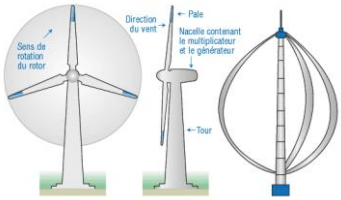
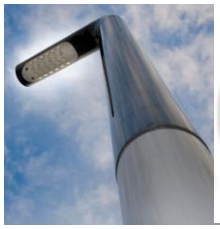




Energie éolienne

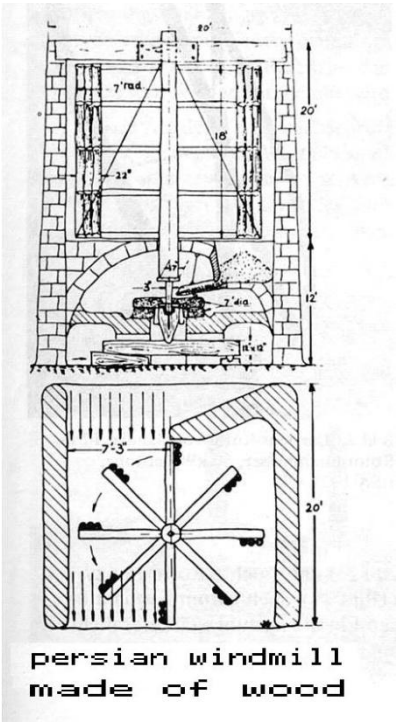
1 Exploiter le vent

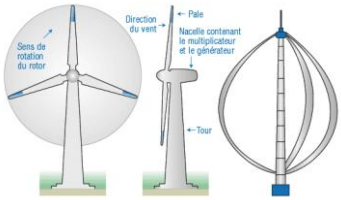
Exploiter l'énergie du vent est une technique très ancienne. Les moulins à vent ont été utilisés pour moudre le grain, presser l'huile d'olive ou pour actionner des pompes pour faire de l'irrigation.

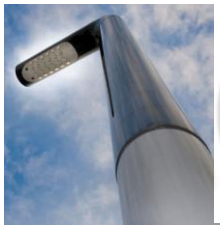
Au Vème Siècle avant JC on trouve, en Grèce, les premières éoliennes à axe vertical comme source d'énergie mécanique. Vers la même époque on utilise des moulins à vent à axe horizontal en Egypte. Ces derniers se sont développés en Europe à partir du VIIème Siècle et leur technologie s'est peu à peu sophistiquée pour culminer avec les moulins hollandais.

Au Vème Siècle avant JC on trouve, en Grèce, les premières éoliennes à axe vertical comme source d'énergie mécanique. Vers la même époque on utilise des moulins à vent à axe horizontal en Egypte. Ces derniers se sont développés en Europe à partir du VIIème Siècle et leur technologie s'est peu à peu sophistiquée pour culminer avec les moulins hollandais.

On a trouvé chez les Perses au VIIème siècle des moulins sans doute dérivés des moulins à prière entraînés par le vent. Ils se composaient d'un axe vertical supportant six ou douze ailes à leur sommet. Des volets permettaient de régler les ailes et de réduire la vitesse du moulin par grand vent technologie s'est peu à peu sophistiquée pour culminer avec les moulins hollandais.





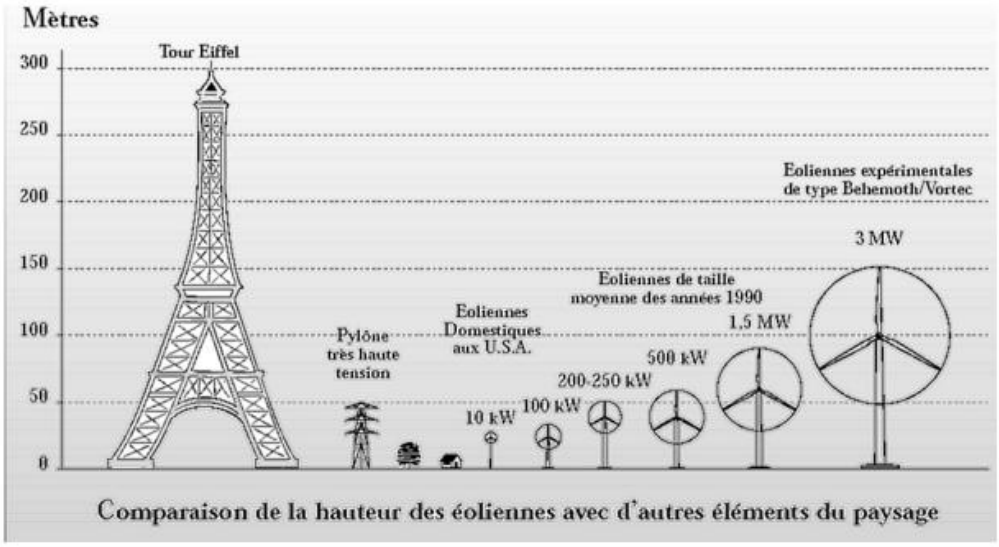


2 Aspects réglementaire

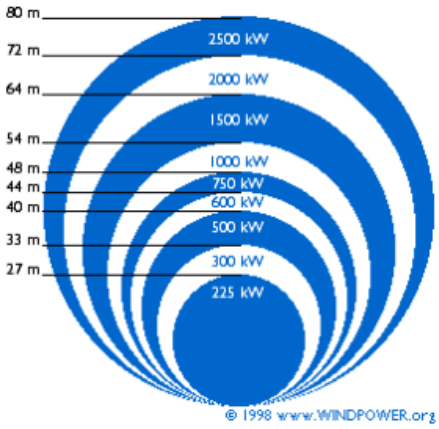
2.1 Impact sur l'environnement.

L'impact est surtout visuel, le schéma ci-dessous illustre les ordres de grandeurs.

Comparaison de la hauteur des éoliennes avec d'autres éléments du paysage



Source : manuel préliminaire de l'étude d'impact des parcs éoliens(Ademe)



D'après l'image ci-contre, une éolienne, dont la puissance de la génératrice est de 600 kW, aura un diamètre de rotor d'environ 43 mètres.

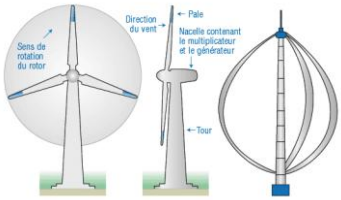
En doublant le diamètre du rotor, on obtiendra une surface quatre fois plus grande (le carré de deux).

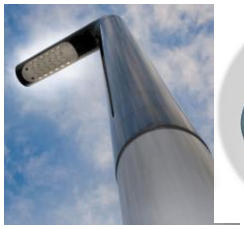
Cela signifie également une augmentation de quatre fois la puissance de sortie du rotor.

2.2 L'aspect réglementaire

Un nouveau dispositif de soutien de l'énergie éolienne. La loi de programme n° 2005-781 du 13 juillet 2005 fixant les orientations de la politique énergétique (dite loi POPE) a modifié le système de soutien à l'énergie éolienne. Elle a introduit les " zones de développement de l'éolien " (ZDE).

Les ZDE doivent prendre en compte trois critères définis par la loi : le potentiel éolien, les possibilités de raccordement au réseau électrique et la protection des paysages, des monuments historiques et des sites remarquables et protégés.



