

Modélisation aérodynamique des turbines éoliennes

Bruno FRANCOIS

Master (Recherche) Sciences et Technologies

Mention : « Automatique et Systèmes Electriques

Spécialité : Energie Électrique et Développement Durable (E2D2)

Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance : L2EP



Merci à

Marc RAPIN, ONERA DDSS (Structural Dynamics and Coupled Systems)

Et

Alain CHAUVIN

pour leur relecture

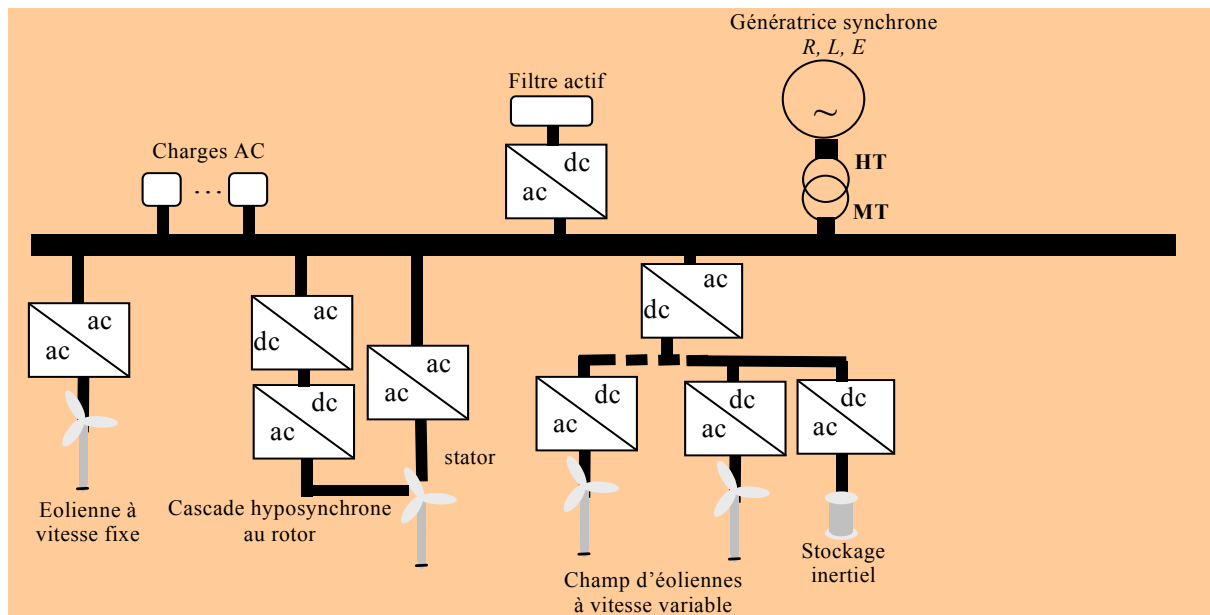
Modélisation aérodynamique des turbines éoliennes

Plan

- * Contexte
- * Forces
- * Paramètres caractéristiques d'une pale
- * Principes physiques
- * Modélisation mathématique
- * Simplifications usuellement admises
- * Influence du profil d'une pale
- * Contrôle du couple

Contexte

Plusieurs technologies d'éoliennes sont installées sur les réseaux électriques



La caractéristique essentielle pour chaque technologie est la façon dont est produite la puissance

Pour les éolienne à vitesse fixe, cela dépend directement des paramètres de la turbine.

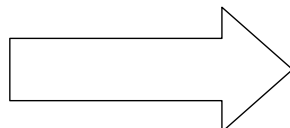
Lesquels comment ?

Force : Action, Réaction

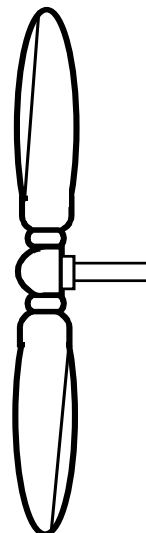
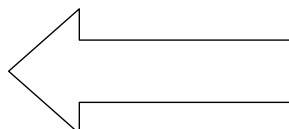
Les pales d'une turbine éolienne :
extraient de la puissance du vent et
ralentissent ce vent.

Cela est réalisé en considérant une force produite par le vent sur la pale et une force produite par la pale sur le vent (effet ventilateur !)

Le vent applique une force sur la pale



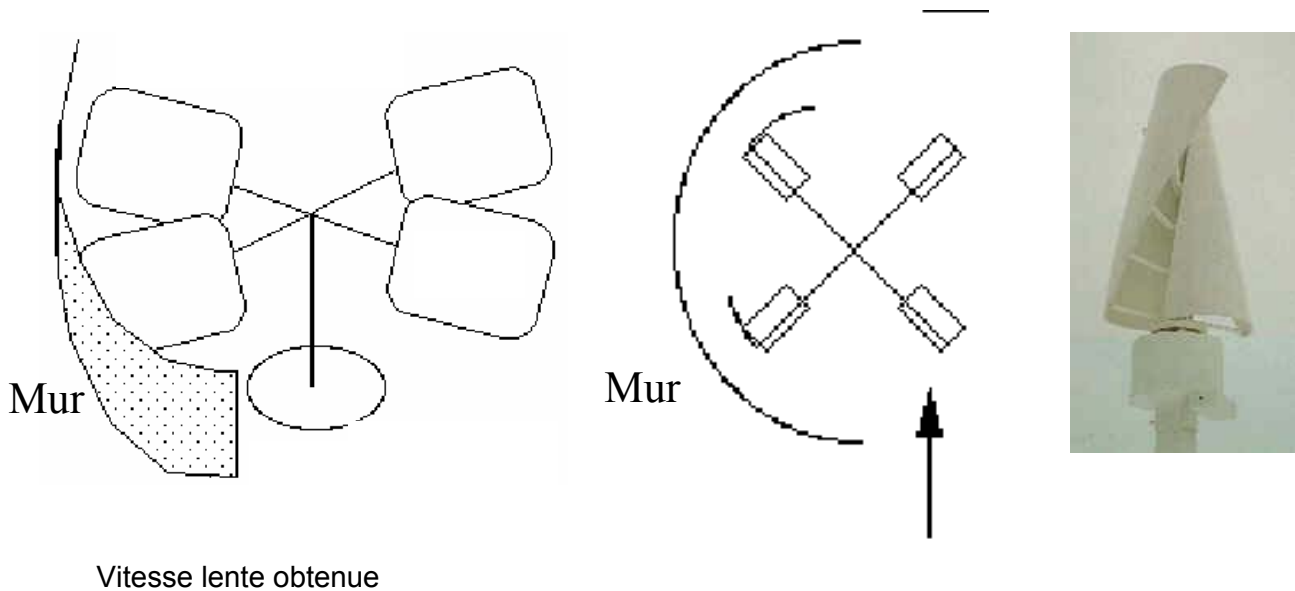
La pale applique une force sur « le vent »



Forces

Les objets présents dans le flux d'air sont entraînés par une force de résistance à l'avancement appelée « drag force ».

Cette force a été utilisée par les premières turbines éoliennes dites verticales.

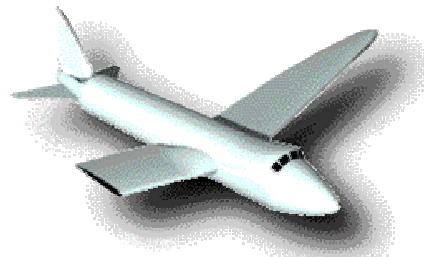


Forces

En fait une deuxième force « ascensorielle » apparaît appelée **Lift force** qui est **toujours orientée orthogonalement** à la direction du vent

La force de résistance à l'avancement (Drag force) est la force produite par le vent dans la direction du vent .

