

Un peu de technique. éoliennes

© 2001/2006, Mini-eoles. Mise à jour septembre 2006

Valeurs de base appliquées aux éoliennes:

Le joule (travail) s'exprime en newton (N) dont l'action sur le point donné se déplace de 1 mètres dans sa direction.

Le joule (électricité) est égal à 1 watt/heure soit 3600 joules.

Le kilomètre est égal à mille mètres. $1 \text{ km} / \text{h} = 0,277 \text{ m/s}$. L'ancienne valeur française de la lieue encore utilisées dans certaines régions valait environ quatre mille mètres.

Le mètre (millième partie du kilomètre) 1 mètre seconde est égal à 3,6 km/h

Le mille est égal à 1609.34 mètres. 1 mille/heure = 0.447 m/s. **Mile**, nom britannique.

Note: Il existe plusieurs valeurs du mille ou Mile. Le "nautical mile" britannique vaut 1855 mètres. Aux USA il vaut 1853,25 mètres. On retiendra ici la valeur de 1609,34 mètres **qui est le mille terrestre**.

Le Newton (force) est une valeur qui s'exprime sur une masse de 1 kilogramme avec une accélération de 1 mètre par seconde/seconde.

En éoliennes on l'utilise aussi: **Couple** sur le rotor éolien ou surface = **C**. **Force** de trainée (**Fx**). Force de portance (**Fz**) Poussée axiale (**P**)

Le Noeud est essentiellement une valeur utilisée par la marine soit 1852 mètres. 1 noeud/heure = 0.514 m/s.

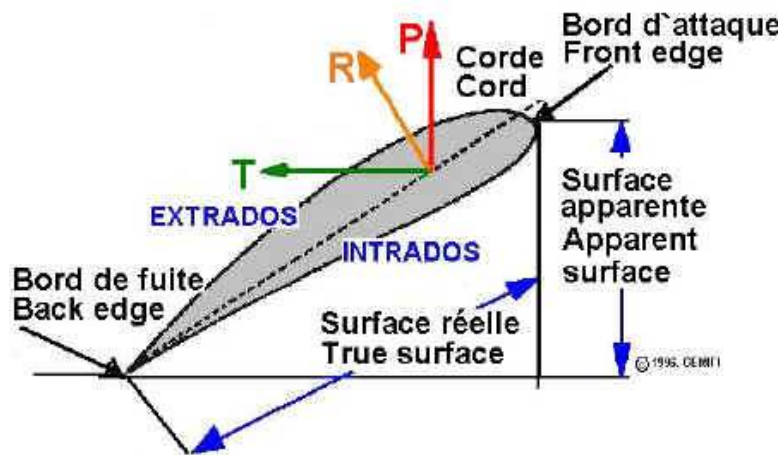
Un tableau récapitulatif en fin de cet article

L'éolienne. Une éolienne, un moulin à vent fonctionne grâce au vent. Rien de plus vrai. Sans vent pas d'énergie !

Bien que la réalisation d'une petite ou moyenne éolienne ne nécessite pas de calculs élaborés si l'on se contente d'un rendement approximatif

(pourvu que ça tourne et produise... un peu !)

Il n'en demeure pas moins que pour un auto-constructeur sérieux qui envisage une unité plus performante, quelques calculs préliminaires s'avèrent nécessaires.



En rouge, **P** = la portance

En vert, **T** = la trainée

En orange **R** = la résultante

La portance doit être supérieure à la trainée. L'intrados, surface inférieure reçoit la pression du vent. (environ 1/3). L'extrados reçoit la dépression du vent.

(environ 2/3). Le bord d'attaque est le côté qui aborde le vent. Le bord de fuite est le côté qui s'éloigne du vent

THÉORIE

Le rendement théorique rêvé dans tout système est idéalement de 100 %. Malheureusement aucun système aussi sophistiqué soit il rencontre ce critère. Dans le cas des systèmes éoliens ce rendement MAXIMA n'est que de 59,3 %. C'est la loi de **BETZ**.

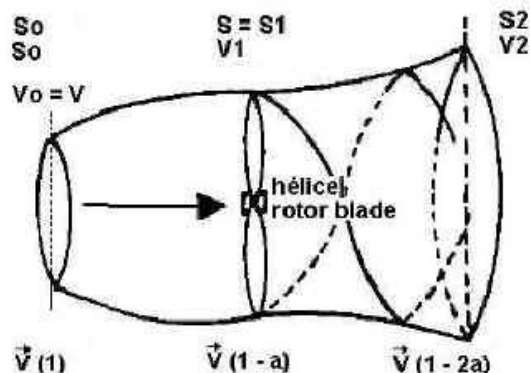
En d'autres termes, l'énergie théoriquement extraite du vent n'est que de **59,3 %** en supposant un système parfait dont le rendement à la base serait de 100 %.

