



MOOC ÉNERGIES RENOUVELABLES

SEMAINE 3 : L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

Ce document contient les retranscriptions textuelles des vidéos proposées dans la partie « Qu'est-ce qui fait tourner les éoliennes ? » 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.

Notions d'aérodynamique

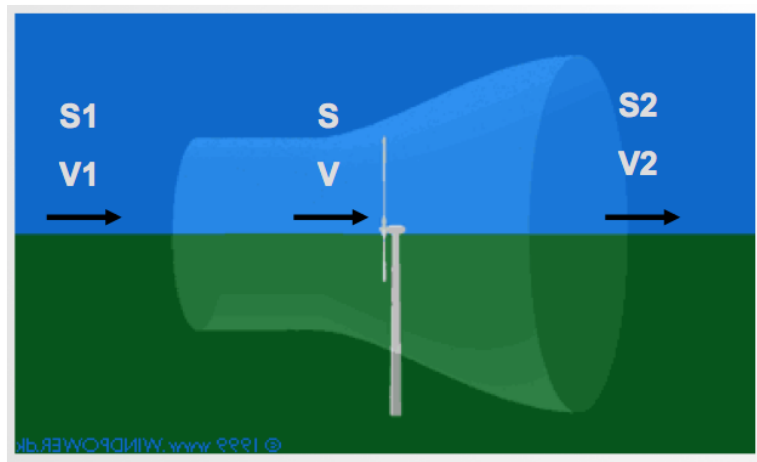
Jacky BRESSON

Professeur – Université de Perpignan Via Domitia

Dans cet exposé, nous poserons les bases de la théorie de Betz, parlerons de l'aile portante ainsi que de portance traînée et des notions de décrochage aérodynamique.

- ⇒ Alors, c'est le physicien allemand Albert Betz qui, en 1919, introduit la théorie qui permet de calculer la puissance de vent que l'éolienne intercepte.
- En effet, si l'on place un obstacle dans un écoulement d'air, cet obstacle va ralentir l'air, la vitesse du vent.
- Notamment - s'il s'agit d'une éolienne bien évidemment -, à l'arrière de l'éolienne, en aval, la vitesse du vent sera plus faible que la vitesse devant l'éolienne, en amont.
- Ainsi, la vitesse à l'arrière d'une éolienne, V_2 , sera donc comprise entre 0 et V_1 .
- ⇒ Alors, ces deux extrêmes sont impossibles, en effet si $V_2 = V_1$, ça suppose qu'il n'y a pas d'éolienne donc pas de puissance récupérée et si $V_2 = 0$, l'éolienne ne peut pas tourner donc puissance récupérée égal 0 aussi.

- ⇒ Donc toute la théorie de Betz consiste à trouver quelle est la valeur exacte du vent à l'arrière d'une éolienne qui permettra de récupérer la puissance maximum sur l'éolienne.



On peut remarquer également que du fait de la conservation du débit, le débit entrant égale le débit sortant c'est-à-dire que le produit $\rho S.V$ est constant tout le long, et bien le tube virtuel de vent augmente en surface depuis l'amont vers l'aval et a une forme de goulot de bouteille.

- ⇒ Donc la théorie de Betz indique que pour obtenir une puissance maximale au niveau du rotor, le vent en aval de l'éolienne, derrière l'éolienne, doit être égal au tiers de la vitesse en amont.
- ⇒ Bien évidemment, ce qui donne une puissance maximale d'environ $16/27^e$ de la puissance du vent qui est égale à 0,59 fois la puissance du vent.

➤ Autrement dit, cette puissance maximale est appelée puissance de Betz.

En fait, une éolienne parfaite et idéale ne pourra récupérer que 59 % de la puissance du vent.

Alors, en résumé, le vent en approche d'une éolienne ralentit depuis la valeur V_1 jusqu'au niveau de l'éolienne aux $2/3$ de V_1 et à l'arrière de l'éolienne sera parfaitement égal à un tiers de la vitesse en amont.

- ⇒ Ainsi on pourra récupérer la puissance maximale au niveau d'une éolienne idéale qui s'appelle la puissance de Betz qui est égale à 0,59 fois la puissance du vent.
- ⇒ Cette puissance du vent étant égale à un $1/2\rho S V_1^3$.
- ⇒ De la même façon, les surfaces augmentent progressivement depuis l'amont jusqu'à l'aval et on observe cet effet de goulot de bouteille.

Pour fixer les idées, nous avons tracé les puissances de vent et les puissances de Betz pour une surface d'un mètre carré avec une densité, une masse volumique de l'air de 1,25 pour plusieurs valeurs de la vitesse du vent.

- Ainsi, lorsque le vent évolue d'1 km/h à 100 km/h, on voit que la puissance de vent varie de quelques milliwatts à plus de 13 kW. Quant à la puissance de Betz, qui est égale à 0,59 fois la puissance de vent, et bien cette puissance va varier de quelques milliwatts à environ 8 kW qui pourra alimenter une habitation, à condition, je le répète que l'éolienne soit parfaite et que le vent souffle en permanence à 100 km/h.

Comparons maintenant une éolienne urbaine avec une éolienne de puissance. Pour un vent de 70 km/h, nous avons calculé la puissance de Betz, c'est-à-dire dans le cas où les deux éoliennes seraient parfaites.

- Ainsi une éolienne urbaine idéale d'un mètre carré de surface pourrait récupérer environ 2,7 kW.
- Dans le cas d'une éolienne de puissance parfaite, pour une longueur de pale de 30 mètres, donc une surface qui serait environ 2800 fois plus grande, la puissance de Betz sera de l'ordre de 7,8 MW. Ce qui permettrait d'alimenter plus de 1500 foyers.

Alors, posons-nous la question : qu'est-ce qui fait tourner les éoliennes ?

