

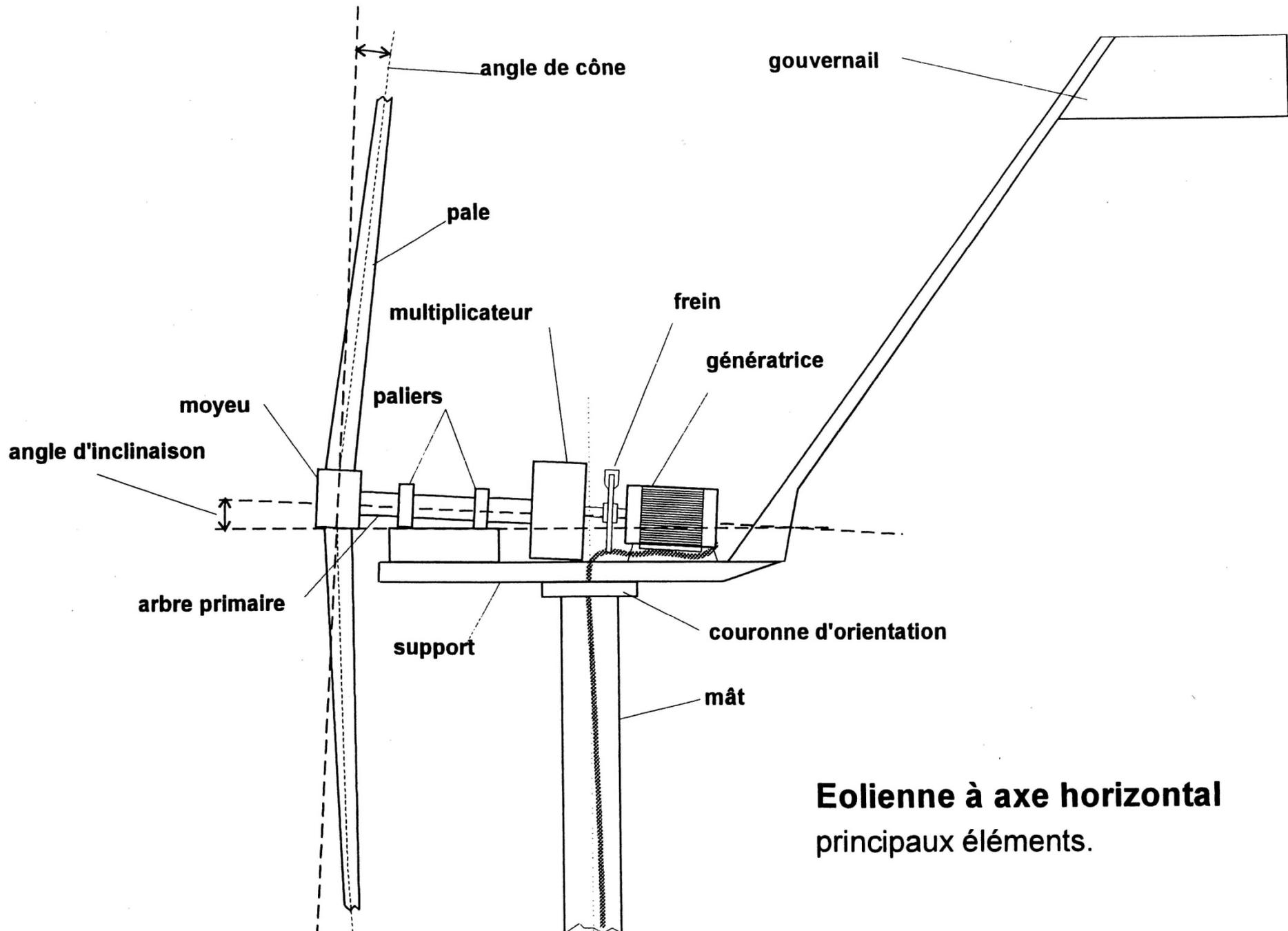
La Technologie des EOLIENNES

André FERRAND

Plan

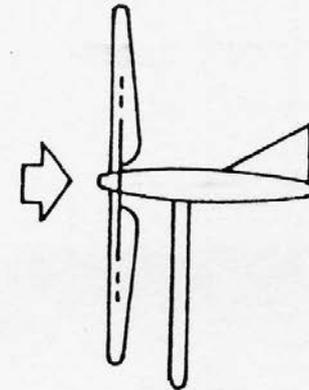
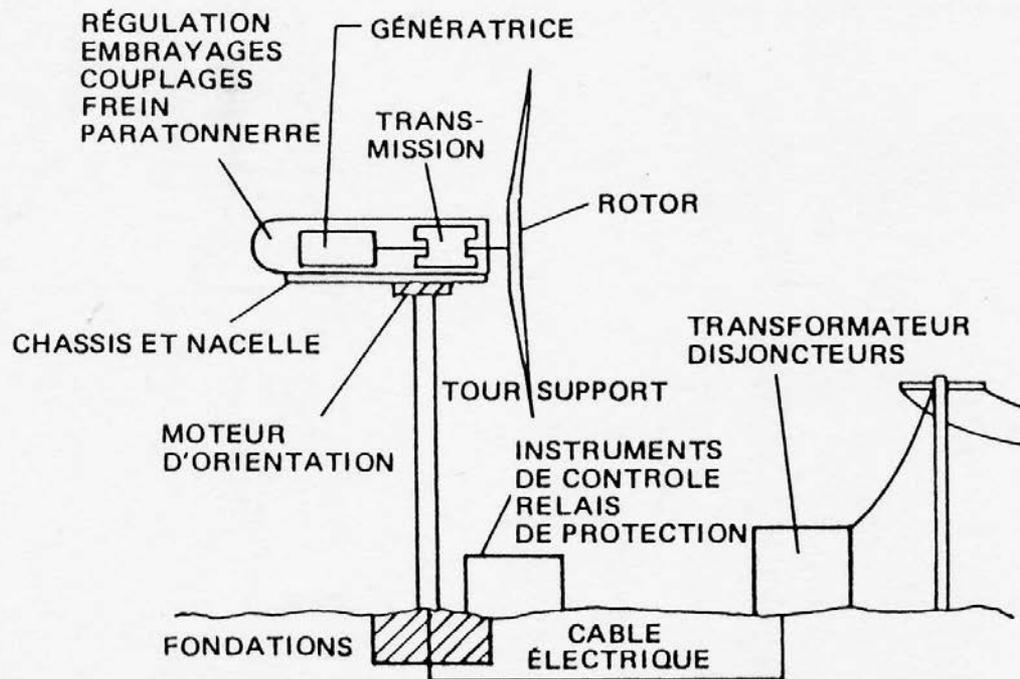
- Éléments constitutifs d'une éolienne
- Conséquences du caractère aléatoire du vent
- Notions d'aérodynamique des pales
- La régulation
- Les générateurs électriques
- Conclusion

Les éléments constitutifs d'une éolienne

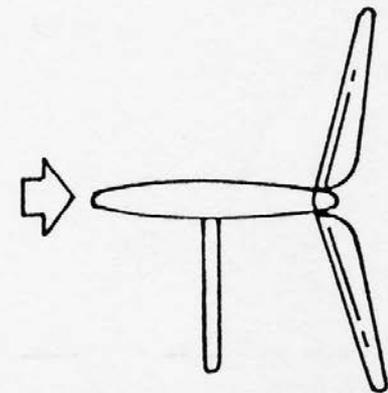


Eolienne à axe horizontal
principaux éléments.

