



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.

Notions d'aérodynamique

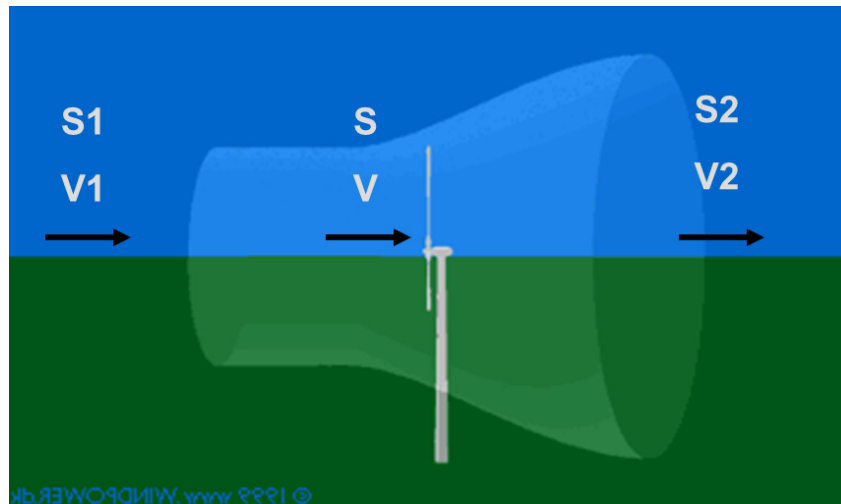
Jacky BRESSON

Professeur – Université de Perpignan Via Domitia

Nous allons poser les bases de la théorie de Betz et nous parlerons de l'aile portante, de portance traînée et des notions de décrochage aérodynamique.

1. Théorie de Betz

Le physicien allemand Albert Betz a, en 1919, introduit la théorie qui permet de calculer la puissance de vent que l'éolienne intercepte. 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, la vitesse du vent sera en aval de l'éolienne plus faible que la vitesse devant l'éolienne, en amont. Cette vitesse à l'arrière d'une éolienne V_2 sera donc comprise entre 0 et V_1 . Ces deux extrêmes sont impossibles. Si $V_2 = V_1$, ça suppose qu'il n'y a pas d'éolienne donc pas de puissance récupérée. Si $V_2 = 0$, l'éolienne ne peut pas tourner donc la puissance récupérée est égale à 0 aussi. 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 (figure ci-dessous).



On peut remarquer 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. Le tube virtuel de vent augmente en surface depuis l'amont vers l'aval et a une forme de goulot de bouteille. 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. Cela 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.

Une éolienne parfaite et idéale ne pourra récupérer que 59 % de la puissance du vent. 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 $1/2\rho SV_1^3$.

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. Cela pourra alimenter une habitation, à condition 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.

2. Aile portante

Qu'est-ce qui fait tourner les éoliennes ? Il existe deux types d'éolienne :

- les éoliennes à axe horizontal
- 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 Darrieus, elle fonctionne également sur ce même principe. Par contre, l'éolienne à axe vertical, la Savonius, fonctionne sur le principe de la traînée différentielle (figure ci-dessous).



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 ? 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

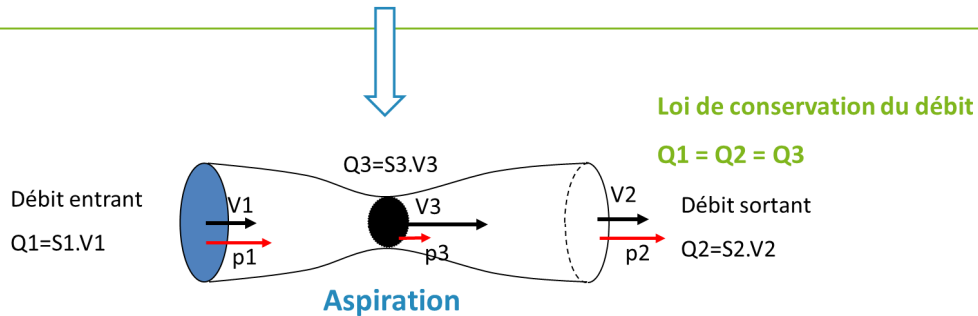
approximer que $p + \frac{1}{2}\rho V^2$ est constant. Ainsi, si la vitesse localement augmente, la pression diminue. Ainsi, à notre rétrécissement, il va y avoir une dépression.

Sur une ligne de courant

Pression totale = pression locale (p) + pression dynamique ($\frac{1}{2}\rho V^2$) = Cte

