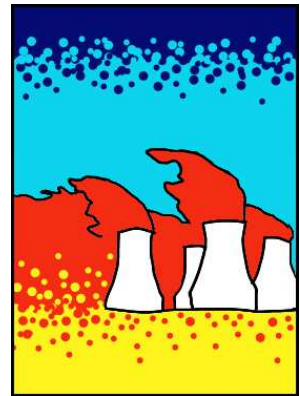


Troisième partie

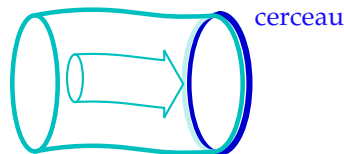
Chapitres techniques



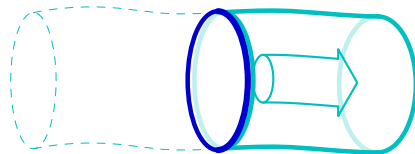
B Vent II

La physique de l'éolien

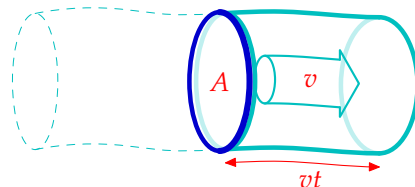
Pour estimer l'énergie qui se trouve dans le vent, imaginons que l'on tienne en l'air, face au vent, un cerceau de surface intérieure A qui a pour vitesse v . Considérons la masse d'air qui passe à travers notre cerceau durant une seconde. Voici un schéma de cette masse d'air juste avant qu'elle passe à travers le cerceau :



Et voici un schéma de cette même masse d'air une seconde plus tard :



La masse de ce volume d'air est le produit de sa densité ρ , de sa surface A , et de sa longueur, qui vaut v fois t , où t est une durée d'une seconde.



L'énergie cinétique de ce volume d'air est égale à :

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho Avt v^2 = \frac{1}{2}\rho Atv^3. \quad (\text{B.1})$$

La puissance du vent, pour une surface A — c'est-à-dire l'énergie cinétique de l'air qui traverse cette surface par unité de temps — vaut donc :

$$\frac{\frac{1}{2}mv^2}{t} = \frac{1}{2}\rho Av^3. \quad (\text{B.2})$$

Cette formule vous paraît peut-être familière — nous avons obtenu une expression identique en page 301, lorsque nous avons discuté des besoins de puissance d'une voiture en mouvement.



J'utilise à nouveau cette formule :

masse = densité \times volume

nœuds	km/h	m/s	Échelle Beaufort
1,9	3,6	1	force 1
6	11	3	force 2
10	18	5	force 3
12	21	6	force 4
14	25	7	force 5
19	36	10	force 6
25	47	13	force 7
31	58	16	force 8
37	68	19	force 9
43	79	22	force 10
52	97	27	force 11
60	112	31	force 12
68	126	35	force 12

FIGURE B.1. Vitesses.

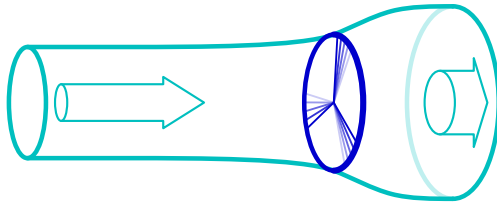


FIGURE B.2. Flux d'air à travers les pales d'une éolienne. L'air est ralenti par la turbine et se disperse en s'évasant.

Quelle est la vitesse typique du vent ? Un jour venteux, un cycliste remarque aisément la direction du vent : avec le vent dans le dos, on peut rouler bien plus vite que d'habitude. La vitesse de ce vent est, par conséquent, du même ordre que la vitesse typique d'un cycliste, qui est, mettons, de 21 kilomètres par heure (6 mètres par seconde). Même si, à Cambridge, le vent est rarement aussi fort, prenons quand même cette valeur comme vitesse de vent typique pour la Grande-Bretagne (et gardons en tête qu'il nous faudra probablement revoir cette estimation).