Les éléments nécessaires à la production d'électricité éolienne



«AU VENT»



«SOUS LE VENT»

Exemple de petite éolienne



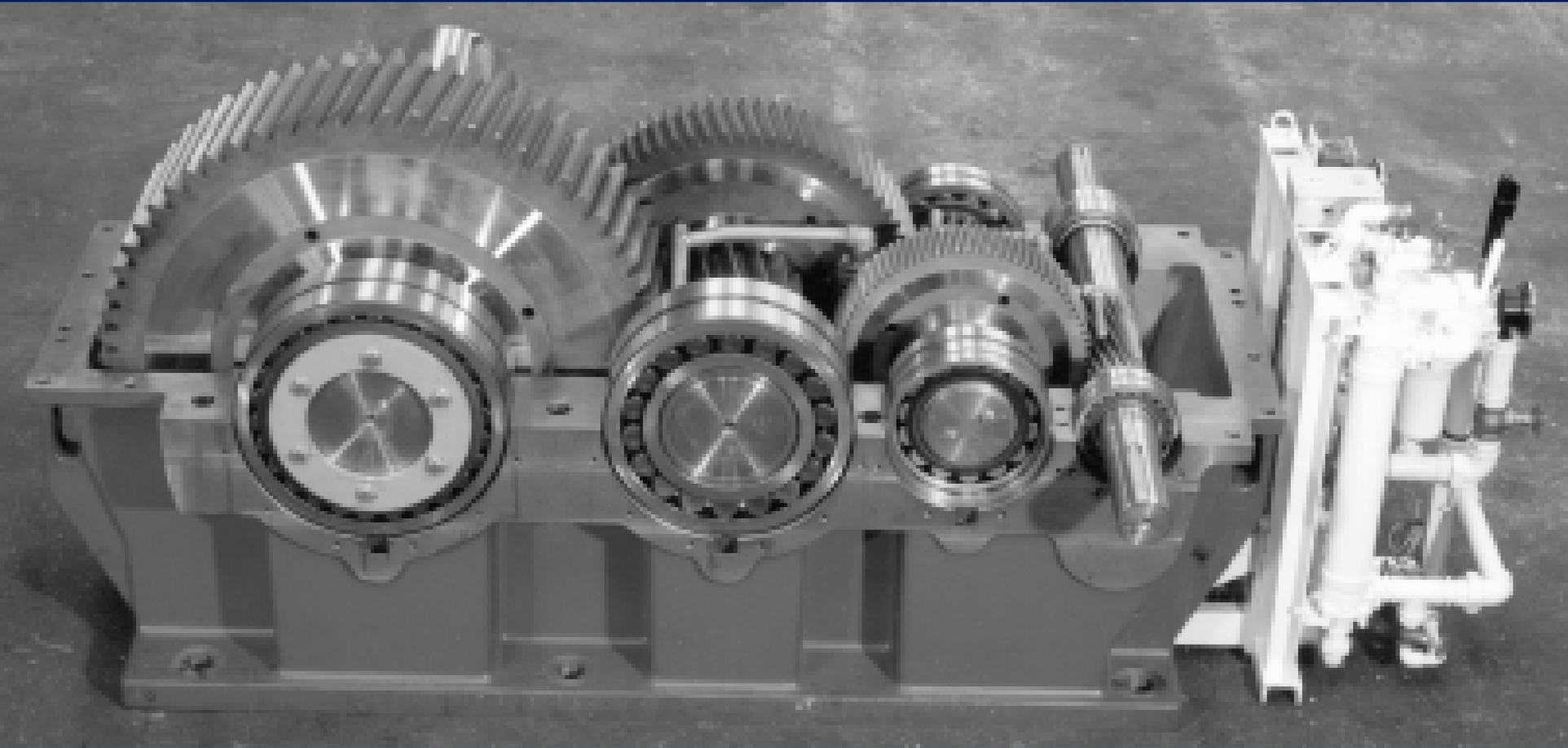
Les capteurs



Orientation moderne



Le multiplicateur



Les fondations

Jusqu'à 400 tonnes,
350 000€

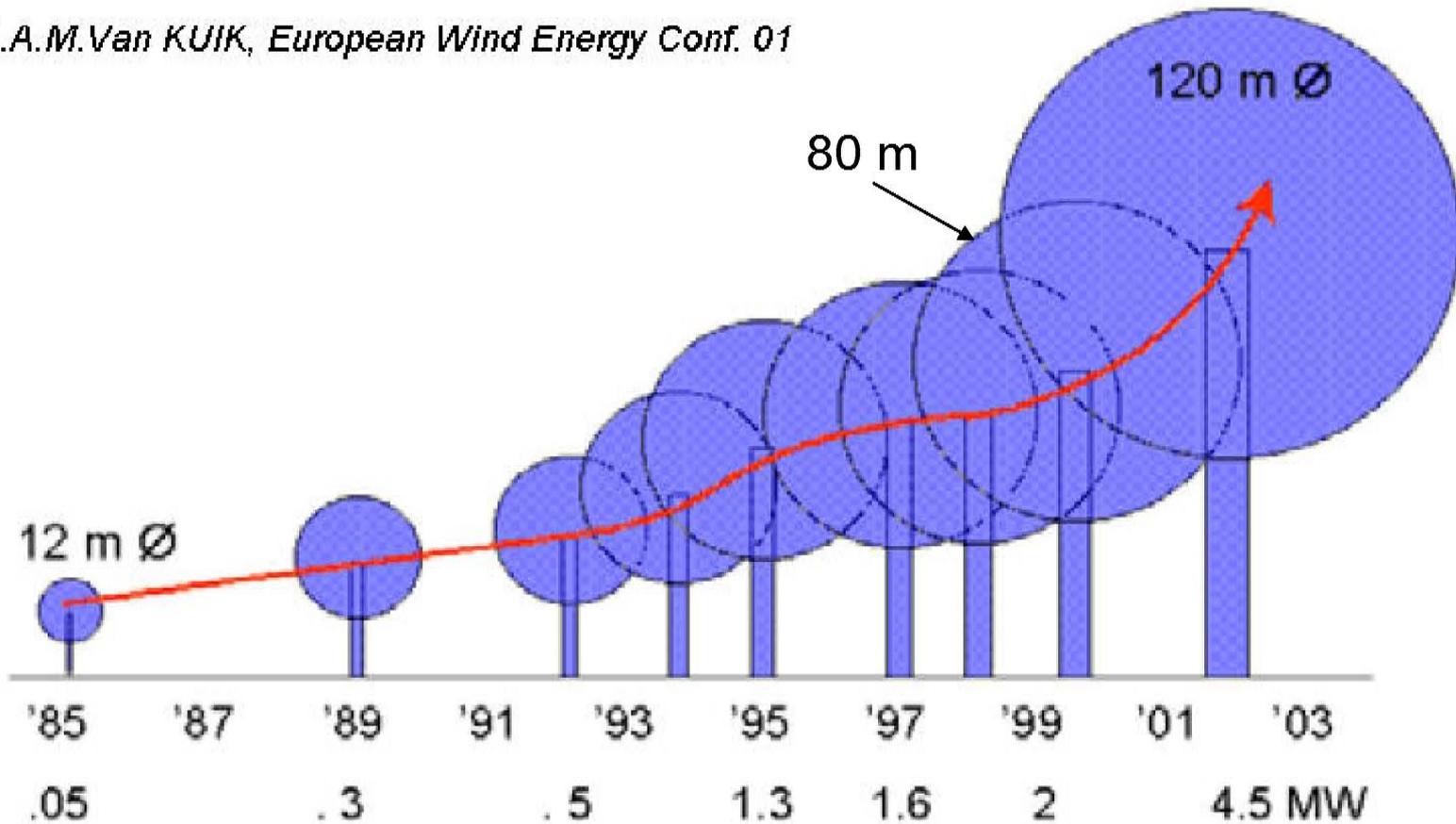


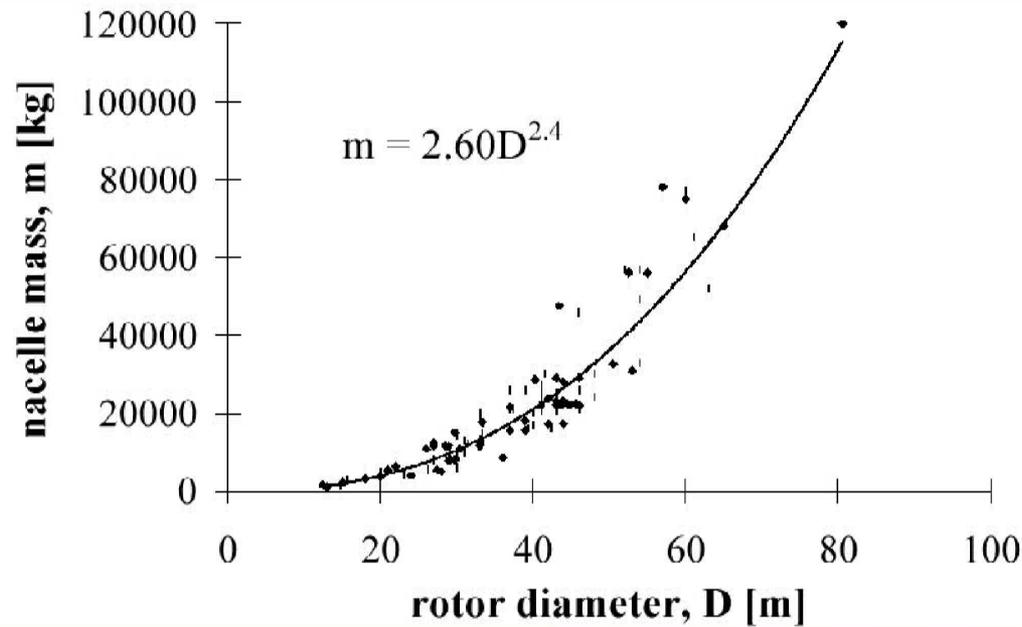
La ferme éolienne



Évolution des puissances