Il existe deux types d'éolienne :

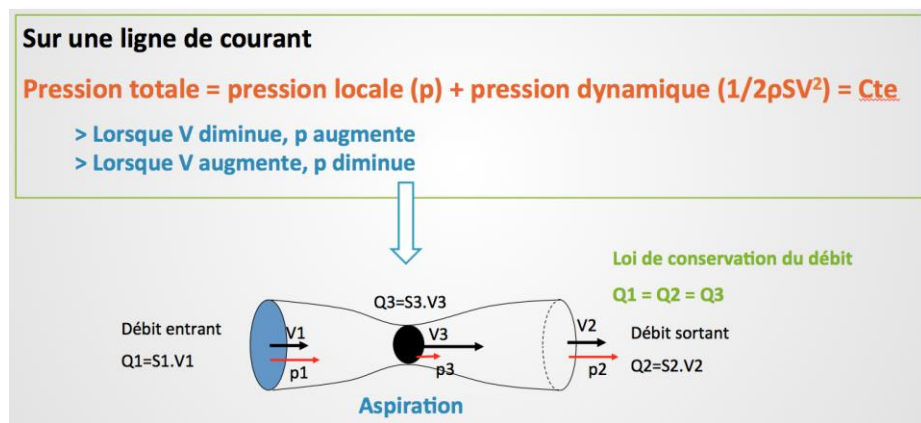
- Les éoliennes à axe horizontal ;
 - Et les éoliennes à axe vertical.
- Toutes les éoliennes à axe horizontal fonctionnent sur le principe de l'aile portante.
 - Quant à l'éolienne à axe vertical qui est la Darrius, elle fonctionne également sur ce même principe. Par contre, l'éolienne à axe vertical, la Savonius, fonctionne sur le principe de la traînée différentielle.



Avant d'expliquer la notion d'aile portante, attardons-nous sur la loi de conservation de débit et la loi de Bernoulli.

Dans un tuyau d'arrosage, la loi de conservation de débit nous dit que le produit section que multiplie la vitesse ($Q_1 = S_1.V_1$) est constante tout le long de ce tuyau. Si la section d'entrée égale la section de sortie, la vitesse d'entrée du liquide est égale à la vitesse de sortie du liquide. Si on pince maintenant ce tuyau son milieu, on va réduire sa section donc augmenter sa vitesse. Que nous dit la loi de Bernoulli ?

- Et bien, elle nous dit que sur une ligne de courant en tout point, la pression totale est constante.
 - ⇒ La pression totale n'est autre que la somme de la pression locale p et la pression dynamique $1/2\rho SV^2$.
 - ⇒ Cette somme étant constante, on peut approximer que $p +$ la vitesse est constant.
 - ⇒ Ainsi, si la vitesse localement augmente, la pression diminue.



- Ainsi, à notre rétrécissement, il va y avoir une dépression.
 - ⇒ C'est ce principe qu'utilise le tube de Venturi qui consiste en un tube au milieu duquel il y a un rétrécissement, la vitesse du fluide va accélérer en présence de ce rétrécissement et il va naître en son milieu une dépression. Pour peu qu'il y ait un petit trou à endroit-là, et bien il va y avoir aspiration.

Quelques applications domestiques qui font apparaître la loi de Bernoulli :

- C'est le principe d'un vaporisateur de parfum où lorsqu'on appuie sur la poire, la vitesse dans le conduit horizontal augmente, d'où une dépression qui fait monter le liquide dans le tuyau.
- On retrouve cette même loi dans un extracteur statique de cheminée où, dû à sa forme, on a procédé à un rétrécissement en son centre et le vent soufflant dans ce

conduit, va accélérer en son centre et créer une dépression qui va aspirer les gaz de fumée.

- Nous retrouvons cela lorsqu'on prend une douche d'eau chaude, localement la vitesse augmente et la dépression fait coller le rideau à la personne qui se douche.
- On peut retrouver ça sous une autre forme, un petit exercice qui s'appelle l'effet Coanda. A partir d'une cuillère, si l'on pousse une petite cuillère, la partie bombée, dans un jet d'eau, on s'aperçoit que dû à sa forme bombée, la vitesse localement va augmenter et il va se créer une dépression qui va maintenir cette petite cuillère dans le jet d'eau.

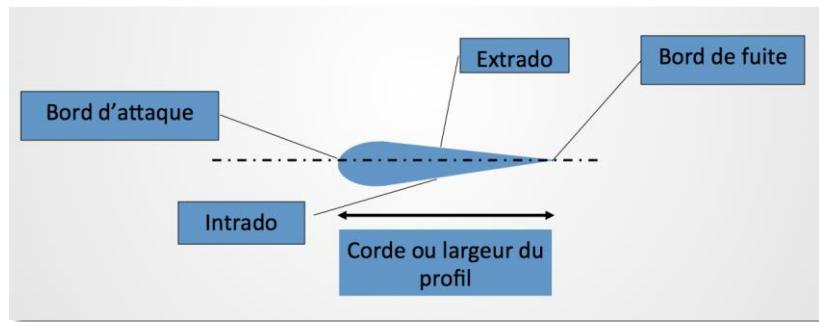
Alors, si maintenant on utilise une pale d'avion et si nous avons interposé une section dissymétrique dans un écoulement, on s'aperçoit que la présence de cette pale d'avion - ou pale d'éolienne -, va perturber l'écoulement et localement la vitesse au-dessus de cette pale va augmenter à cause de la conservation de débit et donc la pression va diminuer.

On peut l'expliquer d'une autre manière, supposons deux molécules d'air qui se présentent sur le bord d'attaque de cette aile d'avion, bien évidemment celle qui va passer par le dessus doit parcourir un trajet plus grand et donc ira plus vite que celle qui passe en dessous pour se retrouver en même temps à la sortie.

