



# MOOC

## Énergies Renouvelables

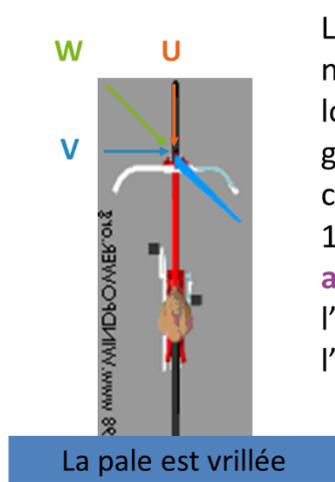
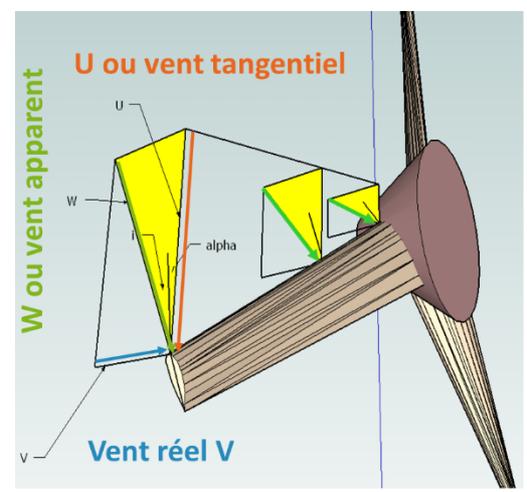
*Ce document est la transcription révisée, chapitrée et illustrée d'une vidéo du MOOC UVED « Énergies renouvelables ». Ce n'est pas un cours écrit au sens propre du terme ; le choix des mots et l'articulation des idées sont propres à l'intervention orale de l'auteur.*

### Les éoliennes à axe horizontal

**Jacky BRESSON**  
 Université de Perpignan Via Domitia

Les éoliennes à axe horizontal, comme l'indique leur nom, ont un axe parallèle à la direction du vent. À l'inverse d'une pale d'avion qui voit arriver le vent dans la même direction tout le long du bord d'attaque, dans le cas d'une éolienne, la pale tourne autour d'un axe de rotation. C'est légèrement plus compliqué pour essayer d'expliquer ce phénomène.

#### 1. Pales vrillées



Le **vent apparent W** n'étant pas constant le long de la pale, pour garder une incidence comprise entre 0 et 12°, **l'angle de calage alpha** augmente lorsque l'on se rapproche de l'axe du rotor.

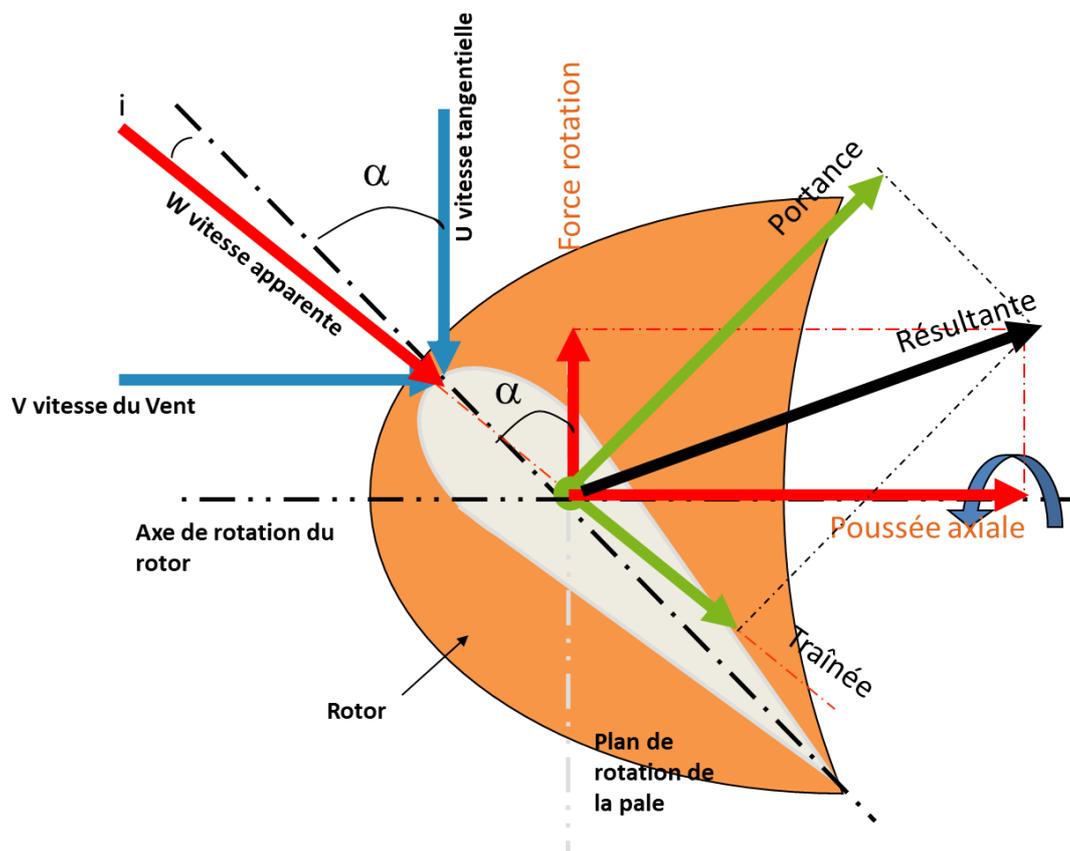
Imaginons un cycliste en train de pédaler par temps calme sur son vélo, il verra arriver un vent de face et créera son propre vent. Dans le cas de l'éolienne, nous appellerons ça le vent

