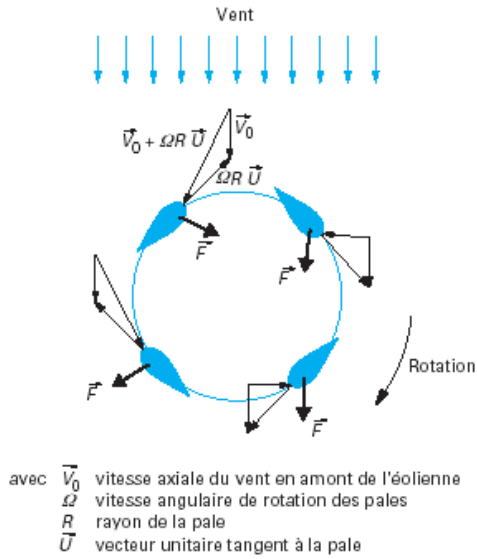
#### Effet du vent sur un corps creux

L'illustration la plus courante de ce type d'éolienne est le rotor de Savonius. La circulation de l'air rendue possible entre les deux demi cylindres augmente le couple moteur. Lors du démarrage, les cylindres sont orientés par rapport au vent de manière à obtenir un couple résultant nul. L'éolienne ne pourra donc pas démarrer spontanément. La superposition de plusieurs rotors identiques, mais décalés d'un certain angle les uns par rapport aux autres, permet de remédier à ce problème, rendant ainsi la machine totalement autonome.



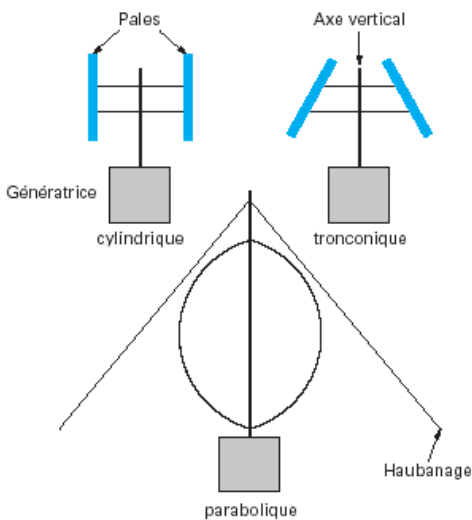
*Rotor de Savonius*

## Variation cyclique d'incidence



Le fonctionnement est ici basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La combinaison de ces forces génère alors un couple moteur. En fait les différents angles auxquels sont soumis les profils proviennent de la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil (en rotation autour de l'axe vertical) et de la vitesse du vent.

### Principe de l'incidence variable



### Différents types de rotor Darrieus

Le principal avantage des machines à axe vertical est que le dispositif de génération électrique repose sur le sol, ne nécessitant donc pas l'édification d'une tour. Par ailleurs, une éolienne à axe vertical fonctionne quelle que soit la direction d'où souffle le vent, permettant donc de s'affranchir d'un dispositif d'orientation de la machine.

En revanche, ces éoliennes étant érigées près du sol, le capteur d'énergie se situe dans une zone peu favorable (gradient de vent, turbulence due aux accidents du terrain en amont de la machine, ce qui réduit significativement l'efficacité de la machine. Par ailleurs, le principe même de fonctionnement fait que ces éoliennes sont très sujettes aux problèmes d'aéroélasticité, soient aux interactions mutuelles des efforts aérodynamiques, inertiels (gravité, force centrifuge...) et élastiques (déformation des pales). Enfin, pour des éoliennes de grande puissance, la surface occupée au sol par le haubanage est très conséquente.



Actuellement, les fabricants d'éoliennes à axe vertical mettent en avant leurs avantages spécifiques et surtout leur fonctionnement avec des vents turbulents près du sol. En effet, ces machines peuvent être installées à proximité de bâtiments ou sur un toit en ville. La vitesse de rotation du rotor est relativement lente, ainsi le bruit et le danger sont réduits.

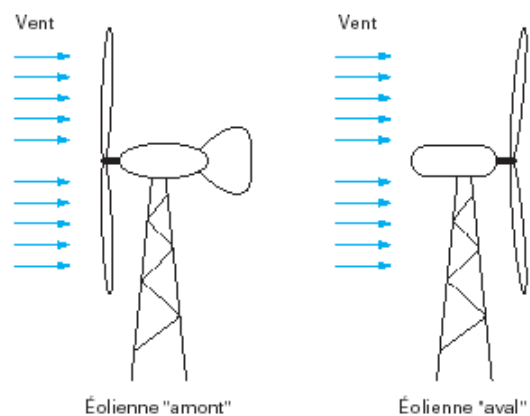


## 2.1.2 Les capteurs à axe horizontal



Toutes les éoliennes commerciales raccordées au réseau sont aujourd'hui construites avec un rotor du type hélice, monté sur un axe horizontal (c'est-à-dire un arbre principal horizontal).