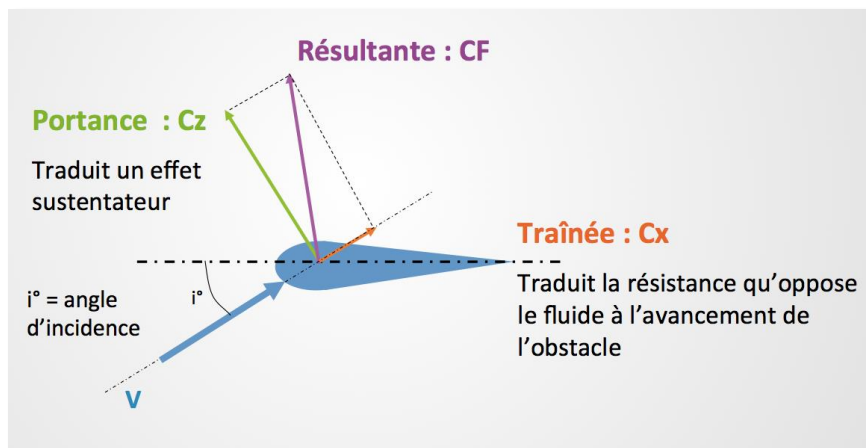
- ⇒ Donc localement, il y a augmentation de vitesse sur le dessus d'une aile d'avion et une dépression. Cette dépression aura tendance à aspirer le profil de l'aile vers le haut. C'est ce qui fait décoller l'avion.
- ⇒ Donc on voit notamment que les forces de dépression au-dessus de l'aile sont plus grandes que les forces de surpression en dessous.

Alors, quelques notions à savoir dans un profil :

- Le bord d'attaque c'est la partie qui se trouve face au vent.
- Le bord de fuite, c'est l'autre côté, bien évidemment.
- La distance entre bord d'attaque et bord de fuite, c'est la largeur de la pale, appelée corde.
- Le dessus s'appellera extrados.
- Le dessous intrados.



Supposons maintenant qu'un vent arrive avec une certaine incidence i par rapport à l'axe du profil. Les filets d'air passant au-dessus vont accélérer par rapport à ceux qui passent en dessous, donc créer une dépression et vont générer ce qu'on appelle une force de portance, de coefficient de portance C_z , qui traduit l'effet sustentateur qui va aspirer le profil dans cette direction.



Lorsqu'on déplace un objet dans l'air, cet air s'oppose à son déplacement et crée dans la même direction que le vent une force de traînée qui a un coefficient de traînée qui s'appelle C_x .

Dans le cas où le profil est symétrique, ce qui est le cas, on voit que si i égale zéro, et bien les deux trajets supérieurs et inférieurs étant les mêmes, les dépressions sont identiques des deux côtés et donc cette force de portance et de traînée, notamment la force de portance est nulle.

⇒ Autrement dit ces deux coefficients varient avec l'angle d'incidence.

On peut retrouver cela sur le graphique suivant. Comment l'obtenir ?

⇒ On utilise soit des souffleries aérodynamiques soit des souffleries virtuelles sur Internet.

On voit bien que lorsque dans ce cas-là :

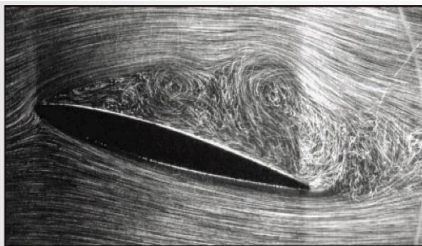
- l'angle d'incidence égale zéro, la portance est nulle et la traînée est très faible ;

- lorsque l'angle d'incidence augmente, la portance augmente, la traînée légèrement ;
- et arrivé à un certain angle d'incidence qui est commun à peu près à tous les profils entre 10 et 12°, la portance brusquement chute et la traînée augmente très fortement.

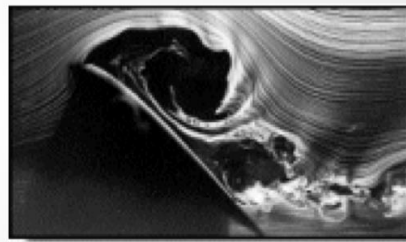
Ceci est dû au décollement des couches limites au-dessus du profil, entraînant d'ailleurs des vortex.

- ⇒ C'est très préjudiciable pour un avion qui atteint cet angle d'incidence puisque l'avion tombe.
- ⇒ Par contre, dans le cas de l'éolienne, on utilisera cette propriété pour ralentir le rotor de l'éolienne.

On voit donc sur ces figures et pour terminer, les remous qu'il y a au-dessus d'une pale d'éolienne ou d'une pale d'avion à l'approche du décrochage, figure de gauche - photo de gauche, photo de droite, des vortex très importants lorsqu'on est au-delà de l'angle de décrochage.



Décollement de la couche limite à l'approche du décrochage.



Puissant tourbillon de retour lors d'un décrochage dynamique (photo ONERA)

Les éoliennes à axe horizontal

Jacky BRESSON

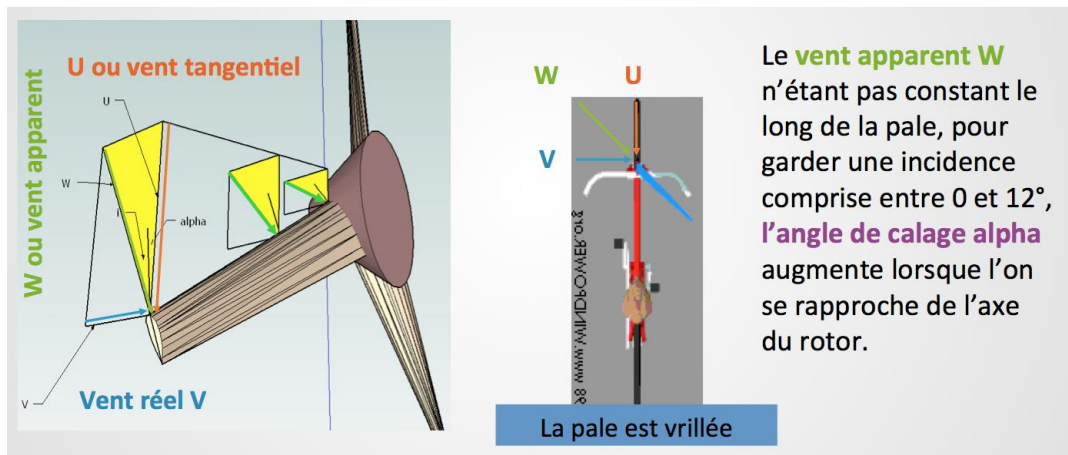
Université de Perpignan Via Domitia

Dans cette vidéo, nous parlerons essentiellement des éoliennes à axe horizontal. Nous aborderons les notions d'aérodynamique de la pale ainsi que les forces en jeu. Nous vous introduirons la notion de vitesse tangentielle et de vitesse spécifique et terminerons par un calcul d'une pale vrillée.