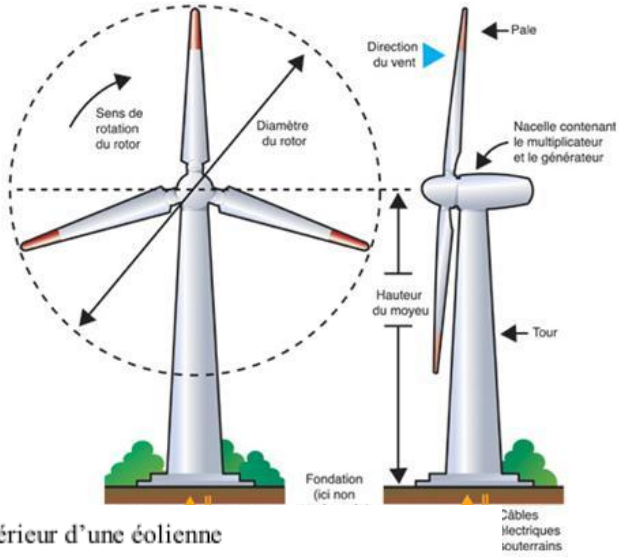


2.3

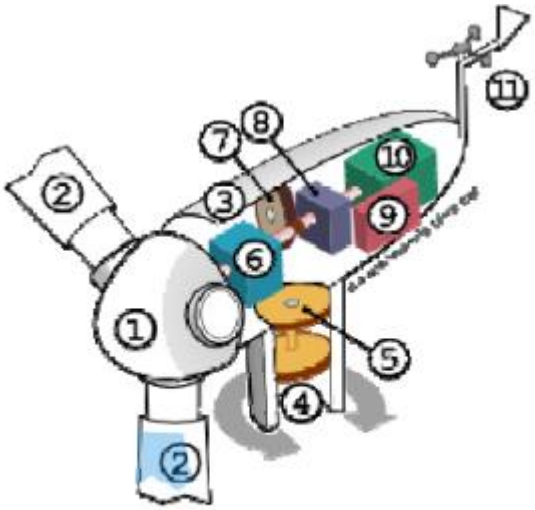
3 Constitution d'une éolienne

Nous trouvons sur le croquis ci-contre les différentes parties d'une éolienne. Ce sont visuellement les plus visibles :

- le rotor.
- les pales.
- la nacelle.
- la tour.

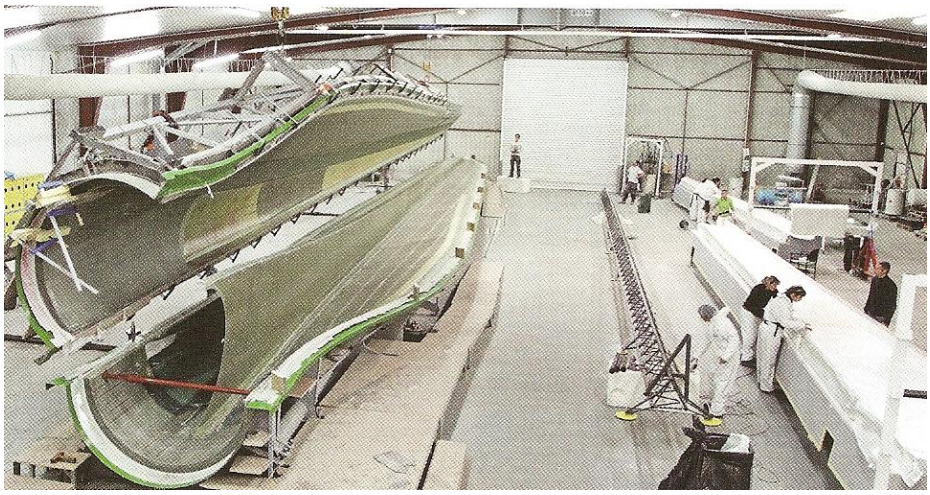


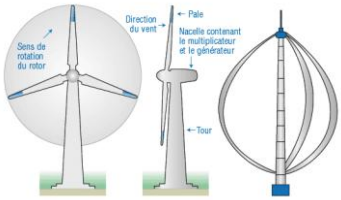
L'équipement technique qui converti la force motrice du vent en énergie électrique est à l'intérieure de la nacelle. Nous en avons une illustration ci-dessous :

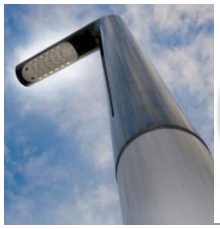


A l'intérieur d'une éolienne

1 : Rotor
2°: Pales
3°: Nacelle
4°: Mât
5°: Dispositif d'orientation de la nacelle
6°: Boîte de vitesse
7 : Frein
8 : Système de désenclenchement
9 : Boîtier électronique de contrôle
10 : Générateur électrique
11 : Anénomètre et contrôle de la direction du vent



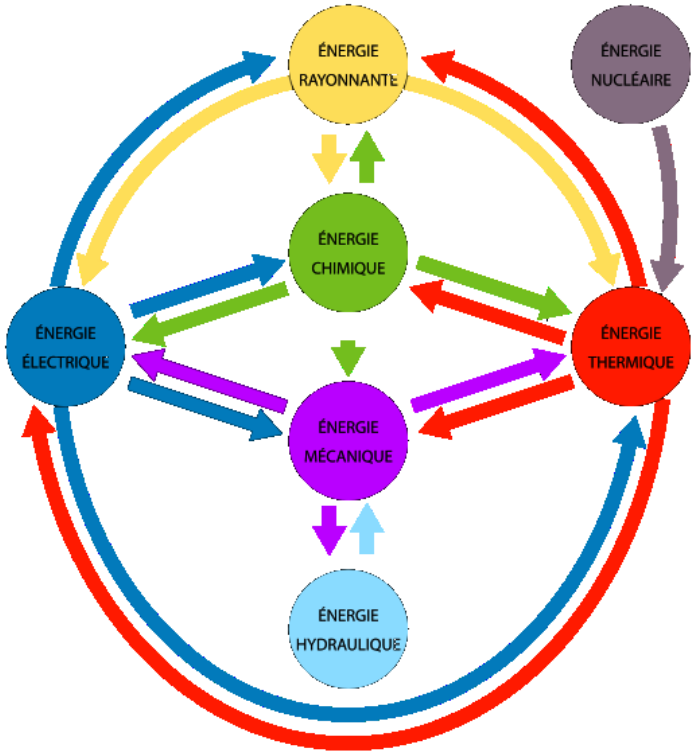




Fabrication de pales d'éolienne de 30 m (Société Occitane)[1]

4 Aspects énergétiques

Quelle est l'énergie utilisée dans une éolienne ?



4.1 Energie cinétique :

L'énergie transformée par l'éolienne est l'énergie cinétique de la masse d'air en déplacement. Cette énergie est transformée en énergie mécanique puis en électricité dans le cas d'une éolienne de production électrique. L'énergie cinétique maximale disponible a pour expression :

Energie cinétique : $Ec = \frac{1}{2}.m.v^2$ J

4.2 Energie cinétique volumique

Modifions l'expression de l'énergie cinétique pour obtenir l'énergie cinétique par unité de volume. Nous avons la masse d'air déplacée qui est égale à :

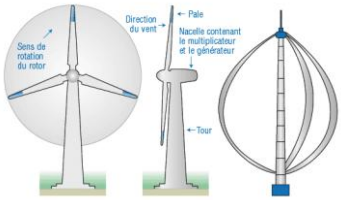
m = ρ.V avec ρ masse volumique de l'air en Kg.m-3 et V volume m^3 d'où :

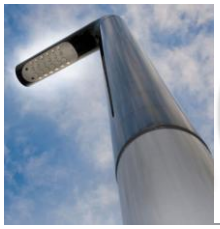
Energie cinétique volumique : $\frac{Ec}{V} = \frac{1}{2}.\rho.v^2$ J .m^{-3}

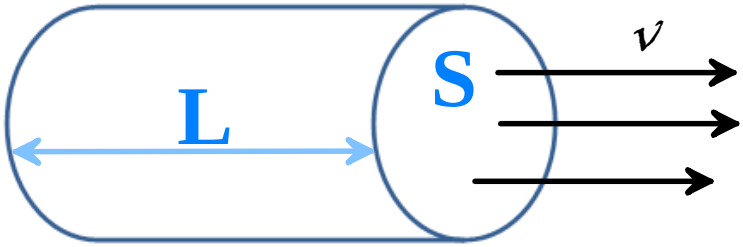
4.3 La puissance surfacique

La puissance surfacique est la puissance disponible par unité de surface. La surface est celle d'un 'tube de vent' où toutes les molécules d'air se déplacent avec un mouvement uniforme.