Exemple :



© 1998 www.WINDPOWER.org

La raison pour laquelle un avion peut voler est que l'air glissant le long de la partie supérieure de l'aile se déplace plus rapidement que sur la partie inférieure.



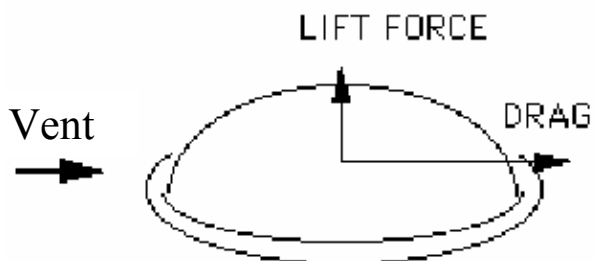
© 1998 www.WINDPOWER.dk

Ceci signifie que la pression sera la plus basse sur la partie inférieure. Ceci crée une force ascensorielle, c.-à-d. la force tirant vers le haut qui permet à l'avion de voler. La force ascensorielle est perpendiculaire à la direction du vent.

En fait une deuxième force « ascensorielle » apparaît

appelée **Lift force**

qui est **toujours orientée orthogonalement** à la direction du vent



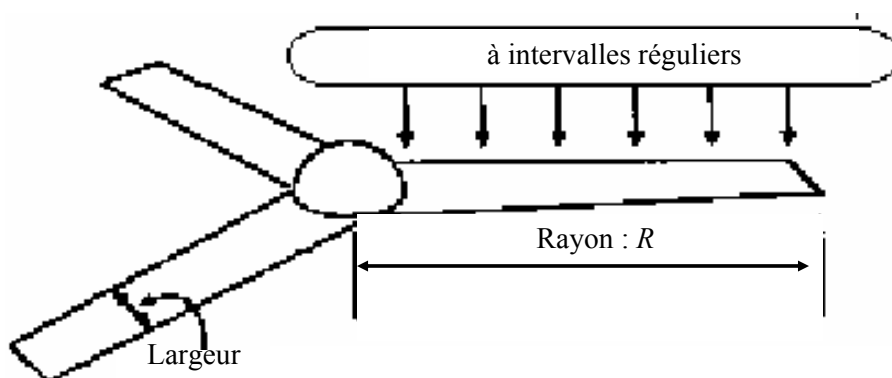
Principe inverse : On applique une « Lift force », on fait tourner des pales ...
Ventilateur, Hélicoptère



Paramètres caractéristiques d'une pale

Pour concevoir une pale, il faut spécifier :

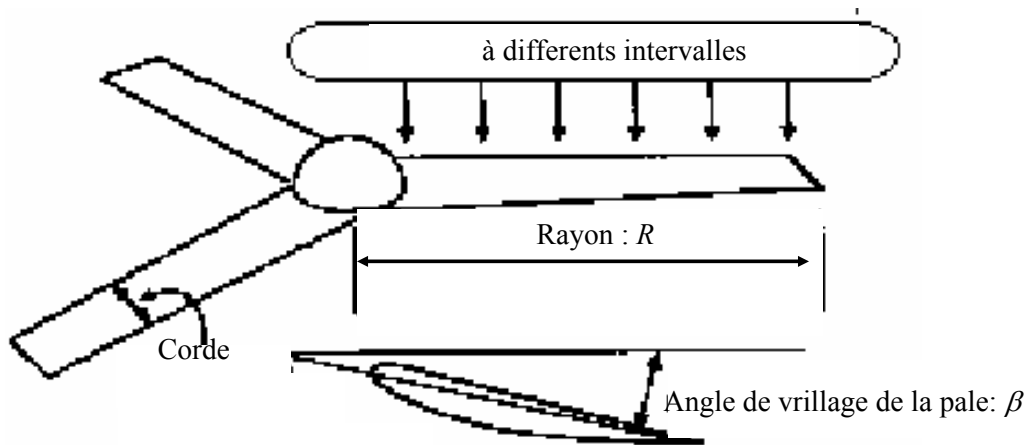
- sa largeur ainsi que



Paramètres caractéristiques d'une pale

Pour concevoir la forme en plan d'une pale, il faut spécifier en différentes sections :

- sa corde, le profil utilise ainsi que
- l'angle de vrillage (β)

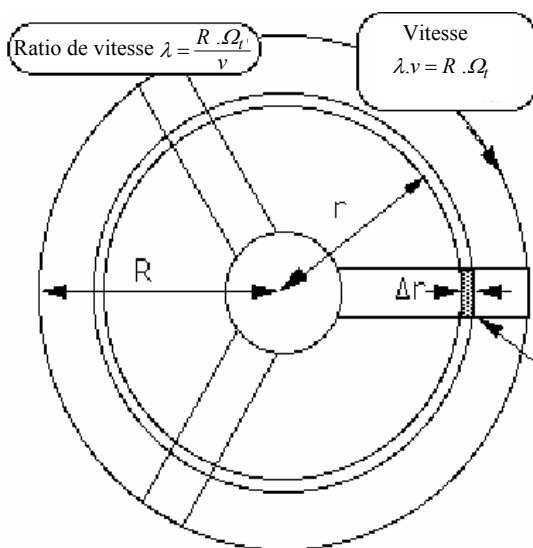


A chaque intervalle, on crée ainsi une forme particulière qui produira la « lift force » suite à l'application d'une composante du vent

Élément finis

Paramètres caractéristiques d'une pale

Élément d'une pale



La partie de la pale à un niveau r :

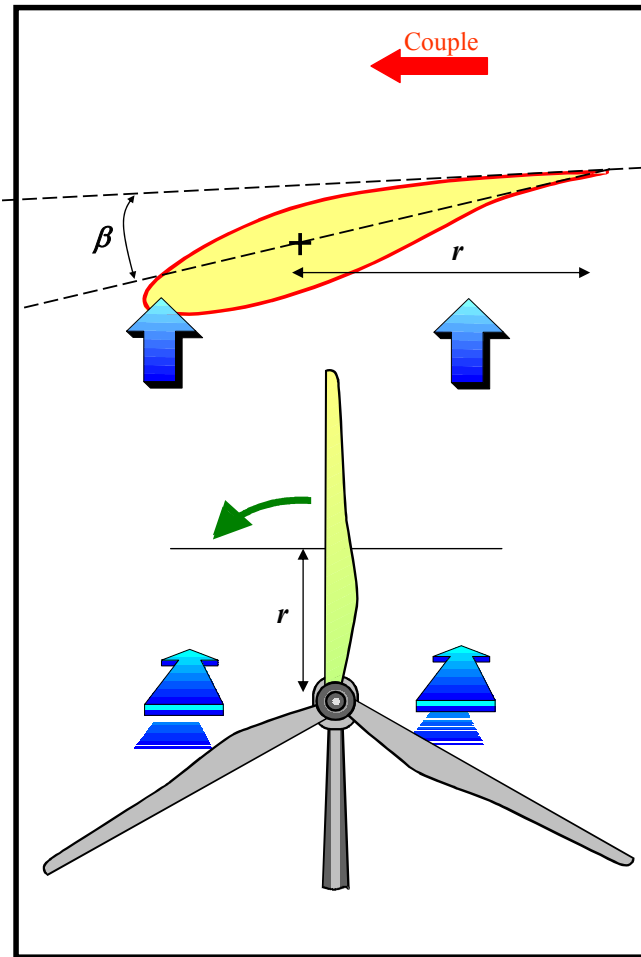
- balaye une fraction de la surface totale : $2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr$
- tourne à la vitesse de $\lambda \cdot v \cdot \frac{r}{R}$
- a pour fonction de convertir la surface balayée de manière à satisfaire la loi de Betz

Principes physiques

L'éolienne est orientée face au vent (représenté par des flèches bleu).

