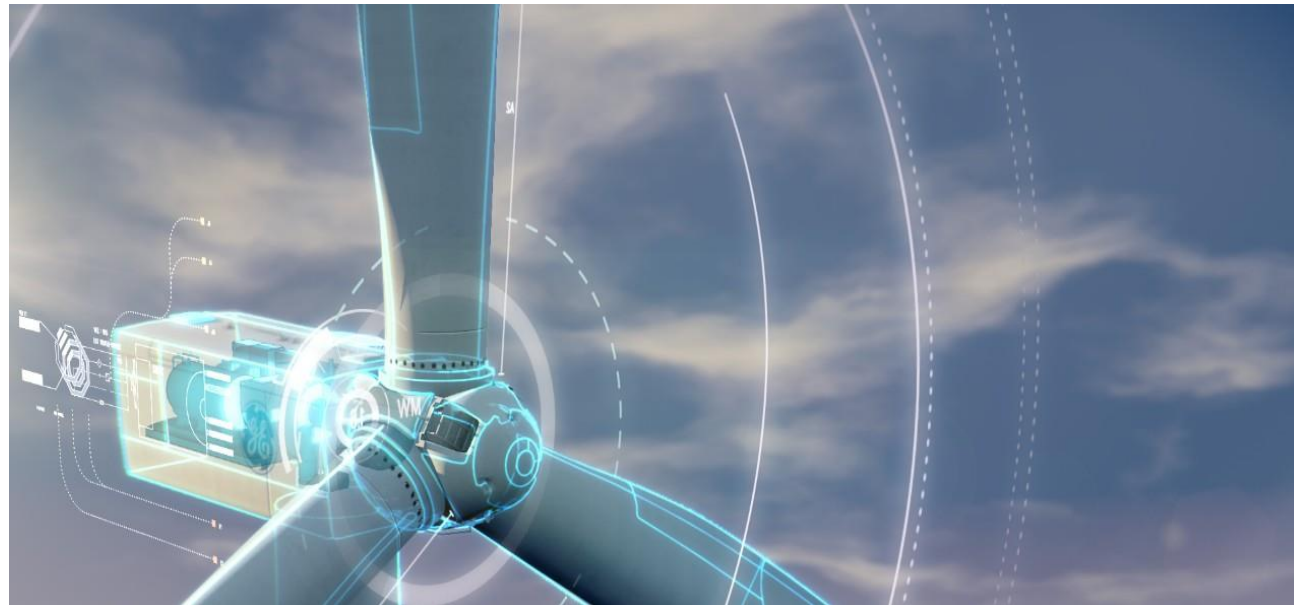




Université Sidi Mohammed Ben Abdellah
Ecole Supérieure de Technologie – Fès



Energie éolienne



Plan et Objectifs

- ✓ Introduction
- ✓ généralités sur le vent
- ✓ Récolte de l'énergie du vent
 - Conversion aéromécanique
 - Conversion mécanique
 - Conversion électromécanique
- ✓ Utilisation des éoliennes

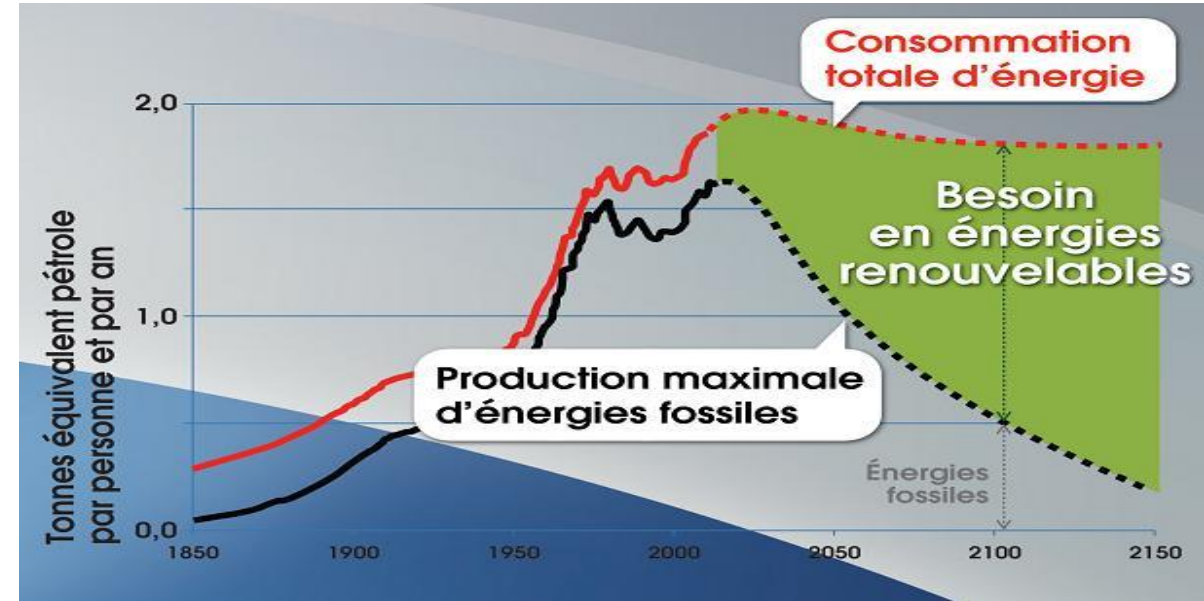
Introduction

Quels sont les principaux problèmes liés à l'utilisation des énergie fossiles ?

- ✓ Ressources épuisables : Pétrole (40 ans), Gaz (60-70 ans), Charbon (200 ans)
- ✓ Dépendance conflictuelle (génère des conflits)
- ✓ Ressources polluantes (++effet de serre)

Qu'est ce qu'une énergie renouvelable ?

- ✓ Inépuisables et non(moins) polluantes que les énergies fossiles
- ✓ Issues de phénomènes naturels réguliers ou constants
- ✓ Mieux réparties dans le monde

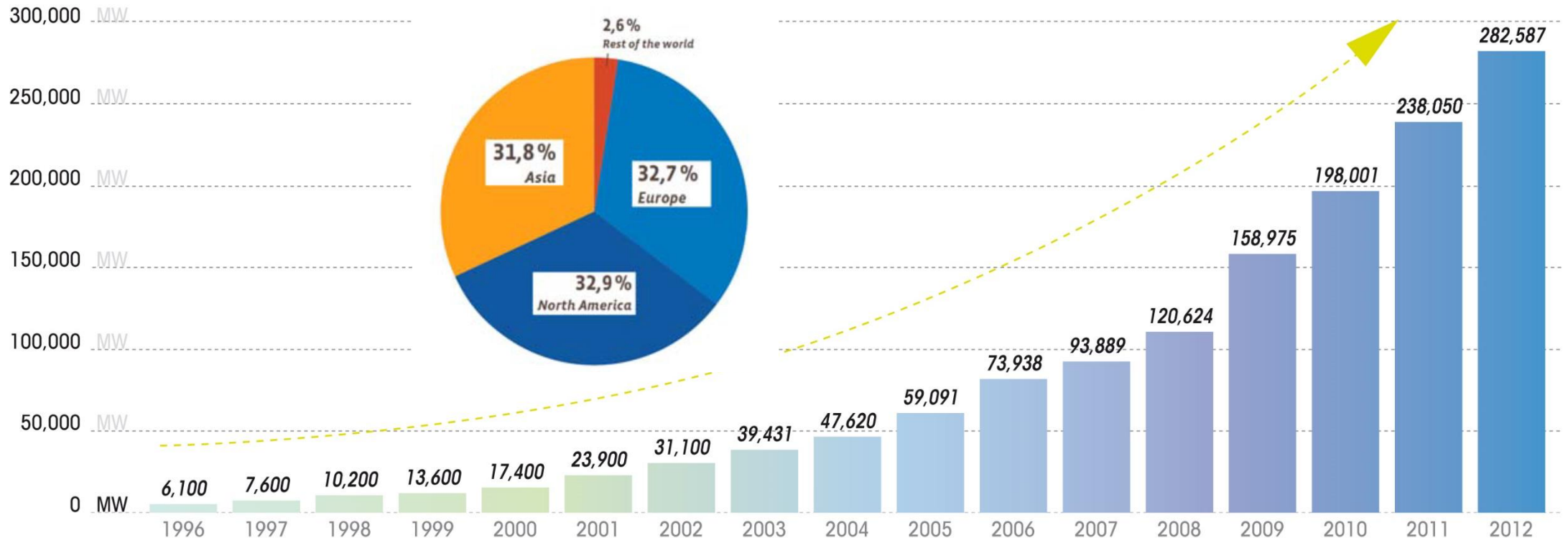


Introduction

Evolution mondiale de la puissance installée d'origine éolienne

Evolution de la capacité installée dans le monde depuis 1996

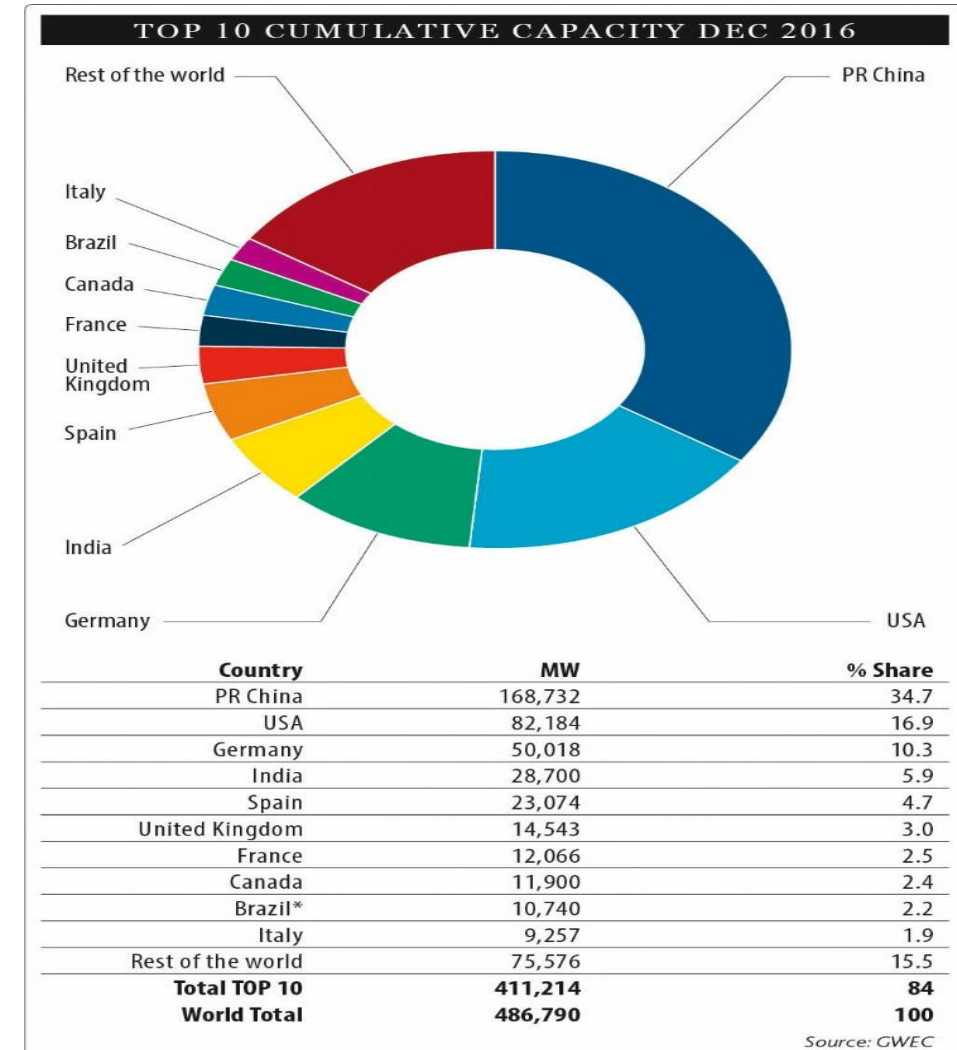
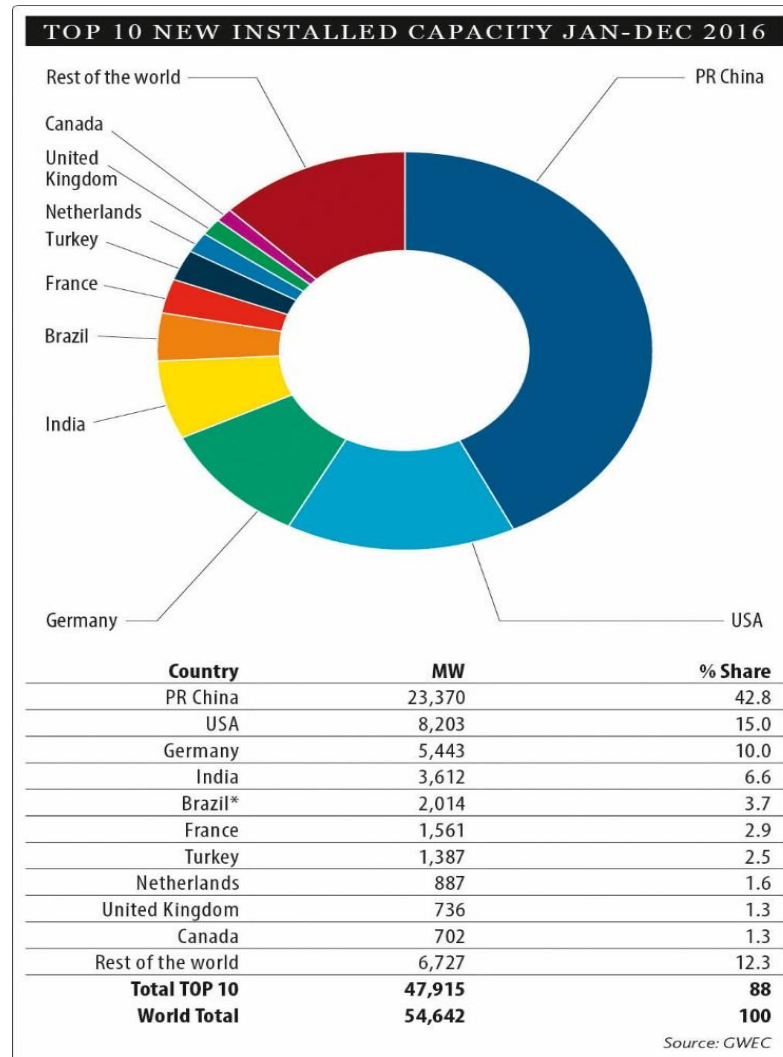
Source GWEC.



Introduction

Statistiques concernant la puissance moyenne mondiale de production électrique

(2016)



Introduction

Gisement marocain terrestre

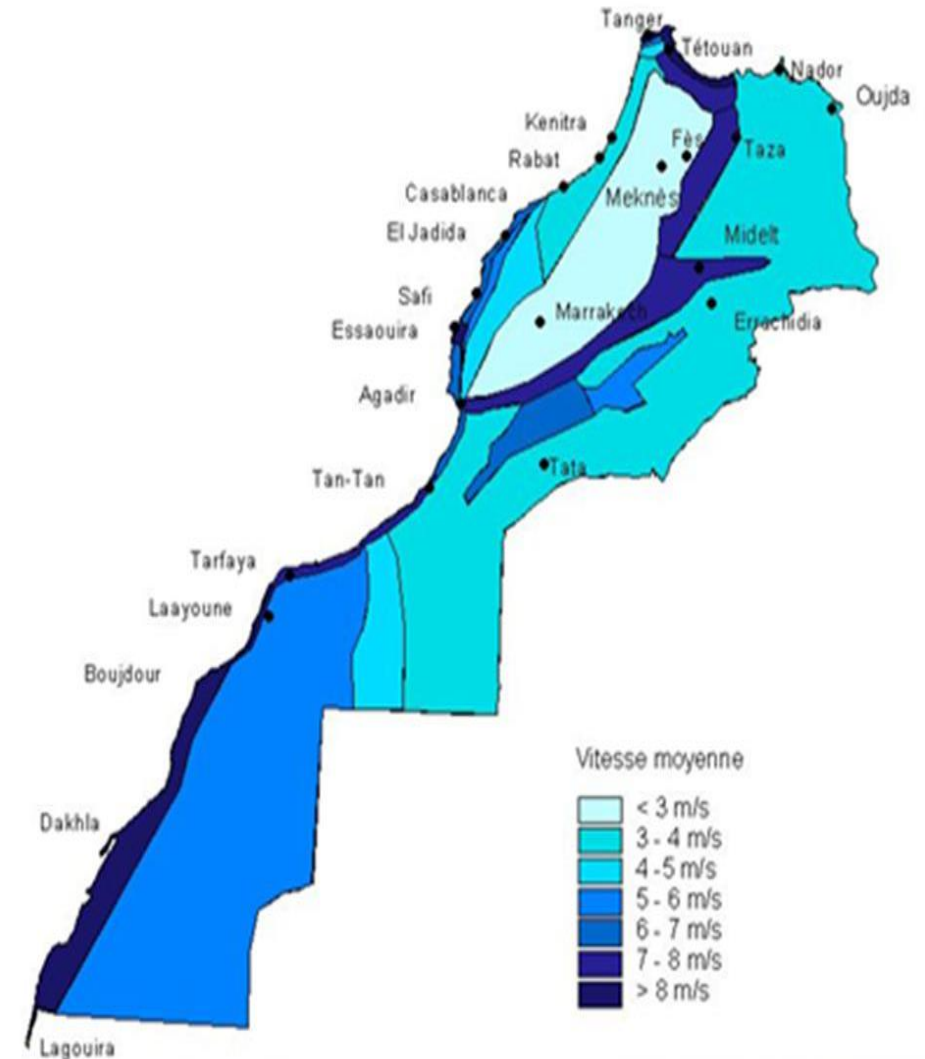
Sur le plan éolien, le pays présente le 31ème potentiel mondial

La vitesses de vent maximale peut aller jusqu'à 11m/s.

Régions les plus ventées :

- ✓ Extrême nord dans les région de gibraltar
- ✓ Région de Essaouira
- ✓ Zone atlantique sud de Tarfaya à Lagouira
- ✓ Couloir de Taza entre les chaine montagneuse de l'Atlas et du rif

Le potentiel technique éolien au Maroc est estimé à environ 25 000MW



Introduction

Situation au Maroc



Parc opérationnel (887 MW)



Parc en cours de développement (1120 MW)

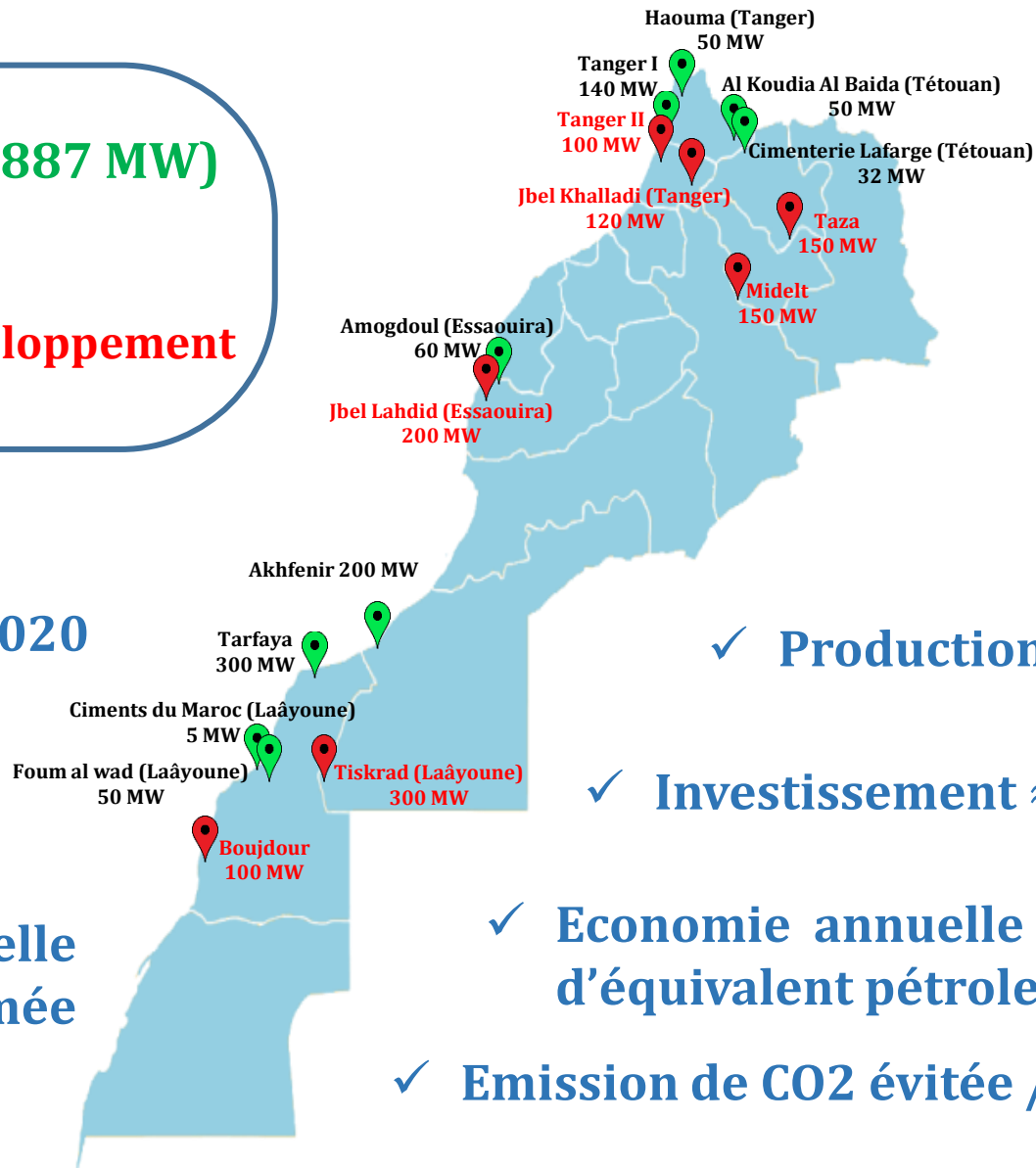


Capacité totale d'ici 2020

≈

2000MW

une capacité additionnelle de 1000 MW est programmée entre 2021 et 2025.