[1] Le journal des énergies renouvelables, N° 205, p. 123







$$L = v.t$$

A partir de l'énergie cinétique nous pouvons écrire :

$Ec = \frac{1}{2}.m.v^2$ or $m = \rho.V = \rho.L.S$ or $L = v.t$ d'où $Ec = \frac{1}{2}.\rho.v.t.S.v^2 = \frac{1}{2}.\rho.v^3.S.t$

La puissance P s'exprime simplement par : $P = \frac{Ec}{t} = \frac{1}{2}.\rho.V^3.S$

Et la puissance surfacique est donnée par : $\frac{P}{S} = \frac{1}{2}.\rho.v^3$ W.m^{-2}

Cette puissance disponible P n'est pas entièrement récupérée par l'éolienne. Si on appelle P_v cette puissance incidente, et P_e la puissance extraite par l'éolienne alors on définit le coefficient de puissance Cp par :

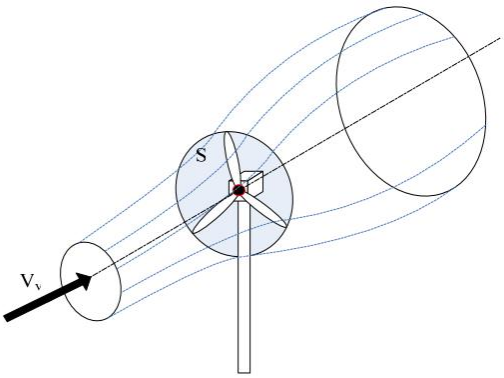
$$C_p = \frac{P_e}{P_v} \; ; \qquad C_p < 1$$

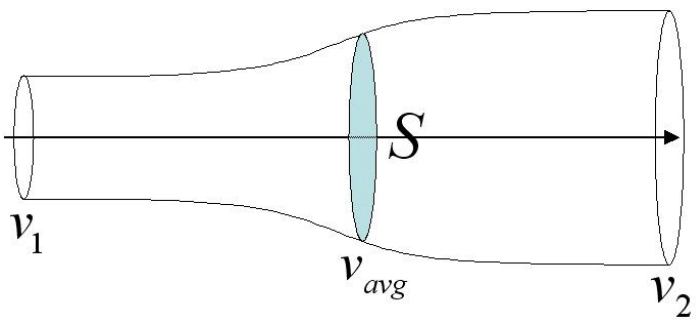
Ce coefficient caractérise l'aptitude de l'aérogénérateur à capter l'énergie éolienne. Ce coefficient a une valeur maximale appelée limite de Betz que nous allons étudier au paragraphe suivant.

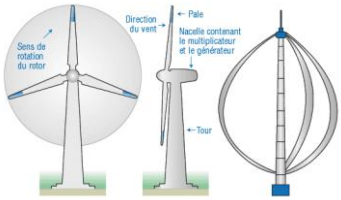
4.4 La limite de Betz

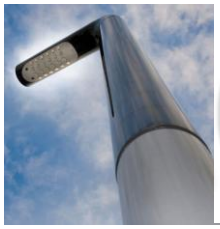
Toute l'énergie disponible dans un flux de vent n'est pas captée par l'éolienne. Si c'était le cas le flux de vent en sortie aurait une vitesse nulle. On appelle coefficient de puissance la proportion :

$$C_p = \frac{P_{éol}}{P} = \frac{P_{éol}}{\frac{1}{2}\rho S V_v^3}$$







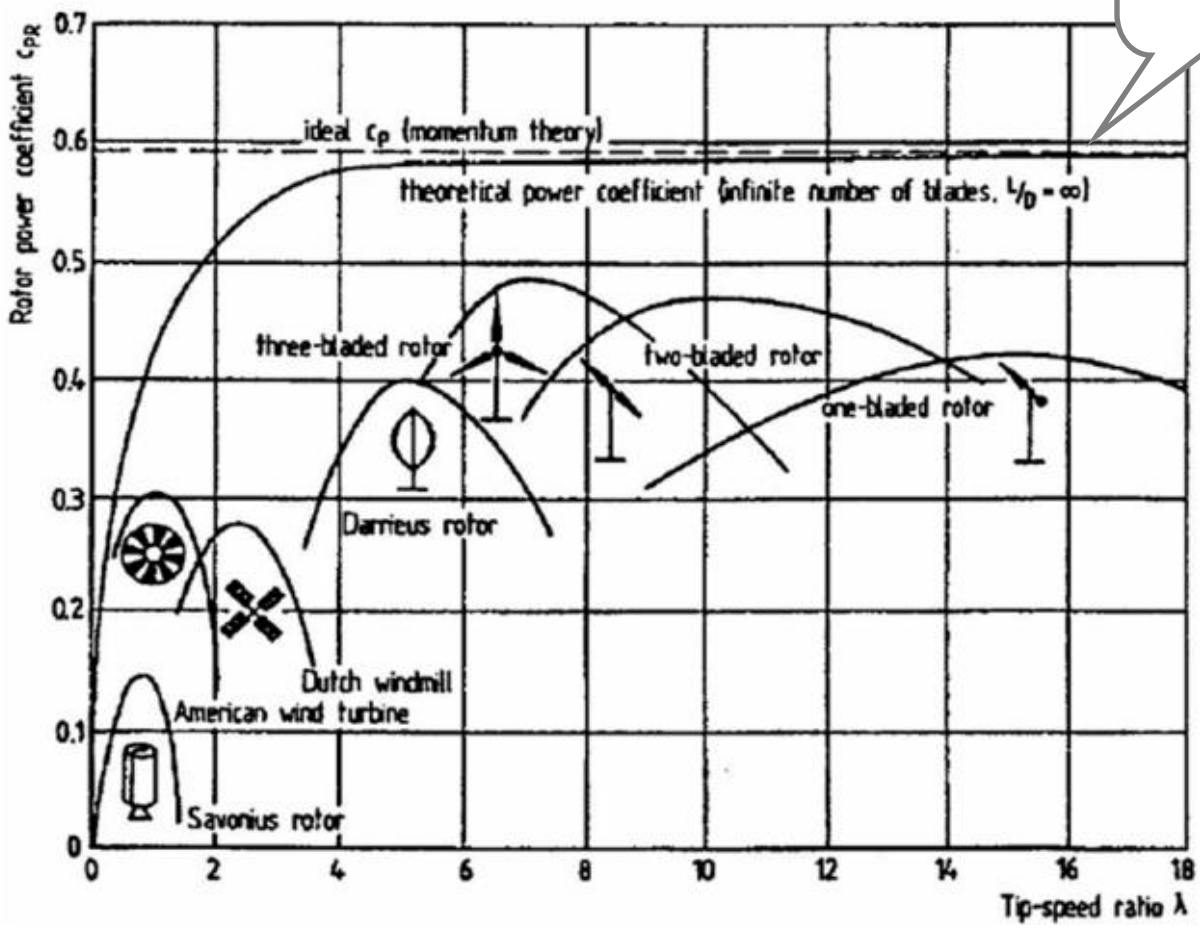


On démontre la valeur limite maximale de Cp, appelée la limite de Betz est C_{pmax}=0,59 soit 59%. Ce coefficient de puissance Cp dépend de la vitesse spécifique λ où λ est le rapport entre la vitesse linéaire périphérique en bout de pale d'hélice R.Ω et la vitesse du vent v :

$$\lambda = \frac{R\Omega}{v}$$

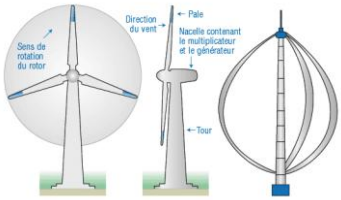
Ce coefficient dépend aussi du type de machine comme l'indique le graphe ci-dessous :