Alors les éoliennes à axe horizontal, comme l'indique leur nom, l'axe est parallèle à la direction du vent.

- Ainsi nous voyons sur la photo des tripales ou une éolienne américaine.

Alors, à l'inverse d'une pale d'avion qui voit arriver le vent dans la même direction tout le long du bord d'attaque, de son profil, dans le cas d'une éolienne, la pale tourne autour d'un axe de rotation. Donc c'est légèrement plus compliqué pour essayer d'expliquer ce phénomène.



- 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 .

- 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.

- Bien évidemment, 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.

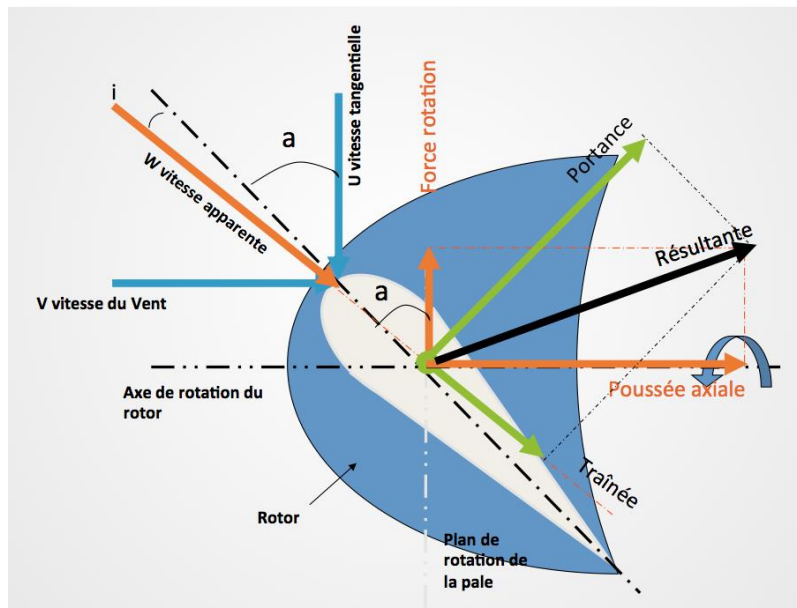
Pour quelle raison ?

- 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.
- Donc son amplitude varie 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° 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.

Alors, essayons de voir les forces en jeu qui font tourner l'éolienne.

- Ici 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 α - 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 .
- Et 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.

Alors, il est intéressant d'introduire une notion de vitesse tangentielle. Essayons de calculer la vitesse à laquelle se déplace le bout de la pale.

Alors, supposons une éolienne qui ait une pale de 30 mètres de longueur, si cette éolienne, cette même éolienne tournait à 1 tr/s, le bout de la pale décrirait un cercle, donc décrirait le périmètre, autrement dit qui est égal $2\pi R$, soit environ 188 mètres.

⇒ Cette distance parcourue en une seconde, et bien le bout de la pale se déplacerait à 188 m/s, c'est ça la vitesse tangentielle.

Soit, 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.

Donc pour éviter cela, on limite volontairement la vitesse tangentielle en bout de pale de toutes les éoliennes à environ 300 km/h. Donc en calcul inverse, on démontrerait qu'il faut que ce rotor tourne à une vitesse légèrement plus faible que précédemment, donc devrait tourner à 0,44 tr/s.

⇒ Au final, la vitesse tangentielle, ce n'est autre que le périmètre multiplié par le nombre de tours.

Alors cette vitesse tangentielle rapportée à la vitesse du vent en amont, l'éolienne, va nous donner un coefficient que l'on appelle λ , qui, improprement est nommé vitesse spécifique.

Donc ce λ_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

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

Alors ce coefficient ou cette vitesse spécifique nous permet de classer nos éoliennes :