En valeurs, nous appliquons : Rendement éolien = ÉNERGIE potentielle du vent **Ep = 100 %**

ÉNERGIE théorique récupérable **Ee = 59,3 %** (loi de Betz) **ÉNERGIE** récupérable en fin de conversion = **E/v**.

Il est bon de connaître les éléments de base qui nous permettent de calculer au plus près l'engin de nos rêves. Nous voyons sur ce dessin de gauche ci-dessus une coupe de pale.

Force du vent en amont et en aval d'une hélice Wind power front/back of a rotor blade



L'Hélice c'est LE moteur de votre aérogénérateur, Comportement amont/aval

Le moteur de votre aérogénérateur est l'hélice éolienne, donc le rotor dans son ensemble. Cet ensemble prélève une partie de l'énergie cinétique du vent.

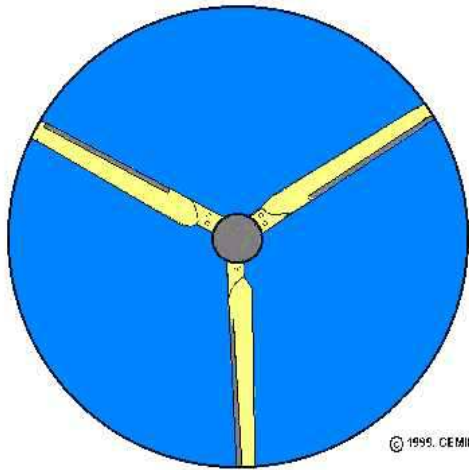
D'après les travaux de Froude, Rankine et Betz et sa fameuse loi ainsi que les travaux préliminaires d'Euler (théorème d'Euler) :

La variation d'énergie de la masse d'air qui traverse un ensemble hélice est égale à la différence ou variation de la quantité d'air entre l'amont et l'aval de l'hélice.

Le dessin de gauche nous démontre ce qui se passe en amont et aval de l'hélice

Adapté de aérogénérateurs

Données de base.



La puissance du vent s'exprime :

$$E_{cv} = (1/2 M) * V_2^2 \quad E_{cv} \text{ s'exprime en joules.}$$

M est égal à **1,25kg / m³** (au niveau de la mer) et

V₂ la vitesse du vent en **m/s (mètres seconde)** multipliée au carré.

$$\text{On peut aussi : } E_c = 1/2 m * V_2^2$$

$$\text{L'énergie théoriquement extraite est égale à : } E_{cs} = 1/2 (M * V_s / m) / V_2$$

$$\text{La puissance disponible (théorique) : } P = 1/2 * m * S * V_2,$$

$$\text{Le maximum récupérable (théorique): } 16/27 * 1/2 * 1,25 * S * V_3 \text{ donc...}$$

$$\text{La limite de Betz nous indique que : } P = 0,37 \pi/4 * D_2^2 * V_3$$

La pression Pr est le rapport de la force sur une surface donnée, dans notre cas la pale, soit: **Pr = F/S**.

La pression peut être aussi exprimée sur la totalité de la surface du disque éolien. En effet, la pression du vent sur le disque éolien est la "force" qui agit sur le rotor lorsque les pales sont en mouvement. Cette pression (disque éolien) est égale à la surface balayée par les pales.

Les pales reçoivent une pression égale à leur surface réellement exposée au vent.

La circonférence s'exprime : **d (diamètre) * 3,1416 (PI)**

La circonférence est le chemin parcouru par l'extrémité de la pale. On peut aussi exprimer la circonférence pour toute section(s) (ou segments) de la pale par rapport à l'axe.

La surface s'exprime pour le rotor éolien: **r (rayon) 3,1416 (PI) S (surface). S = r * r * 3,1416** (le rotor éolien est la surface balayée par une ou des pales en mouvement)

La surface pour une pale: **s = l * L** (largeur fois longueur).

Pour une pale à cordes variables: **s = l * l' / 2 * L** ou nous retrouvons la grande (l) largeur en général au centre, et la petite largeur en bout de pale (l')

La surface active d'une pale se calcule sur la surface réellement au vent.