Ces machines sont les descendantes directes des moulins à vent sur lesquels les ailes, faites de voiles tendues sur une structure habituellement en bois, ont été remplacées par des éléments ressemblant fortement à des ailes d'avion. La portance de ces ailes génère un couple moteur destiné à entraîner un dispositif mécanique tel qu'une génératrice électrique, une pompe, etc. Ces machines comprenant une à trois pales peuvent développer des puissances élevées (plusieurs mégawatts).



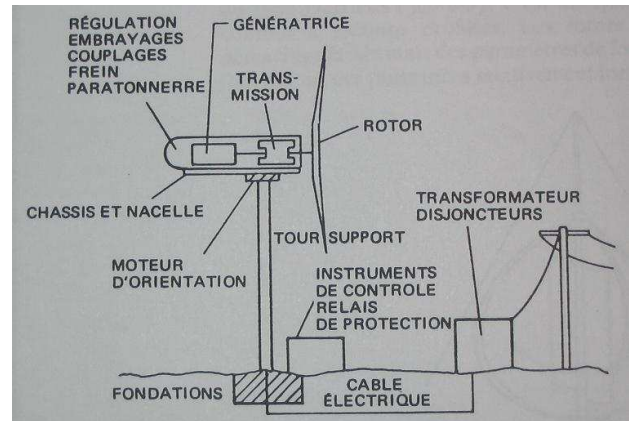
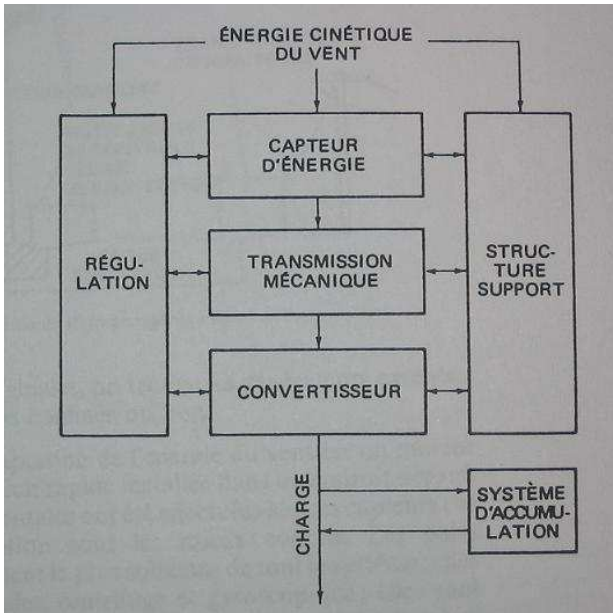
Deux types de configuration peuvent être rencontrés : les éoliennes « amont », sur lesquelles les pales sont situées du côté de la tour exposé au vent, et les éoliennes « aval ». Chaque configuration possède avantages et inconvénients : la formule amont requiert des pales rigides pour éviter tout risque de collision avec la tour alors que la configuration aval autorise l'utilisation de rotors plus flexibles. Par ailleurs, dans le cas d'une machine amont, l'écoulement de l'air sur les pales est peu perturbé par la présence de la tour. L'effet de masque est plus important dans le cas d'une machine « aval ». Enfin, une machine « aval » est théoriquement auto-orientable dans le lit du vent, alors qu'une éolienne « amont » doit généralement être orientée à l'aide d'un dispositif spécifique. On constate néanmoins que la majeure partie des éoliennes de grande puissance adoptent la configuration « amont ».

Une catégorie particulière d'éoliennes à axe horizontal est celle des machines multipales de faible diamètre (jusqu'à 10 m environ). La masse importante de la roue aubagée, les vitesses de rotation peu élevées (en regard du diamètre) font que ces machines de faible puissance sont utilisées principalement pour le pompage de l'eau. Cependant, une application récente de ce type de machine (avec des diamètres de l'ordre du mètre) est la génération électrique à bord de bateaux de plaisance ou de course au large (similaire au modèle retenu pour l'élaboration du travail pratique).



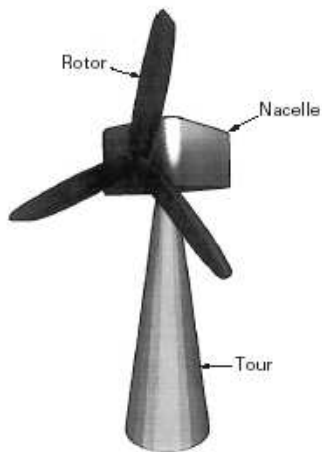
## 2.2 Présentation générale du système

Les machines destinées à convertir l'énergie du vent en énergie électrique ont, généralement, 6 composants :

