

Physique des éoliennes

H.Nifenecker

1 Puissance du vent

On considère une masse d'air animée d'une vitesse V . Un volume d'air de longueur L parallèle à la direction du vent et de surface S est caractérisé par une quantité de mouvement $SL\rho V$ et une énergie cinétique $\frac{1}{2}SL\rho V^2$, où ρ est la masse spécifique de l'air. Pour calculer la puissance passant par une surface S perpendiculaire à la direction du vent il suffit de poser $L=V$. Et donc la puissance du vent passant par la surface S s'écrit :

$$P_0 = \frac{1}{2}S\rho V^3$$

1.1 Puissance maximale récupérable, loi de Betz

On peut schématiser une éolienne comme un dispositif de surface S perpendiculaire à la direction du vent transformant une partie d'énergie du vent en mouvement perpendiculaire. La puissance enlevée au vent implique un ralentissement de l'air de la vitesse initiale V_1 à une vitesse finale V_2 . Remarquons que, pour assurer la conservation de la masse et dans la mesure où la masse spécifique de l'air varie peu, il est nécessaire que la colonne d'air se dilate latéralement en traversant l'éolienne. Par le passage à travers l'éolienne la colonne d'air perd donc une énergie $\frac{1}{2}\rho(V_1^2 - V_2^2)$. En supposant qu'au niveau du rotor de surface S la vitesse de la colonne est $\frac{V_1+V_2}{2}$ la puissance maximum rendue disponible pour l'éolienne vaut donc

$$P_{disp} = \frac{1}{4}\rho S(V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2) = \frac{1}{4}\rho S V_1^3 \left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right) \left(1 - \frac{V_2^2}{V_1^2}\right)$$

P_{disp} est maximum pour :

équation 1

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{3}$$

et vaut

équation 2

$$P_{max} = \frac{16}{27}P_0$$

Cette relation a été démontrée par Albert Betz dès 1919, d'où son nom. La valeur $\frac{16}{27} \approx 0.6$ est une limite maximum du rendement des éoliennes qui est, en général, loin d'être atteinte.

2 Physique des pales

2.1 Définition des forces agissant sur les pales

On suppose que le vent, dirigé selon la direction Ox est incident sur un obstacle. Ainsi qu'on peut le voir sur la Figure 1, les lignes de courant sont déformées pour contourner l'obstacle. En même temps une zone de surpression se crée au vent de l'obstacle, surpression qui

repousse les lignes de courant vers l'extérieur. Derrière l'obstacle, au contraire, une dépression est créée qui est responsable de la reconvergence des lignes. La différence de pression entre les faces au vent et sous le vent entraîne l'existence d'une force de pression qui s'exerce perpendiculairement à la surface de l'obstacle. Soit \vec{R} cette force.

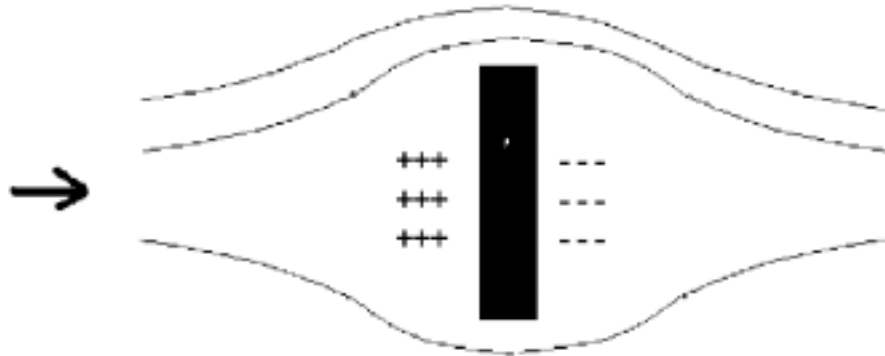


Figure 1

**Distribution des lignes de courant pour un obstacle perpendiculaire à la direction du vent.
Les zones de surpression et de dépression sont indiquées.**

La Figure 1 représente la situation où le vent arrive perpendiculairement à la surface de la pale de l'éolienne. Dans ce cas la pale ne peut se mettre en mouvement. La Figure 2 montre un cas où le vent arrive à un angle oblique par rapport à la surface. Une force s'exerce alors, dans ce cas, pour mettre en mouvement la pale vers le haut, dans le cas d'espèce.

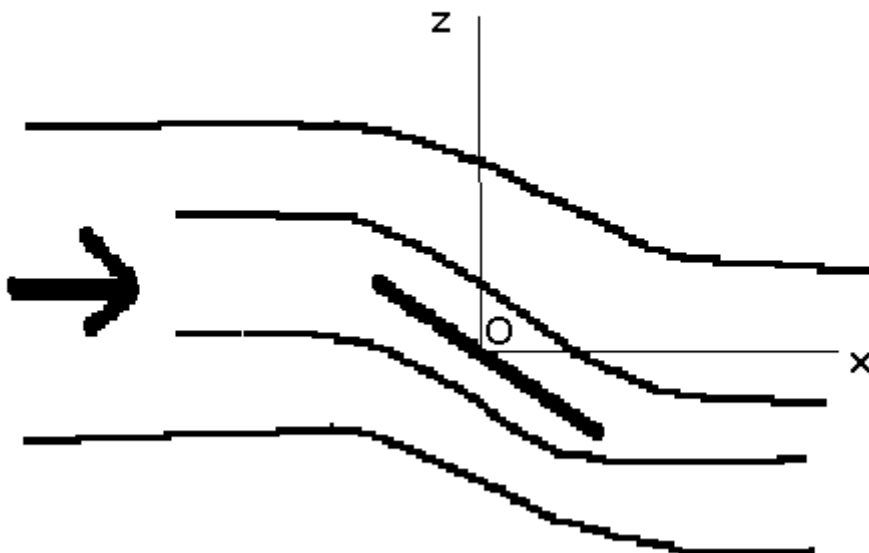
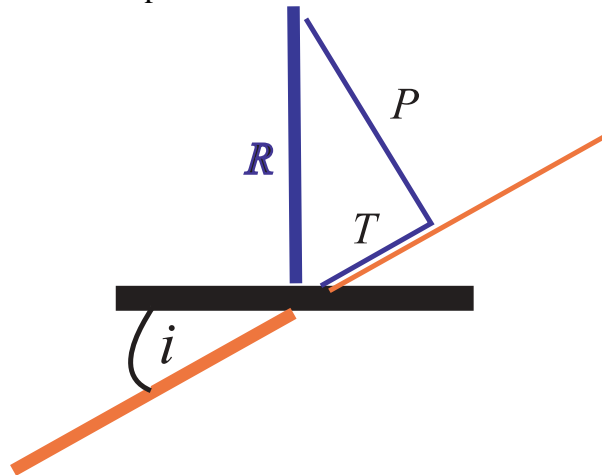


Figure 2

Distribution des lignes de courant pour un obstacle incliné par rapport à la direction du vent.