La surface apparente est lorsque la pale fait un angle de X degrés par rapport au vent. Voir dessin plus haut

La portion des attaches à l'axe porteur n'est généralement pas considérée comme surface active.

La force est celle qui exercée sur un corps solide s'exprime : **F = k * Pr * S = 1/2 k * R * S * V₂**. **k** est le coefficient du nombre de Reynolds. **S** est la surface considérée. **V₂** est la vitesse du vent en m/s (mètres / seconde) fois au carré.

$$\text{La portance s'exprime : } P = C_z * 1/2 * R * V_2^2 * S$$

$$\text{La traînée s'exprime : } T = C_x * 1/2 * R * V_2^2 * S$$

Les coefficients Cz et Cx sont déterminés pas le (les) type(s) de profils utilisés. Voir les données [profils] disponibles sur le réseau Web. Recherchez dans les moteurs de recherches francophones [profils, ou (par exemple) NACA + profils].

Dans les moteurs de recherches anglophones, cherchez [profiles ou (pour l'exemple) NACA + profiles].

[Voir la liste succincte en fin de ce document de quelques sites qui parlent de profils](#)

La longueur est la partie entière de la pale sur un rayon.

On peut calculer soit la longueur totale par rapport à l'axe, c'est donc le rayon vrai, ou, calculer seulement la partie active de la pale, cette deuxième option étant la plus exacte pour les calculs de puissance.

Exemple:

Une éolienne de 2,40 mètres de diamètre. Si le support axial mesure 30 cm de diamètre (attaches au pied de pale), donc: 2,40m/2 moins 1/2 de 30 cm = 1,05 mètres de longueur réelle de chaque pale.

Calcul (simplifié) d'une petite-éolienne

Supposons que nous disposons d'un petit alternateur automobile ou d'un générateur à courant continu non modifié (provenance directe du fournisseur) ou, d'un alternateur ou générateur modifié selon les principes exposés dans [Alternat.pdf et Moteurs en Generatrices CC / CA .pdf]

Votre alternateur d'origine possède une puissance de sortie d'environ **200 watts** soit : **13,5 volts * 15 ampères** = 202,25 Watts

Un rendement brut de **80 %** est envisageable.

Le tableau des puissances possibles dans le document [Auto-construction.] nous démontre qu'une hélice de 2 mètres de diamètre nous fournirait environ 270 watts avec un vent d'environ 30 km/h.

La place disponible sur notre voilier (pour l'exemple) est limitée à 1,70mètre. Par ailleurs nous avons fréquemment en mer des vents de 35 km/h (9,72 ms), voir plus.

Si nous diminuons le diamètre de notre hélice à environ 1,50 mètres de diamètre afin d'avoir suffisamment de jeu autour de notre hélice (question de sécurité) que pouvons nous espérer en puissance ?

Utilisons la formule:

0.150 (coefficient fixe à 40% de rendement) * **S** (surface hélice) * **V3** (vitesse du vent multipliée au cube) = **Watts**

Soit : **0.150 * 0.75 * 0.75 * 3.14 * 9.72 * 9.72 * 9.72 = 242 watts**

Notre diamètre d'hélice et sa qualité nous donnera en principe la puissance requise en autant que le vent que nous avons envisagé (35km/h) soit coopératif.

Supposons le même alternateur en station fixe, petite résidence secondaire par exemple.

Ici nous visons un vent plus faible de 30 km/h (8,33 m/s). Tentons l'expérience avec une hélice de 1,80 mètres

Reprenons notre formule de tout à l'heure.

0.150 * 0.90 * 0.90 * 3.14 * 8.33 * 8.33 * 8.33 = 220 W

Nous sommes très près de la puissance requise de 225 watts calculée précédemment. Nous pourrions calculer directement par la puissance au mètre carré soit **2,54 m2 X 0.0855** (rendement 40 %) = **217 W**. Le résultat est très proche à 0.5% !

Vous voyez qu'il n'est pas très compliqué de calculer avec une marge d'erreur sommes toutes assez faible les dimensions futures de notre future éolienne a hélice à rotation rapide.

Une autre technique est d'envisager le diamètre d'hélice minimum à partir des données techniques de la génératrice CC ou CA

Nous pouvons calculer :

Racine carrée de **2.P** (puissance en watts brut de la génératrice CC ou CA) divisé par **Pi (3.1416) * Rhô (1.25) * V3** (en mètres seconde) *

Cp (rendement souhaité, dans notre cas très conservateur 40 % !)

