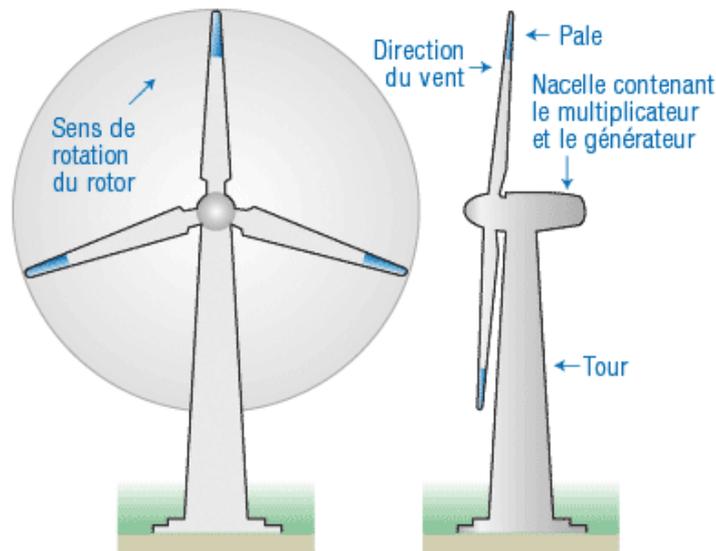


# I) Force et action du vent sur les pâles du rotor

## 1) Rotation des pâles



*Constitution globale extérieure de l'éolienne*

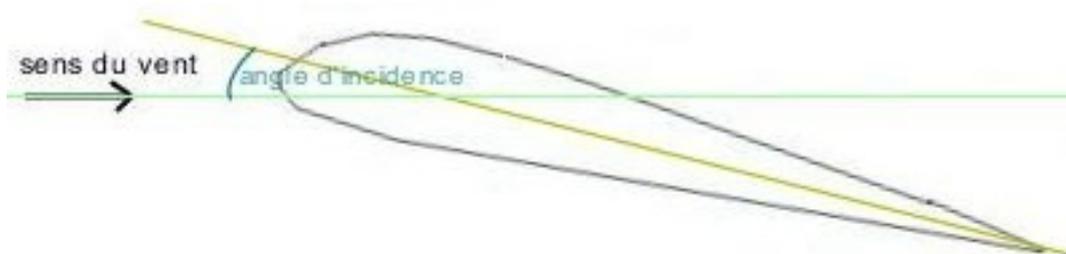
Une éolienne récupère l'énergie du vent grâce aux composants suivants :

- \_ Le **mât** (ou la tour) qui permet de placer l'éolienne à une hauteur où la vitesse du vent est plus élevée et plus régulière qu'au sol (plus l'éolienne est haute, moins il y a d'obstacles au vent). Sa hauteur varie de 10 à 100m en fonction de l'éolienne.
- \_ Une **hélice** (également appelée «**rotor**») qui est composée généralement de trois **pâles**, de 5 à 90m de rayon montées sur un **moyeu**. Quant aux éoliennes qui vont nous intéresser par la suite, elles ont des pâles mesurant de 60 à 80m de longueur.

Le rotor assure une fonction essentielle : transformer l'**énergie cinétique** du vent, une énergie naturelle, en **énergie mécanique**. Par définition, l'énergie cinétique est l'énergie que possède un corps du fait de son mouvement. Ici, l'éolienne se sert de l'énergie cinétique fournie par la rotation des pâles.

Cette rotation est due à deux facteurs principaux :

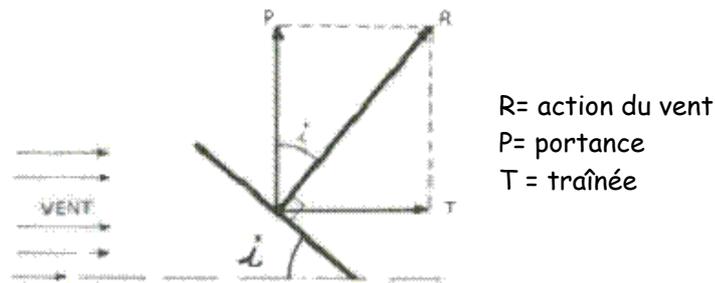
- \_ la force du vent qui s'exerce sur les pâles
- \_ la position oblique des pâles face au vent («**angle d'incidence**», également appelé «**angle d'attaque**»)



*Angle d'incidence*

En effet, à l'échelle d'une pôle, le vecteur représentant l'action du vent en un point est la résultante de deux forces aérodynamiques : la traînée et la **portance**.

Lorsque le vent souffle sur une surface oblique, d'une part il pousse cette surface vers l'arrière (force de traînée), mais d'autre part soulève cette surface (force de portance).



