



SEMAINE 3 : L'ENERGIE EOLIENNE

Ce document contient les retranscriptions textuelles des vidéos proposées dans la partie « Performance et technologies » de la semaine 3 du MOOC « Énergies renouvelables ». Ce n'est donc pas un cours écrit au sens propre du terme ; le choix des mots, l'articulation des idées et l'absence de chapitrage sont propres aux interventions orales des auteurs. Des figures choisies par les intervenants ont été ajoutées afin d'illustrer leurs propos.

Puissance d'une éolienne

Jacky BRESSON

Professeur – Université de Perpignan Via Domitia

Au cours de cet exposé, 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.

Alors à 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 $C_p \times P_v$.

Puissance du vent étant égale à :

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

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.

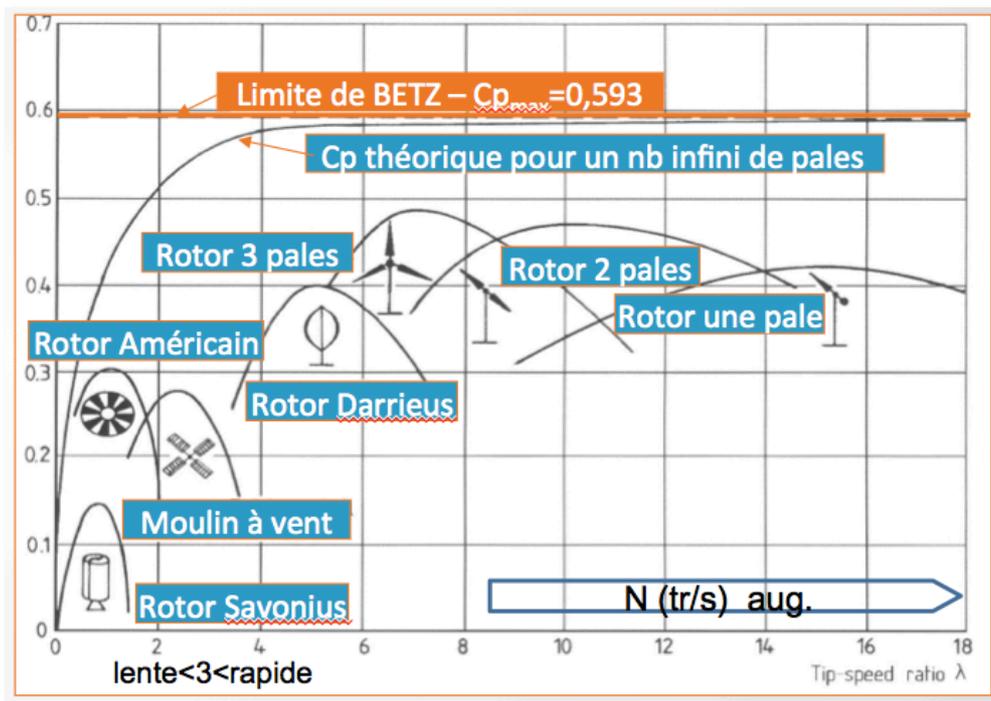
⇒ Autrement dit, on voit bien entre la relation :

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

Et la puissance de BETZ = 0,59 x Pv, que le Cp d'une éolienne réelle sera compris entre 0 et 0,59.

⇒ Alors en fait, une éolienne réelle pourra récupérer moins que 59 % de l'énergie ou de la puissance du vent.

Donc ici, dans ce transparent, dans cette figure, nous avons répertorié l'ensemble de toutes les éoliennes, qu'elle soit à axes vertical ou à axe horizontal.



- Donc en horizontal, en abscisse, nous avons mis la valeur de λ_0 , qui correspond au rapport de la vitesse tangentielle en bout de pale divisée par la vitesse du vent ;
- Et en axe vertical le C_p avec la limite supérieure qui est la limite de BETZ, qui correspond à un C_p de 0,59.

⇒ Ainsi, toutes les éoliennes étant en dessous, bien évidemment, ne peuvent récupérer qu'une puissance inférieure à 59 % de la puissance du vent.