La Figure 3 définit les notations dans ce cas, en supposant, dans une première approche, que la vitesse du mouvement de la pale est faible devant celle du vent.



$$T = k_x S \sin^2(i) V^2$$

$$P = k_z S \sin(i) \cos(i) V^2$$

Figure 3

Définitions de la portance et de la traînée

La composante de \vec{R} le long de la direction du vent est appelée la traînée T et, dans le cas des éoliennes et pour les faibles vitesses, est inefficace, puisque l'on s'arrange toujours pour que les pales tournent dans un plan perpendiculaire à la direction du vent. La composante perpendiculaire à la direction du vent est la portance P .

Le module de la force de pression est proportionnel à la surface de la pale offerte au vent, $S \sin(i)$, où i est l'angle d'incidence du vent par rapport à la surface de la pale et S la surface de la pale. La force de pression est, également, proportionnelle au carré de la vitesse du vent V . On peut donc écrire

$$|R| = k S \sin(i) V^2$$

On mesure expérimentalement la traînée et la portance qu'on peut écrire :

équation 3

$$T = k_x \frac{\rho}{2} S (t_0 + \sin^2(i)) V^2$$

$$P = k_z \frac{\rho}{2} S \sin(i) \cos(i) V^2$$

Le terme t_0 dans la définition de T correspond au fait que la pale ayant une épaisseur finie un terme de traînée existe même pour une incidence rasante. On définit aussi les coefficients de portance et de traînée :

équation 4

$$C_x = k_x (t_0 + \sin^2(i))$$

$$C_z = k_z \sin(i) \cos(i)$$

En principe k_z et k_x varient lentement avec i . La **Figure 4** montre comment C_z varie en fonction de C_x pour des angles d'incidence compris entre -8 et 20 degrés, dans le cas où $k_z = k_x = 1$. Pour les incidences négatives la portance ramène la pale vers le bas. Pour l'incidence nulle la portance s'annule. Elle s'annule aussi pour l'incidence normale.

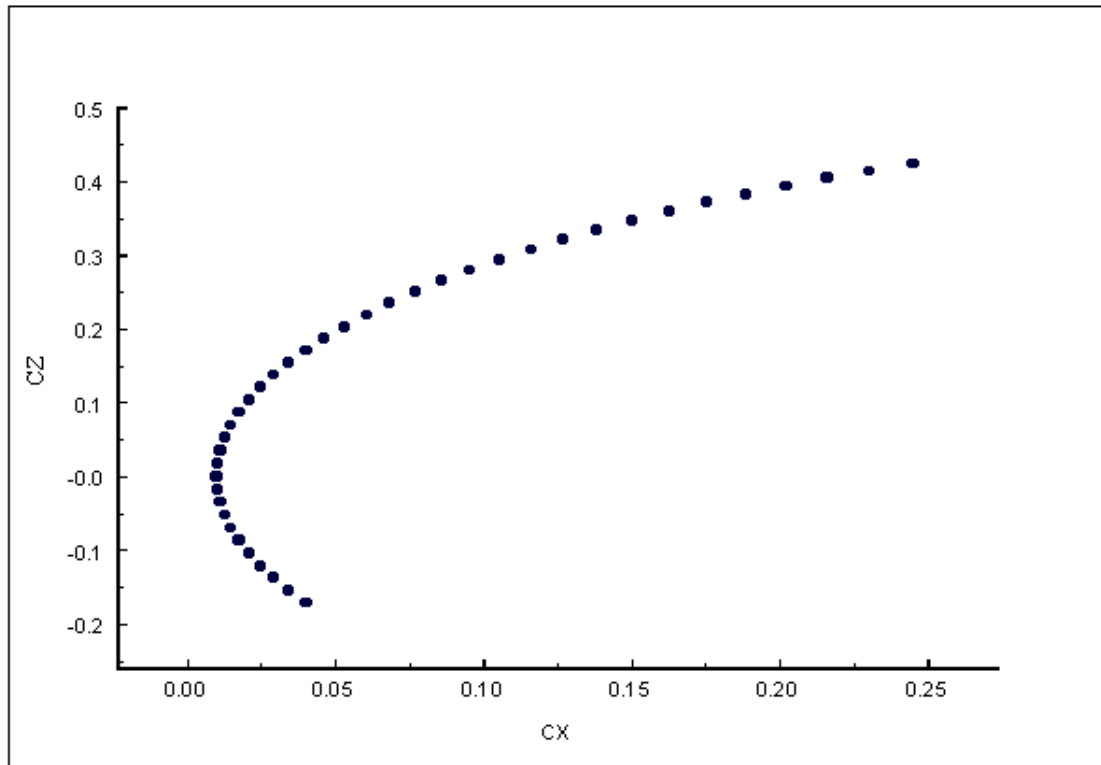


Figure 4
Variation de C_z en fonction de C_x

Le rapport de la portance à la traînée reflète le rendement de la pale. Un exemple de la variation de ce rapport avec l'angle d'incidence est montré sur la Figure 5. On y voit que le rendement passe par un maximum pour une angle d'incidence assez faible.

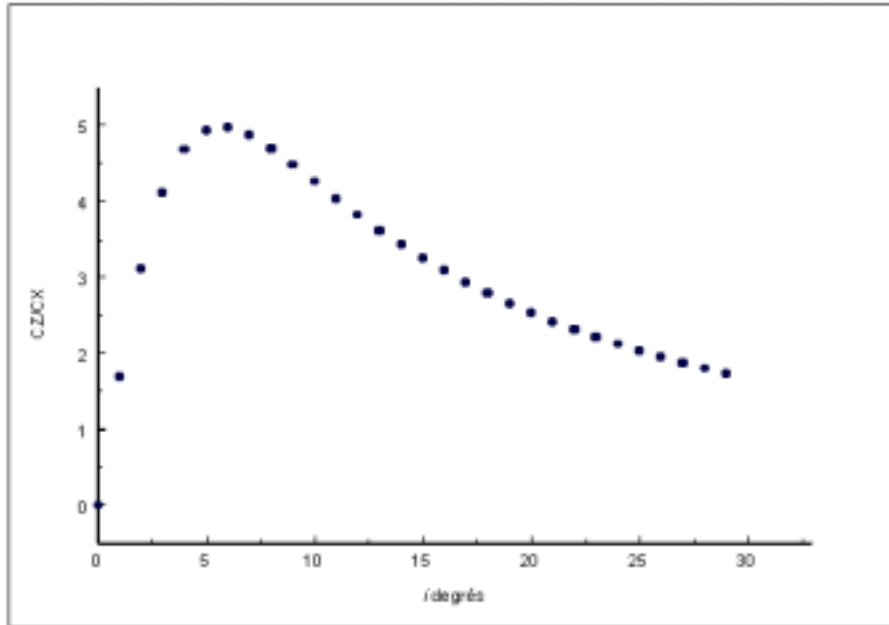


Figure 5

Evolution du rendement de la pale en fonction de l'angle d'incidence du vent

2.2 Cas de la pale en mouvement

Dans ce qui précède nous avons supposé que la vitesse de déplacement de la pale était négligeable devant celle du vent. En réalité la force de portance met en rotation la pale de l'éolienne et crée de ce fait un vent apparent en sens inverse. Ce vent s'ajoute au vent réel pour créer un vent relatif. Soit i l'angle d'incidence fait entre la surface et le vent relatif. Soit α l'angle fait entre le plan de la pale et le plan perpendiculaire à la direction du vent réel (angle décalage). la vitesse relative \vec{V}_{Rel} s'exprime comme la somme du vent apparent \vec{V}_{app} et du vent réel (physique) \vec{V}_{phy} .

$$\vec{V}_{Rel} = \vec{V}_{app} + \vec{V}_{phy}$$

La vitesse apparente dépend à la fois de la vitesse angulaire ω de rotation de la pale et de la distance r à l'axe de rotation. En module on a :

équation 5

$$|V_{app}| = 2\pi\omega r$$

La Figure 6 définit les angles et forces mises en jeu dans ce cas. La pale fait un angle α avec son plan de rotation. Le vent relatif fait l'angle d'incidence i avec la pale. L'angle i est donné par :

$$\arctan(i + \alpha) = \frac{|V_{réel}|}{|V_{app}|}$$

avec la limite pour $|V_{app}| = 0$, $i + \alpha = \frac{\pi}{2}$.