Cette formule va rebuter certains. Servez-vous alors des tableaux de (auto-construction) , c'est tellement plus simple !

A vos calculettes pour la puissance X au carré et Y au cube rêvée !...

Si l'on a un vent plus rapide l'on peut espérer plus d'énergie pour un diamètre donné d'ou, toute l'importance de ne pas sous-estimer les mesures de site, vitesse max instantanée, vitesse mensuelle-annuelle, etc.

Cette formule vous permet de réaliser quelquefois un "moulin" moins important que celui envisagé. Dès lors on constate que :

- **La vitesse du vent** moyenne/annuelle a son importance dans vos futurs calculs.
- **La taille optimale du rotor** envisagée est tributaire du facteur ci-dessus et la puissance envisagée.
- **Le rendement énergétique** au niveau de la surface balayée.

Pour Rappel: Cette formule s'établit ainsi : **P = 1/2 * R * S * V3** soit :

P = Puissance théorique récupérable au niveau de l'arbre de l'hélice ou du rotor.

1/2 = facteur de conversion.

R = (**rhô**) densité moyenne de l'air au niveau de la mer. (1.25kg/m3) Ce facteur est variable suivant l'altitude, à moins que vous habitez à plus de 1000 mètres d'altitude, conservez cette valeur.

S = Surface exposée au vent.

V3 = Vitesse du vent moyen considéré. (**V * V * V**).

E = Rendement de l'hélice estimé en %.

Quatre tableaux **Excel**, travail de collaboration de copains comme vous, sont maintenant disponibles en téléchargement direct (voir INDEX). Ces documents pourraient vous simplifier la vie pour vos calculs. Assurez vous que vous possédez le logiciel EXCEL pour exploiter ces documents

Calculer les bases physiques de son futur engin (rotor éolien)

Nous l'avons vu, les paramètres de base sont le diamètre, donc la surface exposée (**S**), donc la puissance souhaitée pour un vent donné. Cette formule s'exprime **$S = 2P / \rho * V^3 * c_p$**

2P est la puissance souhaitée .

ρ le poids de l'air (1,25 kg/m³)

V la vitesse du vent en m/s.

c_p est un coefficient qui varie de 0,80 (pour une excellente pale) à environ 0,25. Pour une pale de modeste qualité.

Les tables de profils disponibles sur le Web indiquent ces données. Adresses utiles plus bas

Par exemple:

Nous souhaitons une puissance de 500 watts avec un vent optimum de 35 km/h.

Nous choisissons un **c_p** de 0,32 qui est une bonne approche pour une auto-construction.

Quel sera le diamètre de notre hélice ?

$$S = 500 \text{ (watts)} * 2 / 1,25 (\rho) * 9,72 \text{ (ms)}^3 * 0,32 = 2,72 \text{ m}^2$$

Une simple formule nous permet de déterminer le rayon puis, le diamètre :

Racine carrée de **$S / 3,14$** (π)

Dans notre cas : $2,72 / 3,14 = 0,866$, racine carrée de **0,866 = 0,93** mètres, donc un diamètre de **1,86** mètres

En quelques secondes de calculs simples nous avons une bonne idée de la dimension de notre futur engin. Cette simple approche est applicable pour une éolienne dont l'alternateur ou le générateur sont couplés directement.

Si vous utilisez un alternateur ou un générateur non modifié, augmentez le diamètre de votre hélice de 10 à 20% afin de compenser les pertes mécaniques et, suivant l'importance des vents moyens de votre région.

Corde

La largeur d'une pale est la corde de la pale en un point donné. Cette largeur peut être fixe (pales à largeur fixe) ou variable, (pales à largeurs variables). En général on découpe de une pale en sections dans un rapport de 1 à 6, voire de 1 à 10 afin de déterminer les cordes qui sont habituellement décroissantes,

La surface pour une section précise et la circonférence pour un point donné, ce qui permet à chaque niveau de déterminer les rendements.

Quelques adresses utiles

<http://naca.larc.nasa.gov/>

<http://freespace.virgin.net/jan.bassett>

<http://www.aae.uiuc.edu/>

<http://aeromaniacs.free.fr>

http://www.aae.uiuc.edu/m-selig/ads/coord_database.html

<http://jean-claude.etiemble.com/tracfoil/accueilE.htm>

<http://aerolab.virtualave.net/airfoil/index.html>

<http://www.nasg.com/afdb/index-e.phtml>

<http://isoar.ca/%7Eandrewm/rc/airfoils/>

CALCULER LES CORDES DE VOTRE HÉLICE.