- Alors on voit en tout premier le rotor Savonius qui au maximum peut récupérer entre 10 ou 20 % de la puissance du vent avec λ_0 autour de 1.

⇒ Donc 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 λ_0 voisin de 1,2.

⇒ Donc, 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 λ_0 de l'ordre de 5.

- Et enfin, on voit la tripales, 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 tripales, on a bipales ou une monopale, elle va tourner plus vite et c'est pour cette raison que les courbes se déplacent vers des λ_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 a 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.

$$P = C\omega = C2\pi N$$

Où

C : couple moteur (Nm)

N : vitesse de rotation
(tr/s)

Alors, a 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 élevé, vont produire des couples faibles.

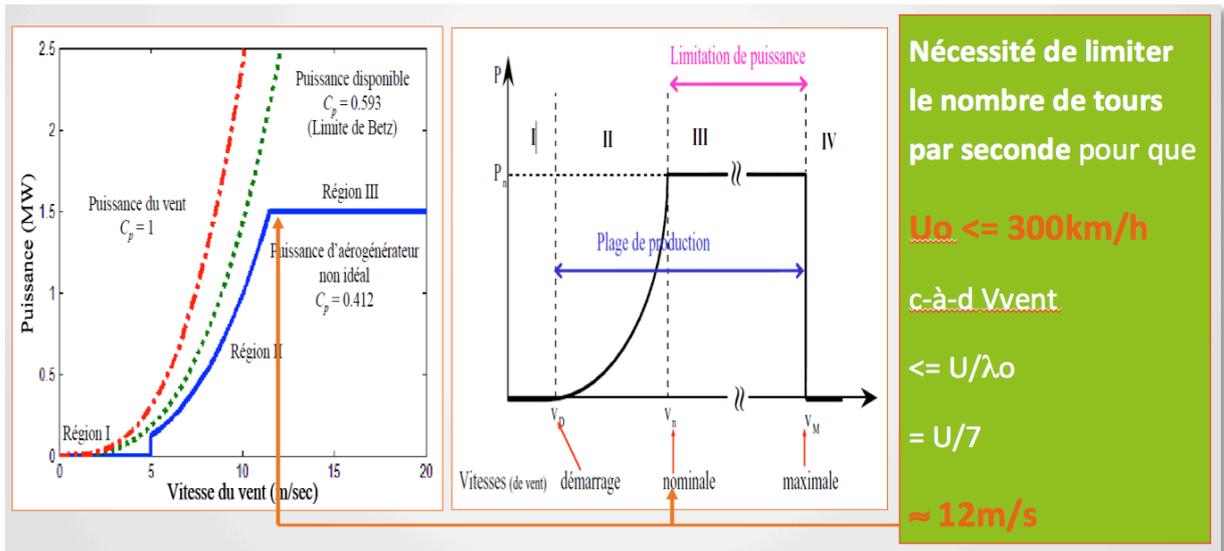
- Ce que l'on voit sur la figure ci-jointe où l'on voit que l'éolienne tripales, monopale ou bipales que sont des éoliennes dont les vitesses de rotation sont élevées génèrent des couples très faibles.
- ⇒ On utilisera plutôt ces éoliennes pour produire de l'électricité.
- Par contre une éolienne comme l'éolienne américaine qui a un λ_0 faible et donc qui tourne très lentement va pouvoir développer un couple très important.
- ⇒ On utilisera plutôt, pareil pour la Savonius, on utilisera plutôt ces éoliennes pour charger des pompes pour pomper de l'eau.

Alors, nous allons voir la courbe de puissance d'une éolienne.

- Nous avons représenté sur la figure de gauche 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 :

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

- Donc cette courbe évolue très rapidement en fonction de la vitesse du vent (c'est la courbe rouge).
- La courbe des BETZ, la puissance 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 donc il est logique que la courbe bleue soit légèrement en dessous des deux précédentes.



- ⇒ Donc cette courbe représente la courbe de puissance de l'éolienne.
- ⇒ Elle démarre, 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, et bien il sera nécessaire de freiner l'éolienne parce que le bout de la pale tourne à une vitesse excessive supérieure à 300 km/h.
- ⇒ Donc 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.