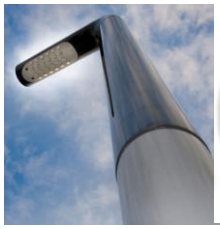
Notez que la valeur maximale de Cp est 0,59

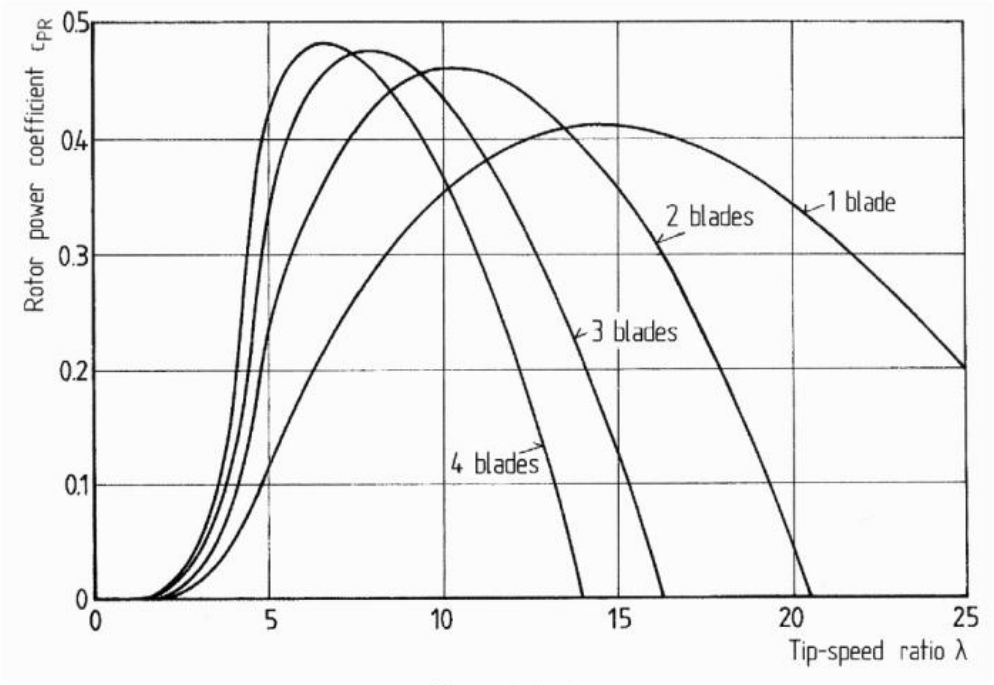


Sur le graphe de la page suivante nous avons une comparaison entre les différentes valeurs du coefficient Cp d'éolienne à axe horizontal de 1 à 4 pales (blades).

⇨ Pour une éolienne a trois pales quelle est la valeur de λ ?







5 L'air et le vent

5.1 La masse volumique de l'air

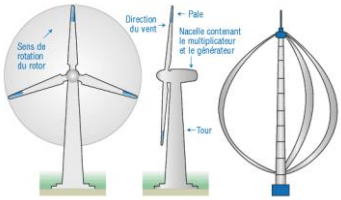
L'air a une masse qui dépend de son taux d'humidité et de sa température. Nous avons besoin de connaître cette masse pour déterminer l'énergie cinétique de celui-ci lors de son déplacement.

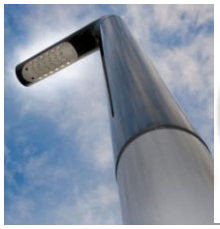
⇨ En analysant le tableau ci-dessous que peut-on dire de la variation de cette masse volumique en fonction de la température ?

⇨ Quelle est l'énergie cinétique apportée par 1m^3 d'air se déplaçant à la vitesse de 1 m/s ?

Table - Masse volumique de l'air sec en fonction de la température

ϑ en °C	ρ en kg/m^3	ϑ en °C	ρ en kg/m^3
- 10	1,341	+ 40	1,127
- 5	1,316	+ 45	1,109
0	1,293	+ 50	1,092
+ 5	1,269	+ 55	1,076
+ 10	1,247	+ 60	1,060
+ 15	1,225	+ 65	1,044
+ 20	1,204	+ 70	1,029
+ 25	1,184	+ 75	1,014
+ 30	1,164	+ 80	1,000
+ 35	1,146	+ 85	0,986





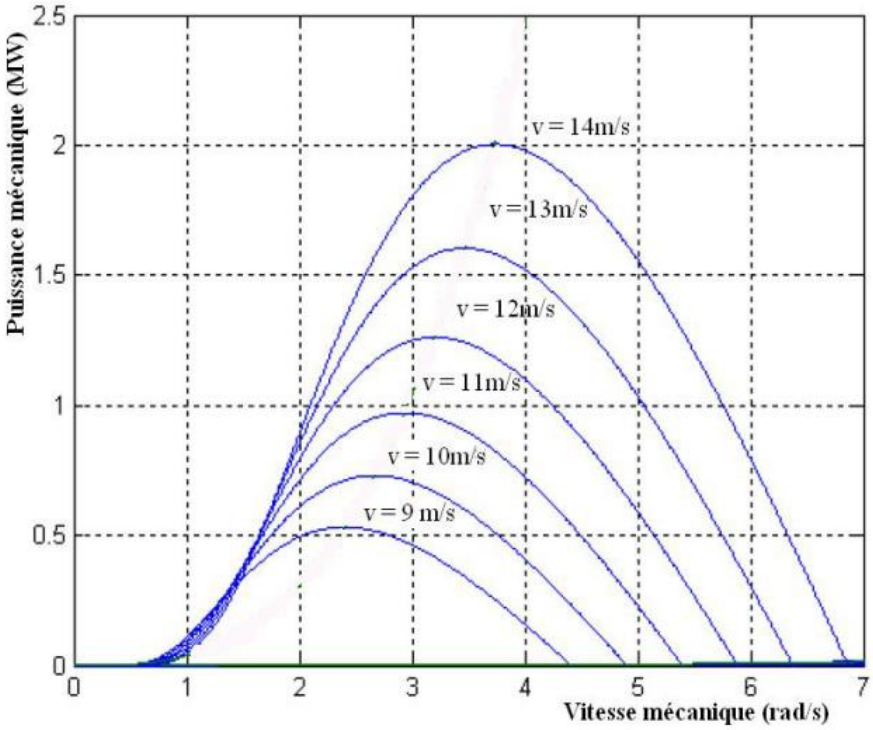
5.2 La vitesse du vent données météorologiques

Degrés Beaufort	Vitesse du vent (m/s)	Vitesse du vent (km/h)	Description générale	Pression sur surface plane (daN/m2)
0	0 à 0.4	< 1	Calme	
3	3.5 à 5.5	12 à 19	Petite brise	3.2 (5 m/s)
4	5.5 à 8	20 à 28	Jolie brise	6.4 (7 m/s)
6	11.4 à 13.9	39 à 49	Vent frais	22 (13 m/s)
8	17.4 à 20.4	62 à 74	Coup de vent	52 (20 m/s)
11	28.4 à 32.5	103 à 117	Violente tempête	117 (30 m/s)
17	54.1 à 60	202 à 220	Cyclone	470 (60 m/s)

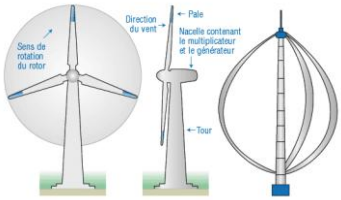
6 Analyse des performances d'une éolienne

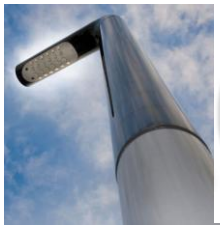
6.1 Puissance maximale délivrée

Le relevé des caractéristiques de production de puissance mécanique par rapport à la vitesse de rotation de l'éolienne est donné ci-dessous :



⇨ Pourquoi y a-t-il plusieurs courbes, quelle est la grandeur physique qui différencie chacune d'entre elle ?