Représentation des deux composantes de l'action du vent

Puisque l'éolienne est fixée sur le sol, la traînée a un effet nul et n'apporte rien au fonctionnement de l'éolienne. C'est donc la force de portance qui soulève les pâles et qui fait tourner l'hélice autour de son axe, dans un plan perpendiculaire à la direction du vent.

La portance s'explique également dans un cadre aérodynamique.

Dans le profil d'une pale, c'est-à-dire la forme d'une coupe transversale de cette pale, on distingue l'**extrados** (le dessus de la pale) et l'**intrados** (le dessous) qui ont tous deux une forme convexe (= bombé), plus importante sur l'extrados que sur l'intrados. On dit que le profil de la pale est **biconvexe** et **effilé** (= allongé). C'est cette forme particulière qui donne un écoulement d'air laminaire autour de l'aile, ce qui signifie que l'air y acquiert un mouvement qui permet un phénomène de turbulences négligeable.

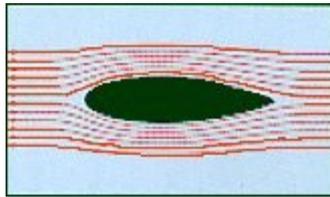
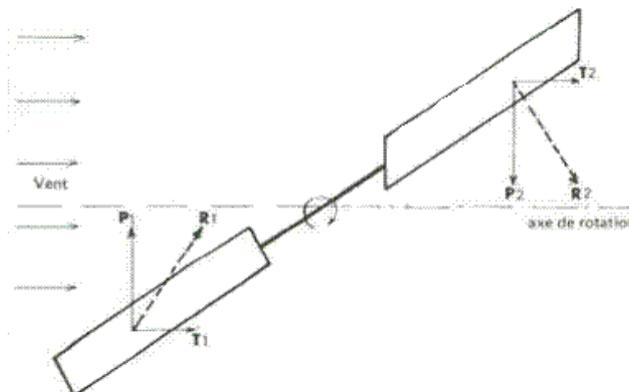


Schéma représentant l'écoulement laminaire de l'air sur la pale

L'écoulement de l'air est plus rapide sur l'extrados que sous l'intrados. Or, le principe de Bernoulli dit qu'à mesure que la vitesse d'un fluide augmente, la pression exercée sur un corps diminue. On en déduit que la pression exercée par l'air sur la pale est inférieure sur l'extrados que sous l'intrados. Cette différence de pression provoque une aspiration vers le haut qui explique la portance.



Mise en rotation de l'hélice grâce à la portance

L'hélice doit donc être en permanence face au vent pour produire l'énergie maximum. On dit que

L'éolienne a une erreur d'orientation lorsque si le rotor n'est pas orienté perpendiculairement à la direction du vent. Cela implique qu'une partie de l'énergie du vent traverse la surface balayée par le rotor.

## 2) L'énergie du vent

### a) L'énergie mécanique du vent

La force de portance, qui nous donne l'énergie du vent se calcule de cette manière :

$$F_p = \frac{1}{2} \mu S V^2 C_p$$

$F_p$  = la force de portance

$\mu$  = la masse volumique de l'air

$S$  = la surface balayée par le rotor

$V$  = la vitesse du vent

$C_p$  = le coefficient de portance (sans unité)

#### La densité de l'air

L'énergie cinétique contenue dans un objet en déplacement est proportionnelle à sa masse volumique (ou son poids). L'énergie mécanique du vent dépend donc de la densité de l'air. Autrement dit, plus l'air est dense, plus la partie de l'énergie récupérable par l'éolienne est importante.

A une pression atmosphérique normale et à une température de 15 degrés Celsius, l'air pèse environ 1,225 kg par mètre cube. Cependant, la densité diminue un peu lorsque l'humidité de l'air augmente.

De même, l'air froid est plus dense que l'air chaud, tout comme la densité de l'air est plus faible à des altitudes élevées (dans les montagnes) à cause de la pression atmosphérique plus basse qui y règne.

#### La surface balayée par le rotor

L'énergie récupérable par une éolienne dépend en effet de la surface balayée par son rotor.

Étant donné que la surface balayée par le rotor s'accroît avec le carré du diamètre du rotor, un doublement de celui-ci entraînera une récolte de  $2^2$  = quatre fois plus d'énergie.

#### Le coefficient de portance

Le coefficient de portance dépend des caractéristiques et de la forme géométrique de la pale, il est proportionnel à l'angle d'incidence d'attaque du vent mais il prend également en compte les rendements des différents composants (génératrice, multiplicateur etc...).

