

Conception technique d'une éolienne

Ce problème étudie les contraintes techniques liées à la conception des éoliennes, en accordant — sauf en partie I — une attention particulière aux éoliennes dites de Darrieus de type H (Figure 1b).



a) Éoliennes à axe horizontal



b) Éolienne Darrieus de type H

Figure 1 Différents types d'éoliennes

Certaines questions, repérées par une barre en marge, ne sont pas guidées et demandent de l'initiative de la part du candidat. Les pistes de recherche doivent être consignées par le candidat sur sa copie ; si elles sont pertinentes, elles seront valorisées. Le barème tient compte du temps nécessaire pour explorer ces pistes et élaborer un raisonnement, il valorise ces questions de façon très significative.

Des données numériques et un formulaire figurent dans le document réponse. Des documents utiles sont regroupés en fin d'énoncé.

I Enjeux énergétiques

Il est déconseillé de consacrer plus de 20 minutes à la résolution de cette partie pour laquelle on s'appuiera sur les documents 1 à 5 en fin d'énoncé.

Pour diminuer les émissions de CO_2 engendrées par le transport routier, il est envisagé, à terme, de remplacer par des véhicules électriques l'ensemble des véhicules à moteur thermique utilisés par les particuliers.

Q 1. Calculer le supplément de consommation énergétique annuelle que cette conversion au tout électrique occasionnerait. Cela demanderait-il de créer de nouvelles unités de production d'électricité ?

Le passage au tout électrique ne conduit à une diminution significative des émissions de CO_2 que dans la mesure où l'énergie électrique est produite avec un bilan carbone très faible. L'utilisation d'énergie éolienne est, de ce point de vue, une possibilité à étudier en gardant à l'esprit certains ordres de grandeurs évalués dans la question suivante.

Q 2. Quantifier la puissance de crête nécessaire à la recharge de tous les véhicules électriques. Estimer la surface d'un champ éolien permettant d'assurer cette production d'électricité. Commenter.

II Conversion énergie éolienne en énergie mécanique – éolienne type Darrieus

On considère une éolienne à axe vertical, type Darrieus H, FAIRWIND 10 kW, implantée sur un site d'essais dans l'Aude. Celle-ci a fait l'objet d'une étude de contrôle et a donc été instrumentée pour relever :

- la production de l'éolienne sur une période de 6 mois,
- la vitesse du vent à proximité de l'éolienne.

Les mesures effectuées sont reportés sur la figure 2 et synthétisées dans le tableau 1.

Q 13. Définir puis déterminer le débit d'énergie cinétique D_{E_c} traversant le cylindre éolien si l'éolienne était absente.

Q 14. Définir le coefficient de puissance η de l'éolienne qui représente le rendement moyen de l'éolienne en énergie. L'exprimer en fonction de k , λ , a et des données géométriques de l'éolienne. Faire l'application numérique. Commenter.

Q 15. Quelle sera (seront) la (les) fréquence(s) des composantes sinusoïdales du couple ? Donner leurs valeurs dans la plage de fonctionnement nominale, pour v_∞ allant de 0 à $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$?

Q 16. Montrer que la puissance de la force de traînée sur un tour est négative. Discuter de l'influence de C_D sur la puissance moyenne que peut fournir une éolienne.

III Générateur

On étudie la production d'énergie électrique par l'éolienne au moyen d'un générateur utilisant des aimants permanents. Il est constitué d'un stator intérieur cylindrique de diamètre D_i et de longueur L_r selon \vec{e}_z . Le rotor a un diamètre intérieur noté $D_i + 2e$, avec $e \ll D_i$ l'entrefer du dispositif et est maintenu en rotation autour de l'axe \vec{e}_z par une liaison pivot, sa position angulaire étant notée θ_r .

