



Ce document est la transcription révisée, chapitrée et illustrée d'une vidéo du MOOC UVED « Énergies renouvelables ». Ce n'est pas un cours écrit au sens propre du terme ; le choix des mots et l'articulation des idées sont propres à l'intervention orale de l'auteur.

Le potentiel éolien

Jacky BRESSON

Professeur – Université de Perpignan Via Domitia

L'objectif de cette vidéo est de déterminer le potentiel énergétique d'un site éolien. Nous parlerons de l'origine de l'énergie et la puissance du vent ainsi que de ses variations temporelles et spatiales.

1. Le vent

Le vent doit son énergie au soleil, comme la majorité des énergies renouvelables. La Terre reçoit de la part du soleil environ $1,74 \times 10^{17}$ Watts ce qui correspond à 100 millions de milliards de Watts et seulement 1 à 2 % de cette énergie est convertie en énergie éolienne. Les rayons du soleil arrivent perpendiculairement à la surface de la Terre au niveau de l'Équateur et tangentiellement au niveau des pôles. Si on fait le bilan thermique de la Terre, on remarque un surplus d'énergie au niveau de l'Équateur et un déficit au niveau des pôles ce qui entraîne nécessairement un transfert de chaleur de l'Équateur vers les pôles. En quelque sorte, les masses d'air plus chaudes au niveau de l'Équateur remontent en altitude et vont aller se refroidir sur les pôles. En fait, ce système est légèrement plus compliqué. Il existe plusieurs cellules dans chaque hémisphère qui sont d'ailleurs entraînées en rotation par la rotation de la Terre, c'est l'effet Coriolis. Pour résumer, les masses d'air se déplacent et créent le vent.

2. Energie cinétique

Une éolienne va capter l'énergie cinétique de ce vent et la convertir en un couple qui va faire tourner les pales du rotor. L'énergie cinétique est fonction de la masse volumique de l'air, c'est-à-dire du poids de l'air, de la surface balayée par le rotor, la surface de vent interceptée par l'éolienne et de la vitesse du vent. La relation est connue de tous : $E_c = 1/2 m V^2$. Prenons un exemple, avec le cas d'une éolienne qui aurait une pale de 40 mètres de rayon. Sa surface étant égale à πR^2 , on va trouver 5000 m^2 . Si ce vent souffle à 10 m/s , c'est-à-dire 36 km/h , en une seconde l'épaisseur de ce disque est de 10 mètres, multipliés par sa surface, nous aurons donc son volume. Ce volume est multiplié par le poids de l'air, c'est-à-dire la masse volumique, $1,225$. Nous allons trouver une masse d'air d'environ 61 tonnes. Son énergie cinétique sera de l'ordre de 3×10^6 joules, c'est-à-dire 3 mégajoules. Ça correspond à l'énergie d'un camion qui se déplacerait à 36 km/h , un camion de 61 tonnes. Si en une seconde ce camion percute un mur, il va développer une puissance qui est égale à l'énergie divisée par le temps. En une seconde, on trouvera bien évidemment la même relation que toute à l'heure.

3. Puissance du vent

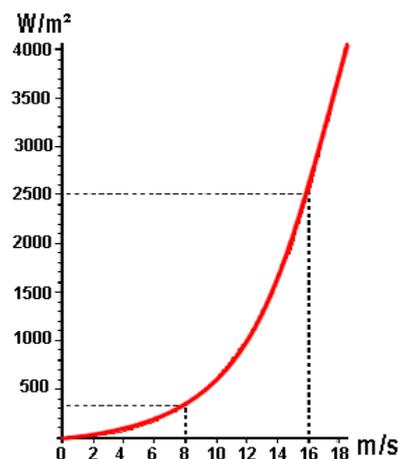
La puissance du vent est donc égale à :

$$P_{\text{vent}} = \frac{E_c}{t = 1\text{s}} = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{1}{2} \rho S V^3$$

On a démontré précédemment que la masse c'est ρ * la section que multiplie l'épaisseur de ce disque, c'est-à-dire la vitesse dont multiplié par V^2 , on va trouver finalement une relation de la forme :

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \rho S V^3$$

On peut voir sur la figure ci-dessous l'évolution de cette puissance en fonction de la vitesse du vent.