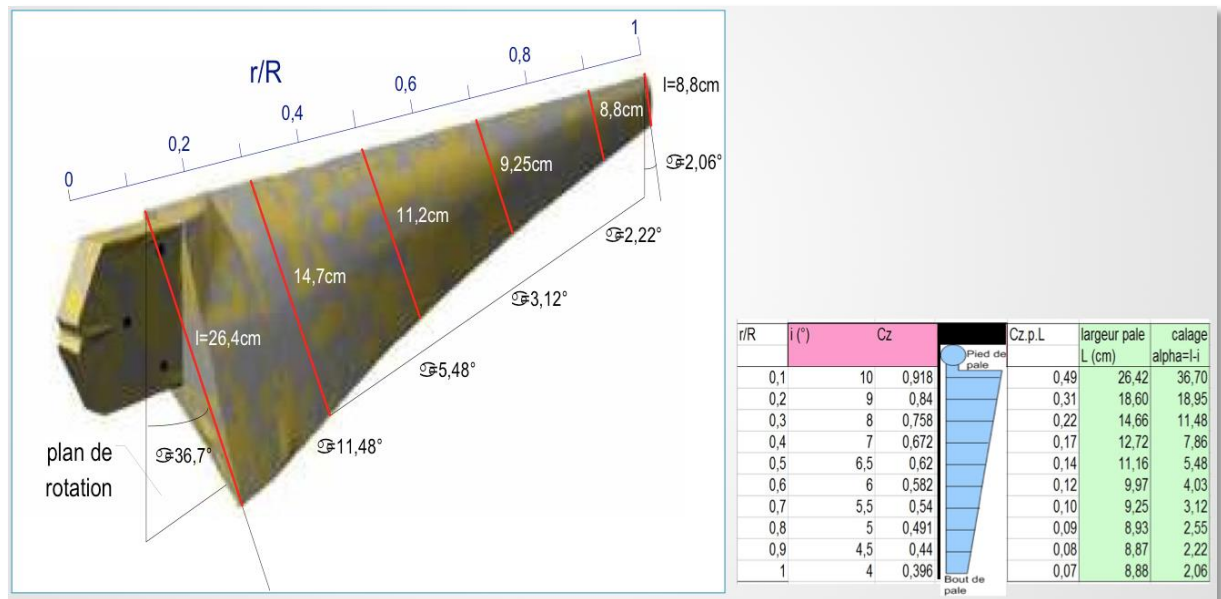
- Lorsque cette vitesse spécifique λ_0 est inférieure à 3, on qualifiera les éoliennes de lentes.
- S'il est supérieur à 3, on qualifiera les éoliennes de rapides ;
- Et si une éolienne tripale a λ_0 voisin de 7, c'est-à-dire que le bout de la pale se déplace à 7 fois la vitesse du vent qui lui arrive dessus, on dira que c'est une éolienne rapide.
- Dans le cas d'une éolienne américaine, qui comporte beaucoup de pales, et bien le λ_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.

⇒ Donc on qualifiera cette éolienne d'une éolienne lente.

Alors 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. λ_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.
- Donc, 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 λ_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 .
- Donc l'angle d'incidence va varier entre 4 et 10° 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° 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 α 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° .

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.

Alors, 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.

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

- Les éoliennes lentes qui ont λ_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.

Essais en soufflerie : vrillage d'une pale d'éolienne

Jacky BRESSON

Professeur – Université de Perpignan Via Domitia

& Didier DUCLOS

Professeur agrégé – Université de Perpignan Via Domitia

Voici l'une des trois pales fixes d'une éolienne à action horizontale soumise à un vent qui provient de cette direction-là. Cette pale va tourner autour de son axe de rotation matérialisé par cette baguette et se déplacer dans le plan de rotation dans cette direction-là.

Cette pale reçoit deux vents, un vent qui est le vent réel, qui est matérialisé par la flèche bleue, qui va être constant tout le long de la pale et vent tangentiel, qu'elle crée en tournant.

L'extrémité se déplaçant plus rapidement que le pied de pale, le vent tangentiel ici matérialisé par la flèche orange va être plus important en bout de pale qu'en pied de pale.

Ainsi, chaque élément de pale va recevoir non pas deux vitesses de vent mais une seule qui est la composante des deux, matérialisée par la flèche verte qui est le vent apparent.

Ce vent apparent est en bout de pale, plutôt dans le plan de rotation, alors qu'en pied de pale, ce vent apparent est plutôt proche du vent réel, c'est-à-dire perpendiculaire au plan de rotation.

Pour qu'il y ait de la portance, il faut que le profil de pale, l'axe du profil de pale soit quasiment dans la direction du vent apparent.

Ainsi, en bout de pale, ce profil de pale est quasiment dans le plan de rotation – pour suivre le vent apparent -, alors qu'en pied de pale, ce profil est fortement incliné vers l'avant pour suivre le vent apparent ici.

La pale est donc vrillée, ce qui permet d'obtenir des caractéristiques optimales de fonctionnement, ce que nous allons voir dans la petite expérimentation qui va suivre.

Voici une expérimentation qui permet de démontrer le bon vrillage d'une éolienne.

Elle est composée donc d'une mini soufflerie qui permet de souffler un vent sur une petite éolienne rabattable ou qui permet donc le vrillage des pales et on récupère les données sur un ordinateur qui nous permet de visualiser l'indice de performance de l'éolienne.



Alors, nous allons faire trois types de vrillages différents :

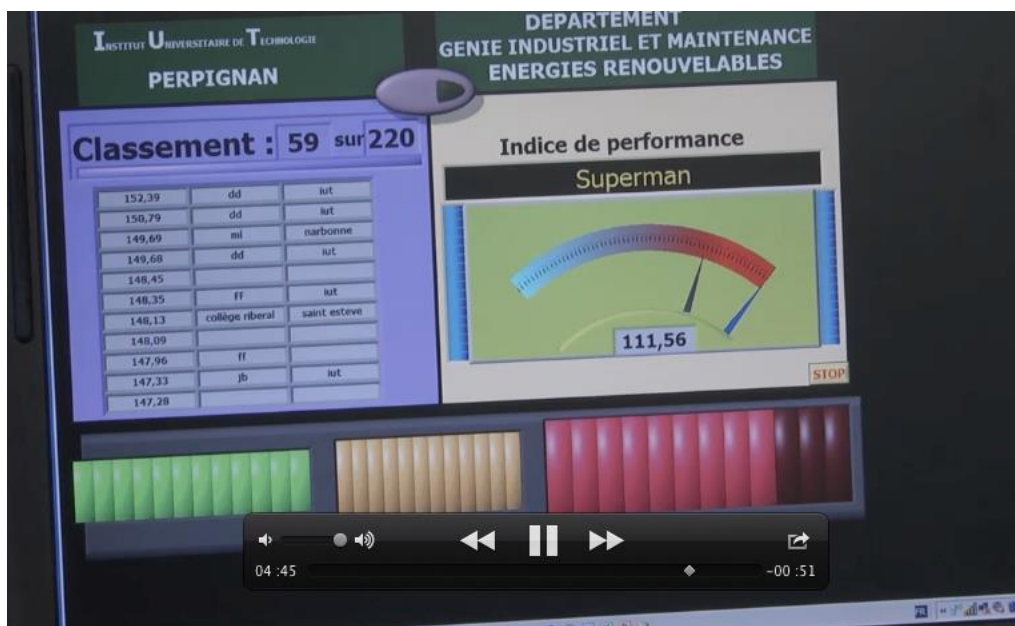
- Un premier vrillage avec un vrillage à zéro ;
 - Ensuite on fera un vrillage régulier sur toute la longueur de la pale ;
 - Et enfin, on fera un vrillage optimum qui permettra de récupérer un indice de performance maximale.
- Alors, dans un premier temps donc nous avons les pales qui ont une incidence à 0° et si nous lançons la soufflerie, on constate que l'éolienne ne démarre pas.
 - Nous allons maintenant réaliser un vrillage régulier sur toute la longueur de la pale.