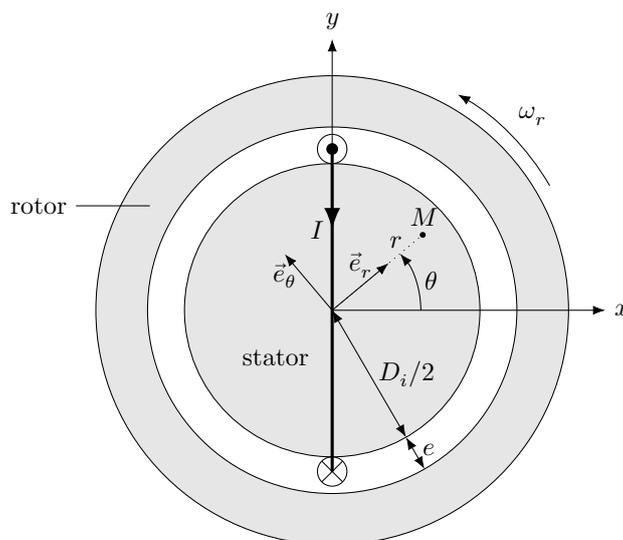


Figure 8 Rotor et stator du générateur (un courant d'intensité I parcourt l'enroulement autour du stator)

Le rotor et le stator sont constitués d'un matériau ferromagnétique doux de perméabilité magnétique relative μ_r supposée infinie.

III.A – On admet que la longueur axiale L_r est suffisamment grande pour que le champ magnétique dans l'entrefer soit indépendant de la coordonnée z . On admet également qu'il y est toujours radial, dirigé selon \vec{e}_r . On enroule autour du stator un câble parcouru par un courant électrique d'intensité $I > 0$ comme représenté sur la Figure 8. On se place dans l'approximation des régimes quasi-stationnaires magnétiques. Comme l'entrefer est très fin, ($e \ll D_i$), on peut considérer que la norme du champ magnétique y est indépendante de r .

Q 17. Montrer que le champ magnétique dans l'entrefer a pour intensité :

$$B_0 = \frac{\mu_0 I}{2e} \quad (\text{III.1})$$

et préciser son sens en fonction de l'angle θ .

Q 18. On enroule autour du stator une deuxième spire parcourue par le même courant I , dans un plan de vecteur normal orienté selon \vec{e}_y . Tracer la courbe représentative du champ magnétique total $B(\theta) = \vec{B} \cdot \vec{e}_r$ dans l'entrefer en fonction de θ .

On enroule maintenant un grand nombre de spires dans différents plans et on admet qu'une répartition adéquate permet d'obtenir un champ magnétique statorique dans l'entrefer qui varie sinusoïdalement avec l'angle θ selon

$$\vec{B}_s(I) = B_0(I) \cos(\theta) \vec{e}_r \quad \text{avec} \quad B_0(I) = \frac{N \mu_0 I}{2e} \quad (\text{III.2})$$

où N est le nombre effectif de tours de l'enroulement.

Cette expression sera valable dans toute la suite.

Q 19. Dans cette question uniquement, l'enroulement statorique fournit une puissance électrique constante de 5,0 kW sous une tension de 230 V et on a $N = 21$. Calculer la valeur de l'intensité du courant I et en déduire l'intensité maximale du champ magnétique dans l'entrefer pour $e = 2$ mm.

III.B – On utilise désormais deux enroulements statoriques similaires mais produisant chacun un maximum de leur champ magnétique dans une direction différente. Ces enroulements sont respectivement parcourus par des courants d'intensité I_1 et I_2 et créent des champs magnétiques respectifs \vec{B}_{s1} et \vec{B}_{s2} donnés par

$$\vec{B}_{s1}(I_1) = B_0(I_1) \cos(\theta) \vec{e}_r, \quad \vec{B}_{s2}(I_2) = B_0(I_2) \cos(\theta - \pi/2) \vec{e}_r,$$

où B_0 est défini dans l'expression (III.2). Les courants I_1 et I_2 ont même amplitude I_s et varient sinusoidalement à la pulsation ω_s : $I_1 = I_s \cos(\omega_s t)$, $I_2 = I_s \cos(\omega_s t - \phi_2)$.

Q 20. Comment peut-on réaliser l'enroulement créant le champ \vec{B}_{s2} si l'on connaît celui qui crée le champ \vec{B}_{s1} ?

Q 21. Déterminer la valeur de ϕ_2 permettant de réaliser un champ dit « tournant » tel que :

$$\vec{B}_s = B_t \cos(\theta - \omega_s t) \vec{e}_r,$$

et préciser l'expression de B_t en fonction, entre autres, de I_s .