✓ Production électrique ≈ 6600 GWH

✓ Investissement ≈ 3.5 milliards \$

✓ Economie annuelle ≈ 0.57 millions TEP (tonne d'équivalent pétrole)

✓ Emission de CO2 évitée /an ≈ 5.6 millions tonnes

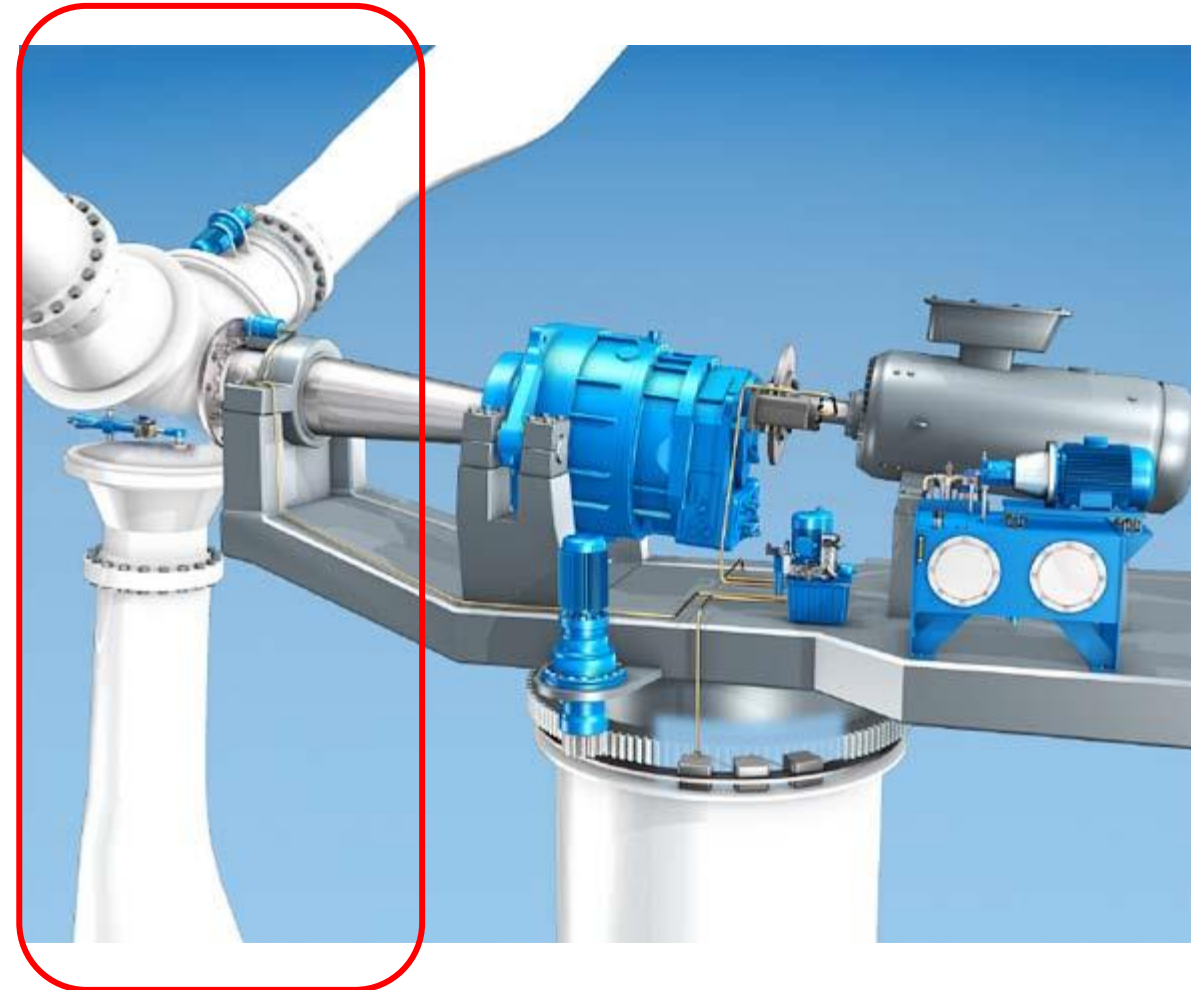
Introduction

Composants d'une éolienne et principe de fonctionnement

Une éolienne est composée de 4 éléments principaux :

Le rotor : c'est la partie entraînée par le vent il est placé en haut afin de capter les vents forts et réguliers. Il est composé de :

- **Les pales** : captent une partie de l'énergie du vent et la transférée vers le moyeu du rotor. le profil des pales détermine le rendement du rotor ainsi le diamètre des pales est déterminé en fonction de la puissance désirée
- **Le moyeu** : appelé aussi « nez », il reçoit les pales et se monte sur l'arbre lent de multiplicateur

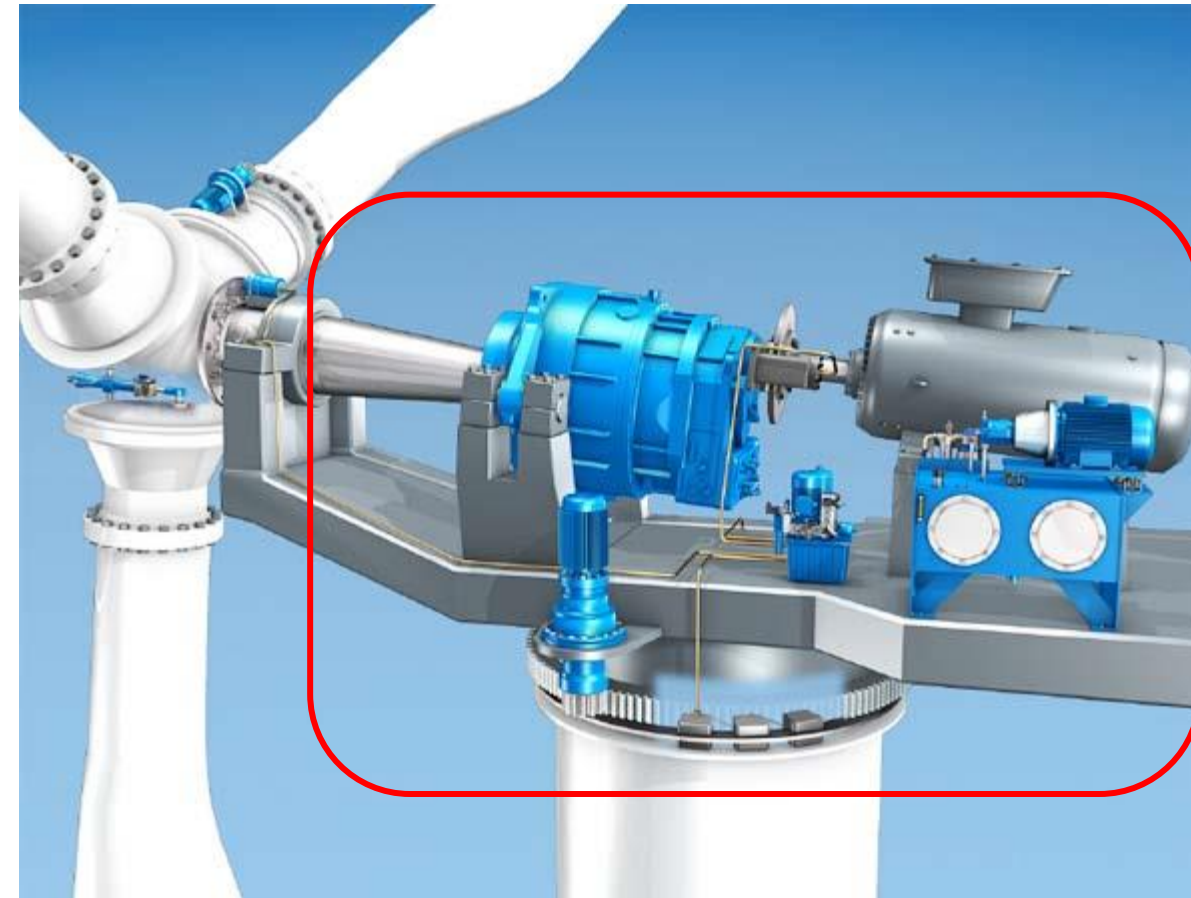


Introduction

Composants d'une éolienne et principe de fonctionnement

La nacelle : Elle est montée au sommet du mât, abritant les composants mécaniques, pneumatiques, certains composants électriques et électroniques:

- **Le multiplicateur** : permet d'adapter la vitesse de rotation lente du rotor à la vitesse de fonctionnement de la génératrice.
- **La génératrice électrique** : transforme l'énergie mécanique issue du multiplicateur en énergie électrique
- **Système d'orientation** : permet d'orienter l'ensemble (rotor+nacelle) de sorte que celui-ci soit toujours orienté face au vent.
- **Frein mécanique** : placé sur l'arbre rapide. Il n'est actionné qu'en cas d'urgence ou lorsque l'éolienne est réparée ou maintenue.



Introduction

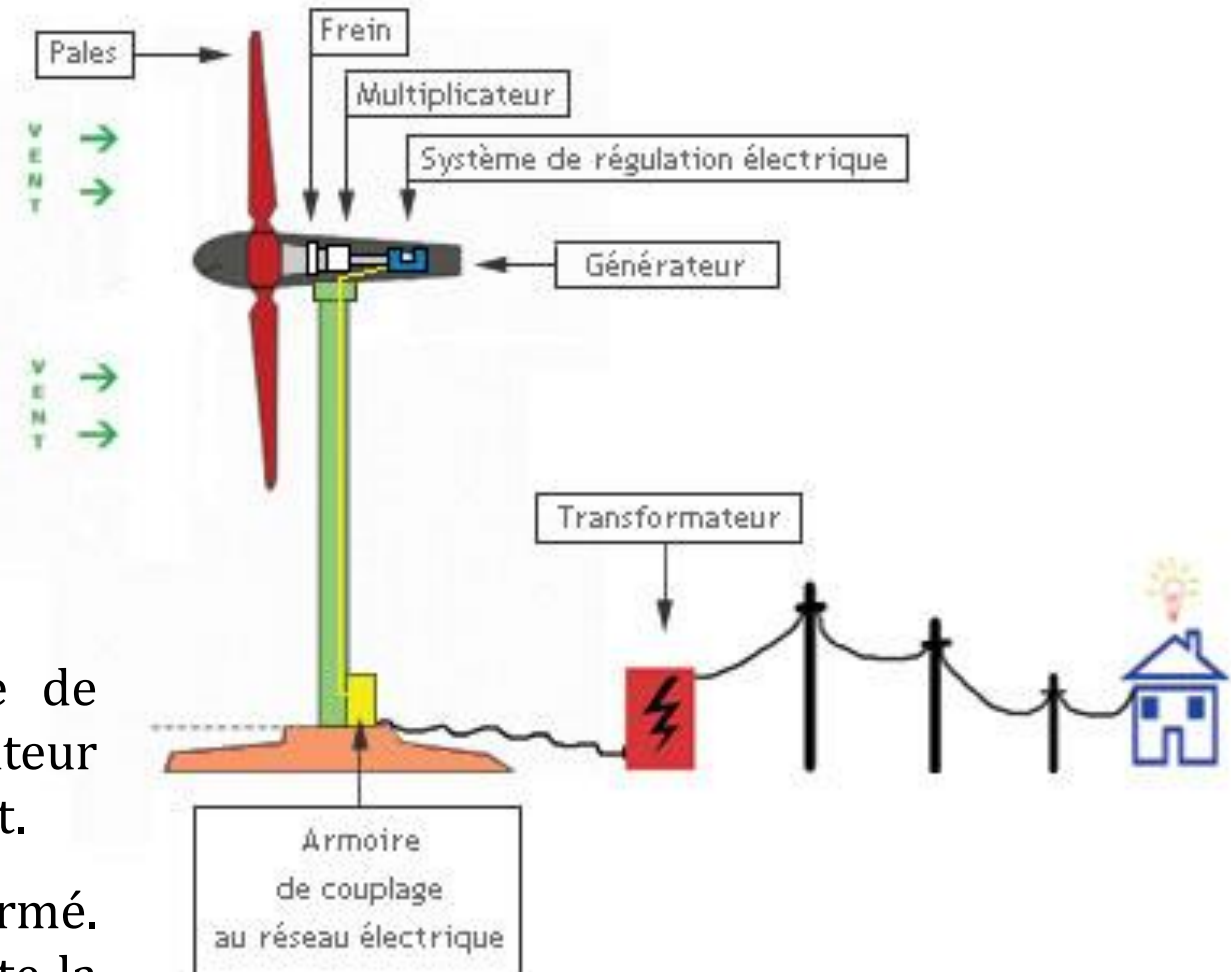
Composants d'une éolienne et principe de fonctionnement

Sur le toit de la nacelle, on trouve :

- **Anémomètre** : pour mesurer la vitesse du vent.
- **Girouette** : indique la direction du vent.
- **Feu d'obstacle** : permet au trafic aérien de repérer l'éolienne à distance.
- **Paratonnerre** : protège l'éolienne contre la foudre.

Le mât : Son rôle est de supporter la masse de l'ensemble (rotor + nacelle), et placer le rotor à une hauteur suffisante, là où le vent est le plus constant et le plus fort.

Les fondations : est généralement conçue en béton armé. Elle doit être assez solide pour permettre de fixer toute la structure de l'éolienne.

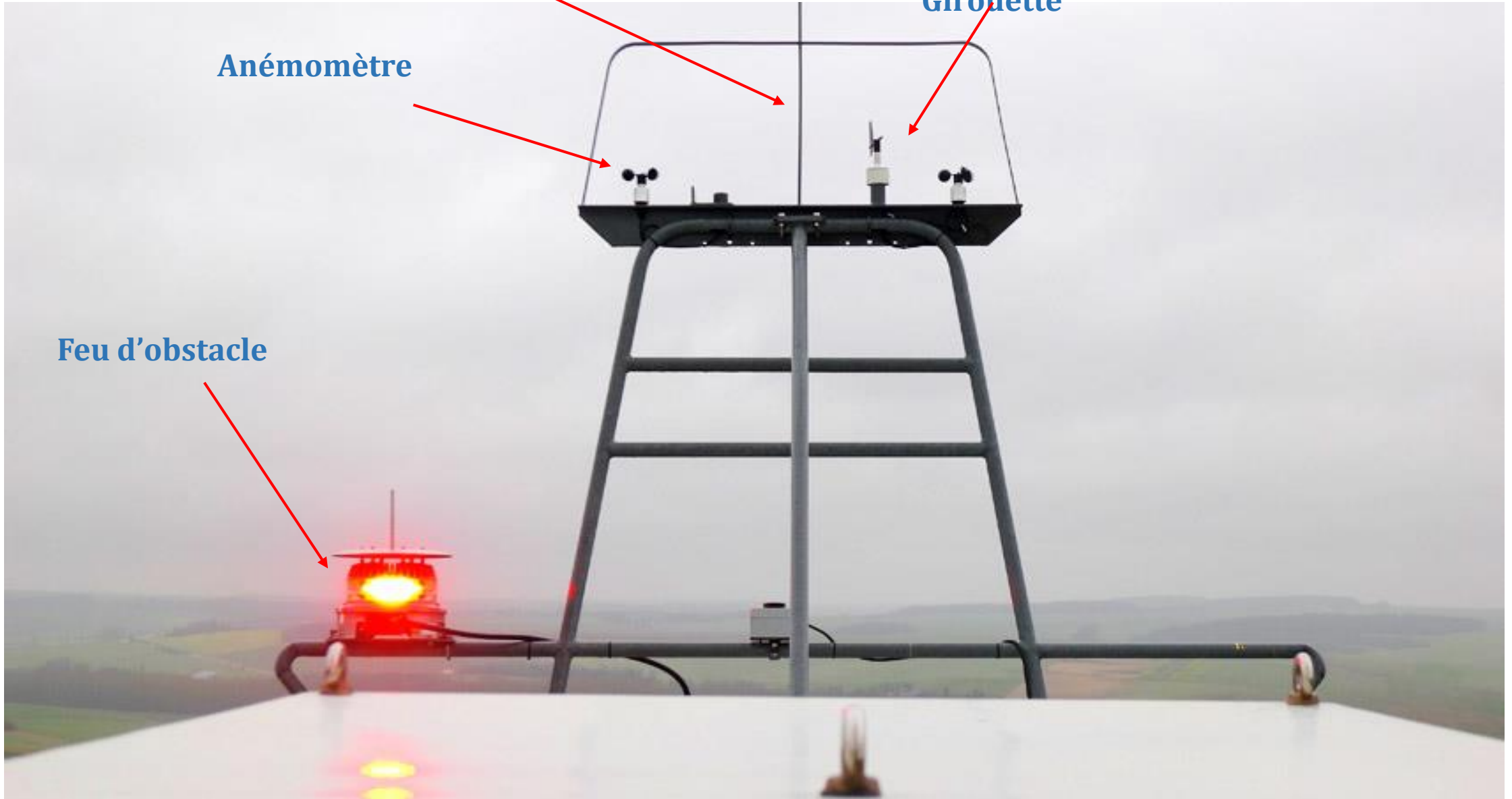


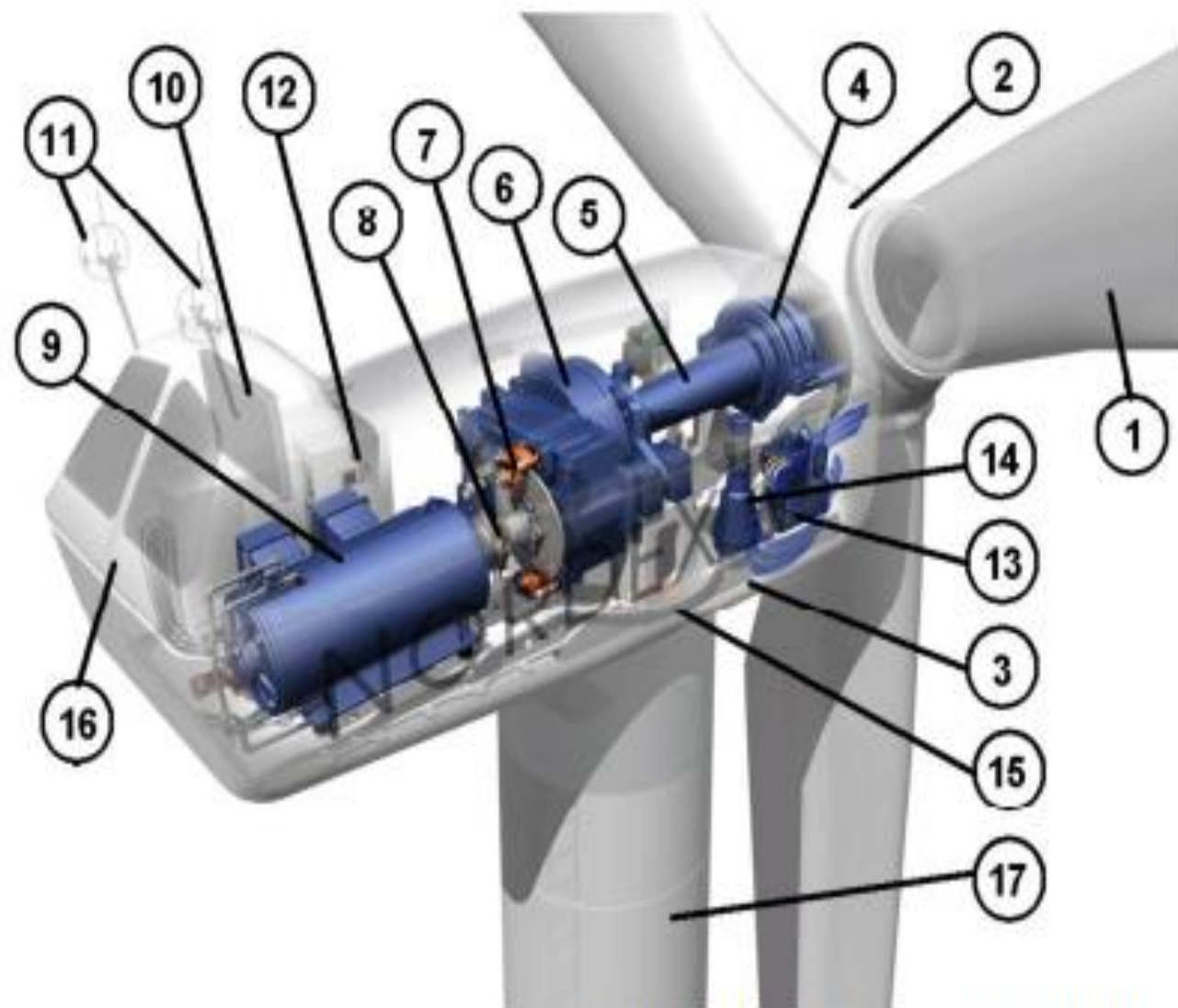
Paratonnerre

Girouette

Anémomètre

Feu d'obstacle





- 1 : Pales
- 2 : Moyeu
- 3 : Structure de la turbine
- 4 : Paliers du rotor
- 5 : Arbre lent
- 6 : Multiplicateur
- 7 : Frein à disque
- 8 : Accouplement
- 9 : Génératrice
- 10 : Radiateur de refroidissement
- 11 : Systèmes de mesure
(anémomètre et girouette)
- 12 : Système de contrôle
- 13 : Système hydraulique
- 14 : Entraînement d'orientation
- 15 : Paliers du système d'orientation
- 16 : Capot de la nacelle
- 17 : Tour

Figure 10 – Composition de la nacelle

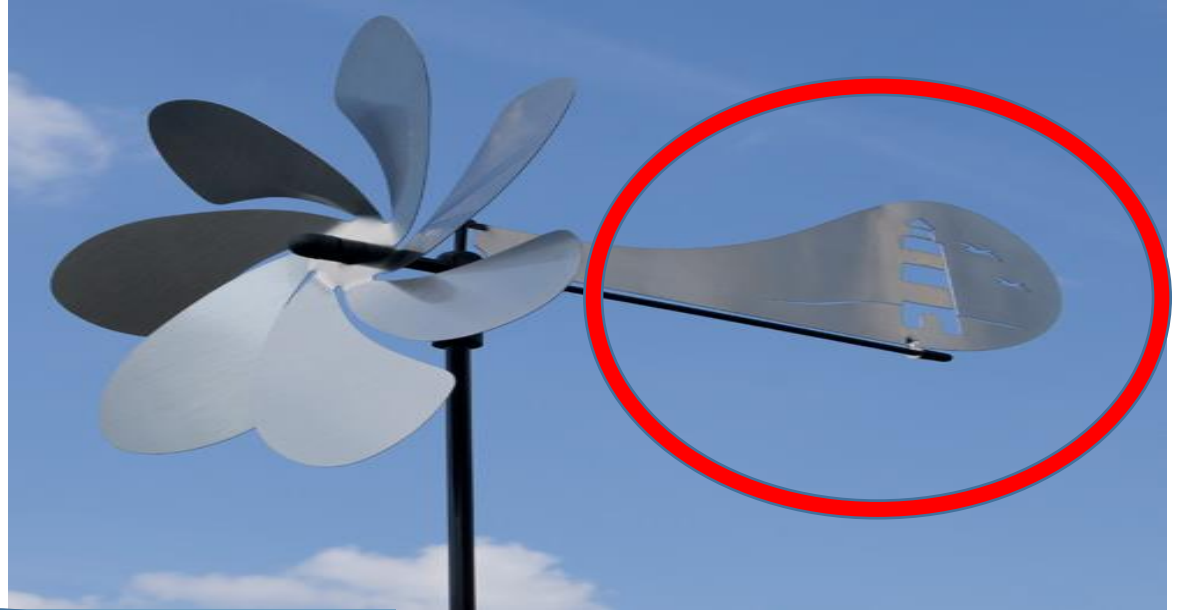


Fig9:Anémomètres

Anémomètres à ultrasons : mesurent la composante horizontale de la vitesse et la direction, tout comme la température acoustique virtuelle.

Anémomètres Propeller : mesurent le flux d'air horizontal et vertical.

girouette



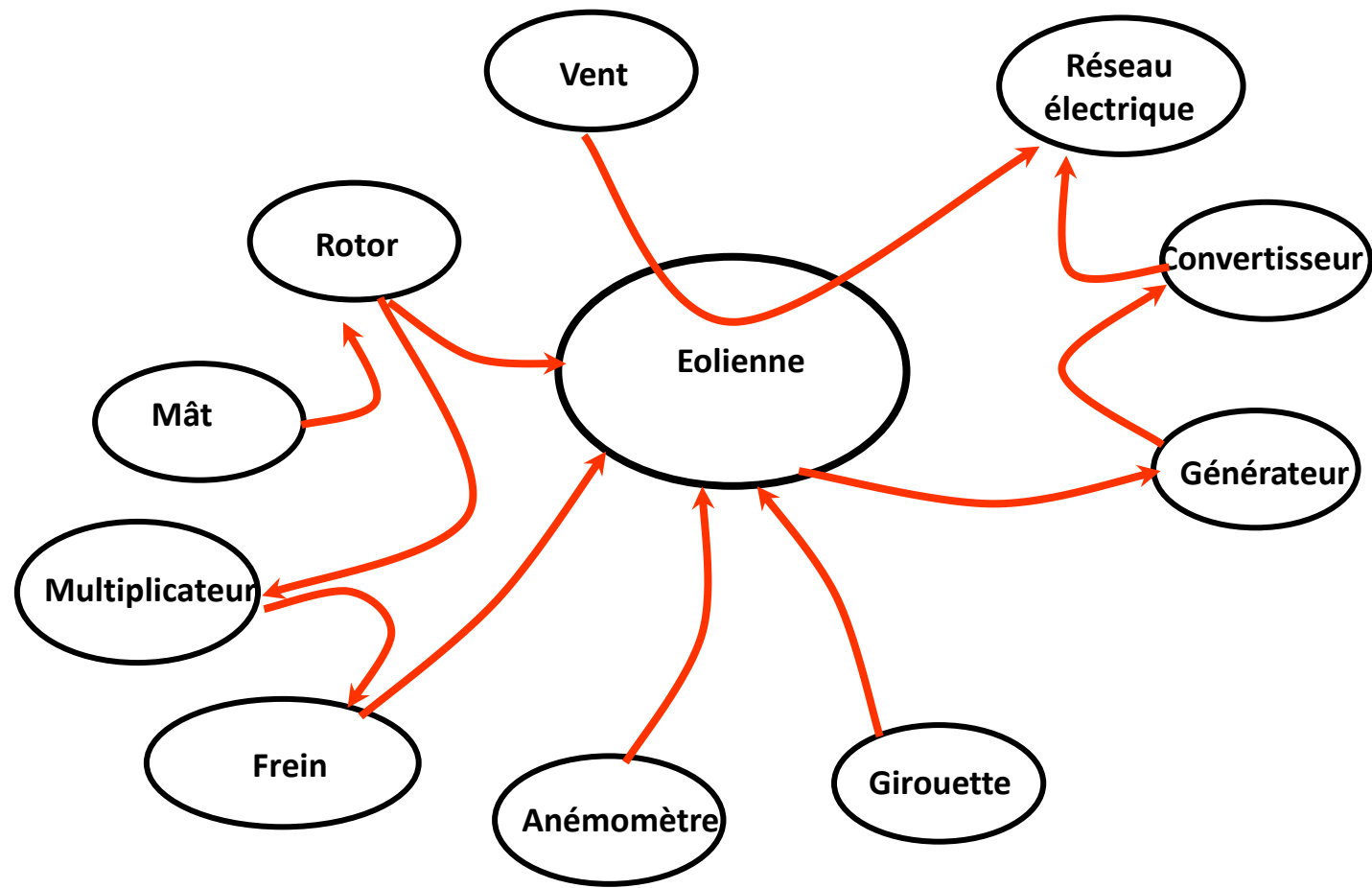
Feu d'obstacle



Paratonnerre



Constitution



Introduction

Types et Tailles

Il existe 2 types principaux (Selon la position géométrique d'arbre) :

➤ **Eolienne à axe horizontal :**



➤ **Eolienne à axe vertical :**



Introduction

Types et Tailles

Considérons deux éoliennes de même puissance nominale (1 kW) et fabriquées par la même compagnie chinoise “Quingdao Hongkun Wind Power Equipment, Ctd”.

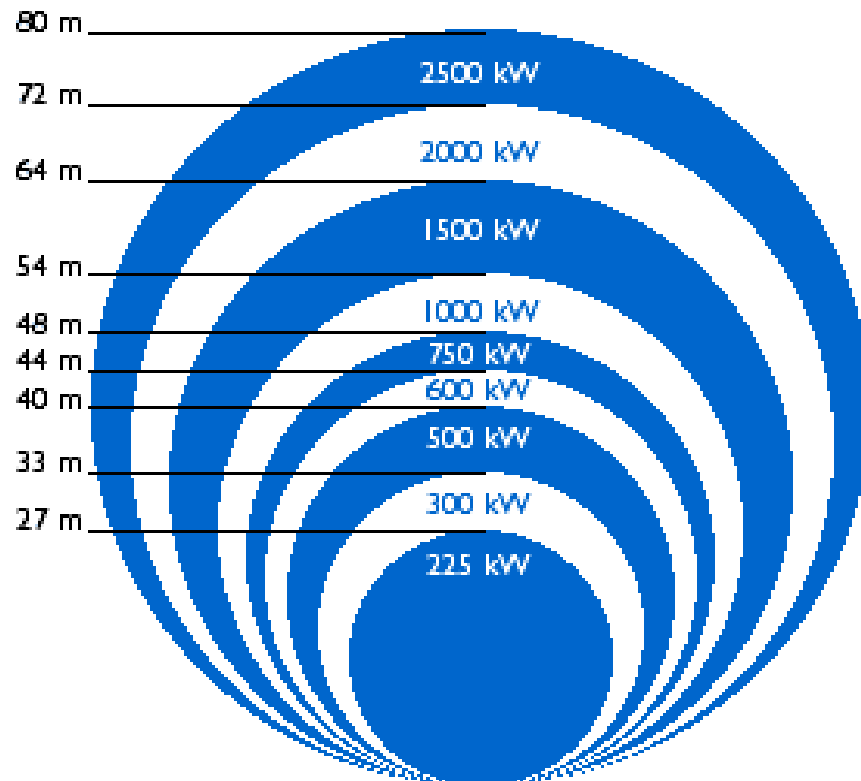
Une étude menée sur ces deux types d'éoliennes a montrée que :

- L'augmentation de la puissance de l'éolienne à axe horizontal en fonction de la vitesse du vent est plus rapide que celle à axe vertical
- Le coefficient de performance de l'éolienne à axe horizontal est égal à 0,593. Celui de l'éolienne à axe vertical avoisine 0,3
- L'éolienne à axe horizontal est plus solide et sa fabrication coûte moins cher que celle à axe vertical.
- L'éolienne à axe vertical possède l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles.

