



*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.*

## *Puissance d'une éolienne*

**Jacky BRESSON**

*Professeur – Université de Perpignan Via Domitia*

Nous aborderons les notions de puissance et coefficient de puissance ainsi que la courbe de puissance d'une éolienne. Nous parlerons de régulation, stall et pitch et calculerons l'énergie récupérée par une éolienne et son facteur de charge.

### 1. Puissance

A cause des vitesses non nulles de l'air derrière l'éolienne, la puissance récupérée sur une éolienne est inférieure à la puissance du vent. On définit alors ce qu'on appelle un coefficient de puissance comme étant le rapport de la puissance de l'éolienne divisée par la puissance du vent.

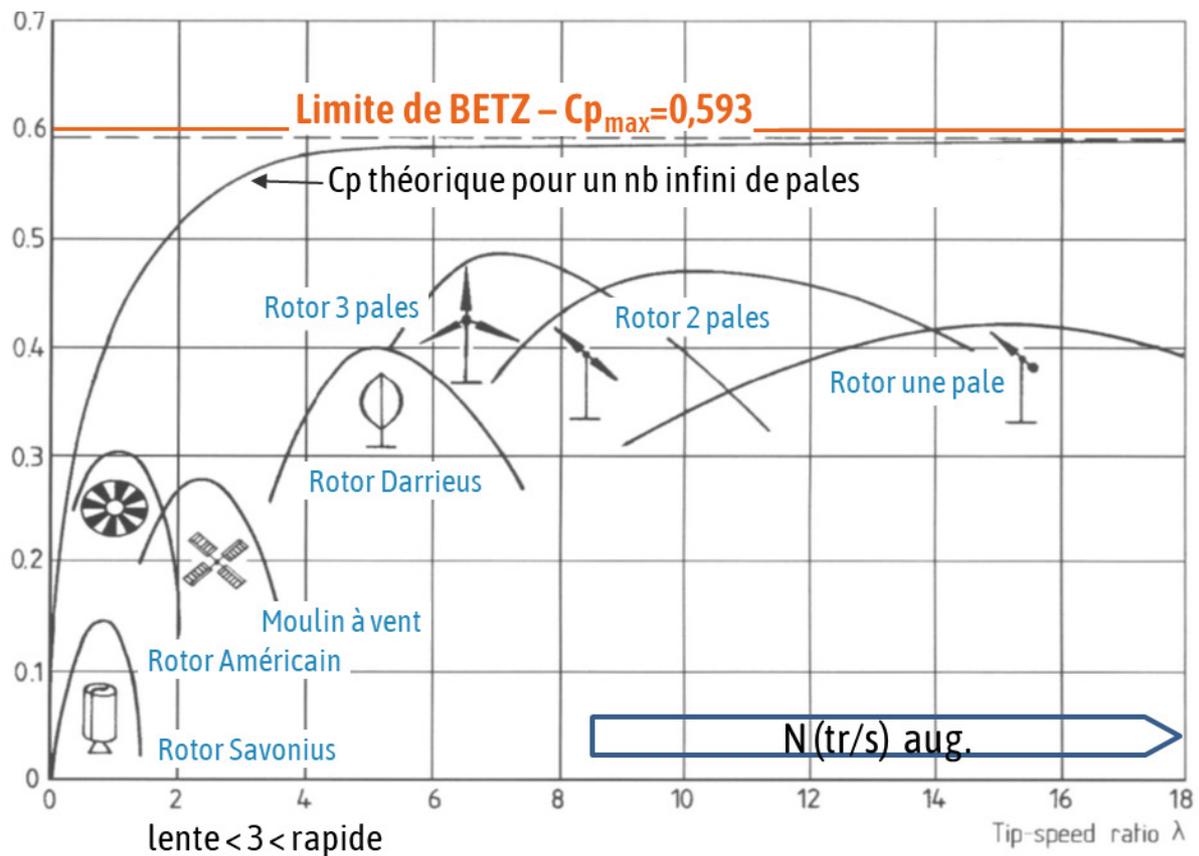
$$C_P = \frac{P_{\text{éolienne}}}{P_{\text{vent}}}$$

Ainsi, tout simplement, la puissance d'une éolienne égal  $C_p \times P_v$ , la puissance du vent étant égale à  $\frac{1}{2}\rho S V^3$ .