➪ Comment obtenir sur l'une de ces courbes la puissance maximale délivrée par l'éolienne ?

➪ Tracer la courbe représentant la puissance maximale en fonction de la vitesse de l'éolienne en rad/s, puis graduer cette courbe en tr/mn.

7 Produire de l'électricité

Le rotor de l'éolienne entraîne la génératrice. Pour les éoliennes de grandes puissances la génératrice produit un système de courants et tensions triphasés pour être reliée au réseau de distribution EDF. Les génératrices sont de type synchrone ou asynchrone.

Une génératrice synchrone est une machine électrique qui fonctionne à une vitesse de rotation du rotor appelée vitesse de synchronisme. Cette vitesse est imposée par la fréquence du réseau électrique auquel est reliée la génératrice. La relation est donnée par :

$$Ns=\frac{60.f}{p}$$

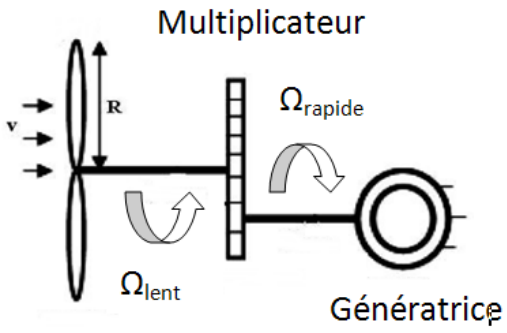
Où f = 50 Hz, p nombre de paire de pôles magnétique présents sur le rotor. Ns vitesse de rotation en tr/mn.

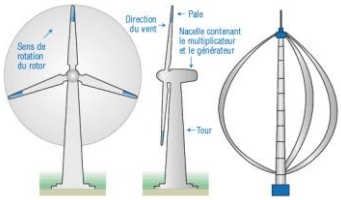
➪ Donner les vitesses de synchronismes pour p=1,2,3 en tr/mn et en rad/s

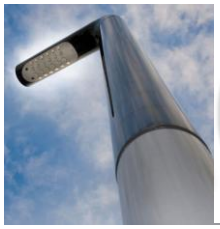
➪ Ces vitesses sont-elles compatibles avec les vitesses de rotation de l'éolienne étudiée au paragraphe 6.1.

➪ Pour une génératrice possédant 2 paires de pôles et un vent de 14 m/s donner la valeur du rapport de vitesse du multiplicateur.

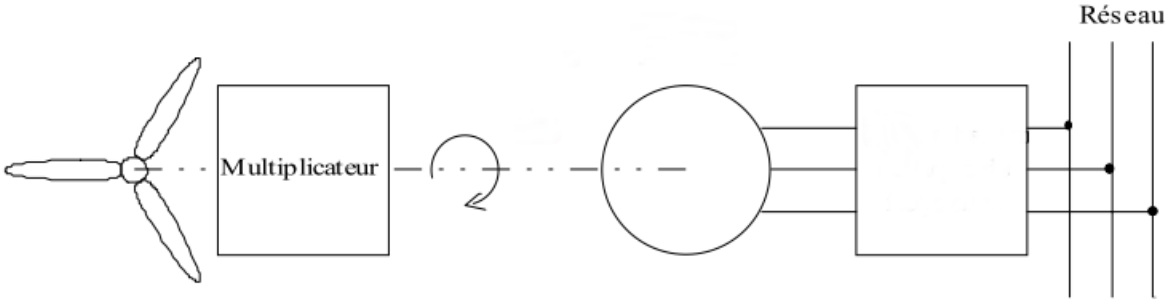
➪ Cette valeur obtenue convient-elle quelque soit la vitesse du vent ?

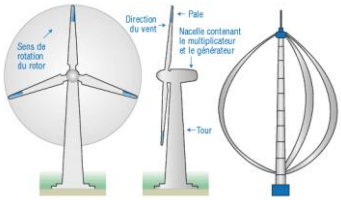


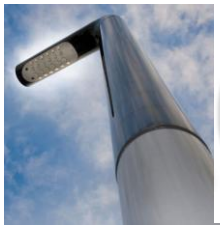




Pour permettre un fonctionnement optimum au point de rendement maximal la génératrice est plus sophistiquée qu'un simple alternateur synchrone. Les fonctionnements obtenus en vitesse variables ne sont possibles avec des rendements optimisés qu'avec l'utilisation de l'électronique de puissance.







Pour approfondir

1 Puissance surfacique du vent

Calculer la puissance surfacique d'un vent de vitesse 14,0 $m.s^{-1}$. On prendra une masse volumique de l'air de 1,204 $kg.m^{-3}$

Calculer la puissance surfacique d'un vent de vitesse variant entre 3,5 $m.s^{-1}$ et 30,0 $m.s^{-1}$. Faire les calculs avec excel ou un autre tableur disponible au laboratoire.

2 Performances d'une éolienne[2]

Données techniques :

Puissance nominale 6150 kW

Vitesse de vent 3,5 $m.s^{-1}$ ---------- 30,0 $m.s^{-1}$

Vitesse de vent optimale 14,0 $m.s^{-1}$

Le rotor

- diamètre 126,0 m
- plage de vitesse 7,7 à 12,1 $tr.mn^{-1}$

Les pales, longueur 61,5 m

La tour, hauteur 85 m à 95 m.

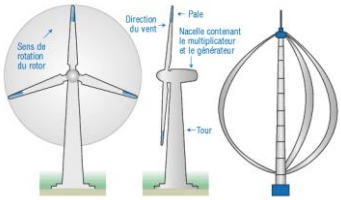
⇨ Calculer la surface balayée par le rotor.

⇨ Calculer la puissance maximale disponible pour un vent de 14,0 $m.s^{-1}$.

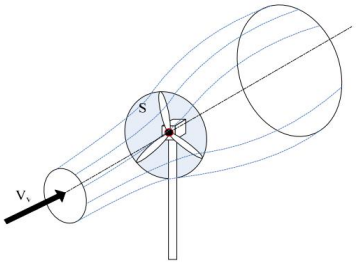
⇨ En tenant compte de la limite de Betz donnez la puissance maximale disponible.

⇨ Calculer le rendement théorique maximal de l'éolienne.