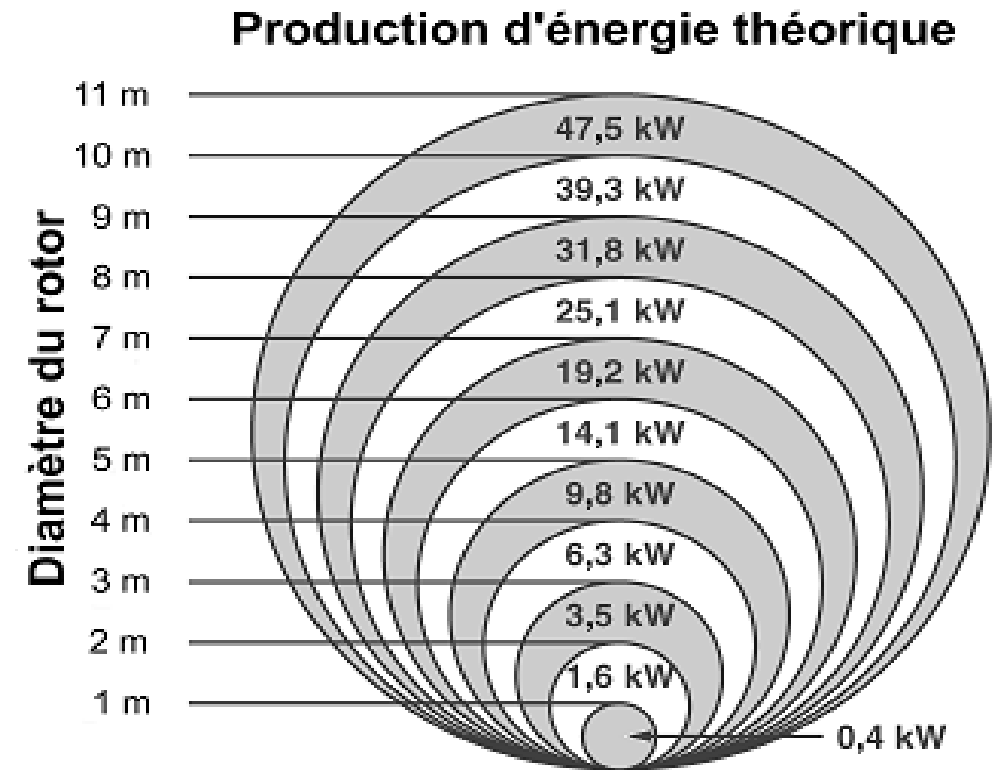
Introduction

Types et Tailles

- Eoliennes industrielles :
 - Une Puissance entre 225 et 5000 KW
 - Un mât qui possède une hauteur de 50 à 120 m et un diamètre de 4 à 6 m.



- Eoliennes domestiques :
 - Puissance entre 0,4 et 47,5 KW
 - mât ne dépasse pas 12 m





Boeing 747



SUMR50
50 MW



306 m



SUMR13
13.2 MW



93 m



USA
Conventional
2.5 MW



SUMR-D
CART2

20 m



Introduction

Production éolienne

La principale caractéristique d'une éolienne est sa puissance de production exprimée en Kilowatts (kW) qui ne dépend pas de l'endroit où elle est posée.

Le taux de charge : le rapport entre le nombre d'heures de fonctionnement à puissance nominale de l'éolienne et le nombre d'heures d'une année (8760 heures/an).

$$\text{Taux de charge} = \frac{\text{nombre d'heures de fonctionnement à puissance nominale pendant 1 an}}{\text{le nombre d'heures d'une année}}$$

Exercice : Calculer le taux de charge d'une éolienne de puissance installée de 2MW qui produit annuellement 2,5 GWh

Introduction

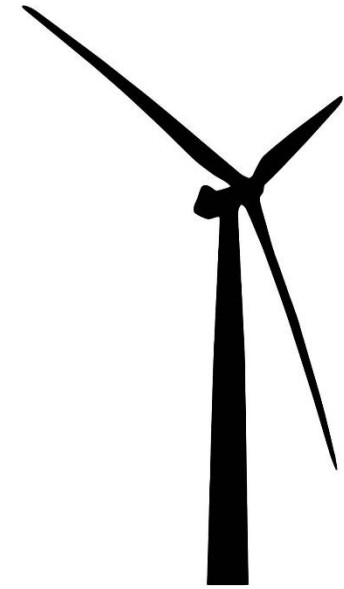
Production éolienne

- Une grosse éolienne produit 2500KW (Puissance installée).
- Sur un an, une éolienne produit : $2500 \times 8760 \text{ heures} = 21,9 \text{ GWh}$
- A Tarfaya le taux de charge moyen 45% : $2500 \times 3942 \text{ heures} = 9,855$
- Une centrale thermique (Jorf LAsfar) produit 2500 GWh par an.
- « Combien de grosse éolienne faudrait -il pour compenser une centrale thermique» ???

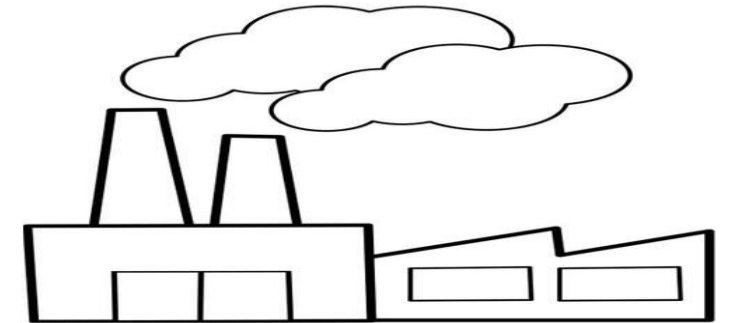
$2500/9,855 = 9.855.000 \text{ KWh} = 254$ grosse éoliennes par centrale nucléaire.



- beaucoup de place est nécessaire pour leur installation + chaque éolienne doit être espacée de 6 fois le diamètre de son rotor pour produire un maximum d'énergie



VS



Introduction

Tableau comparatif

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Technologie fiable, mature, renouvelable et propre- Compatibilité avec usage agricole.- L'installation peut être démantelée relativement facilement.- Pas d'émission de CO2 directe.- Pas de tensions géographiques	<ul style="list-style-type: none">- Investissement important 1,6 M€/MW Grosse éolienne = $1,6 \times 2,5 = 4$ M€- Production aléatoire (Energie intermittente).- Nuisances visuelles et sonores- Projets de longue durée (entre 2 et 4 ans).

généralités sur le vent

Définition : le vent est une masse d'air en mouvement dont le déplacement est provoqué par des différences de températures entre différents points de la Terre.

L'énergie du vent

La vitesse du vent non seulement varie d'un lieu à l'autre, mais il subit également des variations locales considérables dans le temps. L'analyse de la possible conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique(KWh utiles) doit donc commencer par une analyse statistique des vitesses locales du vents (en tenant également compte de la variation de la vitesse moyenne avec la hauteur, de manière à avoir la vitesse au moyeu de la turbine)

La puissance disponible dans un courant de vent :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot V^3$$

avec

$$\left\{ \begin{array}{l} V : \text{Vitesse du vent (m/s)} \\ S : \text{Section normale au courant (m}^2\text{)} \\ \rho : \text{Densité de l'air (Kg/m}^3\text{)} \end{array} \right.$$

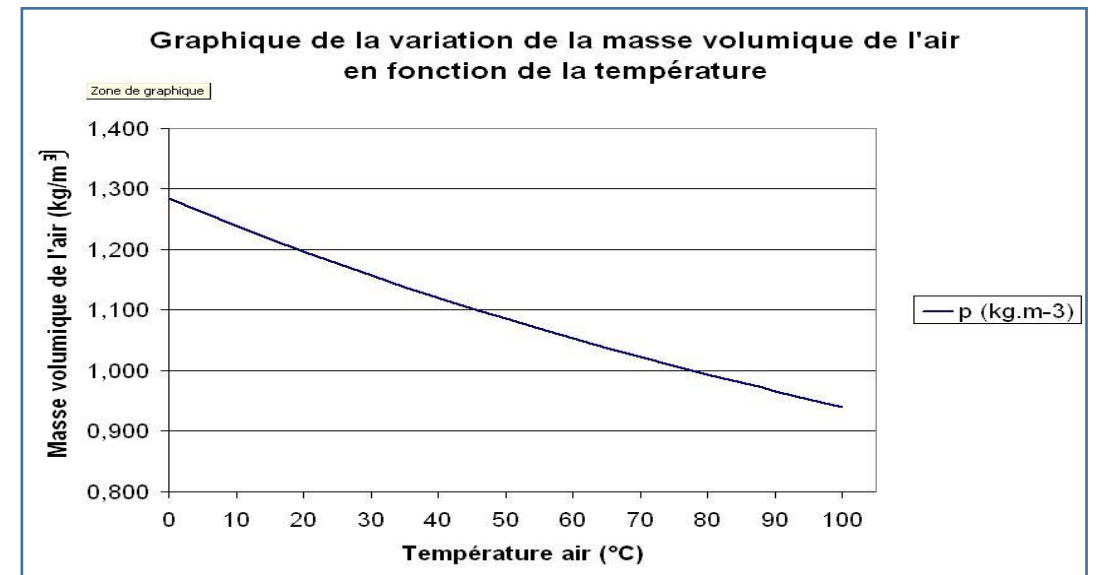
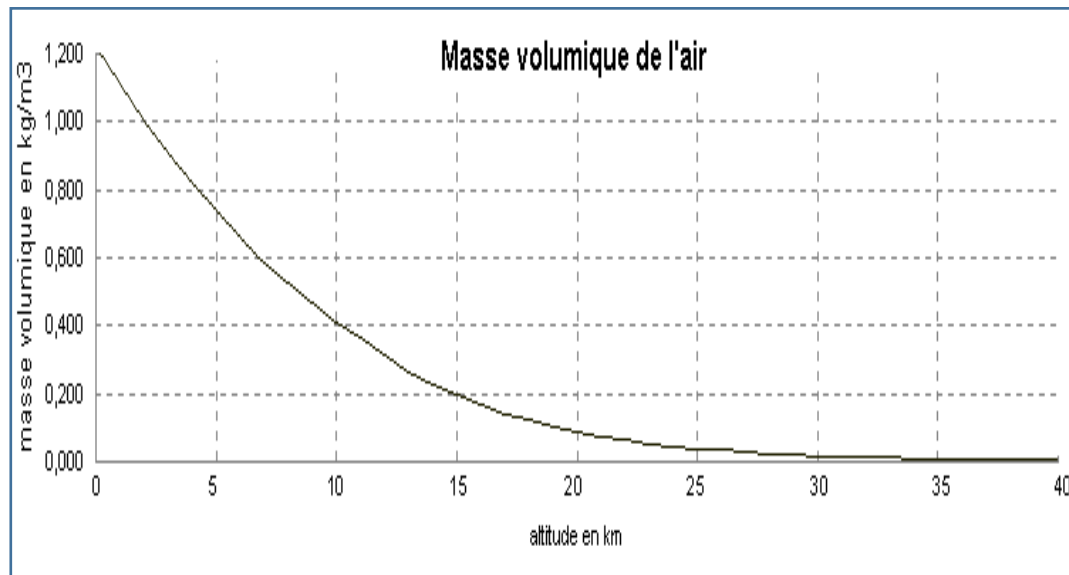
généralités sur le vent

Force du vent : facteurs déterminants

✓ Densité de l'air

La densité de l'air varie en fonction de la température et de l'altitude.

L'air chaud est moins dense que l'air froid. En effet Une turbine toutes conditions égales de vitesse du vent produit moins d'énergie en été qu'en hiver.



généralités sur le vent

Force du vent : facteurs déterminants

✓ **Vitesse du vent**

La puissance du vent est proportionnelle au cube de sa vitesse et il est par conséquent essentiel d'en connaître avec précision les caractéristiques si l'on souhaite réalistiquement prévoir les performance d'un aéromoteur.

Les vitesse du vent les plus élevées sont présentes sur les crêtes montagneuses, sur les côtes et en mer ouverte (ou à proximité des grands lacs).

Les paramètres du vent nécessaire pour un dimensionnement correct d'une turbine éolienne sont les suivants : Les vitesses moyennes, les variations instantanée (rafales), journalières et annuelles, la variation avec l'altitude et les directions prédominantes.

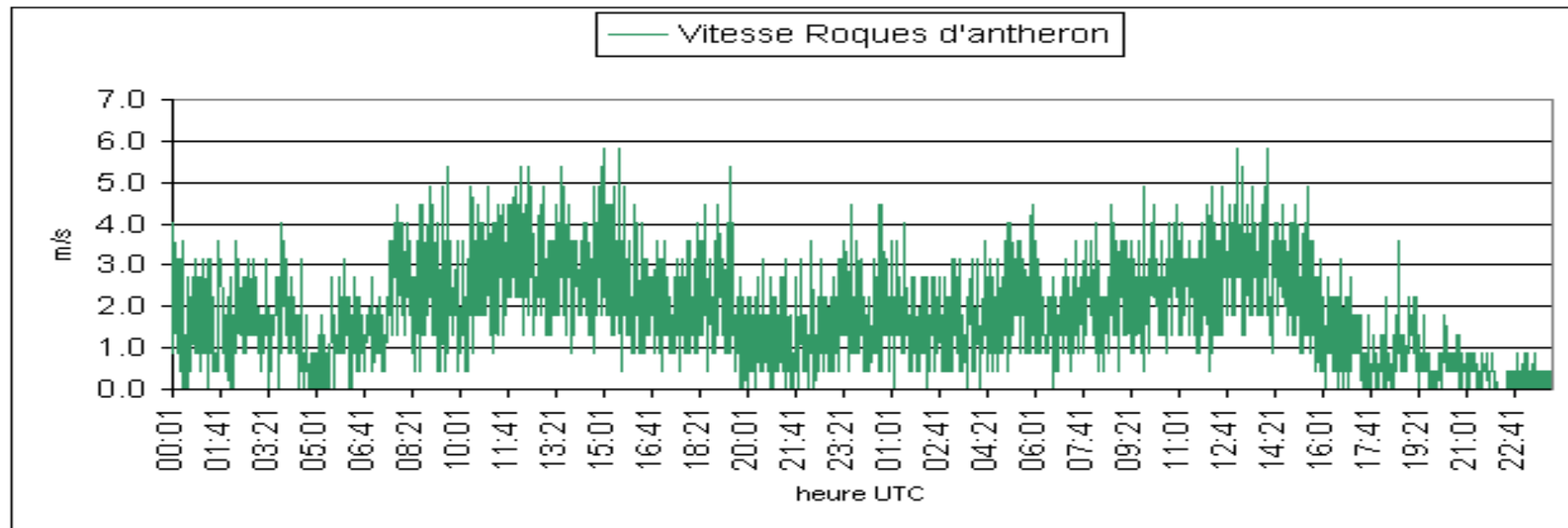
généralités sur le vent

Force du vent : facteurs déterminants

✓ Vitesse du vent

Généralement, la vitesse locale présente des fluctuations considérables dans le temps et la vitesse instantanée v peut être décrite en additionnant à une valeur moyenne V_m une composante fluctuante dans le temps.

La vitesse moyenne V_m typiquement est déterminée sur des intervalles temporels préfixés.



généralités sur le vent

Force du vent : facteurs déterminants

✓ Vitesse du vent

La vitesse du vent sur la surface du terrain est nulle, puis elle augmente rapidement avec la hauteur, typiquement jusqu'à environ 2Km, ensuite le gradient vertical de vitesse s'annule pratiquement.

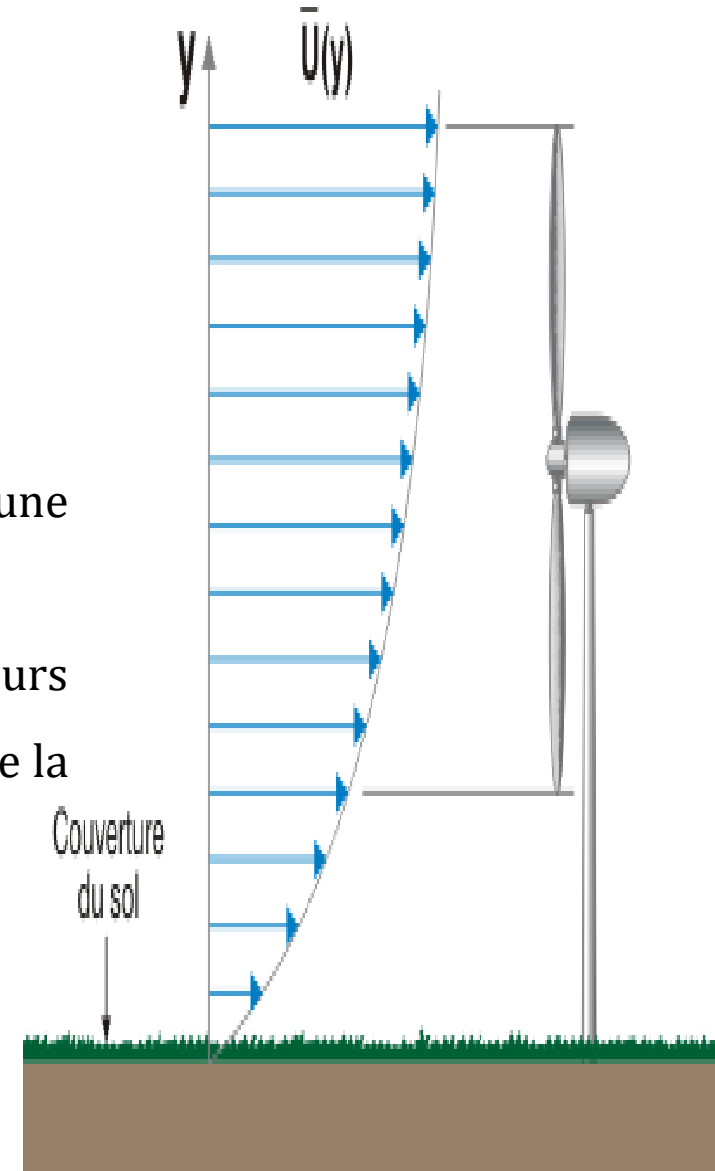
les vitesses moyennes sont fournies à une certaine hauteur.

Suivant la taille des machines que l'on désire installer, il faudra procéder à une extrapolation verticale de la vitesse moyenne de vent.

La variation verticale de la vitesse du vent est généralement décrite avec plusieurs formes représentatives. Parmi les expressions les plus simples et pratiques, on trouve la forme exponentielle :

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

- V_0 : Vitesse du vent relative à la hauteur originale
- V : Vitesse du vent relative à la nouvelle hauteur
- H_0 : Hauteur original
- H : nouvelle hauteur
- α : exposant de rugosité du terrain

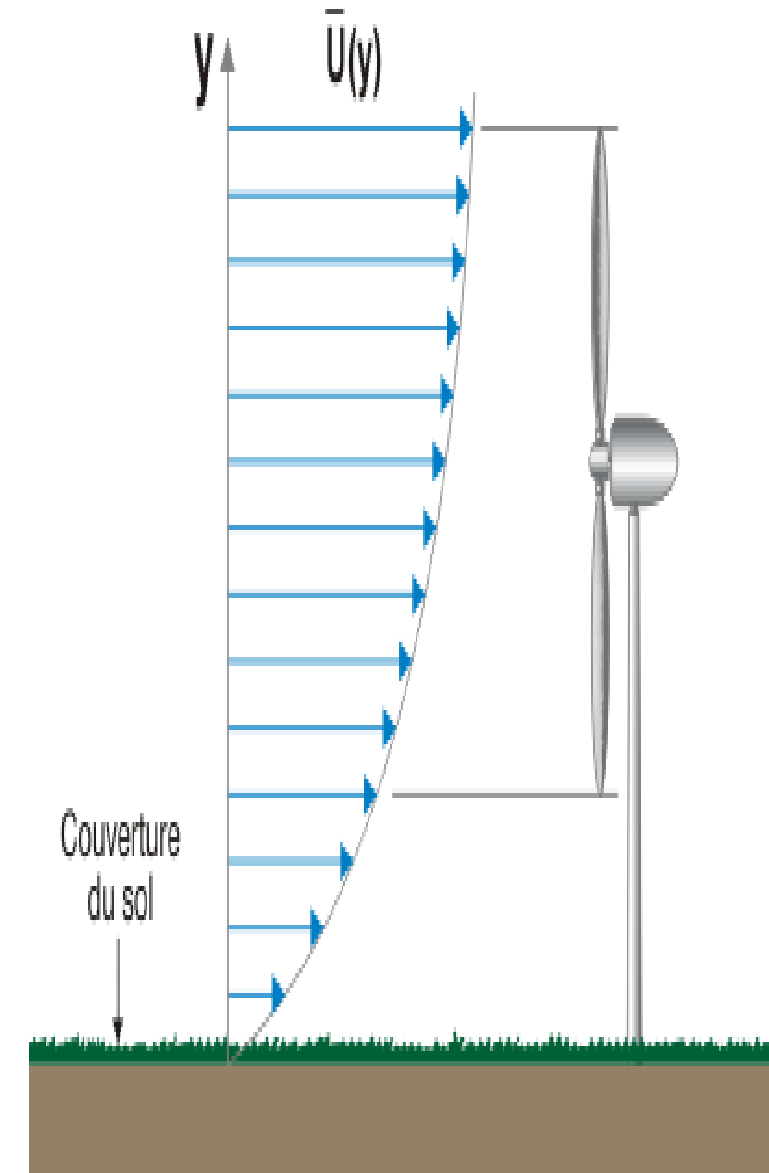


généralités sur le vent

Force du vent : facteurs déterminants

✓ Vitesse du vent

Type de terrain	Classe de rugosité	α
Grandes surfaces aquatiques	0	0.01
Terrains ouverts avec peu d'obstacles	1	0.12
Terrains agricoles avec des édifices et des barrières	2	0.16
Zones agricoles avec beaucoup d'arbre, bois et villages	3	0.28



généralités sur le vent

Force du vent : facteurs déterminants

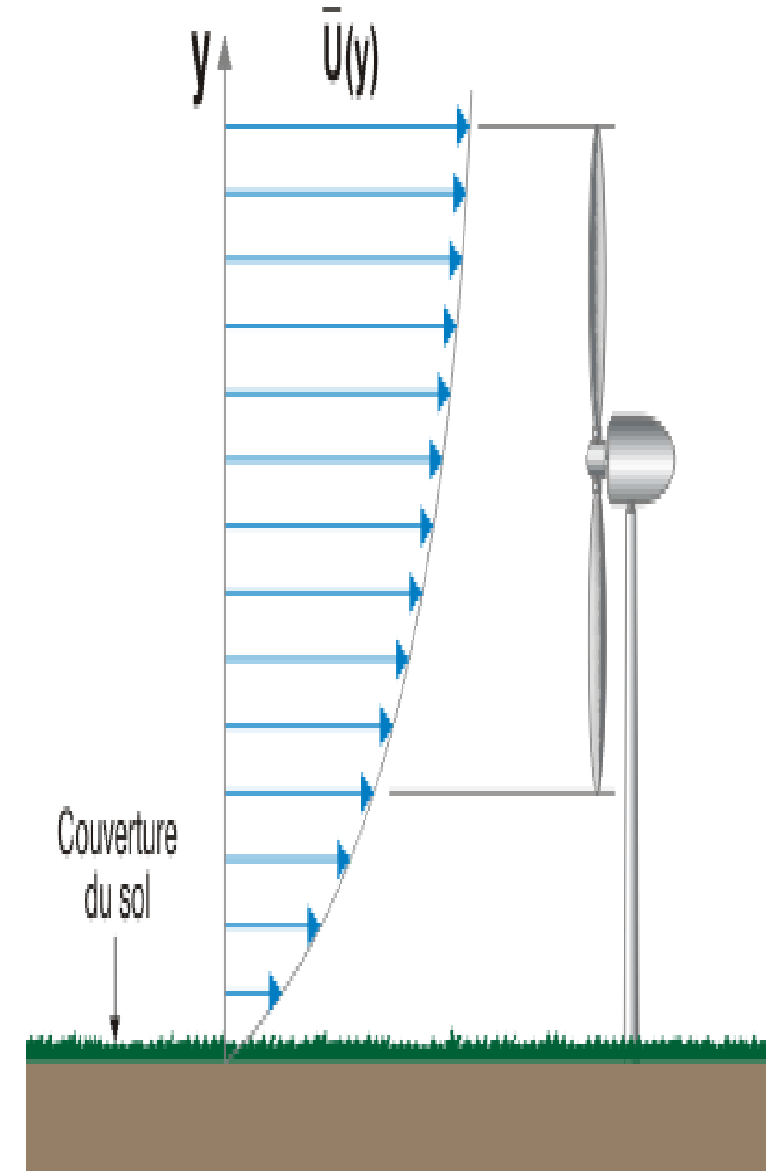
✓ Vitesse du vent

Exercice : Supposons d'installer un générateur à proximité d'un terrain dont le coefficient de rugosité est estimé à 0,14.

