

# UNE QUINZAINES D'EXERCICES SUR LES ÉOLIENNES



01/07/2011

Franck Limosin, Académie de Lille

Des exercices de mathématiques pour les thèmes de convergence de l'énergie et du développement durable au collège.

Pour tout renseignement, toute demande particulière ou suggestion,  
notamment la mise à disposition du document au format word,  
vous pouvez prendre contact à l'adresse suivante :

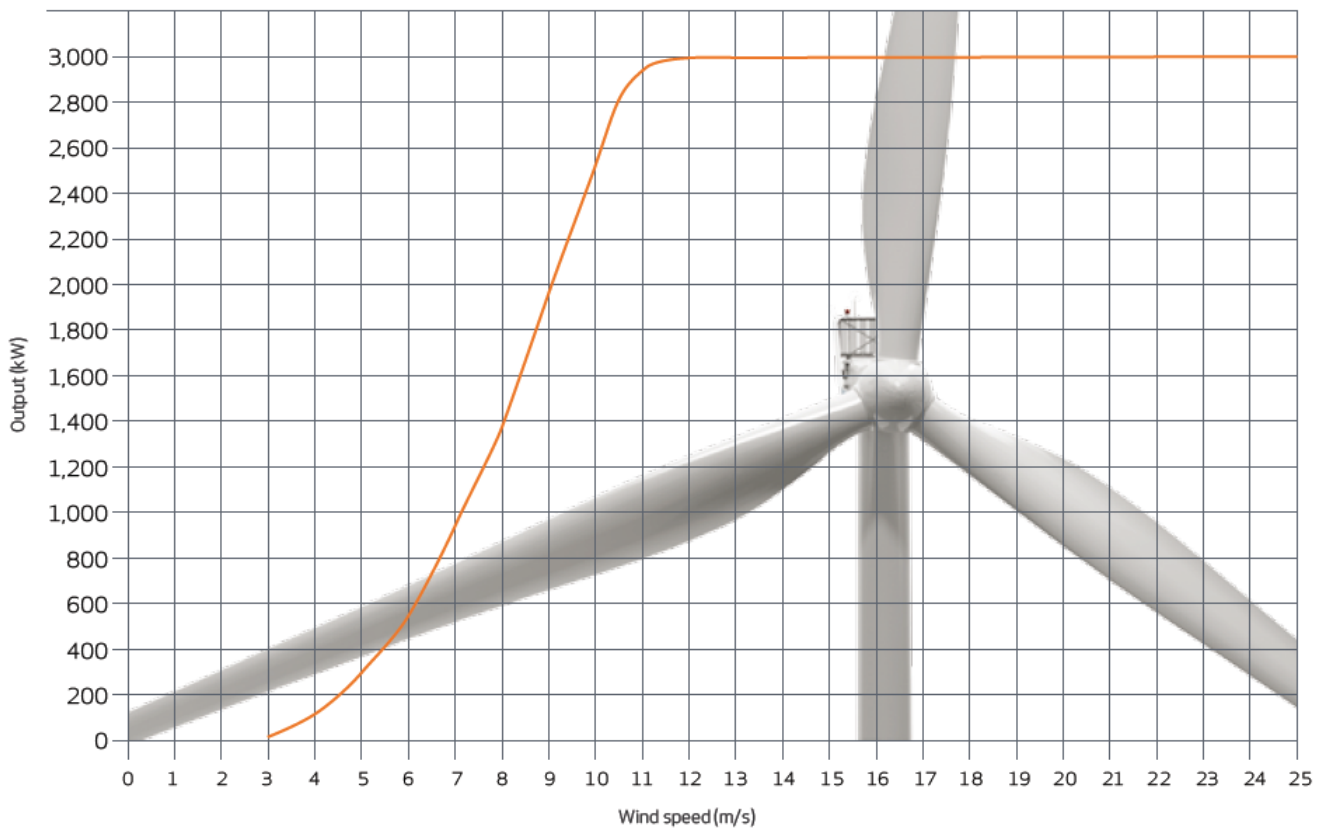
[franck.limosin@ac-lille.fr](mailto:franck.limosin@ac-lille.fr)

## SOMMAIRE

COURBE DE PUISSANCE .....	PAGE 3
PARC OFFSHORE .....	PAGE 4
INSTALLATIONS URBAINES .....	PAGE 5
DISTANCES RÉGLEMENTAIRES 1 .....	PAGE 6
DISTANCES RÉGLEMENTAIRES 2 .....	PAGE 7
SIMULATION .....	PAGE 8
AIR BRASSÉ .....	PAGE 9
ÉTONNANTES ÉOLIENNES .....	PAGE 10
PUISSANCE INSTALLÉE EN FRANCE .....	PAGE 11
MESURE DU BRUIT .....	PAGE 12
FORMULE DE PUISSANCE .....	PAGE 13
FACTEUR DE CHARGE .....	PAGE 14
NUCLÉAIRE INDISPENSABLE .....	PAGE 15
ÉMISSIONS DE CO <sub>2</sub> .....	PAGE 16
OBJECTIFS 2020 .....	PAGE 17
TOP 10 MONDIAL .....	PAGE 18

## COURBE DE PUISSANCE

Le graphique ci-dessous représente la variation de la puissance d'une éolienne en fonction de la vitesse du vent.