On voit, d'après l'équation 5, que $|V_{app}|$ et donc $i+\alpha$, dépendent de la distance à l'axe de rotation. Les considérations qui suivent s'appliquent donc à une portion de pale suffisamment petite pour qu'on puisse négliger cette variation.

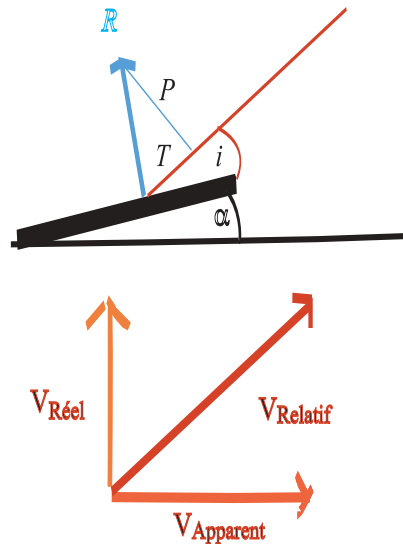


Figure 6

Définition des angles et forces dans le cas d'une pale en mouvement

Les mesures expérimentales fournissent P et T en référence à la direction du vent relatif et de la surface de la pale, comme indiqué par l'équation 3 et l'équation 4. Mais, dans le cas de l'éolienne la force orientée perpendiculairement au plan de rotation F_x ne joue pas de rôle et est analogue à la force de traînée définie dans le cas statique. Au contraire la force F_z est responsable de la rotation et fournit la puissance. Utilisant l'équation 3, on obtient l'expression de F_z .

équation 6

$$F_z = SV_{rel}^2 (k_z \sin i \cos i \sin(i + \alpha) - k_x (t_0 + \sin^2 i) \cos(i + \alpha))$$

Compte tenu de l'expression de F_z on peut essayer de répondre aux questions suivantes :

1. La pale atteint-elle une vitesse de rotation stable, et pour quelle vitesse et, donc, quel angle d'incidence.
2. Y a-t-il une valeur optimale de l'angle α ?

Pour répondre à ces questions nous nous mettrons dans l'hypothèse simplificatrice $k_z = k_x$.

Poser $\beta = i + \alpha$ permet de remplacer la variable i par une expression des vitesses physique $V = V_{Réel}$ et apparente $U = V_{Apparent}$, par exemple :

$$\sin \beta = \frac{V}{\sqrt{U^2 + V^2}}$$

On obtient alors l'expression de F_z :

équation 7

$$F_z = Sk_z V^2 \frac{\sqrt{V^2 + U^2}}{V} \left[\sin \alpha \left(\cos \alpha - \frac{U}{V} \sin \alpha \right) - t_0 \frac{U}{V} \right]$$

2.3 Condition d'équilibre

A partir du repos la vitesse de la pale augmente sous l'effet de la force F_z jusqu'au moment où elle devient égale aux forces de friction. Il faut donc exprimer cette force de friction. En tournant, la pale rencontre la résistance de l'air située sous le vent de la pale¹. La force de friction peut s'exprimer en s'inspirant de l'équation 3 en remplaçant le vent physique par le vent relatif et l'angle α par son complément $\frac{\pi}{2} - \alpha$:

équation 8

$$F_{friction} = Sk_z \frac{\rho}{2} U^2 \sin^2 \alpha$$

La condition $F_z = F_{friction}$ est obtenue lorsque la relation suivante entre α et U est satisfaite :

équation 9

$$\left[\cos \alpha \sin \alpha - \frac{U}{V} (\sin^2 \alpha + t_0) \right] \sqrt{1 + \frac{U^2}{V^2}} - \frac{U^2}{V^2} \sin^2 \alpha = 0$$

Si $\frac{U}{V} \gg 1$ on obtient la solution simple:

équation 10

$$\frac{U}{V} = \frac{\cos \alpha \sin \alpha}{2 \sin^2 \alpha + t_0}$$

2.4 Rendement optimal de pale

La puissance dissipée par la force de friction pour la valeur optimum de U vaut :

équation 11

$$UF_{friction} = k_z S V^3 \frac{\cos^3 \alpha \sin^5 \alpha}{(2 \sin^2 \alpha + t_0)^3}$$

La puissance du vent disponible est $k_z S V^3$ de telle sorte que le rendement maximum de la pale vaut

¹ Ce point est un peu délicat. Pour mieux se représenter l'origine de la force de friction il est commode de considérer que le mouvement de l'éolienne est créé par un moteur agissant sur son axe et lui communiquant sa rotation. L'air au repos est à l'origine de la résistance s'opposant alors au mouvement. Dans le référentiel attaché à une pale tout se passe comme si elle était soumise à un vent de vitesse égale en valeur et de sens opposé au vent apparent. Ce vent est situé dans le plan perpendiculaire à la direction du vent physique et exerce son action sur la face de la pale sous le vent physique.

équation 12

$$R = \frac{\cos^3 \alpha \sin^5 \alpha}{(2 \sin^2 \alpha + t_0)^3}$$

La Figure 7 est un exemple de la variation du rendement maximum en fonction de l'angle de calage α , pour une valeur $t_0 = 0.01$.

