

Chapitre 3. Energie éolienne

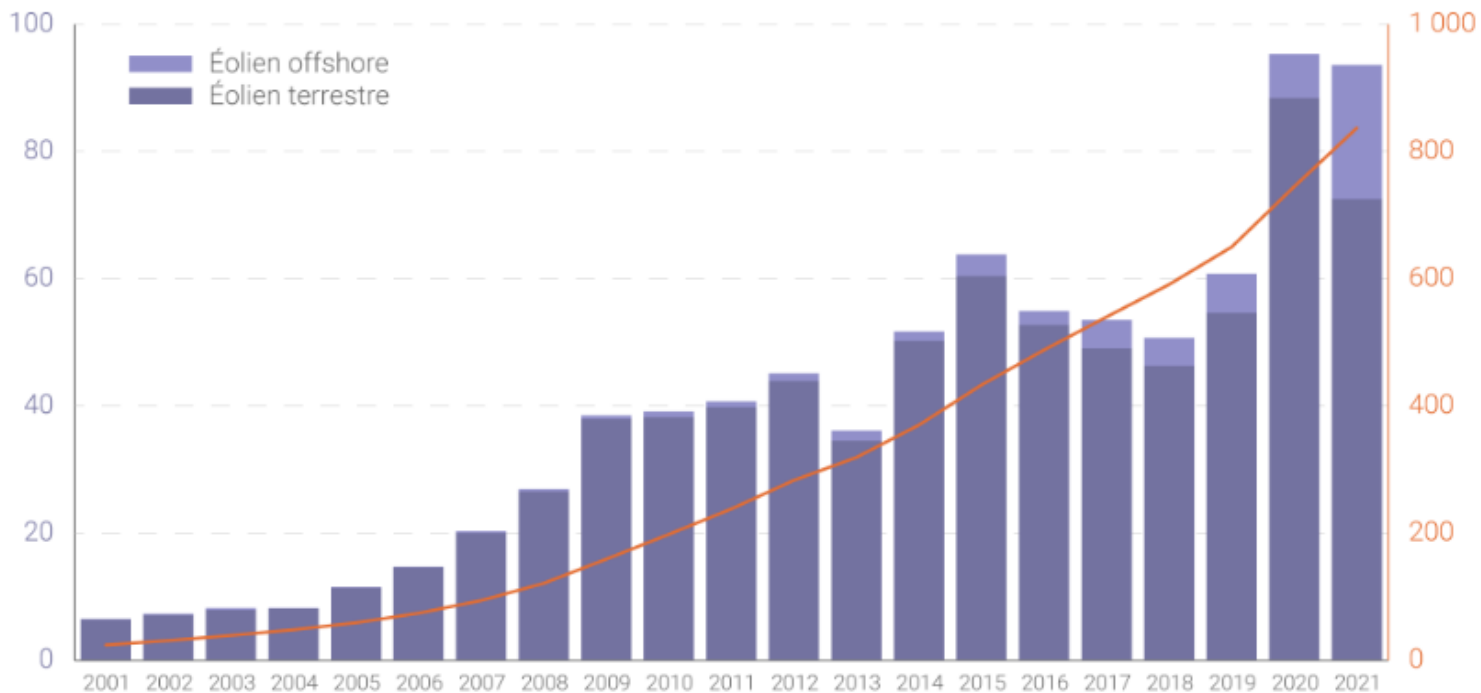
Etat actuelle de l'énergie éolienne dans le monde

- La production de l'électricité à partir de l'énergie éolienne est en pleine croissance:
- A la fin de l'année **2021**, la puissance cumulée de toutes les éoliennes dans le monde dépasse **840 GW**, environ **7%** de la production mondiale d'électricité.
- **93,7 GW** de nouvelles capacités éoliennes ont été déployées en **2021**.

Monde Évolution des nouvelles installations éoliennes

Nouvelles installations annuelles (GW)

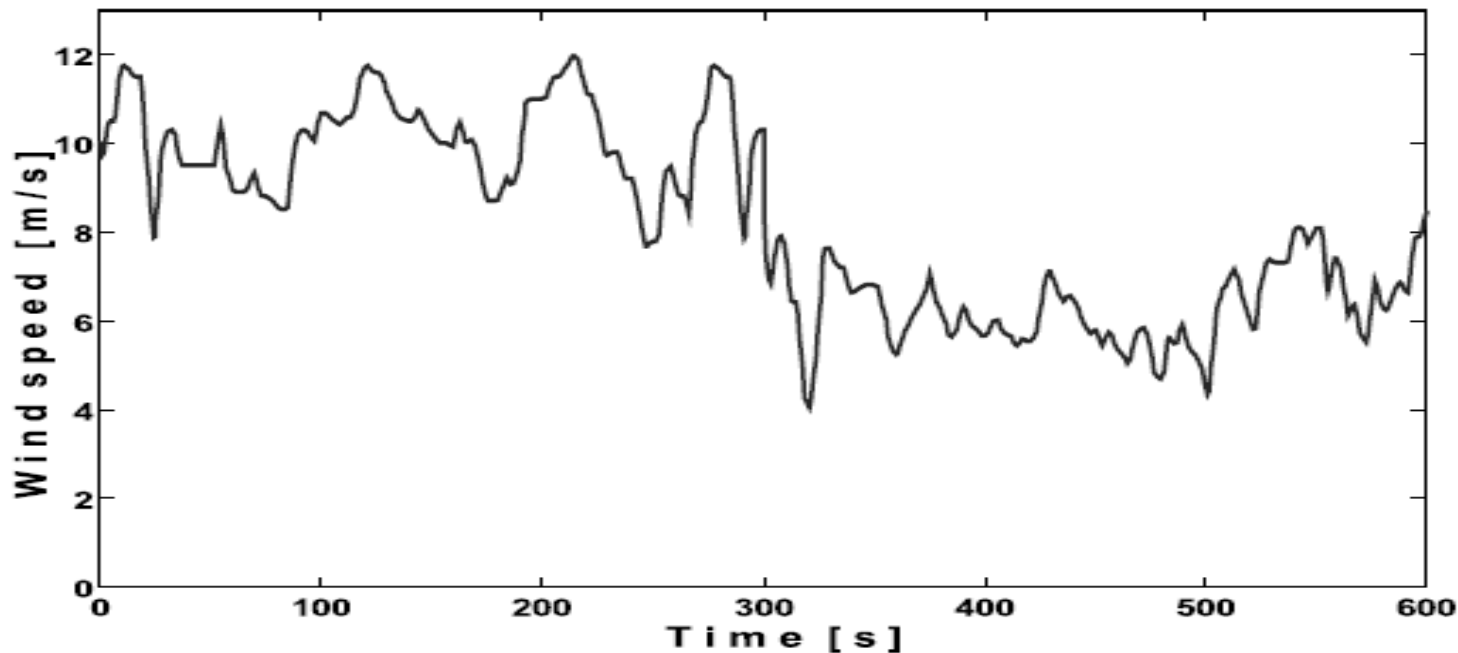
Puissance cumulée du parc éolien (GW)