[2] Eolienne modèle 6M REpower



3 Calcul de puissance moyenne maximale captée par l'aérogénérateur



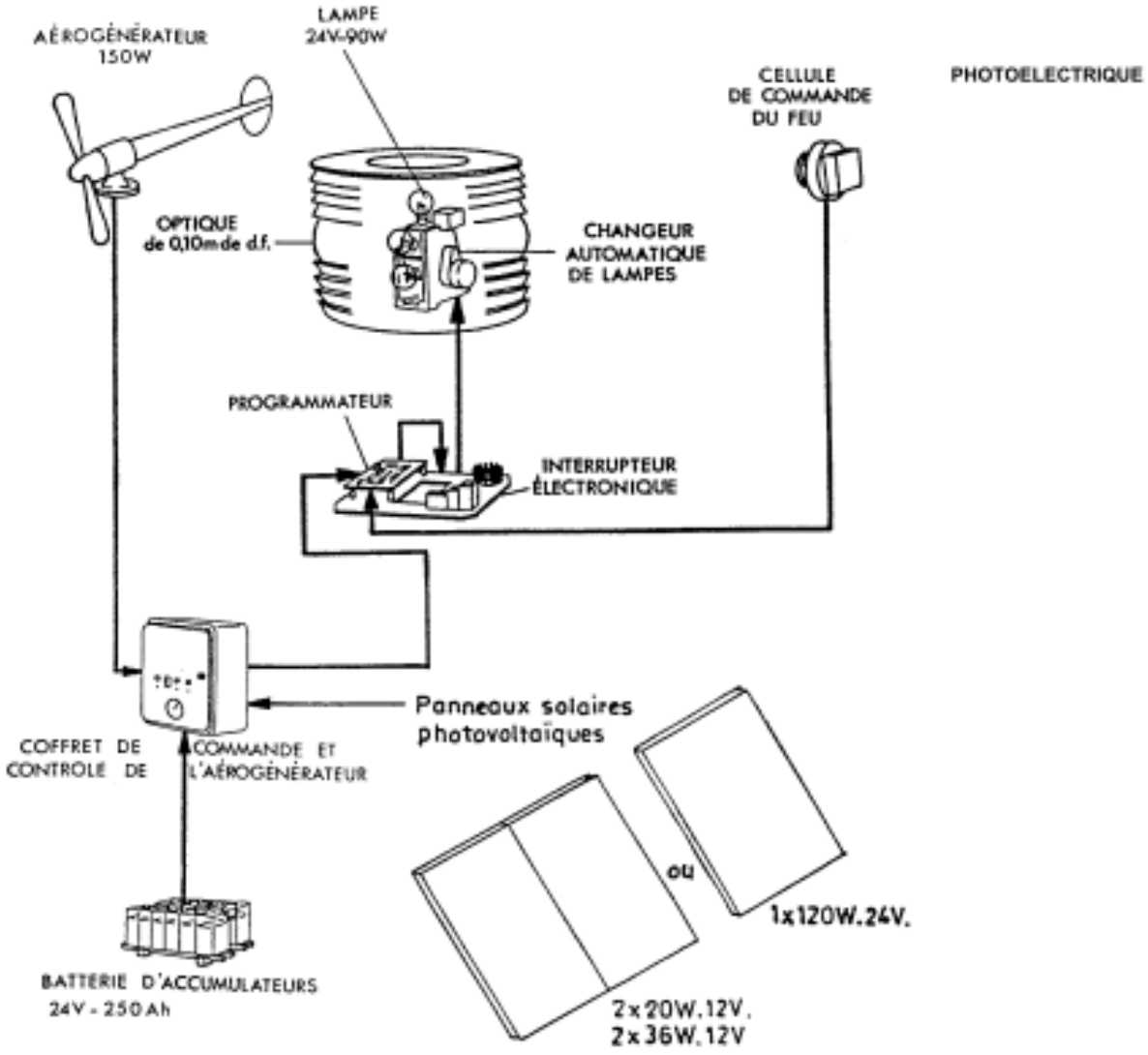
⇨ Rappeler l'expression de la puissance surfacique.

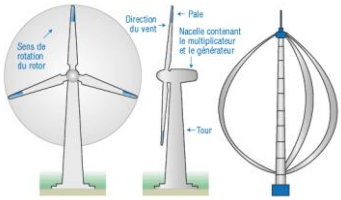
⇨ Calculer la puissance captée maximale d'un vent moyen de 6 $m.s^{-1}$

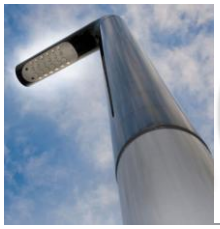
⇨ Donner l'énergie annuelle correspondante.

4 Etude de l'autonomie d'un site isolé (D'après le sujet de BAC SSI Polynésie 2005)

Le phare de l'île noire assure la sécurité de la navigation en mer dans la baie de Morlaix, Finistère. Le schéma de l'installation est le suivant :



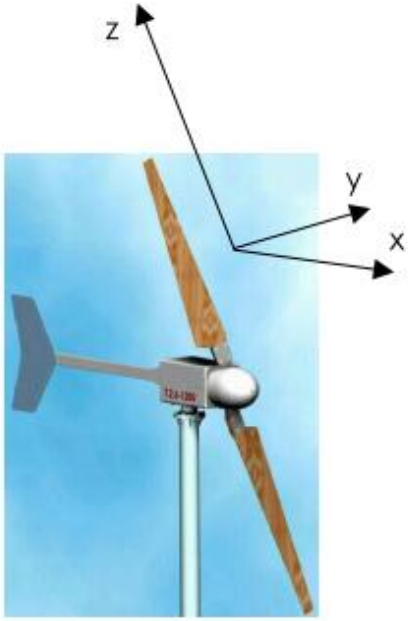




Rappel des données techniques[3] :

L'aérogénérateur

L'aérogénérateur est une machine qui a pour fonction de prélever une partie de l'énergie éolienne disponible pour la transformer en énergie électrique.



- *L'hélice :*

L'organe de prélèvement de l'énergie éolienne est une hélice à calage (angle d'incidence des pales…) variable. La variation de ce calage est commandée par l'action de la force centrifuge.

L'efficacité de fonctionnement du calage variable est telle que la vitesse de rotation ne varie pratiquement plus lorsque la vitesse du vent atteint puis dépasse la vitesse de vent nominale *Vn*, vitesse pour laquelle la machine fournit sa puissance nominale.

- *L'alternateur :*

Le générateur électrique est constitué d'une machine synchrone triphasée à aimants permanents. Il est couplé directement à l'hélice.

Caractéristiques :

- Vitesse de rotation nominale : *525 tr/min.*
- Puissance nominale : *150W*

- *La régulation de la vitesse de rotation :*

Après que la machine ait atteint sa vitesse de rotation nominale, le calage variable règle en permanence les pales de sorte que leur angle d'incidence soit à la limite du décrochage aérodynamique.

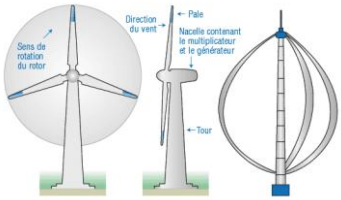
Cela signifie qu'à l'instant du décrochage, l'action du vent sur les pales est *négligeable*.

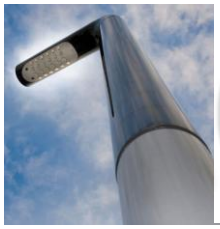
Pour l'aérogénérateur, la vitesse nominale du vent est de *7 m/s*

- *Le gouvernail :*

L'extrémité arrière du bâti porte le gouvernail d'orientation de l'aérogénérateur.

[3] Se référer au cours sur les installations solaires photovoltaïques.





.Coefficient Cp ou coefficient de puissance

Des essais en soufflerie permettent de définir, pour un profil de pale donné, un coefficient de puissance ***Cp***, caractéristique de l'éolienne.