Document technique de l'éolienne VESTAS V112 - 3.0 MW Offshore

<http://www.vestas.com/en/media/brochures.aspx>

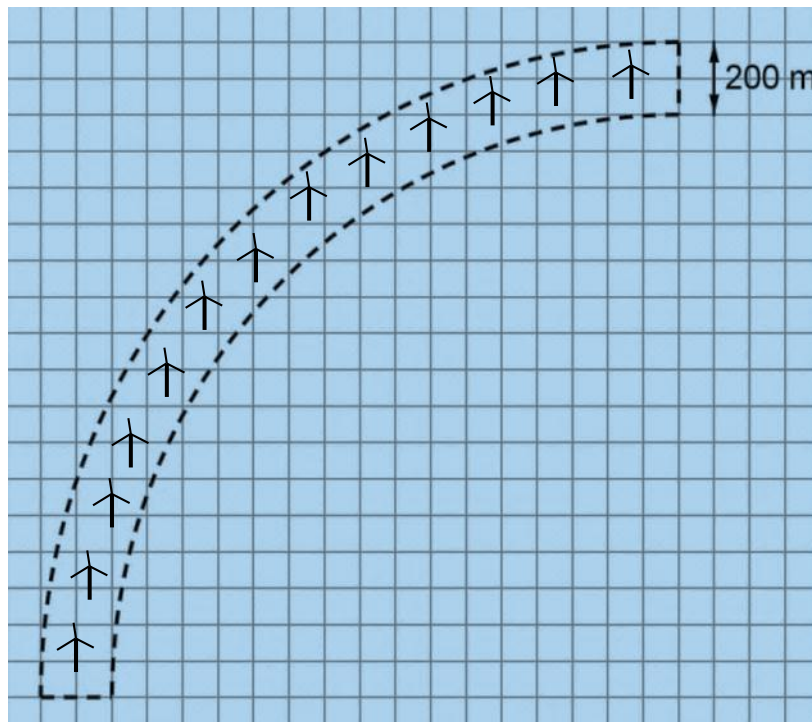
1. À partir de quelle vitesse du vent l'éolienne démarre-t-elle ?
2. Quelle est la puissance électrique atteinte par l'éolienne quand le vent souffle à 10 m/s ?
3. Quelle est la puissance maximale que peut fournir l'éolienne ?  
À partir de quelle vitesse du vent cette puissance maximale est-elle atteinte ?
4. Que signifie la partie horizontale de la courbe ?
5. La puissance électrique fournie est-elle proportionnelle à la vitesse du vent ? Justifier.
6. Comment expliquer que le graphique ne va pas au-delà d'une vitesse du vent de 25 m/s ?  
Que fait l'éolienne lorsque le vent atteint une telle vitesse ?
7. Quelle est environ la puissance électrique fournie quand le vent souffle à 25 km/h ?

## PARC OFF-SHORE



Pour éviter un effet de mur quand on les observe depuis la côte, les éoliennes off-shore (en mer) sont installées en arc de cercle.

Pour des raisons de sécurité, la zone délimitée en pointillés sur la carte ci-dessous est interdite à la navigation.



Quelle est la superficie de la zone interdite à la circulation sur le plan ci-dessus ? On choisira une unité appropriée.

*Bien expliquer chaque étape de la démarche, même si elle n'aboutit pas complètement. Rédiger une phrase après chaque calcul intermédiaire.*

## INSTALLATIONS URBAINES

Une éolienne à axe vertical pourrait fournir en ville de l'électricité pour 3 ménages (chauffage électrique NON compris)

1. Recherche le nombre de ménages de la ville de Lille sur le site de l'INSEE\*.
2. Combien d'éoliennes de ce type faudrait-il installer sur les toits des immeubles pour fournir de l'électricité (hors chauffage) à l'ensemble des ménages de la ville de Lille ?
3. Qu'en penses-tu ?

\* Institut National de la Statistique et des Études Économiques. [www.insee.fr](http://www.insee.fr)



## DISTANCES RÉGLEMENTAIRES 1

Dans un parc, les éoliennes sont regroupées par groupes mais doivent être espacées d'au moins 200 m afin d'éviter les perturbations.

Est-ce le cas sur la photo satellite ci-dessous ?



Vue satellite de l'une des fermes du site éolien de Fruges via googlemaps



## DISTANCES RÉGLEMENTAIRES 2

Les éoliennes doivent être placées à au moins 300 m des habitations environnantes. À partir de 500 m de distance, elles deviennent inaudibles pour les habitants (elles sont moins bruyantes que le vent).

1. Sur la photo satellite ci-dessous, La distance réglementaire des éoliennes par rapport aux habitations est-elle respectée ?
2. Les habitants peuvent-ils craindre d'entendre les éoliennes fonctionner ?