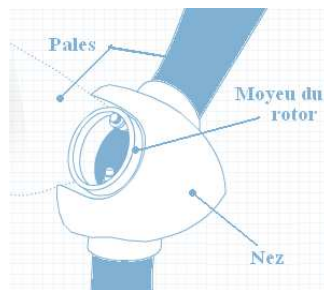


*Éléments composant une éolienne*

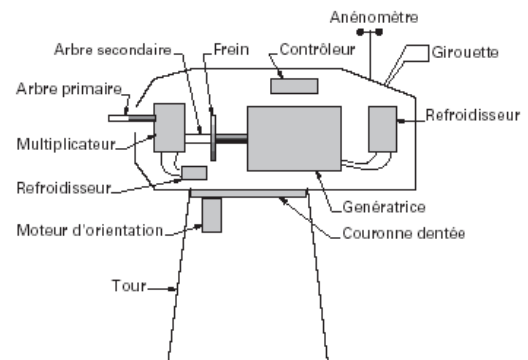
Les éléments d'une éolienne peuvent être schématisés selon les figures suivantes :



*Composantes d'une éolienne*



*Le rotor*



*Éléments d'une nacelle*

Les 6 composants sont décrits ci-dessous :

### 2.2.1 Capteur d'énergie

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. La quantité d'énergie échangée est déterminée par la surface balayée par le rotor et par son rendement. Le rotor est un ensemble constitué des pales (d'un nombre variable) et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Sur certaines machines,

l'arbre primaire qui tourne à faible vitesse comporte un dispositif permettant de faire passer des conduites hydrauliques entre la nacelle (repère fixe) et le moyeu (repère tournant). Cette installation hydraulique est notamment utilisée pour la régulation du fonctionnement de la machine (pas des pales variable, freinage du rotor, etc.).

Les pales constituent la partie généralement la plus sollicitée de ce système : plus les dimensions des aérogénérateurs augmentent, plus les problèmes de structures deviennent complexes. Pour les petites éoliennes par exemple, la force de gravité est une contrainte beaucoup moins importante que pour les grosses.

## 2.2.2 Transmission mécanique

Elle transmet l'énergie au convertisseur : il est nécessaire d'accorder la vitesse de rotation du rotor aux exigences du convertisseur ; ses composants peuvent varier énormément en coût et complexité. Sauf pour des rotors relativement petits, entraînant des génératrices à faible vitesse, on a besoin d'augmenter la vitesse de rotation de l'arbre de transmission.

De nombreuses méthodes ont été envisagées pour transmettre l'énergie mécanique : courroies synchrones et trapézoïdales, transmission à chaîne, prise directe, systèmes hydrauliques, multiplicateur et boîte de vitesse. Le multiplicateur de vitesse sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques.

Aucun de ces systèmes ne convient spécialement aux aérogénérateurs. Le système de transmission finalement adopté est généralement le résultat de compromis techniques et économiques pour la réalisation de l'ensemble complet.

## 2.2.3 Convertisseur

Le convertisseur utilise l'énergie mécanique fournie par le capteur pour produire du travail utile. Le pompage de l'eau, la mouture du grain, la production de chaleur ou d'électricité sont les utilisations les plus courantes des éoliennes et il existe des solutions particulières pour chaque utilisation. En conséquence, le choix d'un convertisseur pour un travail particulier détermine les types de capteurs et de transmissions qui pourront être utilisés.

Dans de nombreux cas le convertisseur est une génératrice électrique. Les installations destinées à la production d'électricité se rattachent à deux catégories : les installations interconnectées et les installations autonomes ou isolées. Généralement, pour des utilisations autonomes, l'aérogénérateur dispose de possibilités d'accumulation et l'énergie est fournie en courant continu. Dans le cas des installations interconnectées, l'éolienne ne fournit qu'une énergie d'appoint.

## 2.2.4 Systèmes de régulation

Les aérogénérateurs fonctionnent de façon satisfaisante dans les zones où les vitesses normales de vent sont comprises entre 8 et 40 km/h. Dans certaines de ces régions, la vitesse

du vent peut occasionnellement atteindre 160 à 190 km/h. Puisque la puissance disponible est proportionnelle au cube de la vitesse du vent, ces périodes de pointe pourraient fournir une énergie considérable. Toutefois les aérogénérateurs prévus pour fonctionner par vents forts sont encombrants et inefficaces pour des vitesses normales de vent. L'aérogénérateur usuel est prévu pour fournir un rendement maximal pour des vitesses de vent comprises entre 16 et 40 km/h ; c'est avec des vents de 40 à 65 km/h que les aérogénérateurs sont les plus malmenés. Les fabricants et ingénieurs ont tenté de nombreuses méthodes pour limiter la puissance et pour diminuer les efforts mais les niveaux de contraintes élevés n'ont été étudiés que récemment.