Ce coefficient ***Cp*** permet de déterminer la puissance disponible sur l'arbre de l'aérogénérateur par application de la relation suivante :

$$P_{hel} = \frac{1}{2} .\rho.Cp.S.V^3$$

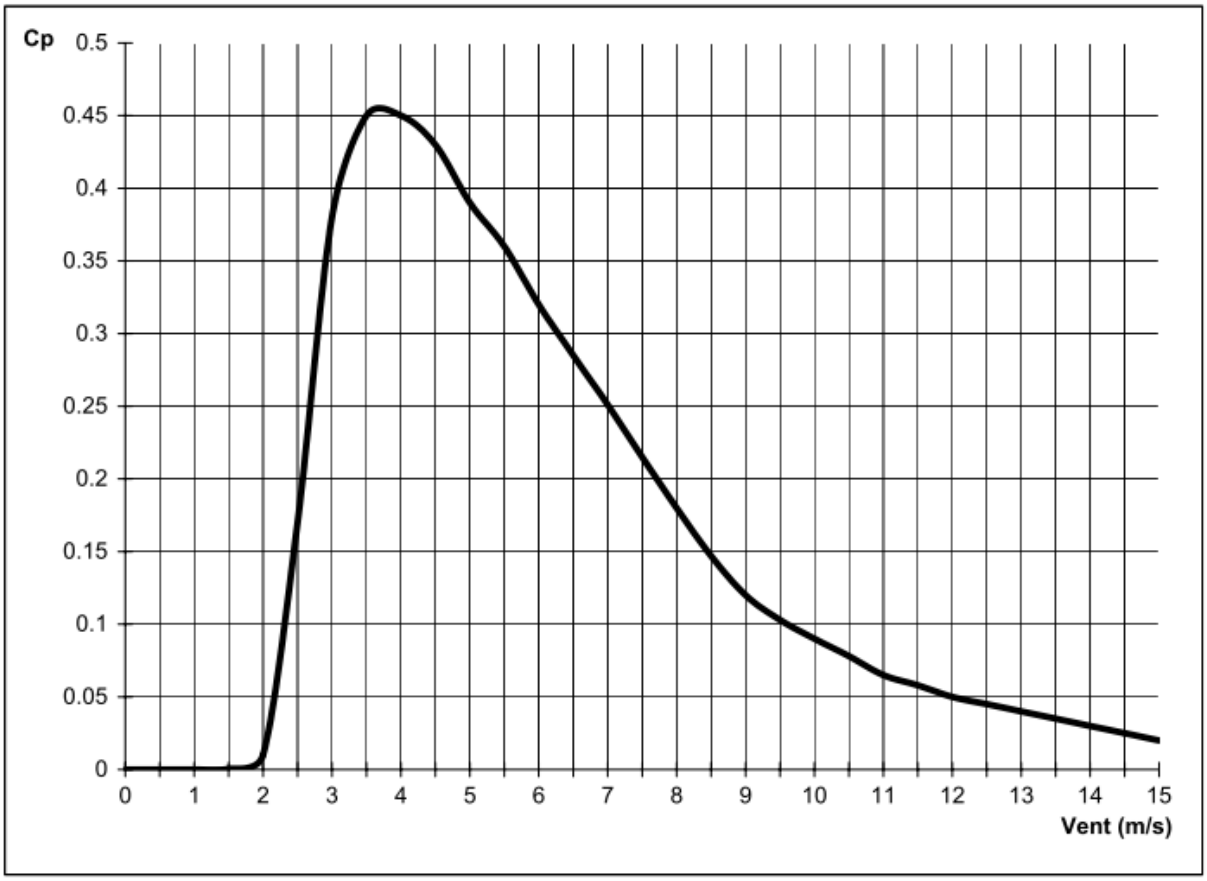
où : P_{hel} = puissance mécanique fournie (disponible sur l'arbre de l'aérogénérateur)

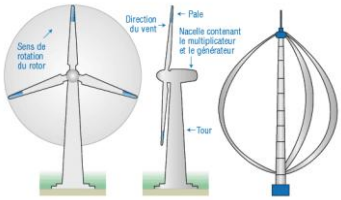
Cp = coefficient de puissance

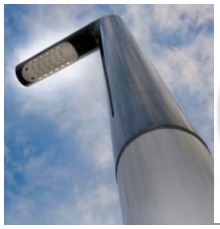
ρ = masse volumique de l'air en kg/m³ = 1,225 Kg/m³

S = surface du disque éolien en m² (surface circulaire générée par la rotation des pales)

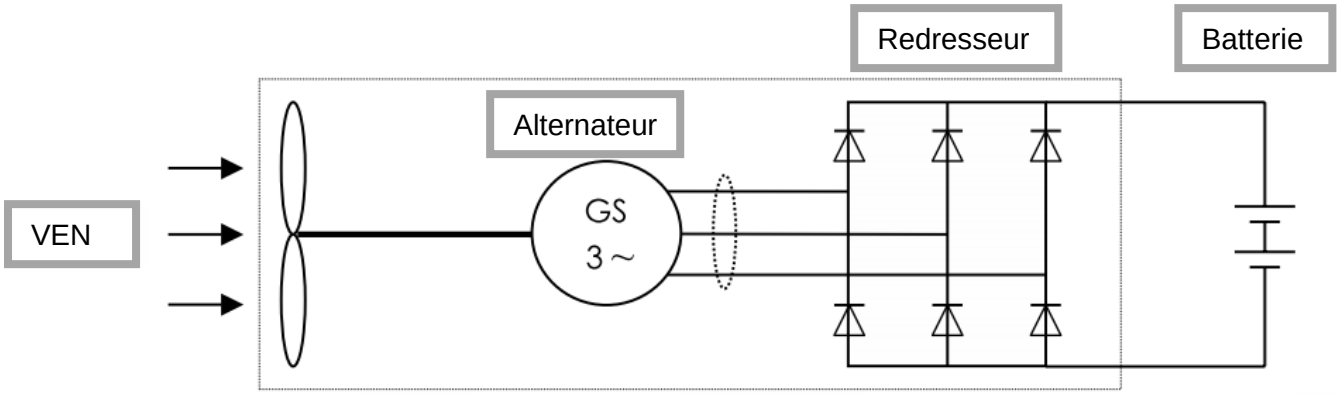
v = vitesse du vent en m/s







4.1 Analyse fonctionnelle de la chaine de conversion d'énergie

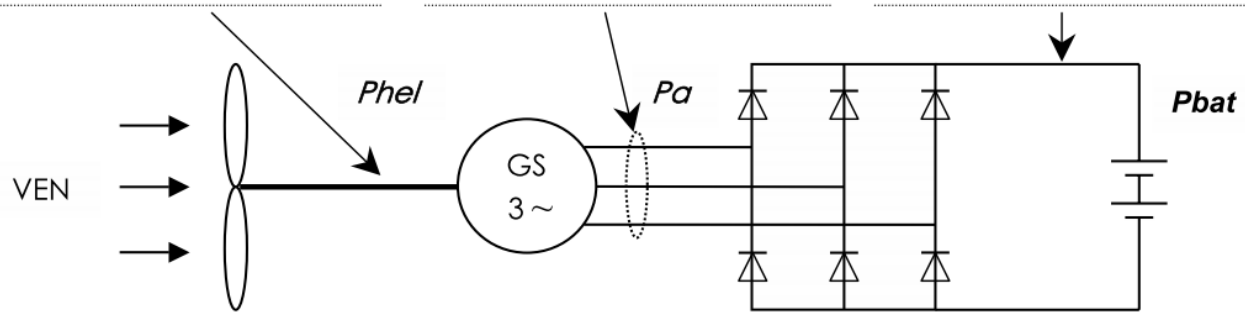


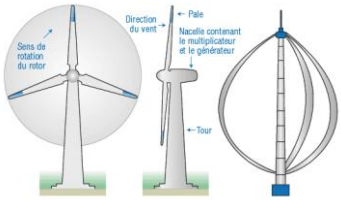
$\eta_h = f(Cp)$ $\eta_a = 0,9$ $\eta_r = 0,95$

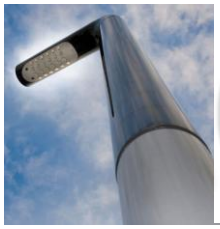
Les différents rendements

4.1 ***Sur le document réponse*** indiquer la nature de l'énergie (mécanique ou électrique) présente à la sortie de chaque élément de la chaîne de conversion. Préciser sa caractéristique principale en choisissant les réponses dans la liste suivante :

- Energie mécanique caractérisée par un mouvement : - de rotation - de translation.
- Energie électrique caractérisée par une tension et un courant : - continus - alternatifs - apériodiques – modulés en largeur d'impulsions.