Caractéristiques du vent

Variabilité

- Le vent est présent partout dans le monde avec des caractéristiques très variables.
- En plus de cette importante variabilité géographique, on peut aussi remarquer une importante variabilité temporelle, car la vitesse du vent sur un site précis varie selon les saisons, les mois, les jours.
- Le vent peut aussi beaucoup varier en quelques secondes. La figure donne un exemple de l'évolution de la vitesse du vent mesurée dans un endroit donné, toutes les 3 secondes.

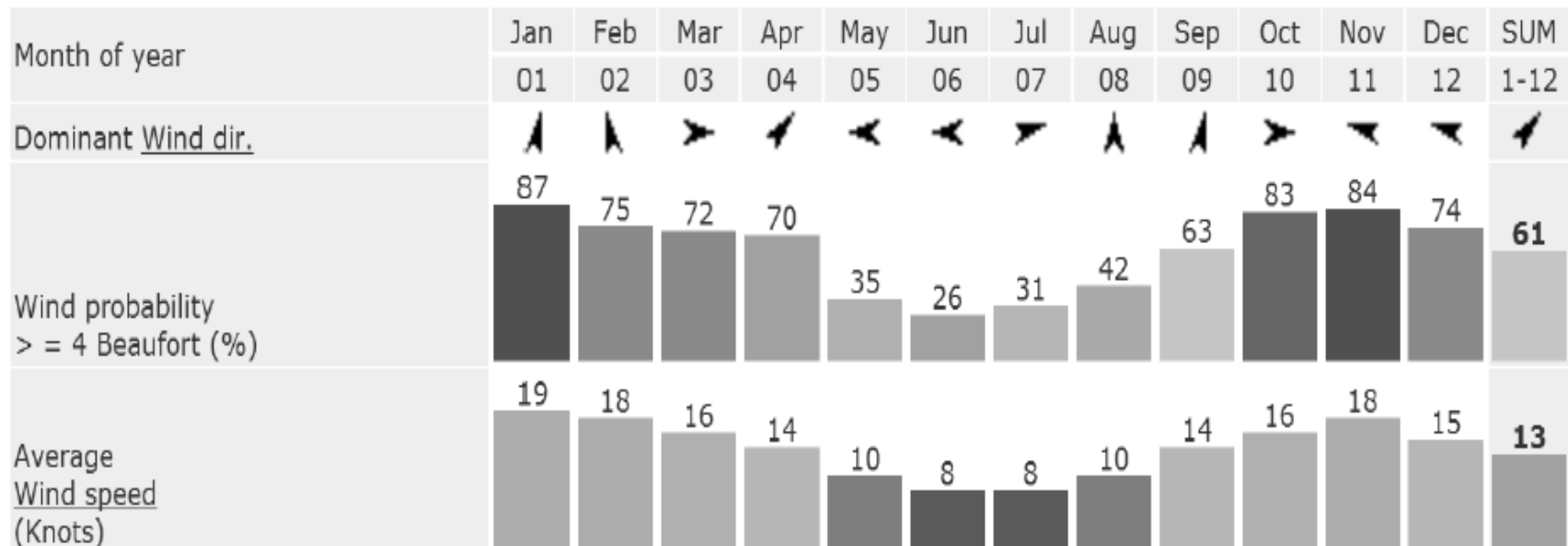


Exemple de l'évolution instantanée de la vitesse du vent.

Caractéristiques du vent

Variabilité

- A cause de ces variations rapides, il est difficile de faire une prévision de la vitesse du vent.
- Il est plus pratique de caractériser la vitesse du vent par moyenne mensuelle d'un ensemble des mesures effectuées dans un site donné.
- Beaufort: échelle de mesure empirique de la vitesse du vent , comportant 13 degrés , de 0 à 12
- Knot: unité de mesure de la vitesse (0,514 m/s)
- Ces mesures aide à caractériser le gisement éolien sur le site considéré. Répétées sur un territoire, elles permettent de caractériser les sites les plus favorables au captage de l'énergie éolienne



Caractéristiques du vent

Distribution de Weibull

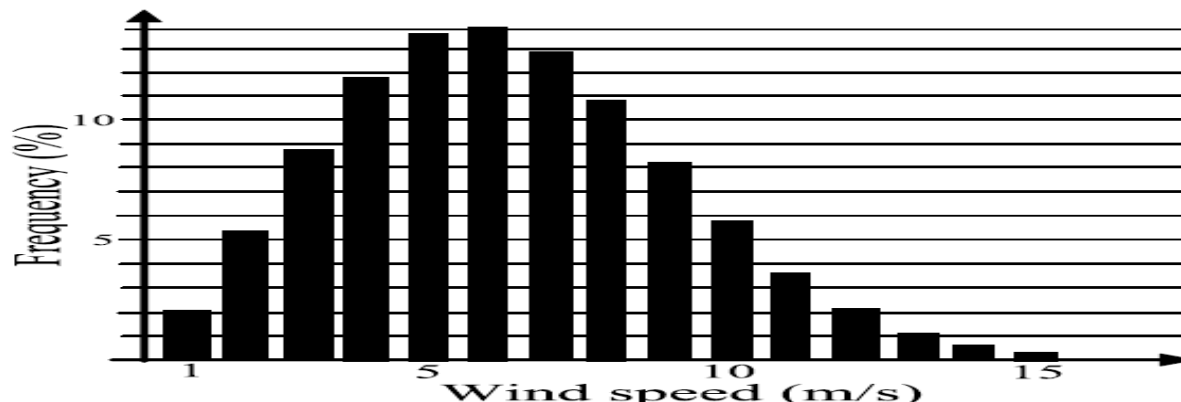
- Les mesures de vitesse sont généralement des valeurs moyennées toutes les 10 minutes.
- Après avoir effectué des mesures sur site pendant un an, la fréquence d'occurrence d'une vitesse de vent spécifique (c'est-à-dire sa probabilité) peut être modélisée mathématiquement par une courbe appelée: distribution de Weibull
- L'expression de la probabilité d'occurrence d'une vitesse v est donnée par:

$$P(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k}$$

Avec: **A** : le facteur d'échelle (m/s);

k : le facteur de forme.