La relation est égale à, au final :

$$P_{\text{éolienne}} = C_P P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \rho S C_P V_1^3$$

Alors, il faut garder à l'esprit la théorie de BETZ qui dit qu'on ne peut pas récupérer 100 % de l'énergie mais qu'au maximum on va pouvoir récupérer 0,59 fois la puissance du vent. Autrement dit, on voit bien entre la relation  $P_{\text{éolienne}} = C_p P_{\text{vent}}$  et la puissance de BETZ qui est égale à  $0,59 \times P_{\text{vent}}$ , que le  $C_p$  d'une éolienne réelle sera compris entre 0 et 0,59. Une éolienne réelle pourra donc récupérer moins que 59 % de l'énergie ou de la puissance du vent. Dans la figure ci-dessous, nous avons répertorié l'ensemble de toutes les éoliennes, qu'elles soient à axe vertical ou à axe horizontal.



En abscisse, nous avons mis la valeur de  $\lambda_0$ , qui correspond au rapport de la vitesse tangentielle en bout de pale divisée par la vitesse du vent. En ordonnée, nous avons le  $C_p$  avec la limite supérieure qui est la limite de BETZ, qui correspond à un  $C_p$  de 0,59. Toutes les éoliennes sont en dessous et ne peuvent récupérer qu'une puissance inférieure à 59% de la puissance du vent.

On voit en tout premier le rotor Savonius qui au maximum peut récupérer entre 10 ou 20% de la puissance du vent avec  $\lambda_0$  autour de 1. On qualifie cette éolienne d'éolienne lente. Le rotor américain peut récupérer plus d'énergie de l'ordre, à son maximum, de 30% avec un  $\lambda_0$  voisin de 1,2. On qualifiera cette éolienne aussi d'éolienne lente. Dans ce cas-là, l'extrémité de la pale se déplace environ à la vitesse du vent.

Ensuite on voit le rotor Darrieus qui est une éolienne à axe vertical, qui au maximum peut récupérer environ 40% de la puissance du vent pour une vitesse de rotation plus élevée, un  $\lambda_0$  de l'ordre de 5.

Enfin, on voit la tripale. C'est la seule éolienne qui va pouvoir récupérer une puissance la plus grande possible. En effet son  $C_p$  culmine à environ 0,47-0,49. On s'aperçoit que si on enlève une pale à cette tripale, on a une bipale ou une monopale qui vont tourner plus vite et c'est pour cette raison que les courbes se déplacent vers des  $\lambda_0$  élevés. Elles tournent plus vite mais leur  $C_p$  diminue. Alors il est préférable de garder à l'esprit de garder le coefficient  $C_p$  plutôt que le rendement. En effet, un rendement varie entre 0 et 1, entre 0 et 100 %. Le rendement aérodynamique, c'est la relation rendement =  $C_p/0,59$ . Ainsi, une éolienne qui a un  $C_p$  de 0,59 aura un rendement de 100 %. C'est une éolienne parfaite. La valeur de  $C_p$  indique mieux le pourcentage de vent que peut récupérer cette éolienne.

En parallèle de cette courbe, il est évident qu'il est intéressant de s'intéresser aux couples que l'on va pouvoir récupérer sur l'arbre moteur de l'éolienne. Une relation assez simple qui est que la puissance, c'est le couple que multiplie  $2\pi N$ , où  $N$  est la vitesse de rotation en tours par seconde.

$$P = C\omega = C2\pi N \quad \text{où} \quad \begin{cases} C : \text{couple moteur (Nm)} \\ N : \text{vitesse de rotation (tr/s)} \end{cases}$$

Alors, à puissance constante, c'est-à-dire si le produit  $C$  que multiplie  $N$  est constant, et bien on s'aperçoit que les éoliennes qui vont donc tourner à vitesse de rotation élevée,  $N$  élevée, vont produire des couples faibles. On voit que l'éolienne tripale, monopale ou bipale, qui sont des éoliennes dont les vitesses de rotation sont élevées, génèrent des couples très faibles. On utilisera plutôt ces éoliennes pour produire de l'électricité. Par contre une éolienne comme l'éolienne américaine qui a un  $\lambda_0$  faible et donc qui tourne très lentement va pouvoir développer un couple très important. On utilisera plutôt ces éoliennes pour charger des pompes pour pomper de l'eau.