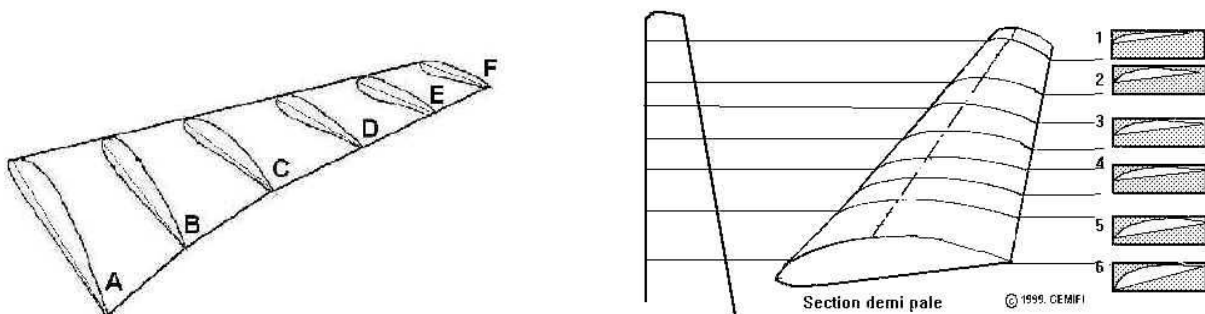
Les cordes de votre hélice peuvent se calculer aussi aisément. Si votre choix se porte sur une hélice à cordes (largeurs) fixes et calage fixe (le plus simple pour débuter) vous ne tiendrez compte que de la corde moyenne du rayon d'une pale. Par contre, si vous envisagez une pale à corde variables, ce qui est le plus recommandé pour une hélice efficace, vous opterez pour un calcul légèrement plus élaboré.

L'image ci-dessus à droite vous permet de visualiser les angles respectifs par rapport aux différentes cordes. L'image de gauche vous montre comment "découper" votre pale en segments pour vos calculs, ici six segments ou plus.

Selon la majorité des auteurs de technique éolienne, la formule la plus généralement acceptée est celle de Mark's Standards qui détermine ces paramètres: soit **$C = 8 * 3,14 (\pi) * r * 1 - \cos \theta / B * c_p$**

C : C' est la corde pour un segment déterminé. **r** : C' est le rayon du segment (par rapport à l'axe). **B** : C' est le nombre de pales.

c_p : Varie de 0,80 (pale très performante) à 0,25 pour une modeste pale.. **$1 - \cos \theta$** . Cette valeur se trouve sur la majorité des sites destinés aux profils de pales, en général θ , ou se calcule simplement à l'aide de tables ou calculatrice



Valeurs λ .

Plusieurs copains "planchent" sur les valeurs λ . Voici quelques données utiles. Ces valeurs s'appliquent en principe pour tout rotor éolien.

Pour rappel :

$$\text{Rapport de vitesse} = \lambda = \frac{\Omega \times r}{V}$$

$$\begin{aligned} \lambda 1,0 &= \lambda 30,4^\circ & \lambda 1,2 &= \lambda 26,6^\circ & \lambda 1,4 &= \lambda 23,5^\circ & \lambda 1,7 &= \lambda 20,3^\circ \\ \lambda 2,0 &= \lambda 17,9^\circ & \lambda 2,5 &= \lambda 14,5^\circ & \lambda 3,0 &= \lambda 12,3^\circ & \lambda 4,0 &= \lambda 9,3^\circ \\ \lambda 5,0 &= \lambda 7,5^\circ & \lambda 6,0 &= \lambda 6,3^\circ & \lambda 8,0 &= \lambda 4,9^\circ & \lambda 10 &= \lambda 4,0^\circ \end{aligned}$$

Déterminer le diamètre de l'hélice, sa puissance, sa vitesse de rotation.

Les tableaux disponibles (auto-construction), et les exemples vous permettent de calculer le diamètre idéal de votre hélice.

Par exemple :

Une hélice de 1,40 mètres de diamètre. Quels seront ses performances (théorie de base)

Surface 3,1416 * rayon au carré. Soit : 0,70m * 0,70 * 3,1416 = 1,539 mètres carrés de surface.