On note $\phi_s = \omega_s t$ la direction dans laquelle pointe le maximum du champ magnétique tournant.

III.C – Le rotor produit, au moyen d'aimants permanents, un champ magnétique dans l'entrefer qu'on considérera lui aussi radial, uniforme sur l'épaisseur de l'entrefer, variant sinusoidalement avec la position, et solidaire du rotor. On note \vec{B}_r son expression

$$\vec{B}_r = B_r \cos(\theta - \phi_r) \vec{e}_r,$$

avec B_r une constante positive et ϕ_r l'angle dont a tourné le rotor.

Le courant dans les enroulements statoriques est désormais induit par le mouvement du rotor. On rappelle que ϕ_r (resp. ϕ_s) désigne la direction dans laquelle la composante radiale du champ magnétique du rotor (resp. du champ magnétique tournant statorique) est maximale.

Q 22. Déterminer l'expression de l'énergie magnétique totale dans l'entrefer, notée \mathcal{E}_{mag} , en fonction, entre autres, de B_r , ϕ_s , ϕ_r et de I_s .

Q 23. En déduire l'expression du couple exercé sur le rotor, donné par $\Gamma = \frac{d\mathcal{E}_{\text{mag}}}{d\phi_r}$.

On suppose dans toute la suite qu'un régime sinusoidal est établi dans lequel le rotor tourne à la pulsation ω_r constante et l'intensité du courant statorique oscille à la même pulsation $\omega_s = \omega_r$ avec une amplitude I_s . On note $\delta = \phi_r - \phi_s = \text{cste}$ qu'on suppose positif.

Q 24. Calculer la valeur maximale possible de la valeur absolue du couple pour $I_s = 22$ A et $B_r = 1,2$ T.

III.D – On peut modéliser chacun des enroulements statoriques par le même circuit électrique, représenté sur la figure 9. La résistance R et l'autoinductance L sont celles de l'enroulement statorique, la force électromotrice E est celle produite par le mouvement du rotor. La résistance R_u représente celle du dipôle alimenté par le générateur. On prendra $R = 1 \Omega$ et $L = 20$ mH.

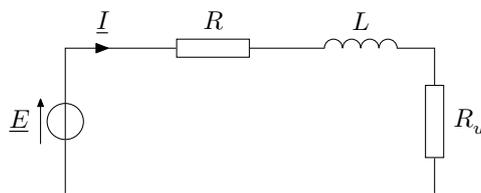


Figure 9 Schéma électrique d'un enroulement statorique

On donne les expressions des forces électromotrices instantanées des enroulements parcourus par les courants I_1 et I_2 définis au III.B, qu'on note respectivement E_1 et E_2 ,

$$\begin{cases} E_1 = \frac{\pi N D_i L_r B_r}{4} \omega_r \sin(\phi_r) \\ E_2 = -\frac{\pi N D_i L_r B_r}{4} \omega_r \cos(\phi_r) \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Q 25. Justifier qualitativement les expressions précédentes.

Q 26. Déterminer, en notation complexe, les expressions des amplitudes complexes des intensités I_1 et I_2 .

Q 27. En déduire l'expression du champ magnétique statorique puis celle du couple exercé sur le rotor.

Q 28. Calculer la valeur du couple mécanique exercé par l'écoulement de l'air sur l'éolienne pour fournir une puissance moyenne de 5 kW à la charge de résistance R_u sous une tension efficace de 230 V à la fréquence de 50 Hz.

L'utilisation d'un grand nombre d'aimants régulièrement répartis sur le rotor crée désormais un champ magnétique

$$\vec{B}_r = B_r \cos(p\theta - \phi_r) \vec{e}_r.$$

Q 29. Déterminer la valeur de la pulsation ω_r de rotation du rotor pour laquelle la fréquence fondamentale du courant électrique produit en régime sinusoïdal établi est 50 Hz pour $p = 12$.

IV Aimants des rotors

Les aimants des rotors des éoliennes sont majoritairement des aimants au néodyme, c'est-à-dire des aimants permanents composés d'un alliage de néodyme, de fer et de bore ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$).