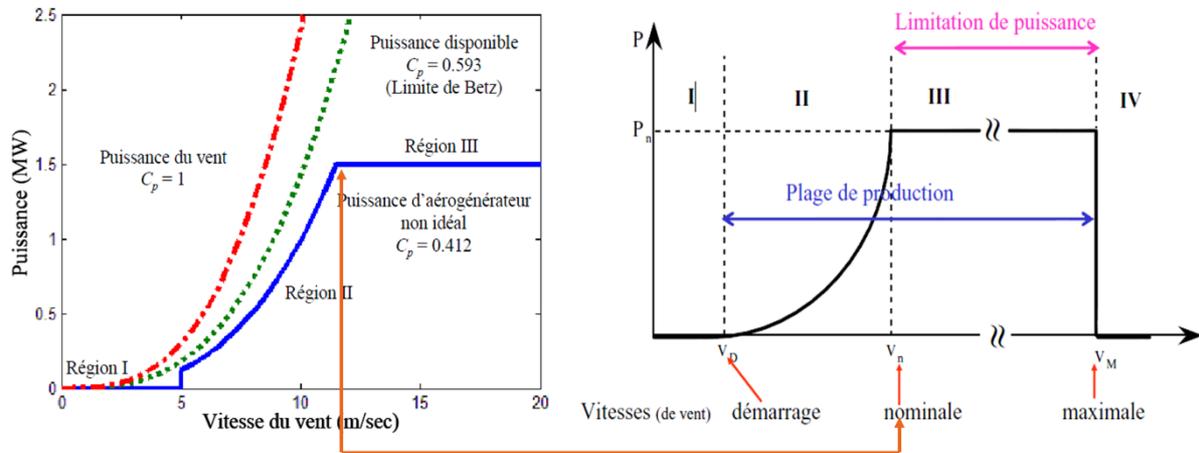
## 2. Courbe de puissance

Nous allons voir la courbe de puissance d'une éolienne. Nous avons représenté sur la figure de gauche (voir ci-dessous) la puissance en fonction de la vitesse du vent. Dans le cas de la puissance du vent, on sait que la puissance de vent est égale à :

$$P_{\text{éolienne}} = C_p P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \rho S C_p V_1^3$$

Cette courbe évolue très rapidement en fonction de la vitesse du vent, c'est la courbe rouge. La courbe de BETZ, c'est 0,59 x la puissance précédente (courbe verte), voilà pourquoi elle est légèrement en dessous. Enfin, la courbe d'un aérogénérateur réel a un  $C_p$  de l'ordre de

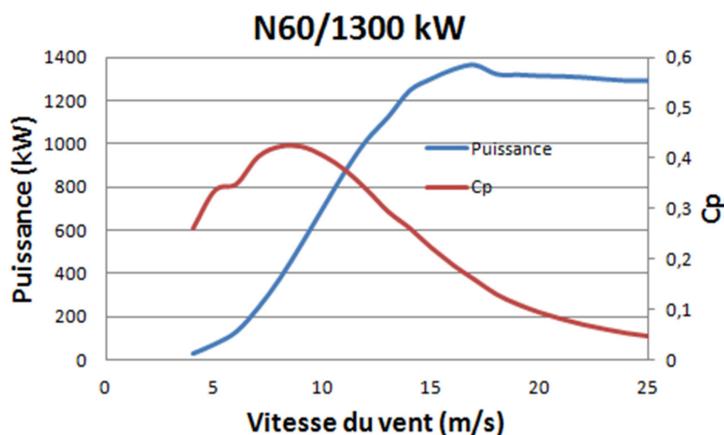
0,4–0,45. Il est donc logique que la courbe bleue soit légèrement en dessous des deux précédentes.



Nécessité de limiter le nombre de tours par seconde pour que  $U_0 \leq 300\text{km/h}$ ,  
 c'est-à-dire  $V_{\text{vent}} \leq \frac{U}{\lambda_0} = \frac{U}{7} \approx 12 \text{ m/s}$ .