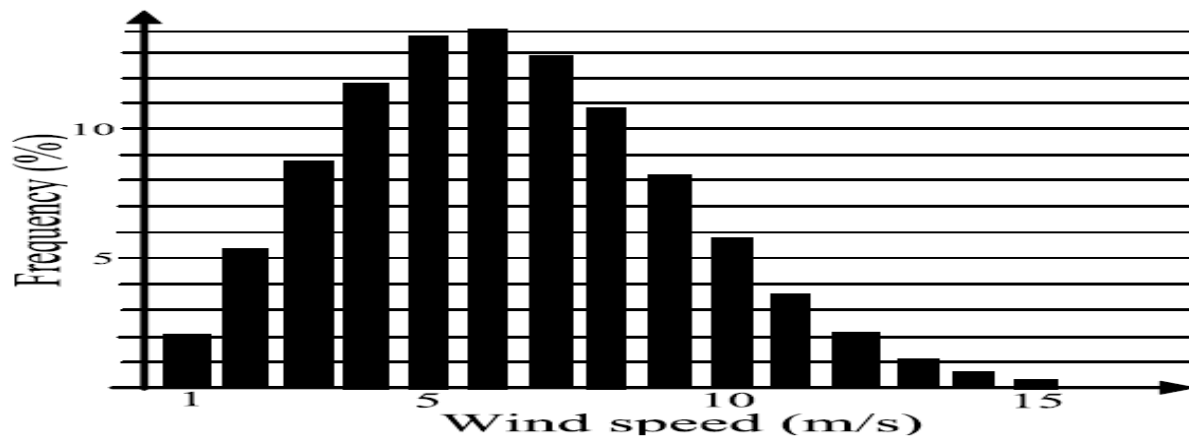
- Le facteur de forme (compris entre 1 et 3) donne une indication sur le climat et le paysage (topographie) du site concerné par la mesure.
- A mesure que le facteur de forme devient de plus en plus élevé, la vitesse du vent fournit moins d'énergie.
- Exemple typique de la distribution de Weibull dans un site donné:



Caractéristiques du vent

Distribution de Weibull

- La distribution de Weibull d'un site permet de déterminer l'énergie qui pourrait être produite, en multipliant la puissance générée par l'éolienne pour chaque valeur de la vitesse du vent (Figure 3.27) par le nombre d'heures que chaque vitesse du vent se produit.
- La courbe de Weibull permet également de déterminer la vitesse du vent pour laquelle une éolienne produira sa puissance nominale.
- Par conséquent, cela nous permet également d'optimiser la conception du système éolien pour la vitesse du vent qui fournit le plus de puissance.
- Pratiquement, les sites les plus intéressants à la production éolienne auront une vitesse de vent régulière comprise entre 6 m/s et 10 m/s.



Caractéristiques du vent

Effet de relief

- La vitesse du vent varie en fonction de la hauteur h à laquelle elle est mesurée et du terrain environnant:

$$v = v_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha$$

v_0 est la vitesse du vent à la hauteur h_0

α est le coefficient de Hellman, qui caractérise les reliefs du site concerné:

- Les reliefs tels que les montagnes, les arbres, les constructions...etc, ont leurs influences sur le vent, en terme de vitesse et de direction.
- Les valeurs typiques de α :
 - ❑ 0,13 sur la mer,
 - ❑ 0,16 sur la rive,
 - ❑ 0,2 sur les plaines
 - ❑ 0,3 dans les villes.