Vue satellite de l'une des fermes du site éolien de Fruges via googlemaps



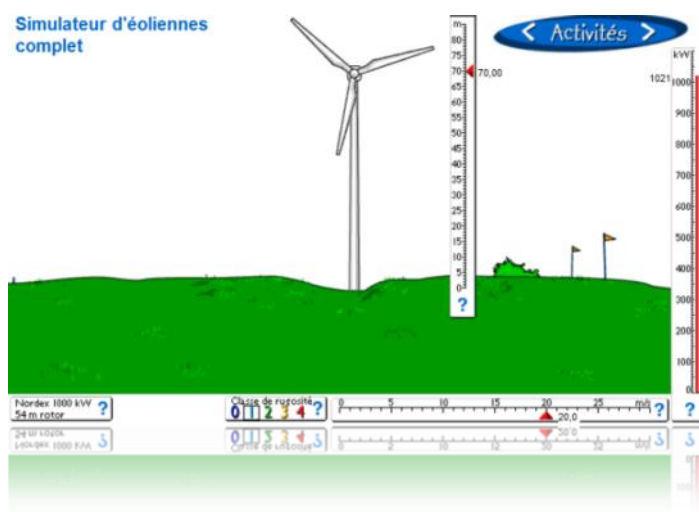
## SIMULATION

Se rendre à l'adresse internet suivante (attention : site optimisé sous Internet Explorer)

<http://www.vindselskab.dk/fr/kids/assign/turbine.htm>

Au cas où le lien ne serait plus valide :

- Rechercher « les aventures de Moulinot »
- Choisir l'activité « Simulateur d'éolienne complet »



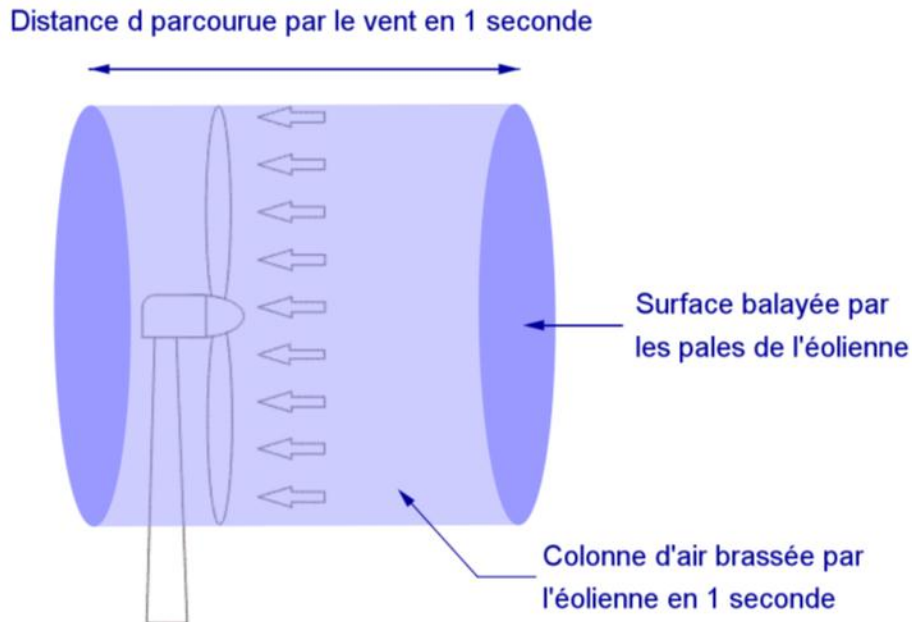
1. Choisir l'éolienne Vestas 850 kW avec rotor de diamètre 52 m.  
Choisir une rugosité de paysage de classe 3.  
Choisir une hauteur pour le moyeu de 60 m.
2. a. À partir de quelle vitesse du vent l'éolienne commence-t-elle à fonctionner ?  
Quelle est alors la puissance fournie ?  
b. À partir de quelle vitesse du vent l'éolienne atteint-elle sa puissance maximale ?  
c. À partir de quelle vitesse du vent l'éolienne s'arrête-t-elle ?
3. a. Quelle est la puissance fournie quand le vent souffle à 7 m/s ?  
b. Quelle est la vitesse du vent si la puissance fournie est de 554 kW ?  
c. Quelle peut-être la vitesse du vent si la puissance fournie est de 850 kW ?
4. a. Recopier et compléter le tableau suivant sans oublier d'indiquer un titre pour chaque ligne.

Titre ?	1 m/s	3 m/s	4 m/s	7 m/s		13 m/s		18 m/s	22 m/s	26 m/s
Titre ?					554 kW		846 kW			

- b. La puissance fournie est-elle proportionnelle à la vitesse du vent ? Justifier.
5. Choisir une autre éolienne, une autre hauteur et une autre rugosité de paysage que l'on précisera. Reprendre ensuite toute la question 2 puis enfin dresser un tableau comportant une dizaine de colonnes de données.
6. Soit en utilisant une feuille de papier millimétré, soit à l'aide d'un tableur, construire la représentation graphique montrant la variation de la puissance de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent.

## AIR BRASSÉ

Le schéma ci-dessous représente la colonne d'air brassée par une éolienne dans un temps donné (ici on a choisi pour l'exemple une seconde).