Cette courbe représente la courbe de puissance de l'éolienne. Toutes les éoliennes démarrent aux alentours de 4 m/s, ensuite la vitesse de vent augmentant, la courbe monte en  $V^3$  et arrivé à une certaine vitesse qui s'appellera la vitesse nominale. Il sera nécessaire de freiner l'éolienne parce que le bout de la pale tourne à une vitesse excessive supérieure à 300 km/h. On sera obligés, au-delà de cette vitesse, à freiner l'éolienne par les techniques que nous allons voir plus loin et ainsi limiter la puissance de l'éolienne. Au-delà d'une certaine vitesse qui est de l'ordre de 25 m/s environ, c'est-à-dire 90 km/h, de manière générale, on arrête les éoliennes parce qu'on ne peut plus les freiner.

Si on prend la courbe réelle d'une éolienne qui aurait un diamètre de 60 mètres et une puissance nominale de 1,3 MW, on voit qu'elle démarre à 4 m/s et que sa vitesse nominale est autour de 15 m/s. Quant à la courbe rouge, c'est la courbe du coefficient de puissance qui culmine à 0,41 – 0,42.

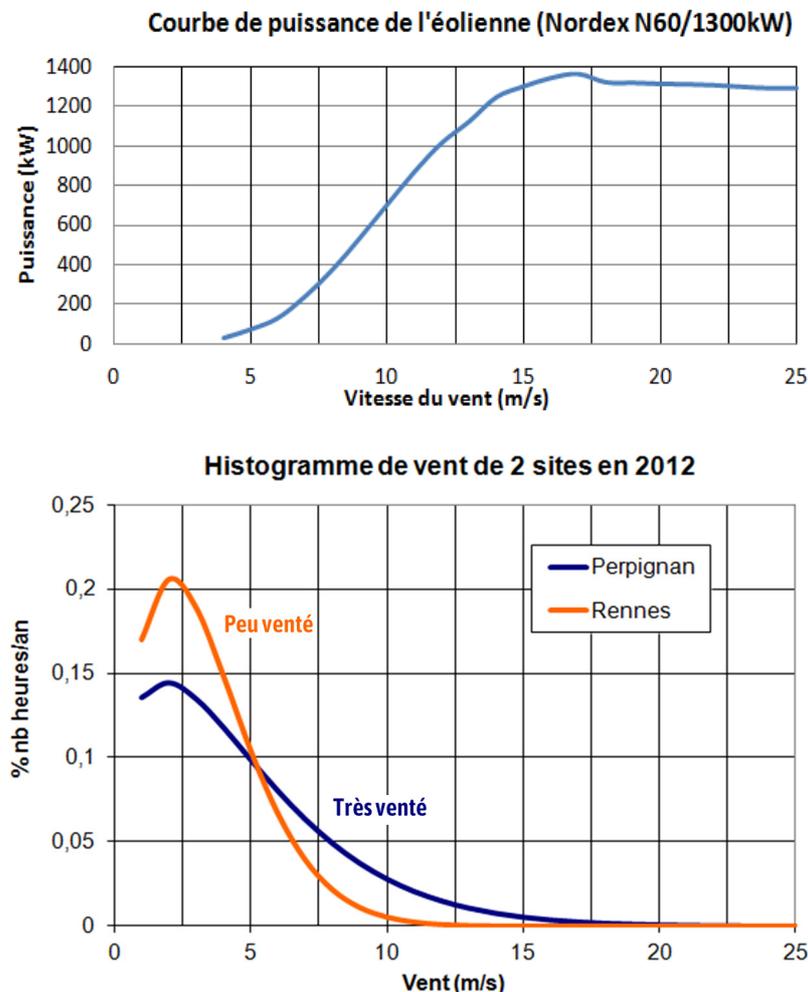


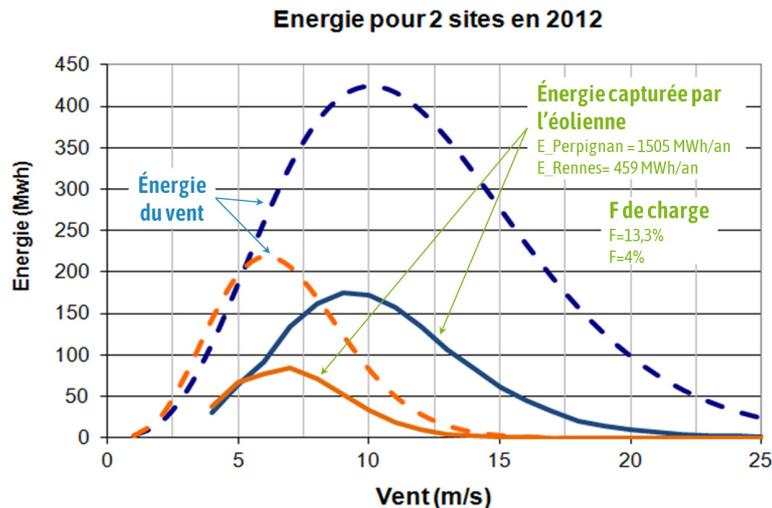
### 3. Systèmes de régulation

Concernant les systèmes de régulation, ils sont de deux types. Un système qui s'appelle *pitch* à pas variable fonctionne en orientant les pales pour les éoliennes qui ont des pales qui pivotent. En fait ce qui se passe lorsqu'on augmente l'angle d'inclinaison ou l'angle de calage, comme on le voit sur la figure entre 0 et 90°, et bien on diminue le  $C_p$ , autrement dit on diminue la puissance de l'éolienne. C'est une technique pour réguler la puissance d'une éolienne. Lorsque cet angle de calage, d'inclinaison est égal à 90°, les pales sont face au vent, on dit qu'elles sont en drapeau et l'éolienne est arrêtée. Une autre technique consiste, surtout sur les éoliennes à pales fixes, à calculer convenablement l'angle de vrillage de la pale de telle façon qu'au-delà d'une certaine vitesse, le décrochage aérodynamique de la pale, c'est-à-dire que la pale perd de la portance, fait naturellement chuter la puissance. C'est une autre technique qui est moins précise que la précédente puisqu'elle est passive alors que l'autre est active.

### 4. Energie récupérée

Dans les figures ci-dessous, nous avons essayé de calculer l'énergie que l'on peut récupérer d'un site éolien.





