

ROBIPLAN

ETUDE SCIENTIFIQUE, TECHNOLOGIES ET RENDEMENTS

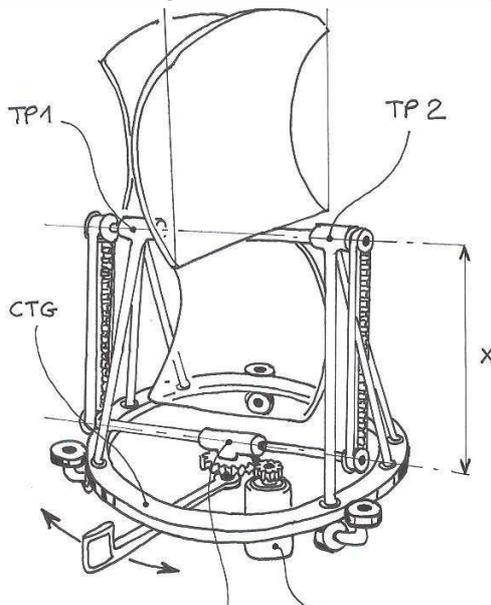
9 février 2009



<http://sycomoreen.free.fr>

La turbine éolienne Rotative Bi-Plan (ROBIPLAN), invention originale de *Pascal HA PHAM*, est susceptible d'être placée sur les habitations, en pleine nature ou en milieu urbain pour générer une puissance mécanique, puis électrique. L'invention possède une simplicité de construction remarquable et une grande aptitude à démarrer sous de très faibles vents, tout comme à supporter des vents forts.

L'Inventeur a déjà construit et testé deux prototypes très simples et améliorables, nommés **Robiplan** :



La ROBIPLAN exploite toute une gamme de vitesses de vent, mais son **rendement, défini comme le rapport entre la puissance récupérée et la puissance cinétique incidente** n'est pas encore connu. La présente étude vise à en estimer un ordre de grandeur : la mécanique des fluides étant particulièrement complexe, *il faudra par la suite confirmer ces estimations par des simulations numériques d'écoulement à éléments finis, et de préférence et surtout, par des mesures en soufflerie.*

Beaucoup d'informations et liens sur les inventions de Pascal HA PHAM disponibles sur :

http://sycomoreen.free.fr/syco_annonces.html

<http://www.econologie.com/forums/turbine-eolienne-rotative-bi-plan-robiplan-vt4872.html>

SOMMAIRE

<i>I. Problématique de cette note scientifique</i>	3
I.1. Aspect juridique.....	3
I.2. Le contexte	3
I.2.a) Histoire de l'énergie éolienne.....	3
I.2.b) L'énergie en 2009 et après : quid de l'éolien ?	3
I.3. La technologie actuelle des éoliennes	5
<i>II. Modélisation de la ROBIPLAN</i>	7
II.1. Cinématique	7
II.1.a) Paramétrage du mouvement.....	7
II.1.b) Coordonnées des points des pales.....	8
II.1.d) Vecteur rotation instantanée des pales	9
II.1.e) Vitesses instantanées des points de pales.....	9
II.2. Vitesses relatives du vent par rapport aux points de pale	9
II.2.a) Vitesse absolue du vent.....	9
II.2.b) Vecteurs normaux unitaires faisant face au vent	9
II.2.c) Modèle de déviation des veines de fluides.....	9
II.2.d) Vitesse relative du vent par rapport aux points de pale	11
II.3. Puissance extraite	11
II.3.a) Calcul de la force induite par la déviation de l'écoulement.....	11
II.3.b) Puissance sur l'élément de pale	13
II.3.c) Puissance totale	13
II.4. Couple mécanique de la ROBIPLAN	13
<i>III. Résultats des simulations</i>	13
III.1. Une seule éolienne ROBIPLAN	13
III.2. Deux éoliennes ROBIPLAN.....	14
III.3. Comparaison par rapport aux technologies éoliennes usuelles.....	16
III.3.a) Par rapport aux éoliennes multipales à axe horizontal	16
III.3.b) Par rapport aux éoliennes de pompage, moulins, et turbines Savonius ou Darreius.....	17
III.4. Productions annuelles	18
III.4.a) Statistique du vent.....	18
III.4.b) Puissance cinétique incidente	18
III.4.c) Rendement des éoliennes.....	18
III.4.d) Production annuelle	20
CONCLUSION	22
DOCUMENTS RELATIFS	24

I. Problématique de cette note scientifique

I.1. Aspect juridique

La présente note est rédigée par SYCOMOREEN SARL sur la demande de Pascal HA PHAM, à titre de collaboration amicale et sans engagement réciproque.

I.2. Le contexte

I.2.a) Histoire de l'énergie éolienne

L'homme aurait commencé à apprivoiser le vent avec des *voiles montées sur des radeaux en mer dès 4000 avant J-C*. L'énergie éolienne a depuis bien longtemps passionné les hommes. En Europe, les *premiers moulins à vent sont construits vers 1100* au Moyen-Âge et utilisés pour pomper l'eau et moulinier le blé. De l'Antiquité à des époques récentes, des éoliennes convertissent le vent en énergie mécanique exploitée pour des usages multiples :

- meulage du grain
- pompage de l'eau et irrigation/assèchement de zones trop sèches/humides
- abreuvement du bétail
- plus récemment, production d'énergie électrique.

En 1888, Charles F. Brush construit aux Etats-Unis une petite éolienne pour alimenter ses ateliers en électricité, avec un stockage par batterie d'accumulateurs. Elle comportait 144 pales et un rotor de 17m de diamètre.

La première éolienne « industrielle » génératrice d'électricité est développée par le Danois Poul La Cour *en 1890*, pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse. Dans les années suivantes, il crée l'éolienne Lykkegard, dont il vend 72 exemplaires en 1908.

La première turbine à courant alternatif date des années 30. Une éolienne expérimentale de 800 kVA fonctionne de 1955 à 1963 en France, à Nogent-le-Roi dans la Beauce. Elle avait été conçue par le Bureau d'Études Scientifiques et Techniques de Lucien Romani et exploitée pour le compte d'EDF. Simultanément, deux éoliennes Neyrpic de 130 et 1 000 kW furent testées par EDF à Saint-Rémy-des-Landes (Manche). Il y eut également une éolienne raccordée au secteur sur les hauteurs d'Alger (Dély-Ibrahim) en 1957.

Jusqu'au milieu du XXe siècle, l'éolien est utilisé essentiellement en sites isolés. *Il est vivement concurrencé par le charbon (machine à vapeur), le moteur à explosion et l'expansion des réseaux électriques centralisés*. C'est dans les années 70, avec la première crise pétrolière qu'il connaît *un nouvel essor, et surtout ces 15 dernières années : le développement très rapide d'éoliennes tri pales de plus en plus puissantes et performantes* est essentiellement le fait des industries européennes (Danemark puis Allemagne). La capacité installée mondiale passe de 4800 MW en 1995 à 74 000 en 2006 avec des taux de croissance annuelle oscillant entre 30 et 45%.

I.2.b) L'énergie en 2009 et après : quid de l'éolien ?

Energie éolienne et réseaux électriques

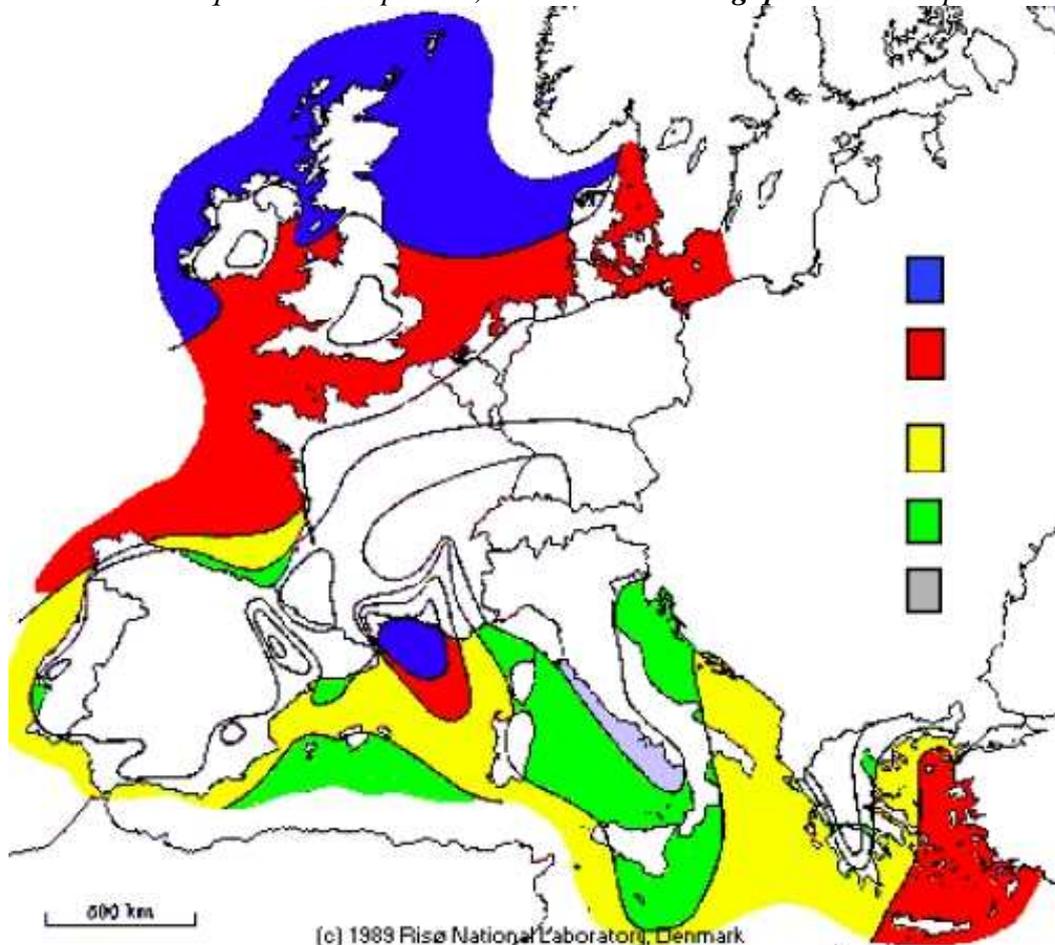
L'énergie éolienne fut longtemps handicapée par son intermittence très peu prévisible et les coûts des batteries électriques nécessaires pour stocker temporairement la production. Toutefois, de nos jours, de grands réseaux électriques interconnectés, notamment en Europe et aux Etats-Unis, raccordent des centrales à énergies renouvelables de puissance irrégulière. Ce sont les champs d'éoliennes qui connaissent actuellement la plus forte progression.

La part actuelle de l'éolien dans le mix électrique

Cet essor très significatif de l'éolien ne doit pourtant pas masquer son caractère marginal dans le mix électrique mondial (environ 0,5%), bien que l'énergie éolienne soit **assez abondante et renouvelable** (engendrée par le Soleil). **A ce titre, les éoliennes sont l'une des technologies-clé pour réduire l'effet de serre tout en favorisant une indépendance énergétique** vis-à-vis de toutes les énergies fossiles, aussi bien les hydrocarbures (charbon, pétrole et gaz) que le minerai d'uranium.