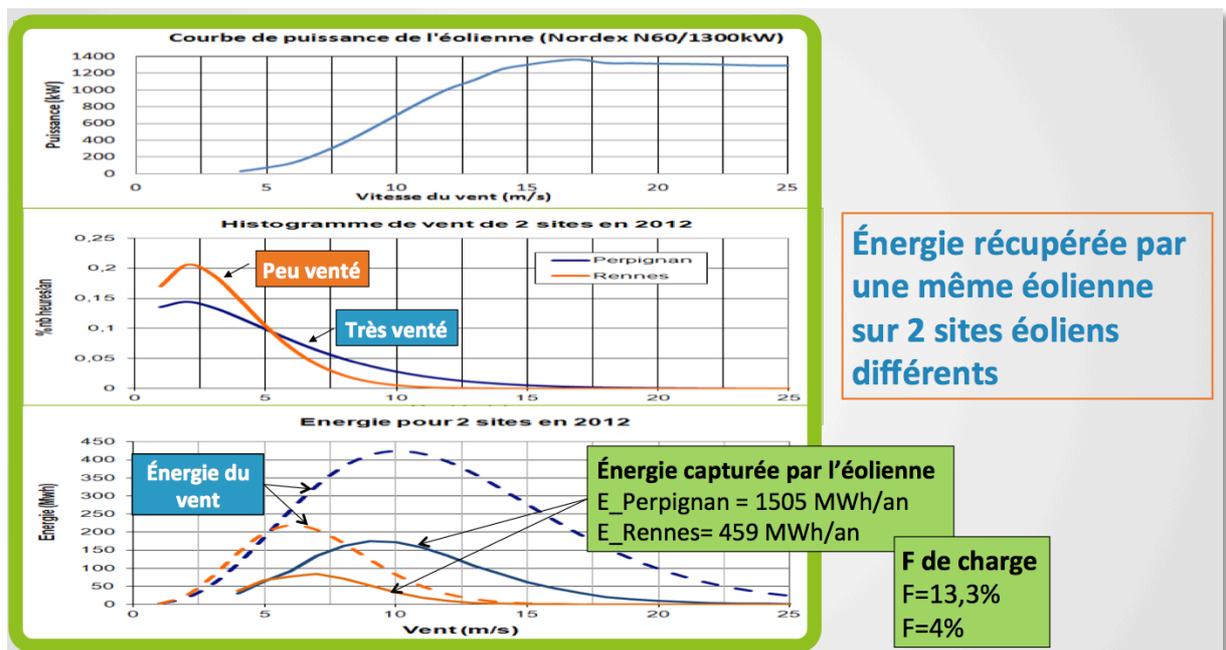
Voici la courbe réelle d'une éolienne qui aurait un diamètre de 60 mètres et une puissance nominale de 1,3 MW (courbe bleue), on voit qu'elle démarre à 4 m/s et que sa vitesse nominale est autour de 15 m/s. Quant à la courbe rouge, c'est la courbe du coefficient de puissance qui culmine à 0,41 - 0,42.

Alors les systèmes de régulation, il existe deux systèmes :

- Un système qui s'appelle *pitch* à pas variable qui 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.

Alors nous avons représenté dans cette figure-là, nous avons essayé de calculer l'énergie que l'on peut récupérer d'un site éolien.



- Donc 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) ;
 - Et 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.
- Donc 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.

Technologie des éoliennes

Jacky BRESSON

Professeur – Université de Perpignan Via Domitia

Au cours de cette vidéo, nous allons voir les éléments constitutifs d'une éolienne puissance ainsi que ses systèmes d'arrêt et ses systèmes de production. On mettra en relation dimension et production et nous terminerons par un projet éolien urbain et parlerons de l'impact acoustique des éoliennes.