tangentiel :  $U$  (figure ci-dessus). Maintenant, supposons qu'il y ait un vent latéral perpendiculaire à la direction de déplacement du cycliste, nous appellerons ça, dans le cas de l'éolienne, le vent réel, qui est constant tout le long de la pale et qui est perpendiculaire au plan de rotation du rotor. Evidemment, le cycliste ne verra pas arriver deux vents mais un vent, la composante des deux vents qui d'ailleurs fera flotter le petit drapeau dans la direction opposée, qui est situé sur le guidon du vélo. De même, le profil de pale verra arriver un vent,  $W$ , que l'on appellera le vent apparent.

Ainsi, ce vent apparent qui est la composante de ces deux vents varie, on le voit, en amplitude et en direction tout le long de la pale. Pour quelle raison ? Bien que le vent réel soit constant tout le long de la pale, le vent tangentiel est maximum en bout de pale et égale à zéro à l'axe de rotation. Son amplitude varie donc et la composante de ces deux, qui est le vent apparent, s'incline plus lorsqu'on se rapproche, plus vers l'avant, autrement dit est parallèle plutôt au vent réel lorsqu'on est proche de l'axe de rotation et est plutôt parallèle au vent tangentiel lorsque l'on est en bout de pale. Ainsi, pour garder une incidence comprise entre 0 et  $12^\circ$  entre cette direction de vent et l'axe du profil, là où il y a la portance maximale, il sera nécessaire d'incliner le profil de pale vers l'avant lorsqu'on se rapproche du rotor. La pale devra être vrillée.

## 2. Les forces en jeu

Essayons de voir les forces en jeu qui font tourner l'éolienne.



Dans la figure ci-dessus, nous avons représenté le rotor, le moyeu du rotor d'une éolienne en partie orange, sur lequel est fixée une pale. Vu l'inclinaison de la pale, cet angle  $\alpha$  - c'est l'angle de calage -, on est plutôt prêts de l'axe du rotor. On voit verticalement le plan de rotation de l'éolienne et horizontalement son axe de rotation. Positionnons le vent. Le vent arrive perpendiculairement au plan de rotation, la pale tournant, l'éolienne tournant, elle crée son propre vent et génère une vitesse tangentielle qui est parallèle au plan de rotation.

La composante des deux qui s'appelle  $W$ , la vitesse apparente, c'est un angle avec l'axe du profil de  $i$ . Donc les filets qui passent au-dessus vont accélérer par rapport aux filets qui passent en dessous, générant ce qu'on appelle une force de portance qui est perpendiculaire à la direction du vent apparent,  $W$ . Dans l'axe du vent apparent, nous aurons une force de traînée, autrement dit, cet élément de pale va avoir tendance à partir dans ces deux directions-là, bien évidemment et partira dans la direction de la résultante. Cette résultante, si on la décompose sur l'axe de rotation, on va obtenir ce qu'on appelle la force de poussée. Il est assez logique, que si on souffle de la gauche, l'éolienne a tendance à tomber vers la droite. Cette force de poussée nous servira à calculer, à dimensionner le mat de l'éolienne. Cette résultante, si on la projette sur le plan de rotation, on a une force qui va faire tourner le rotor puisque c'est le seul degré de liberté qui lui est permis.