Caractéristiques du vent

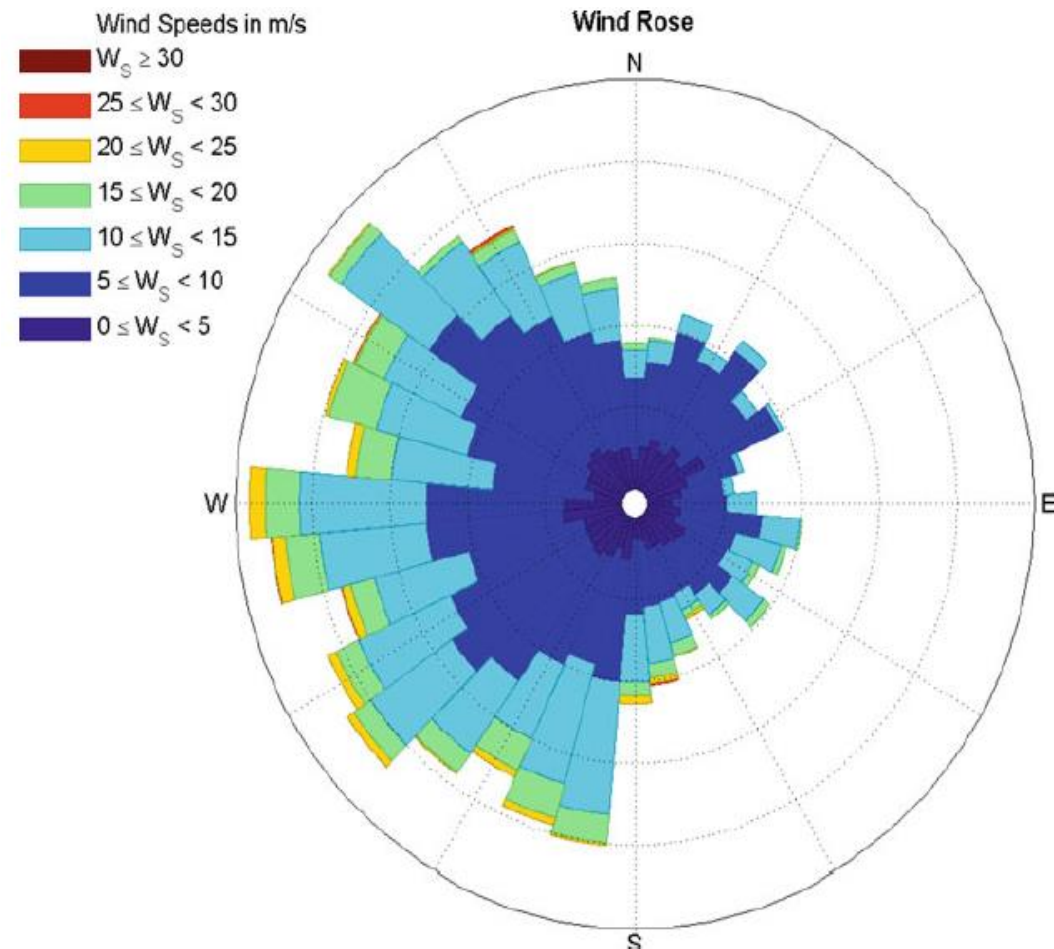
Facteur de charge

- L'utilisation d'une éolienne est caractérisée par le **facteur de charge**, qui est calculé à une période de temps donnée.
- Le facteur de charge annuel est défini par le rapport entre le nombre d'heures de fonctionnement à la puissance nominale (pleine puissance) et le nombre d'heures dans une année (**8 760 heures/an**).
- Par exemple: Une éolienne de **3 MW**, qui a produit un total de **5 256 MWh** en un an aurait produit la même énergie, si elle avait fonctionné à sa puissance nominale pendant **$5\,256 \text{ MWh} / 3 \text{ MW} = 1\,752 \text{ heures}$** . Sachant qu'il y a **8 760 heures** dans une année, son facteur de charge (ou tau de charge) annuel est donc égal à:
$$1\,752 / 8\,760 = 20 \%$$
- A partir de la lecture de la puissance mesurée, le facteur de charge global d'une éolienne peut être calculé sur différentes échelles de temps: Mensuel, journalier...etc.

Caractéristiques du vent

Rose des vents

- Une **rose des vents** est un diagramme polaire, représentant la fréquence de la vitesse du vent en fonction de sa direction au moment des mesures. Exemple: figure.
- Pour cet exemple:
 - ☐ la majorité du vent vient du sud-ouest.
 - ☐ Pour les faibles vitesses du vent ($< 5 \text{ m/s}$), le vent est pratiquement distribuée sur les toutes directions avec le même pourcentage.
 - ☐ Par contre, pour les vitesses plus élevées (correspondantes à la production optimale : 10 à 20 m/s), la majorité du vent vient du sud et de l'ouest.



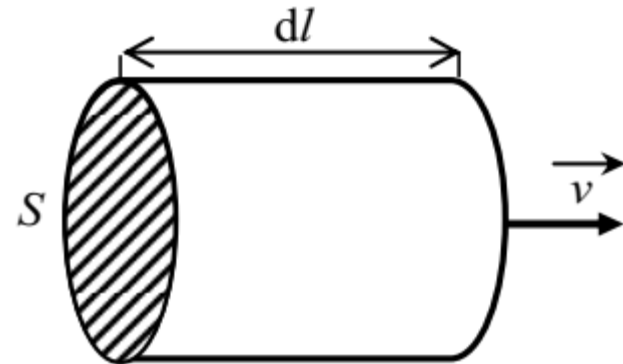
Energie cinétique du vent

- Un tube à vent, à une vitesse v , contient une certaine quantité d'énergie cinétique.
- L'éolienne recevant la section de ce tube à vent va convertir cette énergie cinétique en énergie mécanique.
- Pour calculer l'énergie cinétique du vent, on considère un tube à air de longueur dl , de section S et de densité ρ , qui est entraîné par une vitesse v conformément à la figure.
- L'énergie cinétique de ce tube est exprimée par:
$$W_c = \frac{1}{2}mv^2$$
- m représente la masse totale du volume d'air contenu dans le tube. Cette masse dépend de la longueur du volume considéré, qui peut être exprimée en utilisant la masse volumique de l'air ρ :

avec :

$$dm = \rho S dl$$

$$dl = v dt$$



Energie cinétique du vent

- La densité d'air ρ dépend de la pression p , de la constante du gaz idéal R_a , et de la température de l'air T_{air} :

$$\rho = \frac{P}{R_a T_{air}}$$

- Pour un air sec:

$$R_a = 287,058 \text{ .J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}; \quad P = 101,325 \text{ kPa}$$

- Pour un emplacement donné de l'éolienne, la température est le principal paramètre fluctuant tout au long de l'année ; cela conduit à des variations de densité.
- Dans des conditions normales de température et de pression:

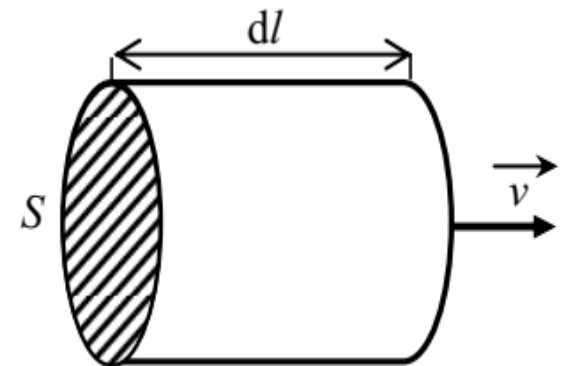
$$\rho = 1,225 \text{ Kg/m}^3$$

- Le déplacement de la masse dm à la vitesse v provoque la variation de l'énergie cinétique du tube d'air, d'une quantité dW_c :

$$dW_c = \frac{1}{2} v^2 dm = \frac{1}{2} v^2 \rho S v dt$$

- La puissance disponible dans ce tube est alors:

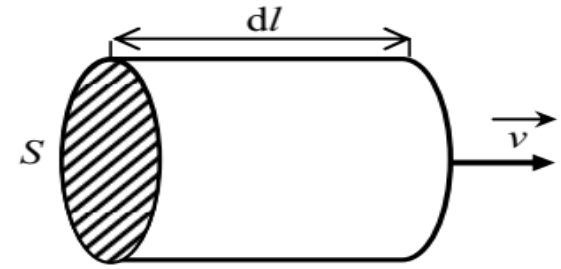
$$P_v = \frac{dW_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S v^3$$



Energie cinétique du vent

- Cette relation de puissance

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v^3$$



Montre qu'une faible variation de la vitesse du vent se traduit par une variation importante de la puissance, car cette vitesse apparaît au cube.