La France et l'Europe : de grandes ressources sous-exploitées

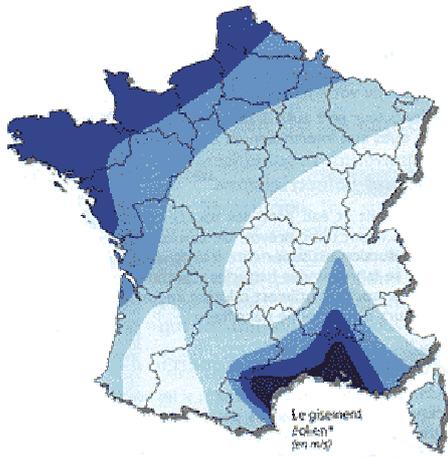
L'Europe et en particulier la France jouissent d'une situation très favorable car elles bénéficient de ressources abondantes en biomasse, en éolien et en force hydraulique avec une forte culture de sciences, d'industrie et d'ingénierie : les progrès dans le stockage/déstocage de l'énergie (par diverses voies), les centrales hydroélectriques de pompage et turbinage (barrage de grande hydraulique, STEP), la capacité de régulation des autres centrales à combustibles (baisse puis reprise de production), et l'émergence de réseaux décentralisés intelligents (Smart Grid) *ouvrent la voie à l'injection sur le réseau de productions propres et intermittentes en synergie (comme celles issues du vent) à des coûts économiquement acceptables, mais surtout **stratégiquement** indispensables.*



(c) 1989 Risø National Laboratory, Denmark

	10 m		25 m		50 m		100 m		200 m	
	m/s	W/m ²								
Blue	> 8	> 600	> 8,5	> 700	> 9	> 800	> 10	> 1100	> 11	> 1500
Red	7 à 8	350 à 600	7,5 à 8,5	450 à 700	8 à 9	600 à 800	8,5 à 10	650 à 1100	9,5 à 11	900 à 1500
Yellow	6.0 à 7.0	250 à 300	6.5 à 7.5	300 à 450	7.0 à 8.0	400 à 600	7.5 à 8.5	450 à 650	8.0 à 9.5	600 à 900
Green	4.5 à 6.0	100 à 250	5.0 à 6.5	150 à 300	5.5 à 7.0	200 à 400	6.0 à 7.5	250 à 450	6.5 à 8.0	300 à 600
Grey	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 6.0	< 250	< 6.5	< 300

Ressources éoliennes marines et terrestres de l'Europe (moyenne annuelle de la vitesse du vent)



Bocage dense, bois/banlieue	Risèe campagne, obstacles épars	Prairies planes, quelques buissons	Lacs, mer	Crêtes*, collines	
<3,5	<4,5	<5,0	<5,5	<7,0	Zone 1
3,5 - 4,5	4,5 - 5,5	5,0 - 6,0	5,5 - 7,0	7,0 - 8,5	Zone 2
4,5 - 5,0	5,5 - 6,5	6,0 - 7,0	7,0 - 8,0	8,5 - 10,0	Zone 3
5,0 - 6,0	6,5 - 7,5	7,0 - 8,5	8,0 - 9,0	10,0 - 11,5	Zone 4
>6,0	>7,5	>8,5	>9,0	>11,5	Zone 5

* Vitesse du vent à 80 mètres au-dessus du sol en fonction de la topographie
 ** Les zones montagneuses nécessitent une étude de gisement spécifique

Gisement éolien en France



Puissance en W/m ²		
Plaine	Côte maritime	Collines
> 500	> 700	> 1800
300-500	400-700	1200-1800
200-300	250-400	700-1200
100-200	150-250	400-700
< 100	< 150	< 400

Source : IUP ANVAREM 1996 - ADEME

Cartographies des ressources terrestres éoliennes de la France

Les hydrocarbures et le nucléaire : les illusions dangereuses

En dépit des discours de circonstances sur des réserves jugées abondantes, et des technologies d'extraction toujours plus performantes, les productions pétrolières dans toutes les régions du monde ont stagné et souvent diminué en 2007/début 2008 (et ce avant la crise économique de l'automne 2008) alors que la demande ne cessait de s'intensifier et que la flambée sans précédent du prix du baril incitait fortement à extraire du pétrole de manière à dégager des profits exceptionnels.

D'ores et déjà, la surconsommation des pays développés (USA, Europe, Golfe Persique, Russie) et l'essor économique de pays très densément peuplés (Chine, Inde, Amérique du Sud) se heurtent à l'implacable raréfaction des hydrocarbures facilement exploitables, et pour l'avenir, tout simplement extractibles. Les marchés ne s'y sont pas trompés avec 150 \$ le baril en été 2008 : record historique qui ne demande qu'à être bientôt pulvérisé ...

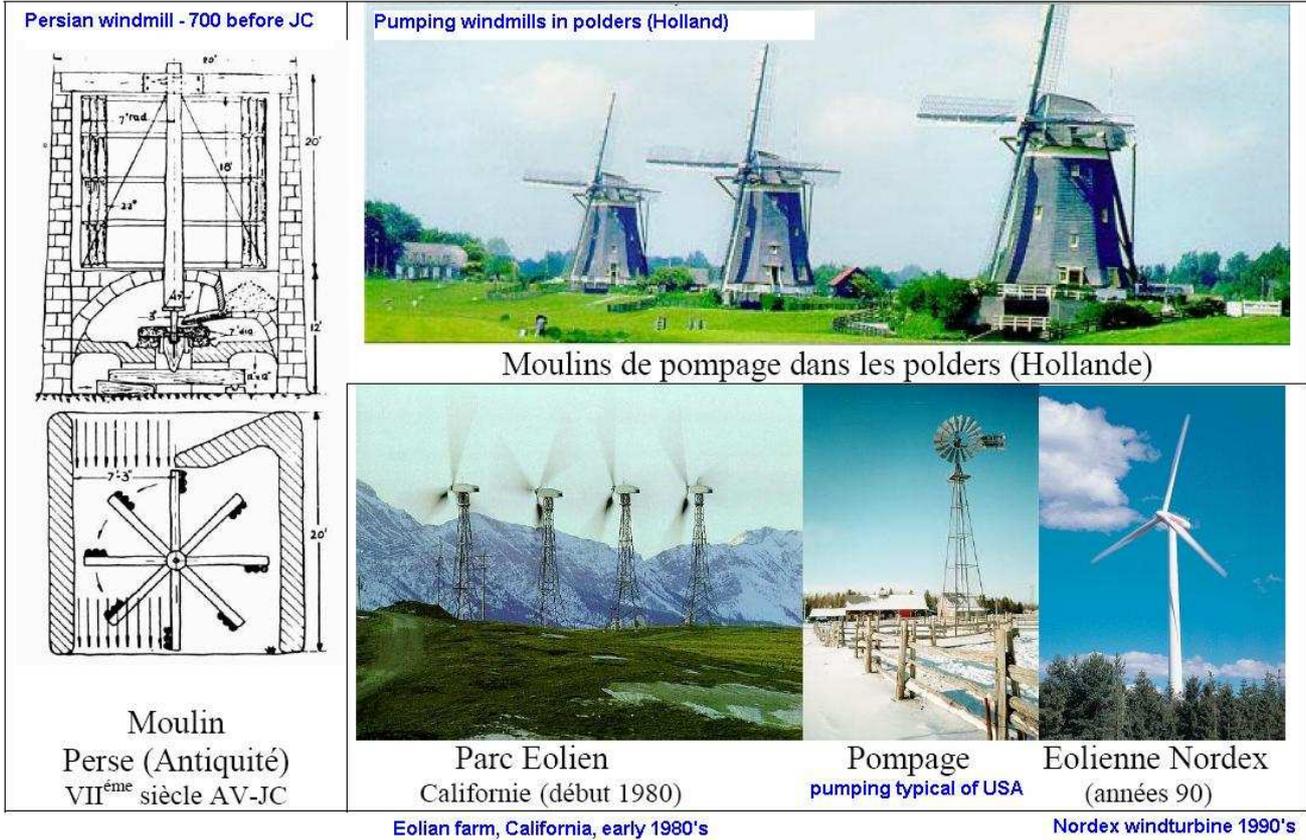
C'est précisément ces enjeux financiers qui rendent hautement probable la combustion des réserves restantes en hydrocarbures, à savoir le pétrole conventionnel, puis les pétroles non conventionnels (sables bitumineux, offshore profond...), puis tout le gaz et charbon encore à disposition. Au risque de plonger la Terre dans le redoutable inconnu d'un réchauffement mondial de plus de 6°C à l'échelle d'un siècle, voire 10°C pour le siècle suivant.

On entend en écho les sirènes de l'énergie nucléaire « décarbonée » : elle ne pourra assurer qu'une transition bien éphémère et restreinte aux pays technologiquement développés et politiquement stables. Par ailleurs, le nucléaire est une ressource éminemment fossile : si le mix électrique français (plus de 80% nucléaire) s'étendait au monde, le schéma connu pour les hydrocarbures se reproduirait fatalement à moyen-terme (<50 ans), à savoir :

1. Epuisement rapide des ressources en uranium (+ risque de la prolifération de la bombe A)
2. Guerres pour l'appropriation du minerai par les grandes puissances militaires
3. Désastres écologiques (incidents et accidents nucléaires, stockage des déchets radioactifs).

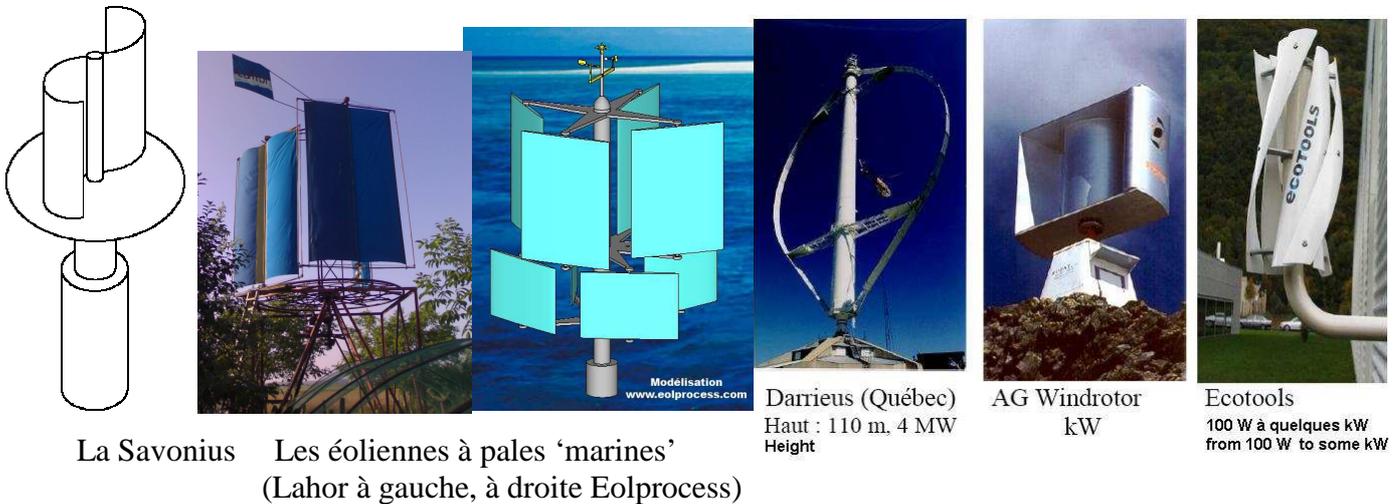
Le monde actuel est **post-peak-oil** : c'est le moment de choisir l'**Avenir**. Un avenir meilleur – économique, social et écologique – ne peut faire l'impasse sur **un mix énergétique à dominante renouvelable**. Donc l'énergie éolienne doit faire partie de cet Avenir, parmi les autres énergies renouvelables (hydraulique, solaire, biomasse, géothermie, marée/houle).

I.3. La technologie actuelle des éoliennes



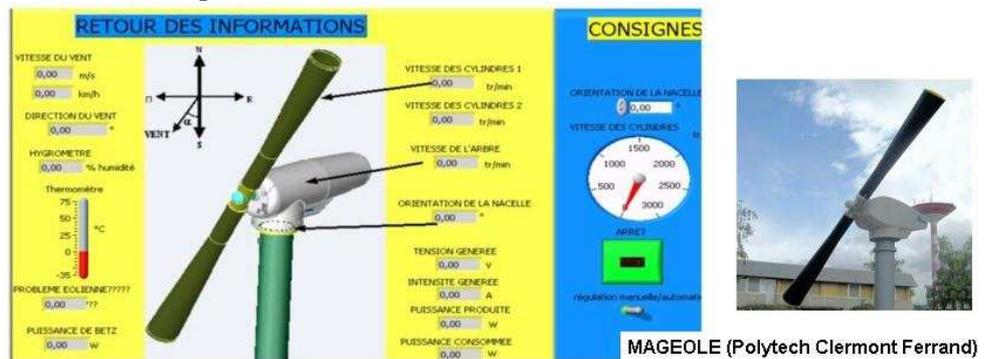
La figure ci-dessus retrace les évolutions majeures de la technologie éolienne. Actuellement, ce sont les éoliennes tri pales à axe horizontal qui s'imposent, généralement disposées dans des parcs éoliens.

Néanmoins, des technologies à axe vertical se sont développées en parallèle à plus petite échelle:



Mais aussi des éoliennes encore plus rares à effet Magnus (ci-contre).

D'autres projets proposent divers engins flottants et rotatifs à hautes altitudes, retenus par câble...