Par exemple les freins aérodynamiques sont courants pour les éoliennes de diamètre inférieur ou égal à 6 mètres ; des volets de freinage augmentant la traînée sont utilisés pour limiter la vitesse. Cette méthode diminue les efforts dus aux forces centrifuges mais ne les élimine pas.

Egalement la rotation de l'axe de l'hélice est utilisée seulement pour les petites éoliennes ; cette méthode de limitation de la puissance fait tourner le plan du rotor. Mais les deux principes majeurs qui se « disputent » le marché pour la régulation des éoliennes de moyenne et grande puissance sont le décrochage et le contrôle de pas.

La régulation par décrochage a l'avantage d'utiliser les propriétés naturelles de la conception du rotor sans avoir besoin de rajouter de systèmes ou mécanismes supplémentaires. L'écoulement de l'air autour d'un profil est en effet plus rapide sur l'extrados (le dessus) que sur l'intrados (le dessous) du profil. La dépression qui en résulte à l'extrados crée la portance. Lorsque la vitesse du vent arrivant sur les pales de l'éolienne est trop importante, l'écoulement de l'air au dessus de la pale arrête soudainement de suivre de façon régulière la surface de l'extrados : l'air commence à tourner dans un tourbillon irrégulier, l'écoulement devient alors turbulent. La portance résultant de la dépression à l'extrados disparaît, c'est le phénomène de décrochage aérodynamique.

Ainsi quand le vent frappe la pale à partir d'un angle incident trop vif, le profil décroche progressivement tout au long d'une partie de la pale provoquant une perte d'efficacité du rotor. L'inconvénient principal provient d'une répartition de profil qui est figée à la conception pour permettre le décrochage et qui peut donc entraîner une diminution de l'efficacité du rotor sur l'ensemble de la plage de vitesse utile.

La régulation par contrôle de pas est de ce fait un principe plus simple. C'est de loin la manière la plus courante pour limiter la vitesse de rotation et la puissance fournie. En général, la force centrifuge déclenche un système mécanique (ressort) qui modifie l'angle d'incidence des pales. L'angle d'incidence est diminué et la portance annulée. Dans d'autres cas la mise en drapeau correspond à une augmentation de l'angle d'incidence jusqu'à la perte de vitesse. L'inconvénient principal provient alors de la nécessité d'avoir un dispositif de mise en pas des pales et un système de contrôle associé, d'où une complexité et un coût supplémentaire.

## 2.2.5 La charge

Si la puissance consommée est inférieure à la puissance disponible l'excédent doit être éliminé par le régulateur de puissance de sortie / charge. À l'inverse, si la charge présente est supérieure à la puissance disponible, l'excès de charge doit être éliminé sous peine de voir l'éolienne s'arrêter.

**Plus la charge est faible, plus le couple résistant est faible et l'éolienne atteindra des vitesses de rotation élevées. A l'inverse, plus il y a de charge, moins la vitesse de rotation de l'éolienne est importante!!!**

Dans ce TP, les trois ampoules représentent les charges.

## 2.2.6 La structure support

La structure support, ou tour, doit avoir une emprise suffisante au sol pour garantir la sécurité. Elle doit monter le rotor à une hauteur suffisante pour qu'il soit au dessus de la turbulence locale de sol et lui permettre de résister à la vitesse de vent la plus forte possible.

La vitesse du vent est fonction de la hauteur de l'aérogénérateur au dessus du sol selon :

$$\frac{V_0}{V} = \left( \frac{H_0}{H} \right)^\alpha$$

La vitesse de référence est généralement la vitesse moyenne  $V_0$  (observée sur dix minutes par exemple) à une hauteur de 10 m ou à la hauteur de la nacelle  $H_0$  en amont de l'éolienne.

Le coefficient  $\alpha$  de rugosité du sol est compris entre 0,1 et 0,4. Il est par exemple de 0,16 pour un terrain plat ou un plan d'eau, de 0,28 pour les terrains boisés ou les banlieues des villes et de 0,4 pour les centres urbains.

De ce fait, plus le disque rotor sera placé haut, plus l'énergie susceptible d'être captée sera importante (car proportionnelle au cube de la vitesse) et moins l'éolienne sera affectée par l'effet de rugosité en amont de la machine.

Avec ses 400 tonnes de ciment et de fer d'armature, la fondation est un élément important d'une grande éolienne. La forme est ronde ou carrée mais peut aussi être en étoile pour réduire l'usage du ciment.

Le châssis et la coquille de la nacelle sont une véritable salle des machines perchée en hauteur. Elle referme tous les instruments qui permettent à l'éolienne de fonctionner automatiquement.