On réalise une coupe verticale de la pale pour obtenir une vue de haut.

β est l'angle de vrillage de la pale au point étudié.

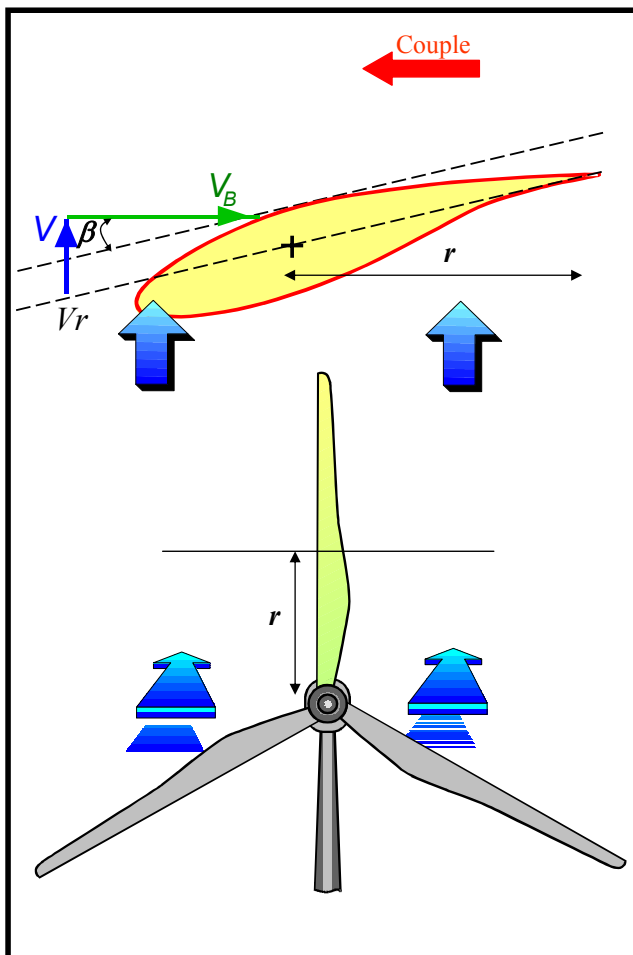


Principes physiques

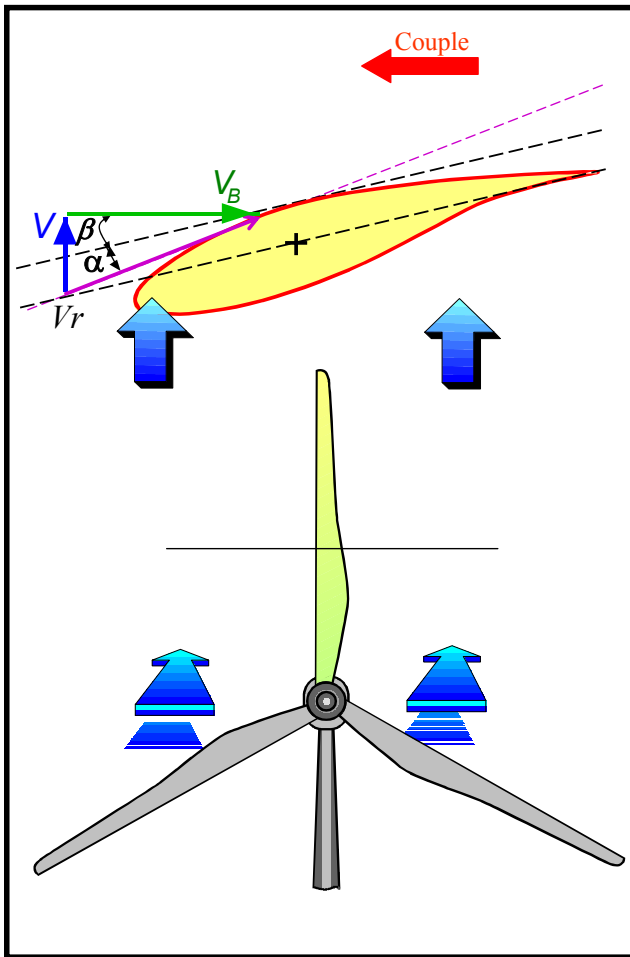
β est l'angle de vrillage de la pale au point étudié.

V vecteur "Vitesse du vent"

Comme la pale tourne, elle voit également une vitesse à l'endroit considéré $V_B = \lambda \cdot v \cdot \frac{r}{R}$



Principes physiques



β est l'angle de vrillage de la pale au point étudié.

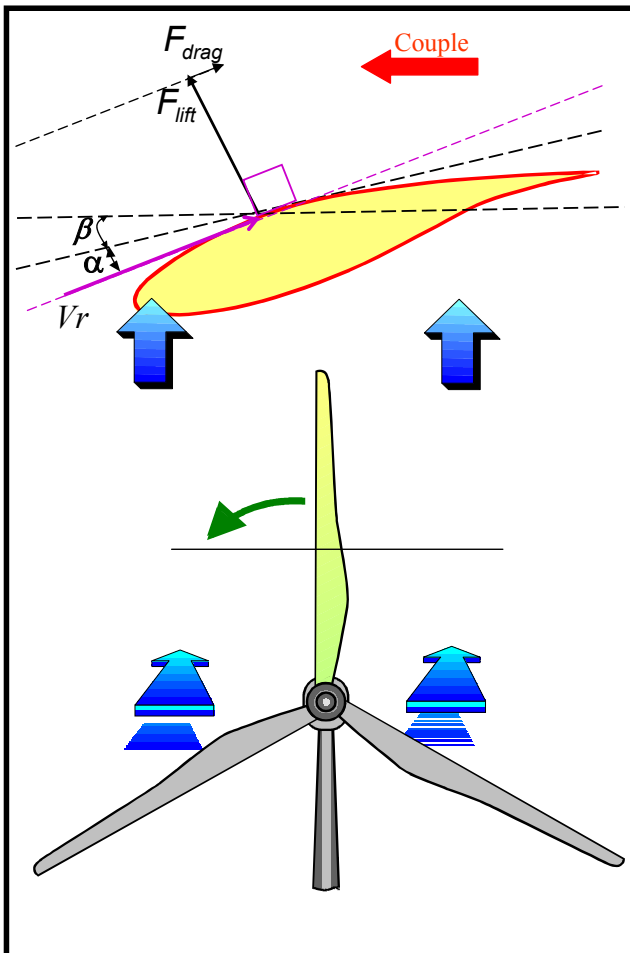
V vecteur "Vitesse du vent"

Comme la pale tourne, elle voit également une vitesse à l'endroit considéré $V_B = \lambda \cdot v \cdot \frac{r}{R}$

Ces deux vecteurs sont à l'origine de l'effet résultant du vent sur la pale : V_r .

α est l'angle d'attaque, angle entre la direction du vent apparent et la pale (ligne moyenne)

Principes physiques



β est l'angle de vrillage de la pale au point étudié.