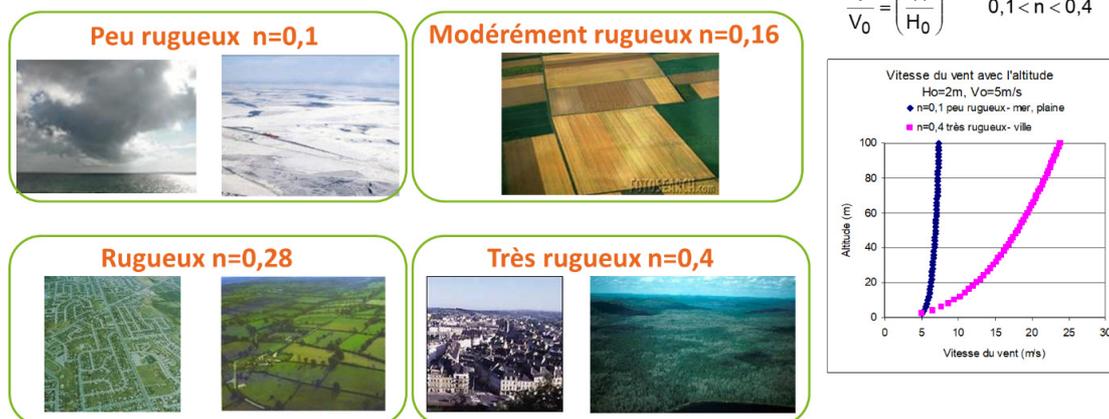


La puissance monte très rapidement avec la vitesse du vent et cette dernière proportionnelle à la vitesse au cube. Ainsi, quand on multiplie la vitesse du vent par deux, cette puissance est multipliée par 2^3 , c'est-à-dire 8. Dans l'exemple précédent, 3 mégajoules d'énergie cinétique correspondrait à une puissance de 3 MW ce qui permettrait d'alimenter en énergie entre 600 et 900 foyers.

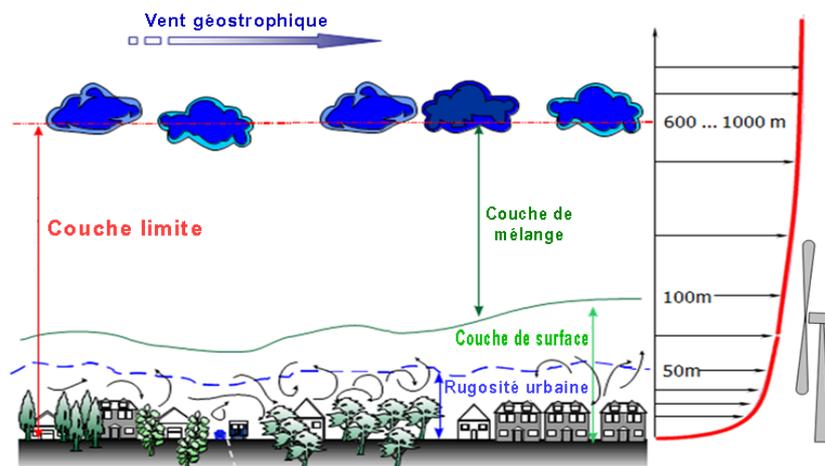
4. Variations de vent

Nous allons nous intéresser maintenant aux variations du vent. On sait que la vitesse du vent est nulle au ras du sol et que, quand on monte en altitude, la vitesse reste pratiquement constante. Dans la couche limite, ce vent va être très fortement influencé par les aspérités du sol. On parlera de rugosité (figure ci-dessous).