G.A.M. Van KUIK, *European Wind Energy Conf. 01*

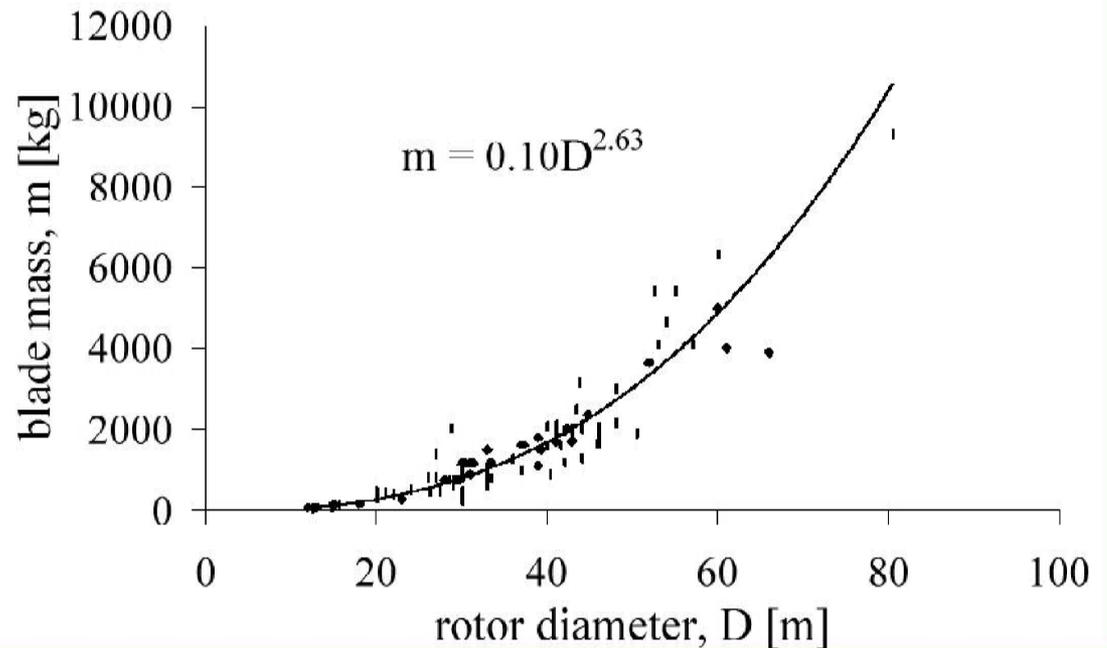




Masse de la nacelle /
diamètre du rotor

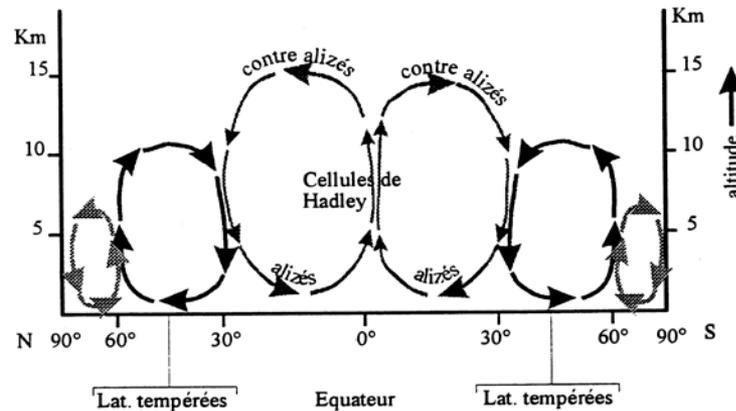
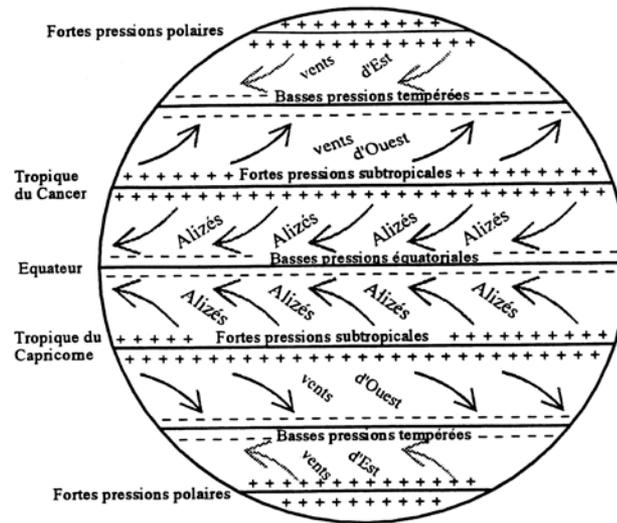
pales

Masse d'une pale /
diamètre rotor



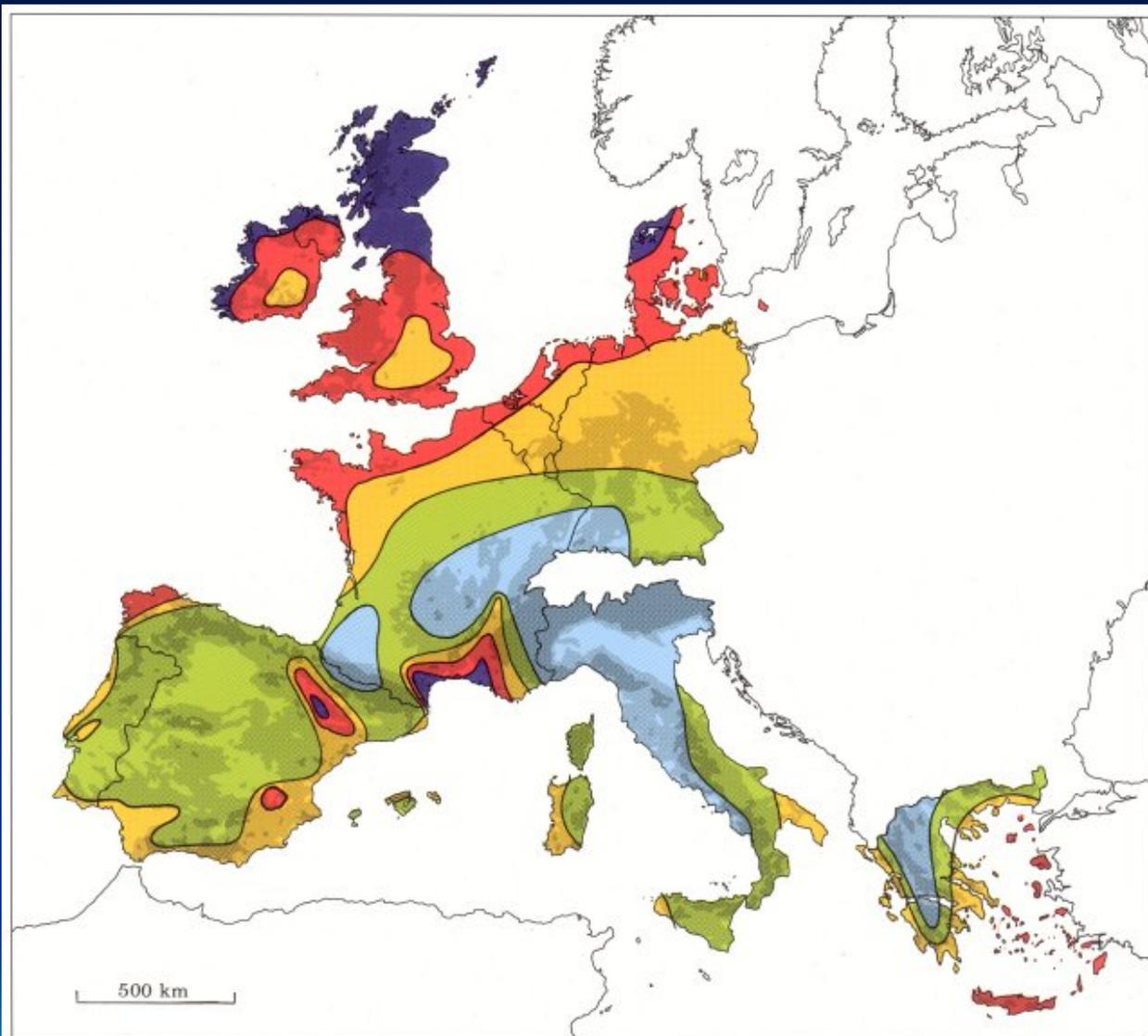
LE VENT





Le mouvement des masses d'air dans chaque hémisphère correspond à 3 systèmes indépendants :