V vecteur "Vitesse du vent"

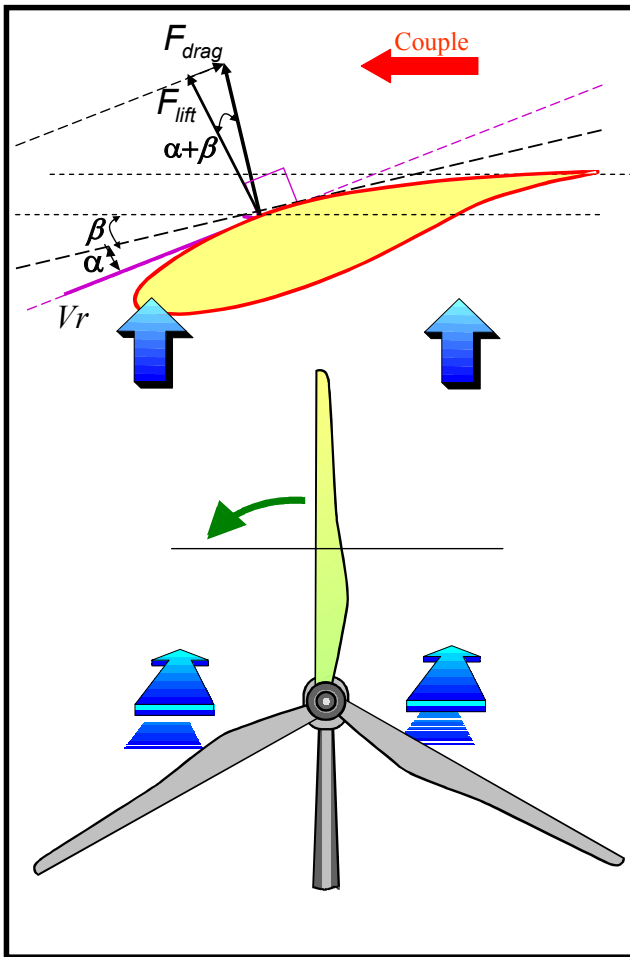
α est l'angle d'attaque, angle entre la direction du vent apparent et la pale (ligne moyenne)

Deux forces sont appliquées sur la pale :

- une **drag** force (F_{drag}), de même direction que le vecteur résultant s'oppose au mouvement de la pale
- une **lift force** (F_{lift}), orthogonal au vecteur résultant pousse la pale

La direction de ces deux forces dépend de l'angle d'attaque et de l'angle d'orientation.

Principes physiques



β est l'angle de vrillage de la pale au point étudié.
 V_r vecteur "Vitesse du vent"

α est l'angle d'attaque, angle entre la direction du vent apparent et la pale (ligne moyenne)

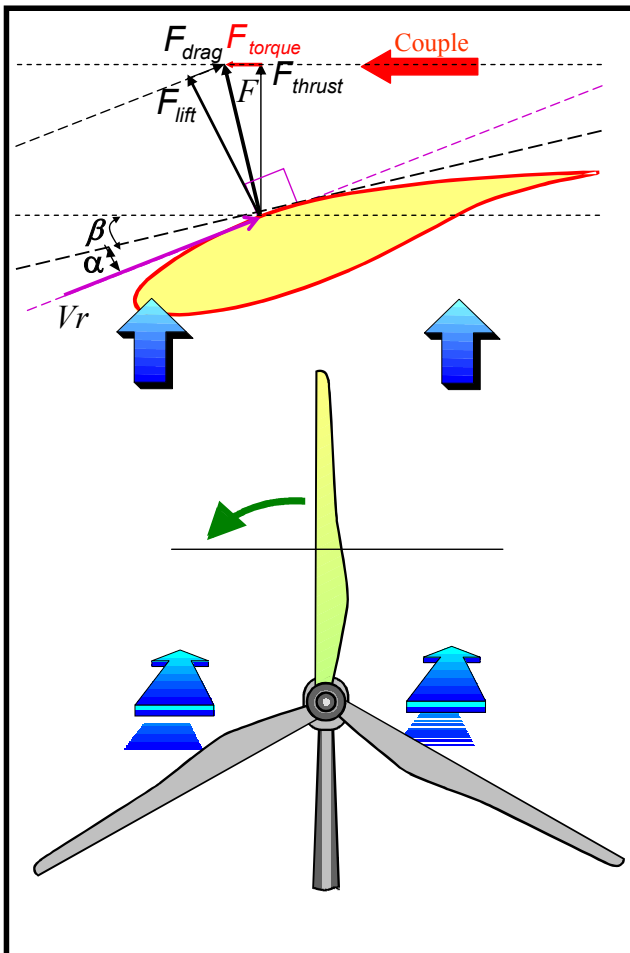
Deux forces sont appliquées sur la pale :

- une **drag** force (F_{drag}), de même direction que le vecteur résultant s'oppose au mouvement de la pale
- une **lift force** (F_{lift}), orthogonal au vecteur résultant pousse la pale

La direction de ces deux forces dépend de l'angle d'attaque et de l'angle d'orientation.

Ces deux vecteurs forment la **force aérodynamique** appliquée à la pale : F

Principes physiques



β est l'angle de vrillage de la pale au point étudié.
 V_r vecteur "Vitesse du vent"

α est l'angle d'attaque, angle entre la direction du vent apparent et la pale (ligne moyenne)

Deux forces sont appliquées sur la pale :

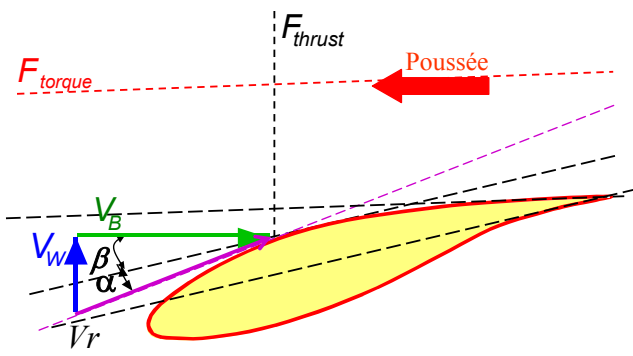
- une **drag** force (F_{drag}), de même direction que le vecteur résultant s'oppose au mouvement de la pale
- une **lift force** (F_{lift}), orthogonal au vecteur résultant pousse la pale

Ces deux vecteurs forment la **force aérodynamique** appliquée à la pale: F

La force aérodynamique est décomposée en

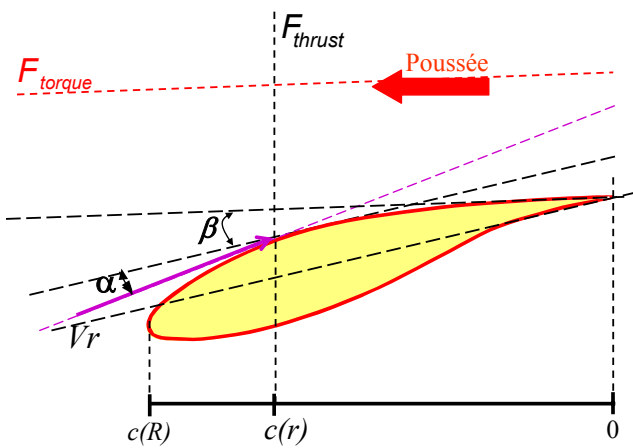
- une force de poussée (F_{thrust}) que la pale doit encaisser et
- une force produisant le couple (F_{torque}) qui est appliquée sur l'axe de la turbine et qui nous intéresse !