Importance de la rugosité du terrain



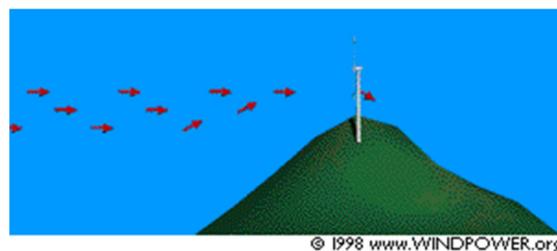
Il existe une loi simple qui donne la vitesse V à l'altitude H , à condition de connaître la vitesse V_0 à l'altitude H_0 , moyennant l'indice n qui est l'indice de rugosité qui dépend de l'état du sol. Dans le cas de terrain un peu rugueux, n est voisin de 0. Dans celui d'un terrain moyennement rugueux, le cas d'une plaine, on a une valeur de 0,16. Dans celui d'une zone plus rugueuse, forêt ou zones urbaines, cet indice augmente jusqu'à 0,4.



Nous avons tracé sur le graphique ci-dessus un profil de vent où on voit l'évolution de la vitesse en fonction de l'altitude pour deux cas : un premier cas où n est voisin de 0,1 donc un cas peu rugueux. On voit que ce profil, la courbe en bleu, est pratiquement vertical et quelle que soit la hauteur cette vitesse est la même. C'est ce qui se passe en mer, en off-shore. Dans le cas où on se trouverait dans une zone urbaine, cet indice voisin de 0,4 nous donne un profil dont la vitesse augmente très rapidement en fonction de l'altitude. Donc il est conseillé dans ce cas-là de mettre les rotors le plus haut possible. Le vent varie également en fonction de la topologie du terrain, donc il est conseillé de mettre les éoliennes dans un goulet, un rétrécissement ou en haut d'une colline (figure ci-dessous).



Effet goulet



Effet colline

D'où vient ce phénomène ? Pour expliquer cela, supposons que nous prenions un tuyau d'eau où le débit entrant est égal au débit sortant, en quelque sorte l'eau qui rentre par un bout du tuyau correspond à l'eau qui en sort. Si ce tuyau a les mêmes sections entrée et sortie, il est évident que le débit qui est le produit de la section que multiplie la vitesse, ces deux sections sont égales, et bien on trouve bien évidemment que la vitesse à l'entrée, de liquide, est égale à la vitesse en sortie.