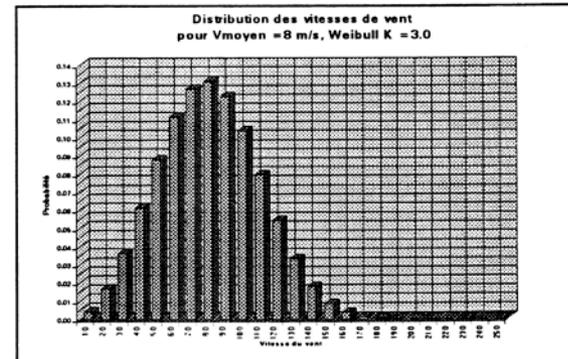
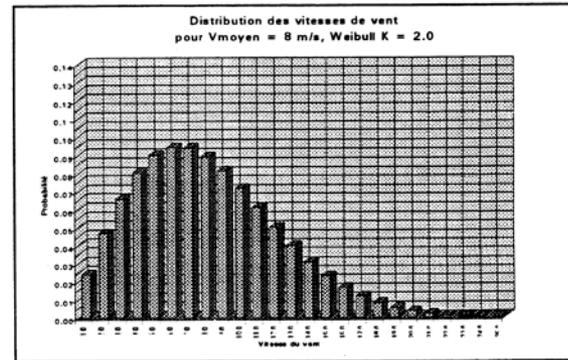
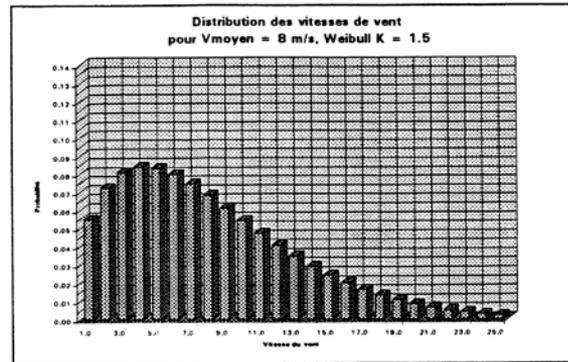
- le système équatorial (alizés) est provoqué par la convection des masses d'air chaud à l'équateur vers les régions tropicales plus fraîches. La force de Coriolis engendrée par la rotation de la terre dévie l'écoulement de l'air vers la droite dans l'hémisphère Nord et inversement au Sud.
- le système des hautes et moyennes latitudes où le mouvement des masses d'air est gouverné par l'équilibre (géostrophique) entre cyclones (basses pressions) et anticyclones (hautes pressions) et est de nature "horizontale". Les forces mises en jeu au sein d'un cyclone ou d'un anticyclone sont au nombre de 3 : le gradient de pression, la force de Coriolis, et la force centrifuge dans le tourbillon.



Wind resources¹ at 50 metres above ground level for five different topographic conditions

	Sheltered terrain ²		Open plain ³		At a sea coast ⁴		Open sea ⁵		Hills and ridges ⁶	
	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²
Dark Purple	> 6.0	> 250	> 7.5	> 500	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 11.5	> 1800
Red	5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
Yellow	4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
Light Green	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0- 8.5	400- 700
Blue	< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 7.0	< 400

Distribution des vitesses de vent suivant la loi de Weibull.

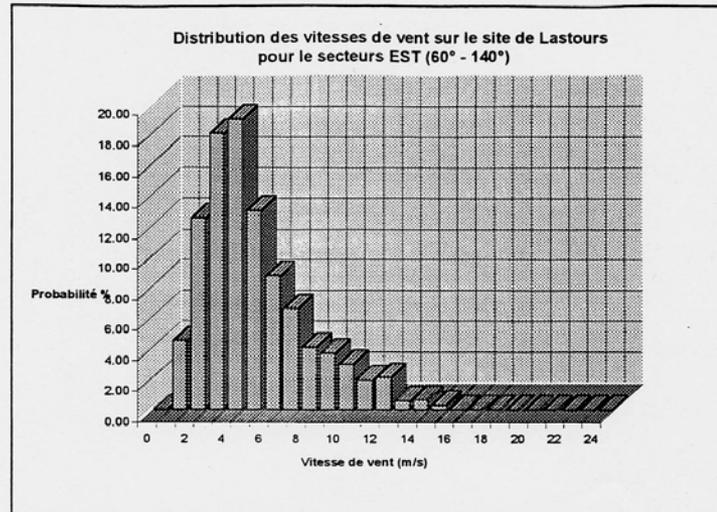


Les 3 graphiques ci-dessus représentent des distributions de vent pour une vitesse moyenne de 8 m/s et 3 coefficient de Weibull K.

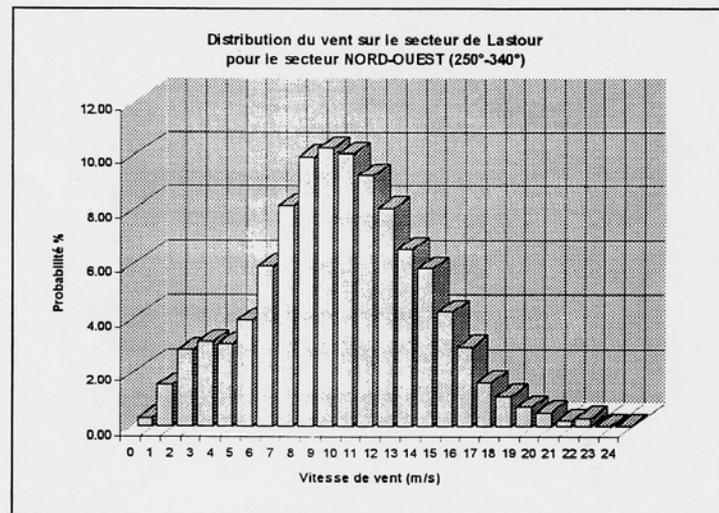
Suivant la loi de Weibull la probabilité qu'une vitesse de vent U_1 soit supérieure à une vitesse U est donnée par la formule :

$$F(U_1 \geq U) = e^{-\left(\frac{U}{C}\right)^k}$$

C est un facteur d'échelle
k est le facteur de forme.