La densité de l'air est d'environ 1,3 kg par m³. (D'habitude, j'arrondis cette valeur à 1 kg par m³, qui est plus facile à retenir, mais je ne l'ai pas fait ici.) La puissance typique du vent par mètre carré de cerceau est alors :

$$\frac{1}{2}\rho v^3 = \frac{1}{2} \times 1,3 \text{ kg/m}^3 \times (6 \text{ m/s})^3 = 140 \text{ W/m}^2. \quad (\text{B.3})$$

Toute cette énergie ne peut pas être extraite par une éolienne. La turbine ralentit fortement l'air, mais il lui faut quand même laisser *un peu* d'énergie cinétique à cet air ; sinon, cet air arrêté bloquerait le passage. La figure B.2 indique de manière schématique ce qu'il advient effectivement du flux d'air derrière la turbine. La fraction maximum de l'énergie entrante qui peut être extraite par une turbine circulaire a été déterminée par un physicien allemand, Albert Betz, en 1919. Si la turbine divise par trois la vitesse du vent qui la traverse, la puissance extraite par la turbine est égale à 16/27 de la puissance totale du vent entrant. 16/27, cela fait 0,59. Concrètement, on va supposer que l'éolienne a un rendement de 50 %. Ceci dit, dans la réalité, les éoliennes sont conçues pour certaines vitesses de vent ; si la vitesse du vent est nettement plus élevée que la vitesse idéale de la turbine, il faut la débrancher.

Comme exemple, supposons que la turbine ait un diamètre $d = 25$ mètres, et un mât d'une hauteur de 32 mètres, qui correspond en gros à la taille de l'éolienne solitaire au dessus de Wellington, en Nouvelle-Zélande (figure B.3). La puissance d'une seule éolienne est alors de :

$$\text{facteur de rendement} \times \text{puissance par unité de surface} \times \text{surface} \\ = 50 \% \times \frac{1}{2}\rho v^3 \times \frac{\pi}{4}d^2 \quad (\text{B.4})$$

$$= 50 \% \times 140 \text{ W/m}^2 \times \frac{\pi}{4}(25 \text{ m})^2 \quad (\text{B.5})$$

$$= 34 \text{ kW}. \quad (\text{B.6})$$



FIGURE B.3. L'éolienne de Brooklyn au dessus de Wellington, en Nouvelle-Zélande, avec quelques personnes à son pied pour donner l'échelle. Un jour de vent, cette éolienne produit 60 kW (soit 1 400 kWh par jour). Photo par Philip Banks.

Et effectivement, lorsque j’ai visité cette éolienne un jour de bon vent, son wattmètre indiquait qu’elle générait 60 kW.

Pour estimer combien de puissance on peut tirer du vent, il nous faut décider de la taille que vont avoir nos éoliennes, et de la distance à laquelle nous pouvons les placer les unes des autres.

Jusqu’à quelle densité peut-on planter des éoliennes ? Trop proches les unes des autres, les éoliennes directement au vent dévient les éoliennes placées en aval. Selon les experts, les éoliennes ne peuvent pas être rapprochées de plus de 5 fois leur diamètre sans qu’apparaissent des pertes significatives de puissance. Avec un tel espacement, la puissance que les éoliennes peuvent générer par unité de surface de terrain est de :

$$\frac{\text{puissance par éolienne (B.4)}}{\text{surface de terrain par éolienne}} = \frac{\frac{1}{2}\rho v^3 \frac{\pi}{8} d^2}{(5d)^2} \quad (\text{B.7})$$

$$= \frac{\pi}{200} \times \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (\text{B.8})$$

$$= 0,016 \times 140 \text{ W/m}^2 \quad (\text{B.9})$$

$$= 2,2 \text{ W/m}^2. \quad (\text{B.10})$$

Ce chiffre mérite d’être gardé à l’esprit : une ferme éolienne avec une vitesse de vent de 6 m/s produit une puissance de 2 W/m² de terrain. Remarquez que notre réponse ne dépend pas du diamètre de la turbine. Les *ds* s’annulent parce que si l’on installe des éoliennes plus grandes, il faut plus les espacer. Planter de plus grandes éoliennes peut être une bonne idée pour attraper les vents plus forts que l’on rencontre en s’éloignant du sol (plus une éolienne est haute, plus la vitesse du vent qu’elle rencontre est élevée), ou pour générer des économies d’échelle. Mais il n’y a pas d’autre raison valable pour préférer de grandes éoliennes.

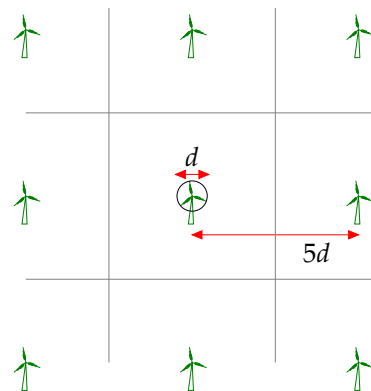


FIGURE B.4. Disposition d’une ferme éolienne.