D'autres éléments sont nécessaires au fonctionnement optimal d'une éolienne :

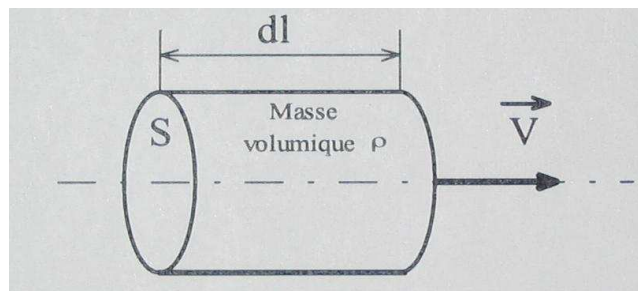
- L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- Un contrôleur électronique est chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble (rotor + nacelle) face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie et réduire les efforts instationnaires sur l'installation. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir.

- Divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile sont généralement installés.
- Le dispositif d'orientation de la nacelle permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée. De nombreuses éoliennes comportent un système de blocage mécanique de la position de la nacelle suivant une orientation donnée : cela évite de solliciter constamment les moteurs et permet aussi de bloquer l'éolienne durant les opérations de maintenance. Le dispositif d'orientation comprend un compteur de tours, de manière à éviter de tordre inconsidérément le câble acheminant l'énergie électrique provenant de la génératrice jusqu'au pied de la tour.

## 2.3 Les méthodes de quantification des performances d'une éolienne

### 2.3.1 L'énergie disponible

On considère une colonne d'air de longueur  $dl$ , de section  $S$ , de masse volumique  $\rho$  animée d'une vitesse  $V$  conformément à la figure suivante :



*colonne d'air*

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

$$dW_c = 1/2 dm V^2 \quad \text{avec} \quad dm = \rho S dl$$

Or nous savons que  $dl = V dt$  car  $V = dl/dt$  D'où :

$$dW_c = 1/2 \rho S V^3 dt$$

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

$$P_d = \frac{dW_c}{dt} = 1/2 \rho S V^3$$

La puissance disponible par  $m^2$  devient alors :

$$P_d = 1/2 \rho S V^3$$

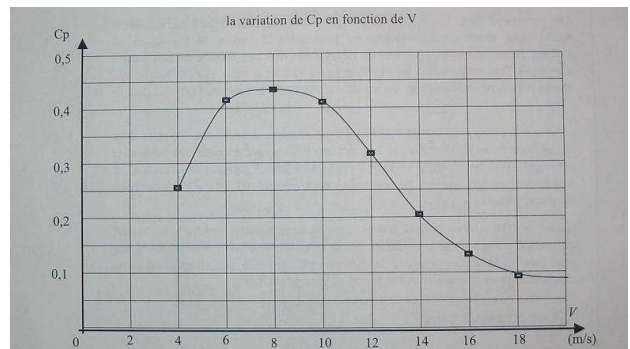
La puissance disponible maximale s'obtient lorsque l'énergie cinétique de rotation de l'air après passage au niveau de l'éolienne est faible, c'est-à-dire pour une forte vitesse angulaire de rotation  $\omega$  et un faible couple sur l'arbre.

**Remarque :** Nous rappelons que la vitesse angulaire de rotation  $\omega$  se définit par  $\omega = 2 \pi n$  avec  $n$  le nombre de tours par seconde.

### 2.3.2 L'énergie récupérable

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

Ainsi ce coefficient de performance varie avec le vent, comme le montre le graphique ci-contre, correspondant à l'éolienne haute performance NORDEX S77/1500kW dont les caractéristiques sont :



- diamètre de rotor : 77m avec 3 pales,
- vitesse de rotation : 9,6 à 17,3 t/min,
- puissance nominale : 1500kW (pour un vent de 13m/s),
- poids 88 000 Kg (sans la tour).

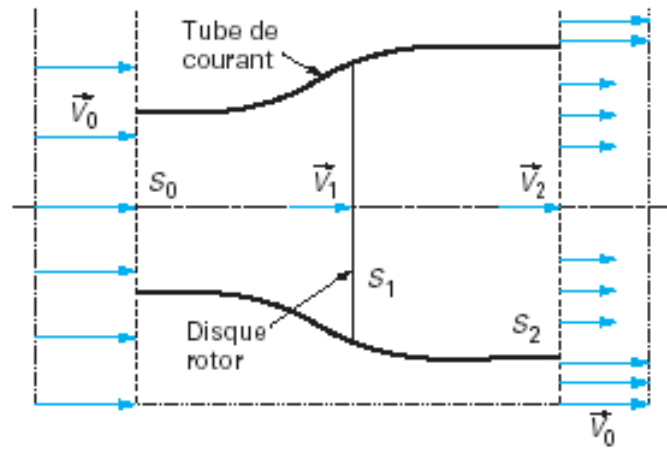
La puissance récupérable  $P_r$  sur l'éolienne est alors définie par :

$$P_r = C_p P_d$$

Où  $P_d$  est la puissance disponible.