Alors, que constate-t-on ?

- ⇒ On constate que l'éolienne se met à tourner mais qu'on a un indice de performance qui est très faible, qui est très en dessous du réglage optimum de la pale que nous allons donc effectuer maintenant.
- Alors, le réglage optimum, il est fait de telle façon qu'en bout de pale, nous avons l'angle d'incidence qui est très proche du plan de rotation et en pied de pale, on a un angle élevé.

Donc nous allons vriller nos pales de façon optimum. Et nous allons donc lancer l'expérimentation.

Donc que constate-t-on ?



⇒ On constate que nous avons un indice de performance maximum, ce qui permet de démontrer que le vrillage optimum d'une pale permet de récupérer un maximum d'indice de performance et un maximum d'énergie.

Les éoliennes à axe vertical

Jacky BRESSON

Professeur – Université de Perpignan Via Domitia

Au cours de cet exposé, nous parlerons des éoliennes à axe vertical, notamment des éoliennes Savonius et des éoliennes Darrieus.

Alors, toutes les éoliennes à axe vertical tournent autour d'un axe qui est perpendiculaire à la direction du vent donc elles doivent, quelle que soit cette direction, être est plutôt dans des vents tourbillonnants, autrement dit dans des zones plutôt urbaines.

- Alors, l'éolienne Savonius, sur la photo de gauche, est plutôt une éolienne lente et qui utilise le principe de la traînée différentielle.
- Quant à l'éolienne à Darrieus qui est une éolienne rapide, elle fonctionnera sur le principe de l'aile portante.

Donc nous allons parler des éoliennes à traînée différentielle de type Savonius. Autrement dit, ces éoliennes utilisent la traînée différentielle.

Alors, à quoi correspond ce coefficient de traînée qui s'appelle C_x ?

- Si nous déplaçons des objets dans l'air, ce déplacement sera d'autant plus facile que l'objet est aérodynamique.
- Ainsi, lorsque nous déplaçons une barre infiniment longue qui a une section circulaire, l'effort accompli est plus grand que si cette même section est plutôt aplatie, ovoïde ou plutôt aplatie comme un frisbee.
- ⇒ Ainsi, le coefficient C_x sera d'autant plus faible que la forme sera aérodynamique et dans ce cas présent, pour un cercle, on aura 1,2 ; 0,46 pour une forme ovoïde et 0,2 pour une forme complètement aplatie.
- ⇒ Pour fixer les idées, une goutte d'eau a un C_x de l'ordre de 0,05 et une voiture de collection de style DS aurait un C_x de 0,31.
- ⇒ Pour gagner des records, bien évidemment, il faut que l'objet ou la voiture soit aérodynamique. Nous présentons ici une voiture qui a battu un record de vitesse, qui avait un C_x de 0,17.



- Goutte d'eau : $C_x = 0,05$
- Coccinelle (Volkswagen) : $C_x = 0,46$
- Austin Mini : $C_x = 0,42$
- Citroën DS : $C_x = 0,31$
- Porsche 911 Turbo : $C_x = 0,31$



voiture JCB DIESELMAX
qui a battu le record du
monde de vitesse
 $C_x=0,174$

Barres infiniment longues, de sections différentes										
vent →										
	1,20	0,46	0,2	2	0	2	1,6	2	1,6	

	Demi-cylindre infiniment long		Demi-sphère creuse		Demi-sphère pleine	
vent →						
	2,3	1,20	1,43	0,38	1,17	0,42

On retrouve le même ordre de grandeur pour les objets de sections carrées différentes et si on s'attarde sur le cas de demi-cylindres, à partir d'un tube, si l'on découpe un tube en deux, la partie concave présentée face au vent aura une traînée plus grande - coefficient $C_x = 2,3$ -, que la partie convexe.

De la même façon, si on prend une balle de ping-pong que l'on coupe en deux, la demi-sphère creuse face concave présentée vers l'avant aura un coefficient C_x de l'ordre de 1,43 et la force convexe plus aérodynamique c'est 0,38. Même chose pour les deux hémisphères pleins.

Ainsi, pour fabriquer une éolienne de type Savonius, il suffit de prendre deux formes complémentaires que l'on associera entre elles et on voit bien que le système va rentrer en rotation puisque la forme supérieure a un C_x plus faible que la forme inférieure.

⇒ Ainsi, l'ensemble tournera et on aura fabriqué une éolienne à traînée différentielle de type Savonius.

Donc ce rotor Savonius a été inventé par l'ingénieur finlandais Sigurd Savonius en 1924 et consiste simplement, à partir de deux demi tubes reliés entre eux, ce système peut tourner autour de son axe.

Si maintenant on laisse un léger espace entre ces deux demi-tubes, on facilite le passage des filets d'air et on aura un meilleur rendement.

Or, c'est ce qu'on peut voir sur la courbe de droite où, en fonction du λ_0 , qui est la vitesse spécifique, nous avons tracé le coefficient de puissance, ce coefficient de puissance correspond au pourcentage de puissance de vent que l'éolienne pourra exploiter.