Modélisation mathématique



Vitesse résultante : $v_r = \sqrt{v^2 + \left(\lambda \cdot v \cdot \frac{r}{R}\right)^2}$

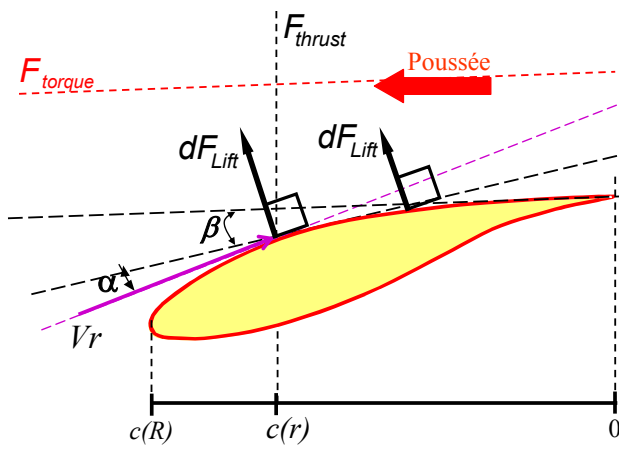
Modélisation mathématique



Vitesse résultante : $v_r = \sqrt{v^2 + \left(\lambda \cdot v \cdot \frac{r}{R}\right)^2}$

Caractérisation du profil -> paramètres

- Angle d'incidence de la pale: $\alpha + \beta$
- Corde de la pale au rayon r de la pale: $c(r)$



Modélisation mathématique

$$\text{Vitesse résultante : } v_r = \sqrt{v^2 + \left(\lambda \cdot v \cdot \frac{r}{R}\right)^2}$$

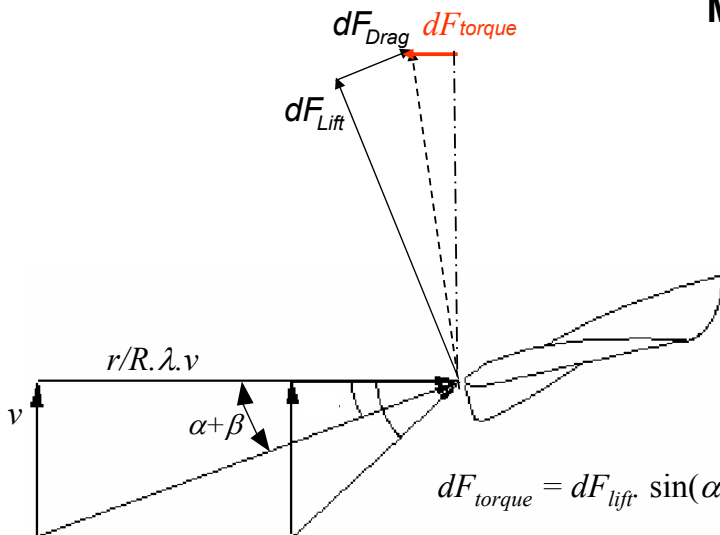
Caractérisation du profil -> paramètres

- Angle d'incidence de la pale: $\alpha + \beta$
- Corde de la pale au rayon r de la pale: $c(r)$

Élément des forces apparaissant sur le profil :

$$dF_{Lift} = C_{Lift} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_R^2 \cdot c(r) \cdot dr$$

$$dF_{Drag} = C_{Drag} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_R^2 \cdot c(r) \cdot dr$$



Modélisation mathématique

$$dF_{torque} = dF_{lift} \sin(\alpha + \beta) - dF_{drag} \cos(\alpha + \beta)$$

$$dF_{torque} = \frac{\rho}{2} \cdot (C_{Lift} \sin(\alpha + \beta) - C_{Drag} \cos(\alpha + \beta)) \cdot v_R^2 \cdot c(r) \cdot dr$$

$$dF_{torque} = \frac{\rho}{2} \cdot (C_{Lift} \sin(\alpha + \beta) - C_{Drag} \cos(\alpha + \beta)) \cdot \left(\frac{v}{\sin(\alpha + \beta)}\right)^2 \cdot c(r) \cdot dr$$

$$dT = r \cdot dF_{torque}$$

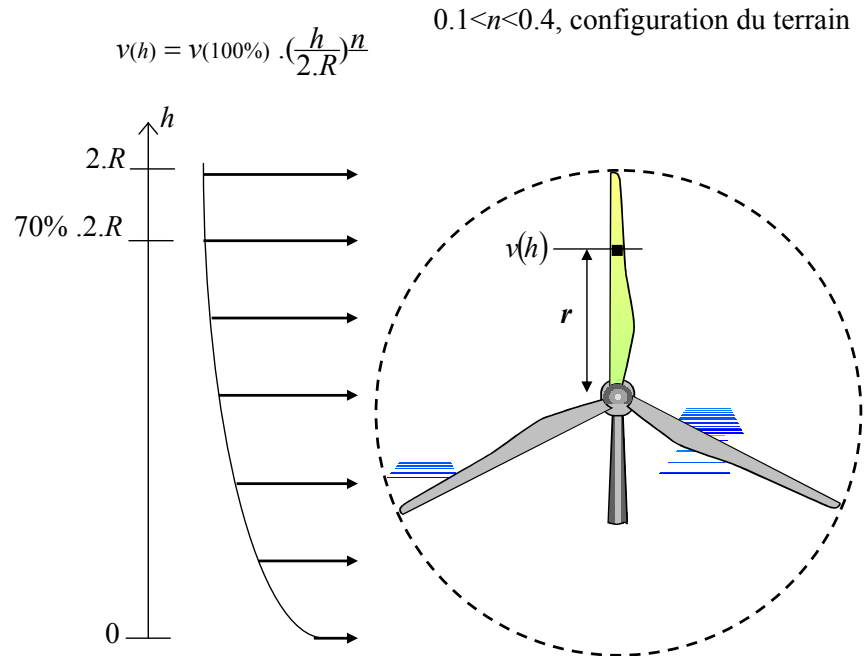
Couple développé par une pale:

$$T = \frac{\rho}{2} \cdot \int_0^R \frac{C_{Lift} \sin(\alpha + \beta) - C_{Drag} \cos(\alpha + \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \cdot v^2 \cdot c(r) \cdot r \cdot dr$$

Simplifications usuellement admises

Vent constant égal à sa valeur à 70% du diamètre des pales :

$$T = B \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot \int_0^R \frac{C_{Lift} \sin(\alpha + \beta) - C_{Drag} \cos(\alpha + \beta)}{\sin(\alpha + \beta)^2} \cdot c(r) \cdot r \, dr$$



Simplifications usuellement admises

Vent constant égal à sa valeur à 70% du diamètre des pales :

$$T = B \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot \int_0^R \frac{C_{Lift} \sin(\alpha + \beta) - C_{Drag} \cos(\alpha + \beta)}{\sin(\alpha + \beta)^2} \cdot c(r) \cdot r \, dr$$

Couple développé par B pales :

$$T = B \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot \int_0^R \frac{C_{Lift} \sin(\alpha + \beta) - C_{Drag} \cos(\alpha + \beta)}{\sin(\alpha + \beta)^2} \cdot c(r) \cdot r \, dr$$

On considère le cas limite pour lequel l'angle d'incidence $\alpha + \beta = \pi/2$

$$T = B \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot \int_0^R C_{Lift} \cdot c(r) \cdot r \, dr$$

On substitue la corde de la pale ($c(r)$) à un tour complet $2 \cdot \pi$

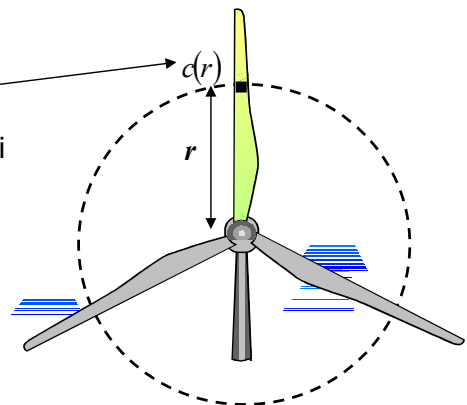
$$T = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \int_0^R C_{Lift} \cdot r \, dr$$

On considère le coefficient constant.

$$T = \frac{\rho}{2} \cdot C_{Lift}(\lambda) \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^2$$