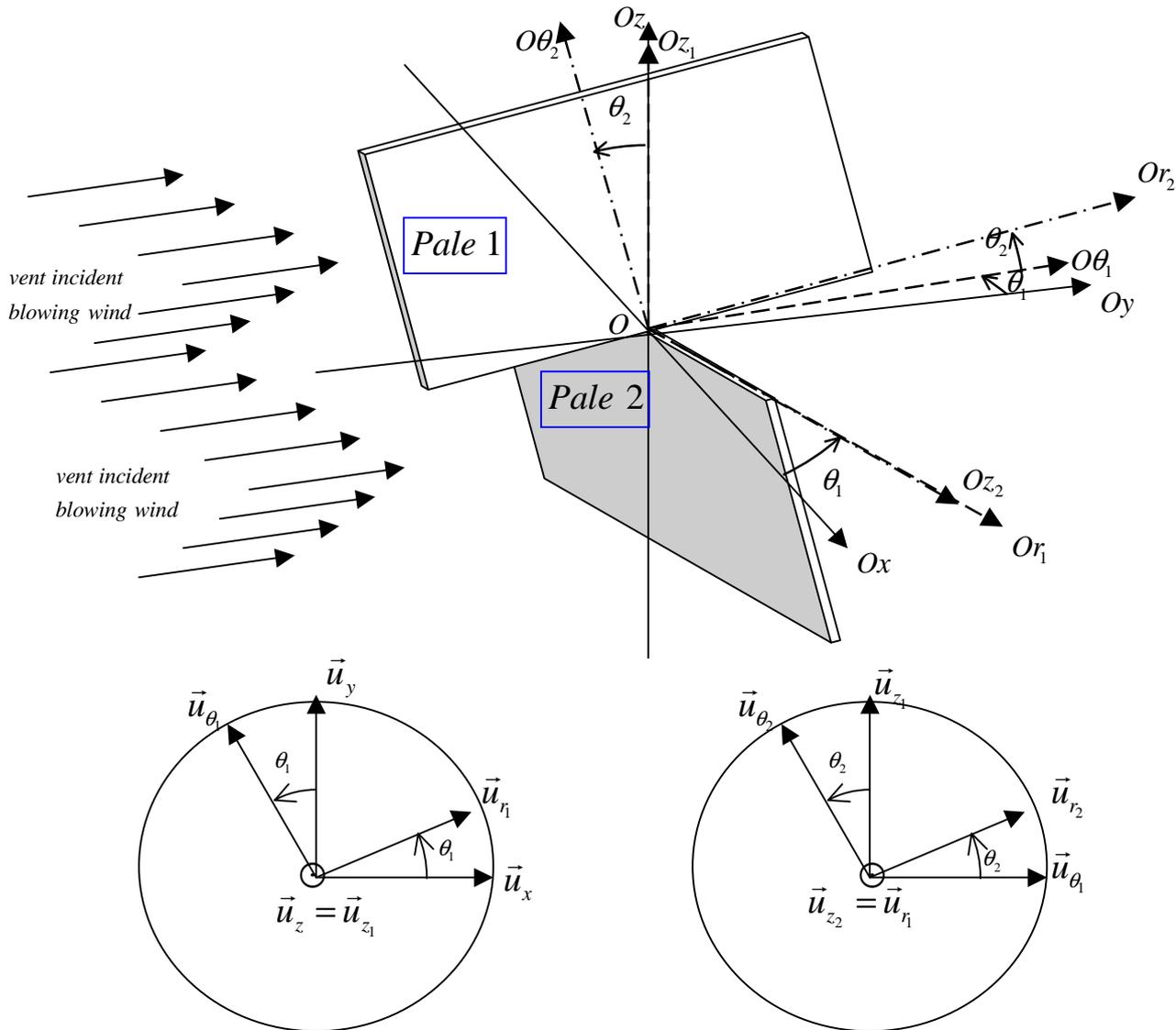


II. Modélisation de la ROBIPLAN

II.1. Cinématique

II.1.a) Paramétrage du mouvement

Le mouvement des pales de la ROBIPLAN résulte de la composition de 2 mouvements homocinétiques de rotation pure autour de 2 axes orthogonaux nécessitant le paramétrage suivant :



On en déduit les relations de projections entre les vecteurs unitaires suivants :

$$\begin{aligned}
 \vec{u}_{r_1} &= \cos \theta_1 \vec{u}_x + \sin \theta_1 \vec{u}_y & \vec{u}_{r_2} &= \cos \theta_2 \vec{u}_{\theta_1} + \sin \theta_2 \vec{u}_{z_1} \\
 \vec{u}_{\theta_1} &= -\sin \theta_1 \vec{u}_x + \cos \theta_1 \vec{u}_y & \vec{u}_{\theta_2} &= -\sin \theta_2 \vec{u}_{r_1} + \cos \theta_2 \vec{u}_{z_1} \\
 \vec{u}_{z_1} &= \vec{u}_z & \vec{u}_{z_2} &= \vec{u}_{r_1}
 \end{aligned}$$

avec les relations $\theta_1 = \omega t = \theta_2$ où t désigne le temps et ω la vitesse de rotation de la ROBIPLAN.

A partir de ces relations, on peut calculer les coordonnées de n'importe quel point des pales ainsi que le vecteur rotation instantanée des pales.

II.1.b) Coordonnées des points des pales

La pale n°1 se déploie dans l'espace le long des axes \vec{u}_{r_1} et \vec{u}_{θ_1} . Nous appellerons a la demi-largeur de pale et b la hauteur de pale. Ainsi, tout point M_1 de la pale n°1 possède un vecteur position :

$\vec{OM}_1 = x_1 \vec{u}_{r_1} + y_1 \vec{u}_{\theta_1}$, qui une fois projeté dans la base fixe $(O; \vec{u}_x; \vec{u}_y; \vec{u}_z)$, se réécrit :

$$\vec{OM}_1 = (-x_1 \cos \theta_2 \sin \theta_1 + y_1 \sin \theta_2 \sin \theta_1) \vec{u}_x + (x_1 \cos \theta_2 \cos \theta_1 - y_1 \sin \theta_2 \cos \theta_1) \vec{u}_y + (x_1 \sin \theta_2 + y_1 \cos \theta_2) \vec{u}_z$$

pour x_1 et y_1 allant respectivement de $-a$ à a et de 0 à b

La pale n°2 se déploie dans l'espace le long des axes \vec{u}_{r_2} et \vec{u}_{θ_2} . Nous appellerons a la demi-largeur de pale et b la hauteur de pale. Ainsi, tout point M_2 de la pale n°2 possède un vecteur position :

$\vec{OM}_2 = x_2 \vec{u}_{r_2} + y_2 \vec{u}_{\theta_2}$, qui une fois projeté dans la base fixe $(O; \vec{u}_x; \vec{u}_y; \vec{u}_z)$, se réécrit :

$$\vec{OM}_2 = (x_2 \cos \theta_1 + y_2 \sin \theta_2 \sin \theta_1) \vec{u}_x + (x_2 \sin \theta_1 - y_2 \sin \theta_2 \cos \theta_1) \vec{u}_y + (y_2 \cos \theta_2) \vec{u}_z$$

pour x_2 et y_2 allant respectivement de $-a$ à a et de $-b$ à 0

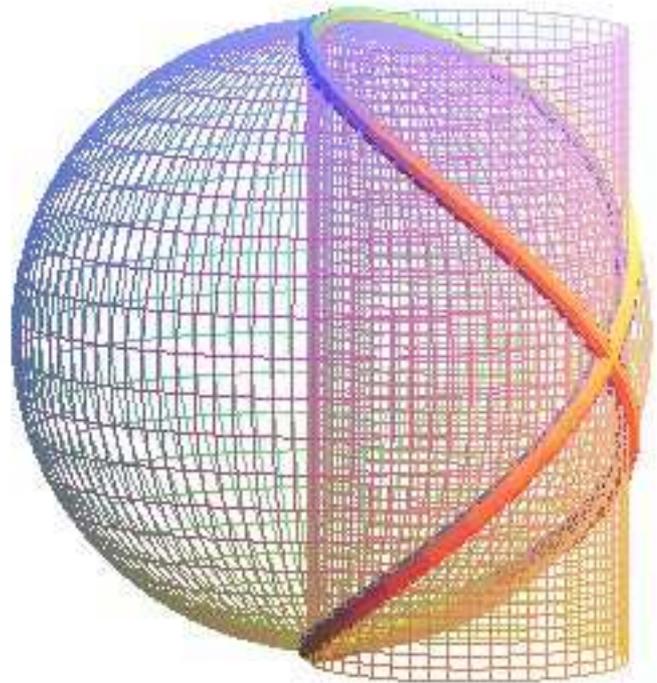
Les trajectoires des points de pales sont *des courbes de Viviani* puisque la cinématique de la ROBIPLAN est fondée sur l'égalité entre l'angle de latitude et celui de longitude à rayon constant.

Un peu d'histoire :

Les trajectoires de Viviani furent étudiées en 1692 par les mathématiciens ROBERVAL et VIVIANI. Elles peuvent avoir plusieurs définitions mathématiques ; l'une d'elle est « *courbe sphérique dont l'angle de latitude vaut celui de la longitude* ». Avant la ROBIPLAN, on n'en connaissait pas d'application technologique dans le monde éolien.

Indépendamment de ces anciens travaux, en 2007 Pascal HA PHAM imagine de faire travailler face au vent 2 pales orthogonales reliées en un point fixe par le milieu de leur côté allongé. En tournant autour de ce point fixe, les pales se placent et s'effacent périodiquement face au vent, sans jamais freiner le mouvement. Pascal HA PHAM choisit une synchronisation par courroie et couple conique.

Ainsi, la *cinématique engendrée est sphérique et conserve l'égalité entre la latitude et la longitude des points de pales : cinématique de Viviani.*



Une courbe de Viviani (source : l'excellent site <http://www.mathcurve.com>)

II.1.d) Vecteur rotation instantanée des pales

C'est la composition de deux rotations θ_1 autour de \vec{u}_z et θ_2 autour de \vec{u}_1 , ainsi ;

$$\vec{\Omega} = \frac{d\theta_1}{dt} \vec{u}_z + \frac{d\theta_2}{dt} \vec{u}_1 \text{ soit en projection sur la base fixe : } \vec{\Omega} = \frac{d\theta_2}{dt} \cos \theta_1 \vec{u}_x + \frac{d\theta_2}{dt} \sin \theta_1 \vec{u}_y + \frac{d\theta_1}{dt} \vec{u}_z$$

II.1.e) Vitesses instantanées des points de pales

Comme O est un point fixe, elles se déduisent directement du produit vectoriel :

$$\vec{v}(M_1) = \vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{OM_1} \text{ et } \vec{v}(M_2) = \vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{OM_2}$$

II.2. Vitesses relatives du vent par rapport aux points de pale

II.2.a) Vitesse absolue du vent

Le vent sera supposé soufflant uniformément le long de Oy avec une vitesse w face à la ROBIPLAN.

Ainsi le vecteur vent est avant tout impact sur les pales : $\vec{w} = w \vec{u}_y$

II.2.b) Vecteurs normaux unitaires faisant face au vent

Pour la pale n°1, la normale face au vent n'est pas constante au cours du mouvement :

Lorsque $\theta_1 \in [0; \pi]$, il s'agit de $\vec{N}_1 = -\vec{u}_{z_2} = -\vec{u}_1 = -\cos \theta_1 \vec{u}_x - \sin \theta_1 \vec{u}_y$

Lorsque $\theta_1 \in [\pi; 2\pi]$, il s'agit de $\vec{N}_1 = +\vec{u}_{z_2} = +\vec{u}_1 = \cos \theta_1 \vec{u}_x + \sin \theta_1 \vec{u}_y$

Pour la pale n°2, la normale face au vent est constante au cours du mouvement :

Quels que soient θ_1, θ_2 , il s'agit de $\vec{N}_2 = -\vec{u}_{r_2} = (\cos \theta_2 \sin \theta_1) \vec{u}_x - (\cos \theta_2 \cos \theta_1) \vec{u}_y - (\sin \theta_2) \vec{u}_z$

II.2.c) Modèle de déviation des veines de fluides

Le but est de trouver le vecteur directeur du fluide après sa déviation pour tout point d'impact sur les pales. *Il faut donc faire des choix et des simplifications délibérées, mais comportant l'essentiel des phénomènes physiques d'impact du fluide sur les pales.*

L'écoulement est très fortement subsonique : même pour des conditions de tempête à 50 m/s, le nombre de Mach reste inférieur à $Ma = 50/340 < 0.15$. Considérer l'écoulement incompressible

revient à faire une erreur relative de $100 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+Ma^2}} \right) \approx 1\%$. L'équation de Navier Stokes pour le

fluide incompressible est donc adaptée : $\rho \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \overrightarrow{grad})(\vec{v}) \right] = \vec{f}_v - \overrightarrow{grad}(p) + \eta \cdot \Delta \vec{v}$

Le nombre de Reynolds $Re = \frac{\rho_{air} v_{air} L_{pale}}{\eta_{air}} \approx 5\,000\,000$ est élevé. Par ailleurs, la pression est sensiblement