- ⇒ Nous avons un réseau de courbes et la meilleure courbe est obtenue lorsque le rapport $e/d = 1/6$.
- ⇒ On voit que ce coefficient de puissance se porte au maximum autour de $\lambda_0 = 1$.
- ⇒ λ_0 correspond au rapport de la vitesse tangentielle, c'est-à-dire la vitesse à laquelle se déplace l'extrémité de la pale par rapport à la vitesse du vent.
- ⇒ Ainsi, dans ce cas-là il s'agit d'une éolienne lente puisque λ_0 est inférieur à trois et le bout de la pale se déplacera environ à la même vitesse que le vent qui arrive sur cette éolienne.

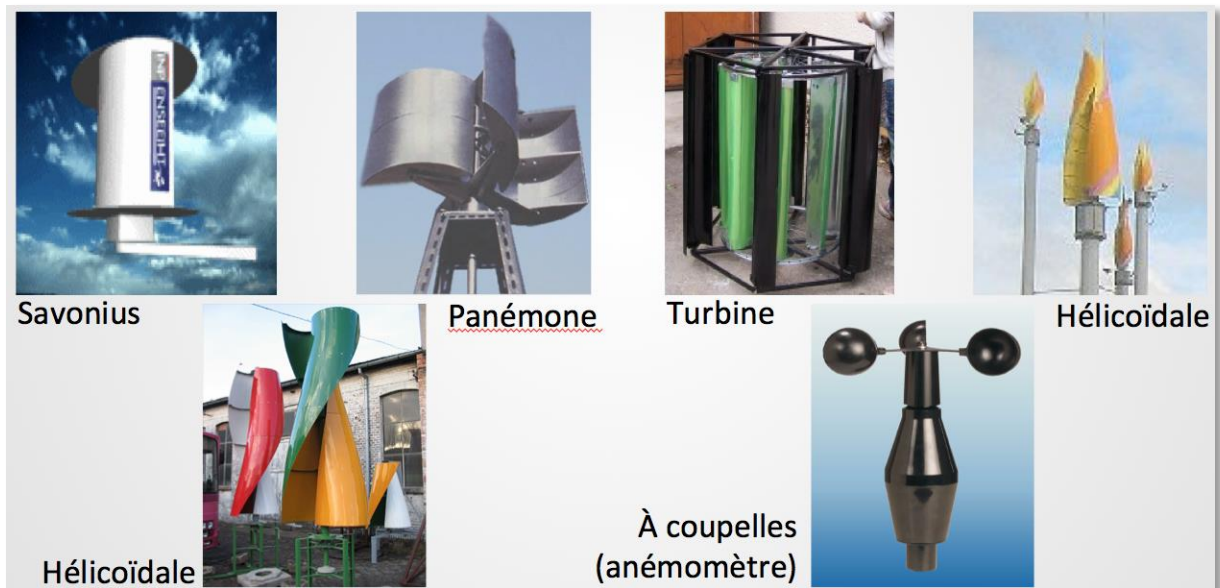
L'avantage d'un rotor Savonius, c'est qu'il tourne quelle que soit la direction du vent, bien que pour une direction privilégiée comme on le voit sur la courbe, c'est lorsque que l'une des formes masque l'autre, il y a ce qu'on appelle un couple négatif.

- ⇒ L'éolienne aurait tendance à inverser son sens de rotation, ce qui risque de poser un problème en fonction de ce qui est fixé sur son axe bien évidemment

Pour éviter cela, la façon la plus simple c'est de positionner deux éoliennes Savonius, superposer deux éoliennes Savonius décalées de 90° ou de vriller le rotor. C'est ce qui se fait habituellement, d'une part c'est plus esthétique mais c'est surtout pour combattre ce couple négatif et être sûr qu'elle va démarrer quelle que soit la direction du vent.

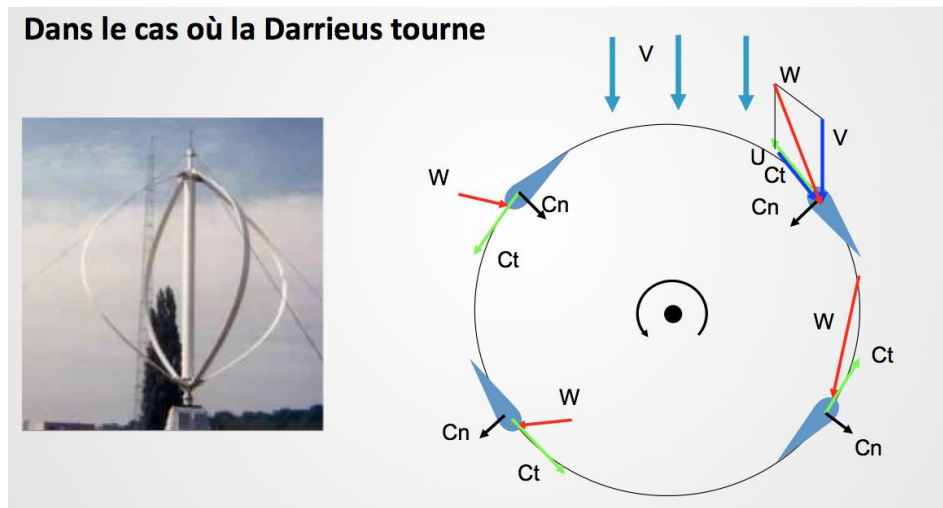
Ici, sont représentés quelques types d'éoliennes :

- La Savonius classique à gauche ;
- Ensuite la Panémone, qui est une Savonius dont les pales peuvent se refermer pour protéger l'éolienne en cas de vents forts ;
- L'éolienne turbine qui utilise un stator à l'extérieur, les pales noires, qui vont dévier le vent vers l'intérieur qu'est le rotor ;
- Deux éoliennes hélicoïdales pour les raisons que l'on a évoquées précédemment, pour combattre le couple négatif ;
- Et enfin, une éolienne qui n'est autre qu'un anémomètre à coupelles qui bien évidemment est une Savonius à traînée différentielle.



Voyons maintenant le cas de l'éolienne rapide de type Darrieus.