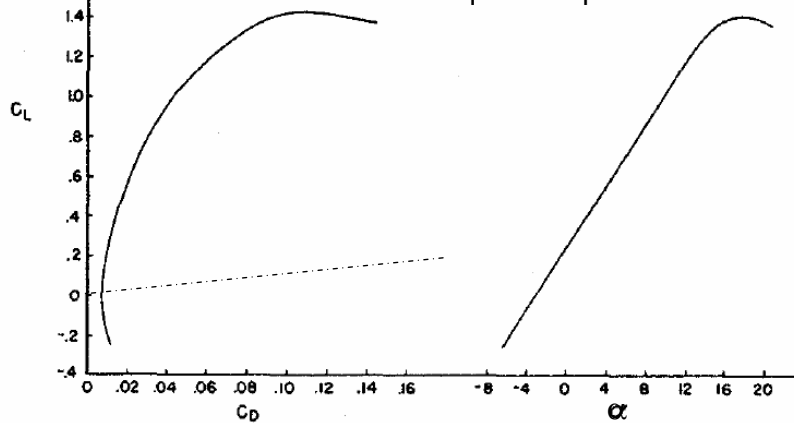
Puissance aérodynamique :

$$P = \frac{\rho}{2} \cdot C_{Lift}(\lambda) \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3$$



Influence du profil de la pale

Les coefficients C_{lift} et C_{drag} sont donnés par les polaires, obtenues expérimentalement en soufflerie ou numériquement par code de calculs CFD



NACA 4424

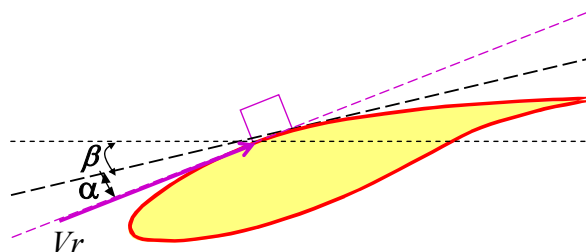
- Variation linéaire du coefficient C_{lift} jusqu'à une certaine valeur au delà de laquelle il y a un décrochage (aérodynamique)
- Variation quadratique du coefficient C_{drag}
- Pour les faibles valeurs de l'angle d'attaque, le coefficient C_{drag} est négligeable devant C_{lift}

Influence du profil de la pale

Déterminer une section et l'angle d'incidence à cet endroit pour

- Maximiser C_{lift}
- Minimiser C_{drag}

Maximiser le glissement aérodynamique $\frac{C_{Lift}(\beta+\alpha)}{C_{Drag}(\beta+\alpha)}$



Pour la plupart des pales, on prend $\alpha = 5$ degré -> bon compromis

Pour spécifier β , on a besoin de connaître l'angle d'incidence $\alpha+\beta$ avec la direction du vent apparent

La direction du vent apparent va dépendre de la vitesse tangentielle

Influence du profil de la pale

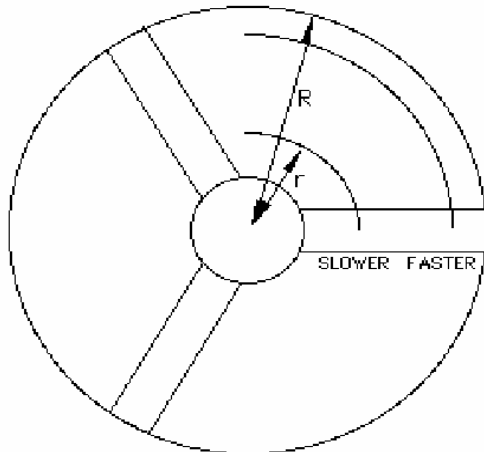
Pour spécifier β , on a besoin de connaître l'angle d'incidence $\alpha + \beta$ avec la direction du vent apparent

La direction du vent apparent va dépendre de la vitesse tangentielle.

La vitesse tangentielle ($V_t \cdot R$) croît avec le rayon et modifie le triangle des vitesses.

En extrémité, le vent ne joue presque plus (10-15m/s contre 60-70 m/s de vitesse périphérique due à la rotation).

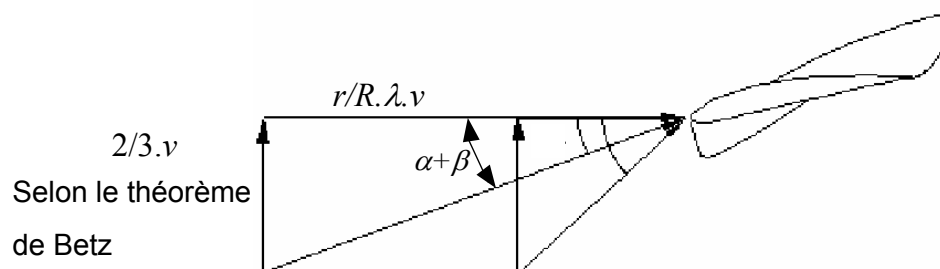
L'angle d'incidence varie avec l'envergure et l'on compense avec le vrillage de la pale pour éviter de se trouver en extrémité dans un régime décroché (voir explication générales plus loin).



L'angle d'incidence $\alpha + \beta$ doit donc changer le long de la pale

Influence du profil de la pale : vrillage

La pale doit donc être vrillée !



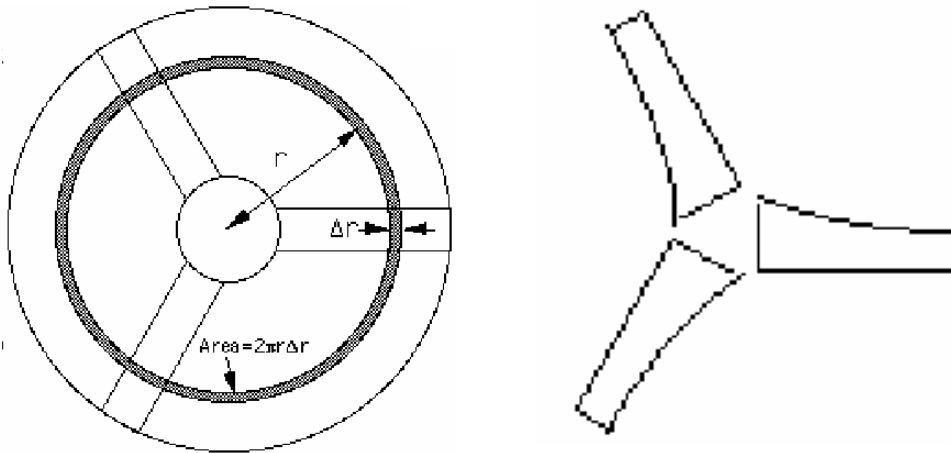
$$\tan(\alpha + \beta) = (2/3 \cdot v) / (r/R \cdot \lambda \cdot v) = 2 \cdot R / (3 \cdot r \cdot \lambda)$$

$$\beta = \text{Arctan}(2 \cdot R / 3 / r / \lambda) - \alpha, \text{ où } \alpha = 5$$

Influence du profil de la pale : largeur

Chaque partie de la pale utilise ou transforme une partie du vent.

Comme le rayon diminue lorsque l'on se rapproche de l'axe de rotation, la surface balayée est moindre.



C'est la partie externe qui réalise le principal travail de conversion

Pour satisfaire la loi de Betz, la vitesse du vent pour chaque partie de la surface balayée doit être ralentie à 1/3 de sa vitesse en amont.