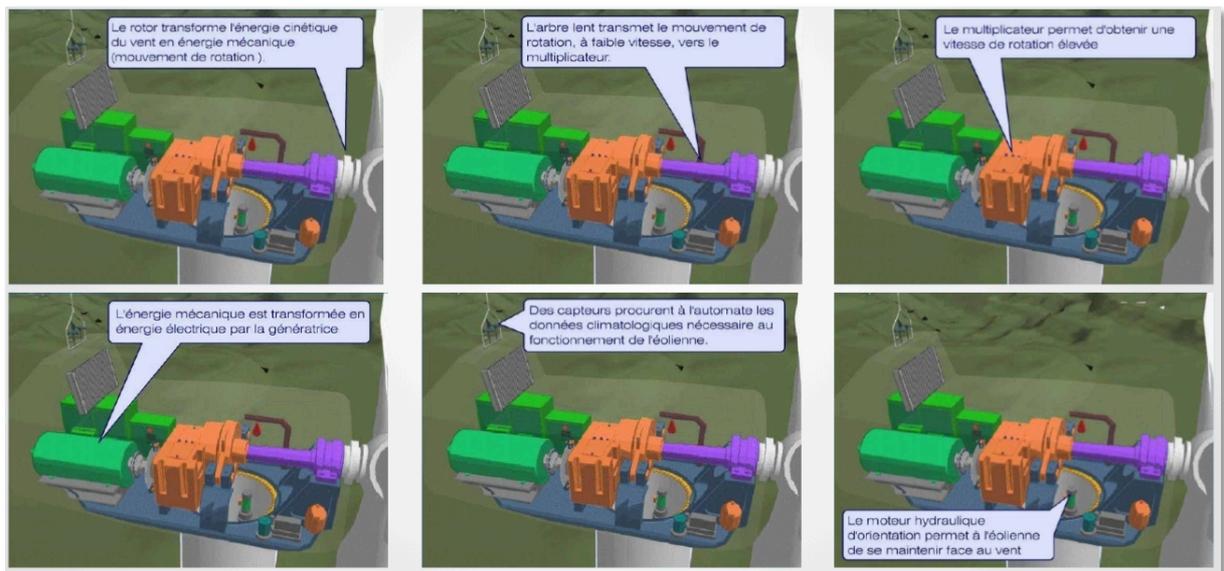
Alors une éolienne est constituée par un mât qui en moyenne a une longueur entre 50 et 100 mètres, voire plus pour les très grosses éoliennes, surmonté d'une nacelle sur laquelle est fixé un rotor avec un certain nombre de pales.

⇒ La plupart des éoliennes de puissance, ce sont des tripales, ces pales sont soit fixes, soit mobiles autour de leur axe.

Sur la photo de droite, on voit que le rotor va récupérer l'énergie cinétique du vent pour le transformer en énergie mécanique et transmettre cette énergie mécanique à un multiplicateur via un arbre lent.

Alors pourquoi un multiplicateur ?

- Parce que le rotor tourne environ à 20 à 30 tr/m et en sortie de multiplicateur, la vitesse sera de l'ordre de 1500 tr/m compatibles avec la génératrice asynchrone qui est derrière, autrement dit cette génératrice va transformer l'énergie mécanique en énergie électrique.
- La nacelle est surmontée de capteurs, alors un capteur notamment une girouette qui indiquera la direction du vent de façon à placer le rotor perpendiculairement au vent en faisant pivoter la nacelle avec des moteurs hydrauliques.
- Cette éolienne est aussi instrumentée avec un anémomètre qui indiquera la vitesse du vent de façon à réguler la puissance de l'éolienne en faisant pivoter les pales ou de mettre les pales en drapeau ou d'arrêter l'éolienne en cas de vent excessif.



Alors les petites éoliennes qui ont des pales fixes n'ont pas ce système et utilisent plutôt la régulation de type *stall* par ce qu'on appelle décrochage aérodynamique.

- En fait, la pale est calculée de telle façon qu'à partir d'une certaine vitesse de vent, la portance décroît et régule automatiquement la vitesse de rotation.
- ⇒ En cas de vent très fort, ces petites éoliennes, petite machine s'efface, soit d'une manière latérale c'est-à-dire qu'elles diminuent leur prise au vent, elles s'inclinent à l'horizontale ou on procède à l'effacement latéral, ce qui est le cas aussi des éoliennes américaines.