Vitesse du vent (Exemple, 35 km/h) soit : 35000 mètres DIVISÉ PAR 3600 (3600 secondes dans une heure) égal 9,72 mètres seconde.

DONC : 9,72 * 9,72 * 9,72 = 918 (La valeur 918 dans notre cas est un coefficient variable)

Calculons selon notre formule habituelle : 0.150 (rendement minimal estimé de 40%) * 1,539 (m2) * 918 (coefficient) = 210 watts (puissance mécanique envisageable).

Ce diamètre d'hélice pourrait donc actionner une génératrice CC ou CA de petite puissance de 180 watts (13,5 volts a son régime optimum calculé ici à 35 km/h)

Vitesse de rotation de l'hélice

Une hélice d'amateur aura un rendement de 4 à 6 voire plus par rapport à la vitesse du vent. Cela veut dire qu'avec un vent de 35km/h l'extrémité de l'hélice verra une vitesse de 4 à 6 fois plus élevée que celle du vent.

Prenons pour exemple un rapport de qualité de 5.

A 35 km/h le vent souffle nous l'avons vu avec une vélocité de 9,72 mètres par seconde. Le diamètre choisi dans notre cas : 1,40 mètres.

Notre formule devient :

$$\begin{aligned} &9,72 \text{ (vitesse vent)} * 5 \text{ (rendement)} * 60 \text{ (secondes)} / 1,40 \text{ mètres (diamètre hélice)} * 3,1416 \text{ (pi)} \\ \text{donc : } &\frac{9,72 \times 5 \times 60}{1,40 \times 3,1416} = 2916 = 664 \text{ tours minute} \end{aligned}$$

A 664 tours/minute votre alternateur ou génératrice CC devrait fournir une bonne puissance et s'être déjà auto-amorcé si vous avez choisi la solution de rebobinage suggérée dans Alternat.pdf pour un alternateur auto ou, la multiplication mécanique de la vitesse de rotation.

Si par chance votre rapport de qualité d'hélice de valeur de 5 passait à 6 la vitesse serait de 796 tours/minute d'où l'absolue nécessité de bien soigner les pales d'hélice.

Vitesse périphérique

Bien que le rapport de vitesse périphérique en extrémité de pale est un critère de qualité (voir plus haut), il est cependant un paramètre à connaître pour éviter une "survitesse" en bout de pales, survitesse qui peut devenir gênante au niveau bruit ou usure prématurée.

>>> De manière générale on se tiendra au dessous de 300 km/h. <<<

Reprenons l'exemple de notre pale de 1,40mètres de diamètre.

Quel sera sa vitesse périphérique en kilomètres/heure ?

Notre calcul sera : $V = \pi (3,14) * d \text{ (diamètre)} * n \text{ (vitesse de rotation)} / 60 \text{ (secondes)}$ soit :

$$3,14 * 1,40 * 664 / 60 = 48,64 \text{ mètres/seconde.}$$

Donc 48,64 m/s * 3600 (secondes dans une heure) = 175 kilomètres heure (valeur arrondie)

Si la vitesse du vent est de 9,73 mètres seconde et que l'extrémité de notre pale circule à 48,73 m/s, notre rapport initial demeurant à 5. Donc:

$$48,73 / 9,72 = \text{rapport de vitesse de } 5,01.$$

Nous retrouvons notre valeur de rapport de qualité initialement calculée ou, envisagée !

Force centrifuge.

La force centrifuge exercée sur les pales peut devenir dangereuse mécaniquement. Bien des copains ont eus la désagréable surprise de voir leurs pales arrachées lors de vents très violents. La tenue mécanique ayant été négligée ! Il est facile de connaître cette force, par conséquent remédier le cas échéant AVANT le désastre.

La force s'exprime dans ce cas : $F = P/g * V^2/r = m V^2/r$

Reprenons l' exemple de la vitesse périphérique à 35 km/h, celle-ci étant de 48,72 m/s (rapport 1 à 5)

Supposons que chacune de nos pales pèse **400** grammes, quel sera la force exercée à **664** tours minute ?