Question 4-2 : Calcul du temps nécessaire à la recharge de la batterie par l'aérogénérateur seul

4.2.1. La puissance ***Pa*** de l'alternateur est de ***150 W*** (pour une vitesse de vent nominale ***Vn*** de ***7 m/s***). Calculer la puissance ***Pbat*** fournie à la batterie dans ces conditions.

4.2.2. Calculer le courant ***Ibat*** de charge de la batterie en considérant la tension à ses bornes égale à 24V.

4.2.3. En tenant compte du rendement de la batterie η_b **= 0,85**, calculer le nombre d'heures ***Tv*** de vent (à vitesse nominale) nécessaires à la recharge de la batterie pour un jour d'hiver où la consommation quotidienne ***Qd*** du phare s'établit approximativement à ***37 Ah***.

Question 4-3 : Dimensionnement du disque éolien de l'aérogénérateur

4.3.1 A l'aide du schéma de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne donné ci-dessus, calculer la puissance mécanique ***Phel*** fournie par l'hélice pour la vitesse nominale ***Vn***.

4.3.2. A l'aide de la documentation technique n°2, déterminer la surface ***S*** que doit avoir le disque éolien (surface circulaire générée par la rotation des pales) qui, sous l'action d'un vent ***Vn***, permet de disposer de la puissance mécanique nominale ***Phel*** calculée précédemment.

4.3.3. Calculer le diamètre ***D*** du disque éolien de l'aérogénérateur qui correspond à la surface générée par la rotation des pales.

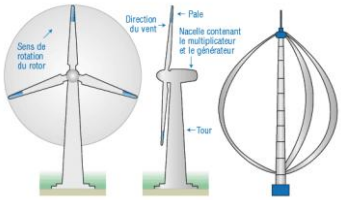
Question 4-4 : Caractéristique de puissance

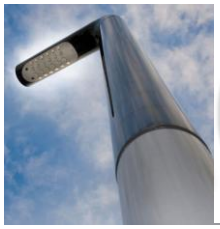
Pour la suite de l'étude, nous prendrons un diamètre de disque éolien ***D = 2m***.

4.4.1. Calculer la puissance mécanique disponible pour les vitesses de vent données sur le document réponse.

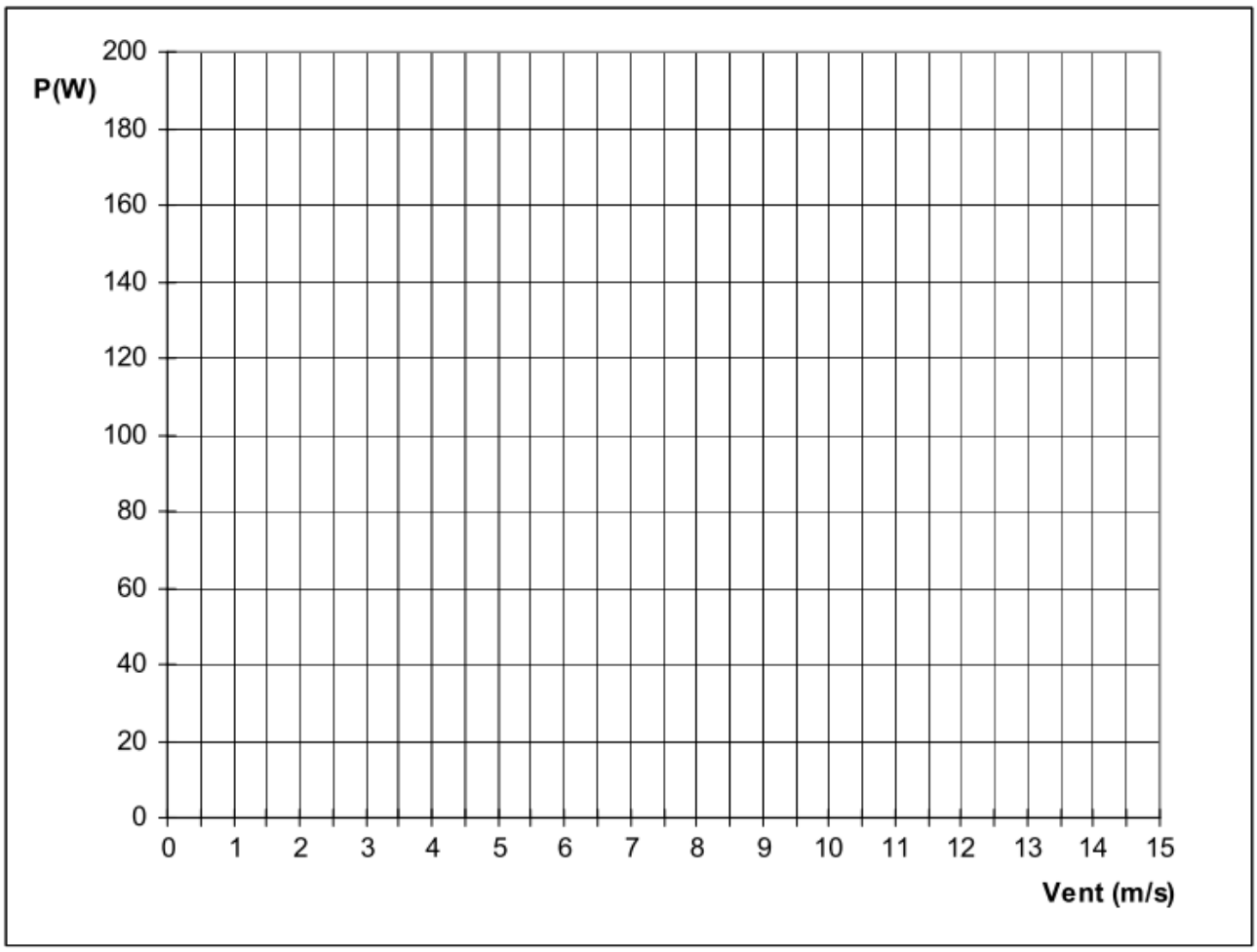
*4.4.1. Puissance mécanique **Phel** disponible*

Vitesse du vent (m/s)	2	3	5	7	9	11	15
Coefficient de puissance *Cp*							
Puissance mécanique *Phel*							





*Courbe de puissance **Phel = f(V)***

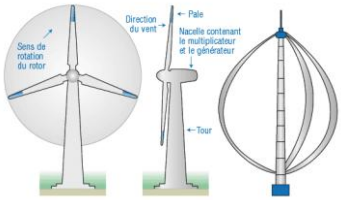


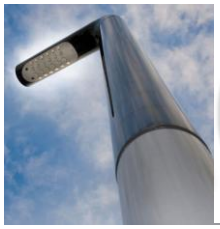
4.4.2. Tracer la courbe ***Phel = f(V)***.

4.4.3. En exploitant la courbe, placer sur celle-ci :

- ***Vd*** : Vitesse de démarrage
- ***Vn*** : Vitesse nominale

4.4.4. Commenter ***sur feuille de copie*** l'allure générale de cette courbe, notamment pour des vitesses de vent supérieures à ***Vn***.





Question 4-5 : Vitesse périphérique critique des pales

A partir d'une certaine vitesse de rotation de l'hélice, la vitesse en périphérie des pales peut devenir gênante au niveau du bruit généré ou de l'usure prématurée causée par les vibrations.

La force due à l'effet centrifuge exercée sur l'ensemble des pales peut également être dangereuse mécaniquement pour l'intégrité de l'hélice lors de vents violents. En effet, les efforts ainsi générés peuvent conduire à la rupture de la structure de l'hélice.

C'est pour toutes ces raisons que l'on considère l'extrémité des pales en « survitesse » à partir de ***250 km/h***.

Rappel : La vitesse de rotation nominale du rotor est ***N = 525 tr/min***.

4.5.1. A partir des caractéristiques générales, déterminer la vitesse linéaire Vp_N de l'extrémité d'une pale.

4.5.2. Vérifier si l'extrémité de la pale est en « survitesse » ou non.