Réalisée par la force de poussée : F_{thrust}

Influence du profil de la pale : largeur

Selon la loi de Betz, au maximum, on peut avoir :

$$F_{thrust} = \rho \cdot A \cdot \frac{2^2}{3^2} \cdot v^2$$

$$F_{thrust} = \frac{4}{9} \cdot \rho \cdot (2 \cdot \pi \cdot r \cdot \Delta r) \cdot v^2$$

En outre, on sait que :

$$F_{thrust} \cong F_{Lift} \cdot \cos(\beta + \alpha)$$

$$F_{Lift} = C_{Lift} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot B \cdot (c \cdot \Delta r) \cdot v_R^2 = C_{Lift} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot B \cdot (c \cdot \Delta r) \cdot \left(\lambda \cdot v \cdot \frac{r}{R \cdot \cos(\beta + \alpha)} \right)^2$$

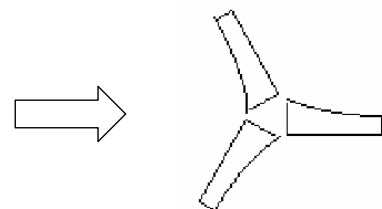
$$\boxed{l = \frac{16 \cdot \Pi}{9} \cdot \frac{R^2}{\lambda^2 \cdot B \cdot r}} \quad \text{avec } C_{Lift} \cong \cos(\beta + \alpha) \cong 1$$

B nombre de pales

b est inversement proportionnel au rayon

b est inversement proportionnel au nombre de pales

b est inversement proportionnel au carré du ratio de vitesse



Conception d'une turbine éolienne

1 Choisir le diamètre du rotor

Diamètre (m)	Puissance (W)
1	50-100
2	250-500
3	500-1000
4	1000-2000
5	2000-3000

2 Choisir le ratio de vitesse

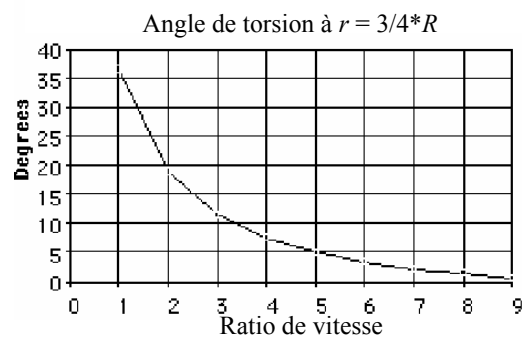
Généralement entre 5 et 8 -> vitesse de l'axe = $60 \cdot \lambda \cdot v / \Pi / D$

3 Choisir le nombre de pales, 3

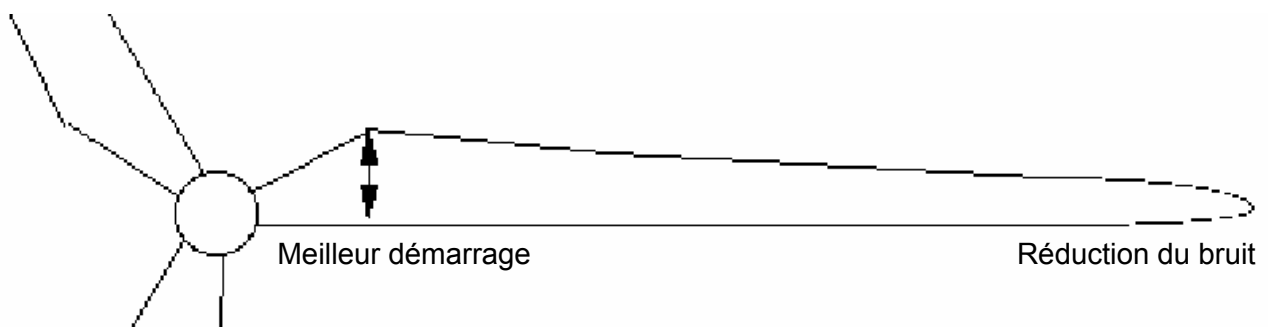
4 Déterminer la largeur du bout de la pale

$$l = \frac{8 \cdot \Pi}{9} \cdot \frac{D}{\lambda \cdot B}$$

5 Déterminer l'angle de vrillage (β)



Pale réelle



Le pied de pale est massif pour accepter les énormes efforts résultants de l'intégration des efforts le long de la pale).

Dans les concepts actuels, les pales sont très rigides.

Dans les nouveaux concepts et parce que ces pales devenaient trop lourdes pour les grandes puissances, on commence à assouplir la pale pour réduire ces efforts.

La pale paraît donc un peu plus effilée avec des cordes moins importantes en pied de pale

(ex: dernière ENERCON E112, 4.5 MW avec pale de 56m...pesant 20 tonnes).

Et, la modélisation de la turbine, dans les faits ?

On mesure le couple qui apparaît sur l'arbre et on fait une interpolation mathématique

Pour aller plus loin

A faible vitesse, l'éolienne se met à tourner par les sections du pied de pale qui possèdent déjà une grande incidence (angle entre la corde moyenne du profil et le vent apparent), disons 15 degrés, alors que les sections extrémités de pale sont cales a 0 degrés.

A cet angle de 15 degrés, ces profils pied de pale ont le coefficient de portance max, d'ou la création d'une composante de force qui fait tourner la pale (et le reste de la pale ne sert a rien!).

Plus la vitesse du vent augmente, plus l'incidence sur toute la pale augmente (car la loi de vrillage , coefficient B , est figée).

Donc les incidences vues par les sections augmentent.

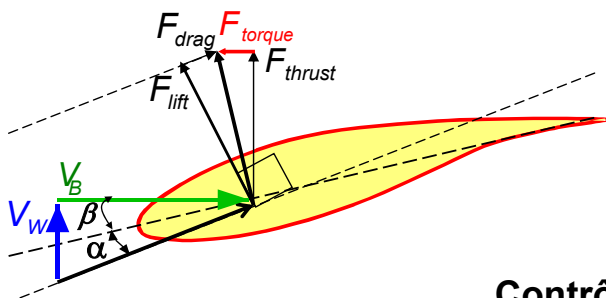
Au pied de pale, leurs caractéristiques aérodynamiques s'effondrent (baisse du coefficient de portance C_z et augmentation de la traînée C_x).

On arrive au décrochage et les sections internes ne servent plus a rien.

En même temps, au fur et a mesure de l'augmentation de cette vitesse de vent (et donc de la rotation), ce sont les sections milieu qui prennent le relais...puis décrochent.

Au final, a la vitesse nominale et au-delà, ce ne sont -disons- que les 30% externes de la pale qui fonctionnent correctement et fournissent la majeure partie de la puissance du rotor!

(car c'est aussi là que l'on a les + grandes vitesses périphériques).

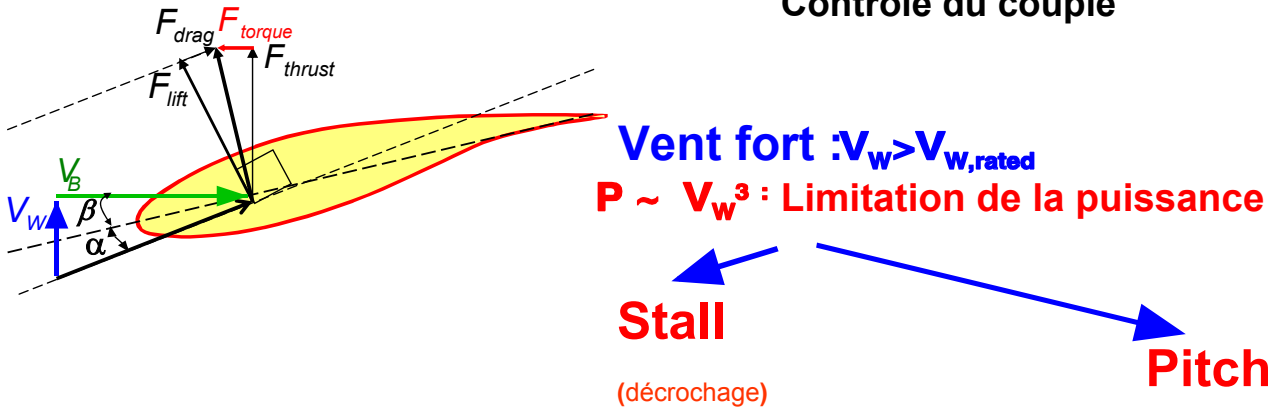


Contrôle du couple

- en agissant sur l'angle d'incidence $\alpha + \beta$ par variation de l'angle de vrillage β
- en agissant sur V_B par variation de la vitesse de la pale