PUISSANCE PAR UNITÉ DE SURFACE	
ferme éolienne (vitesse 6 m/s)	2 W/m ²

TABLEAU B.5. Données à retenir : les fermes éoliennes.

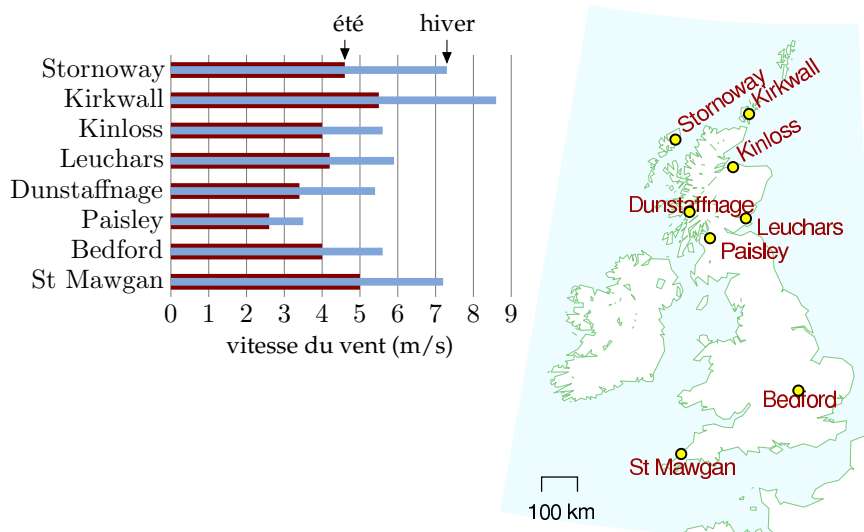


FIGURE B.6. Vitesse moyenne du vent en été (barres sombres) et en hiver (barres claires) sur huit sites répartis sur le territoire de la Grande-Bretagne. Les vitesses ont été mesurées à la hauteur standard du météorologiste, soit 10 mètres. Les moyennes sont calculées sur la période 1971–2000.

Par contre, ce calcul est très largement dépendant de notre estimation de la vitesse du vent. Une vitesse de 6 m/s est-elle une estimation réaliste des vitesses de vent typiques et à long terme dans les zones venteuses de Grande-Bretagne? Les figures 4.1 et 4.2 montraient les vitesses de vent mesurées à Cambridge et Cairngorm. La figure B.6 montre les vitesses de vent estivales et hivernales moyennes en huit autres points de la Grande-Bretagne. Je crains que pour l'essentiel de la Grande-Bretagne, 6 m/s surestime la vitesse du vent typique! Si, au lieu de 6 m/s, on prend la vitesse moyenne à Bedford, soit 4 m/s, comme estimation de la vitesse du vent, il nous faut revoir notre évaluation à la baisse, en la multipliant par $(4/6)^3 \simeq 0,3$. (Souvenez-vous, la puissance du vent varie comme le cube de la vitesse de ce vent.) D'un autre côté, pour estimer la puissance typique, plutôt que de prendre le cube de la vitesse moyenne du vent, on devrait plutôt prendre la moyenne du cube de la vitesse du vent : la moyenne du cube est supérieure au cube de la moyenne. Mais si on commence à aller jusqu'à ce niveau de détails, les choses deviennent encore plus compliquées, parce qu'en réalité, les turbines d'éoliennes ne génèrent pas une puissance proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Il existe un intervalle de vitesses de vent à l'intérieur duquel elles génèrent la puissance idéale. Si la vitesse du vent n'est pas dans cet intervalle (plus faible ou plus élevée), alors elles génèrent moins que la puissance idéale.

Variations de la vitesse du vent selon la hauteur

Des éoliennes plus hautes rencontrent des vents avec des vitesses plus élevées. La manière dont la vitesse du vent augmente avec la hauteur est compliquée : elle dépend de la « rugosité » du terrain alentour et de l'heure de la journée. Pour fixer les idées, si on multiplie la hauteur par deux, on augmente typiquement la vitesse du vent de 10 %, et donc la puissance du vent de 30 %.

Voici un certain nombre de formules standard qui définissent la vitesse v comme une fonction de la hauteur z :

1. Selon la formule du NREL [yat7uk], la vitesse varie comme une puissance de la hauteur :

$$v(z) = v_{10} \left(\frac{z}{10 \text{ m}} \right)^\alpha,$$

où v_{10} est la vitesse du vent à 10 mètres du sol, et où une valeur typique de l'exposant α est 0,143 ou 1/7. La loi en un-septième ($v(z)$ est proportionnel à $z^{1/7}$) est utilisée par Elliott et al. (1991), par exemple.