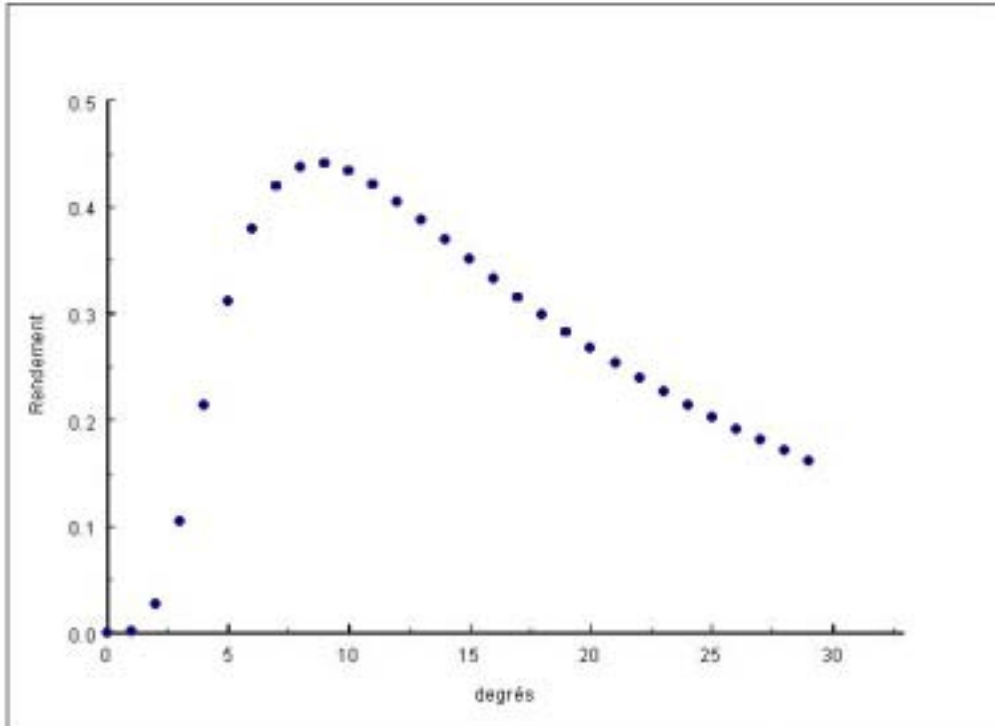


Figure 7

Variation du rendement d'une pale en fonction de l'angle de la pale par rapport au plan de rotation

2.5 Forme optimale des pales.

Comme la vitesse relative U est proportionnelle à la distance à l'axe de rotation (cf. équation 5) la condition d'assortiment de la vitesse radiale à l'angle de la pale donnée par l'équation 10 exige que l'angle α dépende de la distance à la pale. En effet la condition $F_z = F_{friction}$ doit être remplie sur l'ensemble de la pale. Si elle ne l'est que globalement et non localement, on aura $F_z < F_{friction}$ en bout de pale, et, au contraire $F_z > F_{friction}$ dans la région proche de l'axe puisque $F_{friction}$ croît avec la distance à l'axe. Il s'ensuit qu'on peut alors optimiser le rendement de la pale en augmentant $F_{friction}$ dans la région proche de l'axe. Les profils complexes des pales d'éoliennes modernes ont précisément pour but de remplir la condition donnée par l'équation 10 autant que faire se peut.

3 L'éolienne

3.1 De la pale à l'éolienne

Alors que dans la section 1 on discutait de la puissance des éoliennes en terme de surface balayée par les pales, dans la section 2 la discussion se concentrait sur la physique de la pale individuelle, et même, le plus souvent, d'une section étroite de pale. Comment des expressions faisant expressément et uniquement intervenir des caractéristiques des pales peuvent elles conduire à une physique où celles-ci disparaissent, sauf sous une forme globale de surface balayée et de rendement ? Ce passage reflète la persistance des perturbations de l'air consécutives au passage de la pale. L'étude de la dynamique de la transition entre la physique de la pale et celle de la surface balayée fait appel à la mécanique des fluides compressibles et excède l'objet du présent chapitre. Il est toutefois possible de déterminer simplement les conditions conduisant à cette transition.

En effet le mouvement de la pale crée un sillage qui peut interférer avec les passages suivants. Pour examiner qualitativement les effets du sillage nous suivrons l'approche de Landau et Lifchitz². La vitesse relative de l'air vis à vis de la pale est supposée égale à l'opposé de la vitesse de rotation. La résistance de l'air se traduit par un ralentissement de ce mouvement sous le vent³ de la pale. Dans ce paragraphe nous supposons que la vitesse relative de l'air est $U(r)$ (nous changeons la convention de signe par souci de simplicité). Derrière la pale on peut écrire que la vitesse relative est $\vec{V} = \vec{U} + \vec{u}$ où nous omettons aussi la dépendance en r . Dans le cas simple d'un sillage laminaire et lorsque la perturbation \vec{u} est faible, l'équation de Navier et Stokes se simplifie sous la forme :

équation 13

$$U \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} = -\nabla \frac{p}{\rho} + \vec{u} \left(\frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial^2 y} \right)$$

Pour la composante de \vec{u} dans la direction de la force de traînée on peut négliger le terme dépendant de la pression dans l'équation 13 soit :

équation 14

$$U \frac{\partial \vec{u}_x}{\partial x} = \vec{u} \left(\frac{\partial^2 \vec{u}_x}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 \vec{u}_x}{\partial^2 y} \right)$$

On trouve alors la solution pour \vec{u}_x :

équation 15

$$\vec{u}_x = -\frac{\Phi_x}{4\pi\rho\nu} \frac{1}{x} e^{-\frac{U}{4\nu} \frac{y^2+z^2}{x}}$$

Φ_x est une force de traînée du type donné par l'équation 8. ν est le coefficient de viscosité cinématique, qui, dans le cas de l'air vaut $0,15 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Le long de la portance la composante de la vitesse dans la région du sillage est dominée par un terme similaire :

² L.Landau et E.Lifchitz, « Mécanique des fluides » ed.MIR (1971)

³ Noter qu'ici le vent considéré n'est plus le vent physique mais le vent de résistance de l'air. Le côté sous le vent de l'un est le côté au vent de l'autre

équation 16

$$\vec{u}_z = -\frac{\Phi_z}{4\pi\rho\nu} \frac{1}{x} e^{-\frac{U}{4\nu} \frac{y^2+z^2}{x}}$$

La composante \vec{u}_z de la vitesse s'oppose à la composante du vent incident défléchie par la pale et crée une zone de surpression le long du sillage de la pale. Cette zone de surpression est à l'origine de l'entretien du mouvement de la pale. Si donc le sillage a une longueur supérieure à la circonférence décrite par la pale, on conçoit qu'une approche globale du mouvement de cette dernière sera validée. Soit $l(r)$ la longueur du profil de la pale à la distance r de l'axe. La longueur de pale vue par le vent relatif vaut $l(r)\sin\alpha$. La largeur du sillage L_s à une distance x de la pale le long de la circonférence vaut donc approximativement :

équation 17

$$L_s^2 = l^2(r)\sin^2\alpha + \frac{2\nu x}{U}$$

Lorsque le deuxième terme du second membre de l'équation 17 est inférieur ou égal au premier on peut considérer que le sillage est encore bien établi. Une condition suffisante pour que la distribution de pression le long de la circonférence puisse être considérée comme stationnaire est donc que :

$$l^2(r)\sin^2\alpha = \frac{4\nu\pi r}{U}$$

Soit en remplaçant $U = 2\pi\omega r$ par sa valeur, on obtient une valeur de ω au dessus de laquelle on peut considérer que l'approche globale du mouvement de la pale est valable :

équation 18

$$\omega_{\text{lim}} = \frac{2\nu}{l^2(r)\sin^2\alpha}$$

D'après la Figure 7 une valeur typique de α est de l'ordre de 0,1 radian. On suppose une largeur de pale $l(r)=1m$. En remplaçant la viscosité cinématique par sa valeur on obtient donc une estimation de la vitesse limite $\omega > 0,3 \cdot 10^{-2}$ tour/s, soit environ 1 tour/minute, une faible valeur donc. Dans tous les cas de fonctionnement réels on voit donc que la condition pour qu'une approche de la physique de l'éolienne en terme de surface brassée soit valable est bien remplie.