Contrôle du couple

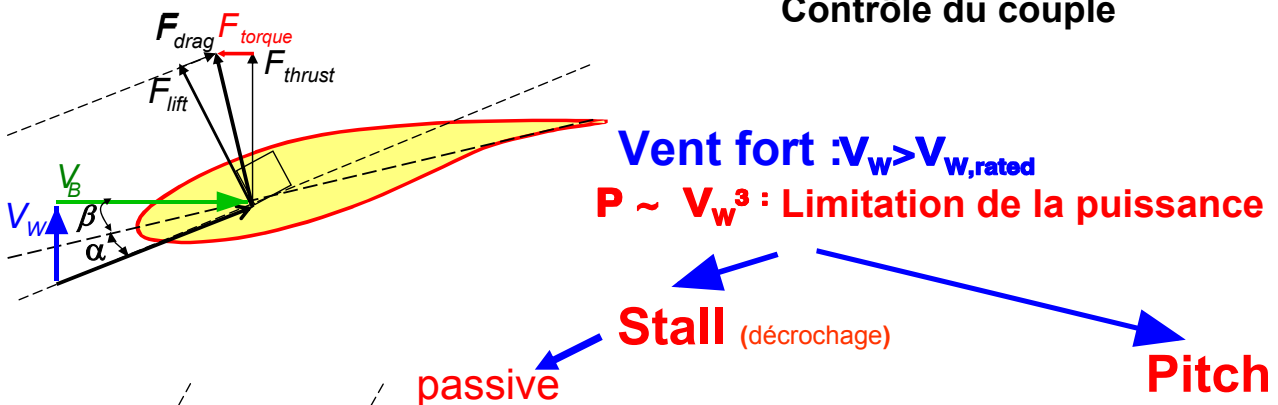


Les turbines sont conçues pour produire le maximum de puissance pour une certaine vitesse du vent appelée vitesse éolienne nominale.

Pour une vitesse de vent supérieure, il est nécessaire de limiter la puissance mécanique à la puissance nominale.

La puissance mécanique peut être limitée par une méthode **stall** or par **pitch**.

Contrôle du couple



La méthode la plus simple est d'utiliser la méthode stall passive. Pour cette méthode, l'angle de vrillage β est figé.

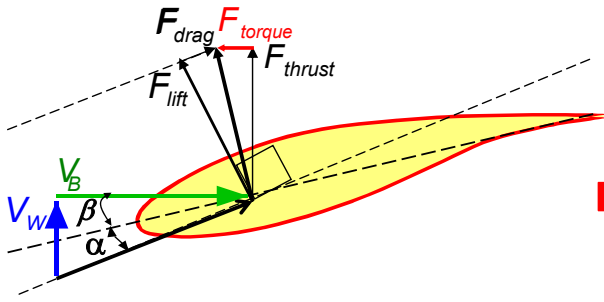
Quand la vitesse du vent augmente, l'angle d'attaque α augmente.

Au delà d'une certaine valeur de cet angle, l'effet stall limite la puissance.

Pour une éolienne régulée par décrochage, le calage de la pale est en fait + ou - son vrillage initial qui est figé (+15 à 0 degrés dans le cas expliqué).

On peut quand même fixer le calage de la pale au moment de sa fixation (on adapte ainsi une seule pale pour différents sites de vent possédant des vitesses moyennes différentes).

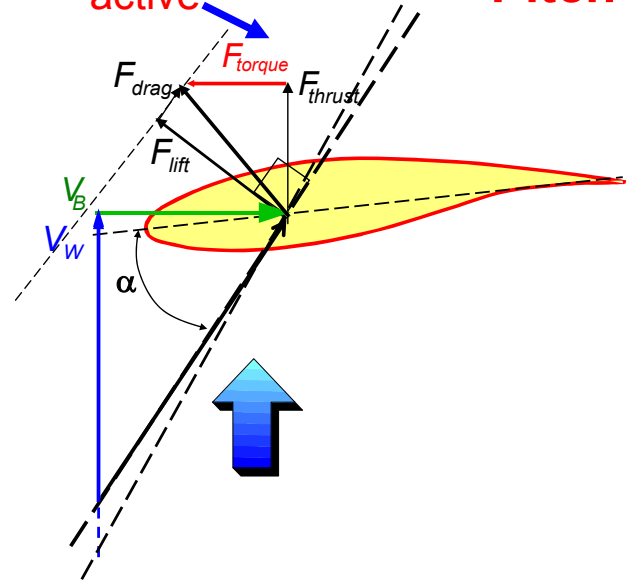
Contrôle du couple



Vent fort : $V_w > V_{w,rated}$

$P \sim V_w^3$: Limitation of Power

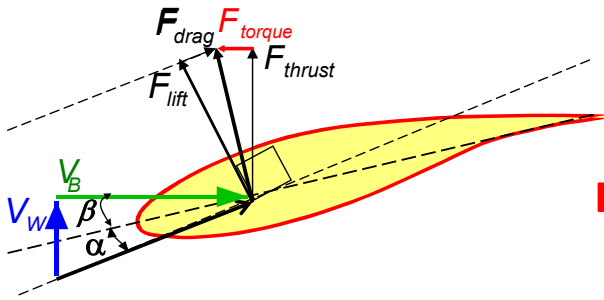
Stall
passive active Pitch



Pour les fortes vitesses de vent, l'effet stall est augmenté de manière à limiter la puissance.

Dans ce cas, l'angle β est diminué et la pale agit comme un mur face au vent.

Contrôle du couple



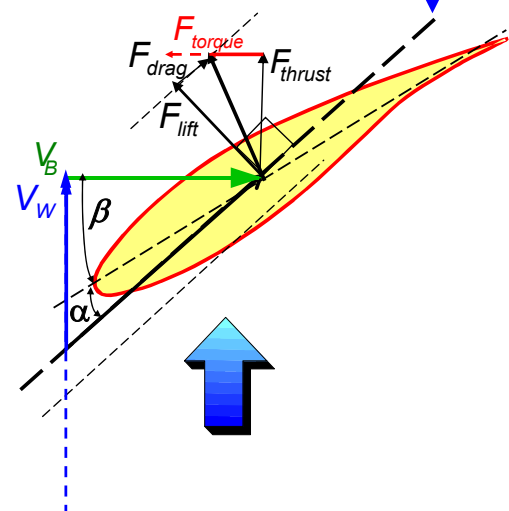
Vent fort : $V_w > V_{w,rated}$

$P \sim V_w^3$: Limitation of Power

Stall Pitch

La méthode du **pitch method** consiste à tourner les pales contre le vent en augmentant l'angle β .

Dans ce cas toutes les forces aérodynamiques sont réduites.



L'intérêt d'une pitch est sa possibilité de pilotage (actif), mais cela nécessite d'avoir des moteurs et un système de mise en pas pour chaque pale (poids/prix/maintenance etc)

L'intérêt du stall (passif) est d'éviter tout ce système mécanique et de pilotage.

Mais il faut bien designer sa pale dès le départ et bien modéliser et comprendre le comportement en décrochage n'est pas si simple.

La production actuelle est donc moitié/moitié.