Au final cette force de rotation est engendrée par la portance et la traînée qui elle-même est engendrée par la vitesse du vent réel, en amont de l'éolienne. Il est intéressant d'introduire une notion de vitesse tangentielle. Essayons de calculer la vitesse à laquelle se déplace le bout de la pale. Supposons une éolienne qui ait une pale de 30 mètres de longueur. Si cette éolienne tournait à 1 tr/s, le bout de la pale décrirait un cercle dont le périmètre serait égal à  $2\pi R$ , soit environ 188 mètres. Cette distance serait parcourue en une seconde. Le bout de la pale se déplacerait à 188 m/s : c'est la vitesse tangentielle. Si on le convertit en kilomètres par heure, et bien il suffit de multiplier le résultat précédent par 3,6 et on obtient environ 680 km/h, ce qui est trop élevé, la pale risquerait de casser. Pour éviter cela, on limite volontairement la vitesse tangentielle en bout de pale de toutes les éoliennes à environ 300 km/h. En calcul inverse, on démontrerait qu'il faut que ce rotor tourne à une vitesse légèrement plus faible que précédemment, à environ 0,44 tr/s. Au final, la vitesse tangentielle, ce n'est autre que le périmètre multiplié par le nombre de tours.

### 3. Vitesse spécifique et qualification des éoliennes

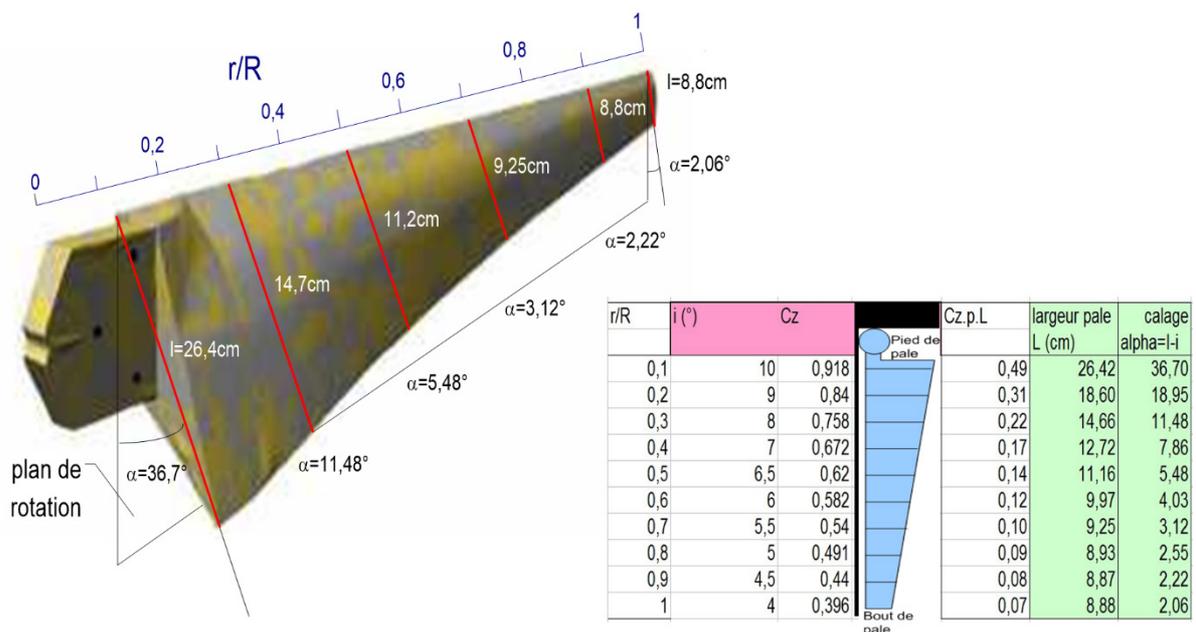
Cette vitesse tangentielle rapportée à la vitesse du vent va nous donner un coefficient que l'on appelle  $\lambda$ , qui, improprement, est nommé vitesse spécifique. Ce  $\lambda_0$ , en bout de pale, c'est la vitesse tangentielle en bout de pale,  $U_0$  divisée par la vitesse  $V_1$  qui est égal donc à :

$$\lambda = \frac{\text{Vit. tangentielle}}{\text{Vit. du vent}} \quad \lambda_0 = \frac{U_0}{V_1} = \frac{2\pi NR}{V_1}$$

Ce coefficient ou cette vitesse spécifique nous permet de classer nos éoliennes. Lorsque cette vitesse spécifique  $\lambda_0$  est inférieure à 3, on qualifie les éoliennes de lentes. S'il est supérieur à 3, on qualifie les éoliennes de rapides. Si une éolienne tripale a un  $\lambda_0$  voisin de 7, c'est-à-dire que le bout de la pale se déplace à 7 fois la vitesse du vent qui lui arrive dessus, on dira que c'est une éolienne rapide. Dans le cas d'une éolienne américaine, qui comporte beaucoup de pales, et bien le  $\lambda_0$  est de l'ordre de 1,5. Donc le bout de la pale se déplace à environ, à peu près la même vitesse que le vent qui lui arrive dessus. On qualifie donc cette éolienne de lente.