3.2 Choix des caractéristiques d'une éolienne

Nous nous concentrons ici sur les éoliennes de forte puissance utilisées pour la production d'électricité. Ces éoliennes sont calculées pour une puissance maximale déterminée par des effets de turbulence aux extrémités des pales. Cette puissance maximale est égale à une fraction de la limite de Betz :

équation 19

$$P_m = 0,29\varepsilon D^2 V_{nom}^3$$

où P_m est la puissance nominale (Watts) de l'éolienne, V_{nom} est la vitesse (m/s) de référence du vent correspondant à la puissance nominale pour le rendement maximum de l'éolienne, ε est le rendement de l'éolienne et D (m) le diamètre du rotor. La vitesse de référence du vent correspond au meilleur rendement ainsi qu'à la limite acceptable de la vitesse de rotation. En utilisant l'équation 10 on a

équation 20

$$P_m = 0,29\rho D^2 U_{lim}^3 \left(\frac{2 \sin^2 \alpha_{opt} + t_0}{\cos \alpha_{opt} \sin \alpha_{opt}} \right)^3$$

α_{opt} est la valeur de l'angle de calage α maximisant le rendement de l'éolienne, comme on peut la déterminer, par exemple, sur la Figure 7. U_{lim} est la vitesse tangentielle limite acceptable. On voit donc que la donnée de U_{lim} et de P_m conduit à celle du diamètre de pale

D . La vitesse limite $U_{lim} = \frac{\omega_{lim} D}{2}$, (ω en tours/s) ce qui permet d'écrire

$$P_m = 0,075\rho D^5 \omega_{lim}^3 \left(\frac{2 \sin^2 \alpha_{opt} + t_0}{\cos \alpha_{opt} \sin \alpha_{opt}} \right)^3$$

Le Tableau 1 montre quelques données pour des éoliennes de diamètre variable entre 1 et 100 mètres. Dans tous les cas la vitesse en extrémité de pale est limitée à environ 100 m/s (360 km/h), vitesse au delà de laquelle se produisent d'importantes instabilités des courants d'air. A cette vitesse limite correspond une vitesse nominale du vent de 18,5 m/s (66 km/h). Le rendement par rapport à la limite de Betz est supposé égal à 0.25, caractéristique des grandes éoliennes.

D	Ω t/s	P_m kW
1	33,33	0,4
2	16,67	1,6
5	6,67	10,1
10	3,33	40,3
20	1,67	161,2
50	0,67	1007,2
100	0,33	4028,9

Tableau 1

Vitesses de rotation et puissance nominale d'éoliennes de différents diamètres

Au delà de la vitesse nominale du vent il est nécessaire de ralentir l'éolienne de manière à maintenir constante la vitesse d'extrémité de pale. Ceci se fait en faisant varier l'angle de calage de l'éolienne, soit en l'augmentant, soit en le diminuant par rapport à sa valeur optimale. Lorsque la vitesse du vent devient trop grande et qu'il y a des risques de détérioration de l'éolienne on amène l'angle de calage soit à 90 degrés, c'est la mise en drapeau, soit, au contraire, à 0 degrés, c'est le décrochage dynamique. La première solution est plus sûre mais moins précise en ce qui concerne le maintien de la vitesse de rotation à la

valeur nominale avant la mise en drapeau ; pour des vents supérieurs à 130 km/h il est nécessaire de freiner le rotor. La deuxième solution, plus précise, entraîne de grands efforts sur la structure en cas de tempête. Les détails techniques permettant de contrôler l'orientation des pales peuvent se trouver dans l'ouvrage de G.Cunty⁴.

En pratique, donc, l'éolienne ne fonctionne à sa puissance nominale que pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale, comprise entre 15 et 20 m/s et inférieures à la vitesse de mise en drapeau comprise entre 25 et 30 m/s. La Figure 8 montre un exemple type du diagramme de la puissance délivrée en fonction de la vitesse du vent.

⁴ Guy Cunty, "Eoliennes et Aérogénérateurs", Edisud 2001

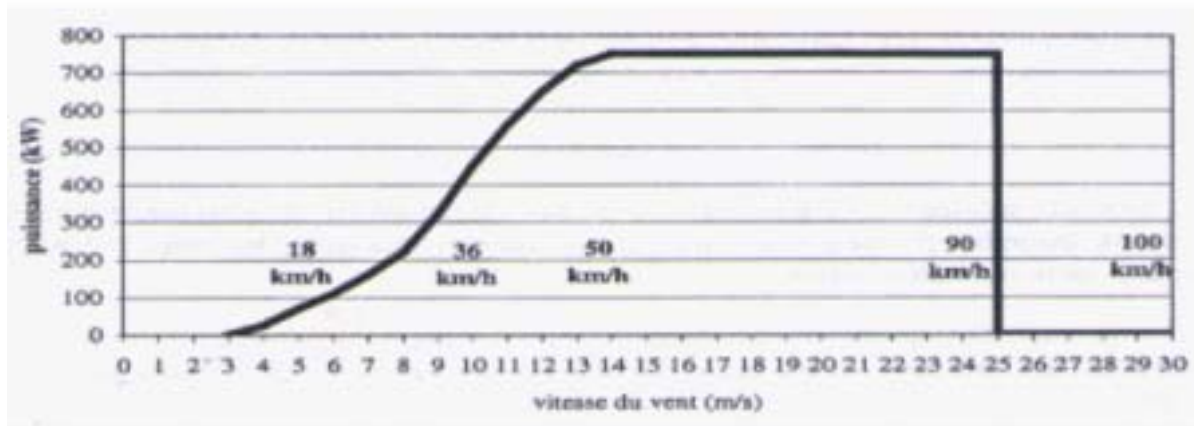


Figure 8

Exemple d'évolution de la puissance fournie par une éolienne en fonction de la vitesse du vent

3.3 Puissances instantanée, nominale et moyenne

La Figure 8 laisse augurer du fait qu'il existe une grande différence entre la puissance nominale (maximum) délivrée par une éolienne et la puissance moyenne qu'elle est susceptible de fournir. Pour que puissance instantanée et puissance nominale soit égales, il faut, en effet, que la vitesse du vent soit comprise dans une fenêtre assez étroite. Etant donné une éolienne de puissance nominale donnée on s'attend donc à ce que la puissance moyenne délivrée dépende de la distribution des vitesses du vent mesurées sur l'année. A titre d'exemple nous considérons une distribution des vitesses linéaire caractérisée par une vitesse maximum v_m :

équation 21

$$p(v) = 2 \frac{v_m - v}{v_m^2}$$

La valeur moyenne de la vitesse vaut donc $\frac{v_m}{3}$. La Figure 9 montre comment varie le rendement moyen de l'éolienne défini comme le rapport de la puissance moyenne à la puissance nominale en fonction de la vitesse maximum du vent. Dans la pratique et compte tenu des distributions réelles des vitesses de vent, il est rare que la puissance moyenne excède le tiers de la puissance nominale. Il est donc très important lorsqu'on discute d'un parc d'éolienne de ne pas se contenter de citer sa puissance nominale mais aussi la puissance moyenne annuelle. C'est ainsi que pour fournir autant d'énergie qu'une centrale nucléaire de 1000 MW électriques, il faut un parc de 3000 à 4000 MW d'éoliennes. Nous verrons plus loin qu'il est également important de tenir compte de la disponibilité de la puissance. Enfin la Figure 9 montre à quel point les sites géographiques peu venteux sont pénalisants.