2. La formule de la *Danish Wind Industry Association* [ya00nz] est la suivante :

$$v(z) = v_{\text{ref}} \frac{\log(z/z_0)}{\log(z_{\text{ref}}/z_0)},$$

où z_0 est un paramètre appelé longueur de rugosité, et v_{ref} est la vitesse à une hauteur de référence z_{ref} qui peut être 10 mètres. La

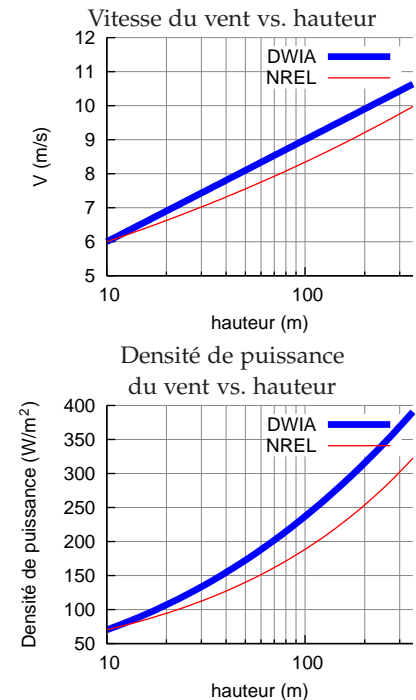


FIGURE B.7. En haut : Deux modèles de vitesses du vent en fonction de la hauteur. DWIA = *Danish Wind Industry Association* (Association de l'industrie éolienne Danoise); NREL = *National Renewable Energy Laboratory* (Laboratoire national des énergies renouvelables). Pour chaque modèle, la vitesse à 10 mètres a été fixée à 6 m/s. Pour le modèle danois, la longueur de rugosité est fixée à $z_0 = 0,1$ mètre. En bas : la densité de puissance (c'est-à-dire la puissance par unité de surface verticale) selon chacun de ces modèles.



FIGURE B.8. La qr5 de quietrevolution.co.uk. Pas exactement une éolienne typique.

longueur de rugosité pour une campagne typique (terres agricoles avec quelques maisons et quelques haies protectrices, espacées d'environ 500 mètres — « rugosité de classe 2 ») est de $z_0 = 0,1$ mètre.

En pratique, ces deux formules de vitesse de vent donnent des résultats numériques similaires. Ce qui ne veut pas dire, cependant, qu'elles sont toujours valables. Van den Berg (2004) suggère que les vents qui soufflent la nuit ont souvent des profils différents.

Caractéristiques standard des éoliennes

Aujourd'hui, une turbine typique a un diamètre de rotor d'environ 54 mètres dont le centre est situé à une hauteur de 80 mètres ; une telle machine a une « capacité » de 1 MW. La « capacité » ou « puissance-crête » est la puissance *maximum* que la turbine peut générer dans des conditions optimales. Habituellement, les turbines éoliennes sont conçues pour commencer à tourner avec des vitesses de vent comprises entre 3 et 5 m/s, et pour s'arrêter si la vitesse du vent atteint 25 m/s (force 10, « avis de tempête » chez les marins). La puissance moyenne réellement délivrée est la « capacité » multipliée par un facteur qui décrit la fraction du temps pendant lequel les conditions de vent sont proches des conditions optimales. Ce facteur, parfois appelé « facteur de charge » ou « facteur de capacité », dépend du site choisi ; un facteur de charge typique pour un *bon* site au Royaume-Uni est de 30 %. Aux Pays-Bas, le facteur de charge typique est de 22 % ; en Allemagne, il est de 19 %.

Estimations de la densité de puissance des fermes éoliennes, faites par d'autres personnes

Dans l'étude gouvernementale [www.world-nuclear.org/policy/DTI-PIU.pdf], la ressource de vent terrestre du Royaume-Uni, en puissance éolienne par unité de surface, est estimée à 9 W/m^2 tout au plus (en termes de capacité, pas de production moyenne). Si le facteur de capacité est de 33 %, alors la puissance moyenne produite serait de 3 W/m^2 .

Le *London Array* est une ferme éolienne en mer en cours de construction au large de l'estuaire de la Tamise. Avec sa capacité de 1 GW, il est prévu qu'elle devienne la ferme éolienne marine la plus grande au monde. Une fois terminée, cette ferme éolienne sera composée de 271 éoliennes couvrant 245 km² [6o86ec], et elle fournira une puissance moyenne de 3 100 GWh par an (350 MW). (Pour un coût d'1,8 milliard d'euros.) Cela fait une puissance par unité de surface de 350 MW/245 km² = 1,4 W/m². C'est moins que d'autres fermes éoliennes en mer parce que, je présume, le site inclut un grand chenal (le *Knock Deep*) qui est trop profond (environ 20 mètres) pour que l'installation d'éoliennes y soit économiquement rentable.