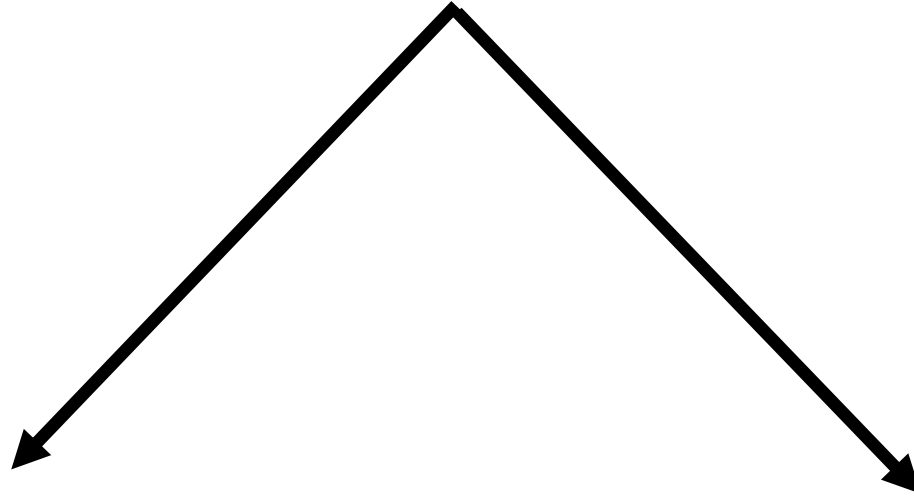
- L'augmentation de la vitesse du vent de 10% provoque une augmentation de sa puissance de 33%.
- La puissance disponible par m^2 pour une vitesse de vent de 36 km/h (10 m/s) est égale à:

$$\frac{P_s}{S} = \frac{1}{2} \rho v^3 = 625 \text{ W/m}^2$$

- Capturer la puissance du vent dans sa totalité par une éolienne supposerait que la vitesse du vent en sortie de l'éolienne soit nulle.
- Cependant, nous ne savons pas comment faire cela avec nos connaissances actuelles.

Turbines éoliennes

Les turbines éoliennes



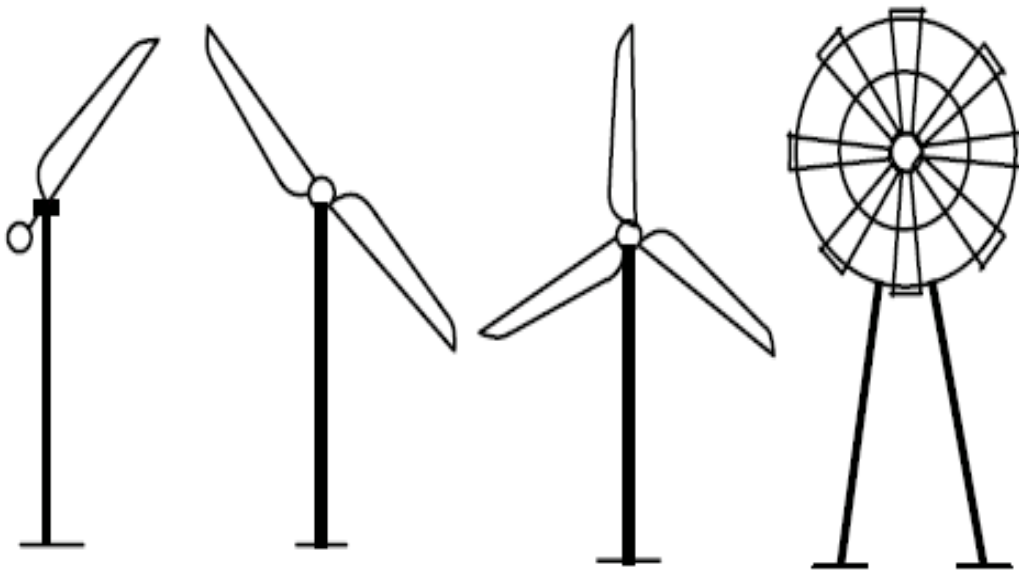
les turbines à axe horizontale

les turbines à axe verticale

Turbines éoliennes

Turbines à axe horizontale

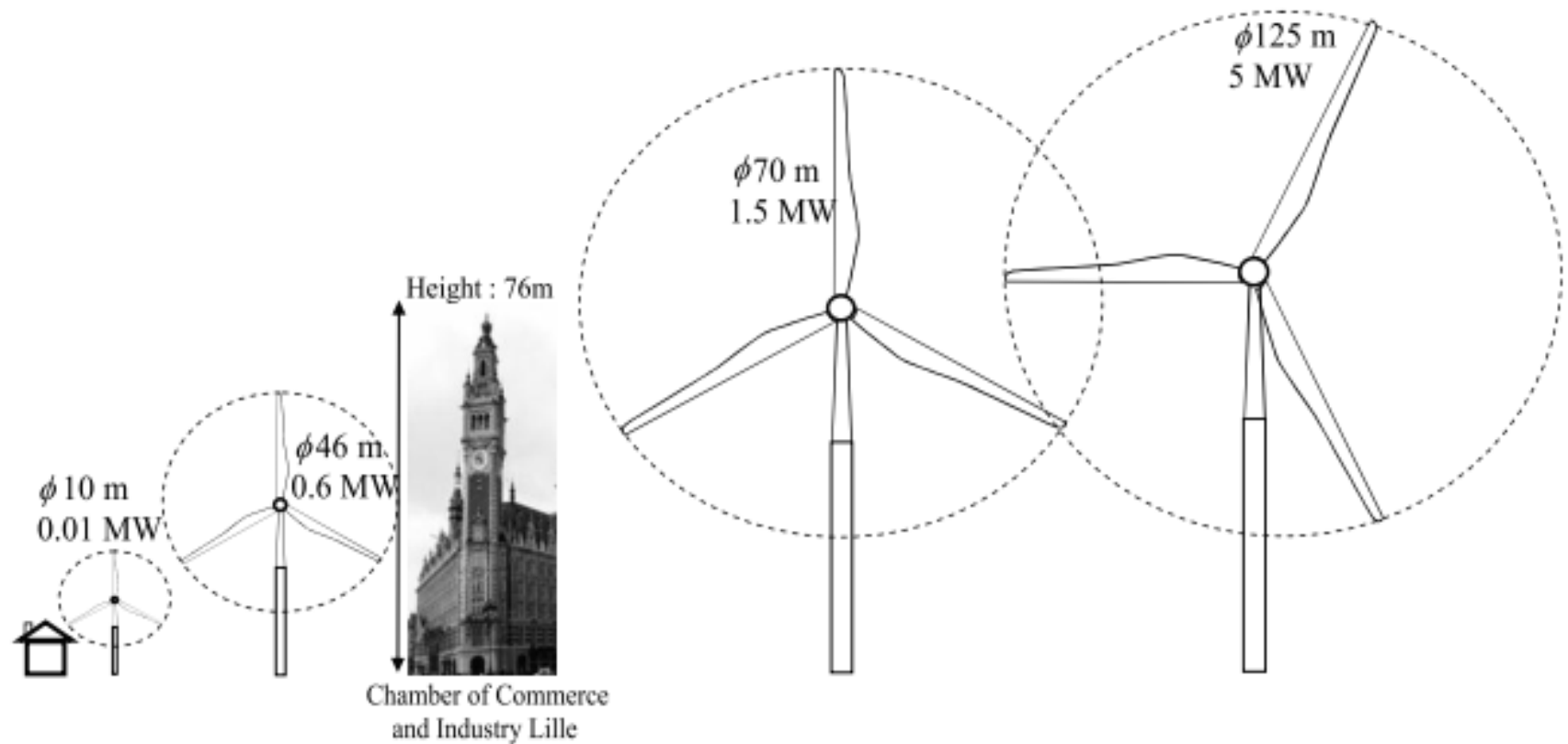
- La plupart des éoliennes actuellement installées ont un axe horizontal.
- La turbine est composée des pales assemblées sur un axe de rotation horizontale.
- Les éoliennes à axe horizontal sont composées d'une ou plusieurs pales.
- La turbine à trois pales est la plus utilisée, car elle donne le meilleur compromis entre la puissance convertie, le coup, l'équilibre de la turbine, ainsi que le confort visuel et esthétique.