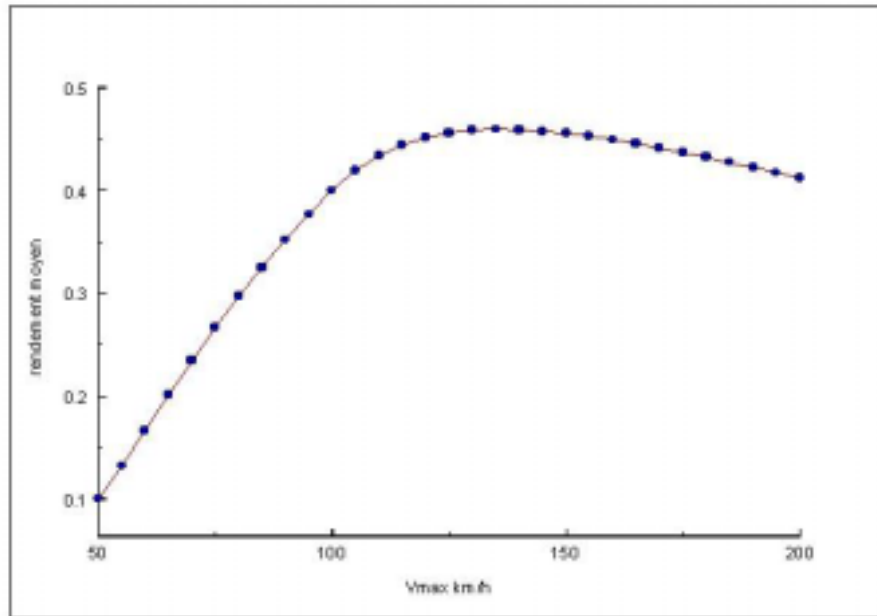


Figure 9

Variation du rendement de l'éolienne moyenné sur l'année en fonction de la valeur maximum atteinte par la vitesse du vent

3.4 De la puissance du vent à la puissance électrique

Pour les petites puissances on associe souvent une dynamo au rotor, ce qui fournit du courant continu idéal pour charger des batteries. C'est la configuration type des installations décentralisées. Elles présentent de l'intérêt en l'absence de réseau.

Pour les puissance plus importantes on couple plutôt le rotor à un alternateur. Alors que les fréquences de rotation des rotors ne dépassent pas le tour par seconde, la fréquence du courant électrique est, en général de 50 Hertz. Même en utilisant des structures d'alternateur multipolaires, il est nécessaire d'intercaler un multiplicateur de fréquence entre le rotor et l'alternateur. Si l'on désire envoyer le courant sur le réseau la précision de l'accord entre la fréquence du réseau et celle de l'alternateur n'est pas suffisante pour qu'on puisse accepter une injection directe du courant fourni par l'alternateur sur le réseau. Pour ce faire on doit utiliser la combinaison d'un redresseur et d'un onduleur.

Les éoliennes de forte puissance font appel à des générateur asynchrones. De ce fait il peut être utile de rappeler les principes de fonctionnement des génératrices asynchrones.

3.4.1 Les génératrices asynchrones

Dans une génératrice asynchrone typique le stator est constitué d'un certain nombre d'électroaimants alimentés par le secteur de fréquence angulaire ω . La configuration bipolaire triphasée comporte trois électroaimants alimentés chacun par une phase différente. On dit que la configuration est bipolaire alors qu'il y a trois électroaimants car lorsque l'un des aimants est à la tension maximum, les deux autres sont à une tension moitié mais de signe opposé et se comportent comme un seul pôle de signe opposé. Le champ magnétique créé par cette configuration est donc de type bipolaire. De plus il est tournant avec une fréquence angulaire égale à celle du courant triphasé. Une configuration quadripolaire comporte 6 aimants et une configuration hexapolaire 9. Si $2p$ est le nombre de pôles la fréquence de rotation du champ

tournant est $\frac{\omega}{p}$. Les éoliennes de puissance utilisent des configurations quadri ou

hexapolaires, ce qui permet à la génératrice de tourner à 1500 ou 1000 tours/minutes tout en fournissant du courant à 50 Hertz.

Le rotor est une structure dans laquelle le champ tournant crée des courants d'induction. A leur tour ces courants créent un champ magnétique induit. Dans les génératrices utilisées dans les éoliennes de puissance le rotor est de type « cage d'écureuil ». Il s'agit d'un ensemble de barres conductrices parallèles à l'axe de la génératrice reliées à leur extrémité par des cercles conducteurs. La Figure 10 représente schématiquement une génératrice asynchrone bipolaire.

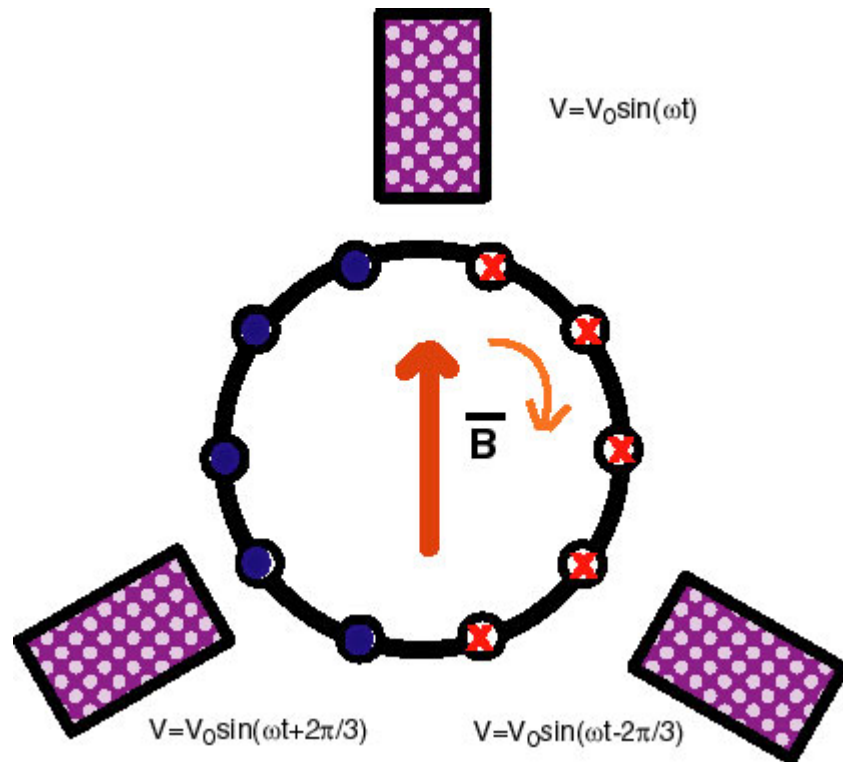


Figure 10

Représentation schématique d'une génératrice asynchrone bipolaire triphasée. Les rectangles représentent les électroaimants du stator. Le cercle central et les petite cercles sur sa périphérie représentent la cage d'écureuil. Le courant d'induction va dans un sens à droite du champ et en sens inverse à gauche. Le champ magnétique est représenté pour $t=0$.