1. Calculer la distance  $d$  parcourue en une seconde par un vent faible dont la vitesse est de 18 km/h.
2. Calculer la surface balayée par une éolienne dont le rotor a un diamètre de 90 m.
3. Déduire des réponses précédentes le volume d'air brassé en une seconde par une éolienne dont le rotor a un diamètre de 90 m quand le vent souffle à la vitesse de 18 km/h.
4. a. La densité de l'air est de  $1,225 \text{ kg/m}^3$ <sup>1</sup>. En déduire alors la masse d'air brassée en une seconde par une éolienne dont le rotor a un diamètre de 90 m quand le vent souffle à la vitesse de 18 km/h.  
 b. En considérant que le poids d'un éléphant adulte est en moyenne de 6 tonnes, calculer le nombre d'éléphants brassés en une seconde (!) par une éolienne dont le rotor a un diamètre de 90 m quand le vent souffle à la vitesse de 18 km/h.
5. Reprendre les questions précédentes pour une éolienne géante<sup>2</sup> dont le rotor a un diamètre de 164 m (éolienne offshore) avec un vent fort de 45 km/h.

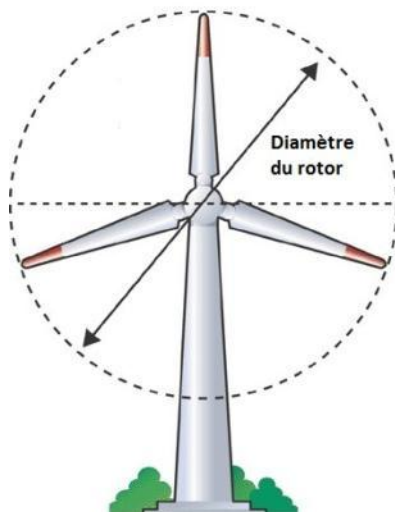


<sup>1</sup> L'industrie éolienne utilise comme standard la densité de l'air sec à la pression atmosphérique au niveau de la mer à la température de 15°C soit 1,225.

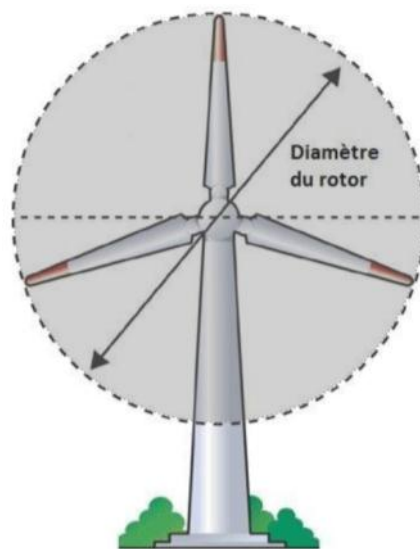
<sup>2</sup> C'est le cas de l'éolienne Vestas V164 – 7.0 MW.

## ÉTONNANTES ÉOLIENNES

1. Lorsqu'une éolienne atteint son plein régime, son rotor effectue 16 tours par minute. Si l'on considère une éolienne dont le rotor a un diamètre de 90 m, quelle est alors la vitesse en km/h à l'extrémité des pales ?

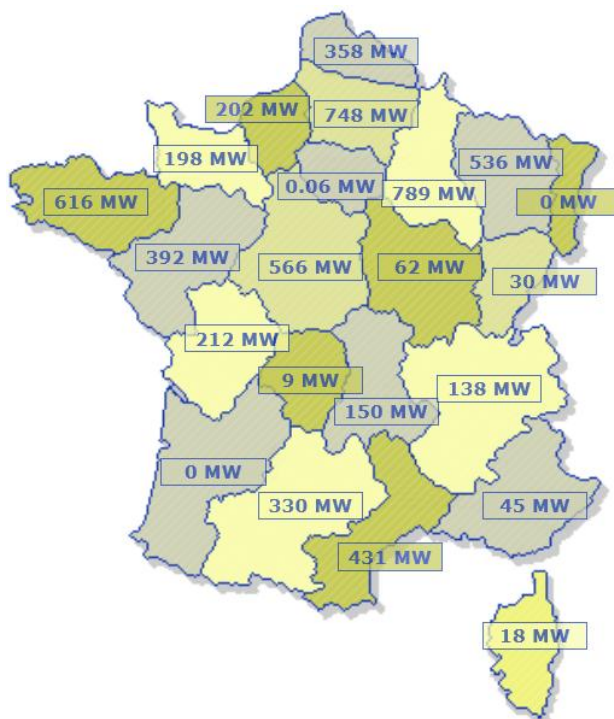


2. Quelle est en  $\text{m}^2$  la superficie de la surface balayée par une éolienne dont le rotor a un diamètre de 90 m ?
3. On remplace le rotor d'un diamètre de 90 m par un rotor de diamètre 112 m.
- Par combien environ le diamètre est-il multiplié ?
  - Quel pourcentage d'augmentation du diamètre cela représente-t-il à peu près ?
  - Par combien alors la surface balayée par les pales est-elle multipliée ?
  - En déduire la surface balayée par une éolienne dont le rotor a un diamètre de 112 m. Comparer avec la surface d'un terrain de football de dimensions 125 m par 90 m.
  - Quel est environ le pourcentage d'augmentation de la surface balayée par les pales quand on passe d'un rotor de diamètre 90 m à un rotor de diamètre 112 m ?