IV.A – Extraction du néodyme

Les terres rares, notamment le néodyme, ont des propriétés magnétiques exceptionnelles leur permettant, en alliage avec d'autres métaux, la miniaturisation d'aimants très performants, utilisés notamment dans les éoliennes, la téléphonie ou encore l'électroménager.

À l'état naturel, les terres rares ne sont jamais présentes sous forme métallique mais sous forme d'oxyde dans des composés minéraux.

Le néodyme est extrait d'un minerai appelé la monazite. Ce minerai contient des terres rares comme le lanthane (La), le cérium (Ce), le néodyme (Nd) ou le praséodyme (Pr) sous forme d'oxyde. La monazite extraite de la mine de Mount Weld en Australie contient entre 60 et 70 % (en masse) d'oxydes de terre rare. Le tableau 2 fournit la proportion de chaque oxyde parmi l'ensemble des oxydes de terre rare contenus dans ce minerai.

| | | | | | | | |
|-------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| La_2O_3 | CeO_3 | Pr_6O_{11} | Nd_2O_3 | Sm_2O_3 | Eu_2O_3 | Gd_2O_3 | Tb_4O_7 |
| 26 % | 51 % | 4 % | 15 % | 1,8 % | 0,4 % | 1,0 % | 0,1 % |
| Dy_2O_3 | Ho_2O_3 | Er_2O_3 | Tm_2O_3 | Yb_2O_3 | Lu_2O_3 | Y_2O_3 | Total |
| 0,2 % | 0,1 % | 0,2 % | < 0,1 % | 0,1 % | < 0,1 % | < 0,1 % | 60 – 70 % |

Tableau 2 Composition massique des oxydes de terre rare contenus dans la monazite en provenance de la mine de Mount Weld (d'après *Techniques de l'ingénieur J6630v2*)

Q 30. Quelle masse de néodyme est contenue dans une tonne de monazite provenant de la mine australienne de Mount Weld ?

IV.B – Corrosion des aimants

La présence du fer dans les aimants au néodyme les rend sujet à la corrosion. La corrosion atmosphérique des métaux est similaire à la corrosion humide. Elle résulte de l'action du dioxygène de l'air, et éventuellement de l'eau (condensation de l'humidité, pluie, projections) sur les métaux. Dans le cas du fer, il peut y avoir formation d'oxydes de fer (rouille) ou encore de cations fer (II) ou fer (III).

Le diagramme potentiel-pH de la figure B du document réponse représente le diagramme du fer superposé à celui de l'eau.

L'étude suivante se place systématiquement en milieu aqueux acidifié, pour une concentration des espèces solubles $C = 1 \times 10^{-6} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$: les pressions partielles des espèces gazeuses sont prises égales à $P^\circ = 1 \text{ bar}$. L'aimant est assimilé en première approximation à du fer solide.

Q 31. Donner le nombre d'oxydation du fer et de ses dérivées. Préciser sur la figure B du document réponse, les domaines de corrosion, de passivation et d'immunité à la corrosion du fer.

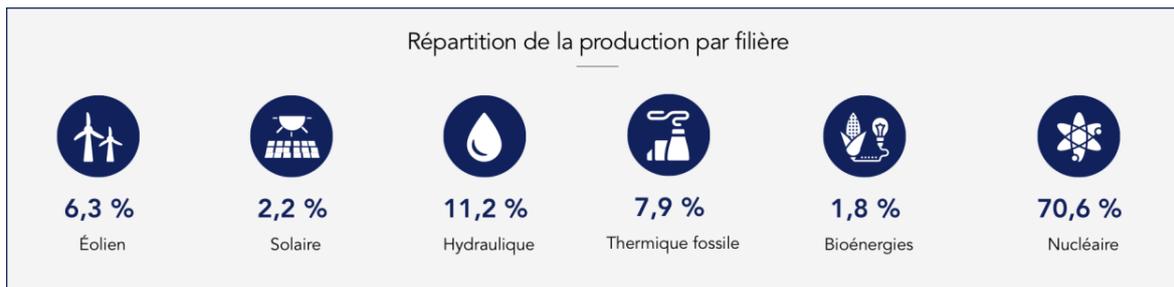
Q 32. Le fer solide est susceptible de réagir avec l'eau ou le dioxygène dissous dans l'eau. Écrire les équations bilan de ces deux réactions en milieu acide, en choisissant un coefficient stoechiométrique égal à 1 pour Fe (s). Calculer les constantes d'équilibre K° correspondantes et commenter.