On montre que la vitesse de rotation du champ induit est la même que celle du champ tournant. Les deux champs font donc un angle constant α entre eux. On démontre aussi qu'un couple est alors créé tendant à aligner les champs d'une amplitude proportionnelle à $\sin \alpha$. Contrairement au champ induit, le rotor d'une génératrice asynchrone ne tourne pas exactement à la même fréquence que le champ tournant. Soit Ω le vitesse de rotation de la cage d'écureuil. Si $\Omega > \frac{\omega}{p}$ il se crée un couple tendant à ralentir le rotor au bénéfice d'une

augmentation de la puissance électrique circulant dans les électroaimants. On a, effectivement, un fonctionnement en génératrice, ou, plus exactement en amplificateur de

puissance. Dans le cas où $\Omega < \frac{\omega}{p}$ le fonctionnement est celui d'un moteur, la puissance électrique se transformant en énergie de rotation du rotor.

4 Les parcs d'éoliennes

L'implantation d'un champ d'éoliennes nécessite de répondre au moins à deux questions :

1. Comment doivent être disposées les éoliennes dans le parc ?
2. Où implanter le parc ?

4.1 Disposition des éoliennes d'un parc

La réponse à la première question est générique, en ce qu'elle ne dépend que de la physique de l'éolienne décrite dans les sections précédentes. En particulier l'équation 1 montre qu'en sortie d'éolienne la vitesse du vent est divisée par trois, ce qui implique (conservation du flux) que la surface du courant d'air est multipliée par trois. On peut alors estimer l'espacement nécessaire entre les éoliennes pour que la puissance du vent ne soit pas trop diminuée. A titre d'exemple cherchons la condition pour que la vitesse moyenne du vent derrière la première rangée d'éoliennes du parc soit égale à 95% de la vitesse du vent incident. Soit r le rayon de l'éolienne et $2R$ la distance entre deux éoliennes. La vitesse du vent incident est V et celle derrière l'éolienne est $\frac{V}{3}$. La vitesse moyenne derrière la rangée d'éoliennes vaut donc

$$\frac{V}{3} \left(\frac{r}{R} \right)^2 + V \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) = 0,95V \text{ ce qui donne la valeur } \frac{r}{R} = 3,65. \text{ Dans la pratique}^5, \text{ les}$$

distances entre éoliennes situées dans un plan perpendiculaire au vent dominant sont de l'ordre de 3 à 5 diamètres d'éolienne. Les distances entre plans sont plutôt de l'ordre de 3 à 9 diamètres.

4.2 Localisation du parc

L'optimisation de l'implantation du parc conduit à prendre en compte la puissance moyenne du vent mais, aussi la rugosité h_0 du site. Cette dernière est définie comme l'altitude en dessous de laquelle la vitesse du vent s'annule. De façon plus pratique on peut paramétrer la variation de la vitesse du vent en fonction de l'altitude par : $\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^\gamma$. Les faibles valeurs

de γ correspondent à de faibles valeurs de la rugosité ainsi qu'à une stabilisation de la vitesse du vent à faible altitude, ce qui favorise un bon fonctionnement des éoliennes. Au contraire pour les fortes valeurs de γ la vitesse du vent est notablement plus faible pour les pales en position basse qu'en position haute, ce qui conduit à un déséquilibre gênant et à une efficacité réduite. La rugosité et l'exposant peuvent être reliés par une formule telle que :

équation 22

$$\gamma = 0,096 \log h_0 + 0,016 (\log h_0)^2 + 0,24$$

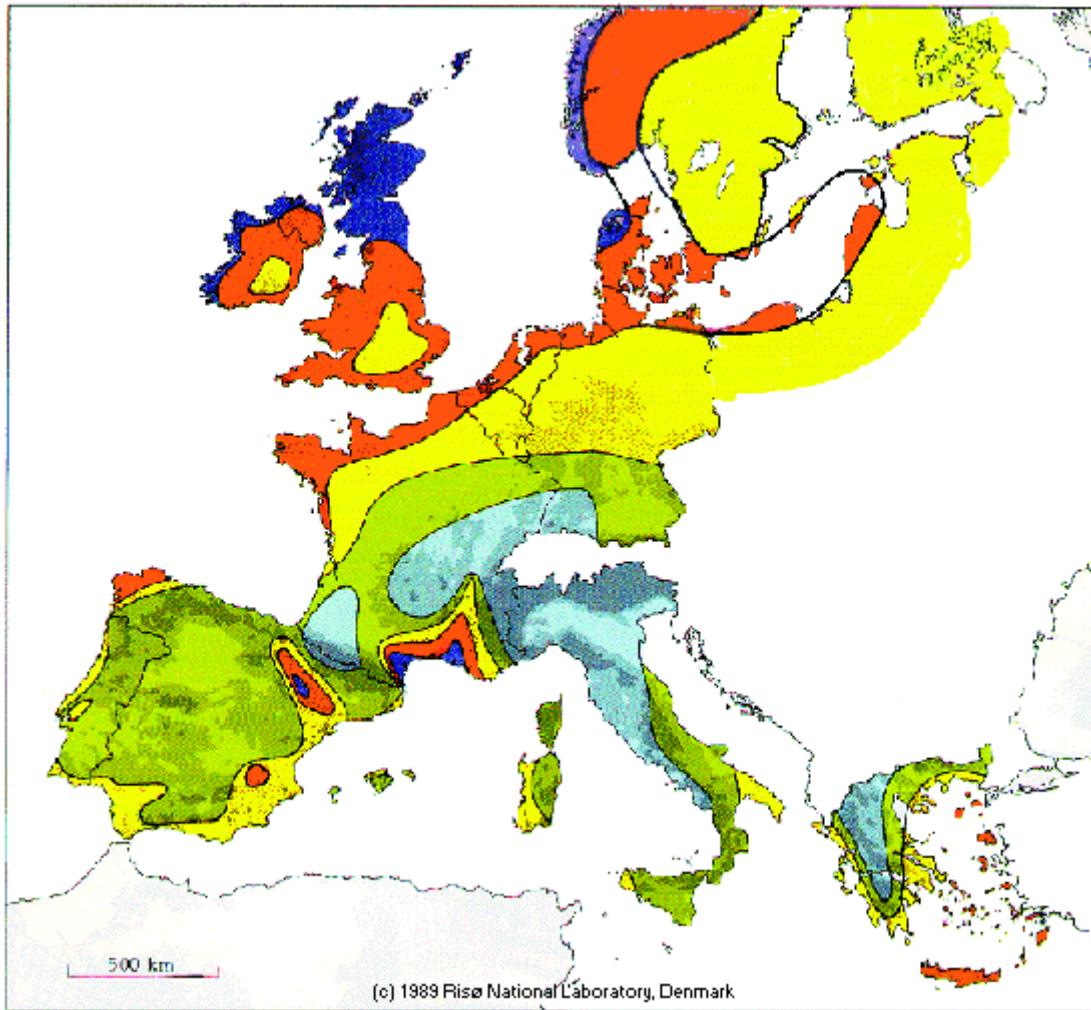
⁵ Voir l'excellent site www.windpower.org qui explique de façon très pédagogiques de nombreux aspects des éoliennes. Ce site émane d'ingénieurs danois.