### b) La puissance du vent

La quantité d'énergie susceptible d'être convertie en électricité par une éolienne dépend avant tout de la vitesse du vent. L'énergie transportée par le vent est proportionnelle au cube de la vitesse moyenne du vent. Ainsi, un doublement de la vitesse du vent correspond à une augmentation de sa capacité énergétique de  $2^3$  = 8 fois.

La puissance du vent sera expliquée en détails par la suite.

## 3) Vitesses de rotation

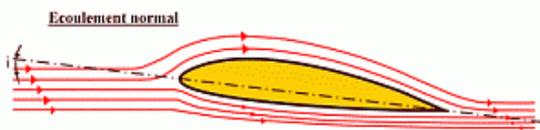
Pour commencer à produire de l'énergie, une éolienne exige une vitesse de vent minimale, dite **vitesse de démarrage**. Pour la plupart des éoliennes modernes, cette vitesse de vent est de 4 m/s (14,4 km/h).

Les éoliennes sont conçues pour produire de l'électricité à un prix aussi bas que possible. Par conséquent, les éoliennes sont en général construites de manière à atteindre leur performance

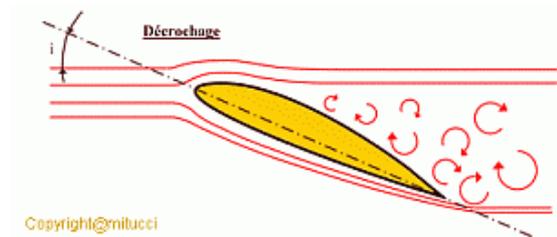
maximale à environ 15 m/s. C'est la **vitesse nominale**. Il est en effet inutile de concevoir des éoliennes qui maximalisent leur rendement à des vitesses de vent encore plus élevées au prix de renforcements de structure coûteux pour un rendement faible, les vitesses de vent élevées étant très peu fréquentes. En cas de vitesses de vent supérieures à 15 m/s, il est nécessaire de perdre une partie de l'énergie supplémentaire contenue dans le vent afin d'éviter tout endommagement de l'éolienne. Toutes les éoliennes sont donc conçues avec un système de freinage ou de régulation de la puissance.

Il existe une grande quantité de techniques de freinages et de régulation. Parmi elles, il existe des systèmes aérodynamiques. Elles constituent la façon la plus sûre et la plus fréquente de réguler une éolienne moderne, en raison d'un point commun : ces systèmes fonctionnent grâce à l'énergie du vent (qui s'obtient facilement puisqu'elle est ici excessive) à partir duquel ils font appel pour la plupart au **décrochage aérodynamique**.

Concrètement, lorsque l'angle d'incidence du vent par rapport à la paroi de la pôle est trop important, l'écoulement de l'air commence à tourner dans un tourbillon irrégulier (on parle de **turbulence**). Du coup, la dépression sur l'extrados de la pôle disparaît, ainsi que la portance.



*Filets d'air lors d'un écoulement normal*



*Filets d'air lors d'un décrochage*

Le décrochage est valable également dans le sens inverse. Si les pâles sont trop parallèles au vent, il n'y a plus de portance non-plus. On dit que l'hélice se met «**en drapeau**».

Ces deux cas constituent des techniques efficaces pour la régulation de la vitesse de rotation. Une éolienne peut être régulée par **calage variable de pâles** à condition d'être composées de pâles orientables, c'est-à-dire qu'elles sont fabriquées de façon à pouvoir pivoter sur elle-même dans un sens ou dans l'autre et donc changer l'angle d'attaque du vent. Ce dispositif possède cependant des inconvénients : il est complexe et nécessite un entretien considérable. Ou bien, une éolienne peut être régulée par décrochage aérodynamique dit passif. Dans ce cas, les pâles sont fixées au moyeu de façon rigide et la géométrie de la pale est conçue de façon à mettre à profit en cas de vitesses de vent trop élevées le décrochage aérodynamique qui empêche la portance d'agir sur le rotor. C'est l'**effet Stall** qui est alors mis en application.

Un dernier dispositif permet de réguler la vitesse de rotation mais elle ne prend pas en compte le décrochage : la **régulation par effacement de rotor**. Il s'agit de faire basculer le rotor, donc la surface balayée par le rotor, verticalement ou latéralement, lorsque la rotation atteint la vitesse nominale. Ainsi, la surface balayée (qui intervient dans l'énergie mécanique du vent) diminue.

#### **Lors de fortes variations de vitesse : les turbulences :**

Les turbulences rendent plus difficile la récupération de l'énergie cinétique du vent par une éolienne. De même, la turbulence augmente la fatigue des composants mécaniques de l'éolienne. En général, on essaye donc d'accroître la hauteur des tours afin d'éviter que la turbulence engendrée près du sol influe sur la surface balayée par le rotor.