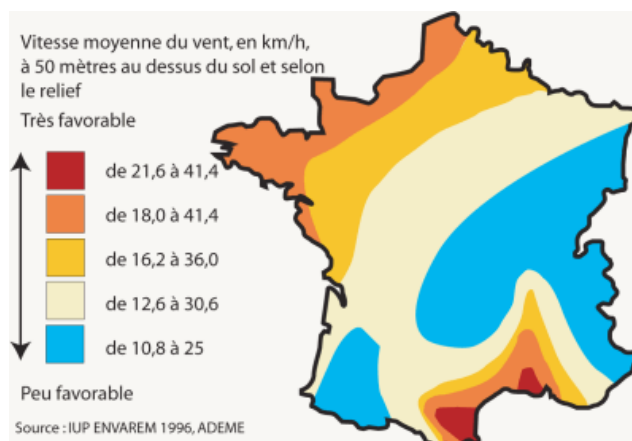
## PUISSANCE INSTALLÉE EN FRANCE

La carte ci-dessous indique la puissance disponible (en Mégawatt) par région sur le parc éolien de la France métropolitaine en mai 2011.



Source : [www.suivi-eolien.com](http://www.suivi-eolien.com)

1. Quelle est la puissance totale disponible ?  
Comparer avec la puissance totale nucléaire disponible qui est de 62,6 GW (Gigawatt).
2. Quelles sont les régions qui ne disposent pas d'éoliennes ?  
Quelle est la région qui dispose de la plus forte puissance ?
3. Quelle est la puissance moyenne installée dans les régions de la France métropolitaine ?
4. Quelle est la puissance médiane ? Interpréter le résultat obtenu.
5. Rechercher les 1<sup>er</sup> et 3<sup>ème</sup> quartiles des puissances régionales. Interpréter les résultats obtenus.
6. D'après la carte ci-contre, faut-il donner tort ou raison aux régions n'ayant pas installé de parc éolien ? Justifier votre réponse.



## MESURE DU BRUIT

Les données techniques ci-dessous indiquent le niveau sonore enregistré sur une éolienne en fonction de la vitesse du vent.

### SOUND POWER

(Mode 0, 10 m above ground, hub height 80 m,  
air density 1,225 kg/m<sup>3</sup>)

4 m/s	97.9 dB
5 m/s	100.9 dB
6 m/s	104.2 dB
7 m/s	106.1 dB
8 m/s	107.0 dB
9 m/s	106.9 dB



Document technique de l'éolienne Vestas V90 – 3.0 MW

<http://www.vestas.com/fr/fr/actualités/brochures.aspx>

1.
    - a. Quelle est l'unité utilisée pour mesurer le niveau sonore.
    - b. À quelle distance du sol les mesures sont-elles effectuées ?
    - c. Quel est la hauteur du mât de l'éolienne retenue pour effectuer ces mesures ?
  2. Le niveau de bruit de l'éolienne est-il proportionnel à la vitesse du vent ? Justifier.
  3. Le niveau sonore double tous les 3 dB.
    - a. Citer deux vitesses de vents entre lesquelles l'éolienne est deux fois plus bruyante.
    - b. Entre des vitesses du vent de 5 m/s et de 9 m/s, combien de fois l'éolienne est-elle plus bruyante ?
- N. B. *Au pied de l'éolienne, quand le vent souffle à 7 m/s, le niveau de bruit n'est plus que de 55 dB, et à 500 m de l'éolienne, il chute à 35 dB, soit le niveau d'une conversation à voix basse. En fait le vent dans les oreilles est plus bruyant que l'éolienne elle-même !*

## FORMULE DE PUISSANCE

La puissance électrique récupérable par une éolienne est donnée par la formule

$$P = 0,14 \times D^2 \times V^3$$

Où :

- P désigne la puissance en W (Watts),
- D désigne le diamètre du rotor en m (mètres),
- V désigne la vitesse du vent en m/s (mètres par seconde).



1. Calculer en MW (mégawatts) la puissance récupérable<sup>1</sup> par une éolienne offshore de diamètre 125 m quand le vent souffle à la vitesse de 12 m/s.
2. La première éolienne installée en France (à Port-la-Nouvelle dans l'Aude) en 1991 avait un diamètre de 25 m. Pour une même vitesse du vent, par combien la puissance est-elle multipliée en passant à un diamètre de 125 m ?
3. Pour un diamètre fixé, par combien la puissance récupérable est-elle multipliée quand on passe d'un vent de 6 m/s à un vent de 12 m/s ?
4. Sur feuille millimétrée, ou à l'aide d'un tableur, représenter la variation de la puissance en kW (kilowatts) en fonction de la vitesse du vent (de 4 à 13 m/s) pour une éolienne de diamètre 90 m.