En doublant la hauteur d'installation, calculer :

- ✓ L'augmentation de la vitesse du vent.
- ✓ L'augmentation de la puissance.

Exercice : Pour une augmentation de la vitesse du vent de 1m/s, calculer l'augmentation de la puissance ($V_0=4\text{m/s}$).



généralités sur le vent

Description de la variation du vent : La distribution de Weibull

L'évaluation de l'énergie qui peut être stockée dans les batteries ou utilisée par l'utilisateur dans les systèmes 'stand alone', ou bien l'énergie envoyée dans le réseau dans les systèmes définie 'grid connected', est exprimée en KWh et peut être définie une fois que l'on connaît l'évolution de la vitesse du vent dans le temps.

Nous aurions dû mesurer la vitesse du vent pendant une année (avec anémomètres, Sodars, Lidars) à la hauteur désirée.

connaître la valeur moyenne du vent sur un site ne suffit pas, car en effet la vitesse du vent n'est pas constante et les vents forts contenant le plus d'énergie. Pour cette raison, l'évaluation de la distribution des vitesses du vent dans le temps est déterminante.



Anémomètre



Sodar



Lidar

généralités sur le vent

Description de la variation du vent : La distribution de Weibull

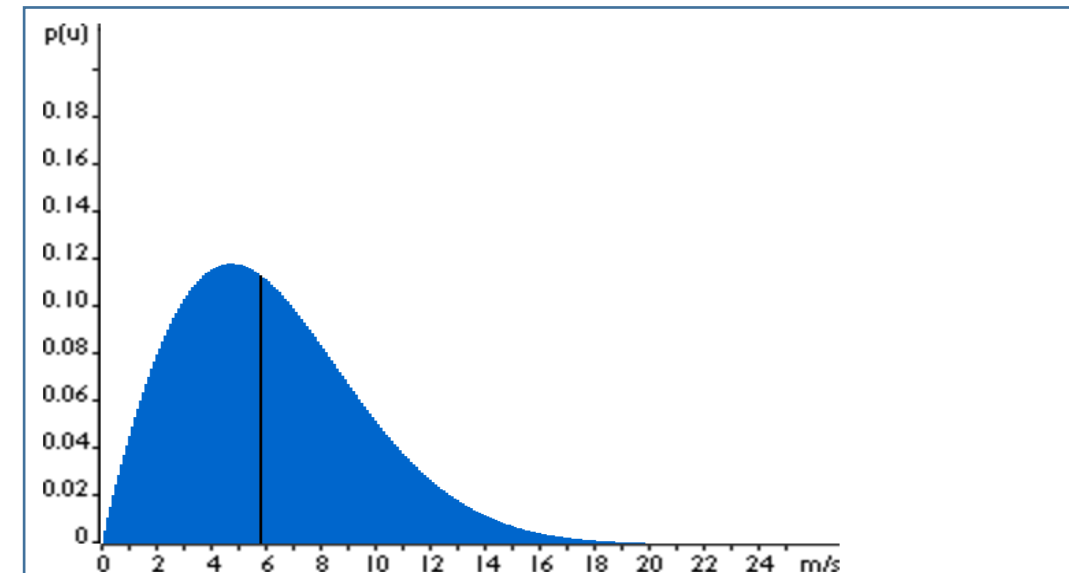
Densité de probabilité de Weibull:

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

avec $\left\{ \begin{array}{l} v : \text{Vitesse du vent (m/s)} \\ A : \text{Facteur d'échelle (coefficient constant)(m/s)} \\ k : \text{Facteur de forme (coefficient constant) } (1 < k < 3) \text{ (adimensionnel)} \end{array} \right.$

la valeur Modale: c'est la valeur de vitesse du vent la plus fréquente dans un site donné (ex. ci contre $V_{mod} = 5 \text{ m/s}$)

la valeur Médiane (La valeur moyenne): c'est la valeur m qui permet de couper l'ensemble des valeurs en deux parties égales
 $V_{méd} = 5,8 \text{ m/s}$.



généralités sur le vent

Description de la variation du vent : La distribution de Weibull

Dans le cas où le paramètre de forme est égal à exactement 2, comme c'est le cas pour le graphe ci-dessus, on parle d'une distribution de Rayleigh

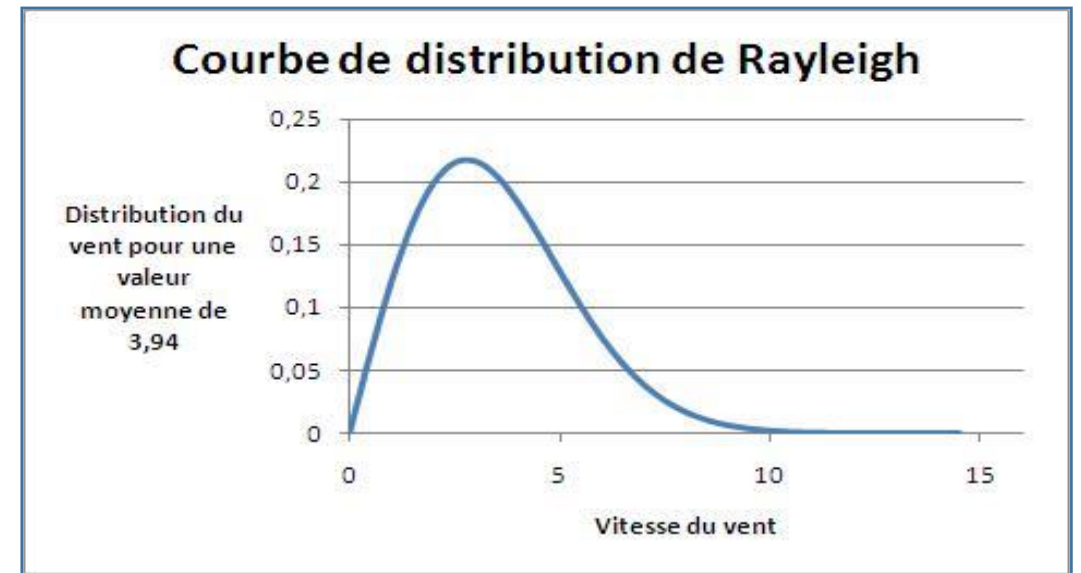
La relation entre la vitesse moyenne et le facteur d'échelle :

$$V = A \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$$

$$\text{Avec : } \Gamma(z) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{n! n^z}{z(z+1)\dots(z+n)}$$

Pour $k=2$ (Distribution de rayleigh) : $\Gamma\left(\frac{3}{2}\right) = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$

Dans le cas où nous n'avons que la vitesse moyenne du vent, on peut utiliser l'équation précédente et attribuer la valeur de 2 au facteur de forme k , et la valeur moyenne de vent connu au facteur d'échelle A . On obtient ainsi une courbe de distribution de Rayleigh.

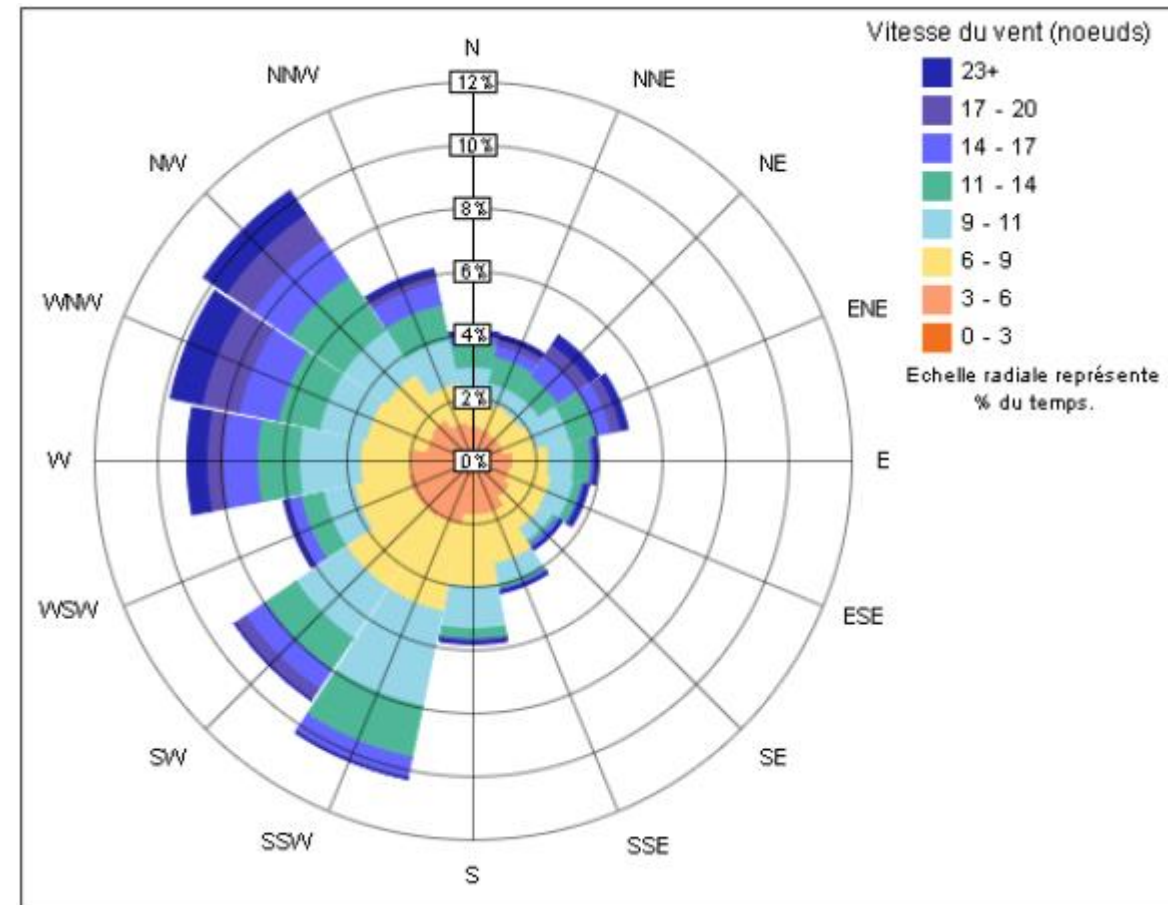


généralités sur le vent

Description de la variation du vent : Rose des vents

Une rose des vents a un rôle important dans la représentation d'un site : on peut y porter l'intensité, la direction ou les deux simultanément. Elle est très pratique pour avoir une première estimation de l'implantation des machines si une ou deux directions de vent sont privilégiées.

- Les vitesses des vents sont classées suivant une direction, par secteur de 10, 20....,
- La longueur radiale de chaque rayon autour du cercle est le pourcentage de temps que le vent souffle dans cette direction.
- Lorsque vous vous déplacez vers l'extérieur sur l'échelle radiale, la fréquence associée au vent provenant de cette direction augmente.



généralités sur le vent

Théorie des aéromoteurs : Théorie de betz

Physiquement, il est impossible de récupérer la totalité de l'énergie cinétique du vent puisque l'air doit conserver une énergie cinétique résiduelle pour qu'il subsiste un écoulement

$$P_{captée} = \frac{1}{2} C_p \times S \times \rho \times V^3$$
$$P_{captée} = \frac{1}{2} C_p \times \pi \times R^2 \times \rho \times V^3$$

avec

- C_p : Coefficient de puissance (adimensionnel)
- S : Surface balayée par le rotor.
- R : Rayon du rotor (Longueur de la pale)

La loi de Betz montre que C_p est maximal pour une valeur de $\frac{16}{27}$ soit environ 0,593.

$$C_{p_max} = \frac{16}{27}$$

Le coefficient de puissance dépend de l'aérodynamisme du rotor.

généralités sur le vent

Théorie des aéromoteurs : Théorie de betz

Soit v_1 la vitesse d'entrée et v_2 la vitesse de sortie.

La variation d'énergie par unité de temps, donc la puissance, transmise au rotor de l'éolienne vaut:

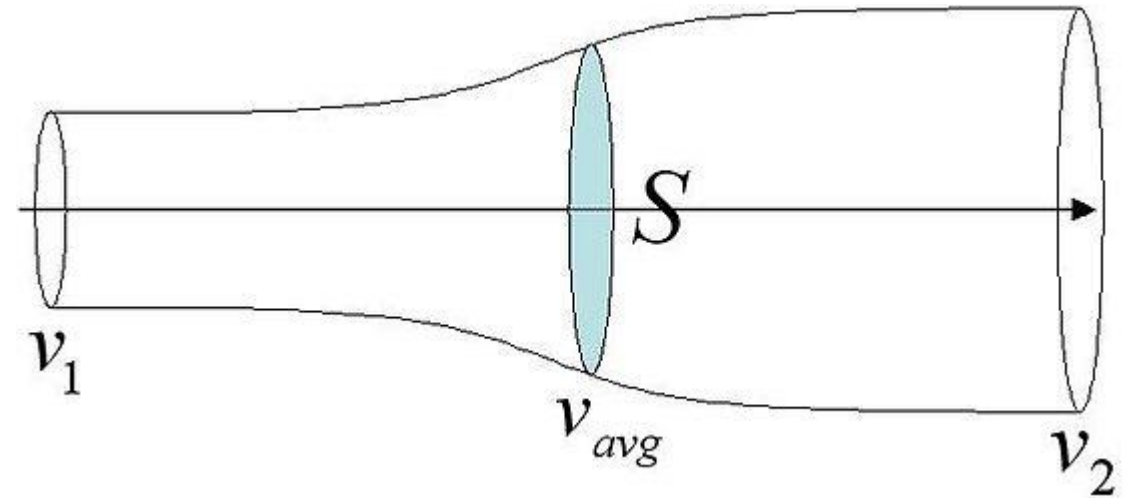
$$P = \frac{1}{2} \times m \times (v_1^2 - v_2^2)$$

m est la masse de l'air traversant la surface balayée par le rotor en une seconde. Elle est égale à

Soit v_{avg} la vitesse moyenne de l'air traversant S .

Donc:

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times v_{avg} \times (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{4} \times \rho \times S \times (v_1 + v_2) \times (v_1^2 - v_2^2)$$



$$m = \rho \times S \times v_{avg}$$

$$v_{avg} = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

généralités sur le vent

Théorie des aéromoteurs : Théorie de betz

Le maximum de $P(v_2)$ s'obtient lorsque:

$$\frac{d}{dv_2} \left\{ \frac{1}{4} \times \rho \times S \times (v_1 + v_2) \times (v_1^2 - v_2^2) \right\} = 0$$

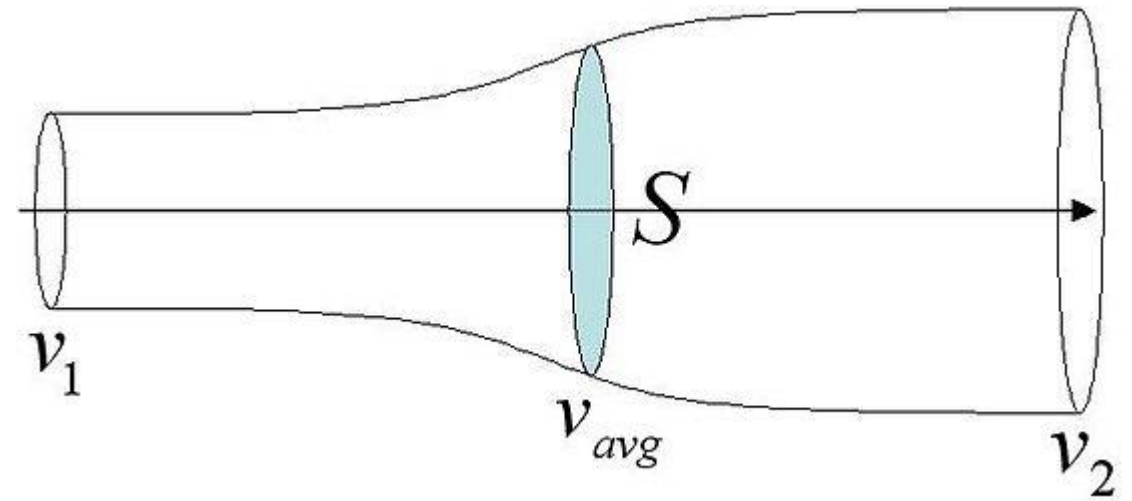
En développant, on obtient:

$$\frac{d}{dv_2} \left\{ \frac{1}{4} \times \rho \times S \times (v_1 + v_2) \times (v_1^2 - v_2^2) \right\}$$

$$= 0.25 \times \rho \times S \times ((v_1 + v_2)(-2v_2) + (v_1^2 - v_2^2)) = 0.25 \times \rho \times S \times (v_1^2 - 2v_1v_2 - 3v_2^2)$$

Cette expression est nulle pour:

$$v_2 = \frac{-2v_1 + \sqrt{4v_1^2 + 12v_1^2}}{6} = \frac{v_1}{3}$$



généralités sur le vent

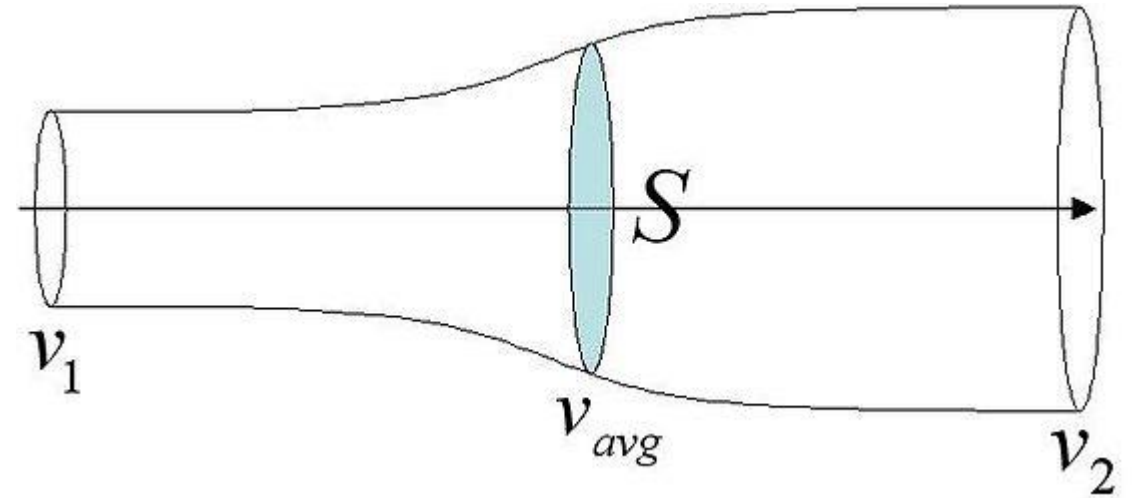
Théorie des aéromoteurs : Théorie de betz

D'où la puissance maximale est:

$$P_{max} = \frac{8}{27} \rho S v_1^3$$

La fraction maximale de la puissance totale qu'il est possible de convertir en énergie mécanique est donc donnée par:

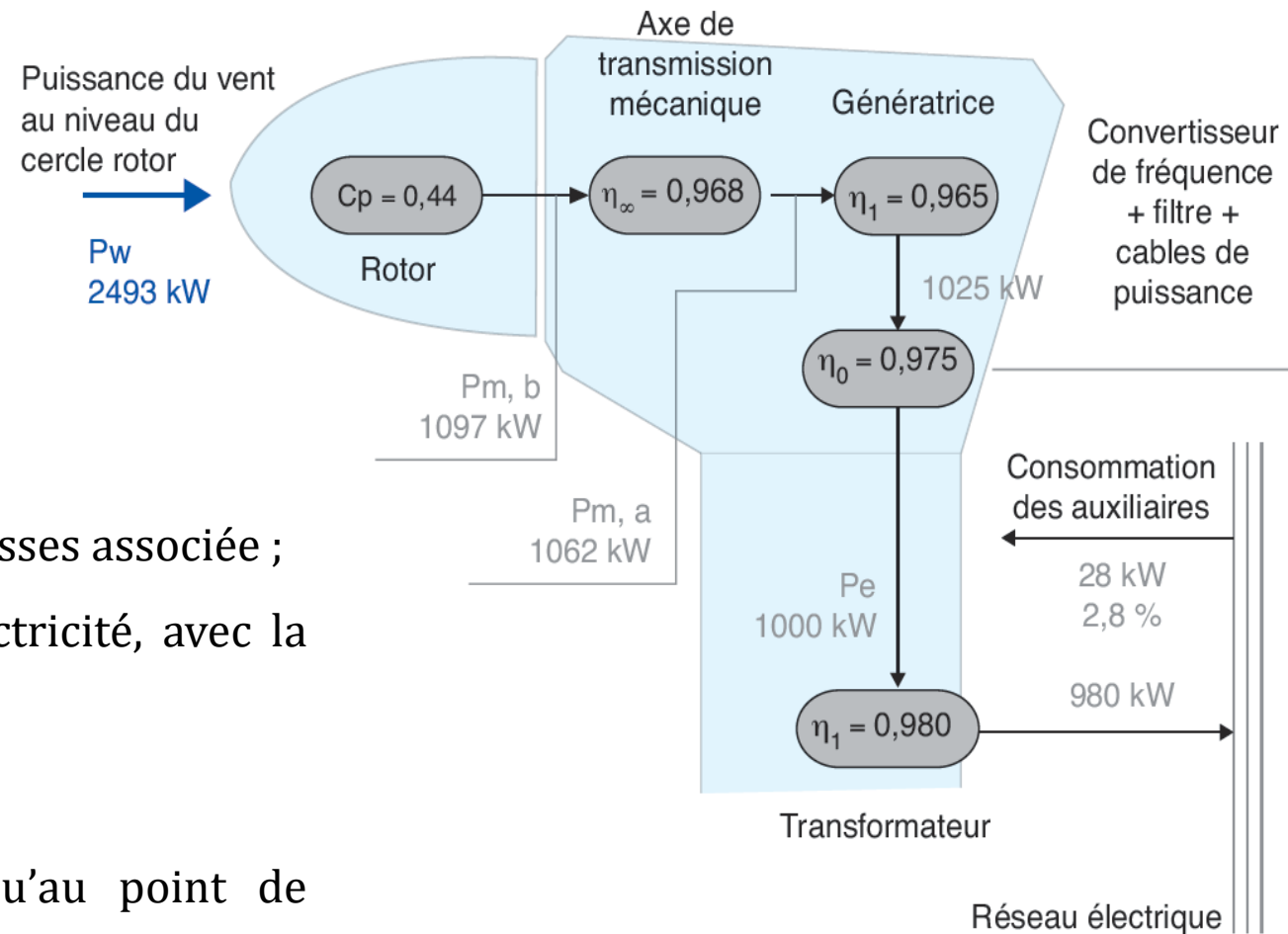
$$C_p^{max} = \frac{P_{max}}{P_t} = \frac{\frac{8}{27} \rho S v_1^3}{\frac{1}{2} \rho S v_1^3} = \frac{16}{27} \approx 0.593 \approx 59,3\%$$



La récolte de l'énergie du vent

Puisque le vent ne peut être optimisé, le moyen d'action le plus efficace sur la production sera de jouer sur les choix d'équipements :

- ✓ Le rotor (Les pâles + Moyeu);
- ✓ la transmission mécanique, avec ou sans boîte de vitesses associée ;
- ✓ la transformation d'une rotation mécanique en électricité, avec la génératrice synchrone ou asynchrone ;
- ✓ L'électronique de puissance
- ✓ Le traitement et la transmission électrique jusqu'au point de raccordement.



Il faut donc multiplier l'ensemble des rendements associés pour établir le rendement réel de l'éolienne.

La récolte de l'énergie du vent

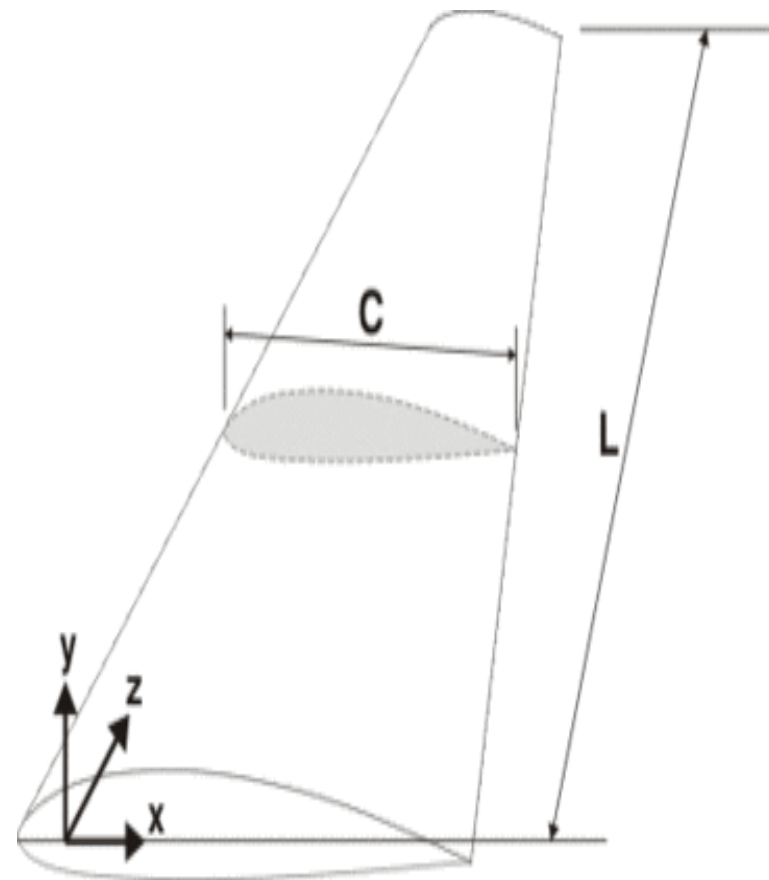
Le Rotor

✓ Comment le vent pousse-t-il la pale ?