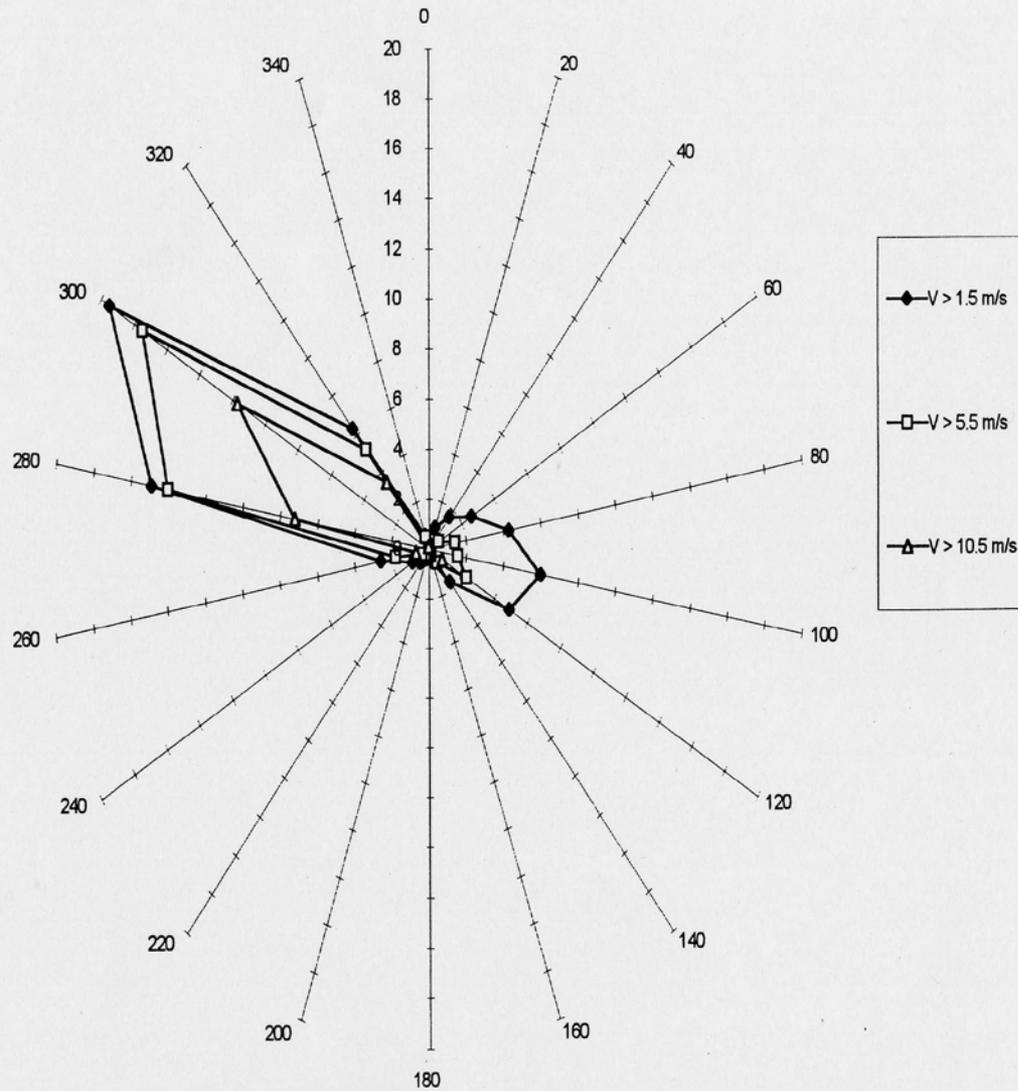


La distribution de vent pour le secteur Est (marin) correspond approximativement à une vitesse moyenne de 4.3 m/s et un coefficient de Weibull K de 2.1.



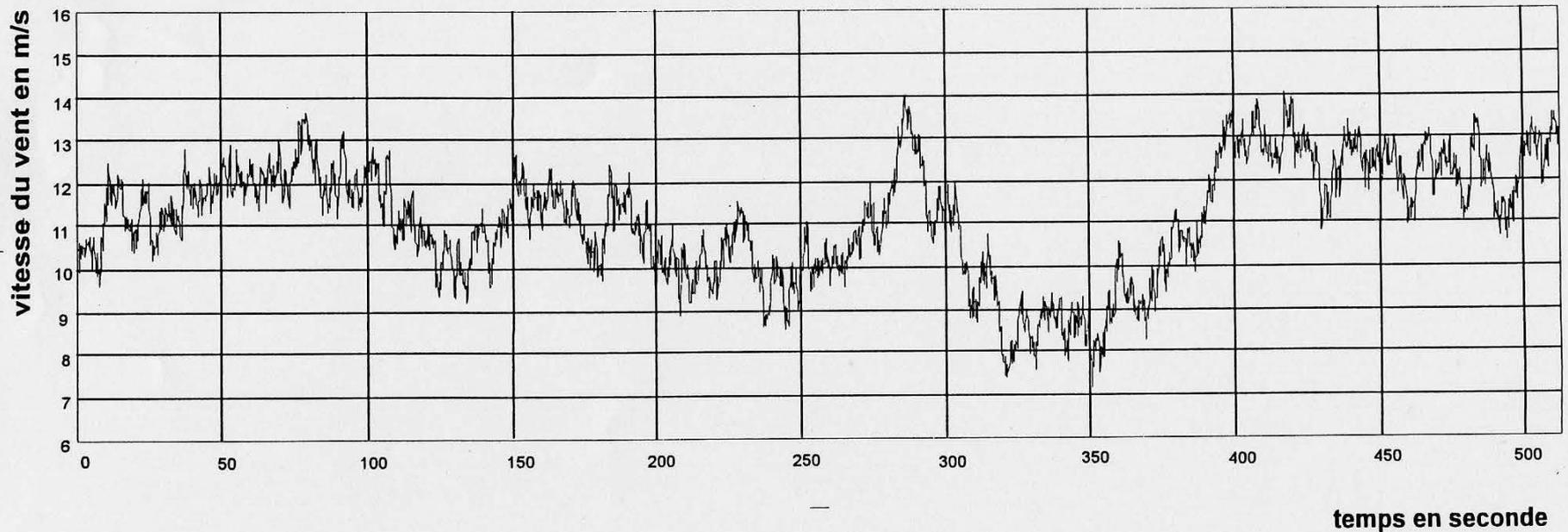
Pour le vent d'Ouest (Cers) la vitesse moyenne est de l'ordre de 9.5 m/s et le coefficient K de 2.6.

Rose des vents sur le site de Lastours



Les graduations dans le sens radial de 0 à 20 indiquent la probabilité d'occurrence d'un vent dans une direction et une vitesse données. Par exemple un vent avec une vitesse supérieure à 10,5 m/s dans la direction 300° représente 12% du temps soit environ 1,5 mois sur une année.

TURBULENCE



Tracé de l'évolution de la vitesse du vent sur une durée de 10 minutes.

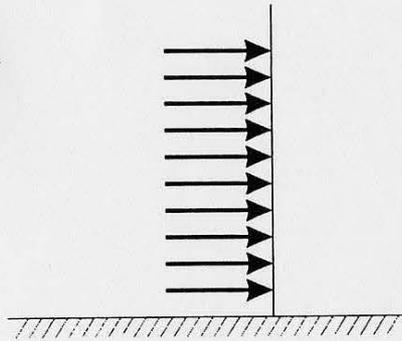
Vitesse moyenne : 10 m/s

Intensité de turbulence : $\frac{\sigma}{U_{\text{moy}}} = 0.149$

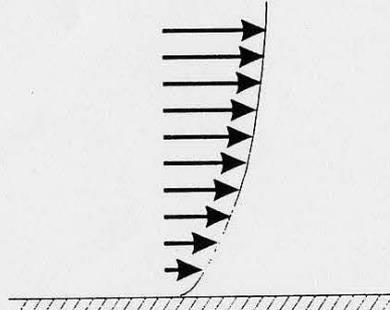
Coefficient de rafale : $\frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{moy}}} = 1.40$

LE VENT

gradient vertical et cisaillement.

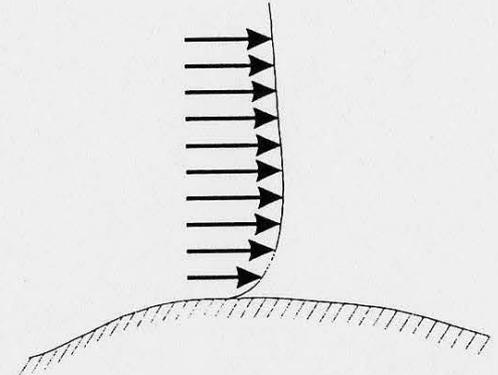


gradient vertical nul

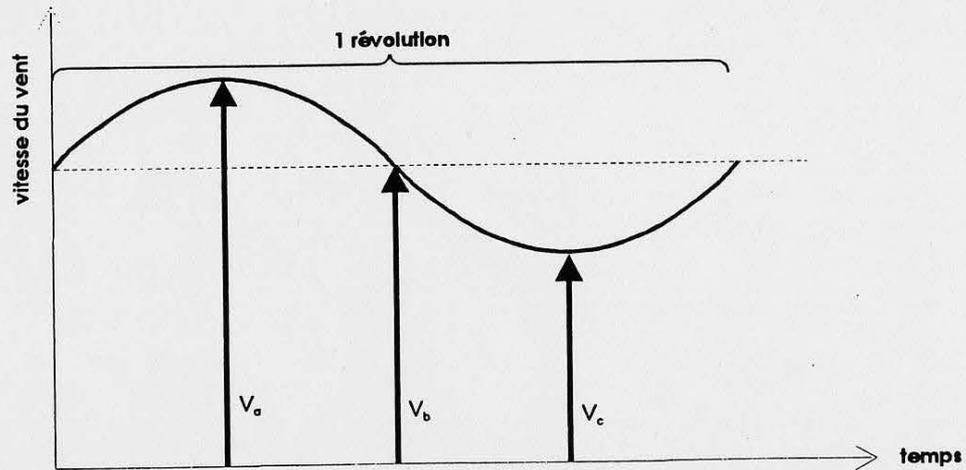
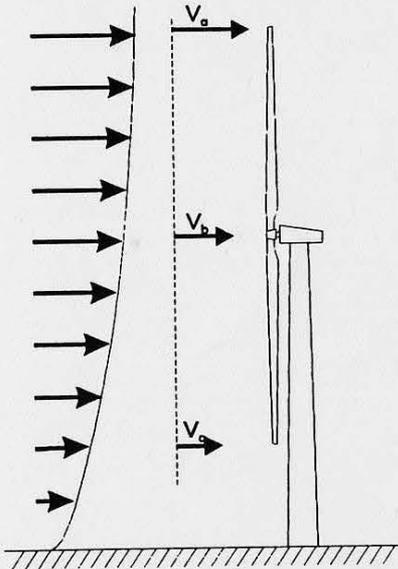