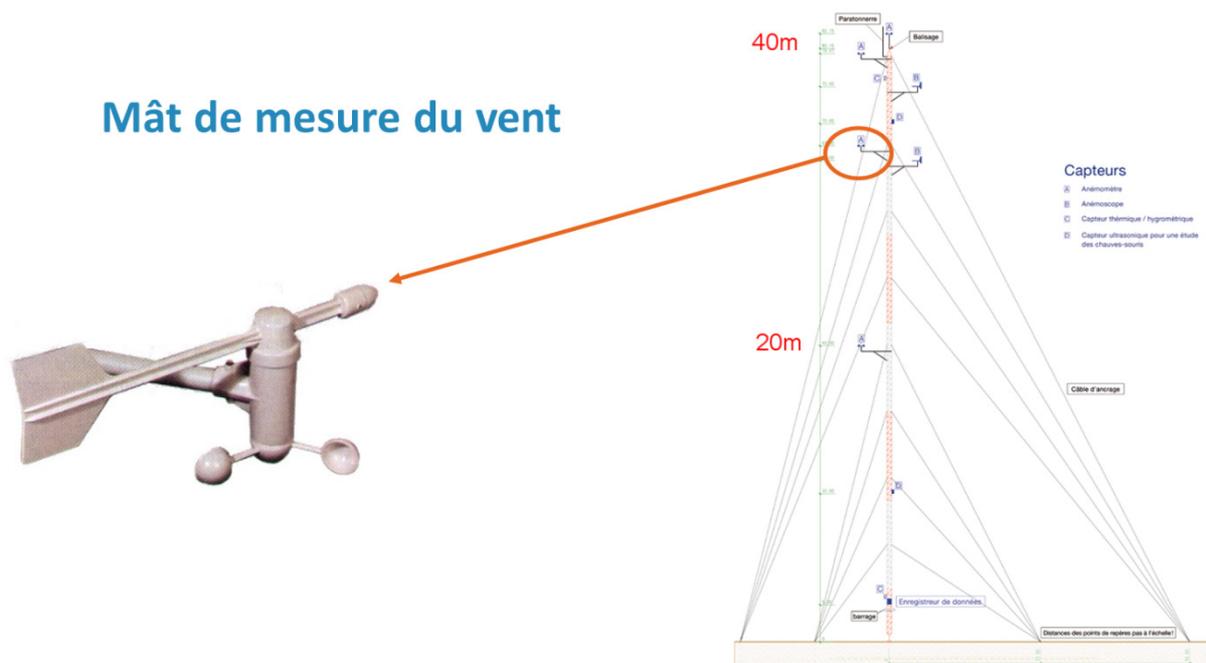
Maintenant supposons que nous pincions en son milieu ce tuyau. Nous allons procéder à un rétrécissement, donc une diminution de section ce qui aura pour conséquence d'augmenter localement la vitesse à ce niveau-là. C'est ce qui se passe lorsqu'on interpose une colline sur un terrain plat, on voit que le tube virtuel de vent est modifié à la verticale de la colline et localement, la vitesse du vent augmente à la verticale de cette colline. Si on monte très haut en altitude, on retrouve bien évidemment le même vent qu'auparavant. On remarque également qu'à l'arrière de la colline, le profil de vent s'inverse, c'est normal, cela crée des tourbillons, il est déconseillé de placer une éolienne à cet endroit-là. Le vent varie également en fonction de l'instant, du temps et également de la topologie qu'on a vue précédemment.

Ainsi, en montagne, dans la journée les masses d'air s'élèvent depuis la vallée vers les cimes et la nuit le système s'inverse. De même, en bord de mer, dans la journée, la terre s'échauffant plus vite que la mer, les masses d'air vont s'élever dans l'atmosphère et se refroidir au niveau de la mer créant ainsi un vent depuis la mer vers la terre et la nuit on a le système inverse. On voit bien cela sur la rose des vents où à certains endroits, en montagne

ou proche de la mer, on retrouve deux directions privilégiées qui sont diamétralement opposées.

5. Potentiel énergétique d'un site éolien

Nous allons essayer d'évaluer le potentiel énergétique d'un site éolien. Pour cela, avant d'installer des éoliennes, il est de coutume d'installer un ou plusieurs mâts de mesures. Ces mâts de mesures sont instrumentés et, à diverses hauteurs, ils présentent des capteurs de vent en direction et en vitesse (figure ci-dessous).



Pour quelle raison utiliser différentes hauteurs ? Ça permet simplement de déterminer la rugosité du site. L'anémomètre va mesurer la vitesse du vent, la girouette sa direction. On prend ainsi, à raison d'une mesure toutes les 10 minutes, sur un mois, plusieurs mois, voire une année, on pourra ainsi réaliser la rose des vents qui nous donnera les directions privilégiées du vent de façon à installer les alignements d'éoliennes. En comptabilisant les données de vent, on va pouvoir tracer ce qu'on appelle la distribution des vitesses de vent qui consiste à relever le nombre d'heures qu'un vent a soufflé pour une classe de vitesse. L'axe horizontal correspond à des vitesses de vent qui vont habituellement de 0 jusqu'à 25 mètres par seconde et verticalement, nous avons les axes qui sont gradués en nombre d'heures sur une année. A partir de cet histogramme de vitesses de vent, on peut bien évidemment calculer sa puissance avec la relation précédente : $P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \rho S V^3$.