Les pales sont les éléments les plus représentatifs de l'éolienne. Ce sont aussi les seuls éléments en mouvement. Elles constituent le point d'entrée de l'énergie apportée par le vent.

lorsque l'on regarde une aile, qu'il s'agisse d'une aile d'avion ou d'éolienne, il s'agit d'un corps à 3 dimensions spatiales (longueur de corde, cambrure, envergure).

On analyse les phénomènes physiques au moyen de profils 2D d'aile en "découpant" une section de l'aile en un point le long de l'envergure (Surface grise). Il s'agit de la dimension de la cambrure et de la corde



X : Longueur de corde
 Y : Cambrure
 Z : Envergure

La récolte de l'énergie du vent

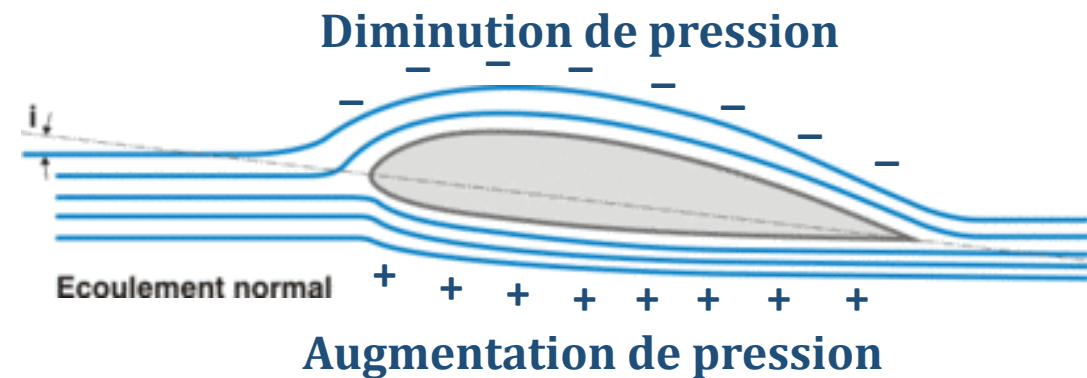
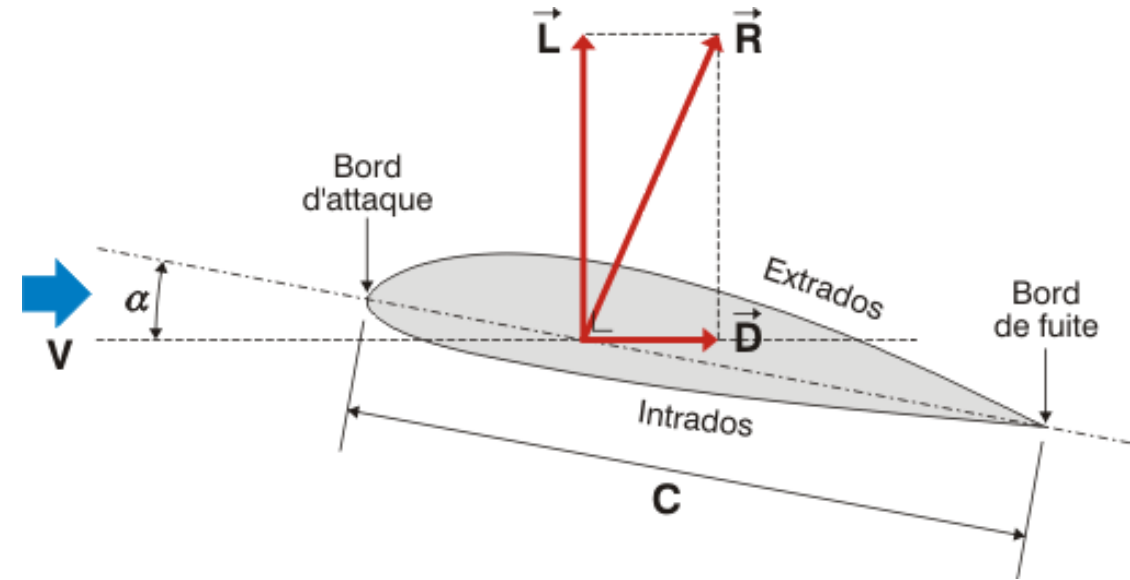
Le Rotor

✓ Comment le vent pousse-t-il la pale ?

La partie du profil entre le bord d'attaque et de fuite orientée vers le haut est appelée, **extrados**, tandis que l'autre moitié orientée vers le bas est appelée, **intrados**.

Du côté de l'extrados, l'aile a fait accélérer l'écoulement. Par contre, elle a ralenti l'écoulement côté intrados.

Une accélération engendre une diminution de pression alors qu'une décélération engendre une augmentation de la pression (**Effet venturi**). Il en résulte une force perpendiculaire à l'axe de vent apparent : **La portance**.



La récolte de l'énergie du vent

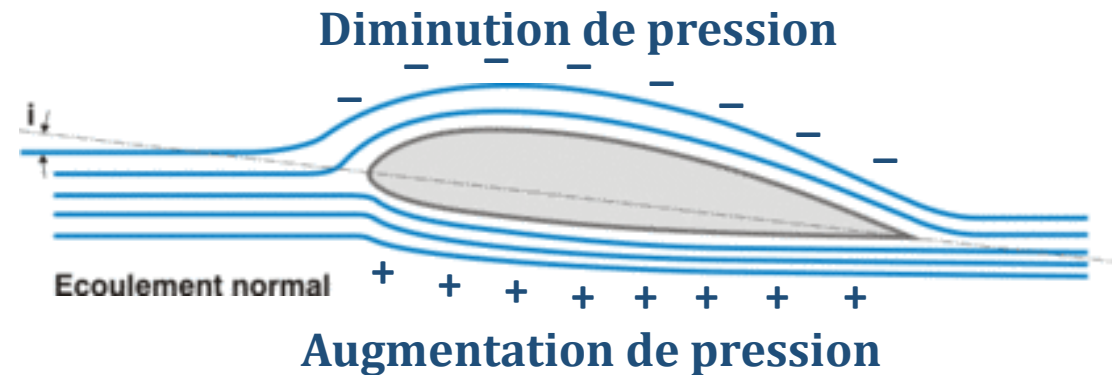
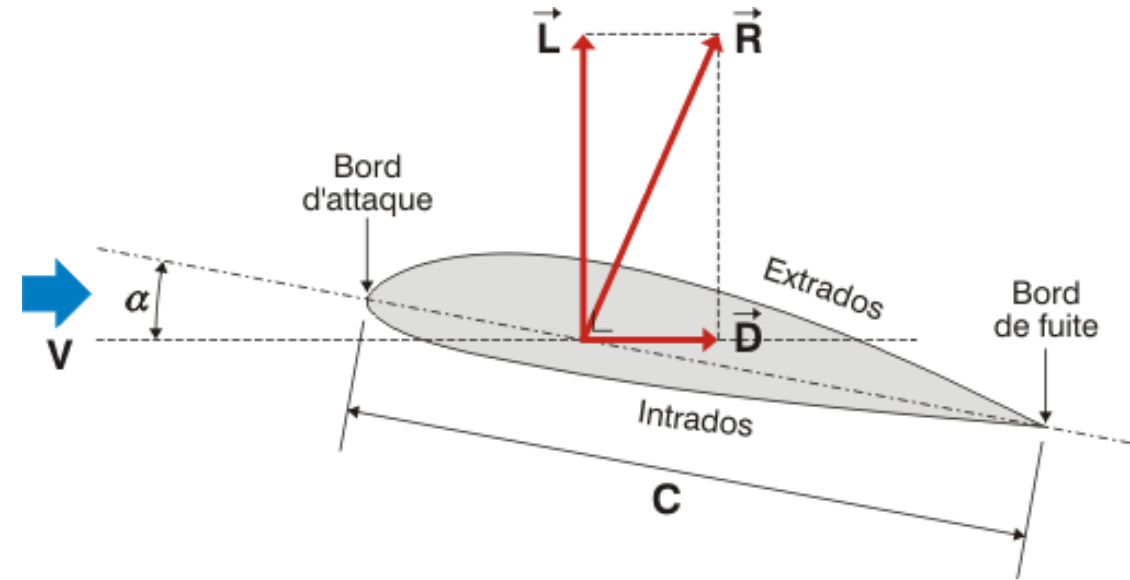
Le Rotor

✓ Comment le vent pousse-t-il la pale ?

La traînée est la force qui agit sur la pale dans la même direction du vent. Cette force tend à contrer le mouvement d'avancement de la pale et doit être la plus faible possible.

La corde présente un certain angle avec la vitesse de l'air en amont, V . Cet angle s'appelle l'angle d'attaque.

La portance est d'autant plus importante que l'angle d'attaque est important.



La récolte de l'énergie du vent

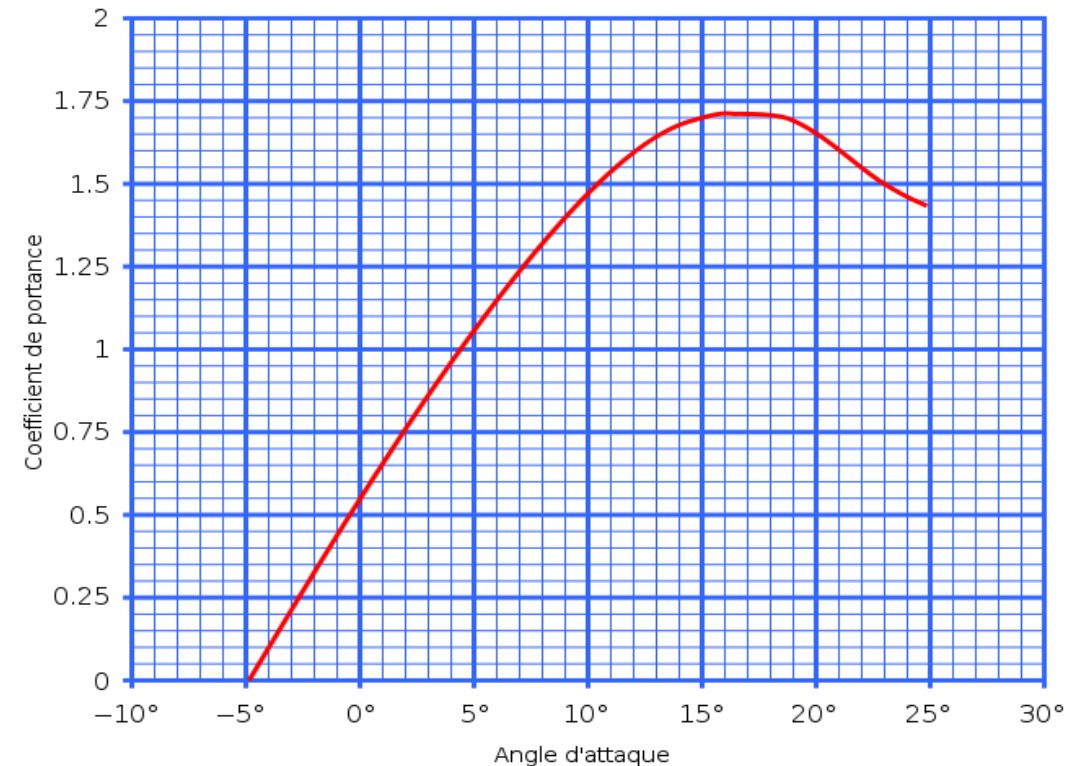
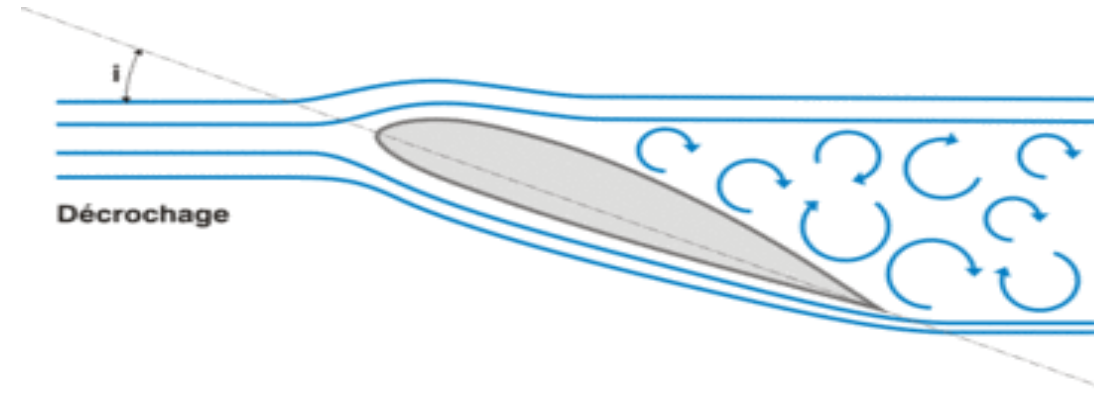
Le Rotor

✓ Comment le vent pousse-t-il la pale ?

Arrivée à une certaine valeur d'angle d'incidence, l'écoulement de l'air au-dessus de l'aile arrête soudainement de suivre de façon régulière la surface de l'extrados. L'écoulement de vent devient turbulent engendrant des vibration de la pale ainsi qu'une perte de la portance.

Le décrochage est la perte de portance dû à un angle d'incidence (angle d'attaque) trop important,

Une pale d'éolienne, tout comme une aile d'avion, est le résultat d'une technologie très évoluée, même si sa « ligne » paraît pure et simple.



La récolte de l'énergie du vent

Le Rotor

✓ Conversion aéromécanique

Le rotor transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation.

La puissance transmise à l'axe (aussi appelé arbre) central se définit par :

$$P_{captée} = T \times \Omega$$

avec $\left\{ \begin{array}{l} T : \text{Couple mécanique (N.m).} \\ \Omega : \text{Vitesse de rotation (rad/s)} \end{array} \right.$

La vitesse spécifique ou le paramètre de rapidité noté λ (adimensionnel) est le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales et la vitesse du vent. Les machines peuvent être classées en fonction de ce paramètre.

✓ si λ est inférieur à 3, l'éolienne est dite lente.

✓ si λ est supérieur à 3, l'éolienne est dite rapide.

$$\lambda = \frac{U}{V} = \frac{R \cdot \Omega}{V}$$

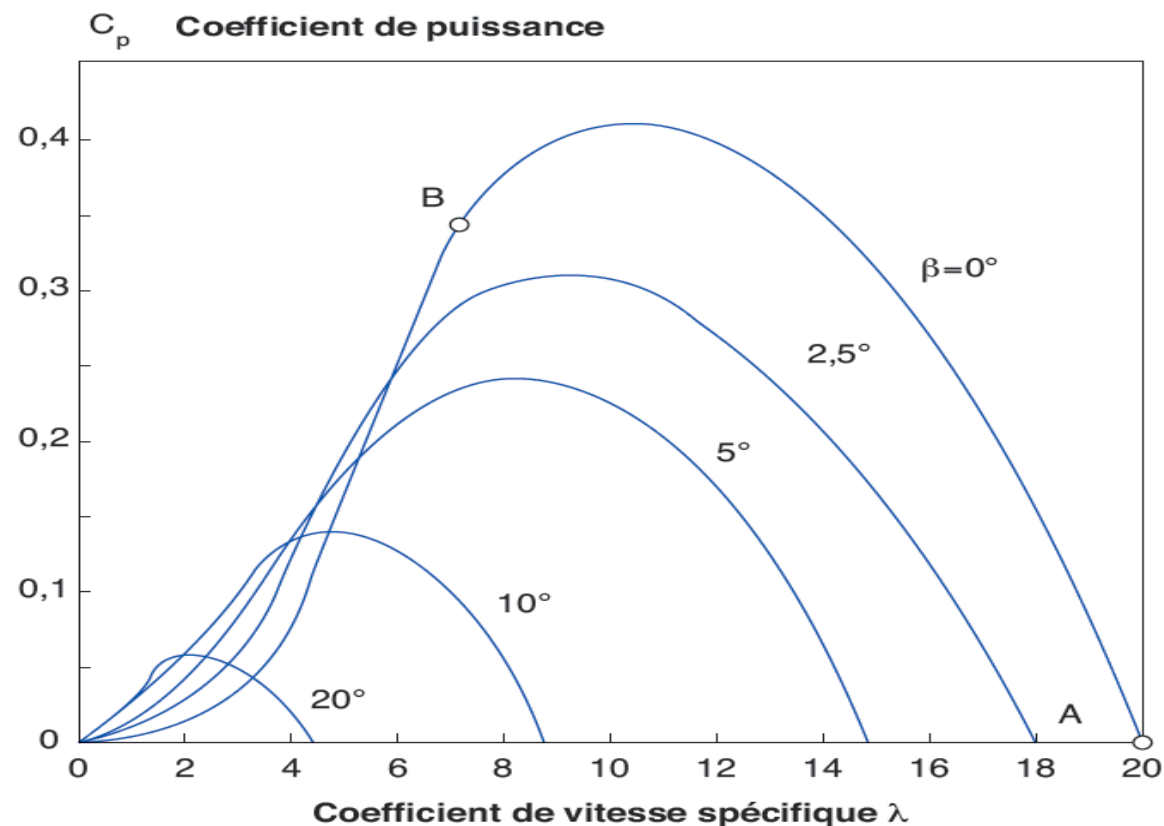
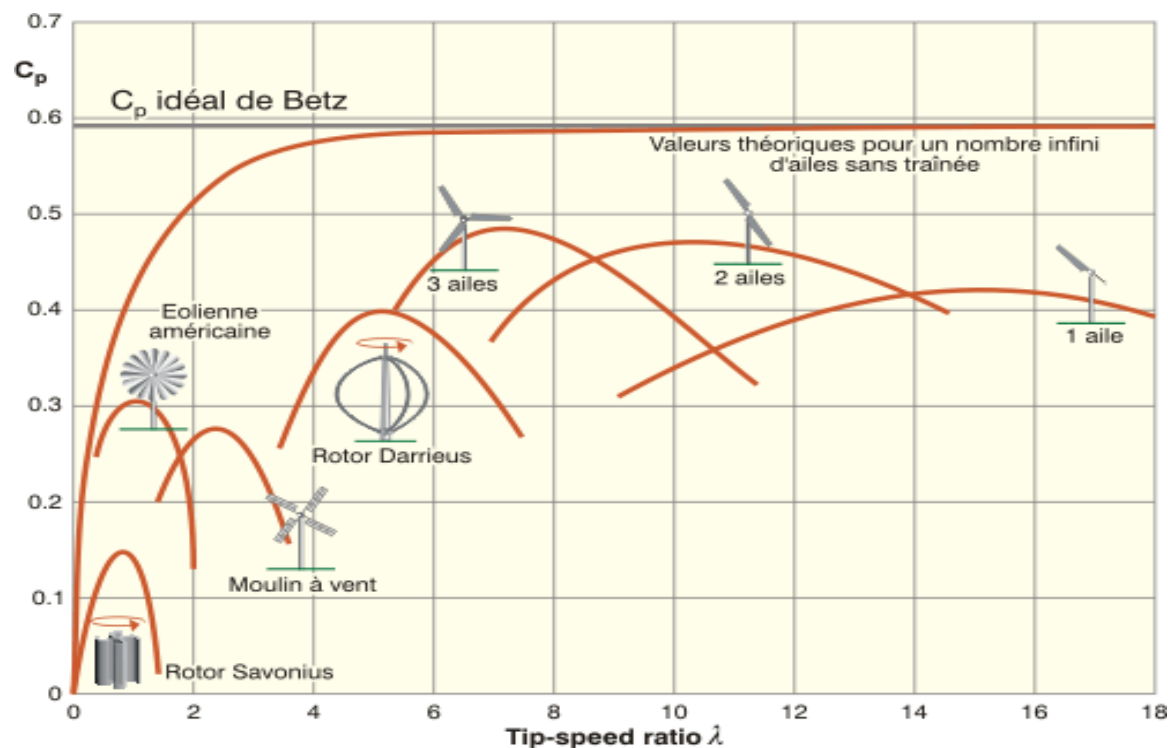
avec $\left\{ \begin{array}{l} U : \text{Vitesse de l'extrémité des pâles (m/s)} \\ V : \text{Vitesse du vent.} \\ R : \text{Rayon du rotor (Longueur de la pale)} \end{array} \right.$

La récolte de l'énergie du vent

Le Rotor

✓ Conversion aéromécanique

le rendement aérodynamique C_p de la turbine. Il dépend du dimensionnement de la pale, de la vitesse spécifique λ et de l'angle de calage β .



La récolte de l'énergie du vent

Le Rotor

✓ Conversion aéromécanique

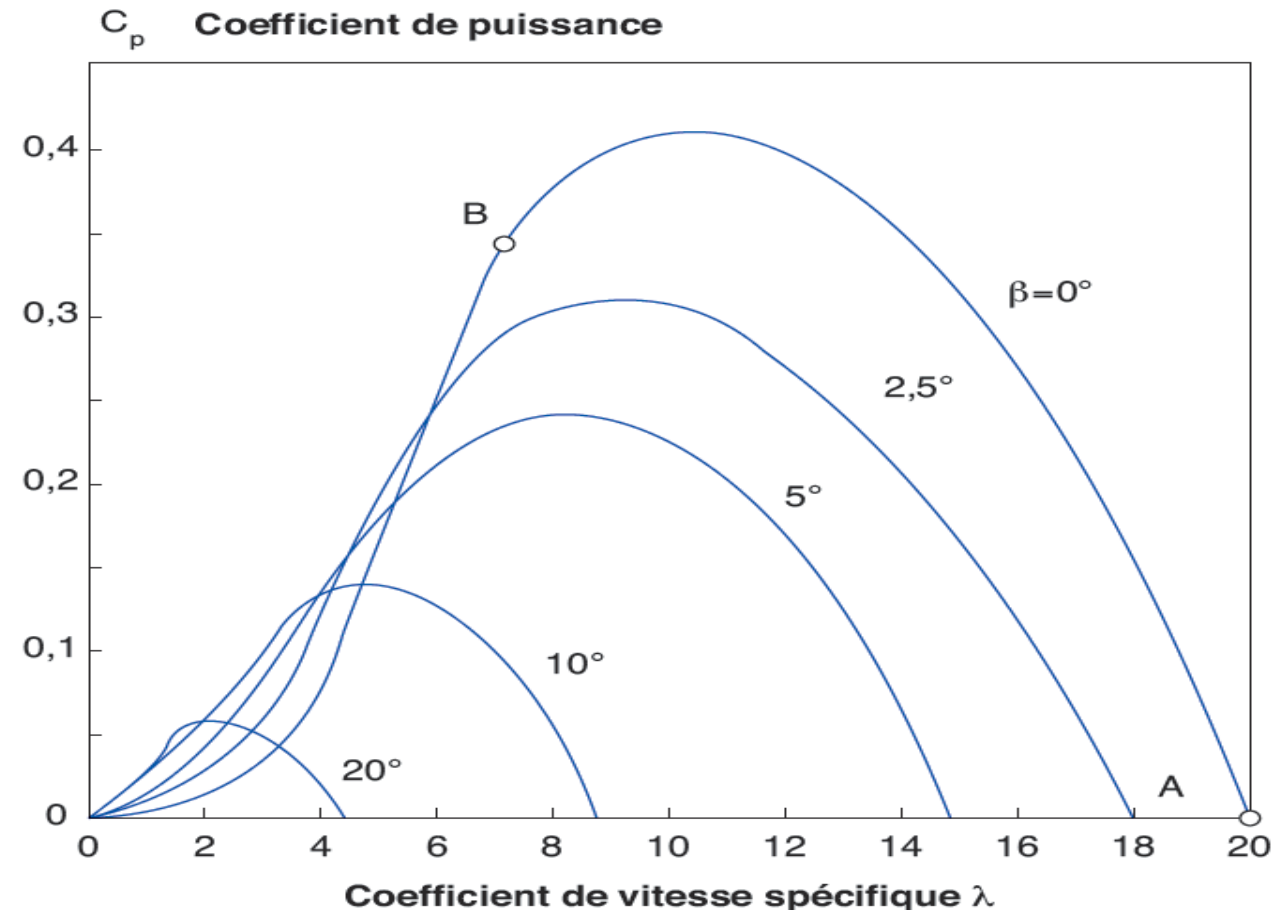
le rendement aérodynamique C_p

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5872 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0085\lambda$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

$$\lambda = \frac{\Omega_{tur} \cdot R}{V}$$



La récolte de l'énergie du vent

Le Rotor

✓ Conversion aéromécanique

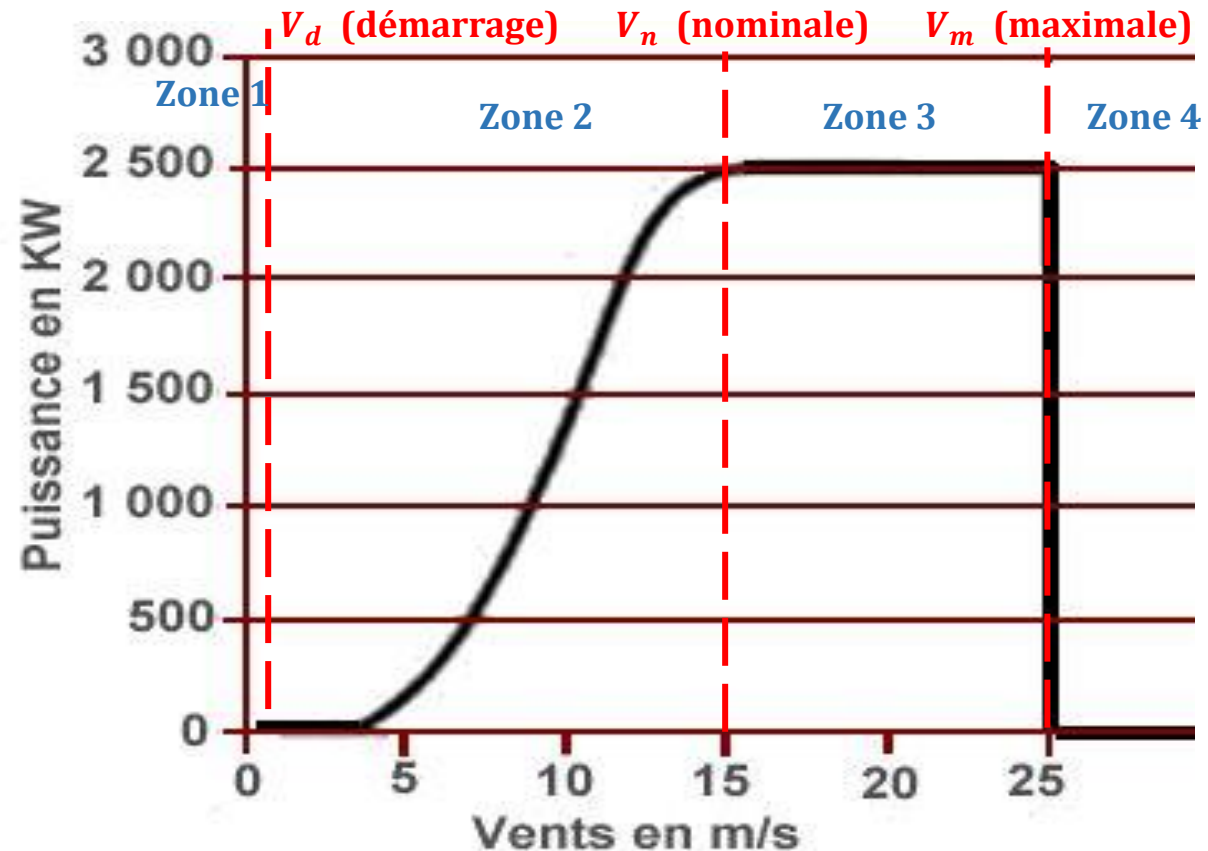
La courbe de puissance représente la distribution de puissance instantanée pour chaque vitesse de vent mesurée à la hauteur de moyeu.