La corrosion est particulièrement active dans les zones qui présentent une hétérogénéité de surface (rayure, contrainte, défaut), une hétérogénéité de composition (alliages, impuretés, soudures), ou encore une hétérogénéité de la concentration du milieu. Une quelconque de ces hétérogénéités provoque ce qu'on appelle une corrosion différentielle : l'oxydation et la réduction se produisent en deux zones différentes, le métal assurant la circulation des électrons.

La corrosion est étudiée au niveau d'une goutte d'eau oxygénée sur le métal (figure C du document réponse). Les couples mis en jeu dans la corrosion du fer sont : Fe^{2+}/Fe et O_2/OH^- (correspondant au couple $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ en milieu basique).

Document 2

La production totale d'électricité en France s'établit à 537,7 TW·h sur l'année 2019, répartie comme indiqué dans le schéma ci-dessous :

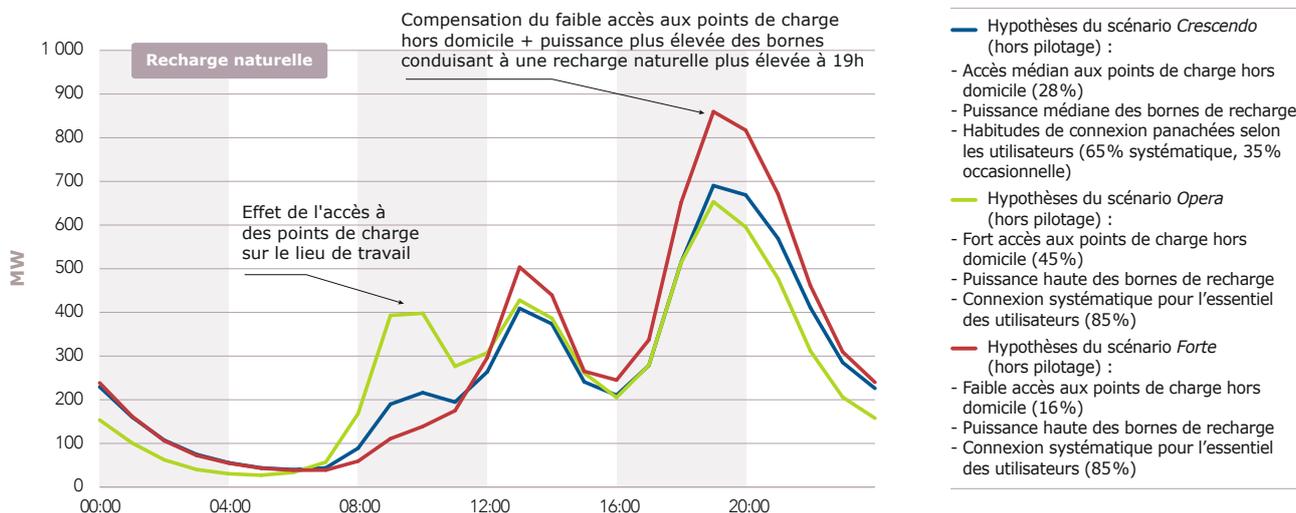


Les pertes représentent principalement l'énergie dissipée par effet Joule lors du transport sur le réseau haute et très haute tension. Elles dépendent essentiellement de la consommation, du plan de production et des échanges transfrontaliers. Les taux de pertes sur le réseau de transport sont compris entre 2 et 3,5 % de la consommation, suivant les saisons et les heures de la journée. En moyenne, en 2019, le taux s'établit à 2,22 %, ce qui représente environ 11 TW·h.