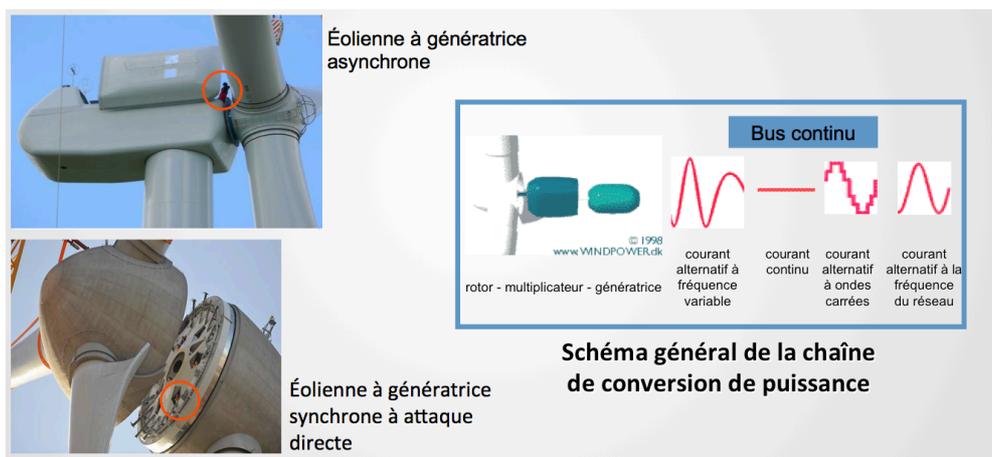
Alors, les systèmes d'arrêt sont de deux types et on arrête les éoliennes en cas de vent excessif (au-delà de 25 m/s quasiment toutes les éoliennes sont arrêtées, sont mises en drapeaux), en cas de problèmes électriques ou de problèmes mécaniques et de vibrations intempestives.

Alors, il existe deux types de frein :

- Lorsqu'un rotor de cette dimension-là est en rotation, il est hors de question de le freiner avec des systèmes mécaniques, on va utiliser plutôt des freins qu'on appelle aérodynamiques.
- ⇒ En fait, on fait pivoter la pale - pour les pales qui peuvent pivoter -, ainsi en augmentant l'angle de calage de 0 à 90°, on va freiner le rotor et à 90° on aura les pales qui seront en drapeau et donc l'éolienne sera arrêtée.
- Pour les pales fixes, c'est l'extrémité de ces pales qui peut pivoter et freiner l'éolienne.
- ⇒ Lorsque l'éolienne est arrêtée, on utilise des freins à disques, des gros freins à disques qui permettent de bloquer l'éolienne et éviter qu'elle ne reparte accidentellement lorsque les techniciens de maintenance sont à l'intérieur de la nacelle.

Alors, pour produire l'énergie, on a besoin de génératrices. Il existe actuellement deux catégories d'éoliennes :

- Les éoliennes qui utilisent des génératrices asynchrones, donc qui nécessitent un multiplicateur interposé entre le rotor et la génératrice.
- ⇒ Alors ce multiplicateur est un système mécanique, c'est une sorte de boîte de vitesses qui a un rendement très faible et qui va pénaliser le rendement total de l'éolienne.
- ⇒ D'autre part, ce système tombe souvent en panne et pose des problèmes.
- ✓ Donc les nouvelles générations d'éoliennes sont des éoliennes à génératrice synchrone à attaque directe.
- On voit ici sur la photo en haut à droite, la génératrice se trouve directement reliée au rotor et se trouve derrière le rotor. Il n'y a plus de multiplicateur.
- Nous voyons les photos correspondant à ces génératrices-là que l'on repère facilement lorsqu'on est au sol.



⇒ L'ancienne génération d'éoliennes, la nacelle est plutôt parallélépipédique, alors que les nouvelles générations d'éoliennes, les nacelles sont plutôt ovoïdes, ressemblent plutôt à un ballon de rugby.

⇒ Pour avoir les dimensions, il suffit d'observer les techniciens de maintenance qui se trouvent dans chacune de ces nacelles.