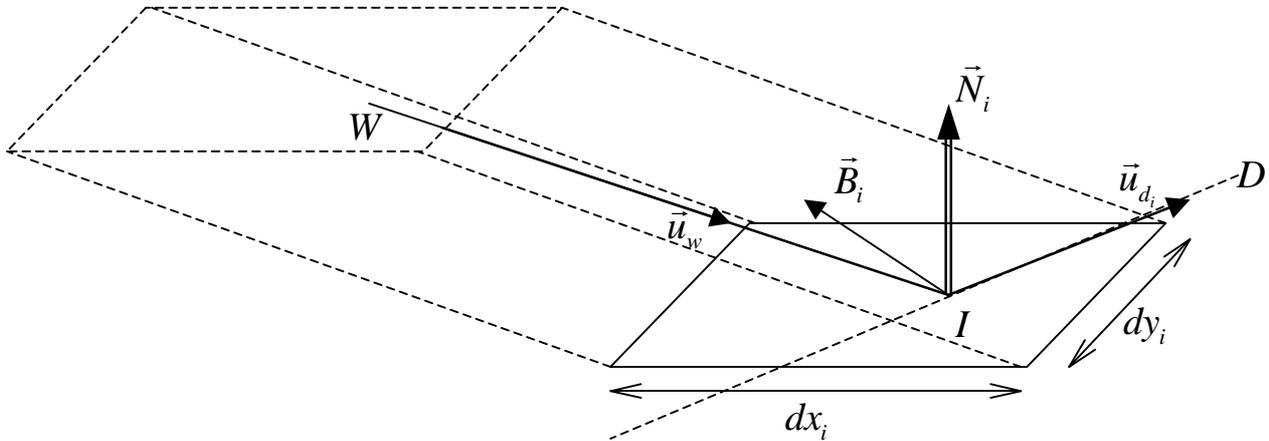
uniforme et les forces volumiques de pesanteur négligeables devant les forces d'impact, si bien que

l'on peut négliger tous les termes de droite : $\rho \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \overrightarrow{grad})(\vec{v}) \right] \approx \vec{0}$

Même en situation stationnaire, l'équation précédente reste non linéaire. Il ne s'agira donc pas ici de modéliser finement les déviations des veines de fluides ; ceci nécessiterait un code CFD (*Computing Fluid Dynamics*) très lourd en temps de calcul, en particulier si l'on veut prendre en compte le mouvement des pales, le décollement du fluide et les turbulences. **Au contraire, on s'attache à trouver un modèle vectoriel intrinsèque** (indépendant de tout système de coordonnées) **de déviation, sur la base d'un écoulement incompressible et localement stationnaire.**

Ainsi, dans le schéma ci-après :

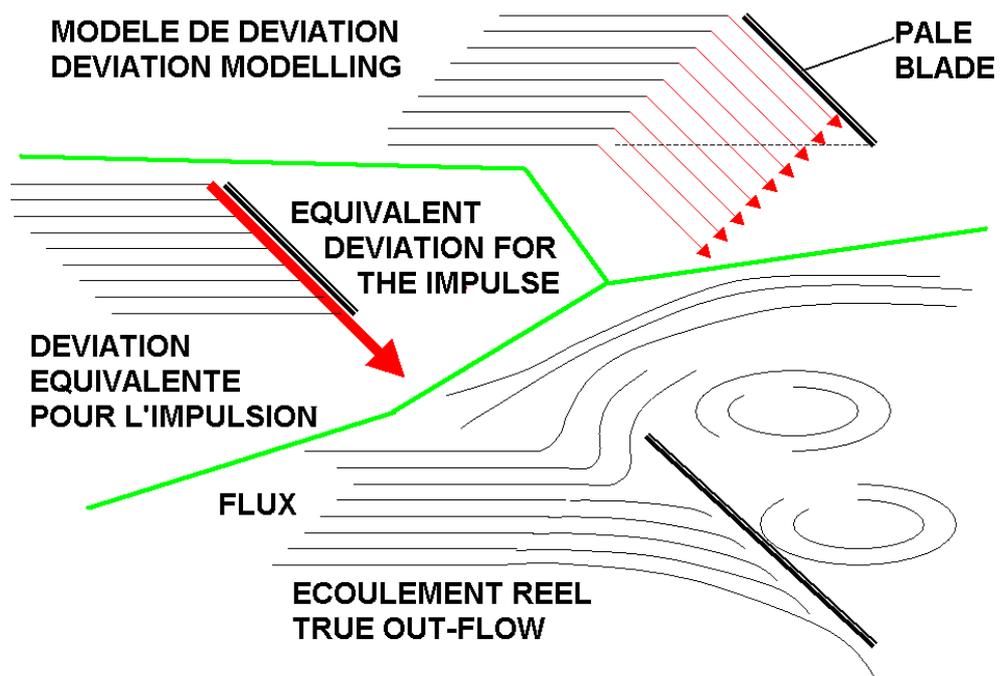
1. La veine de fluide incident est WI
2. La veine de fluide dévié est ID
3. La normale locale à la pale est \vec{N}_i définie au II.2.b avec i prenant les valeurs 1 ou 2
4. On considère une surface élémentaire centrée en I de pale $dx_i dy_i$: $(x_i; y_i)$ sont les coordonnées des points de pale tels que définis au II.1.b



Le choix du schéma ci-contre découle de l'idée suivante (qui est une approximation nécessaire) ;

le vent arrive sur la pale n°i le long de la direction WI et l'inertie du vent fait qu'il change le moins possible de direction : on propose donc que la veine de fluide partant(ID) soit dans le plan d'incidence défini par $(\vec{WI}; \vec{N}_i)$

(prolongement naturel du vent si l'on regardait la pale face à la normale)



On définit donc un vecteur normé \vec{B}_i binormal à la fois à \vec{N}_i et \vec{WI} : $\vec{B}_i = \frac{\vec{N}_i \wedge \vec{WI}}{\|\vec{N}_i \wedge \vec{WI}\|}$

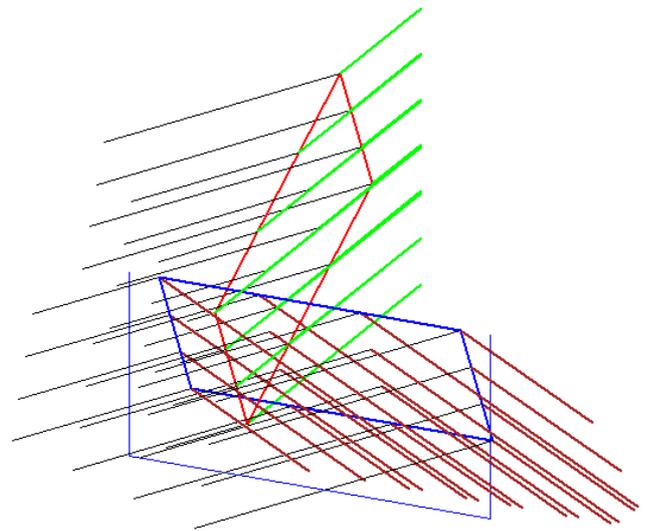
Puis le vecteur unitaire directeur du flux dévié est obtenu par : $\vec{u}_{d_i} = \vec{B}_i \wedge \vec{N}_i$

Finalement : $\vec{u}_{d_i} = \frac{\vec{N}_i \wedge \vec{WI}}{\|\vec{N}_i \wedge \vec{WI}\|} \wedge \vec{N}_i$

Lorsque le vent arrive en pleine face d'une pale, il faut imposer une direction arbitraire puisque dans ce cas $\vec{N}_i \wedge \vec{WI} = \vec{0}$: on imposera un flux partant centrifuge le long de Ox ou Oz.

$$\vec{N}_i \wedge \vec{WI} = \vec{0} \Rightarrow \vec{u}_{d_i} = \vec{u}_z \text{ ou } \vec{u}_x$$

L'ensemble du modèle cinématique exposé précédemment a été programmé sur un logiciel de calcul formel et l'affichage en 3 dimensions donne le résultat ci-dessous.



- traits noirs fins :**
veines de fluide incidentes sur les pales face au ROBI
- traits verts forts :**
veines de flux déviées par la pale rouge (n°1)
- traits bruns forts :**
veines de flux déviées par la pale bleue (n°2)

Des animations sont disponibles sur les adresses suivantes :

<http://www.econologie.info/share/partager/12316848546AX4XU.gif>

Publiées dans le Topic ROBIPLAN :

<http://www.econologie.com/forums/post111526.html#111526>

II.2.d) Vitesse relative du vent par rapport aux points de pale

Une particularité de la ROBIPLAN réside dans le fait que *chaque point de pale à sa vitesse propre* : ainsi, *chaque point de pale produit un impact différent résultant d'une vitesse relative \vec{v}_{RI} unique entre ce point d'impact I et le vent local incident*. On a ainsi :

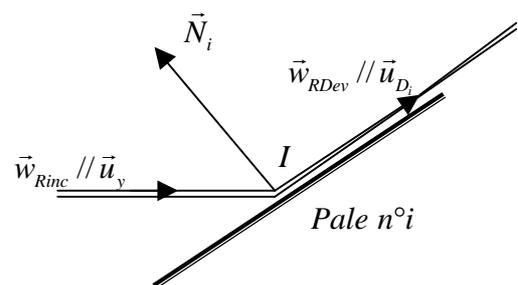
$$\vec{v}_{RI} = \vec{w} - \vec{v}_I = \vec{w} - \vec{\Omega} \wedge \vec{OI}$$

On suppose un écoulement local stationnaire et incompressible, ce qui implique que *dans le référentiel de la pale n°i, la norme de la vitesse est inchangée entre le vent incident et le vent dévié (seule la direction change)*. Ainsi :

le vecteur 'vent incident relatif' par rapport à la pale n°i est : $\vec{w}_{Rinc} = \|\vec{v}_{RI}\| \vec{u}_y = \|\vec{w} - \vec{\Omega} \wedge \vec{OI}\| \vec{u}_y$

le vecteur 'vent dévié relatif' par rapport à la pale n°i est : $\vec{w}_{RDev} = \|\vec{v}_{RI}\| \vec{u}_{D_i} = \|\vec{w} - \vec{\Omega} \wedge \vec{OI}\| \vec{u}_{D_i}$

Ces deux vecteurs sont cruciaux pour calculer la force produite sur la pale par la déviation du vent, puis la puissance qui en résulte.



II.3. Puissance extraite

II.3.a) Calcul de la force induite par la déviation de l'écoulement

On considère l'élément vectoriel de surface $dx_i dy_i \vec{N}_i$ de la pale n°i centrée en I .

Soit ρ la masse volumique de l'air (environ $1,3 \text{ kg/m}^3$)

Cet élément de pale reçoit un débit massique de fluide $\delta D_m = \rho dx_i dy_i |\vec{w} \cdot \vec{N}_i|$ en kg/sec

Localement, l'élément infinitésimal de pale est un référentiel R non galiléen (en rotation par rapport au référentiel fixe). Dans ce référentiel, l'écoulement est supposé stationnaire et incompressible.

Ainsi, la relation fondamentale de la dynamique appliquée à la masse de fluide $d^2m = \delta D_m dt$ s'écoulant de manière incompressible et en régime stationnaire dans le référentiel de la pale donne :

$$\frac{d\vec{p}_R}{dt} = \delta^2 \vec{F}_{pale \rightarrow fluide} + \delta^2 \vec{F}_{inertie} \Leftrightarrow \delta D_m dt \frac{(\vec{w}_{RDev} - \vec{w}_{Rinc})}{dt} = \delta^2 \vec{F}_{pale \rightarrow fluide} + \delta^2 \vec{F}_{inertie}$$

Les forces d'inertie dans le référentiel de la pale sont :

- la force d'inertie d'entraînement : $\delta^2 \vec{F}_{ie} = -d^2m \left(\frac{d\vec{\Omega}}{dt} \wedge \overline{OM} + \vec{\Omega} \wedge (\vec{\Omega} \wedge \overline{OM}) \right)$
- la force d'inertie de Coriolis : $\delta^2 \vec{F}_{ic} = -2 d^2m \vec{\Omega} \wedge \vec{v}_{RI}$

Ces deux forces sont négligeables par rapport à la force d'impact car celui-ci se fait sur un temps presque nul ; le raisonnement en ordre de grandeur donne à vitesse angulaire quasi constante :

$$d'une part \|\delta^2 \vec{F}_{ie}\| = d^2m (0 + r\vec{\Omega}^2) \quad \text{et d'autre part} \|\delta^2 \vec{F}_{ic}\| = 2 d^2m \Omega v_{RI}$$