RTE, *Bilan électrique 2019*

Document 3

RTE a étudié l'impact de différents scénarios de développement de l'électromobilité sur le système électrique français. La figure ci-dessous présente la courbe de charge type pour un jour ouvré moyen pour un million de véhicules électriques dans différents scénarios considérés (dans leurs variantes sans pilotage).



RTE, *Enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique*, mai 2019

Document 4

Le secteur de l'énergie éolienne en France a pris progressivement de l'importance : en 2019, sa part dans la production nette d'électricité du pays atteint 6,3 % et le taux de couverture moyen de la consommation par la production d'origine éolienne a été de 7,2 % contre 5,9 % en 2018.

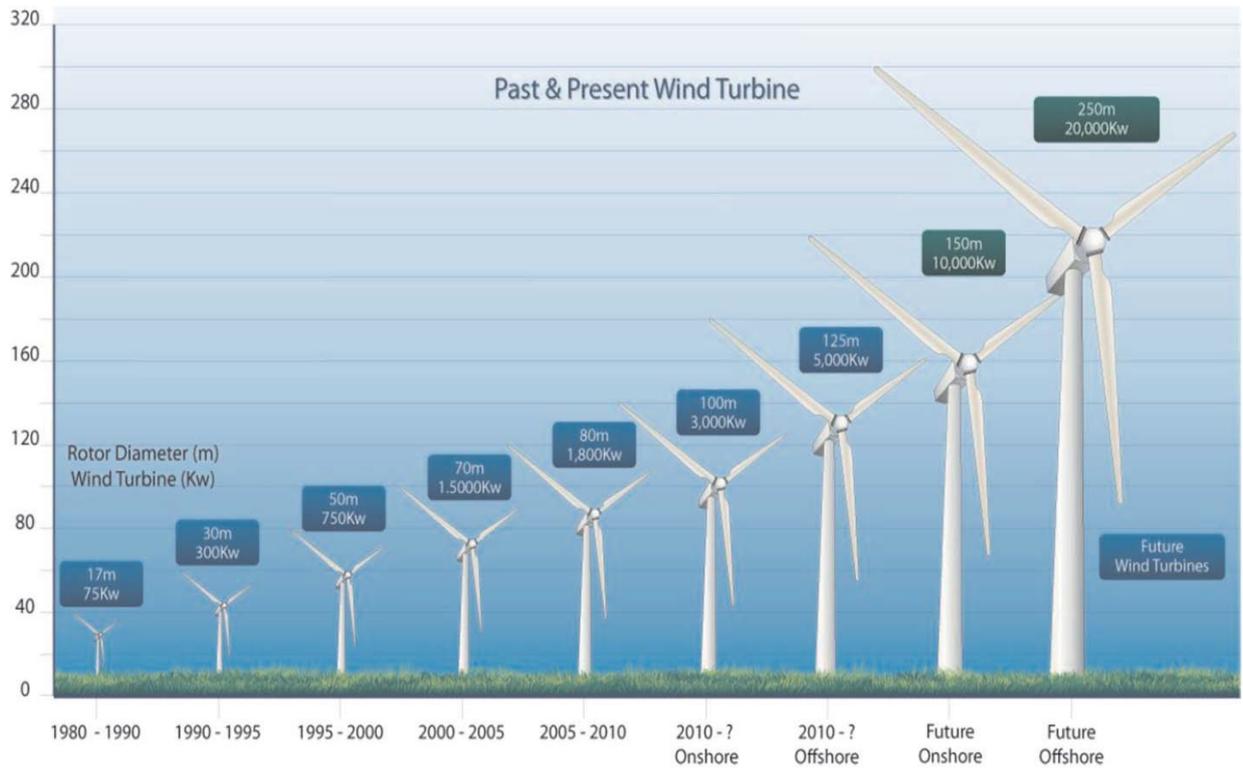
En 2018, avec près de 8 000 éoliennes terrestres sur 1 380 parcs, la France était au quatrième rang européen pour la production d'électricité éolienne, loin derrière l'Allemagne, le Royaume-Uni et l'Espagne, et au septième rang mondial.