Quatre zones principales peuvent être distinguées :

Zone 1 : de 0 à 4 m/s: l'éolienne ne se déclenche pas : le vent est trop faible pour mouvoir les pâles.

Zone 2 : de 4 à 15 m/s : Une fois le démarrage est effectué, l'éolienne va fonctionner de manière à extraire le maximum de puissance disponible pour avoir un fonctionnement optimal jusqu'à ce que le vent atteigne la vitesse nominale V_n .

L'éolienne tourne mais pas à puissance nominale.



La récolte de l'énergie du vent

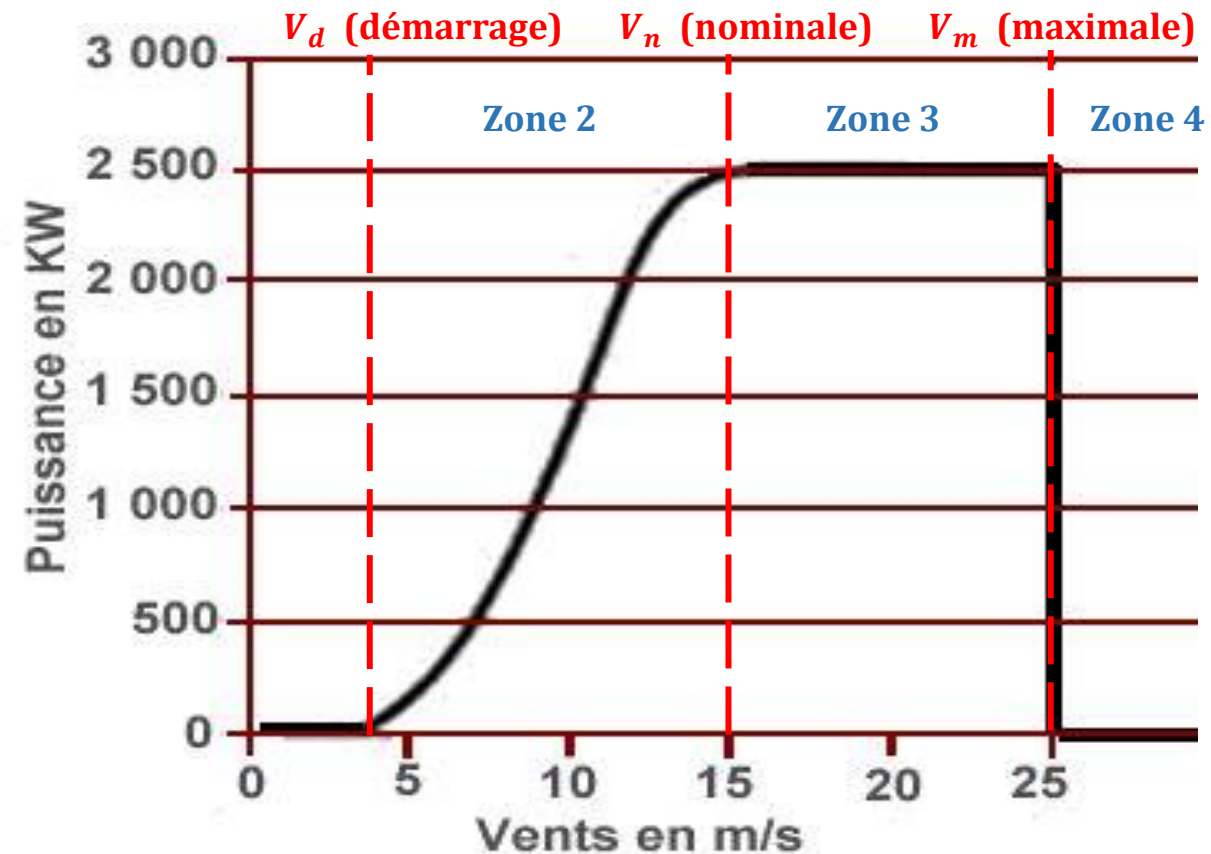
Le Rotor

✓ Conversion aéromécanique

Zone 3 : de 15 à 25 m/s : la vitesse de rotation et la puissance mécanique doivent être maintenues à leur valeurs nominales afin de ne pas endommager l'éolienne.

Ces limitations peuvent s'effectuer en orientant les pales de l'éolienne afin de dégrader le rendement de l'éolienne

Zone 4 : au-dessus de 25 m/s on doit arrêter l'éolienne le vent étant trop violent.



Exercice 1 : Nous souhaitons dimensionner les pâles d'une éolienne à vitesse fixe pour obtenir une puissance mécanique de 750KW pour une vitesse de vent de 13.8 m/s avec une densité de $1.225\text{Kg}/\text{m}^3$ on considère un coefficient de puissance C_p égal à 0.2. Quel sera la longueur de notre pale?

Exercice 2

Avec un sonomètre, on mesure le niveau sonore, en décibel du bruit produit par un champ d'éoliennes. Pour une éolienne, le niveau sonore mesuré est égal à 46 dB. Le niveau sonore, en dB du bruit produit par un champ de n d'éoliennes est donné par la relation :

$$B_n = 46 \times (1,02)^{n-1} \quad \text{avec} \quad n \geq 1$$

1) Calculer le niveau sonore du bruit produit par 25 éoliennes, puis celui produit par 38 éoliennes

A proximité d'une zone urbaine, le niveau sonore du bruit produit par un champ d'éoliennes doit être strictement inférieur à 90 dB.

3) Donner le nombre maximal d'éoliennes qu'il est possible d'implanter.

Exercice 3 : L'hélice de l'éolienne a un diamètre de 80m et balaie une surface S.

Elle tourne à 24 tr/min.

La vitesse du vent est $V=54 \text{ Km/h}$

La masse volumique de l'air est de 1.1 Kg/m^3

1) Déterminer le volume d'air traversant la surface S en 1 seconde.

2) a- Calculer la masse d'air déplacé.

b- Calculer l'énergie cinétique correspond au déplacement de ce volume d'air.

3) Calculer la puissance P_{vent}

4) En fait, la puissance maximal récupérable $P_{récup}$ par l'hélice est donné par : $P_{récup}=0,37.S.V^3$

Calculer le rendement de la turbine éolienne.

5) Calculer le couple développé par l'hélice.

La récolte de l'énergie du vent

Le multiplicateur (Boite de vitesse)

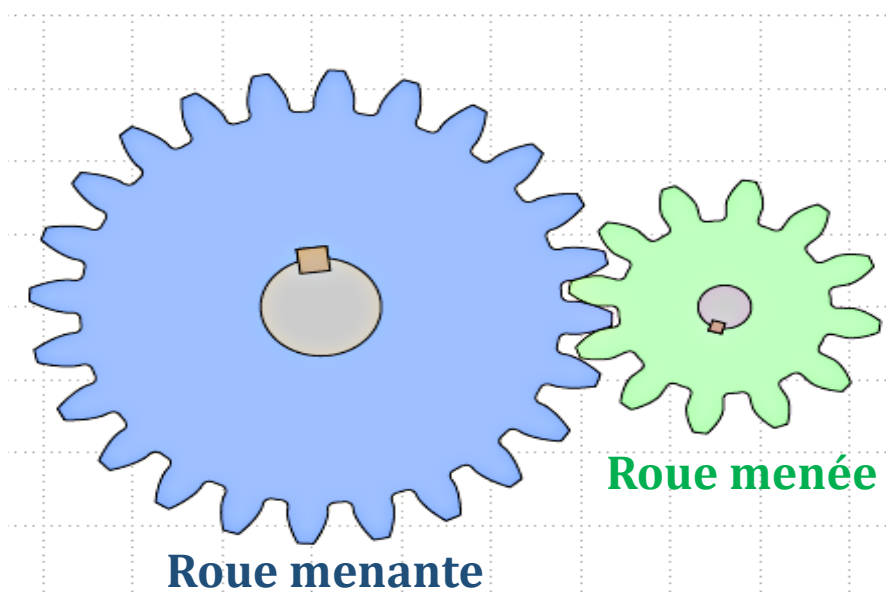
Le multiplicateur permet de transformer la puissance à vitesse lente et à un couple élevé produite par le rotor de l'éolienne, en une puissance à grande vitesse et à couple faible utilisée par la génératrice.

✓ Principe de fonctionnement de la boîte d'engrenages

Un engrenage est un mécanisme constitué de deux roues dentées mobiles en rotation autour de deux axes. Ces roues sont caractérisées par leur diamètre et le nombre de dents qu'elles possèdent.

Le rapport de transmission :

$$r = \frac{\text{Nombre de dents de la roue menante}}{\text{Nombre de dents de la roue menée}}$$



La récolte de l'énergie du vent

Le multiplicateur

Le rendement est variable suivant la puissance transmise mais en moyenne 97%

Le multiplicateur étant l'un des constituants les plus coûteux de l'aérogénérateur, il fut et reste l'un des éléments sensibles de la chaîne de conversion.

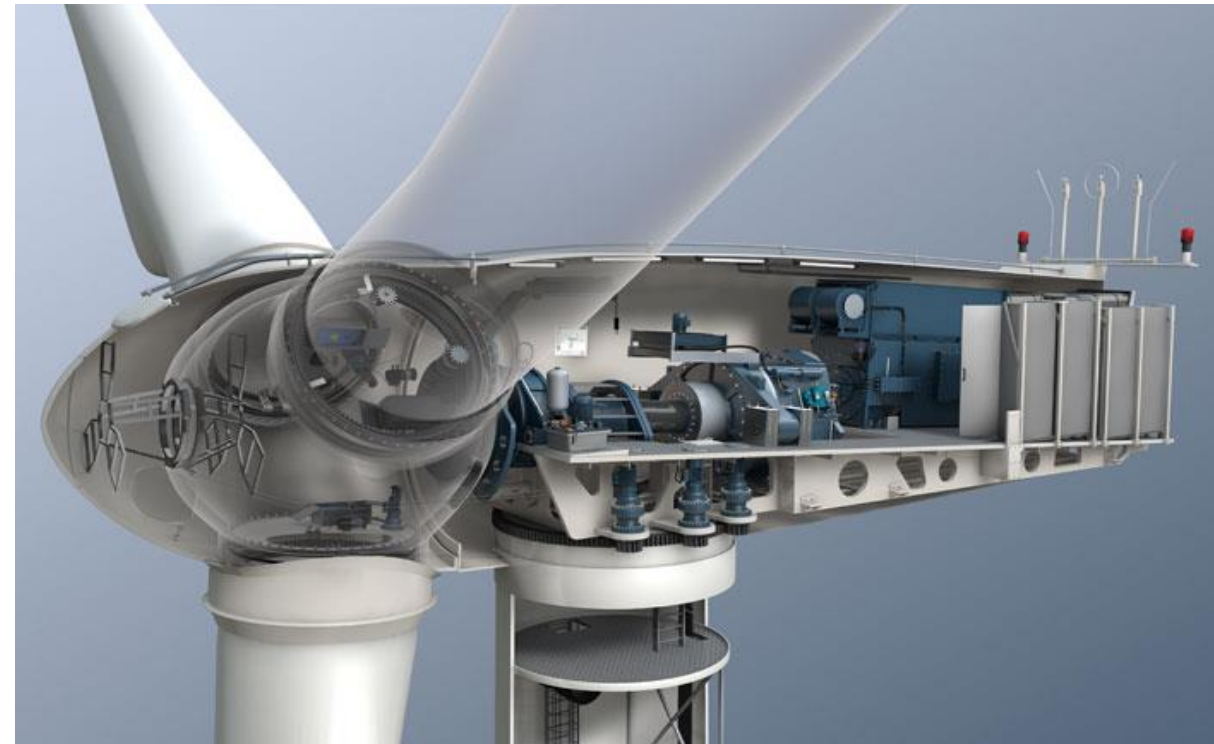
Les multiplicateurs fonctionnent sans arrêt et sont soumis à des charges lourdes et variables entraînant une usure, ce qui nécessite une maintenance préventive et corrective.

- ✓ Filtrage et changement des huiles
- ✓ inspection par endoscopie (vérification de la denture des engrenages)
- ✓ vérification des roulements et échange quasi-systématique.
- ✓ Dans les pays froids on doit réchauffer les boîtes d'engrenages

La récolte de l'énergie du vent

Le multiplicateur

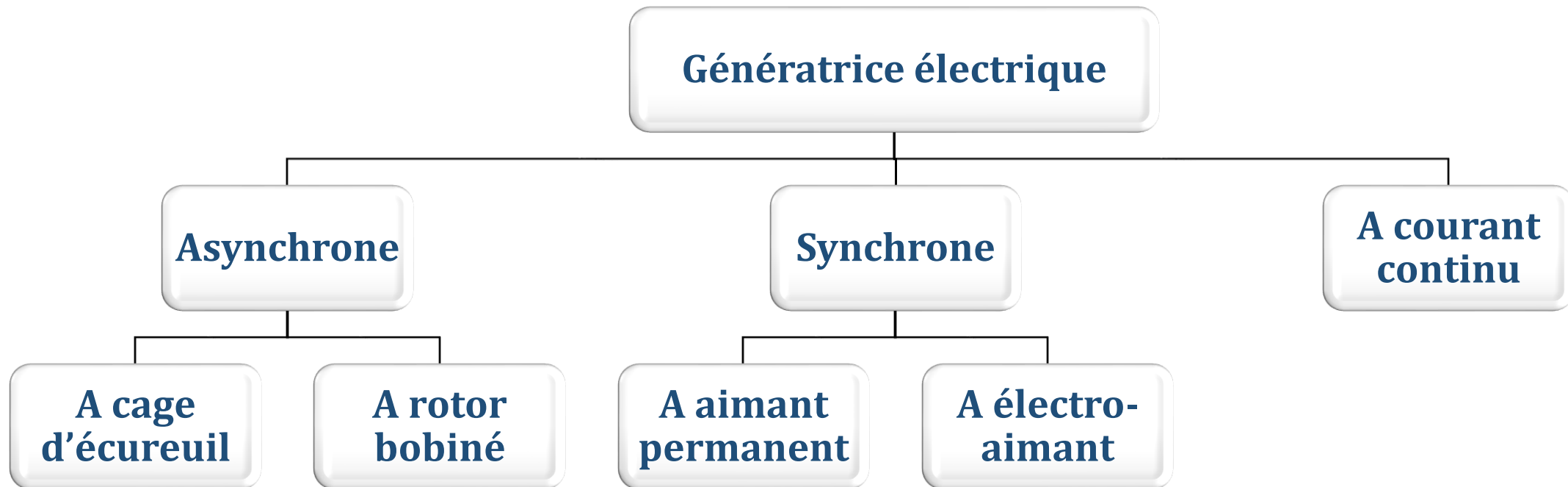
Dans les grandes éoliennes, certains fabricants, réalisent des turbines « à attaque directe », c'est-à-dire que le rotor entraîne directement une génératrice spéciale (multipolaires) mais la taille de cet alternateur est important. La plupart des petites éoliennes de moins de 15 kW n'ont pas de boîte de vitesse.



La récolte de l'énergie du vent

La génératrice électrique

La génératrice est l'élément de l'éolienne qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

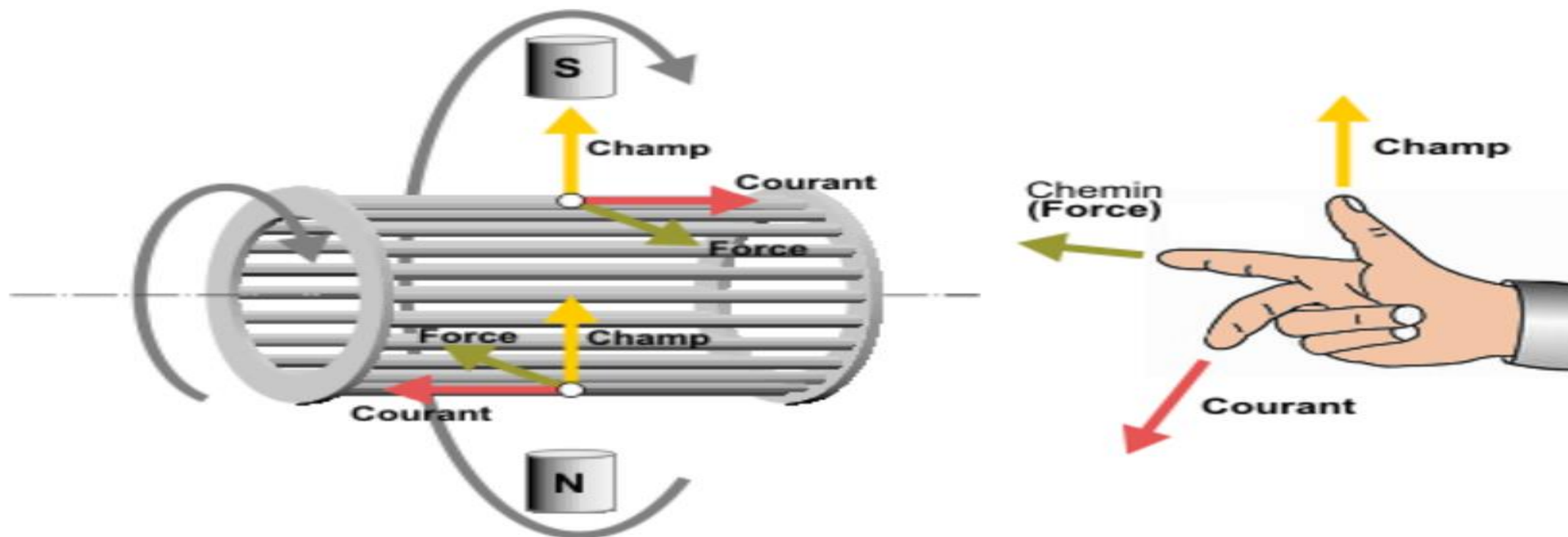


La récolte de l'énergie du vent

La génératrice électrique

✓ Machine Asynchrone

Le moteur asynchrone est constitué de deux parties distinctes : le stator (statique) et le rotor (rotatif). L'espace entre le stator et le rotor est appelé entrefer.



La récolte de l'énergie du vent

La génératrice électrique

✓ Machine Asynchrone

Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique tournant à la vitesse de synchronisme (Vitesse du champ tournant):

$$n_s = \frac{f}{p}$$

avec $\left\{ \begin{array}{l} n_s: \text{Vitesse de synchronisme (tr/s)} \\ f: \text{fréquence des courants alternatifs (Hz).} \\ p: \text{Nombre de paires de pôles} \end{array} \right.$

Le glissement g représente la différence de vitesse de rotation entre l'arbre du moteur et le champ tournant du stator. Il est généralement exprimé en pourcentage de la vitesse de synchronisme n_s

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{n_g}{n_s}$$

avec $\begin{array}{l} n: \text{Vitesse de rotation (tr/s).} \\ n_g: \text{Vitesse de glissement} \end{array}$

La récolte de l'énergie du vent

La génératrice électrique

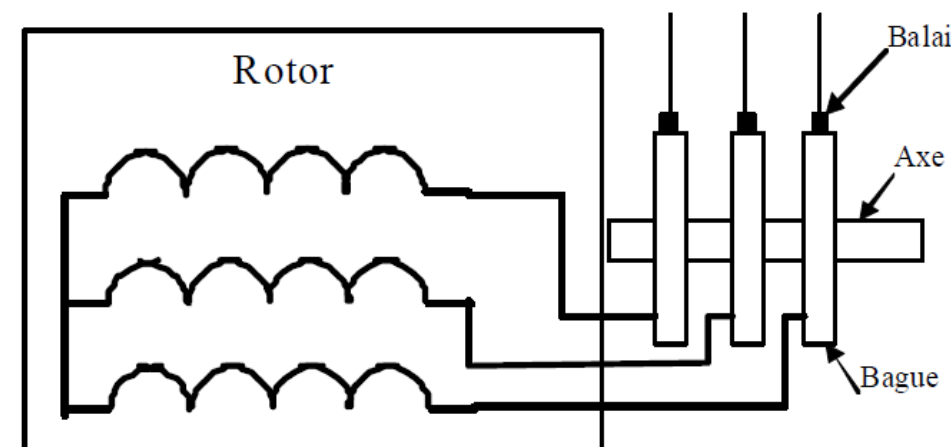
✓ Génératrice Asynchrone

La machine asynchrone à cage fonctionne en mode génératrice si le rotor tourne à une vitesse de rotation supérieure à la vitesse de synchronisme.

Les génératrices ont besoin de courant sur le stator pour induire le champ initial.