> Lorsque V diminue, p augmente

> Lorsque V augmente, p diminue

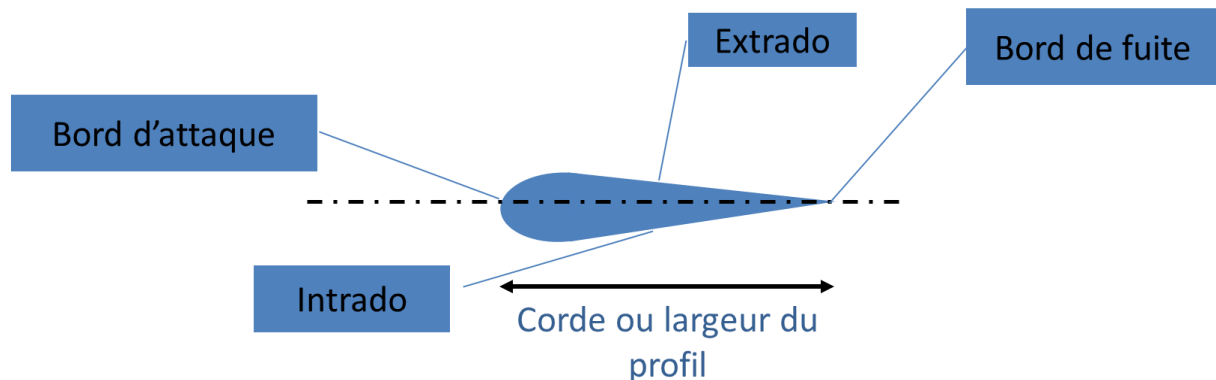


C'est ce principe qu'utilise le tube de Venturi qui consiste en un tube au milieu duquel il y a un rétrécissement, la vitesse du fluide va accélérer en présence de ce rétrécissement et il va naître en son milieu une dépression. Pour peu qu'il y ait un petit trou à endroit-là, et bien il va y avoir aspiration.

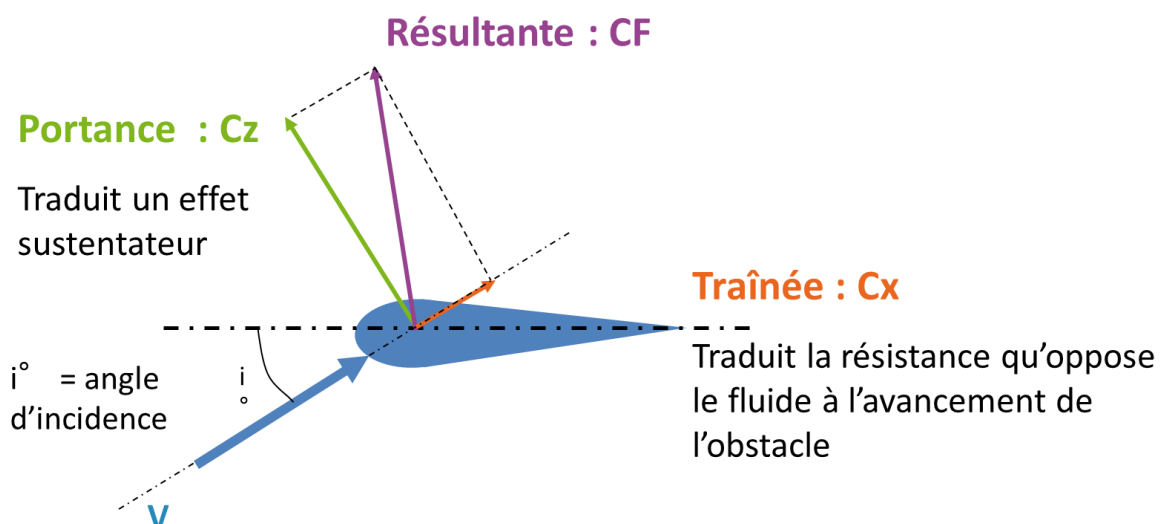
Il y a quelques applications domestiques qui font apparaître la loi de Bernoulli. C'est le principe d'un vaporisateur de parfum où lorsqu'on appuie sur la poire, la vitesse dans le conduit horizontal augmente, d'où une dépression qui fait monter le liquide dans le tuyau. On retrouve cette même loi dans 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. 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. Il y a donc localement une 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. On voit notamment que les forces de dépression au-dessus de l'aile sont plus grandes que les forces de surpression en dessous. Voici quelques notions à savoir dans un profil. Le bord d'attaque est la partie qui se trouve face au vent. Le bord de fuite 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 et le dessous intrados (figure ci-dessous).



Supposons 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. Ils vont 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 (figure ci-dessous).

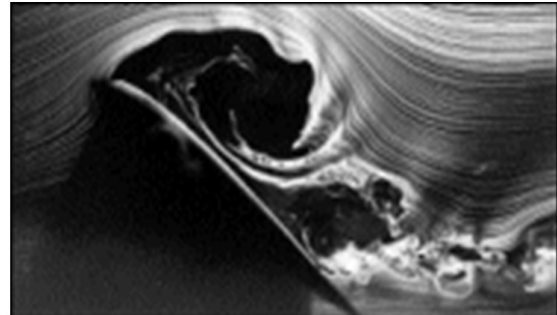


Lorsqu'on déplace un objet dans l'air, cet air s'oppose à son déplacement et crée dans la même direction que le vent une force de traînée qui a un coefficient de traînée qui s'appelle C_x . Dans le cas où le profil est symétrique, ce qui est le cas, on voit que si i égale zéro, et bien les deux trajets 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 aérauliques 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 ; 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 sur les figures ci-dessous les remous qu'il y a au-dessus d'une pale d'éolienne ou d'une pale d'avion à l'approche du décrochage.



Décollement de la couche limite à l'approche du décrochage



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