Alors, quel que soit le type de génératrice, le signal produit est un signal triphasé, alternatif à la fréquence variable.

- En effet, quand l'éolienne démarre, la fréquence varie en fonction de la rotation du rotor.
- Il est donc impossible de connecter directement ce signal sur le réseau qui est à fréquence fixe.

- On a l'habitude de passer par ce qu'on appelle un bus continu, c'est-à-dire qu'à partir du signal alternatif à fréquence variable, on va le redresser avec des systèmes spécifiques, des redresseurs particuliers, pour fabriquer ainsi une tension continue.
- Et à partir de cette tension continue, on va fabriquer du signal alternatif à fréquence fixe grâce à des onduleurs.
- ⇒ Ainsi, on pourra se connecter directement sur le réseau.
- ⇒ Cette technique est actuellement la plus utilisée puisqu'elle laisse le rotor libre en rotation ce qui permet d'obtenir la puissance maximale extraite du vent.

Dans les machines que l'on utilise actuellement sont des machines synchrones ou machines à aimants permanents, encore appelées machines *brushless*, c'est-à-dire « sans balais ».

⇒ Elles utilisent simplement des aimants qui passent devant des bobines.

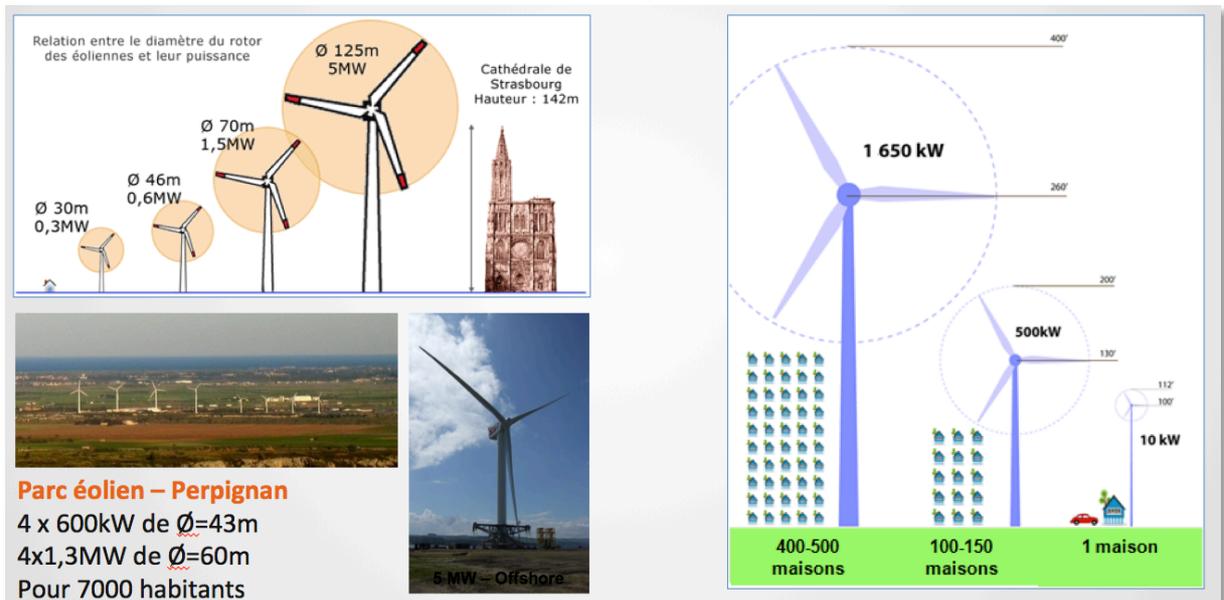
Alors il y a deux catégories :

- Lorsque le champ magnétique est perpendiculaire à l'axe de rotation, on a à faire à des machines à champ radial, cylindriques ;
- Et lorsque le champ magnétique est parallèle à l'axe de rotation, on a à faire à des machines à champ axial qui s'appellent discoïdes.