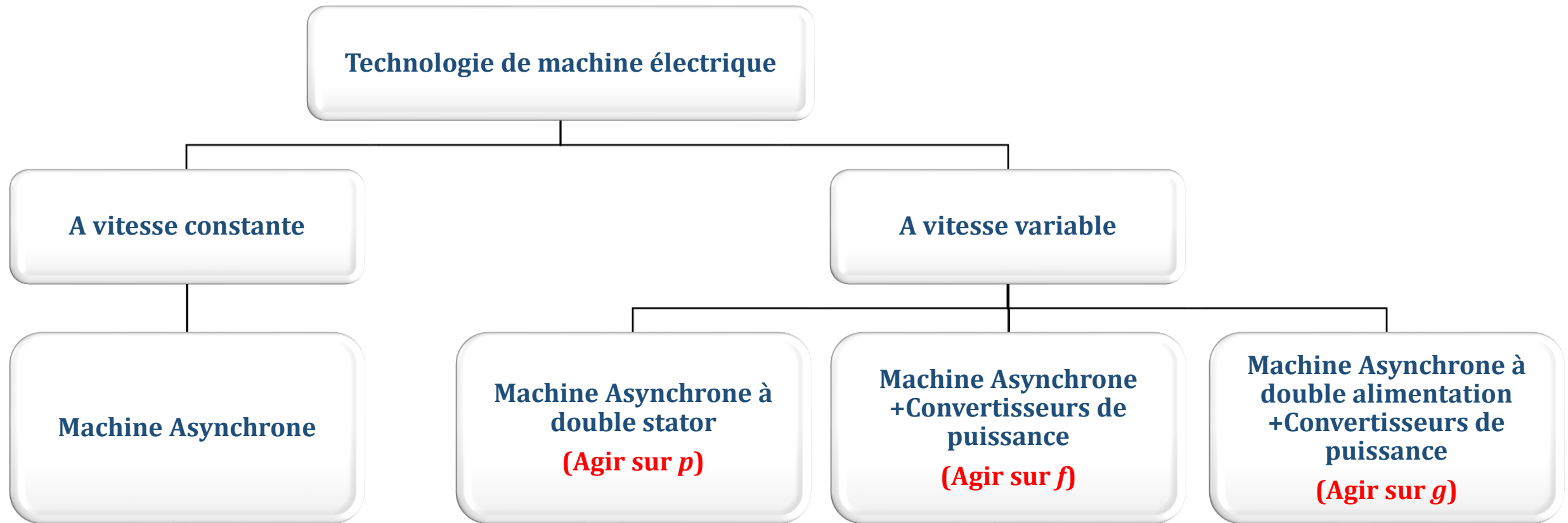
✓ Génératrice Asynchrone à double alimentation

Elle possède un stator identique à celui d'une machine asynchrone classique ou d'une machine synchrone. La différence réside dans le rotor composé d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques et connectés en étoile. Leurs extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais



La récolte de l'énergie du vent

Technologies des machines électriques



La récolte de l'énergie du vent

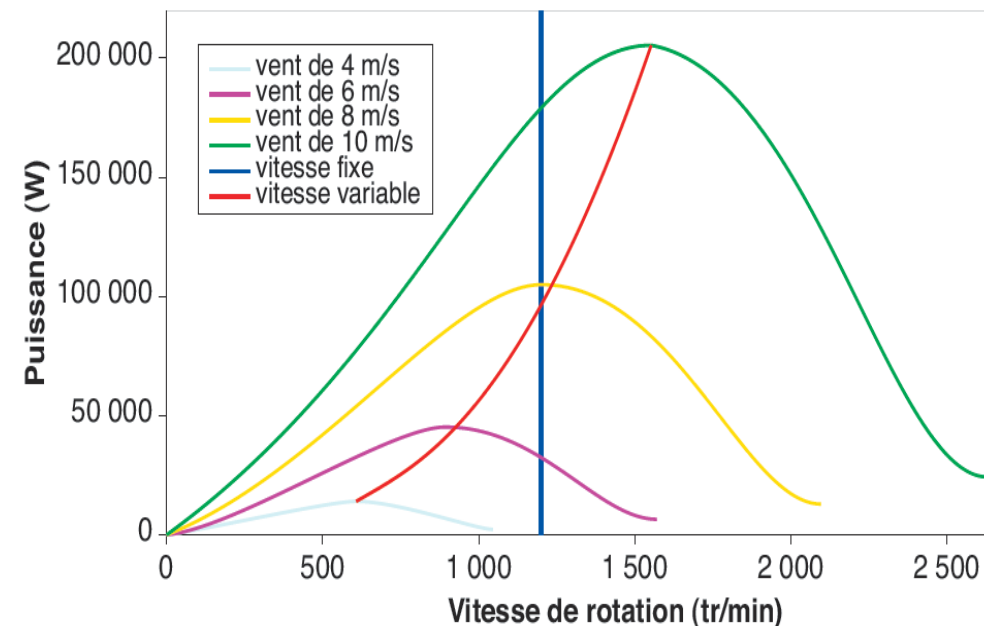
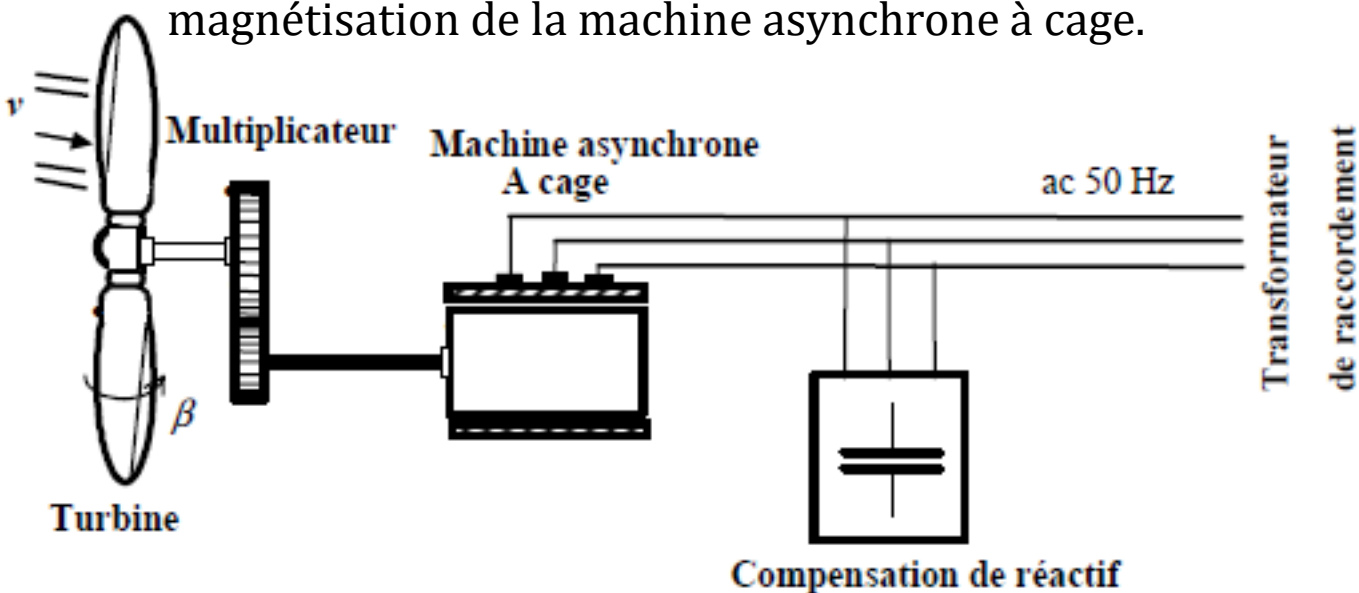
Technologies des machines électriques

✓ Génératrice à vitesse constante

Cette technologie est en voie de disparition sur les plus grandes éoliennes car une part conséquente du productible est perdue

La vitesse de cette machine est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control)

Une batterie de condensateurs est souvent associée pour compenser la puissance réactive nécessaire à la magnétisation de la machine asynchrone à cage.

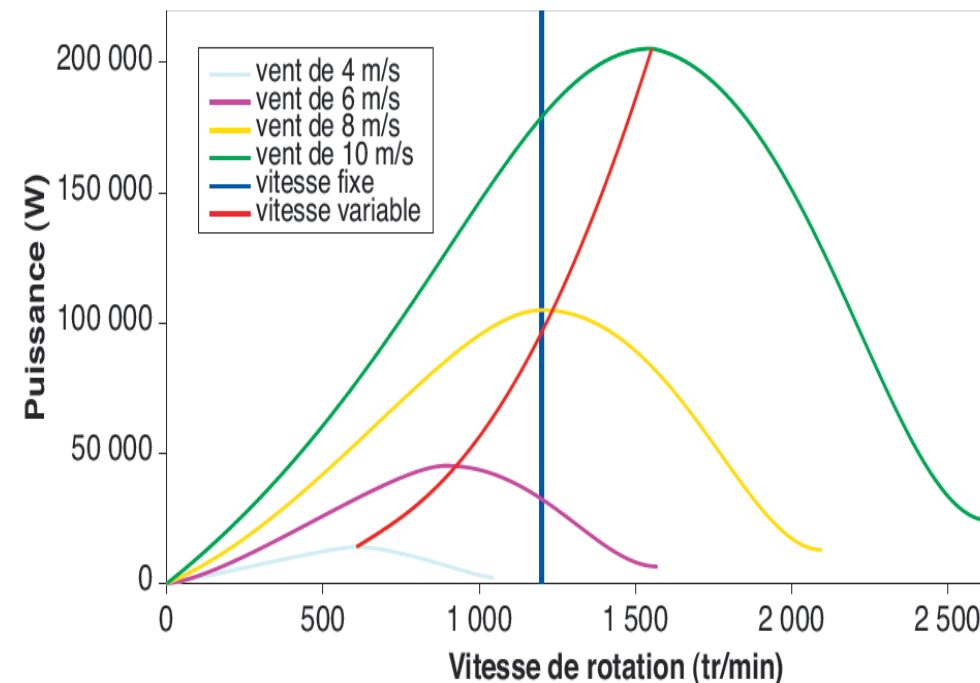
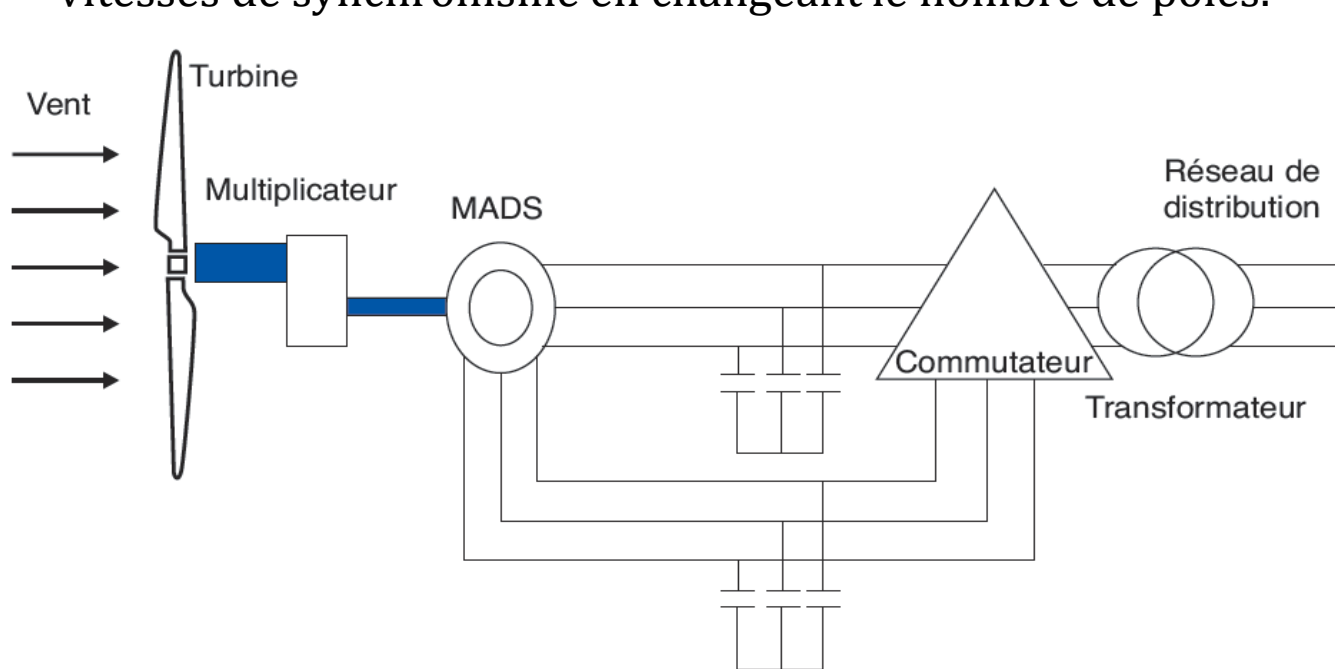


La récolte de l'énergie du vent

Technologies des machines électriques

✓ Génératrice à vitesse Variable (Machine Asynchrone à Double Stator)

Cette configuration d'éolienne permet de fonctionner à deux vitesses. On réalise un double bobinage au stator, qui induit un nombre variable de paires de pôles, et donc deux plages de vitesses différentes (un pour les petites vitesses de vent et l'autre pour les vitesses du vent élevées). Il est en effet possible d'imposer deux vitesses de synchronisme en changeant le nombre de pôles.

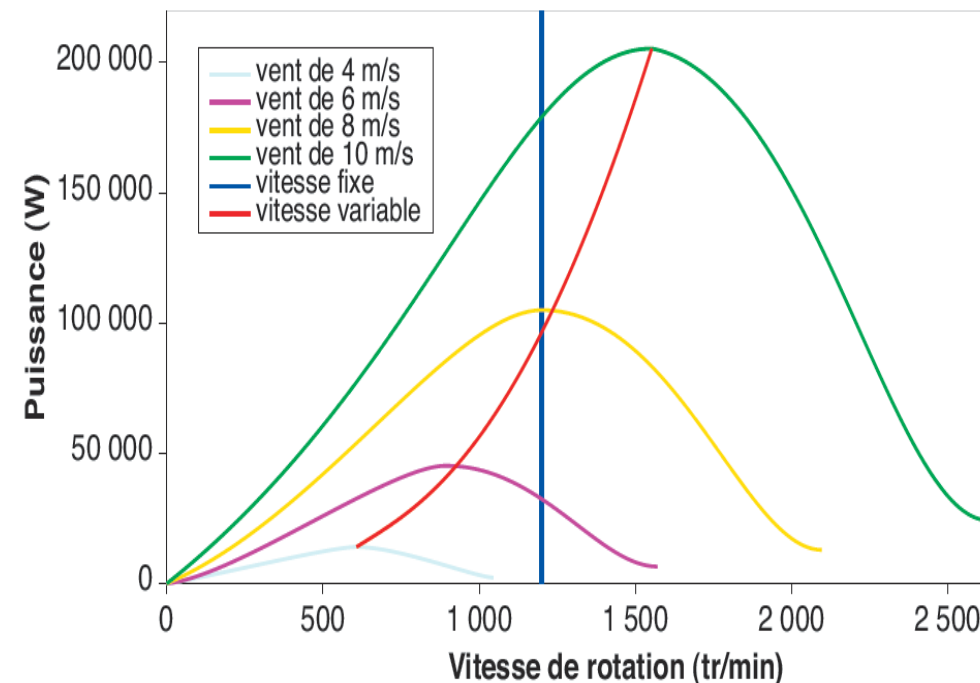
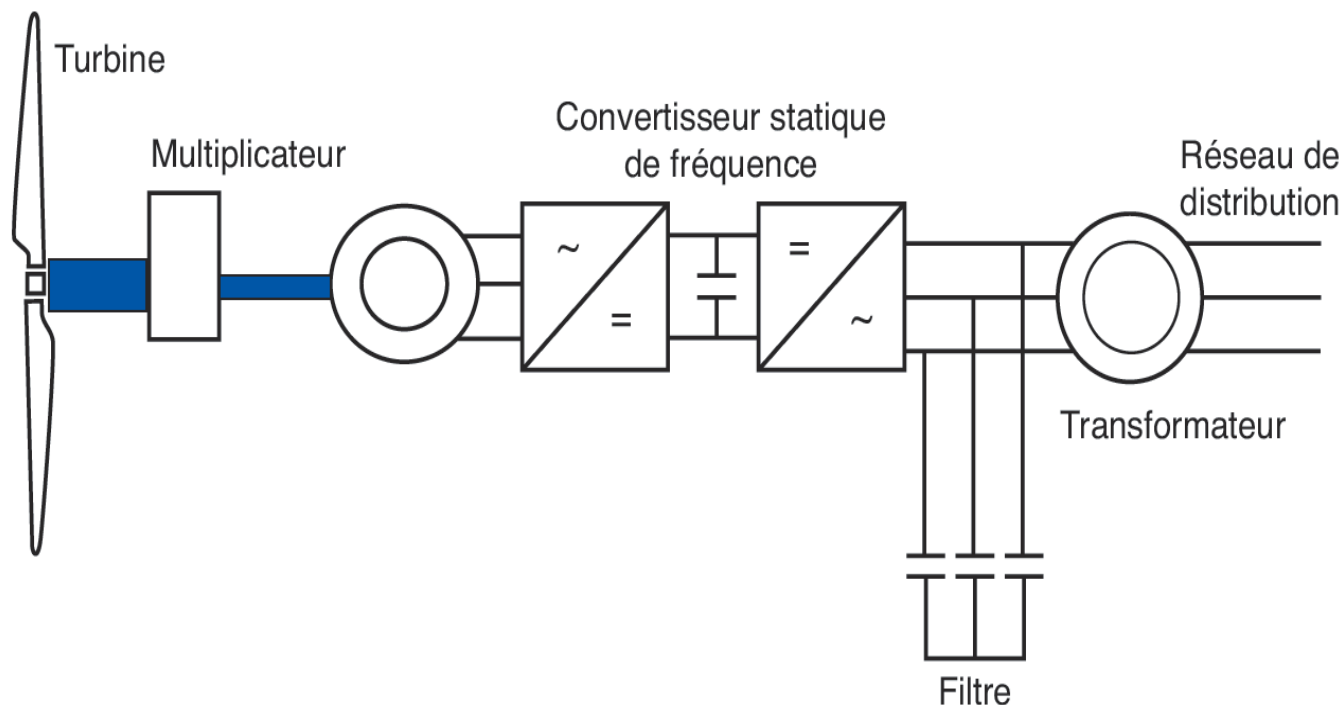


La récolte de l'énergie du vent

Technologies des machines électriques

✓ Génératrice à vitesse Variable (Machine Asynchrone + Convertisseur statique)

Pour la machine asynchrone à cage, l'amplitude et la fréquence sont fonction de la vitesse de rotation. Le raccord au réseau nécessite donc un convertisseur statique de fréquence (un redresseur et un onduleur)



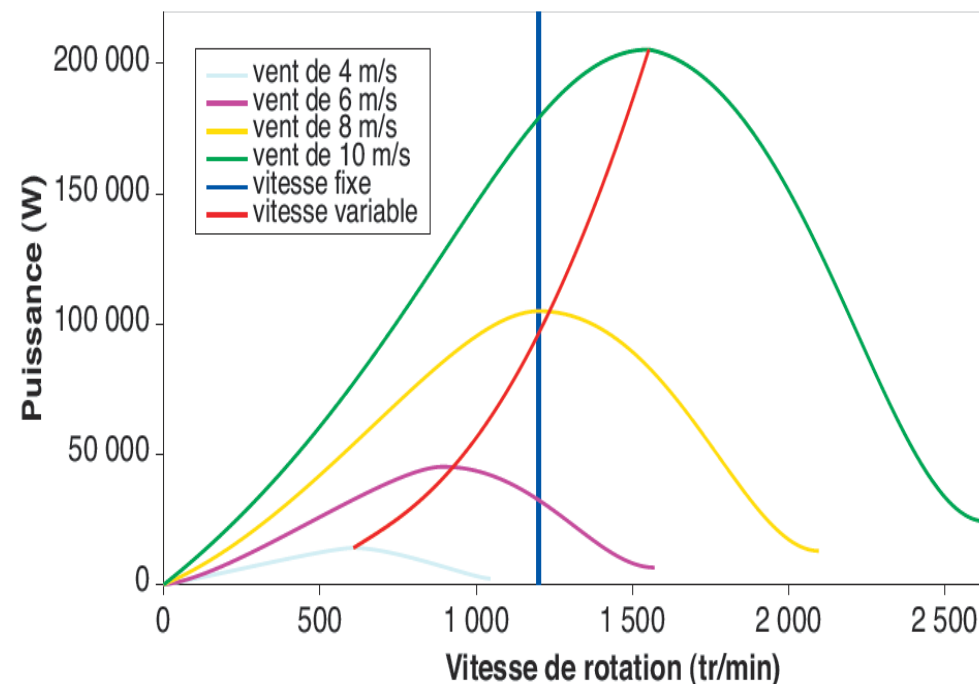
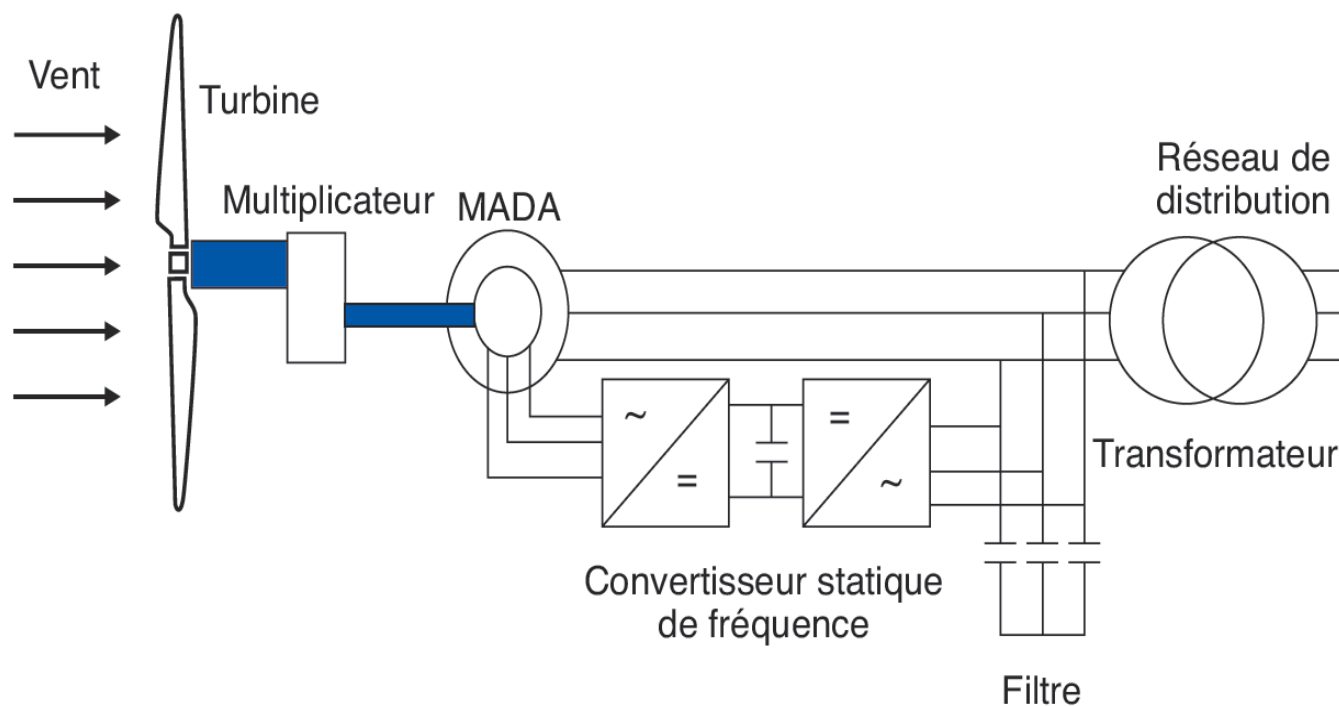
La récolte de l'énergie du vent

Technologies des machines électriques

✓ Génératrice à vitesse Variable (Machine Asynchrone à Double Alimentation + Convertisseur statique)

Avec les génératrices asynchrones à double alimentation (GADA), la variabilité de la vitesse s'appuie sur la possibilité d'effectuer un glissement de vitesse, ensemble peut aussi être associé à un double convertisseur MLI.

Ce type de génératrice est le plus utilisé en grandes éoliennes.



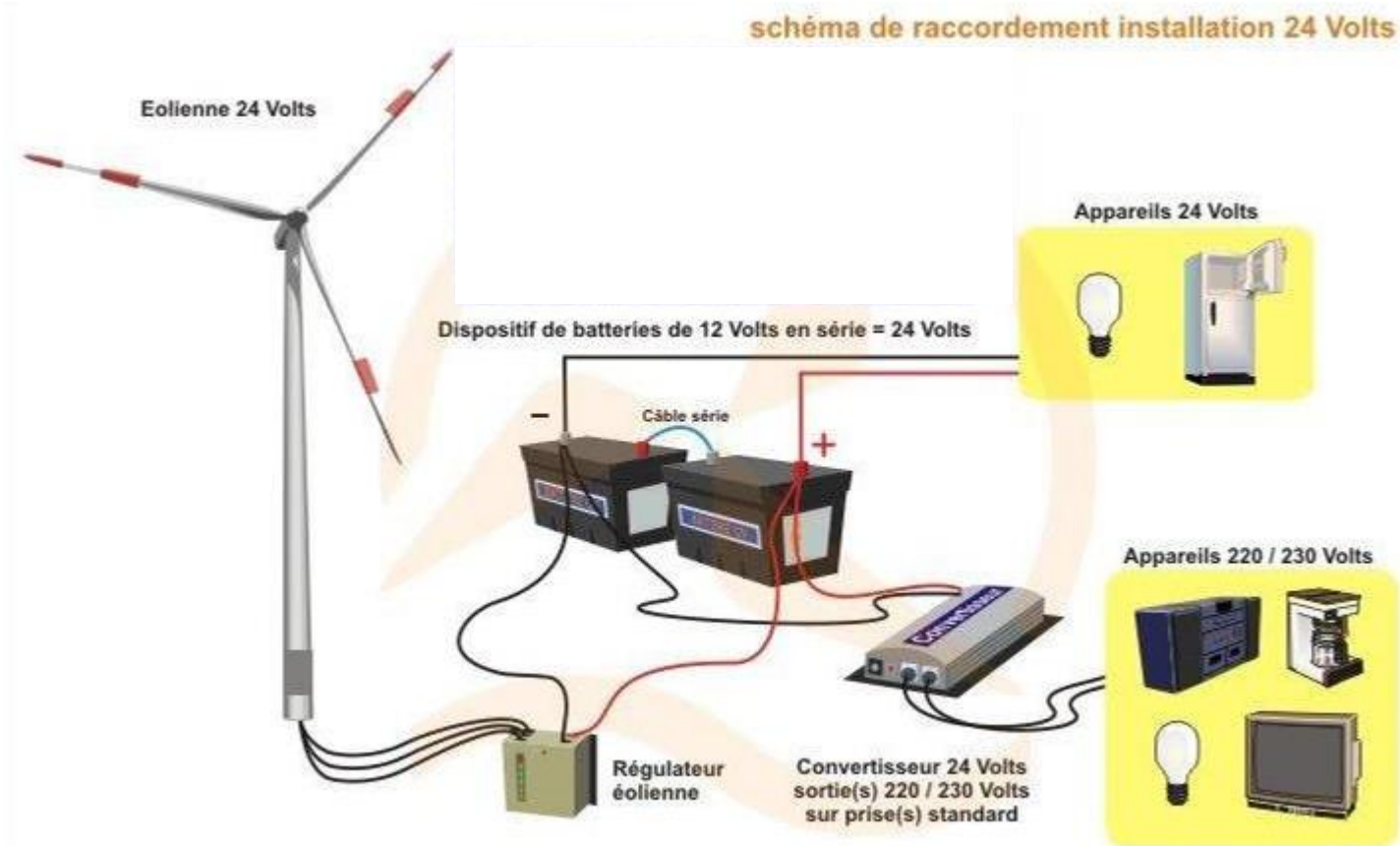
La récolte de l'énergie du vent

Systèmes autonomes

Les systèmes autonomes peuvent fournir de l'énergie éolienne mécanique ou électrique et ils sont souvent équipés d'un dispositif qui stocke l'énergie pour la restituer lorsque les conditions de vent sont défavorables

✓ Composants d'une installation éolien autonome

- **Génératrice éolienne** : pour convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique (Souvent alternative)
- **Redresseur** : Le redresseur convertit le courant alternatif en courant continu pour charger les batterie en vue des périodes de grand vent.



La récolte de l'énergie du vent

Systèmes autonomes

✓ Composants d'une installation éolien autonome

- **Régulateur (Contrôleur de charge)**: pour protéger les batteries de la surcharge et de décharge profonde
- **Générateur d'appoint (à essence, au carburant diesel ou au propane)** : Utilisé Si la demande d'électricité est continue et que le vent est faible pendant une période prolongée,
- **Onduleurs** : convertit le courant continu d'une batterie en alternatif.