- La photo présentée ici est une Darrieus cylindrique et nous avons représenté, vu de dessus, une des pales qui est reliée à son rotor.
- Supposons que le vent arrive avec une incidence i sur cette pale, les filets d'air passant au-dessus vont accélérer par rapport aux filets d'air passant en dessous créant au-dessus une dépression qui est la force de portance, C_z .
- Dans l'axe du vent, on aura la force de traînée C_x .
- ⇒ La pale aura tendance à partir dans la direction de la composante de ces deux forces.
- ⇒ Bien évidemment, comme elle est retenue par l'axe, on va décomposer cette même force sur deux axes :
 - l'axe normal à l'éolienne, on aura une composante C_n que l'on appellera la composante de poussée qui permettra notamment de calculer la résistance du tirant qui relie ce profil à l'axe de rotation.
 - Cette composante R , on peut la décomposer aussi sur l'axe tangentiel. On a une composante C_t et bien évidemment, c'est cette composante qui va entraîner le rotor en rotation.
- ⇒ En effet, le seul degré de liberté que peut présenter ce profil c'est de tourner autour de son axe de rotation.



Le problème de la Darrius, c'est que suivant la position de la pale, elle ne voit pas arriver le vent de la même direction.

- Alors, supposons que la Darrius tourne, et que le vent arrive d'une direction donnée, elle va créer elle-même son propre vent qui est le vent tangentiel, U , associé au vent V , on va obtenir le vent apparent W , et suivant la position du profil, ce vent W n'arrivera pas de la même direction.

En fait, on dit que le rotor tourne le vent ou enroule le vent qui lui arrive dessus.

À partir de ce vent V , va créer portance et traînée puis après décomposition sur l'axe normal et tangentiel, nous obtiendrons les deux composantes.

- En vert, la composante tangentielle ;
- Et en noir, la composante normale.

- ⇒ On peut le faire sur ces quatre positions différentes et on s'aperçoit que les composantes en vert ont tendance à faire tourner le rotor dans la direction indiquée en son centre et les composantes normales associées ont tendance à pousser le rotor dans la direction opposée du vent.

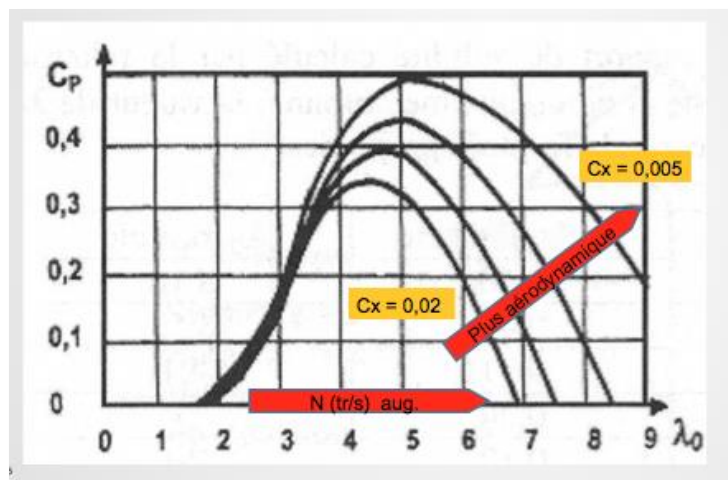
Pour une meilleure compréhension, nous avons utilisé une animation et on peut voir le résultat à droite de cette animation.

- ⇒ On peut remarquer que lorsque les pales passent face au vent ou sous le vent, en haut et en bas de la figure de droite, et bien on voit que la composante tangentielle augmente.
- ⇒ Par contre, lorsque la pale remonte ou descend le vent, on s'aperçoit que cette composante s'annule et même s'inverse. Autrement dit, la pale freine mais la somme de toutes ces forces est quand même dans le sens de rotation et entraîne l'éolienne en rotation et quant aux forces normales - vertes ici -, la somme de toutes ces forces va faire tomber l'éolienne dans la direction opposée de la direction du vent.

Alors, si on s'intéresse à l'influence du C_x de la pale par rapport à la puissance que l'on va récupérer, et bien, sur la courbe on voit qu'en abscisse, c'est-à-dire l'axe horizontal, on a λ_0 qui n'est autre que le rapport de la vitesse tangentielle sur la vitesse du vent en fonction du coefficient de puissance qui correspond au pourcentage de puissance que l'éolienne va pouvoir extraire du vent.

⇒ Ainsi une Darrieus peut exploiter entre 30 à 40 ou 50 % de la puissance du vent.

En fonction de son coefficient de traînée, C_x , lorsque le C_x diminue, autrement dit lorsque la pale devient plus aérodynamique, plus fine, et bien on s'aperçoit qu'elle tourne plus vite, le maximum se déplace plutôt vers la droite et on obtient un meilleur C_p .



Intéressons-nous maintenant au nombre de pales ou à la largeur de la pale.

➤ On s'aperçoit que c'est le produit $p.c$, on s'aperçoit que lorsque ce produit diminue, autrement dit lorsqu'il y a moins de pales ou les pales sont moins larges, autrement dit lorsque l'éolienne finalement est plus légère, elle tourne évidemment plus vite. Donc c'est ce qu'on voit sur la figure.

Au final, nous avons dit toute à l'heure que la Darrieus ne démarrerait pas, pour cela elle a besoin d'une assistance au démarrage. Alors il y a deux principes :

- Soit on inverse la génératrice qui est sous l'éolienne, on va la mettre en moteur pour lancer l'éolienne et ensuite, bien évidemment, il faudra la faire revenir en génératrice pour produire de l'énergie ;
- Soit on utilise des systèmes mécaniques comme un système à pales mobiles ou, la plupart du temps, on l'associe à une éolienne Savonius qui, elle, démarre le système tout seul.
- Ou encore, d'autres techniques, on utilise des becquets avant ou arrière, devant le bord d'attaque ou le bord de fuite, ce qui va permettre de démarrer l'éolienne.