Turbines éoliennes

Turbines à axe horizontale

- La puissance développée par une turbine à axe horizontale est proportionnelle à la taille (le diamètre) de la turbine



Turbines éoliennes

Turbines à axe horizontale

Rendement et coefficient de puissance

- La turbine extrait une puissance mécanique P_m , inférieure à la puissance du vent P_v , du fait que la vitesse de la masse d'air n'est pas nulle derrière la turbine.
- Nous définissons alors le coefficient de puissance de la turbine (ou le rendement aérodynamique) par:

$$C_p = \frac{P_m}{P_v}; C_p < 1$$

- La puissance captée par la turbine, P_m est exprimée par:

$$P_m = C_p \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3$$

- Il est montrée, en se basant sur le théorème de Bernoulli et la mécanique des fluides, que le coefficient de puissance C_p ne peut pas dépasser la valeur $\frac{16}{27} = 0,5925$
- le coefficient de puissance C_p dépend du rapport de la vitesse de pointe, définie par:

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_t}{v}$$

Ω_t : vitesse de rotation de la turbine; v : vitesse du vent; R : rayon de la turbine

$R\Omega_t$: vitesse linéaire (tangentielle) du bord de la turbine

Turbines éoliennes

Turbines à axe vertical

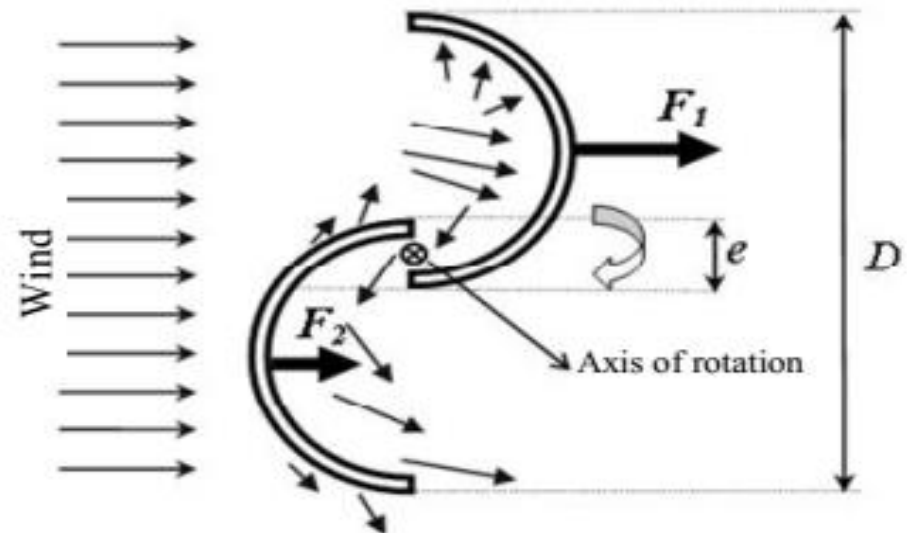
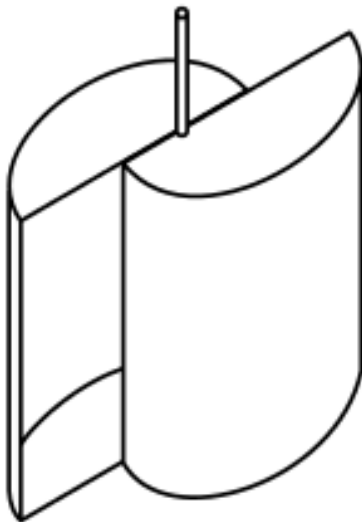
- Les éoliennes à axe vertical captent la vitesse du vent quelle que soit sa direction ; il n'y a donc pas besoin de dispositif d'orientation du rotor, comme dans le cas des éoliennes à axe horizontal.
- Les turbines verticales offrent la possibilité d'accueillir, à leur fondation, l'ensemble du dispositif de conversion d'énergie (générateur, multiplicateur, etc.), facilitant ainsi les opérations de maintenance.
- Il existe deux types principaux des turbines à axe verticale : Les **turbines Savonius**, et les **turbines Darrieus**.

Turbines éoliennes

Turbines à axe vertical

Turbine Savonius

- La turbine Savonius est composée de deux ou plusieurs demi-cylindres arrangés en S.
- La force F_1 frappant la concave est plus importante que la force F_2 frappant la convexe, ce qui provoque la rotation de la turbine
- Le rotor Savonius se caractérise par une faible vitesse de rotation et un couple élevé.



Turbines éoliennes

Turbines à axe vertical

Turbine Savonius

- Actuellement, ces turbines ont évolué vers des dispositifs utilisant plusieurs étages de demi-cylindres ou une forme torsadée. Ils permettent une circulation continue des flux à l'intérieur de la turbine, et une amélioration du coefficient de puissance et du couple de démarrage qui devient indépendant de la direction initial par rapport au vent.