La photo du milieu représente les aimants qui sont collés à l'intérieur d'un rotor sur lequel vont être fixées les pales de l'éolienne et ces aimants vont tourner et passer devant des bobines qui sont fixées sur le stator.

- Ces moteurs, ce sont des moteurs que l'on utilise sur les vélos électriques.
- Ces machines *brushless* fonctionnent à moteur et sont réversibles puisqu'on peut récupérer de l'énergie en descente, elles fonctionnent donc en génératrice.
- ⇒ C'est ce qu'on voit sur la photo de droite, on voit la génératrice à attaque directe, qui est fixée directement sur le rotor de l'éolienne.
- ⇒ Pour obtenir une tension continue, on utilise soit des redresseurs à diodes, soit des redresseurs à modulation de largeur d'impulsion MLI.
- Alors, si on regarde production et dimension, on peut s'apercevoir qu'avec un rotor de 30 mètres, on peut espérer avoir une puissance de l'ordre de 30 kW.
- Lorsqu'on augmente la surface des rotors de 46 jusqu'à 125 mètres, bien évidemment la puissance augmente avec un rotor de 125 mètres, on a des génératrices et on produit des puissances de l'ordre de 5 MW.

⇒ On voit que bien évidemment la nacelle se trouve très haut à plus de 100-150 mètres de hauteur.



En dessous il y a une photo qui représente un parc éolien qui est composé de quatre machines de 600 kW et quatre machines de 1,3 MW. Ça permettrait d'alimenter une petite agglomération de 7 000 habitants.

Juste à côté, il y a une machine offshore, ce sont des éoliennes de très grande dimension de plus de 125 mètres de diamètre et elle peut produire environ 5 MW.

- On peut remarquer que la hauteur du mât est légèrement plus importante que la longueur de la pale.
- ⇒ En effet en mer, quelle que soit la hauteur, le vent est à peu près le même, le profil est vertical et il n'y a pas besoin de monter les nacelles très haut.

Enfin, que peut-on espérer alimenter comme habitation avec une machine ?

- Avec une éolienne de 10 kW, on va pouvoir alimenter une habitation, une maison ;
- Avec une machine de 500 kW, entre 100 et 150 habitations ;
- Et avec 1,6 MW, on peut espérer alimenter entre 400 et 500 habitations.

Alors, dans le cas d'un projet éolien urbain non raccordé au réseau, l'énergie doit être stockée dans une batterie.

- Le signal issu de l'éolienne est un signal triphasé, il suffira de le redresser pour charger convenablement la batterie.

- À partir de ce signal continu, un onduleur permettra de re-générer un signal alternatif de 120 V à fréquence fixe, 50 hertz compatibles avec les utilisations courantes.

Ici nous avons mis une éolienne d'un mètre de diamètre qui peut produire entre 400 et 600 W à 45 km/h.

Si maintenant le site est raccordé au réseau, l'énergie récupérée par l'éolienne sera directement, après être redressée et passée par un bus continu, sera réinjectée au réseau électrique et lorsque l'éolienne ne tourne pas, l'utilisateur pourra récupérer l'énergie directement du réseau électrique.

⇒ Voilà pourquoi il y a la présence de deux compteurs spéciaux.

Donc ici nous avons mis une éolienne qui peut produire 2 kW à 40 km/h, qui a un rotor plus conséquent de 4 mètres de diamètre.

Intéressons-nous au bruit généré par les éoliennes.

- Sur la figure de gauche nous voyons une échelle qui varie de 0 à 150 dB.
 - 0 dB correspondant au seuil d'audibilité ;
 - et 150 dB au seuil de la douleur.
- Une éolienne va générer un niveau de pression au niveau d'intensité acoustique à 350 mètres d'environ 40 à 50 dB.
- Ce que nous retrouvons sur la cartographie acoustique à droite où on voit un alignement d'éoliennes et où on voit qu'à la verticale d'une éolienne (les parties rouges), le niveau de bruit est compris entre 50 et 60 dB.
- A mesure que l'on s'éloigne d'une éolienne, le bruit diminue dans les parties vert foncé, on retrouve bien un niveau de l'ordre de 40 à 50 dB.