Par ailleurs, pour que la plupart des points de pale aient une vitesse absolue égale à la moitié de celle du vent incident, et qu'aucun point de pale n'aille aussi vite que le vent (pour avoir un rendement optimal), il faut :

$$\omega = \frac{w}{a+b}$$

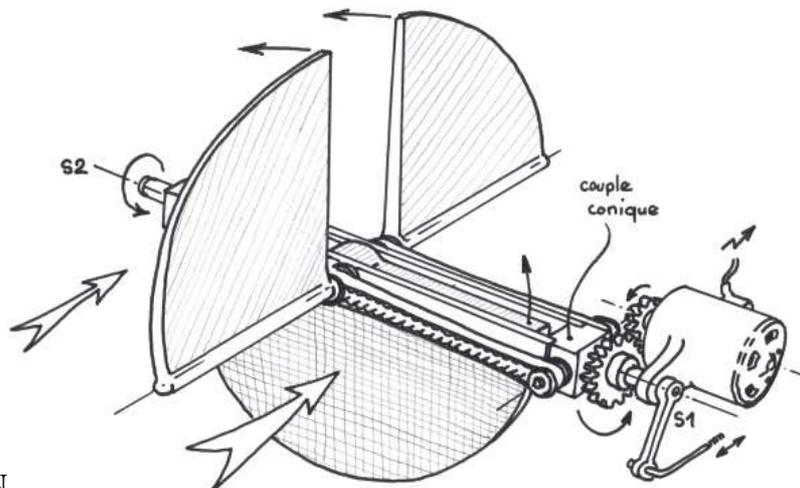
$$D'où \frac{\|\delta^2 \vec{F}_{ie}\|}{\left\| \frac{d\vec{p}_R}{dt} \right\|} \approx \frac{d^2m r \omega^2}{d^2m \frac{\|\vec{w}_{RDev} - \vec{w}_{Rinc}\|}{dt}} \approx \frac{dt r \omega^2}{w} \approx \frac{dt r w}{(a+b)^2} \ll 1 \text{ car } dt \text{ tend vers } 0 \text{ (impact quasi instantané)}$$

$$D'où \frac{\|\delta^2 \vec{F}_{ic}\|}{\left\| \frac{d\vec{p}_R}{dt} \right\|} \approx \frac{2d^2m \omega \|\vec{v}_{RI}\|}{d^2m \frac{\|\vec{w}_{RDev} - \vec{w}_{Rinc}\|}{dt}} \approx \frac{2dt \omega w}{w} \approx 2 \frac{dt w}{a+b} \ll 1 \text{ car } dt \text{ tend vers } 0 \text{ (impact quasi instantané)}$$

$$\text{On en déduit } \delta D_m dt \frac{(\vec{w}_{RDev} - \vec{w}_{Rinc})}{dt} \approx \delta^2 \vec{F}_{pale \rightarrow fluide}$$

et par le principe des actions réciproques $\delta^2 \vec{F}_{fluide \rightarrow pale} = -\delta^2 \vec{F}_{pale \rightarrow fluide}$

$$\text{soit } \delta^2 \vec{F}_{fluide \rightarrow pale} = \delta D_m (\vec{w}_{Rinc} - \vec{w}_{RDev}) = \rho dx_i dy_i \vec{w}_i \cdot \vec{N}_i (\vec{w}_{Rinc} - \vec{w}_{RDev})$$



Une variante de ROBIPLAN

II.3.b) Puissance sur l'élément de pale

$$\delta^2 P_i = \delta^2 F_{\text{fluide} \rightarrow \text{pale}} \cdot \vec{v}_I = \rho dx_i dy_i \left| \vec{w} \cdot \vec{N}_i \right| (\vec{w}_{RDev} - \vec{w}_{Rinc}) \cdot (\vec{\Omega} \wedge \vec{OI})$$

II.3.c) Puissance totale

Il faut sommer les puissances recueillies par chaque pale : $P_{tot} = \iint_{I \in \text{Pale1}} \delta^2 P_1 + \iint_{I \in \text{Pale2}} \delta^2 P_2$

$$P_{tot} = \iint_{I \in \text{Pale1}} \rho dx_1 dy_1 \left| \vec{w} \cdot \vec{N}_1 \right| (\vec{w}_{RDev} - \vec{w}_{Rinc}) \cdot (\vec{\Omega} \wedge \vec{OI}) + \iint_{I \in \text{Pale2}} \rho dx_2 dy_2 \left| \vec{w} \cdot \vec{N}_2 \right| (\vec{w}_{RDev} - \vec{w}_{Rinc}) \cdot (\vec{\Omega} \wedge \vec{OI})$$

II.4. Couple mécanique de la ROBIPLAN

La puissance des pales est communiquée sur un premier arbre tournant, entraînant une courroie ou une chaîne, laquelle transmet le mouvement sur un pignon conique fixe. On note η_{courroie} et η_{pignon} les rendements mécaniques respectifs de la courroie et du pignon conique.

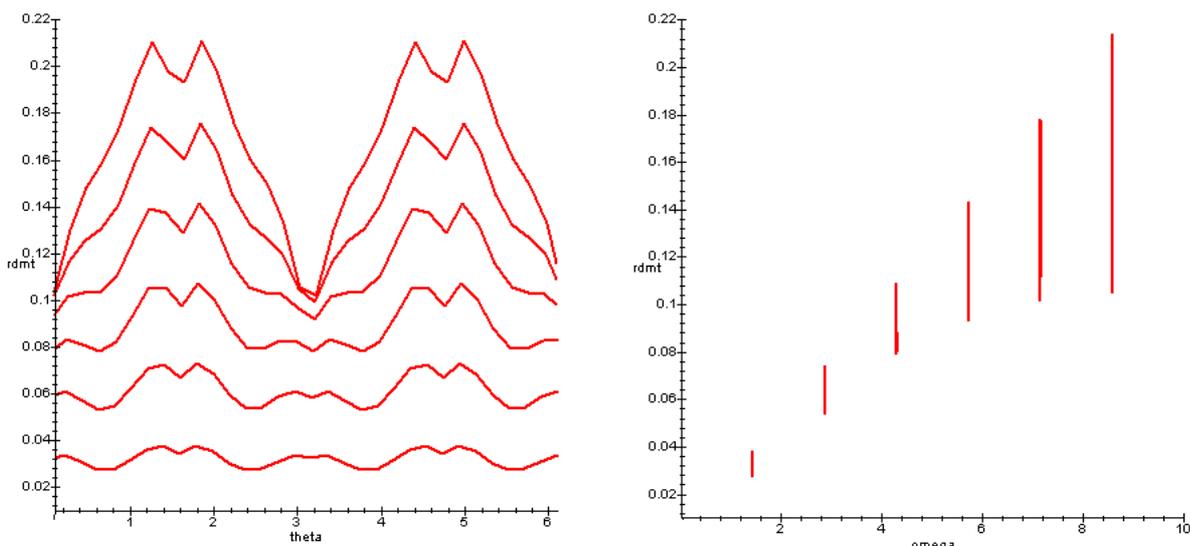
Le couple C_z de la ROBIPLAN autour de l'axe Oz vérifiera : $\eta_{\text{courroie}} \eta_{\text{pignon}} P_{tot} = C_z \omega$

Soit
$$C_z = \frac{\eta_{\text{courroie}} \eta_{\text{pignon}} P_{tot}}{\omega}$$

III. Résultats des simulations

Les résultats ci-après présentent des cartographies du rendement éolien en fonction de la position angulaire θ (rad) de la ROBIPLAN et de la vitesse ω (rad/s). La puissance instantanée récupérée par l'éolienne dépend uniquement de ces 2 paramètres. Ces rendements n'incluent pas η_{courroie} η_{pignon}

III.1. Une seule éolienne ROBIPLAN

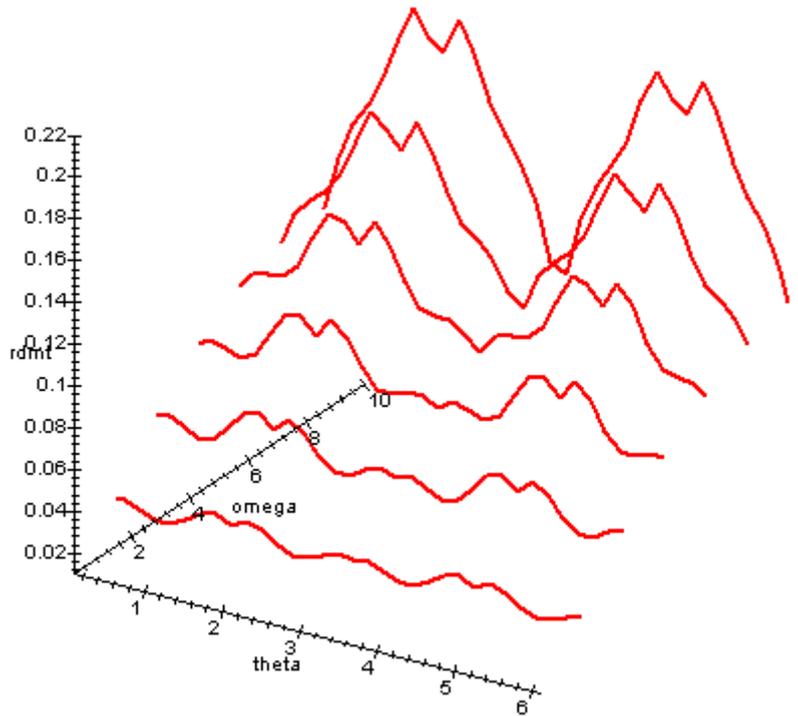


Les courbes ci-dessus et ci-dessous résultent d'une simulation avec les paramètres suivants :

- Masse volumique de l'air : à 10°C : $\rho_{\text{air}} = 1.25 \text{ kg} / \text{m}^3$
- vitesse du vent incident $w = 20 \text{ m} / \text{s}$
- 1/2 envergure de pale : $a = b = 1 \text{ m}$;
- Puissance cinétique incidente : 1745 W

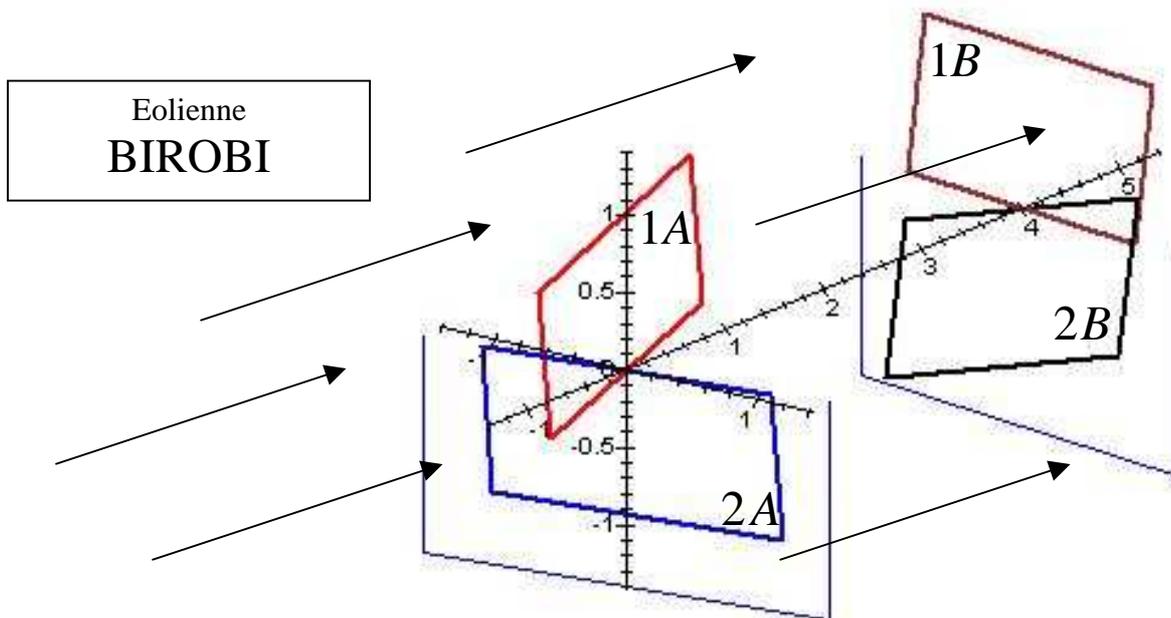
Les points essentiels du comportement sont :

- rendement proportionnel à la vitesse de rotation entre 0 et $\omega = \frac{w}{a+b}$
- puis décroissance linéaire, car à partir de cette vitesse, les bouts des pales se mettent à aller plus vite que le vent et le brasse au lieu d'être impactés.
- Les position $0, \pi$ et 2π sont des positions de rendement minimum : les pales sont face au vent, mais son effet passe par le couple conique)
- Les positions $\pi/2$ et $3\pi/2$ sont des positions de rendement maximum : les pales sont face au vent, et son effet met directement en rotation le cadre du Robiplan)
- Le rendement n'est jamais nul (il y a toujours une force motrice sur les pales)
- **Le rendement moyen** à la vitesse optimale $\omega = \frac{w}{a+b}$ **vaut 19,3%**
- **Pour ce rendement, la puissance extraite du vent est donc de 336 W ;** en tenant compte de 15% de pertes globales sur la courroie et le couple conique : 286 W .



III.2. Deux éoliennes ROBIPLAN

Les éoliennes ROBIPLAN doivent idéalement être utilisées par deux (version « BIROBI ») de manière à ce que le vent non dévié par la première ROBIPLAN impacte la seconde et vice-versa.