gradient vertical positif

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha \quad \alpha \text{ coefficient de cisaillement}$$



gradient vertical positif puis négatif

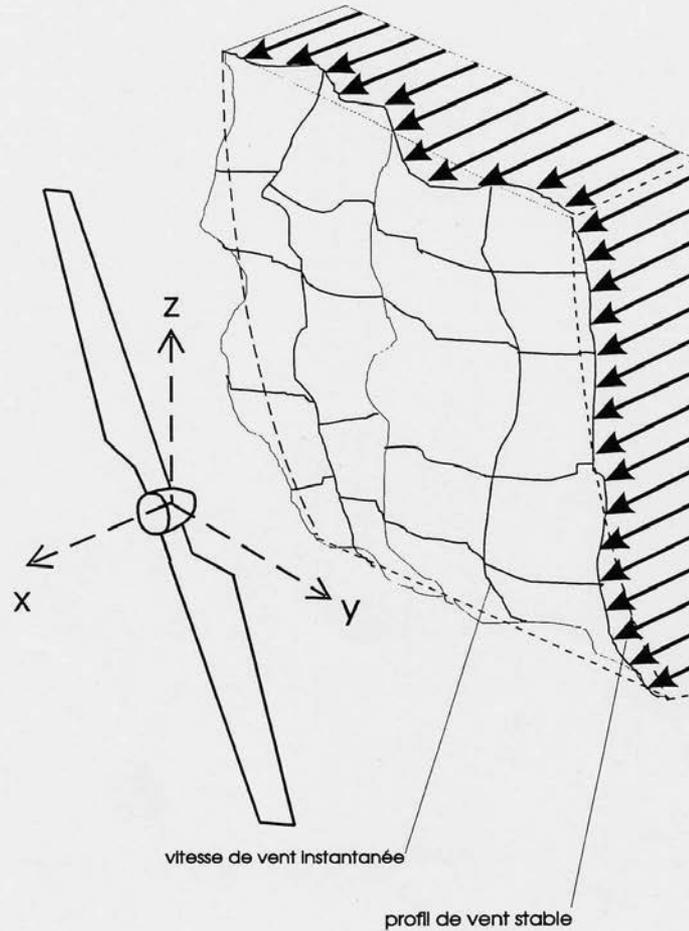


Evolution de la vitesse du vent en bout de pale pour 1 révolution.

L'évolution de la vitesse du vent au cours d'une révolution engendre des efforts cycliques responsables de la fatigue des matériaux constituant les pales.

LE VENT

TURBULENCE ET GRADIENT VERTICAL



La turbulence provoque une répartition non uniforme des vitesses et directions du vent dans l'espace et dans le temps. Si l'on considère 2 points séparés par une certaine distance, la vitesse et la direction du vent en ces 2 points sera d'autant plus semblable que cette distance est faible.

Le gradient vertical du vent est due à la friction des couches d'air sur la surface du sol, la vitesse du vent diminue au fur et à mesure que l'on se rapproche du sol. Ce gradient vertical est fonction de la rugosité du sol.

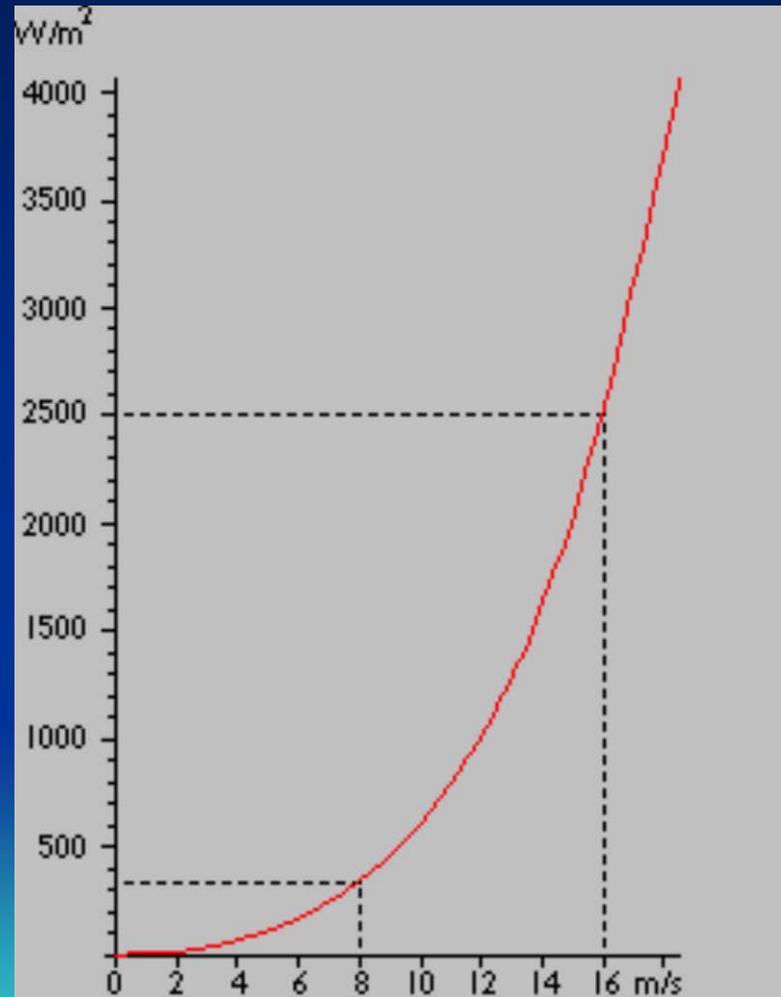
très grande ville avec de grands immeubles et gratte-ciel	1,6
Grandes villes avec bâtiments hauts	0,8
Villages, petites villes, zones agricoles avec de nombreuses haies, forêts et terrains très accidentés.	0,4
Zone agricole avec de nombreux bâtiments, ou des haies de 8 mètres espacées de 250 m.	0,2
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 500 m.	0,1
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 1250 m.	0,055
Zone agricole sans barrière ni haie, parsemée d'habitations éparses sur un relief de collines douces.	0,03
Terrain vague avec surface lisse (piste de décollage, gazon entretenu,...)	0,0024
Surface d'un plan d'eau	0,0002



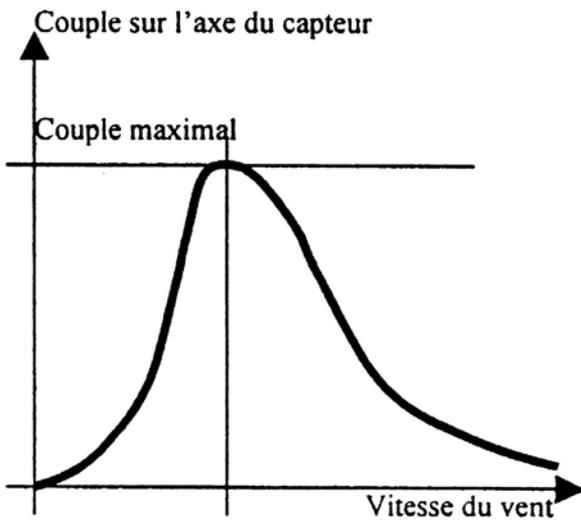
Classes de vent

Standard	Critères	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
GL	Vitesse vent moyenne	max 10m/s	max 8,5 m/s	max 7,5 m/s	max 6 m/s
	Rafale sur 50 ans	65,1m/s	55,3 m/s	48,8 m/s	39,1 m/s
	Vent établi sur 50 ans	46,5 m/s	39,5 m/s	34,9 m/s	29,9 m/s
IEC	Vitesse vent moyenne	max 10 m/s	max 8,5 m/s	max 7,5 m/s	max 6 m/s
	Rafale sur 50 ans	70 m/s	59,5 m/s	52,5 m/s	42 m/s
	Vent établi sur 50 ans	50 m/s	42,5 m/s	37,5 m/s	30 m/s