Les éoliennes fonctionnent environ 80 % du temps mais avec une puissance très variable, située entre 0 et (théoriquement) 100 % ; par exemple, en 2019, la puissance éolienne maximale s'est élevée à 13 330 MW le 19 décembre, avec un facteur de charge de 83,8 % ; mais la puissance moyenne mensuelle observée est restée entre 2207 MW en août et 6288 MW en décembre, alors que la puissance installée atteignait 16 494 MW fin 2019 ; le taux d'utilisation (facteur de charge) de cette puissance (puissance moyenne/puissance nominale) a été en moyenne de 24,7 % en 2019, en augmentation (22,8 % en 2018) ; sa moyenne a varié de 13,9 % en août à 39,5 % en décembre, et sa valeur maximale de 52,3 % en juillet à 83,8 % en décembre.

Dans la plupart des parcs éoliens à axe horizontal, un espacement d'environ 6 à 10 fois le diamètre du rotor est souvent respecté. Cependant, pour les grands parcs éoliens, des distances d'environ 15 diamètres de rotor devraient être plus économiques, compte tenu des coûts typiques des éoliennes et des terrains.

Wikipedia (*Énergie éolienne en France, Wind turbine*)

Croissance des éoliennes commerciales. L'ordonnée correspond à la hauteur du mât. L'inscription au dessus de chaque éolienne donne le diamètre du rotor et sa puissance nominale.



Silvio Simani, Overview of Modelling and Advanced Control Strategies for Wind Turbine Systems
Energies, 2015, 8, p.13396

• • • FIN • • •

Données et formulaire

Données numériques

| | |
|--|---|
| Masse volumique de l'air | $\rho_{\text{air}} = 1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ |
| Viscosité dynamique de l'air | $\eta = 1,8 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ |
| Masse volumique du nickel | $\rho_{\text{Ni}} = 8,9 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ |
| Constante de Faraday | $\mathcal{F} = 9,65 \times 10^4 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$ |
| Produit ionique de l'eau à 298 K | $K_e = 10^{-14}$ |
| Constante de Nernst à 298 K | $\frac{RT}{\mathcal{F}} \ln(10) = 0,06 \text{ V}$ |
| Tonne équivalent pétrole | 1 tep = 42 GJ |
| Surface de la France métropolitaine | $S_F = 550\,000 \text{ km}^2$ |
| Préfixe du système international d'unité | T (téra) = 10^{12} |

Caractéristiques de l'éolienne Darrieus H

| | |
|-------------------|-------------------------|
| Rayon | $R = 4,0 \text{ m}$ |
| Corde | $\ell = 0,45 \text{ m}$ |
| Hauteur des pales | $L = 8,0 \text{ m}$ |
| Nombre de pales | $N = 3$ |

Caractéristiques du générateur

| | |
|-----------------|------------------------|
| Diamètre | $D_i = 530 \text{ mm}$ |
| Entrefer | $e = 2 \text{ mm}$ |
| Longueur axiale | $L_r = 300 \text{ mm}$ |

Potentieux standard à 298 K

| | | | | | | |
|-----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | Zn^{2+}/Zn | Fe^{2+}/Fe | Ni^{2+}/Ni | H^+/H_2 | $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ | $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ |
| $E^\circ \text{ (V)}$ | -0,76 | -0,44 | -0,25 | 0,00 | 0,77 | 1,23 |

Extrait du tableau périodique des éléments

| | | | | | |
|---|------|------|------|------|-------|
| Numéro atomique | 1 | 6 | 8 | 28 | 60 |
| Symbole | H | C | O | Ni | Nd |
| Masse molaire atomique ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$) | 1,01 | 12,0 | 16,0 | 58,7 | 144,2 |

Formules trigonométriques

$$\begin{aligned} \cos a + \cos b &= 2 \cos\left(\frac{a+b}{2}\right) \cos\left(\frac{a-b}{2}\right) & \cos a - \cos b &= -2 \sin\left(\frac{a+b}{2}\right) \sin\left(\frac{a-b}{2}\right) \\ \sin a + \sin b &= 2 \sin\left(\frac{a+b}{2}\right) \cos\left(\frac{a-b}{2}\right) & \sin a - \sin b &= 2 \cos\left(\frac{a+b}{2}\right) \sin\left(\frac{a-b}{2}\right) \end{aligned}$$