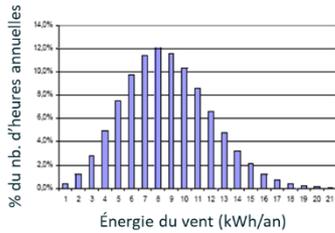
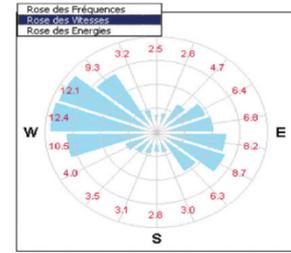
Si cette puissance est multipliée par un nombre d'heures de vent, on va avoir l'énergie (figure ci-dessous).

Vitesse et énergie du vent

L'anémomètre > vitesse du vent

La girouette > direction du vent

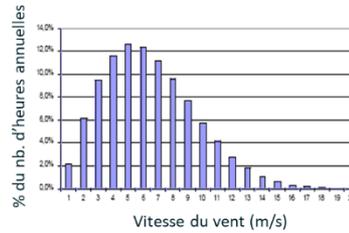
} La rose des vents



Distribution de l'énergie du vent sur une année

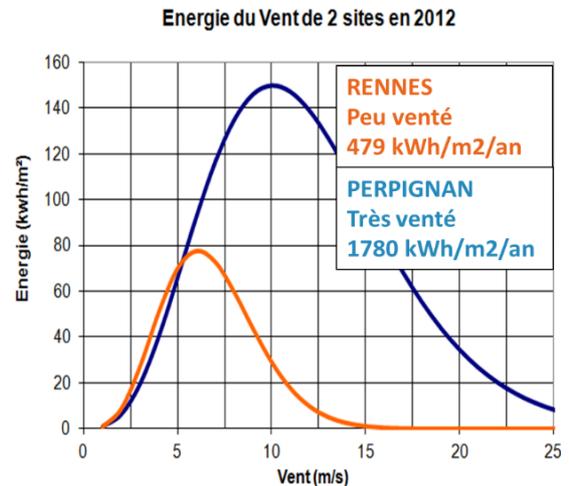
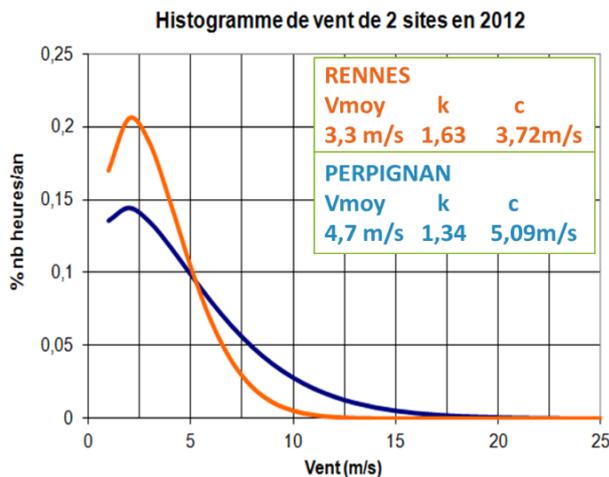
$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \rho S V^3$$

$$E_{\text{vent}} = P_{\text{vent}} \times \text{Nb Heures}$$



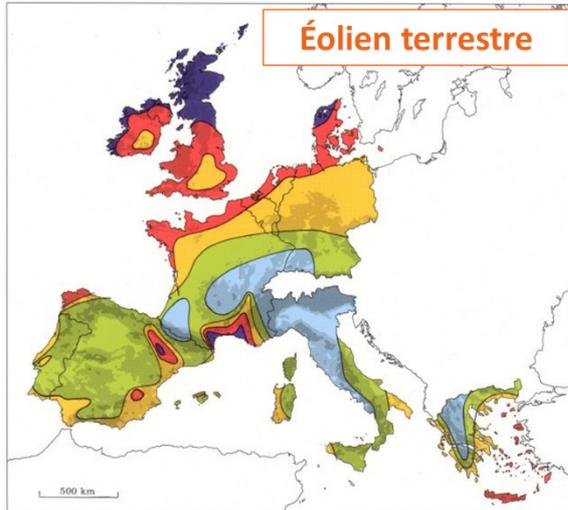
Distribution de la vitesse du vent sur une année