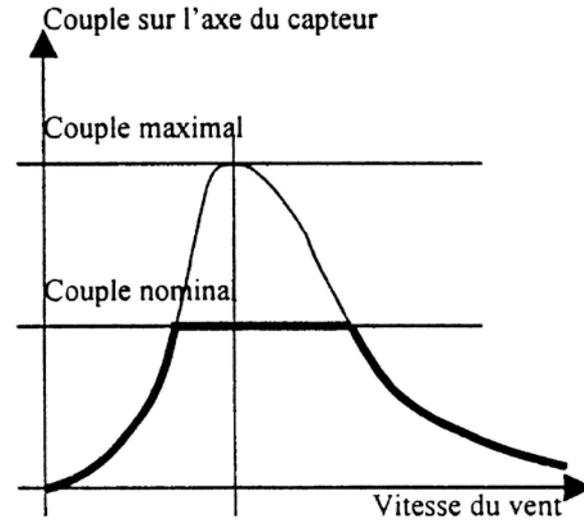
La puissance est proportionnelle à la vitesse du vent au cube



Nécessité de la régulation

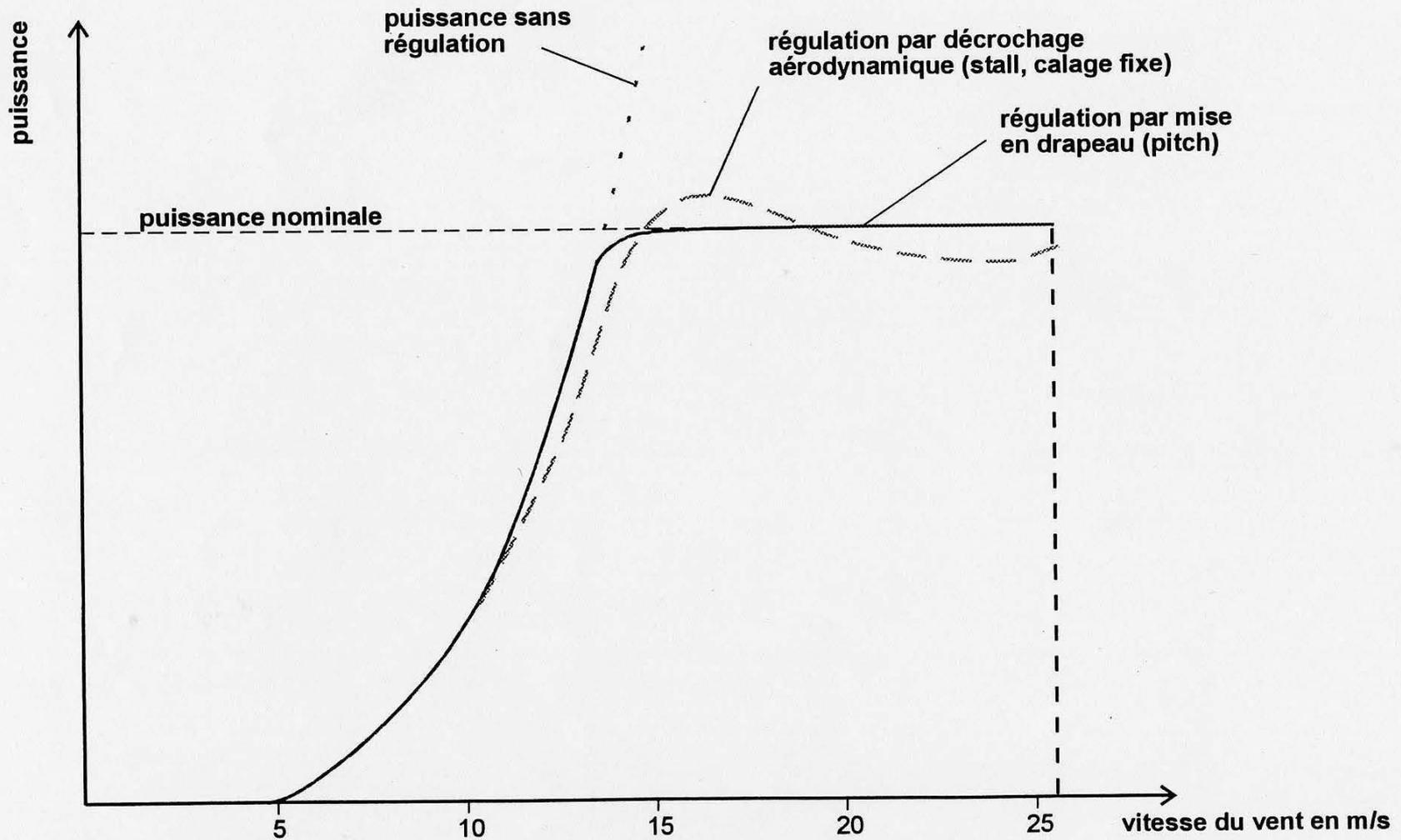


Autorégulation



régulation commandée

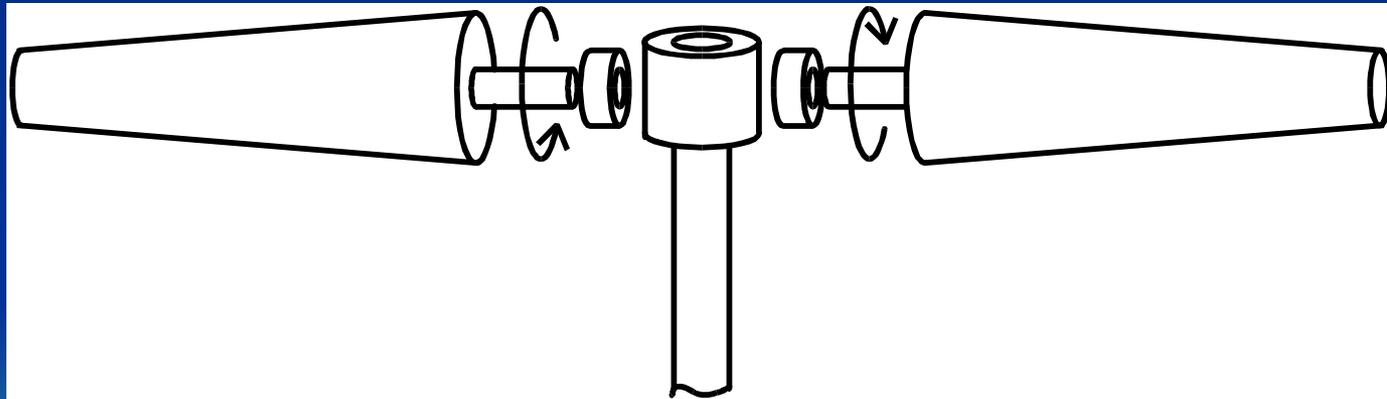
REGULATION DE LA PUISSANCE



Mécanisme d'orientation des pales

Régulation PITCH

- Angle de calage variable
- La pale tourne sur son axe propre
- Meilleur rendement possible
- Puissance nominale constante



$$C_p^{\max} = \frac{16}{27} \approx 0,593$$

RÉGULATION STALL

- La pale ne tourne pas sur son axe propre => plus économique, plus fiable
- Nécessité d'un frein aérodynamique
- N'est pas utilisé sur les grandes éoliennes récentes

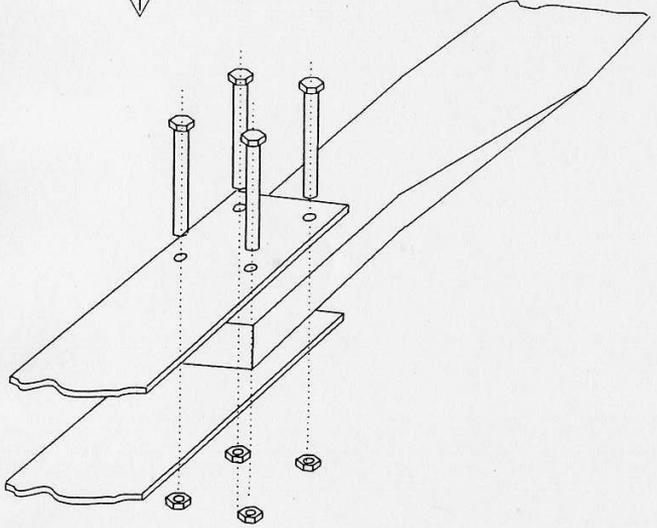
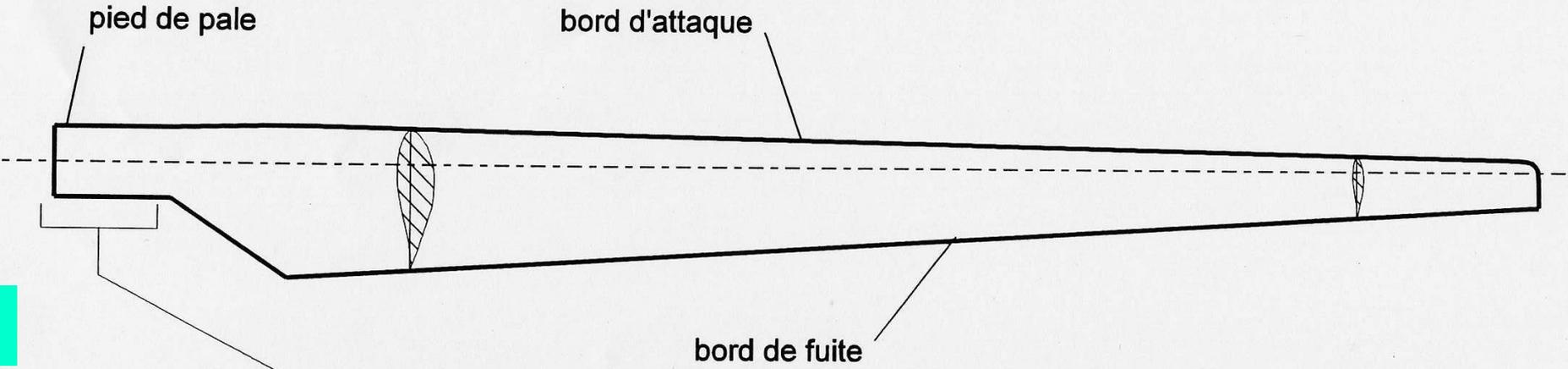