Si on regarde la figure du milieu qui correspond à la distribution des vitesses de vent, autrement dit le nombre d'heures de vent, en fonction de la vitesse, pour deux sites : un site peu venté (la courbe orange) ; un site très venté (la courbe bleue). Le site peu venté, on voit qu'il y a beaucoup d'heures de vent pour des vitesses de vent faibles et peu d'heures de vent pour des vitesses de vent élevées. La courbe bleue, site très venté, c'est l'inverse. En dessous, on a calculé l'énergie du vent (c'est les courbes qui sont en pointillés). On s'aperçoit tout de suite que le site très venté est plus énergétique que le site peu venté.

Maintenant, le problème va être de récupérer cette énergie avec l'éolienne dont la caractéristique se trouve au-dessus. Alors cette éolienne, on voit qu'elle démarre à 4 m, avant 4 m/s elle est arrêtée, donc bien qu'il y ait de l'énergie dans le vent, il ne peut pas être capté. Vers 15 m/s cette éolienne fonctionne à plein régime et on peut voir à la verticale que l'énergie du site peu venté (la courbe en pointillé orange), il n'y a plus d'énergie dans ce vent-là. Par contre, le site très venté, il y a encore de l'énergie puisque ce dernier a des heures de vent, des heures de vitesse de vent élevée.

Ainsi, tous calculs faits, on retrouve les deux courbes en trait plein sur le dernier graphique, en bas. La courbe orange, c'est l'énergie que pourrait récupérer cette éolienne sur le site peu venté, tous calculs faits c'est-à-dire en calculant l'énergie, la surface qui se trouve en dessous, la surface de la courbe qui est sous la courbe et bien on trouve une énergie qui est de l'ordre de 460 MWh sur une année alors que le site très venté qui est le site de Perpignan on trouve environ 1500 MW par an. On en déduit ce qu'on appelle les facteurs de disponibilité qui sont respectivement de 13 % pour le site très venté et 4 % pour le site peu venté. Alors, à quoi correspond ce facteur de disponibilité ? C'est simplement le rapport entre l'énergie réellement produite par l'éolienne sur une année divisée par l'énergie qu'elle produirait si elle tournait à plein régime pendant 8 760 heures. Ce facteur de charge est compris entre 10 et 25 %, bien évidemment 25 % c'est le cas idéal, c'est ce qui se passe dans les sites offshore.