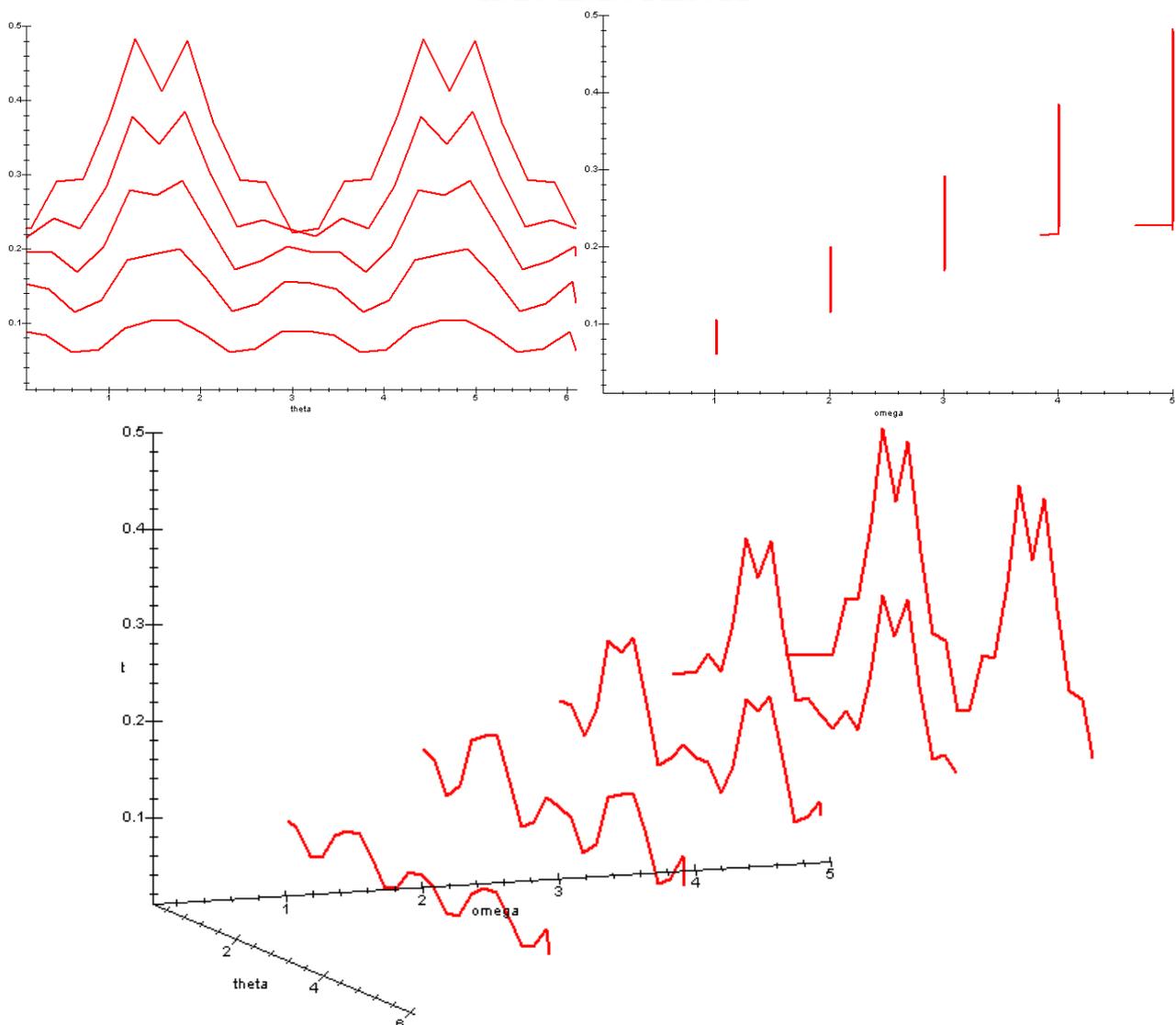
Des animations de BIROBI sont disponibles : <http://www.thewindpower.net/forum/topic851-30.html>

Toutefois dans certaines positions, la première ROBIPLAN ombre significativement la seconde. Ainsi, le rendement d'une éolienne BIROBI par rapport à une simple MONOROBI ne double pas, mais augmente très significativement. *Cet ombrage a une période double de celle de la vitesse angulaire de rotation et est en opposition de phase entre les pales 1 et 2.* Les fonctions d'ombrage retenues pour les simulations sont ainsi avec les conventions suivantes (voir aussi fig. précédente) :

- La Robiplan prenant le **vent en premier est indicée A** avec sa pale 1 et sa pale 2 telles que définies au II.1.a et qui délivrent les puissances respectives P_{1A} et P_{2A}
- La Robiplan prenant le **vent en second est indicée B** avec sa pale 1 et sa pale 2 telles que définies au II.1.a et qui délivrent les puissances respectives P_{1B} et P_{2B} .
- Les puissances P_{1A} et P_{2A} sont les puissances calculées en MonoRobi
- Les puissances P_{1B} et P_{2B} sont :
 - o $P_{1B} = P_{2A} O_{1A \rightarrow 1B}$ où $O_{1A \rightarrow 1B} = (1 + \cos 2\omega t) / 2$ est la fonction d'ombrage de la pale 1B par la pale 1A
 - o $P_{2B} = P_{1A} O_{2A \rightarrow 2B}$ où $O_{2A \rightarrow 2B} = (1 - \cos 2\omega t) / 2$ est la fonction d'ombrage de la pale 2B par la pale 2A

Les simulations ci-dessus sont calculées à partir d' une vitesse de vent à 10 m/s

Rendements BIROBI



Ainsi, on prévoit que le BIROBI atteint un rendement moyen de 35%, l'éolienne A fournissant 20%, et l'éolienne B 15% ; ceci quelle que soit la vitesse w du vent à condition de placer les ROBIPLAN sur leur vitesse de rotation optimale $\omega = w / (a + b)$

III.3. Comparaison par rapport aux technologies éoliennes usuelles

III.3.a) Par rapport aux éoliennes multipales à axe horizontal

Le rendement éolien $C_{PR} = P_{éolienne} / P_{cin}$ se définit comme le rapport entre la puissance du vent sur l'éolienne et la puissance cinétique incidente (voir page 1 et III.3.b). Ce rendement varie avec la vitesse de rotation de l'éolienne car la puissance résulte du produit d'une force par une vitesse sur chaque élément de pale ainsi :

- si la pale est immobile, la force est maximale, mais la vitesse est nulle
- si la pale va aussi vite que le vent, la vitesse est maximale, mais la force est nulle
- **la recherche d'un compromis sur la vitesse de pale donne l'optimum à récupérer.**

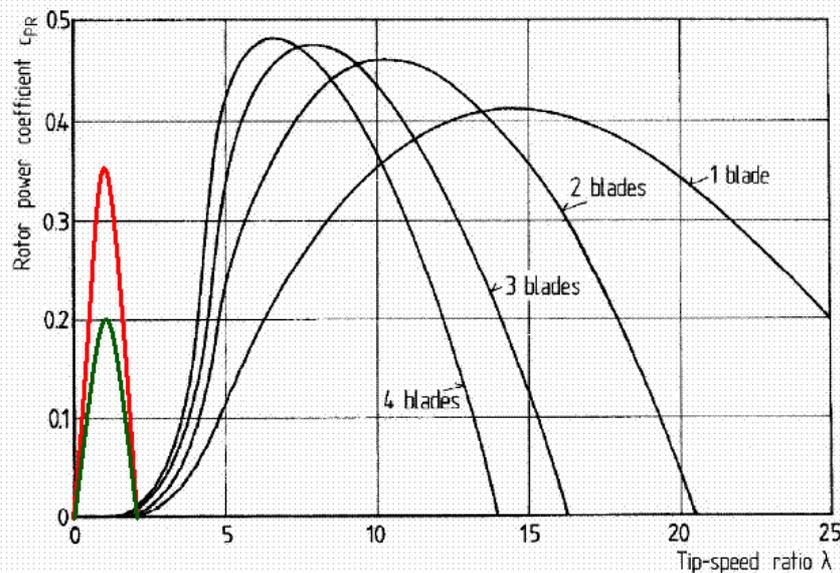
Dans le monde des éoliennes à axe horizontal, il est usuel de définir la *vitesse de rotation normalisée* :

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} \quad \text{Où : } \begin{array}{l} R \text{ est le rayon de pale,} \\ \Omega \text{ la vitesse de rotation angulaire du rotor} \\ V \text{ la vitesse absolue du vent incident.} \end{array}$$

Cette vitesse normalisée se rapporte donc à celle des bouts de pale, aussi bien instantanée que moyenne. On définira pour la ROBIPLAN la même notion **sur la vitesse maximum d'un coin de pale** :

$$\lambda \approx \frac{(a+b)\omega}{V} \quad \text{où : } \begin{array}{l} a \text{ est la demi-longueur de pale} \\ b \text{ est la largeur de pale,} \\ \omega \text{ la vitesse de rotation angulaire de la ROBIPLAN} \\ V \text{ la vitesse absolue du vent incident.} \end{array}$$

A partir de ces définitions, voici comment se situent les MONO et BIROBIPLAN



BIROBI **MONOROBI** Coefficient of output according to the standard speed of rotation

Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée λ

L'optimum des ROBIPLAN correspond à $\lambda = 1 \Leftrightarrow (a+b)\omega = V$ de façon à ce que le flux incident heurte une surface maximale de pales sensiblement à la moitié de sa vitesse incidente. Quand $\lambda = 2$, il n'y a plus aucune puissance car le centre des pales est aussi rapide que le vent incident.

On remarque que le **rendement optimum des ROBIPLAN est légèrement inférieur à celui des multipales, mais il est obtenu pour des vitesses normalisées bien inférieures**, favorisant ainsi sa **capacité à convertir des vents très rapides, et donc très puissants**. Nous y reviendrons au III.4.d.

III.3.b) Par rapport aux éoliennes de pompage, moulins, et turbines Savonius ou Darreius

A partir des notations suivantes :

- ρ la masse volumique du fluide
- S la surface balayée par l'éolienne
- V la vitesse absolue du vent incident
- P_R la puissance récupérée sur le rotor

on définit le rendement éolien C_{PR} par $P_R = C_{PR} \frac{\rho S V^3}{2}$

On définit aussi le coefficient de couple C_{QR} avec le couple M de l'éolienne par : $M = C_{QR} \frac{\rho S V^2}{2} R$

Définition qui sera ainsi adaptée dans le cas des ROBIPLAN : $M = C_{QR} \frac{\rho S V^2}{2} a \approx C_{QR} \frac{\rho S V^2}{2} b$

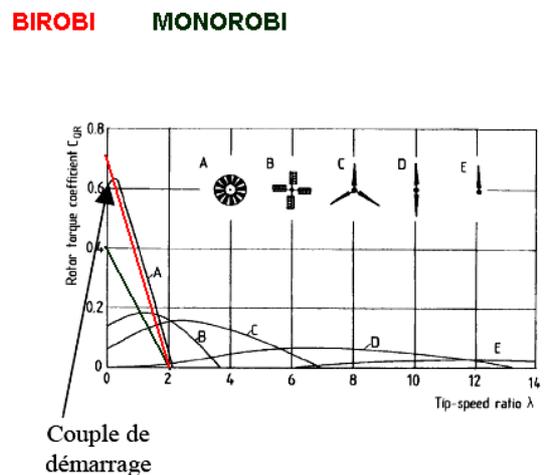
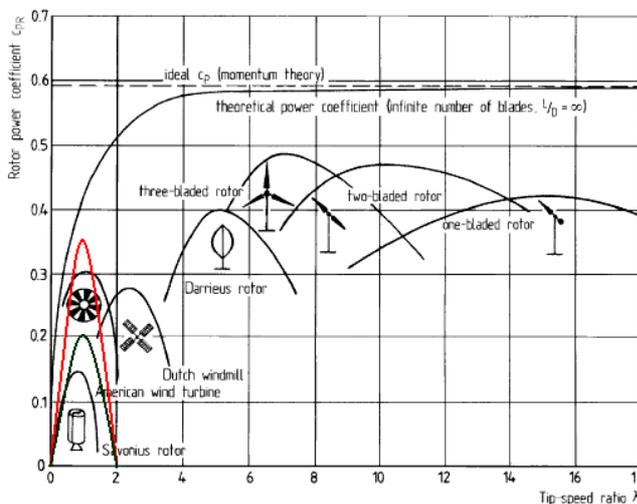
Le coefficient C_{PR} traduit la *qualité énergétique d'une turbine* et le coefficient C_{QR} traduit son *domaine de fonctionnement* :

- si C_{QR} est faible, la machine trouve la puissance sur des vitesses élevées de rotation
- si C_{QR} est grand, la machine trouve la puissance sur des vitesses lentes de rotation
- C_{QR} traduit aussi la *capacité de démarrage* de la turbine.

Comme $P_R = M \Omega$, on peut montrer que $C_{PR} = \lambda C_{QR}$

Pour une ROBIPLAN, $C_{PR} \approx C_{PR}^{\max} \lambda(2-\lambda)$, donc $C_{QR} = (2-\lambda) C_{PR}^{\max}$

Avec $C_{PR}^{\max} = 20\%$ en MONOROBI et $C_{PR}^{\max} = 35\%$ en BIROBI (Cf. III.1. et III.2.)