La figure de droite nous donne une distribution en énergie et la somme de toutes ces énergies, sur toutes les vitesses de vent va nous donner le potentiel énergétique du site étudié. Nous avons représenté ci-dessous deux exemples de site éolien. L'un est peu venté. C'est le site autour de la région de Rennes où on voit que sur ce site-là, il y a beaucoup d'heures de vent de vitesse faible et peu d'heures de vent de vitesse élevée. Par contre, la région plutôt ventée autour de Perpignan, on voit que c'est plutôt l'inverse, on a beaucoup plus d'heures de vent, de vitesse de vent élevée. En calculant l'énergie comme précédemment, on va retrouver deux courbes : une courbe en bleu où on voit un site qui est plus énergétique que le site de Rennes.

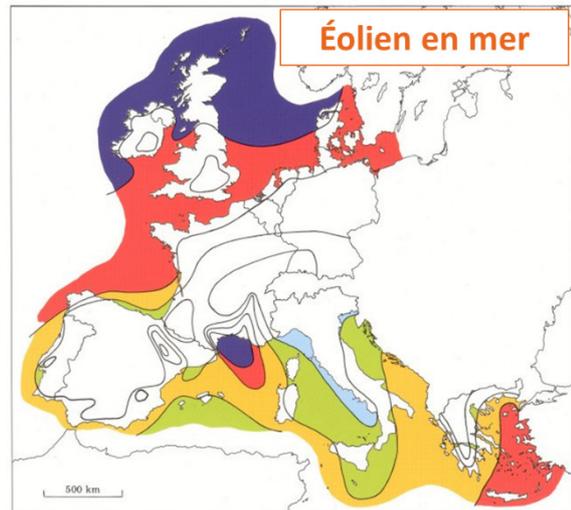


Après avoir fait les calculs, qui consistent à sommer toutes ces énergies, on trouve dans le cas du site peu venté de Rennes une énergie de l'ordre de 470 kWh par mètre carré de vent, le calcul étant fait sur une année. Dans le cas de Perpignan, on trouvera quelque chose de plus élevé de l'ordre de 1800 kWh par mètre carré de vent, toujours sur une année. En se servant uniquement de la moyenne de ces valeurs, on va pouvoir établir des cartes que l'on trouve habituellement sur Internet. On voit ici en Europe que les endroits les plus ventés

sont face au golfe du Lion, c'est-à-dire en France, et dans le nord de l'Europe (ce sont les parties qui sont en bleu sur la carte). On retrouve des choses quasiment identiques dans les sites éoliens en mer où voit que les sites les plus ventés se retrouvent bien évidemment dans le golfe du Lion ou dans la mer du Nord (figure ci-dessous).



Wind resources ¹ at 50 metres above ground level for five different topographic conditions									
Sheltered terrain ²		Open plain ³		At a sea coast ⁴		Open sea ⁵		Hills and ridges ⁶	
m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²
> 6.0	> 250	> 7.5	> 500	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 11.5	> 1800
5.0-6.0	100-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0- 8.5	400- 700
< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 7.0	< 400



Wind resources over open sea (more than 10 km offshore) for five standard heights											
10 m		25 m		50 m		100 m		200 m			
m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²
> 8.0	> 600	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 10.0	> 1100	> 11.0	> 1500		
7.0-8.0	350-600	7.5-8.5	450-700	8.0-9.0	600-800	8.5-10.0	650-1100	9.5-11.0	900-1500		
6.0-7.0	250-300	6.5-7.5	300-450	7.0-8.0	400-600	7.5- 8.5	450- 650	8.0- 9.5	600- 900		
4.5-6.0	100-250	5.0-6.5	150-300	5.5-7.0	200-400	6.0- 7.5	250- 450	6.5- 8.0	300- 600		
< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 6.0	< 250	< 6.5	< 300		