### 2.3.3 La théorie de BETZ

La production d'énergie se fait par prélèvement d'énergie cinétique à la traversée de l'aéromoteur.



avec  $V_0$  vitesse axiale initiale du vent  
 $S_0$  surface à l'entrée du tube de courant  
 $V_1$  vitesse du vent dans le plan du rotor  
 $S_1$  surface du rotor  
 $V_2$  vitesse du vent à l'aval du rotor  
 $S_2$  surface à l'aval du rotor

*Veine de vent à la traversée de l'aéromoteur*

On supposera l'air incompressible, ce qui permettra d'écrire la conservation du débit volumique :

$$S_0 V_0 = S_1 V_1 = S_2 V_2$$

Le théorème d'Euler (variation de la quantité de mouvement de la veine de vent entre l'amont et l'aval de l'hélice) permet d'écrire que la force  $F$  s'exerçant sur les pales de l'aéromoteur est donnée par l'expression :

$$F = \rho S_1 V_1 (V_0 - V_2)$$

On obtient ainsi l'expression de la puissance mécanique fournie à l'aéromoteur :

$$P = F V_1 = \rho S_1 V_1^2 (V_0 - V_2)$$

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

$$dm = \rho S_1 V_1 dt$$

La variation d'énergie cinétique de cette masse  $dm$  lorsque la vitesse passe de la valeur  $V_0$  à la valeur  $V_2$  est défini par :

$$dW_c = 1/2 dm (V_0^2 - V_2^2)$$

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

$$P_c = \frac{dW_c}{dt} = 1/2 \rho S_1 V_1 (V_0^2 - V_2^2)$$

en exprimant que  $P_c = P$ , on en déduit que :

$$V_1 = \frac{V_0 + V_2}{2}$$

Ainsi la puissance récupérable selon la théorie de Betz s'énonce :

$$Pr = 1/4 \rho S_1 (V_0 + V_2)^2 (V_0 - V_2)$$

### 2.3.4 La limite de BETZ

La relation devant exister entre  $V_0$  et  $V_2$  pour que cette puissance  $P_r$  passe par un maximum est :

$$dP_r/dV_2 = 0 \quad \text{soit} \quad V_0 = 3 V_2$$

Dans ces conditions la puissance maximale s'écrit :

$$P_{max} = (8/27)\rho S V_0^3 = (16/27)(1/2 \rho S V_0^3)$$

$$\boxed{P_{max} = \frac{16}{27} P_d}$$

ce qui signifie que la puissance maximale récupérable ne pourra jamais représenter plus de  $\frac{16}{27} \times 100 = \underline{59,26 \%}$  de la puissance disponible due au vent, c'est la limite de Betz.

En réalité la puissance récupérée est inférieure à cette puissance maximale car « du vent à l'ampoule » dans notre cas, ou « du vent au réseau électrique » à l'échelle nationale il y a plusieurs étapes de conversion d'énergie, chacune avec son propre rendement (par exemple le rendement d'une hélice est d'environ 85%). De plus, en pratique tous les organes ne sont pas à leur rendement maximum en même temps, ce qui réduit encore le rendement global. Ainsi une éolienne industrielle aura un rendement global compris entre 50 et 55%, une éolienne artisanale entre 25 et 40%.



# Chapitre 3

## Manipulation



La manipulation est composée d'un bloc éolien et d'un bloc soufflerie. L'éolienne, dont les caractéristiques données par le constructeur sont notées en annexe à la fin du dossier, est une éolienne marine de **51 cm de diamètre**, la RUTLAND 503, comportant cinq pales et produisant en fonctionnement optimal 60W au maximum. La soufflerie est constituée du ventilateur Axalu 630/9-9/4Z/PP de 3kW à quatre pôles, doté d'un variateur de vitesse et des grilles de protection et dont le diamètre de sortie fait 70 cm.

Les appareils de mesure à utiliser lors de la séance sont le tachymètre permettant de connaître la vitesse de rotation de l'éolienne, la sonde à fil chaud Testo permettant de mesurer la vitesse du vent, l'ampèremètre nous donnant l'intensité du courant produit par l'éolienne et le voltmètre nous indiquant la tension délivrée.

Les appareils de mesure de la vitesse du vent et de celle de rotation de l'éolienne sont à placer soigneusement aux endroits indiqués sur la grille de protection de l'éolienne.

### 3.1 Questions de culture générale

1. Décrire rapidement l'origine de l'exploitation de l'énergie du vent.
2. Quel a été l'événement majoritairement responsable d'un développement massif de la technologie éolienne ?

3. Quels sont les engagements de la France en faveur de l'environnement ?
4. Commenter rapidement la production mondiale d'énergie éolienne.
5. Qui sont les leaders européens dans le domaine ?
6. Quelle est la situation actuelle de la France concernant la production d'électricité grâce à l'énergie éolienne ?
7. Démontrer la relation de Betz et retrouver sa limite.