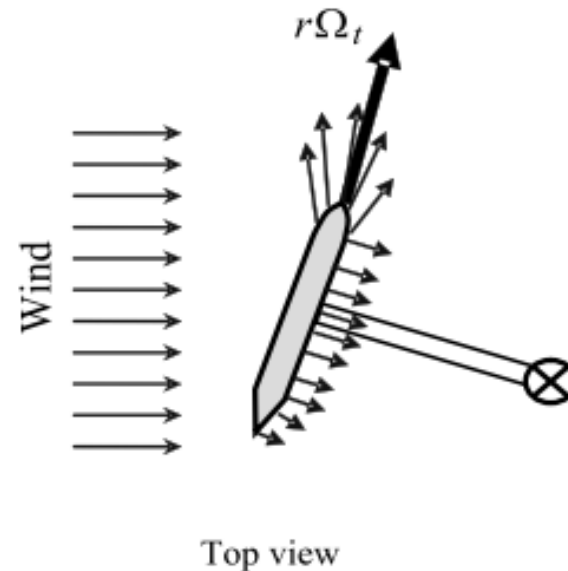
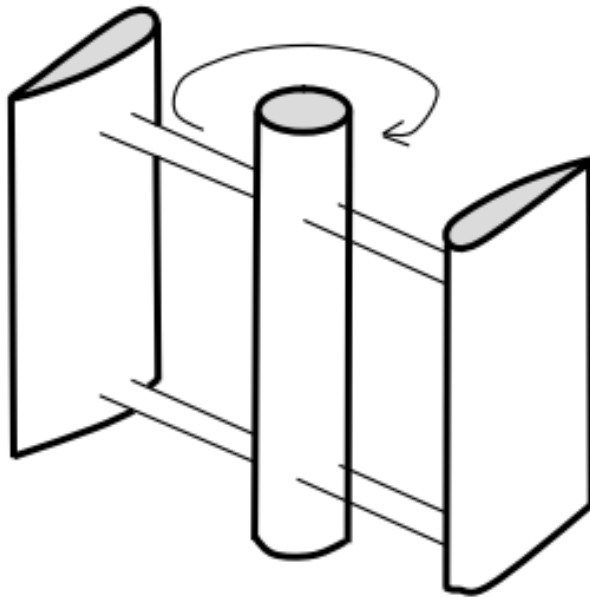


Turbines éoliennes

Turbines à axe vertical

Turbine Darrieus

- La turbine Darrieus est composée des ailes placées sur une périphérie circulaire, suivant différents angles. Ces ails sont soumis à des efforts de vent d'intensités différentes, ce qui provoque la rotation de la turbine.
- Le rendement des turbines Darrieus est généralement supérieur au rendement des turbines Savonius.



Turbines éoliennes

Turbines à axe vertical

Turbine Darrieus

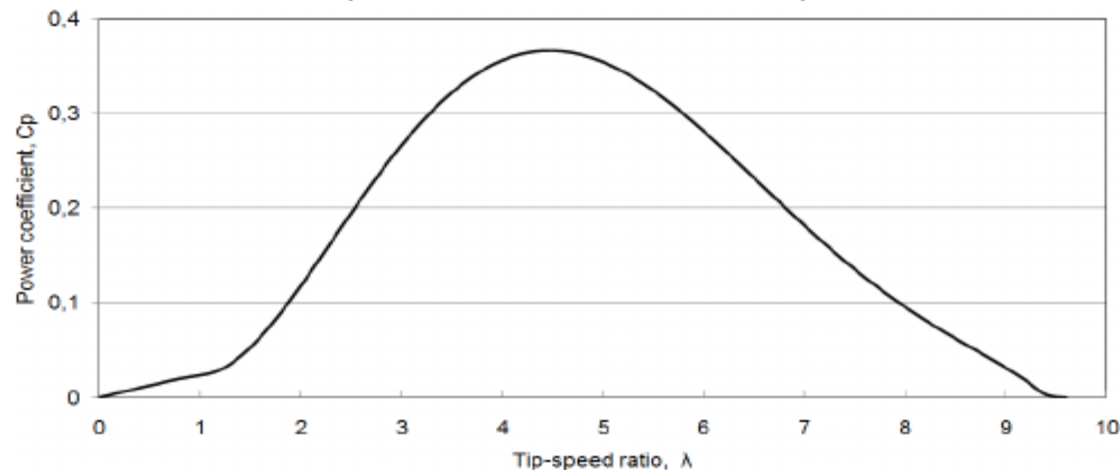
- Il existe une grande variété des formes des turbines Darrieus, basée sur le même principe
- Les éoliennes Darrieus sont les plus adaptées à certains secteurs, comme l'intégration dans les bâtiments, les zones extrêmes (observatoires, aérodromes, etc.).
- Les turbines Darrieus ont un rendement inférieur aux éoliennes à axe horizontal, mais elles permettent de contourner les limites résultant de la taille des pales et de la vitesse de rotation. L'encombrement global est plus faible et dans certains cas où la machine électrique est située au pied de l'éolienne, ce type d'éoliennes est plus économique.
- Le principal défaut de ce type d'éolienne est leur démarrage difficile, à cause du poids du rotor qui prend appui sur sa base.