Nature du terrain	h_0 rugosité (cm)	exposant γ
Plat (mer, herbes courtes...)	0 à 20	0,08 à 0,12
Peu accidenté(champs...)	20 à 200	0,13 à 0,16
Accidentés(bois....)	1000 à 1500	0,20 à 0,23
Très accidentés(villes...)	1000 à 4000	0,25 à 0,4

Tableau 2

Caractérisation de différents terrains par leur rugosité h_0 et l'exposant γ Selon la référence 4

On voit qu'il y aura lieu de rechercher des implantations dans des endroits où le vent peut se déplacer avec le moins d'obstacles possibles. Il faut aussi rechercher des sites le plus venté possible. La Figure 11 est une carte des vents observés en Europe Occidentale. Les zones les plus favorables se trouvent dans le Nord des îles britanniques et l'Ouest de la Scandinavie. La France est assez bien dotée avec les côtes de la Manche, celles de Bretagne et, surtout, du couloir Rhodanien. On voit sur le Figure à quel point la nature du terrain est importante pour le choix d'un site, les plus favorables se situant sur le hauteurs face à la mer.



	Sheltered terrain		Open plain		At a sea coast		Open sea		Hills and ridges	
	$m s^{-1}$	$W m^{-2}$	$m s^{-1}$	$W m^{-2}$	$m s^{-1}$	$W m^{-2}$	$m s^{-1}$	$W m^{-2}$	$m s^{-1}$	$W m^{-2}$
	> 6.0	> 250	> 7.5	> 500	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 11.5	> 1800
	5.0 - 6.0	150 - 250	6.5 - 7.5	300 - 500	7.0 - 8.5	400 - 700	8.0 - 9.0	600 - 800	10.0 - 11.5	1200 - 1800
	4.5 - 5.0	100 - 150	5.5 - 6.5	200 - 300	6.0 - 7.0	250 - 400	7.0 - 8.0	400 - 600	8.5 - 10.0	700 - 1200
	3.5 - 4.5	50 - 100	4.5 - 5.5	100 - 200	5.0 - 6.0	150 - 250	5.5 - 7.0	200 - 400	7.0 - 8.5	400 - 700
	< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 7.0	< 400

Figure 11

Carte des Vents dans l'Europe de l'Ouest. Cette carte a été établie par le laboratoire danois de Risø⁶. Le tableau situé sous la figure explique les conventions de couleur. Dans la même zone la vitesse du vent est d'autant plus grande que la rugosité est faible

⁶ *European Wind Atlas* - (c) 1989 Risø National Laboratory, Denmark

5 La gestion des parc d'éoliennes

La puissance moyenne du vent disponible sur les sites n'est pas la seule, ni même la principale caractéristique à prendre en compte dans la gestion d'un ensemble de parcs d'éoliennes. L'énergie éolienne est, en effet fortement variable dans le temps, d'une façon assez peu prévisible. L'électricien doit donc pouvoir faire face à des variations importantes de la puissance fournie par le parc d'éoliennes qu'il exploite ou dont il achète la production. Un exemple de la variabilité du vent sur un parc d'éoliennes anglais est montré sur la Figure 12. La Figure montre que les fluctuations du vent sur une courte période (un mois ici) peuvent être à la fois très fortes et chaotiques. Pour les fluctuations de très courtes durées on peut envisager que les parcs localisés en différentes régions puissent ne pas être en phase, et donc que leurs variations se compensent les unes les autres. Par contre, les périodes de faible vent s'étendant sur quelques jours sont, en général, le reflet de passages de zones de hautes pressions qui affectent de vastes zones géographiques. Il faut donc disposer de sources de puissance électrique susceptibles de se substituer aux éoliennes défaillantes. L'investissement nécessaire pour que ces sources soient disponibles doit donc avoir été fait. Il s'ensuit que

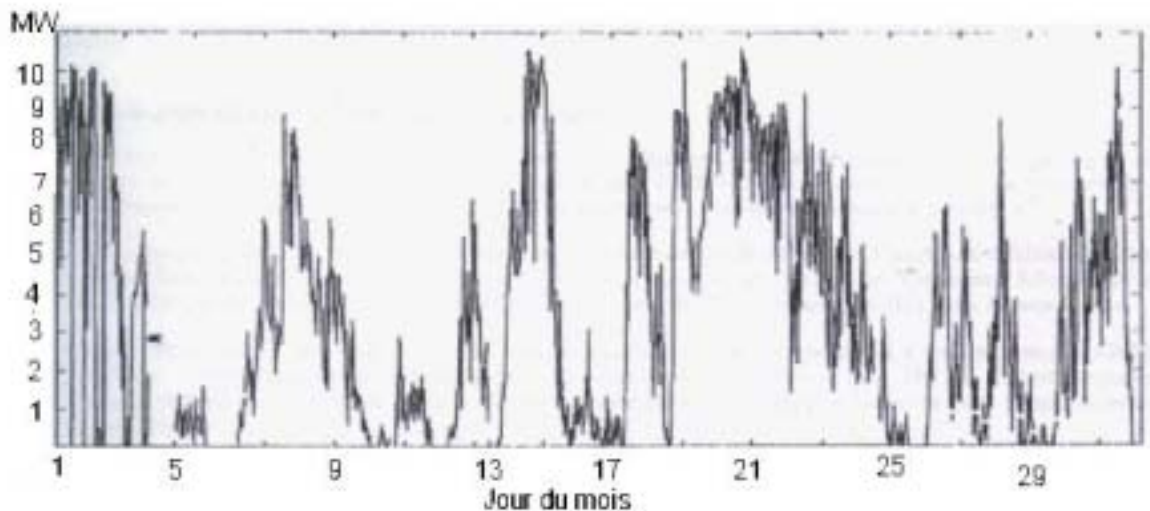


Figure 12

Fluctuations du vent au mois de Janvier 1997 sur un parc anglais de puissance nominale 10MW. La puissance était moyennée sur de périodes de 10 minutes

les éoliennes ne permettent d'économiser que le combustible qui serait utilisé sans elles par ces sources de complément. En fait, compte tenu de la faible disponibilité des éoliennes, au maximum de 30%, ce sont plutôt elles qui doivent être considérées comme des sources de complément dont l'intérêt essentiel est, précisément, d'économiser du combustible et de réduire les conséquences environnementales associées à leur usage. C'est vrai, en particulier, lorsque la source principale est une centrale thermique utilisant du gaz et, surtout du charbon. C'est le cas pour un pays comme le Danemark qui produit l'essentiel de son électricité dans des centrales à charbon. Dans le cas de la France, un important programme d'éoliennes se heurterait à la relative rigidité de la production d'électricité par les centrales nucléaires. Il est donc probable qu'il devrait s'accompagner de la mise en oeuvre de centrales à la fois plus souples et moins gourmandes en investissement, de façon préférentielle des centrales à gaz à cycle combiné. Dans ce cas, toutefois, les émissions de gaz à effet de serre augmenteraient d'autant.