## 3.2 Travail pratique : Quantifier les performances de l'éolienne

### 3.2.1 Protocole expérimental

- Appeler le professeur habilité pour qu'il réarme le disjoncteur.
- Placer les blocs à 26 cm l'un de l'autre et veiller par la suite à ce que le rotor de l'éolienne soit parfaitement perpendiculaire à la direction du vent.
- Vérifier que le variateur est sur la position 0, puis le mettre en marche en maintenant quelques secondes l'interrupteur sur la position haute (il y a trois positions : position basse correspondant à l'arrêt, position haute pour l'enclenchement et position intermédiaire lorsque la soufflerie fonctionne).
- Se placer sur la position 0 du variateur et mesurer la vitesse de rotation avec le tachymètre.
- allumer une lampe, observer l'hélice et sa vitesse de rotation. Commentaires ?

Nous allons maintenant étudier le comportement de l'éolienne en fonction de la charge (nombre de lampes) mise sur le circuit.

#### Mesure de la vitesse moyenne

Mesurer la vitesse du vent moyenne sur la section de l'éolienne pour chacune des 7 positions du variateur (0 à 6). Pour cela prendre un quadrillage équidistant de 9 positions sur la section est y mesurer la vitesse à l'aide de l'anémomètre à hélice. En faire la moyenne. Etablir un tableau de correspondance position du variateur-vitesse du vent.

#### Mesure de la puissance récupérée $P_r$

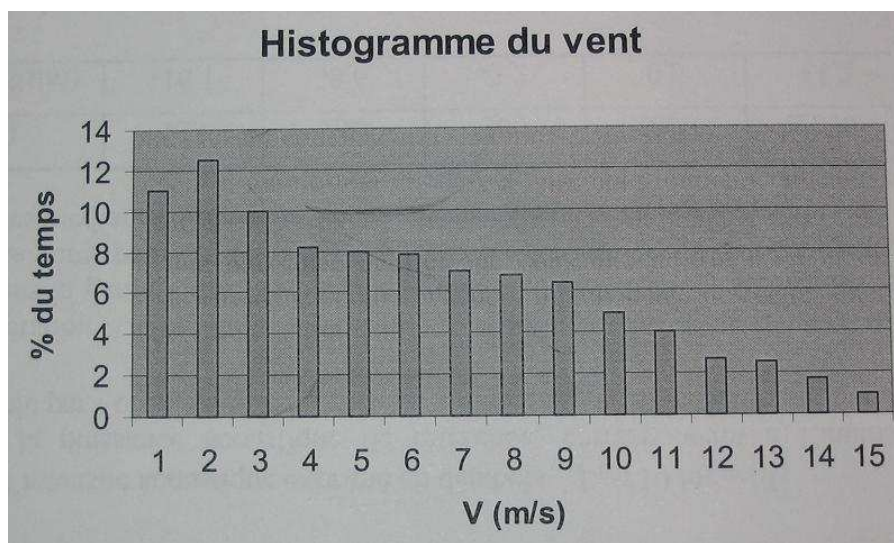
1. pour une lampe, mettre le variateur aux positions 0 à 7.
2. A chacune de ces vitesses attendre que l'équilibre se fait à l'aide du tachymètre..
3. Relever tension, intensité et vitesse de rotation en fonction des différentes vitesses de vent.
4. faire ces mesures ensuite pour 2 puis 3 lampes.
5. tracer sur le même graphique les trois courbes  $P_r = f(V)$ , ( $V$  la vitesse du vent).

#### Traitement des résultats

6. Sur ce graphique, choisir pour chaque vitesse le point (nombre de lampes) pour lequel l'éolienne donne la plus grande puissance. Tracer la courbe correspond à ces points.

cette courbe sera celle exploitée dans le reste de l'exercice.

7. Pour chaque mesure, calculer la puissance disponible  $P_d$  due au vent. Déterminer l'erreur sur les calculs.
8. en déduire le tracé de  $C_p = f(V)$ , avec  $C_p$  le coefficient de performance de l'éolienne et  $V$  la vitesse du vent.
9. Après avoir exprimé la puissance maximale selon Betz  $P_{max}$  en fonction de la vitesse de vent au niveau de l'éolienne, tracer sur un même graphique la courbe de Betz,  $P_r = f(V)$  et  $P_d = f(V)$ . La limite de Betz est-elle vérifiée? Proposer des explications au fait que l'on ne récupère qu'une partie de la puissance disponible.
10. Chacun sait que le vent n'est pas une source d'énergie constante et permanente. Selon le site où l'éolienne est implantée, elle permet de fournir plus ou moins d'énergie pour un temps donné. Ainsi vous est fourni l'histogramme des vents du site de Pierrelatte dans la vallée du Rhône :