L'impact qu'auront ces projets [de construction du London Array] sur le paysage et sur notre style de vie m'inquiète plus que je ne l'ai jamais été d'une invasion nazie sur nos côtes.

Bill Boggia, de Graveney, où les câbles sous-marins de la ferme éolienne vont émerger sur la terre ferme.

Interrogations

Et la micro-génération ? Si vous plantez une de ces mini-turbines sur votre toit, quelle quantité d'énergie pouvez-vous espérer obtenir ?

En prenant comme hypothèse une vitesse de vent de 6 m/s, ce qui, comme nous l'avons vu précédemment, se situe *au-dessus* de la vitesse moyenne de vent sur l'essentiel du territoire britannique, et en supposant que l'éolienne a un diamètre de 1 mètre, la puissance délivrée sera de 50 W. Cela fait 1,3 kWh par jour — autrement dit, pas beaucoup. Et en réalité, sur un site urbain typique en Angleterre, une micro-turbine ne fournit que 0,2 kWh par jour — voir page 78.

Les pires éoliennes au monde sont peut-être celles situées dans la ville de Tsukuba, au Japon : elles consomment plus de puissance qu'elles n'en génèrent. Leurs installateurs étaient tellement embarrassés par ces turbines immobiles, qu'ils ont préféré importer de la puissance pour les faire tourner et faire croire ainsi qu'elles fonctionnaient ! [6bkvbn]

Notes et bibliographie

Page n°

- 312 *La fraction maximum de l'énergie entrante qui peut être extraite par une turbine circulaire...* Le site Web de la *Danish Wind Industry Association* en donne une bonne explication. [yekdaa].
- 314 *où z_0 est un paramètre appelé longueur de rugosité.* Le projet francophone *Wiki Eolienne* donne une description assez détaillée de la notion de rugosité [6ey1xa].
- 315 *Habituellement, les turbines éoliennes sont conçues pour commencer à tourner avec des vitesses de vent comprises entre 3 et 5 m/s.* [ymfbsn].



FIGURE B.9. Une micro-turbine Ampair de « 600 W ». La puissance moyenne générée par cette micro-turbine installée à Leamington Spa est de 0,037 kWh par jour (1,5 W).

- *un facteur de charge typique pour un bon site est de 30 %*. En 2005, le facteur de charge moyen de l'ensemble des grandes fermes éoliennes du Royaume-Uni était de 28 % [ypvbvd]. Le facteur de charge n'est pas le même selon le moment de l'année, avec un minimum à 17 % en juin et juillet. Le facteur de charge de la zone la plus productive du pays — Caithness, les îles Orcades et les Shetlands — était de 33 %. Les facteurs de charge des deux fermes éoliennes en mer qui étaient en exploitation en 2005 étaient de 36 % pour North Hoyle (au large du Pays de Galles du Nord), et de 29 % pour Scroby Sands (au large de Great Yarmouth). Les facteurs de charge moyens en 2006 pour dix régions étaient de : Cornouailles, 25 % ; milieu du Pays de Galles, 27 % ; Cambridgeshire et Norfolk, 25 % ; Cumbria, 25 % ; Durham, 16 % ; sud de l'Écosse, 28 % ; îles Orcades et Shetlands, 35 % ; nord-est de l'Écosse, 26 % ; Irlande du nord, 31 % ; éoliennes en mer, 29 %. [wbd8o]

Watson et al. (2002) indique qu'une vitesse de vent moyenne annuelle minimale de 7,0 m/s est actuellement considérée comme nécessaire pour qu'un projet de production de puissance éolienne puisse être commercialement viable. Au Royaume-Uni, environ 33 % du territoire connaît de telles vitesses de vent.



FIGURE B.10. Une turbine Iskra de 5,5 mètres de diamètre et de 5 kW de puissance [www.iskrawind.com], subissant son contrôle annuel. Cette turbine, située dans le Hertfordshire (pas vraiment la région la plus ventée de Grande-Bretagne), installée à une hauteur de 12 mètres, génère en moyenne 11 kWh par jour. Une ferme éolienne composée de machines ayant cette performance, avec une éolienne installée pour chaque carré de terrain de 30 mètres de côté, aurait une puissance par unité de surface de 0,5 W/m².