

Systèmes de conversion éolienne

SOLUTION DE EXERCICE 1 : L'Énergie Disponible dans le Vent

Données :

- Diamètre du rotor : $D = 80 \text{ m}$
- Rayon du rotor : $R = 40 \text{ m}$
- Masse volumique de l'air : $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$
- Vitesse du vent site A : $V_A = 8 \text{ m/s}$
- Vitesse du vent site B : $V_B = 10 \text{ m/s}$

1. Calcul de la puissance totale disponible dans le vent pour chaque site

Calcul de la surface balayée :

$$A = \pi \times R^2 = \pi \times (40)^2 = \pi \times 1600 = 5026,55 \text{ m}^2$$

Site A :

$$P_{vent_A} = 1/2 \times \rho \times A \times V_A^3 = 0,5 \times 1,225 \times 5026,55 \times (8)^3 = 1\,577 \text{ kW} = 1,577 \text{ MW}$$

Site B :

$$P_{vent_B} = 1/2 \times \rho \times A \times V_B^3 = 0,5 \times 1,225 \times 5026,55 \times (10)^3 = 3079 \text{ kW} = 3,079 \text{ MW}$$

2. Comparaison des deux résultats

$$\text{Rapport de puissance} = \frac{P_{vent_B}}{P_{vent_A}} = \frac{3,079}{1,577} = 1,953 \approx 1,95$$

Ou directement avec le cube du rapport des vitesses :

$$\frac{V_B}{V_A} = \left(\frac{10}{8}\right)^3 = 1,953$$

Conclusion : La puissance du vent sur le site B est environ **1,95 fois** supérieure à celle du site A, alors que la vitesse n'a augmenté que de 25%. Ceci illustre l'impact considérable de la vitesse du vent en raison de sa relation cubique avec la puissance.

3. Augmentation du diamètre du rotor du site A à 100 mètres

Nouveau rayon et nouvelle surface :

$$R_{nouveau} = 50m$$

$$A_{nouveau} = \pi \times (50)^2 = \pi \times 2500 = 7\,853,98 \text{ m}^2$$

Nouvelle puissance :

$$P_{vent_A_nouveau} = 1/2 \times \rho \times A \times V_A^3 = 0,5 \times 1,225 \times 7\,853,98 \times (8)^3 = 2\,463 \text{ kW} = 2,463 \text{ MW}$$

Comparaison :

Augmentation du diamètre de 80 m à 100 m (soit +25%) : la puissance est passée de 1,577 MW à 2,463 MW (soit +56%).

La puissance est proportionnelle au carré du diamètre (car $A \propto D^2$).

Commentaire : La puissance est proportionnelle à la surface balayée (donc au carré du diamètre), tandis qu'elle est proportionnelle au **cube** de la vitesse du vent. Par conséquent, un changement de la vitesse du vent a un effet bien plus important sur la puissance disponible qu'un changement du diamètre du rotor. Cependant, en pratique, augmenter le diamètre du rotor est un choix technique réalisable, alors que la vitesse du vent est une donnée naturelle que l'on ne peut pas modifier.

4. Pourquoi une éolienne ne peut-elle pas extraire toute cette puissance?

Une éolienne ne peut pas extraire toute l'énergie cinétique du vent, car cela signifierait que l'air s'arrêterait complètement derrière le rotor, ce qui bloquerait le flux d'air et empêcherait toute extraction continue.

Nom de la limite physique : La limite de Betz

Valeur approximative :

$$C_{p_max} = 16/27 \approx 0,593 \text{ (soit 59,3\%)}$$

Cela signifie que, théoriquement, une éolienne ne peut extraire au maximum qu'environ **59,3%** de la puissance disponible dans le vent.