Turbines éoliennes

Caractéristique d'une turbine

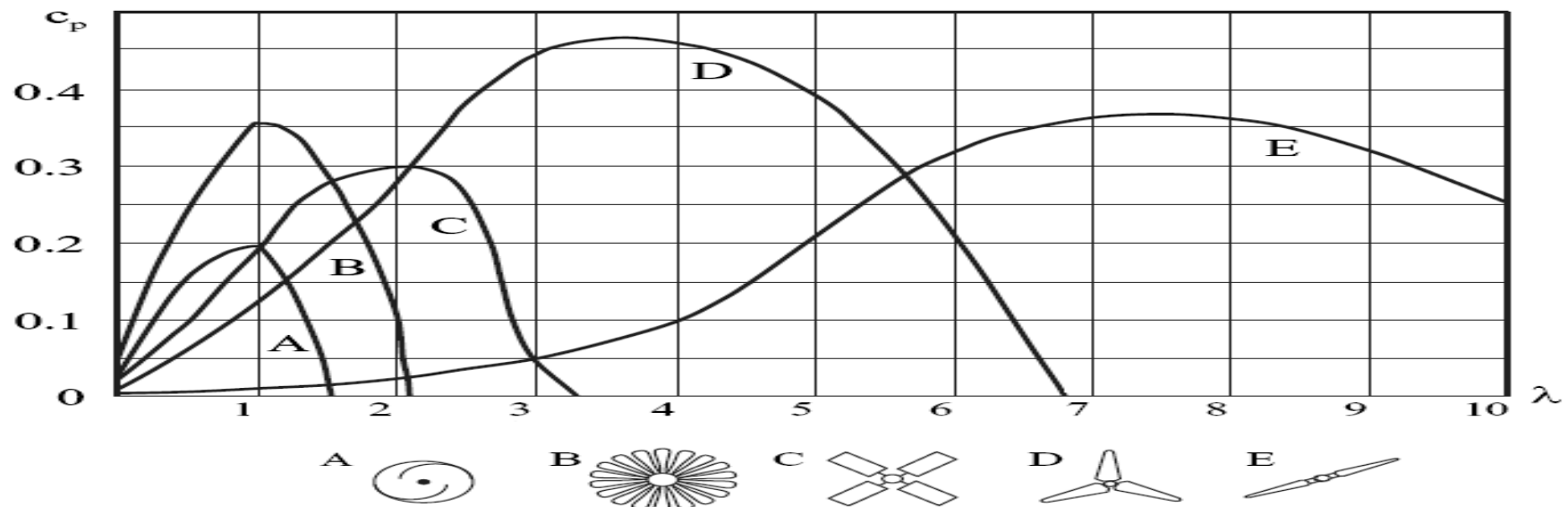
- La caractéristique de la turbine est la relation entre le coefficient de puissance C_p est le rapport de la vitesse de pointe λ ,
- Le coefficient de puissance augmente initialement avec l'augmentation de λ .
- La courbe passe par un maximale, correspondant à une valeur particulière de λ , qui est la valeur optimale. Pour une vitesse de vent donné v , cette valeur optimale correspond à une vitesse de rotation optimale Ω_t
- Au-delà de la valeur optimale de λ , le coefficient de puissance commence à diminuer avec l'augmentation de λ .
- La puissance captée par la turbine a la même allure que celle du coefficient de puissance. Elle passe par un point maximale, correspondant à une valeur optimale de λ .



Turbines éoliennes

Comparaison entre des turbines de types divers

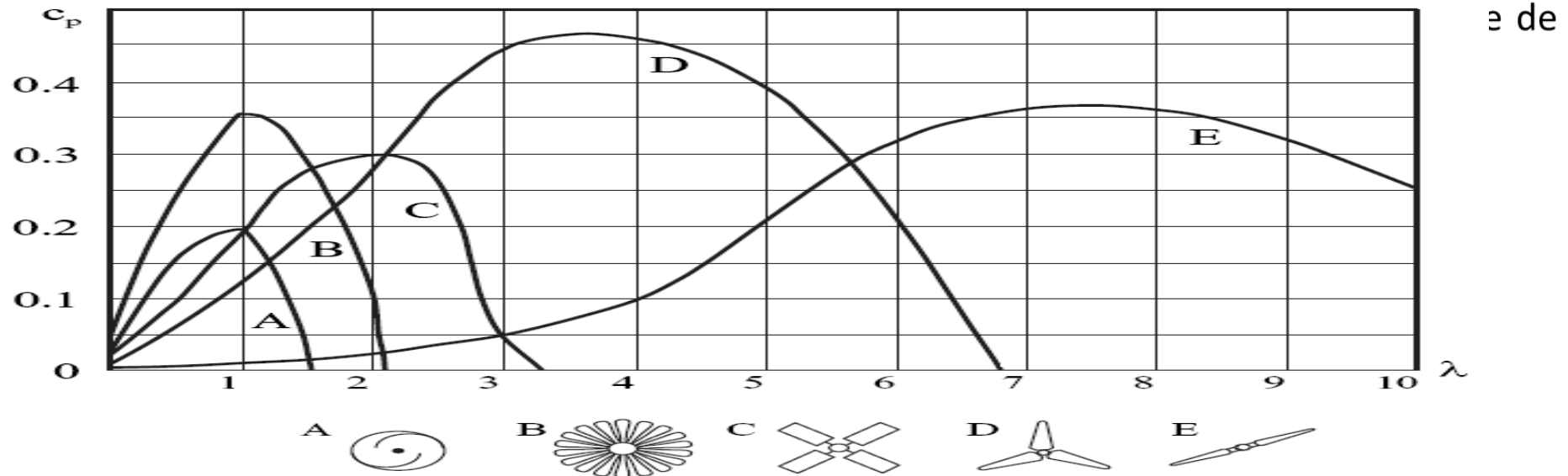
- On peut comparer des turbines de types divers en examinant leur caractéristiques, c.à.d. les courbes de leurs coefficients de puissance C_p en fonction de leurs rapport de vitesse de pointe λ (figure: exemple de comparaison)
- On peut remarquer que toutes ces courbes passent par un maximum, ce qui révèle l'existence d'une vitesse de rotation optimale, à une vitesse de vent donnée.
- Plus la valeur optimale de λ est élevée, plus la vitesse de rotation optimale à un diamètre de turbine donné devient élevée.



Turbines éoliennes

Comparaison entre des turbines de types divers

- La turbine A est une turbine Savonius à axe vertical. Les turbines B et C sont des turbines à axe horizontal multipales . Les turbines D et E sont des éoliennes modernes à trois et deux pales.
- Une faible valeur du rapport de vitesse de pointe λ correspond à une turbine à faible vitesse.
- Avec moins de pales, une éolienne à axe horizontal a une vitesse de rotation optimale plus élevée.
- La turbine D (à trois pales) est donc un bon compromis (pour des vitesses de vent moyennes) et apporte le meilleur rendement.



Turbines éoliennes

Comparaison entre des turbines de types divers

- La réduction du nombre de pales permet de réduire les coûts de fabrication et d'installation.
- L'inconvénient d'une éolienne à une ou deux pales est qu'elle doit tourner plus vite.
- Cela réduit la durée de vie des composants mécaniques et crée une puissance plus irrégulière: En effet, lorsqu'une pale pénètre dans la zone aérodynamique protégée située juste devant la tour, la puissance instantanée captée par la turbine diminue significativement (phénomène d'ombre de la tour).