<sup>1</sup>

$$P_{absolue} = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad \text{Avec } S \text{ surface balayée par le rotor, } \rho \text{ densité de l'air en kg/m}^3 *, V \text{ vitesse du vent en m/s.}$$

$$P_{maximale} = \frac{16}{27} \times P_{absolue} \quad \text{C'est la limite de Betz.}$$

$$P_{récupérable} = P_{maximale} \times 50 \text{ à } 55 \% \quad \text{Perte due à la distribution sur le réseau en plusieurs étapes de conversion.}$$

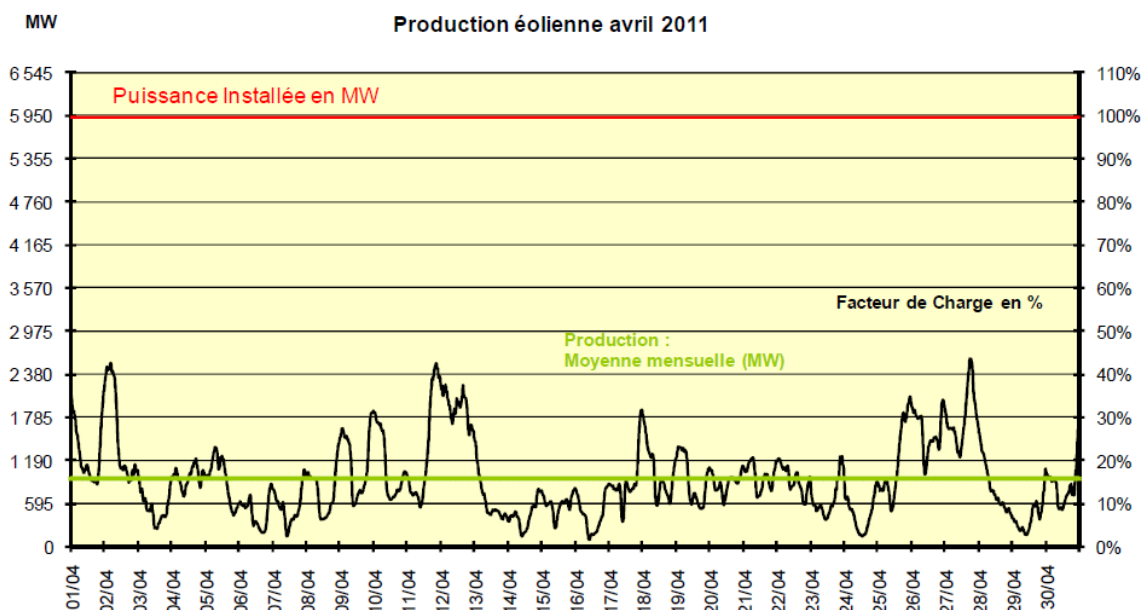
\* L'industrie éolienne utilise comme standard la densité de l'air sec à la pression atmosphérique au niveau de la mer à la température de 15°C soit 1,225.

## FACTEUR DE CHARGE



1. Supposons que le vent souffle assez fort pour qu'une éolienne fournisse sa puissance maximale de 2 MW pendant 3 heures. Elle fournira alors une énergie électrique de 6 MW.h (mégawatts heures) car  $2 \text{ MW} \times 3 \text{ h} = 6 \text{ MW.h}$ 
  - a. Supposons que le vent souffle suffisamment fort pendant 6 jours pour que cette éolienne fournisse **toujours** sa puissance maximale de 2 MW. Quelle serait alors l'énergie électrique fournie par cette éolienne pendant ces 6 jours complets ?
  - b. En réalité, sur ces 6 jours, le vent a été variable si bien que l'éolienne a fourni :
    - sa puissance maximale de 2 MW pendant 1 jour,
    - une puissance de 1,5 MW pendant 2 jours,
    - une puissance de 0,5 MW pendant 3 jours.
Calculer l'énergie électrique fournie (en MW.h) par cette éolienne durant ces 6 jours. En déduire quelle a été, durant cette période, la puissance moyenne fournie (en MW) par cette éolienne.
  - c. La puissance moyenne fournie à la question b. (où l'éolienne ne fournit pas toujours sa puissance maximale) représente un certain pourcentage de la puissance maximale délivrable par l'éolienne. Calculer ce pourcentage. Ce pourcentage est appelé **facteur de charge** de l'éolienne.
2. En avril 2011, la puissance totale du parc éolien français était de près de 6 000 MW soit 6 GW.
  - a. En supposant que cette puissance maximale ait été fournie pendant tout le mois d'avril, calculer quelle aurait été alors l'énergie électrique fournie en GW.h durant ce mois.
  - b. En réalité, durant le mois d'avril 2011, le facteur de charge du parc éolien français n'a été que de 16 % environ\*. Calculer l'énergie électrique fournie (en GW.h) par l'ensemble du parc éolien français durant ce mois d'avril.

\* source : <http://www.rte-france.com/fr/>
  - c. D'après le graphique ci-dessous, quels sont les jours où le facteur de charge a connu ses valeurs extrêmes. Proposer un encadrement en puissance et en pourcentage pour chacune de ces valeurs.