#### 4. Largeur des pales d'une éolienne

Essayons de calculer maintenant la pale d'une éolienne. On utilisera une théorie qui est simple, qui s'appelle la théorie simplifiée, qui permet à partir des deux relations qui s'affichent de calculer la largeur de la pale en fonction du rapport  $r/R$ . Autrement dit, nous allons décomposer notre pale en plusieurs sections et pour chacune des sections nous allons calculer sa largeur. C'est la première relation dans laquelle  $C_z$  est le coefficient de portance,  $P$  le nombre de pales et  $L$  est la largeur.  $\lambda_0$ , on a vu ce que c'était et  $r/R$  on le fera varier entre le pied de pale et le bout de la pale.



On peut également calculer l'angle d'inclinaison pour chacune de ces valeurs,  $r/R$  avec la relation 2. Pour cela, il faut bien évidemment choisir le type d'éolienne que l'on va fabriquer. Supposons que l'on veuille fabriquer une bipale, donc  $P = 2$ . Supposons que l'on veuille une éolienne de 1 mètre diamètre, on aura la valeur de  $R$  et on souhaiterait que cette éolienne, elle tourne à 18 tr/s pour un vent de 9 m/s. On pourra en déterminer facilement le  $\lambda_0$  qui vaut de l'ordre de 6,28. Voilà les données d'entrée. Ensuite nous allons choisir un profil. Ici c'est un profil symétrique, profile NACA 0012, classique. À partir de ce profil, nous obtenons avec une soufflerie aéraulique ou une soufflerie virtuelle sur Internet les coefficients de

portance  $C_x$  et  $C_z$ . Nous n'aurons besoin dans cette théorie-là que de la portance  $C_z$ . L'angle d'incidence va varier entre  $4$  et  $10^\circ$  dans la partie rouge de la courbe. À partir de là, avec un tableur simple ou une calculette, dans la première colonne nous avons représenté  $r/R$  qui va varier depuis  $0,1$ , jusqu'à  $1$ ,  $0,1$  étant le pied de pale et  $1$  étant le bout de pale. Nous allons y affecter les angles d'incidence  $i$  vus précédemment entre  $4$  et  $10^\circ$  et leur coefficient de portance respectifs. Donc à partir de ces trois colonnes, on peut calculer facilement en utilisant la relation 1, le produit  $C_z \times Pl$ , donc c'est la partie droite de l'équation 1 dans laquelle tout est connu sauf la valeur  $r/R$ . À partir de  $C_z.Pl$  puisque l'on connaît  $P = 2$  et que  $C_z$  se trouve dans la colonne 3, on peut calculer la largeur de la pale, ici dans ce cas-là, en centimètres, au niveau du pied de pale la largeur sera d'environ  $26$  cm et en bout de pale sera à peu près égale à  $9$  cm. Pour calculer l'angle de calage, il suffit de calculer  $I$  avec la relation 2, donc de faire varier  $r/R$  et à partir de  $I$  il suffit d'enlever  $i$  qui se trouve sur la ligne correspondante et nous aurons l'angle  $\alpha$  qui est l'angle d'inclinaison de la pale par rapport au plan du rotor. Donc nous voyons ici que l'angle varie entre  $36$  et  $2^\circ$ .

Au final, voilà la pale que nous avons calculée. Donc en bout de pale, la pale est plutôt effilée, en bout de pale elle est plus fine qu'au pied de pale et quand la pale tourne, le bout de pale tourne quasiment dans le plan de rotation et par contre est très fortement incliné en pied de pale. Voilà le résultat au final où on trouve exactement ce qu'on a calculé. Cette théorie simple ne fait pas intervenir le fait que lorsque le rotor tourne, la veine entre en rotation à l'arrière, ce qui consomme de l'énergie, en utilisant une autre théorie beaucoup plus complexe qu'on n'abordera pas dans cet exposé, qui est la théorie tourbillonnaire qu'utilisent les logiciels industriels.

## 5. Conclusion

En conclusion, nous classons les éoliennes en deux catégories, les éoliennes à axe horizontal :

- Les éoliennes lentes qui ont  $\lambda_0$  inférieur à trois, ce sont plutôt les éoliennes américaines ;
- Et lorsqu'on enlève des pales, bien évidemment, le rotor va tourner plus vite et on aura à faire à des éoliennes tripales ou monopales avec des éoliennes qui sont plutôt rapides.

Donc, d'une manière générale, les machines tourneront d'autant plus vite qu'elles seront légères.