Coefficients de puissance et de couple en fonction de la vitesse normalisée λ pour différents types de turbines

Power and torque outputs' coefficient relative to the standard speed of rotation for several technologies of wind turbines

Ainsi, les turbines ROBIPLAN se rapprochent très nettement des éoliennes américaines de pompage, logiquement, car elles fonctionnent aussi sur l'impact du vent. **Les ROBIPLAN ont le meilleur coefficient de couple dès les basses vitesses, ce qui signifie :**

1. **Qu'elles démarrent spontanément à des vitesses de vent très faibles** (1m/s déjà observé expérimentalement sur les prototypes de Pascal HA PHAM),
2. **Qu'elles n'ont pas besoin de tourner aussi vite que les autres éoliennes** pour extraire la même puissance (approximativement 7 fois moins vite que les tripales).

III.4. Productions annuelles

III.4.a) Statistique du vent

On admet en général que la densité de probabilité $f(V)$ de la vitesse du vent est celle de Weibull :

$$f(V) = \frac{k}{V} \left(\frac{V}{c}\right)^k \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) \text{ où :}$$

- k est un paramètre de forme modelant la répartition
- c un paramètre reportant la puissance sur les hautes (c grand) ou basses vitesses (c petit).

La probabilité dp de rencontrer une vitesse de vent V comprise entre V et $V+dV$ vaut :

$$dp = f(V) dV$$

La vitesse moyenne du vent est donnée par $V_{moy} = \int_{V=0}^{\infty} f(V) V dV = \int_{V=0}^{\infty} k \left(\frac{V}{c}\right)^k \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) dV$

Les mesures sur les sites éoliens montrent qu'en général, $k = 2$ convient bien.

La valeur de c dépend du site et de l'altitude, et lorsque $k = 2$, la vitesse moyenne du vent vérifie :

$$V_{moy} = 0.88c$$

III.4.b) Puissance cinétique incidente

$$P_{cin} = D_m \frac{\rho V^2}{2} = \frac{\rho S V^3}{2} \text{ avec } D_m = \rho S V, \text{ le débit massique de fluide sur la surface balayée.}$$

III.4.c) Rendement des éoliennes

Pour les éoliennes tripales, le rendement dépend de la vitesse :

- Phase I : si $V < V_D$, alors le rendement est nul car l'éolienne ne démarre pas du fait de ses frottements internes : $C_{PR} = 0$
- Phase II : si $V_D < V < V_n$, (vitesses absolues du vent entre le démarrage et le nominal), alors le rendement est assimilé en première approximation (favorable) à l'optimum : $C_{PR} = 0.48$
- Phase III : si, $V_n < V < V_M$ (vitesses absolues du vent entre le nominal et le maximum), l'éolienne est contrainte de modifier le pas de ses pales pour en limiter la flexion. En pratique, cela limite la puissance à la valeur nominale précédente pour un rendement $C_{PR} = 0.48 \left(\frac{V_n}{V}\right)^3$
- Phase IV : si $V_M < V$, (vitesses absolues du vent supérieures au maximum toléré), alors le rendement est à nouveau nul car il faut arrêter l'éolienne pour raison de sécurité (la force centrifuge est susceptible de rompre les pales : $C_{PR} = 0$)

Le schéma ci-après résume ces comportements des tripales sur la courbe noire.

Schema of the power recovered by the turbine on the shaft in relation to the wind speed for (tri-blade in black)

I : no power : wind too slow
 II : power until the nominal
 III : power remaining on the nominal to release strenghts
 IV : no power due to security

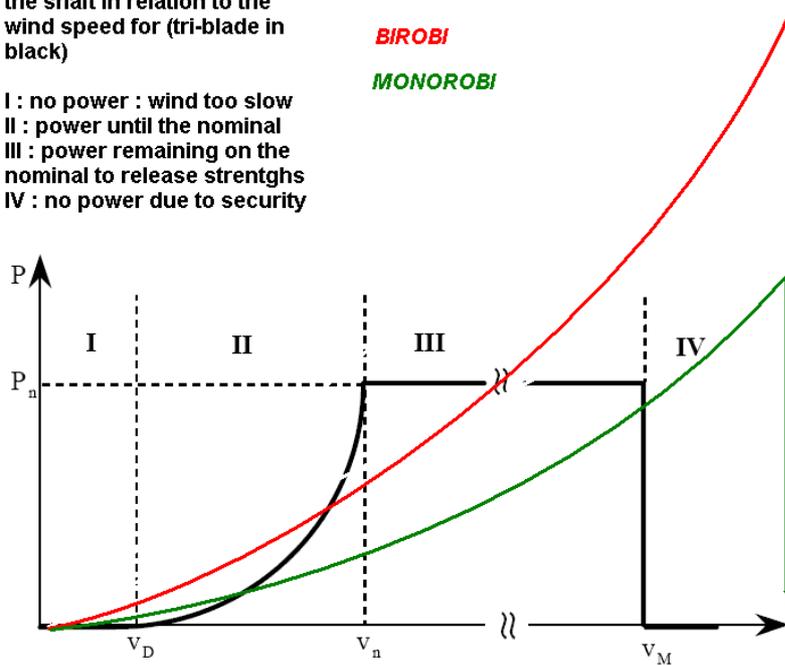


Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent

Par rapport aux tripales, les éoliennes ROBIPLAN démarrent plus vite, n'ont pas de phase III puisque leur pas est fixe, et tolèrent une vitesse maximale de vent plus grande. Ainsi, leur puissance croît sensiblement comme le cube de la vitesse absolue du vent incident. Elles ont aussi un rendement constant sur la phase II : 20% pour le MONOROBI, et 35% pour le BIROBI.

Pour ROBIPLAN, le rendement dépend donc aussi de la vitesse :

- Phase I : si $V < V_D$, alors le rendement est nul car l'éolienne ne démarre pas du fait de ses frottements internes : $C_{PR} = 0$
- Phase II : si $V_D < V < V_M$, (vitesses absolues du vent entre le démarrage et le maximum), alors le rendement est assimilé en première approximation à l'optimum : $C_{PR} = 0.35$
- Phase III : absente.
- Phase IV : si $V_M < V$, (vitesses absolues du vent supérieures au maximum toléré), alors le rendement est à nouveau nul car il faut arrêter l'éolienne pour raison de sécurité (la force centrifuge est susceptible de rompre les pales $C_{PR} = 0$)

Ordres de grandeur usuels

	Eoliennes tripales	ROBIPLAN
Vitesse de démarrage V_D	5 m/s	1 m/s
Vitesse nominale V_n	16 m/s	//
Vitesse maximale V_M	28 m/s	Plus de 50 m/s **
Rendement C_{PR}^{\max} sur phase II*	0.48	0.35 BIROBI 0.20 MONOROBI

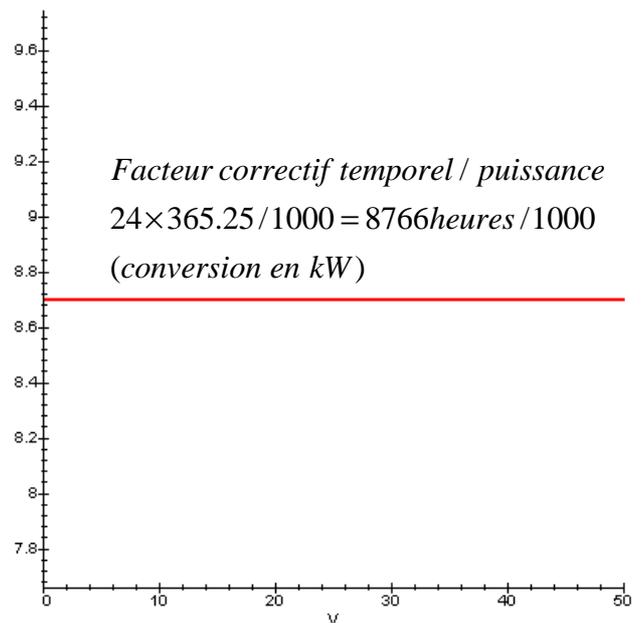
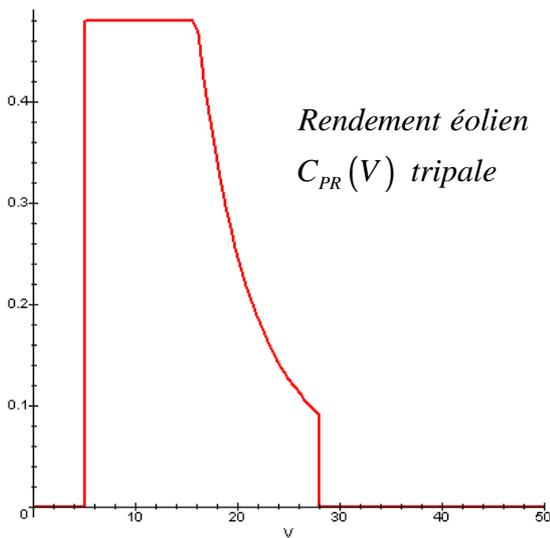
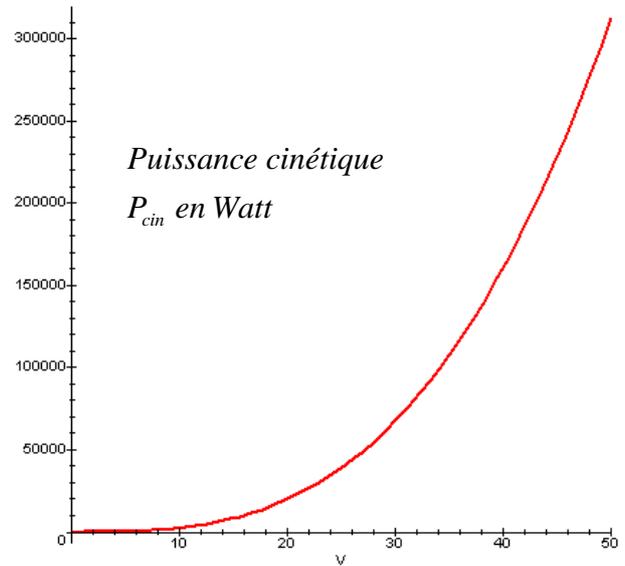
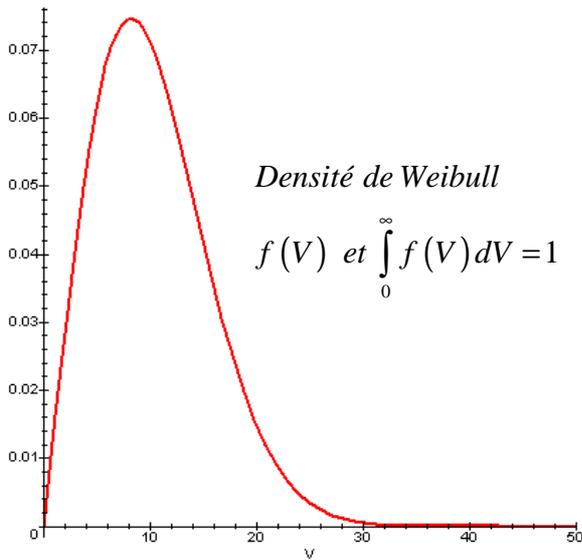
* à la vitesse de rotation optimale (par régulation électrique de type MPT (maximum power tracking))

** car elles tournent environ 6 fois moins vite pour la même puissance incidente)

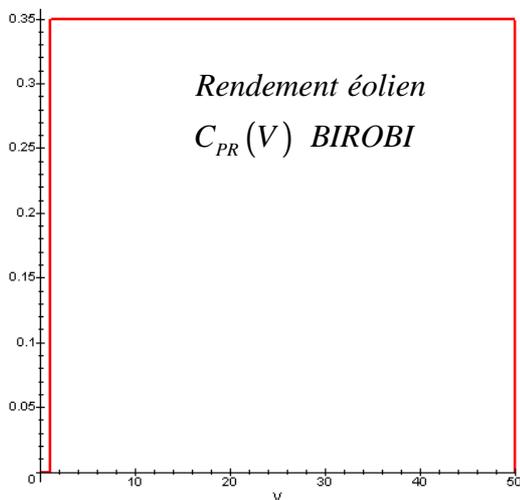
Les simulations et calculs qui suivent gardent ce jeu de paramètres pour une éolienne BIROBI.