EXERCICE 2 : La Limite de Betz et la Puissance Extraite

- **Données :**

- Coefficient de performance maximal : $C_{p_max} = 0.48$
- Rayon du rotor : $R = 45m$
- Masse volumique de l'air : $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$
- Vitesse du vent : $V = 9 \text{ m/s}$

1. Calcul de la surface balayée par le rotor

$$A = \pi \times R^2 = \pi \times (45)^2 = \pi \times 2025 = \mathbf{6\,361,73m^2}$$

2. Calcul de la puissance maximale que cette éolienne peut extraire mécaniquement

On calcule d'abord la puissance totale du vent :

$$P_{vent_A_nouveau} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V_A^3 = 0,5 \times 1,225 \times 6\,361,73 \times (9)^3 = 2841 \text{ kW} = \mathbf{2,841 \text{ MW}}$$

Puissance extraite :

$$P_{ext} = C_p \times P_{vent} = 0,48 \times 2\,840,9 = 1\,363,6 \text{ kW} = 1,364 \text{ MW}$$

3. Si l'on remplace cette éolienne par une éolienne idéale fonctionnant à la limite de Betz

$$C_{p_betz} = 16/27 \approx \mathbf{0,592}$$

$$P_{Betz} = 0,5926 \times 2\,840,9 = 1\,683,5 \text{ kW} = 1,684 \text{ MW}$$

Différence de puissance :

$$\Delta P = P_{Betz} - P_{ext} = 1\,683,5 - 1\,363,6 = 319,9 \text{ kW}$$

L'éolienne idéale de Betz permettrait d'extraire environ 320 kW de plus.

4. Où se situent les autres pertes dans la chaîne de conversion ?

En plus des pertes aérodynamiques au niveau du rotor (représentées par C_p), les autres pertes qui empêchent de transformer toute l'énergie cinétique du vent en électricité se situent dans :

- **Le multiplicateur (boîte de vitesses) :** Pertes mécaniques par frottement (rendement $\approx 95\text{-}98\%$).
- **La génératrice électrique :** Pertes électriques et magnétiques (rendement $\approx 94\text{-}97\%$).
- **Le convertisseur de puissance :** Pertes dans l'électronique de puissance.

- **Le transformateur élévateur** : Pertes magnétiques et par effet Joule pour élever la tension en vue du transport.
- **Les câbles et connexions électriques** : Pertes ohmiques (effet Joule).

EXERCICE 3 : Extrapolation de la Vitesse du Vent avec l'Altitude

Données :

- Hauteur du moyeu prévue : $z_2 = 100 \text{ m}$
- Vitesse mesurée à hauteur $z_1 = 10 \text{ m}$: $V_1 = 6,0 \text{ m/s}$
- Exposant de cisaillement pour terrain agricole ouvert : $\alpha = 0,19$
- Exposant de cisaillement pour la mer : $\alpha = 0,10$

Calcul de la vitesse du vent estimée à 100 mètres sur le site terrestre

$$V_2 = V_1 \times \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha$$

$$V_{2_terrestre} = 6,0 \times \left(\frac{100}{10} \right)^{0,19} = 6,0 \times 1,549 = \mathbf{9,29 \text{ m/s}}$$

Vitesse du vent à 100 mètres en pleine mer

$$V_{2_maritime} = 6,0 \times \left(\frac{100}{10} \right)^{0,10} = 6,0 \times 1,259 = \mathbf{7,55 \text{ m/s}}$$

3. Rapport de la puissance disponible (terrestre / maritime) à 100 mètres

$$\text{Rapport de puissance} = \frac{P_{\text{terrestre}}}{P_{\text{maritime}}} = \left(\frac{V_{\text{terrestre}}}{V_{\text{maritime}}} \right)^3 = \left(\frac{9,29}{7,55} \right)^3 = (1,231)^3 = \mathbf{1,86}$$

Conclusion : Dans ce cas précis, le site terrestre offre une puissance disponible environ **1,86 fois** supérieure à celle du site maritime. Cela s'explique par le fait que l'exposant α est plus élevé sur terre (0,19 contre 0,10), ce

qui signifie que la vitesse du vent augmente plus rapidement avec l'altitude au-dessus de la terre que de la mer. Cependant, cela ne signifie pas que les sites terrestres sont toujours plus favorables, car le vent de surface en mer est souvent plus fort au départ.