La récolte de l'énergie du vent

Systèmes autonomes

✓ Composants d'une installation éolien autonome

- **Batteries** : On équipe un grand nombre de systèmes éoliens de batteries qui produisent de l'électricité de remplacement quand le vent n'est pas propice

Parmi les plus importantes caractéristiques des batteries :

- ✓ **la profondeur de décharge (PDD)**: est la quantité d'énergie qui a été déchargée de la batterie. Elle est donnée en pourcentage de sa capacité.
- ✓ **Capacité (Ah)**: la quantité totale d'électricité qu'une batterie peut fournir à une charge externe après avoir été complètement chargée.

$$C = I \times t$$

avec $\left\{ \begin{array}{l} I: \text{Courant de décharge (A).} \\ t: \text{Temps de décharge (h).} \end{array} \right.$

- ✓ **Nombre de cycle de vie** : Précise le nombre de cycles (c.-à-d. le cycle de vie nombre de décharges et de recharges) que la batterie peut supporter avant de manquer de capacité.

La récolte de l'énergie du vent

Systèmes autonomes

✓ Investissement

Le prix d'une éolienne horizontale, installation par un professionnel comprise, varie en fonction de différents facteurs : ses composants, sa puissance, sa taille, son diamètre, les possibilités du terrain, la vitesse du vent, les travaux d'ancrage. Rien que pour les composants, les prix varient énormément :

- Éolienne domestique : entre 100 000 DH et 300 000 DH
- Travaux d'installation : entre 70 000 DH et 120 000 DH
- Régulateur/redresseur : entre 300 DH et 4000 DH
- Batterie : entre 100 DH et 4000 DH
- Onduleur : entre 4000 DH et 30 000 DH

On estime que les prix oscillent entre 250 000 DH et 400 000 DH. Certaines éoliennes verticales sont moins chères.

L'étude de la faisabilité d'un système éolien doit être confiée à une personne qualifiée,



Exercice :

Pour l'éolienne étudiée, la vitesse V en bout de pales est de 63 m/s. Le rayon R de balayage des pales est de 14 m.

La fréquence de rotation N du rotor de la génératrice (Asynchrone à cage) est de 1528 tr/min.

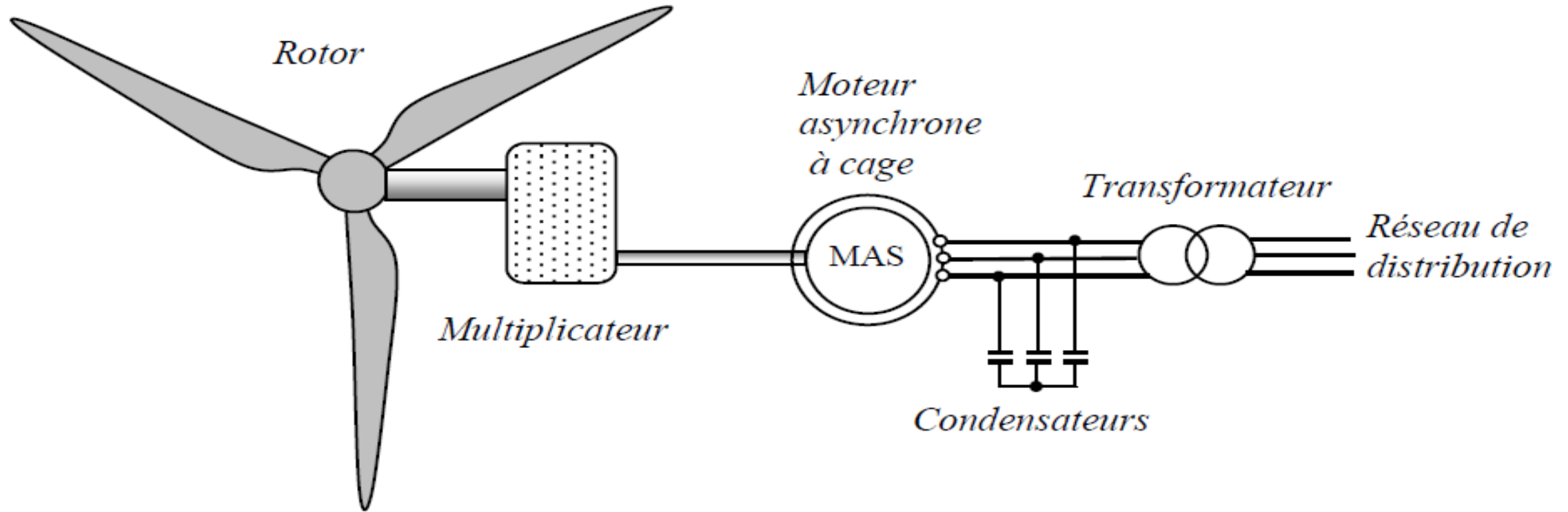
- 1) Calculer, en tr/min, la fréquence de rotation n_p des pales.
- 2) Calculer le rapport de multiplication r des fréquences de rotation.
- 3) Déterminer le nombre de paires de pôles et le glissement de la machine pour une fréquence imposée $f=50\text{Hz}$

Cette éolienne a une puissance nominale de 2,3MW. La production d'énergie mesurée pendant une année est de 3 GWh.

- 4) Calculer le taux de charge de cette éolienne
- 5) Quelle devrait être la puissance d'une installation qui produirait la même énergie annuelle, mais de manière constante ?

Exercice_2 :

Soit l'installation suivante : La turbine de l'éolienne entraîne une génératrice asynchrone (MAS) à cage qui débite sur un réseau de distribution. Les données sont :



Densité de l'air : $1,225 \text{ Kg/m}^3$

Rayon des pales: $R=45 \text{ m}$

Coefficient du multiplicateur: $G=70$

Nombre de pôles de la MAS : 4

Fréquence du réseau : 50Hz

1) Calculer pour un glissement $g=-1\%$

- ✓ La vitesse du rotor de la génératrice asynchrone en rad/s et en tr/min
- ✓ La vitesse de l'arbre primaire

On suppose que la vitesse du vent est constante et égale à 10m/s. La valeur maximale du coefficient de puissance réel est 0.4

2) Calculer pour le même glissement , la vitesse spécifique et la puissance électrique maximum P_e fournie au réseau pour l'éolienne. On prendra un rendement de multiplicateur à 97% et de la génératrice de 96%

3) Quelle serait l'énergie produite (KWh) en une année, si la vitesse du vent était toujours optimale .

Exercice 3 :

On donne quelque paramètres d'une éolienne de 300KW

La masse volumique de l'air: $1,225 \text{ Kg/m}^3$

Vitesse nominale du vent : 14 m/s

Diamètre des pales: $R=28 \text{ m}$

Vitesse nominale de rotation du rotor : 44 tr/min

Rapport du multiplicateur: $G=35$

- 1) Quel pourcentage de l'énergie du vent récupère-t-on au point de fonctionnement nominal ?
- 2) De quel type d'éolienne s'agit-il : éolienne lente ou éolienne rapide ?
- 3) Quelle est la vitesse nominale N du rotor de la génératrice

Travaux Dirigés

Exercice_1 :

On s'intéresse à une éolienne moyenne, de diamètre $d = 50$ m. Dans les conditions « normales » de température et de pression (15°C , 1013 hPa) la masse volumique de l'air sec est de $\rho = 1,225$ kg/m³. Elle est animée par un vent régulier qui souffle à une vitesse de $v = 11$ m/s (≈ 40 km/h)

1°) -. Calculer la masse m_1 d'une tranche d'air de longueur $l = 1$ mètre se situant face l'éolienne. En déduire la masse m_s d'air qui franchi les pales chaque seconde.

2°) - Calculer l'énergie cinétique E_{cin} de cette masse, en déduire la puissance du vent P .

3°) - Reprendre le calcul en utilisant la loi $P = \frac{1}{2} \rho V^3 \pi r^2$, puis justifier cette formule.

4°) – Calculer la puissance maximum récupérable en considérant que la limite de Betz égale à

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

Exercice_2 :

Une éolienne a les caractéristiques suivantes :

- Diamètre de rotor : 100 m avec 3 pales,
- Coefficient d'efficacité $C_p = 0,44$.

1) Calculer la puissance captée par l'éolienne pour une vitesse de vent de 7 m/s puis pour une vitesse de vent de 10 m/s.
La masse volumique de l'air $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$.

2) Conclure.

3) Quels paramètres faut-il prendre en compte lors du choix et de l'installation d'une éolienne ?

Exercice_3 :

Nous souhaitons dimensionner les pales d'une éolienne à vitesse fixe pour obtenir une puissance mécanique de 750 kW pour une vitesse de vent de 13,8 m/s. On considère un coefficient de puissance C_p égal à 0,2.

Question : Quel sera la longueur de notre pale ou le rayon de la surface balayée par la turbine ?

Exercice_4 :

On donne quelques paramètres d'une éolienne de 300 kW: Diamètre des pales : 28 m

Surface balayée par le rotor : 615 m^2

Vitesse nominale du vent : 14 m/s

Vitesse nominale de rotation du rotor : 43 tr/min

Rapport du multiplicateur : 35

Vitesse nominale de la MAS : 1515 tr/min

Par ailleurs, la densité de l'air est de $1,225 \text{ kg/m}^3$.

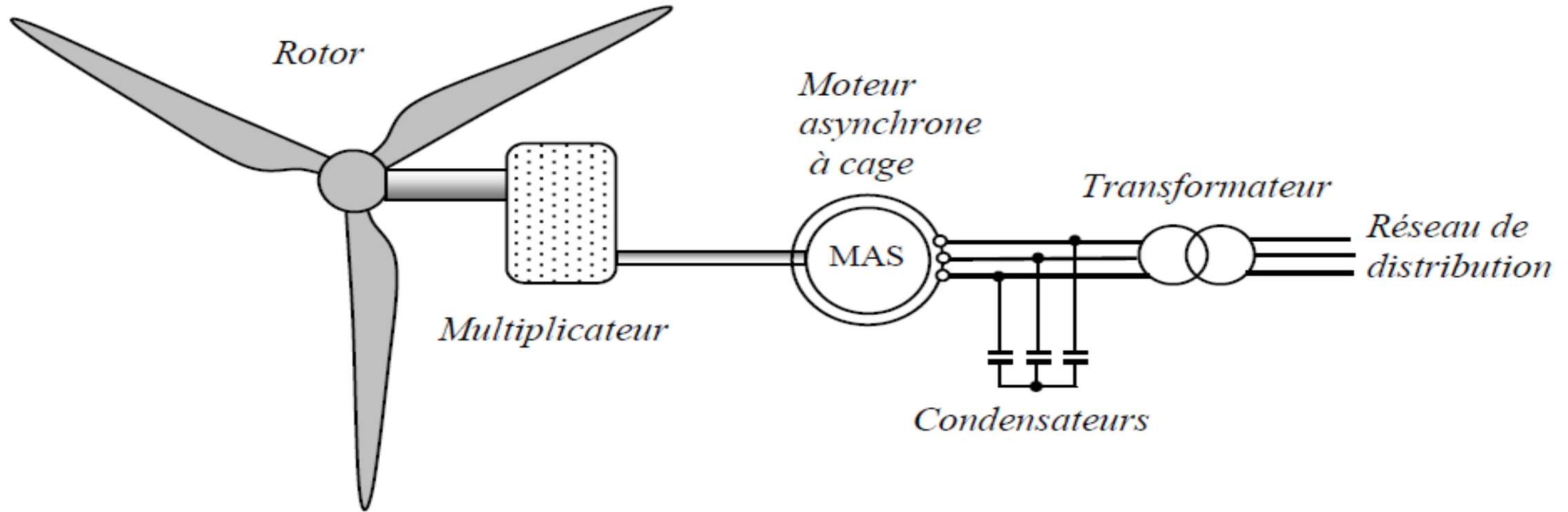
1- Quel pourcentage de l'énergie du vent récupère t-on au point de fonctionnement nominal ?

2- De quel type d'éolienne s'agit-il : éolienne lente ou éolienne rapide ?

3 -Quelle est la vitesse nominale N du rotor de la génératrice ?

Exercice_5 :

Soit l'installation suivante : La turbine de l'éolienne entraîne une génératrice asynchrone (MAS) à cage qui débite sur un réseau de distribution. Les données sont :



Densité de l'air : $1,225 \text{ Kg/m}^3$

Nombre de pôles de la MAS : 4

Rayon des pales: $R=45 \text{ m}$

Fréquence du réseau : 50Hz

Coefficient du multiplicateur: $G=70$

1) Calculer pour un glissement $g=-1\%$

- ✓ La vitesse du rotor de la génératrice asynchrone en rad/s et en tr/min
- ✓ La vitesse de l'arbre primaire

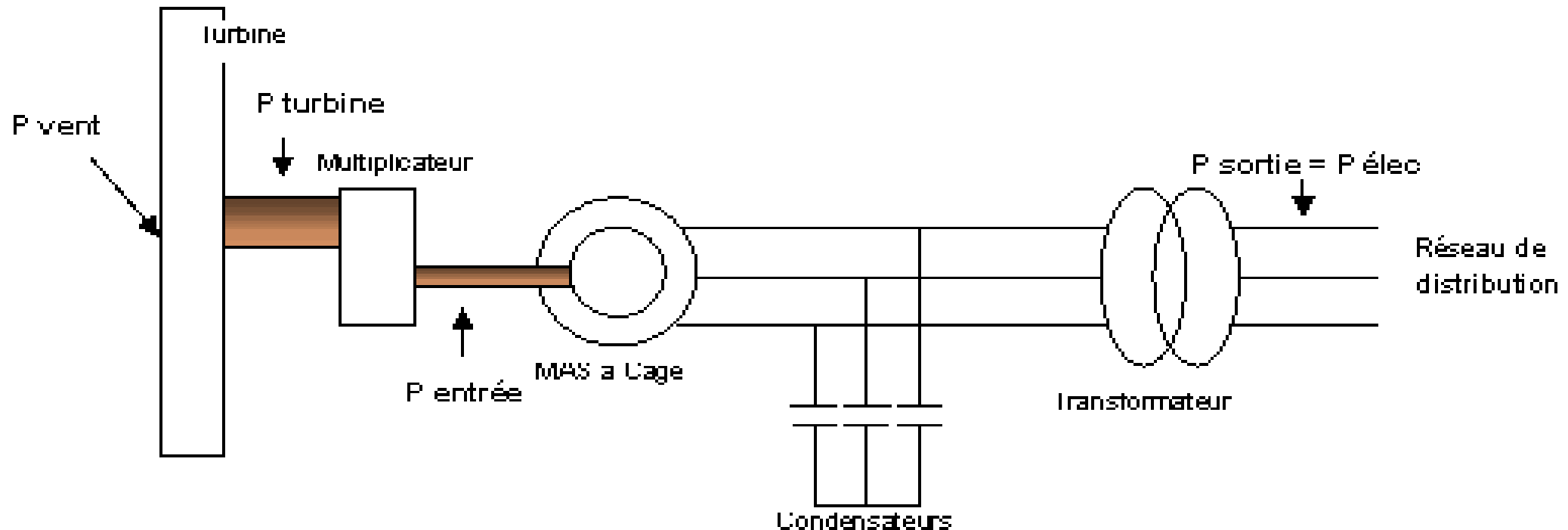
On suppose que la vitesse du vent est constante et égale à 10m/s. La valeur maximale du coefficient de puissance réel est 0.4

2) Calculer pour le même glissement , la vitesse spécifique et la puissance électrique maximum P_e fournie au réseau pour l'éolienne. On prendra un rendement de multiplicateur à 97% et de la génératrice de 96%

3) Quelle serait l'énergie produite (KWh) en une année, si la vitesse du vent était toujours optimale .

Exercice_6 :

L'éolienne sert à transformer l'énergie mécanique du vent en énergie électrique. Nous vous proposons d'étudier la génératrice asynchrone à cage d'une éolienne installée au sein d'une ferme éolienne de puissance totale de 7,5 MW. Les éoliennes fonctionnent à vitesse fixe, la génératrice est reliée au réseau. Nous allons déterminer la puissance, la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice, et le schéma équivalent de la génératrice. Les éoliennes comportent des multiplicateurs. Le schéma est le suivant :



Soient les données suivantes :

$V = 15 \text{ m/s}$, la vitesse du vent nominale supposée constante

$N = 32,8 \text{ tr/min}$, la vitesse nominale de la turbine éolienne

$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$, la masse volumique de l'air

$C_p = 0,27$, le coefficient aérodynamique

$R = 21,7 \text{ m}$, le rayon des pales

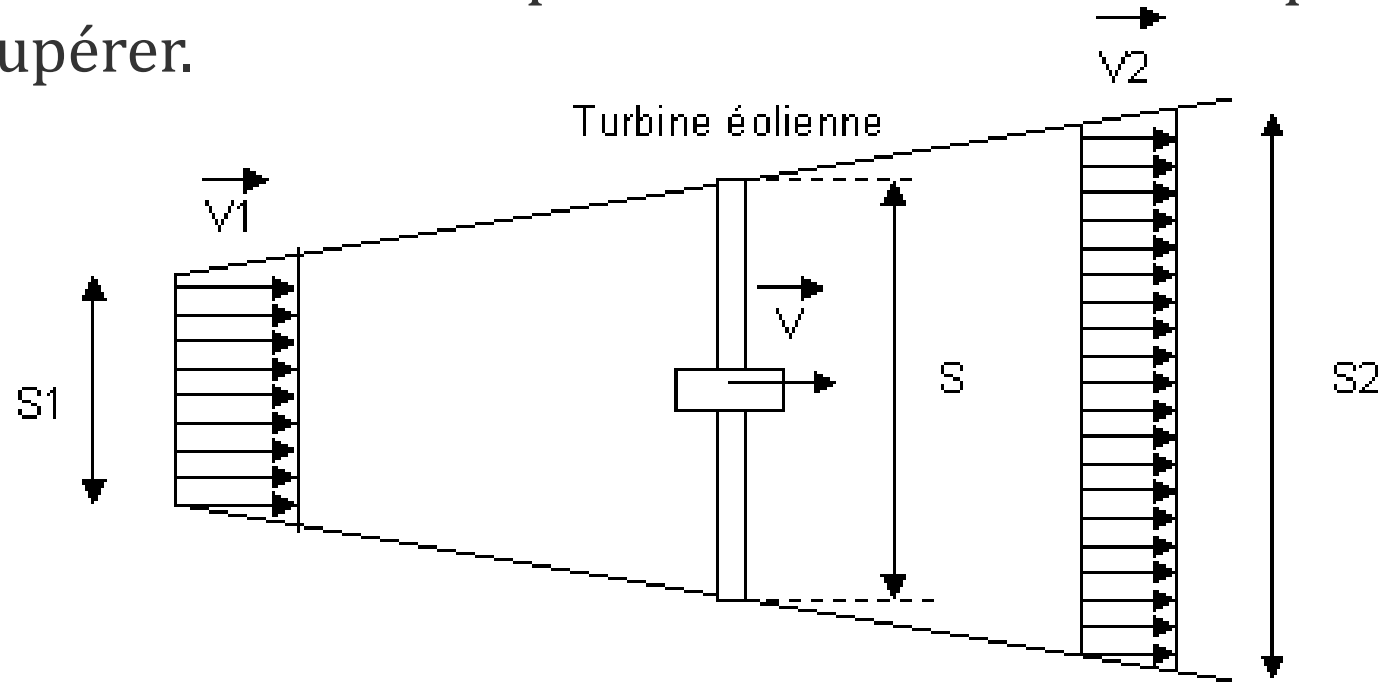
Sachant que le multiplicateur utilisé a un rapport de 46,48 et un rendement de 96% et que les éoliennes tournent à 32,5 tr/min. Les pertes dues à la génératrice sont supposées négligeables,

1- Calculez la puissance électrique en sortie de la génératrice P_e

2- Calculez la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice.

Exercice_7 :

L'énergie électrique que va fournir l'éolienne dépend de la puissance du vent qu'elle va récupérer. L'exercice va nous permettre de déterminer quelle quantité de vent la turbine va récupérer.

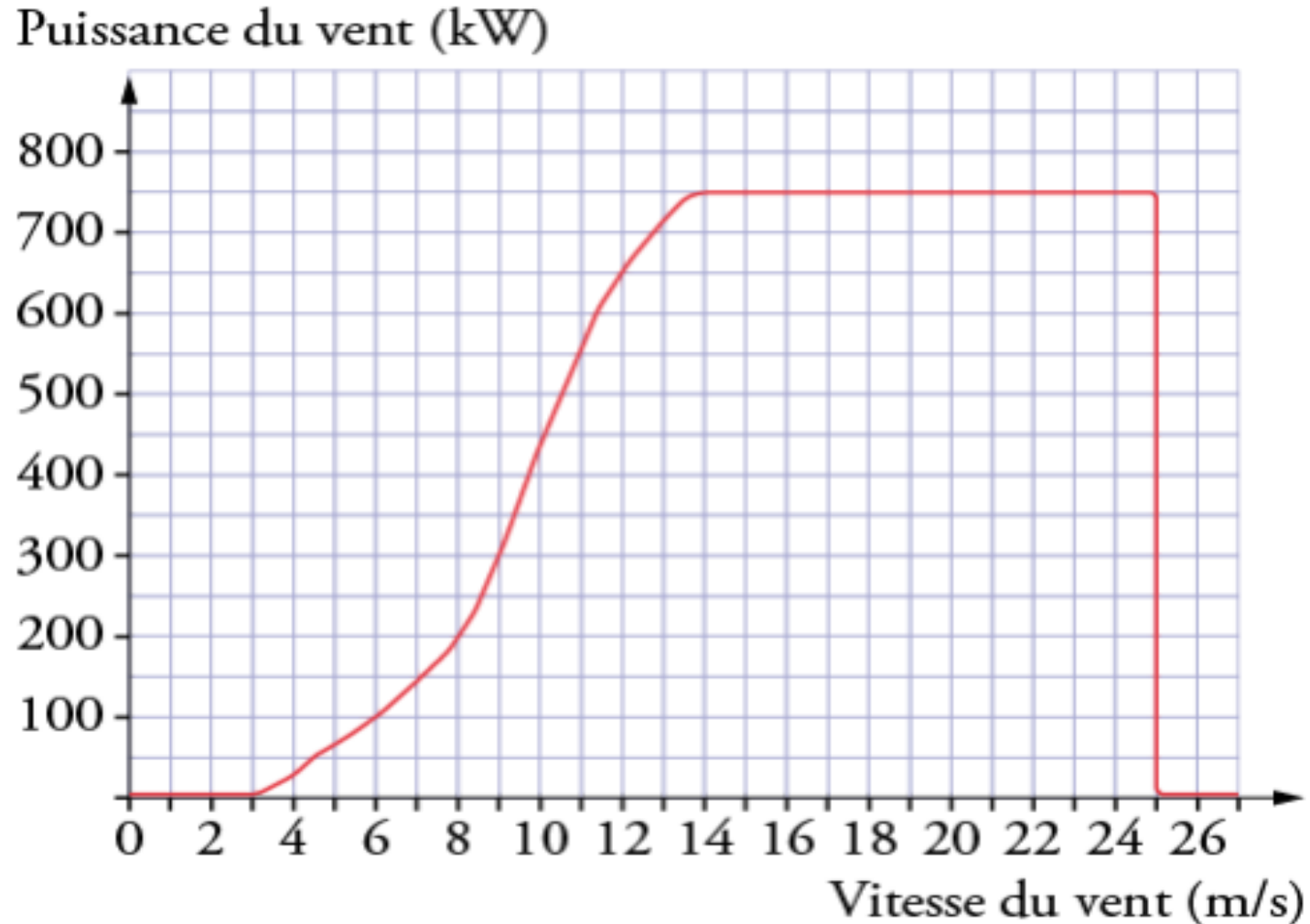


On modélise le passage du vent, dans le rotor de l'hélice par un tube de courant, avec V , V_1 , V_2 les vitesses du vent avant les pales, aux pales, et après les pales. L'air est déterminé par sa masse volumique ρ en kg/m^3 , la surface balayée par les pales est S en m^2 .

- 1- Quelle est la puissance P absorbée par le rotor ?
 - 2- Quelle est la variation d'énergie cinétique par seconde de la masse d'air ?
 - 3- Que peut-on en déduire sur la relation entre V , V_1 , V_2 ?
 - 4- Déterminer la vitesse V_2 pour laquelle, la puissance est maximale.
 - 5- Calculer alors la puissance maximale P_{\max} ,
- En déduire le coefficient de puissance maximal pour une éolienne.

Exercice_8 :

Une éolienne est un dispositif composé de pales en rotation qui transforme l'énergie du vent en électricité. Voici une courbe donnant la puissance électrique fournie par une éolienne en fonction de la vitesse du vent.



1. À partir de quelle vitesse du vent l'éolienne délivre-t-elle une puissance non nulle ?
2. À partir de quelle vitesse du vent la puissance délivrée n'augmente-t-elle plus ?
3. À partir de quelle vitesse du vent la puissance délivrée retombe-t-elle à zéro ?
4. Quelle puissance une éolienne délivre-t-elle pour un vent de 11 m/s et pour 8 m/s ?
5. Supposons que la puissance délivrée par l'éolienne soit maintenant de 600 kW. Pour calculer l'énergie E délivrée par l'éolienne en fonction de la durée de fonctionnement, on utilise la fonction $E(t) = 600 \times t$ où t est la durée en secondes (s), $E(t)$ est l'énergie en kilojoules (kJ).
 - a) Quelle est la nature de cette fonction ? Justifier.
 - b) Calculer l'énergie obtenue au bout de 12 s.
 - c) Calculer l'énergie obtenue au bout de 2 min 25 s.
 - d) Calculer la durée nécessaire pour obtenir une énergie de 3 000 kJ.
 - e) Tracer la courbe représentative de cette fonction,

Exercice_9 :

Montrer que le couple mécanique produit par la turbine peut s'exprimer par

$$\Gamma = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot C_{\Gamma} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot V^2$$

Où C_{Γ} est le coefficient de couple, R le rayon de la pale, v la vitesse du vent.