Notre calcul devient :

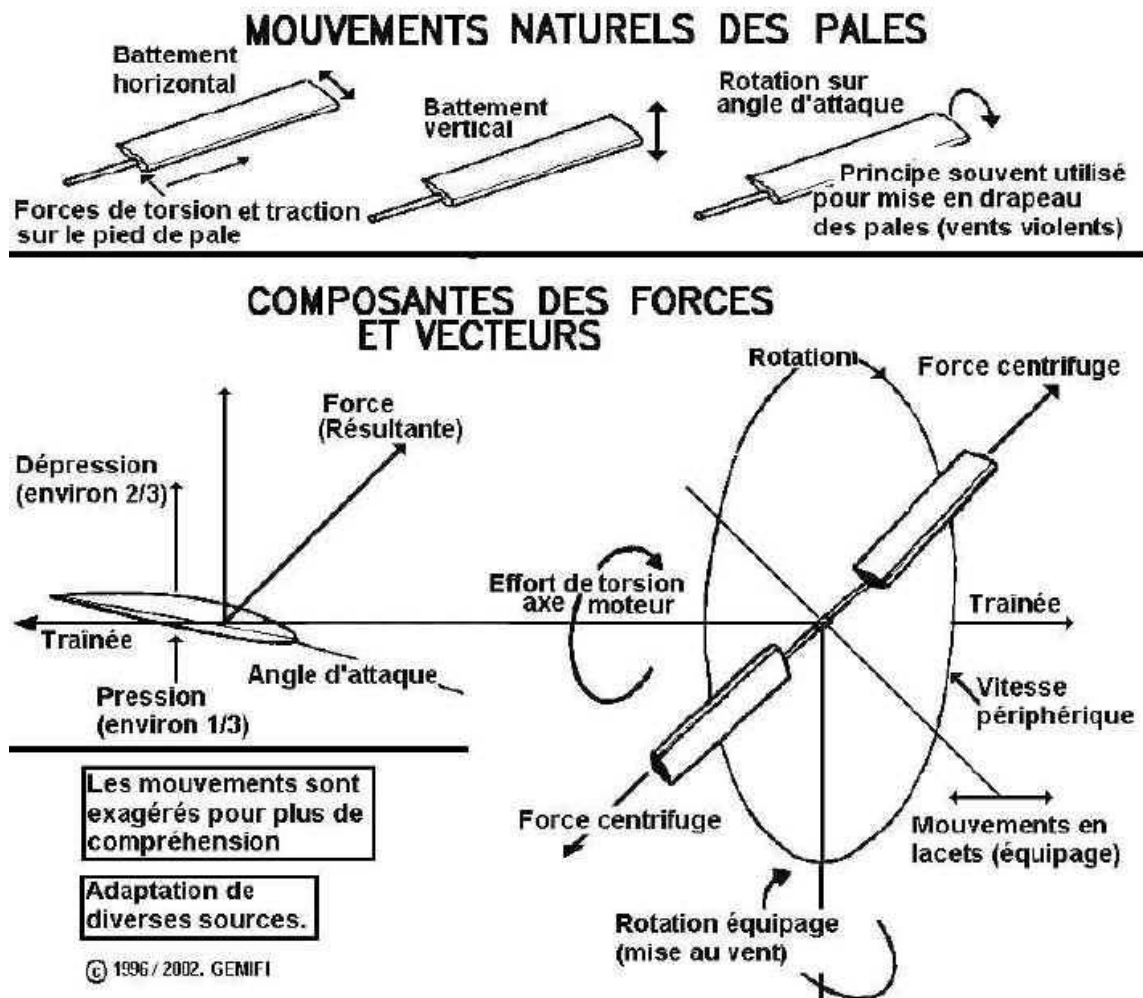
400 (grammes) / **9,81** (accélération de la pesanteur) * **2376** (Vitesse en m/s au carré) / **0,70** (rayon)

Soit : **0,400 / 9,81 = 0,0407 * 2373 / 0,70 = 3390** donc : **0,0407 * 3390 = 13 7** kilos (valeur arrondie)

Si cette valeur peut paraître modeste pour une petite éolienne il n'en demeure pas moins que tout le soins doit-être apporté tant à la qualité des matériaux utilisés qu'aux attaches de pales souvent sous évaluées.

Forces en jeu

Le tableau ci-dessous représente les différences forces et contraintes d'une éolienne. Les exemples sont exagérés pour une meilleure compréhension des phénomènes.



L'amateur ne devrait pas avoir a trop se préoccuper de toutes ces forces mises en jeu dans une mini-éolienne auto-construite. Cependant il semble adéquat de connaître (ne serais-ce que pour information) ces différents paramètres.

Bons vents a tous. Moulinette