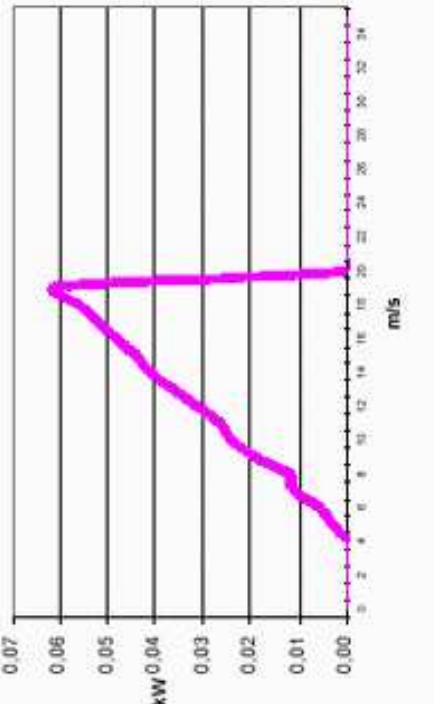
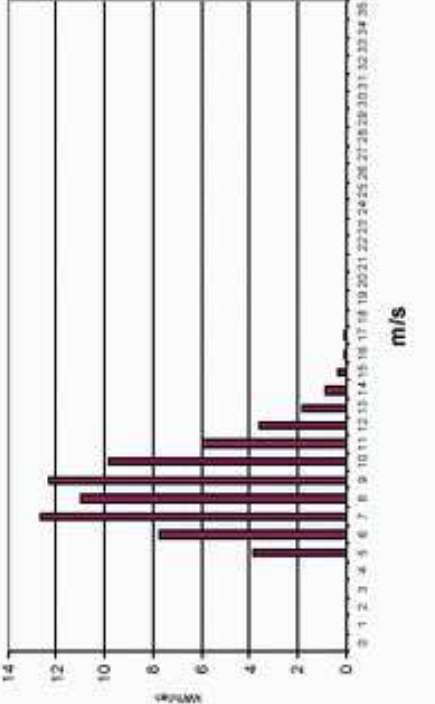
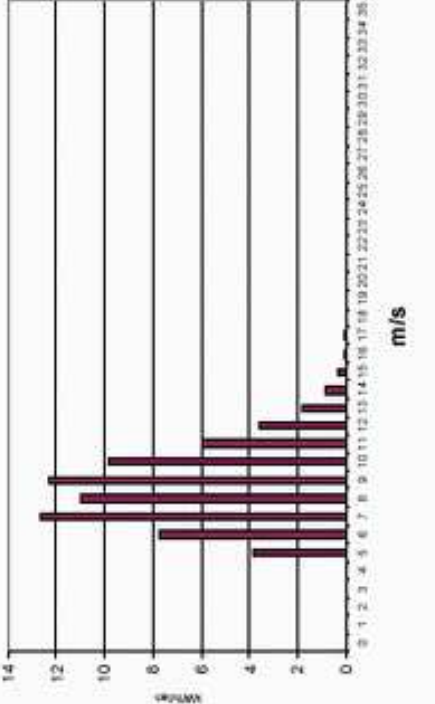
A partir de cet histogramme, calculer l'énergie que l'on pourrait récupérer en un an en plaçant l'éolienne étudiée sur le site considéré en vous aidant d'un tableau de la forme :

V (m/s)		
Puissance $P_r$ (W)		
% du Temps		
Temps/1 an (heures)		
Energie (kWh)		

### Conclusion

Conclure sur l'ensemble des travaux réalisés.

### 3.3 Annexe : Caractéristiques de l'éolienne RUTLAND 503

<b>Puissances en Watts</b> (nominale / maximale)	30 / 60	 <p style="text-align: center;"><b>Courbe de puissance de l'aérogénérateur</b></p>
<b>Vitesses de vent en m/s</b> (démarrage / nominale / de survie)	2.5 / 10 / 40	
<b>Vitesse de rotation en trs/min.</b> (nominale / maximale)	170 - 200	 <p style="text-align: center;"><b>Production de l'aérogénérateur à 6 m/s moyen au niveau du moyeu</b></p>
<b>Hélice</b> Nombre de pâles Diamètre (mètres) Matériau des pâles	6 0.5 plastique	
<b>Génératrice</b>	Synchrones, aimants permanents	 <p style="text-align: center;"><b>Production de l'aérogénérateur à 6 m/s moyen au niveau du moyeu</b></p>
<b>Type</b>	N.C. conversion en CC dans la nacelle	
<b>Tension de sortie</b>	N.C. conversion en CC dans la nacelle	
<b>Fréquence de sortie</b>	Aucune	
<b>Régulation</b>	Aucune	
<b>Protection tempête</b>	Aucune	
<b>Frein</b>	Aucune	
<b>Productible* à 6 m/s de vent</b> En kWh par an	70	
<b>Types de support disponibles*</b>	Pour pont bateau ou allonge 1 m pour tube galva 1"1/2.	