Deux autres raisons pratiques pour lesquelles un site en mer est souvent plus favorable

Le facteur de forme k de la distribution de Weibull :

En mer, le facteur de forme k est généralement plus élevé (environ 2,2 à 2,5) que sur terre (environ 1,8 à 2,0). Une valeur de k plus élevée signifie que la distribution des vitesses de vent est plus concentrée autour de la valeur moyenne. Cela se traduit par :

- Un plus grand nombre d'heures de fonctionnement aux vitesses optimales de l'éolienne.
- Une production d'énergie plus régulière et plus prévisible.
- Moins de périodes de vents très faibles ou au contraire extrêmes (hors plage de fonctionnement).

Les turbulences :

En mer, la rugosité de surface est beaucoup plus faible que sur terre. Par conséquent :

- L'intensité de turbulence est significativement plus faible.
- Des turbulences plus faibles réduisent les contraintes mécaniques (fatigue) sur les pales, le moyeu et la tour.
- Cela augmente la durée de vie de l'éolienne et réduit les coûts de maintenance.
- L'écoulement plus laminaire améliore aussi légèrement l'efficacité aérodynamique du rotor.

EXERCICE 4 : Composants d'une Éolienne et Flux d'Énergie

Données :

- Puissance totale disponible du vent : $P_{\text{vent}} = 2 \text{ MW}$
- Rendement aérodynamique du rotor : $C_p = 0,45$
- Rendement mécanique du multiplicateur : $\eta_{\text{mult}} = 0,96$
- Rendement électrique de la génératrice : $\eta_{\text{gen}} = 0,95$

1. Calcul de la puissance mécanique à la sortie du rotor (arbre lent)

$$P_{\text{rotor}} = C_p \times P_{\text{vent}} = 2 \times 0,45 = \mathbf{0,90 \text{ MW}}$$

2. Calcul de la puissance mécanique à la sortie du multiplicateur (arbre rapide)

$$P_{\text{rapide}} = \eta_{\text{mult}} \times P_{\text{rotor}}$$

$$P_{\text{rapide}} = 0,90 \times 0,96 = 0,864 \text{ MW}$$

3. Calcul de la puissance électrique à la sortie de la génératrice

$$P_{\text{elec}} = \eta_{\text{gen}} \times P_{\text{rapide}}$$

$$P_{\text{elec}} = 0,864 \times 0,95 = 0,8208 \text{ MW}$$

4. Rendement global du système et comparaison avec la limite de Betz

Rendement global :

$$\eta_{\text{global}} = C_p \times \eta_{\text{mult}} \times \eta_{\text{gen}}$$

$$\eta_{\text{global}} = 0,45 \times 0,96 \times 0,95 = 0,4104 \text{ (soit 41,04\%)}$$

Comparaison avec la limite de Betz :

$$\eta_{\text{global}} = 41,04\%$$

$$C_{p_Betz} = 59,26\%$$

$$Ecart = 59,26\% - 41,04\% = 18,22\%$$

Explication de la différence :

Le rendement global de **41,04%** est bien inférieur à la limite de Betz de **59,26%** car la limite de Betz ne concerne que le rendement aérodynamique maximal théorique du rotor seul. Le rendement global, lui, prend en compte toutes les pertes successives de la chaîne de conversion :

Pertes aérodynamiques dans le rotor (55%) : $C_p = 0,45$ signifie que 55% de l'énergie du vent n'est même pas captée par le rotor, notamment en raison de la limite de Betz et des imperfections aérodynamiques réelles.

Pertes mécaniques dans le multiplicateur (4%) : Frottements dans les engrenages et les paliers.

Pertes électriques dans la génératrice (5%) : Pertes par effet Joule dans les enroulements, pertes magnétiques (hystérésis, courants de Foucault), et pertes mécaniques internes.

Au final, sur les 2 MW disponibles dans le vent, seuls **820,8 kW** sont convertis en électricité, soit moins de la moitié.

Puissance totale perdue :

$$P_{pertes} = 2 - 0,8208 = 1,179 \text{ MW}$$

Ainsi, environ **59%** de l'énergie du vent est dissipée sous forme de chaleur tout au long de la chaîne de conversion. Ces pertes sont inhérentes aux lois de la physique (limite de Betz) et de la thermodynamique (frottements, effet Joule).