## NUCLÉAIRE INDISPENSABLE

Le tableau ci-dessous indique la répartition selon l'origine de la production d'électricité en France au cours du mois d'avril 2011.

(Source : <http://www.rte-france.com/fr/>)

<b>Nucléaire</b>	32 860 GW.h
<b>Thermique</b>	2 896 GW.h
<b>Hydraulique</b>	4 036 GW.h
<b>Éolien</b>	675 GW.h
<b>Autres sources renouvelables</b>	546 GW.h



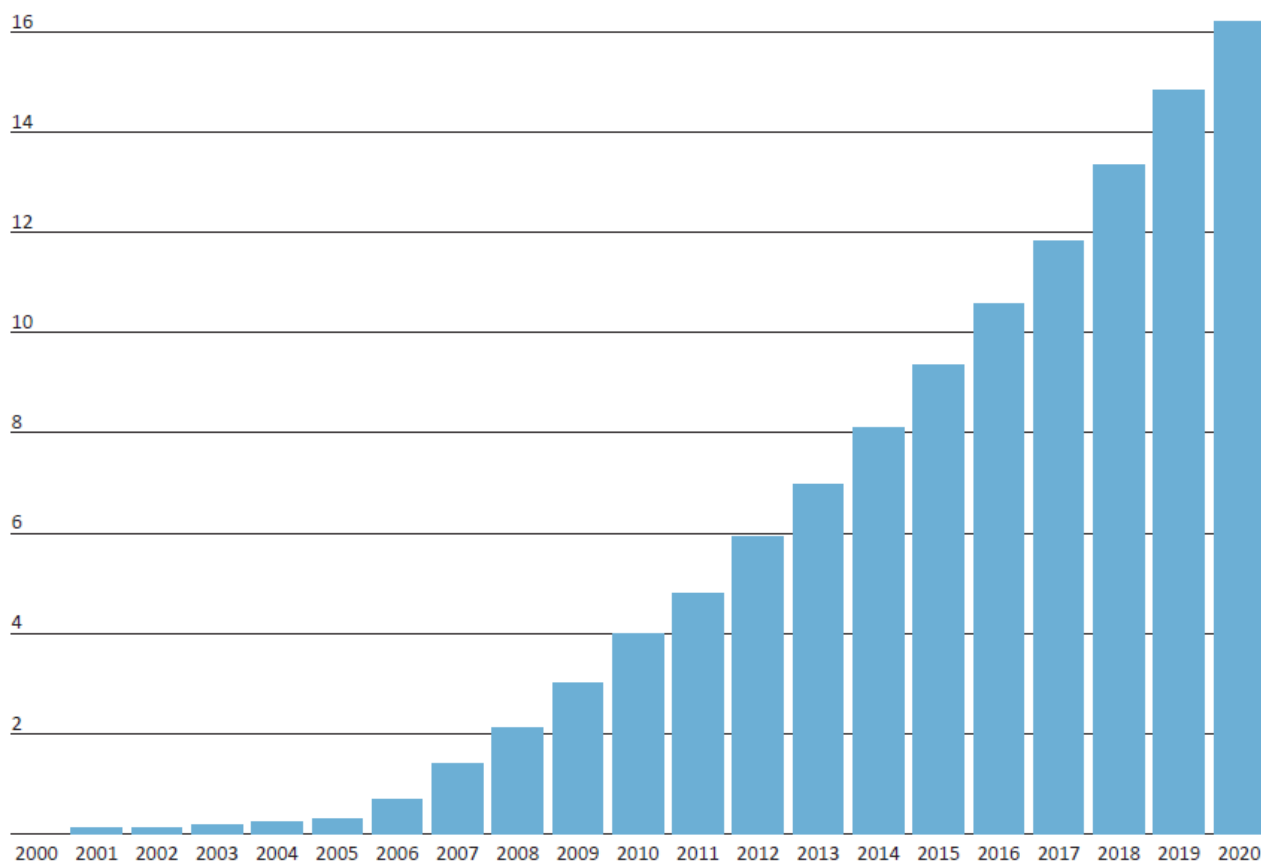
1. Dans ce tableau, citer deux productions d'électricité d'origine renouvelable et deux autres qui utilisent une source fossile. Quelles peuvent être les autres sources renouvelables ?
2. Au cours de ce mois d'avril 2011, la consommation intérieure brute d'électricité en France a été de 35 959 GW.h. Quelle est la part (en pourcentage) de cette consommation fournie par l'éolien ? Comparer avec celle fournie par le nucléaire.
3. Supposons qu'il n'y ait plus de nucléaire, ni de thermique et que la part de l'hydraulique reste inchangée.<sup>1</sup> Par combien faudrait-il multiplier l'énergie fournie par l'éolien et les autres sources renouvelables pour satisfaire la consommation intérieure ? Cela vous semble-t-il irréalisable ?
4. Réaliser un diagramme circulaire, ou semi-circulaire, à la main ou à l'aide d'un tableur, présentant la répartition selon son origine de la production d'électricité en France en avril 2011.
5. Une énergie électrique de 1 MW.h produit par une éolienne permet d'éviter 3 g de déchets nucléaires de classe B ou C pour lesquels aucune solution de stockage à long terme n'a été trouvée.  
Calculer la masse (en tonnes) de déchets nucléaires de classe B ou C ainsi évités par la filière éolienne en France au cours du mois d'avril.
6. La production d'électricité en France en avril 2011 a-t-elle été excédentaire ou déficitaire ? Que se passe-t-il alors dans chacun de ces cas ?