III.4.d) Production annuelle

La production annuelle résulte du produit des 4 courbes suivantes :



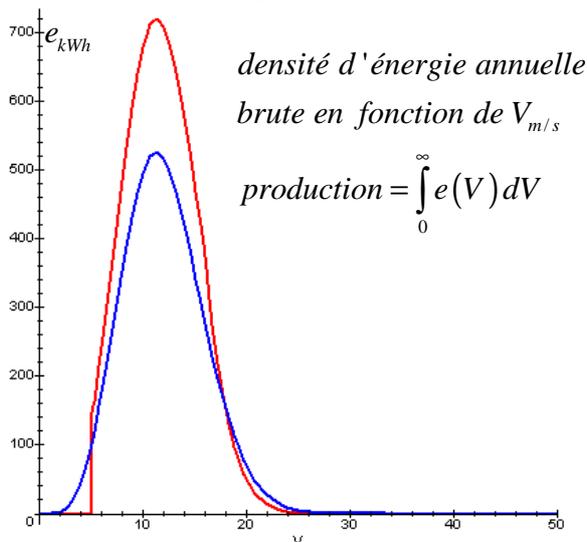
OU BIEN



On obtient alors le graphe ci-après dont l'aire sous les courbes représente l'énergie brute annuelle récupérée en kWh : en rouge l'éolienne tripale, en bleu le BIROBIPLAN:

Selon 3 scénarios de vitesse moyenne annuelle :

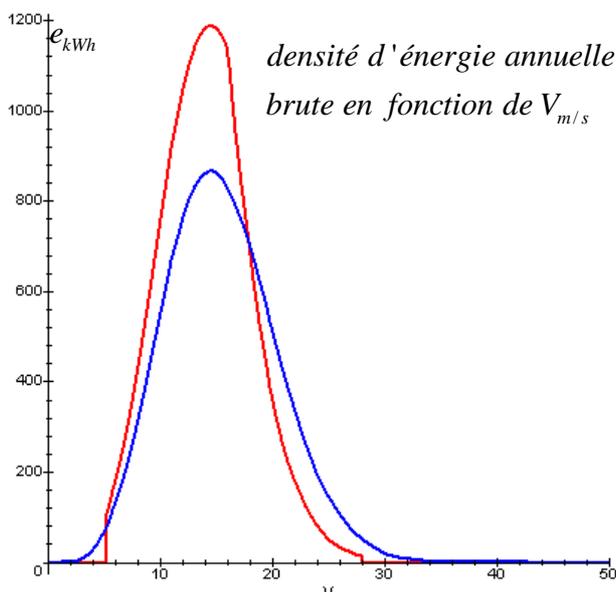
avec des valeurs respectives de c : 7,95 9 et 11 m/s
 10,22 et 12.5 m/s



Hyp 0.06 €/kWh	BIROBI	Tripale
Production brute kWh	5 123	6 560
- Pertes méca/élec 15%	4 355	5 576
Puissance moyenne W	497	636
Recettes €	261	394

Scénario 7 m/s de vent en moyenne, 4 m² de surface balayée

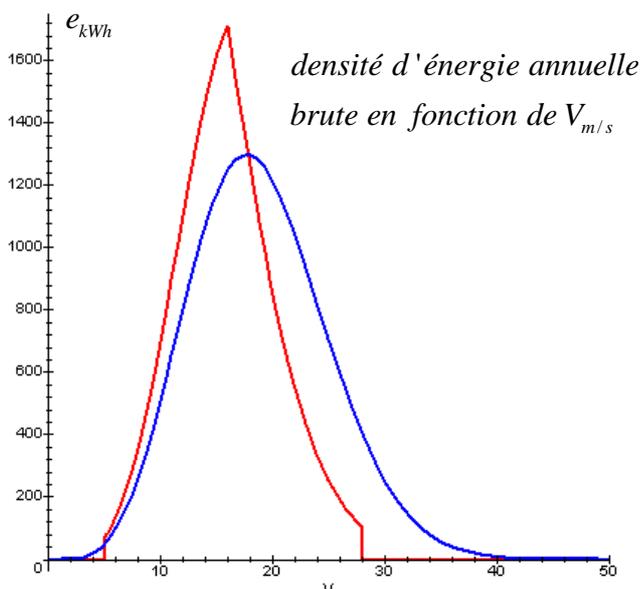
Le BIROBI atteint 80% de la performance d'une tripale. Bien qu'il démarre plus tôt, la tripale prend le dessus sur les vitesses modérées.



Hyp 0.06 €/kWh	BIROBI	Tripale
Production brute kWh	10 884	12 123
- Pertes méca/élec 15%	9 251	10 304
Puissance moyenne W	1 055	1 175
Recettes €	555	618

Scénario 9 m/s de vent en moyenne, 4 m² de surface balayée

Le BIROBI atteint 90% de la performance d'une tripale. Il démarre plus tôt, reste en retrait aux vitesses modérées, mais reprend l'avantage pour les vents très forts.



Hyp 0.06 €/kWh	BIROBI	Tripale
Production brute kWh	19 915	17 368
- Pertes méca/élec 15%	16 927	14 763
Puissance moyenne W	1 931	1 684
Recettes €	1 016	886

Scénario 11 m/s de vent en moyenne, 4 m² de surface balayée

Le BIROBI atteint 115% de la performance d'une tripale. Il démarre plus tôt, reste en retrait aux vitesses modérées, mais trouve l'essentiel de sa performance pour les vents très forts, là où la tripale est bridée, voire à l'arrêt.

Cette tendance s'accroît de plus en plus sur des sites bien ventés et en altitude/crête.

Quand BIROBI et éolienne tripale ont une production égale, la vitesse moyenne annuelle du vent est 10 m/s environ.

CONCLUSION

Prévisions des simulations

- L'ordre de grandeur du rendement éolien d'une éolienne ROBIPLAN est de 20%
- L'ordre de grandeur du rendement éolien de deux éoliennes ROBIPLAN placées et tournant tel que le propose cette étude est de 35%.
- Le rendement optimal est obtenu lorsque $\omega = \frac{w}{a+b}$. Le rendement décroît à peu près linéairement autour de cette valeur.
- A condition de régler ω en fonction de la vitesse absolue du vent w selon la formule précédente, ce rendement se maintient à toutes les vitesses de vent car la ROBIPLAN fonctionne seulement en impact.

Orientation face au vent de la ROBIPLAN

La ROBIPLAN doit se placer face au vent. Selon l'Inventeur Pascal HA PHAM, cet ajustement est grandement facilité par une commande centrale qui agit sur le positionnement angulaire du pignon fixe du couple conique ; ceci favorise la réactivité de l'éolienne pour le suivi automatique du vent lorsqu'il impose de fréquents changements de direction.

Poursuite de la recherche scientifique sur la ROBIPLAN

Comme annoncé en introduction, ces prévisions mériteraient d'être simulées numériquement par des codes CFD (computing fluid dynamics), mais surtout, la ROBIPLAN est une technologie émergente et prometteuse dont il faudrait urgemment confirmer les comportements et performances en soufflerie.

Indépendamment de ces considérations, il n'existe actuellement – par rapport à l'état de l'art connu – aucune autre technologie ayant les caractéristiques de la ROBIPLAN ; la mécanique des fluides est complexe, et l'on manque de données expérimentales sur des concepts aussi nouveaux, mais qui ont un potentiel...

L'atout énergétique de la ROBIPLAN

Bien que le rendement d'une ROBIPLAN, en particulier seule, soit inférieur à l'optimum d'une hélice tripale, il n'en demeure pas moins que *son rendement se conserve à toutes les vitesses de vent car la Robiplan démarre mieux aux faibles vents et n'est pas non plus limitée par les grands vents* : comme vitesse du vent est très aléatoire, ceci permet donc d'*extraire en moyenne plus d'énergie, en particulier pour des sites fortement ventés*.

Les éoliennes ROBIPLAN : domestiques ou industrielles ?

La ROBIPLAN possède de *grands atouts pour entrer sur le marché de l'éolienne domestique*. Son fort couple de démarrage et son rendement très correct pour toutes les vitesses de vent lui permettent *une production plus régulière et plus importante que les petites éoliennes tripales*. Par ailleurs, elle est mécaniquement extrêmement simple (pièces et assemblages), très robuste et facilement réparable.

Pour l'éolienne industrielle (1 MW, hauteur 100 m, section balayée de plusieurs dizaines de m²), des études complémentaires, aussi bien sur l'architecture choisie que pour le génie civil en découlant, seraient nécessaires.

A condition de surmonter les difficultés de génie civil et de résistance des matériaux concernant les éoliennes ROBIPLAN haute puissance, celles-ci seraient plus performantes que les grandes éoliennes tripales actuelles.

POUR FINIR, une petite note d'humour donnant matière à réflexion...

« En matière d'éolien,
l'essentiel est d'avoir du souffle
et de ne pas manquer d'air »



The Naturally Energetic Movement !
Le Mouvement Naturellement Energique !
Die Natürlich Energische Bewegung !
El Movimiento Naturalmente Energico !

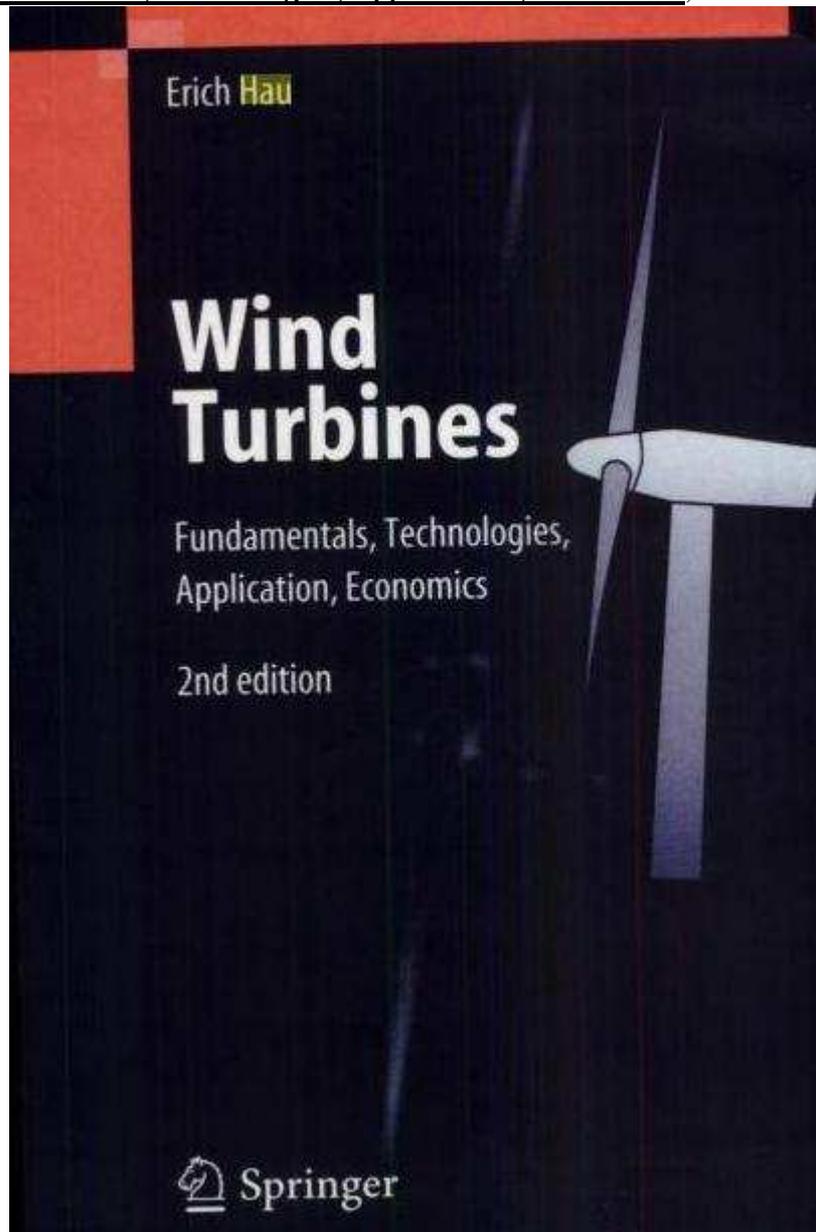
**Retrouvez d'autres études, concepts
et réalisations relatives
aux énergies renouvelables sur :**

<http://sycomoreen.free.fr>

DOCUMENTS RELATIFS

Les graphiques comparatifs de cette étude sont extraits et adaptés de

Wind Turbine Fundamentals, Technologies, Applications, Economics, Erich HAU, Springer Edition



Disponible sur <http://books.google.fr>

Voir aussi un bon *état de l'art par Bernard MULTON*,
Professeur des Universités à ENS Cachan, Agrégé de Génie Electrique (French)

Fichier (14 Mo) téléchargeable sur cette page http://www.geea.org/article.php3?id_article=316

Panorama général des éoliennes actuelles et futures et leur problématique (Powerpoint)
http://www.iufmrese.cict.fr/catalogue/2007/Strasbourg/Keiflin/EE-Eoliennes_PPT2000v2.ppt
par Denis KEIFLIN, lycée Louis Armand de Mulhouse (FRANCE)

Concepts et réalisations de Doug Selsam (USA)

Concernant des éoliennes multi-rotors sur le même axe : www.selsam.com