<sup>1</sup> En France, l'hydraulique est presque arrivé à saturation du point de vue du nombre de barrages possibles mais pour chaque site, les technologies peuvent encore progresser afin d'améliorer le rendement (c'est-à-dire améliorer la puissance fournie pour un même débit).

## ÉMISSIONS DE CO<sub>2</sub>

On considère le diagramme ci-dessous qui présente les émissions de CO<sub>2</sub> évitées (en millions de tonnes) en France grâce à l'énergie éolienne pour la période 2000 – 2020.

Source : <http://www.enr.fr/>



Soit l'équivalent de :

100 000 voitures  
en 2004

1 million de voitures  
en 2008

3 millions de voitures  
en 2012

5 millions de voitures  
en 2016



1. En 2012, à combien estime-t-on la quantité de CO<sub>2</sub> rejeté dans l'atmosphère qui sera évitée grâce à l'énergie éolienne ?
2. À partir de quelle année évitera-t-on de rejeter environ 8 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> ?
3. Entre 2009 et 2019, par combien environ la quantité de CO<sub>2</sub> évitée est-elle multipliée ?
4. Compléter le graphique inférieur pour l'année 2020 (en arrondissant à l'unité de millions).

## OBJECTIFS 2020

*D'ici l'année 2020, 20 % de la production d'électricité en France devra provenir d'énergies renouvelables. L'énergie éolienne, comptant pour un quart de cet objectif, est donc indispensable. Elle devra fournir une puissance de 25 GW, dont 6 GW installée en mer (off-shore), soit environ 8000 éoliennes au total (source : SER-FEE).*



1. Quel pourcentage de la production électrique française les éoliennes devront-elles fournir en 2020 ?
2. Quel pourcentage de l'ensemble de la production électrique éolienne les installations off-shore représentent-elles ?
3. Quelle sera en 2020 la puissance moyenne d'une éolienne (en MW) si l'objectif est atteint ?

*Le Grenelle de l'environnement a donc fixé pour l'éolien en mer un objectif de 6 GW en 2020, ce qui permettra une production de 18 TWh par an, soit l'équivalent de la consommation domestique de 8 millions de Français, chauffage compris (source : SER-FEE).*



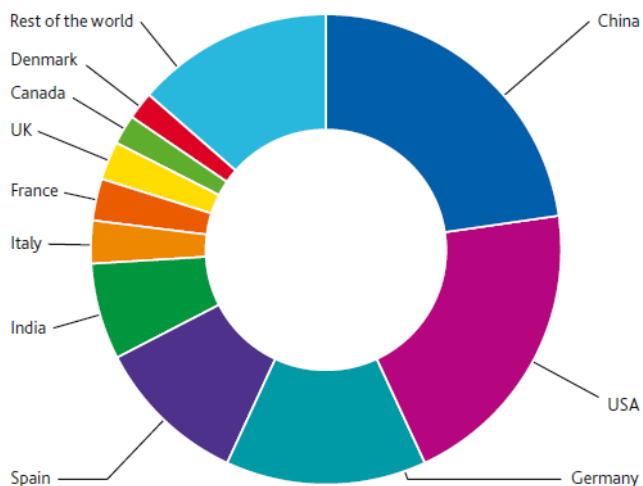
4. D'après l'énoncé ci-dessus, quel est en une année le temps moyen de fonctionnement retenu pour une éolienne off-shore en heures ?  
En jours ?  
Quelle proportion d'une année complète cela représente-t-il ?
5. Pour 2020, quelle est (en kWh) la consommation électrique annuelle moyenne retenue par habitant en France ?

## TOP 10 MONDIAL

Le graphique suivant indique la puissance éolienne totale installée dans le monde au mois de décembre 2010 (source : GWEC).



### TOP 10 CUMULATIVE CAPACITY DEC 2010



Country	MW
China	44,733
USA	40,180
Germany	27,214
Spain	20,676
India	13,065
Italy	5,797
France	5,660
UK	5,204
Canada	4,009
Denmark	3,752
Rest of the world	26,749

1. En décembre 2010, quelle était la puissance totale installée en France par les parcs éoliens ? Quel pourcentage de la puissance mondiale installée cela représente-t-il ?
2. Quel pays arrive en tête de position ? De quelle puissance dispose-t-il ? Quel pourcentage de la puissance installée dans les pays du TOP 10 cela représente-t-il ?
3. Quel pourcentage de la puissance mondiale installée les pays du TOP 10 disposent-ils ?
4. Citer deux pays limitrophes dont l'un dispose d'une puissance en électricité éolienne environ sept fois supérieure à celle de son voisin.
5. Dans quelle catégorie de ce diagramme le Japon fait-il partie ?