$$C_p^{\max} = \frac{16}{27} \approx 0,593$$

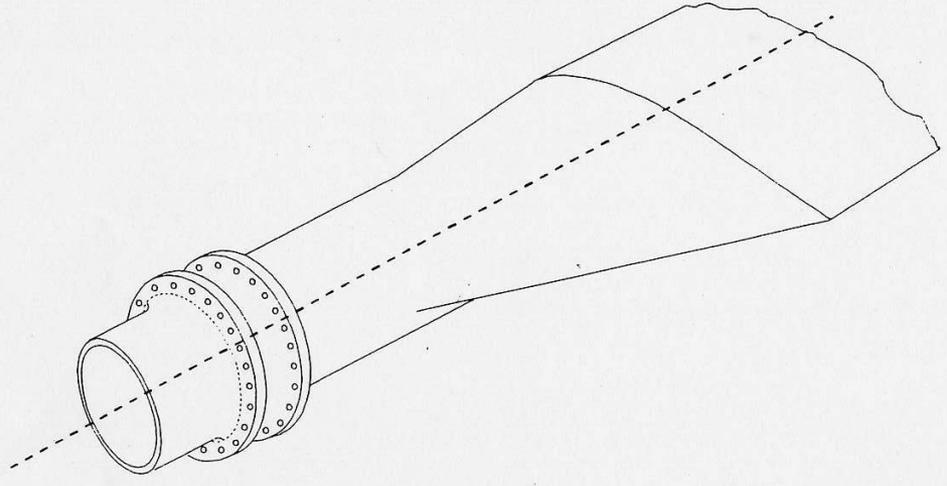
Aérodynamique des pales



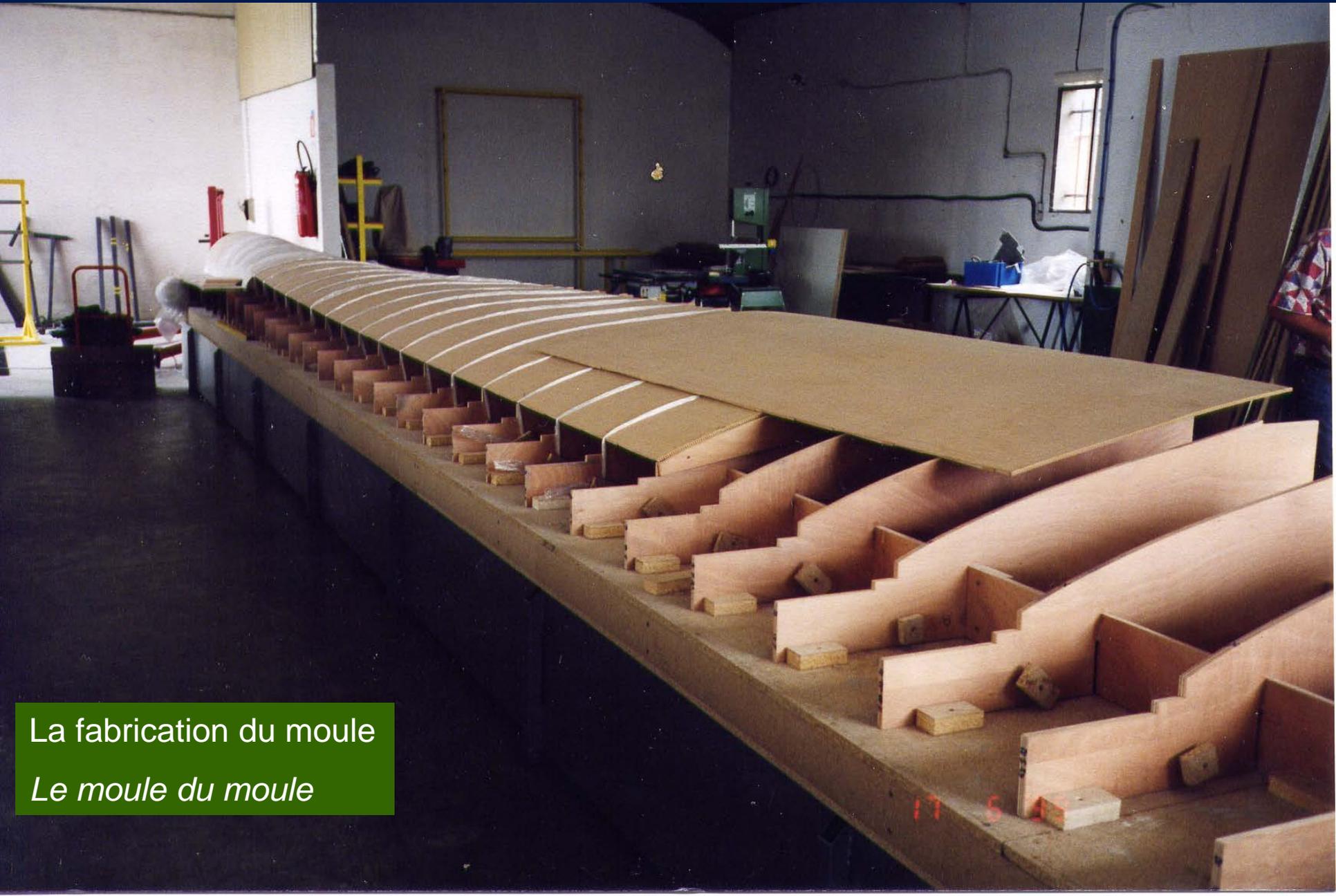
LA PALE



Fixation par plaque et contre-plaque



Fixation par bride et contre-bride



La fabrication du moule
Le moule du moule

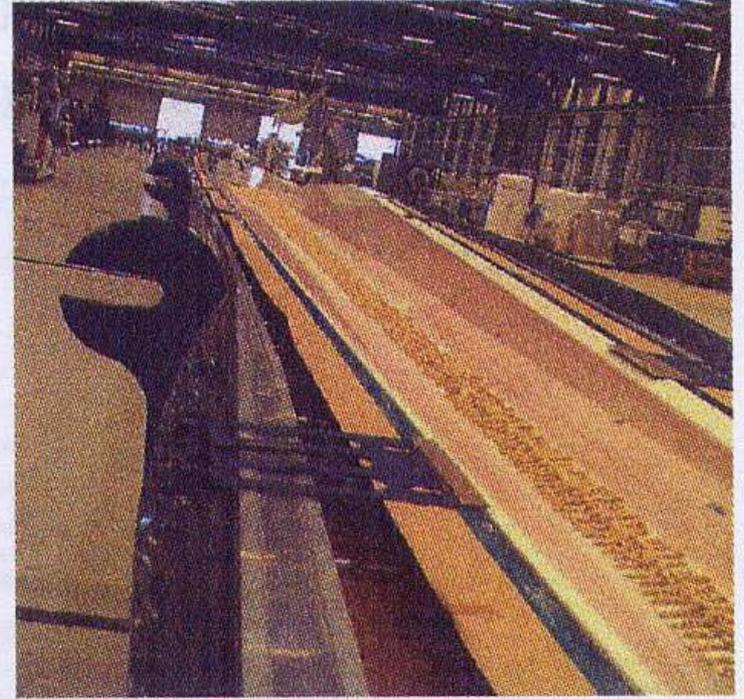
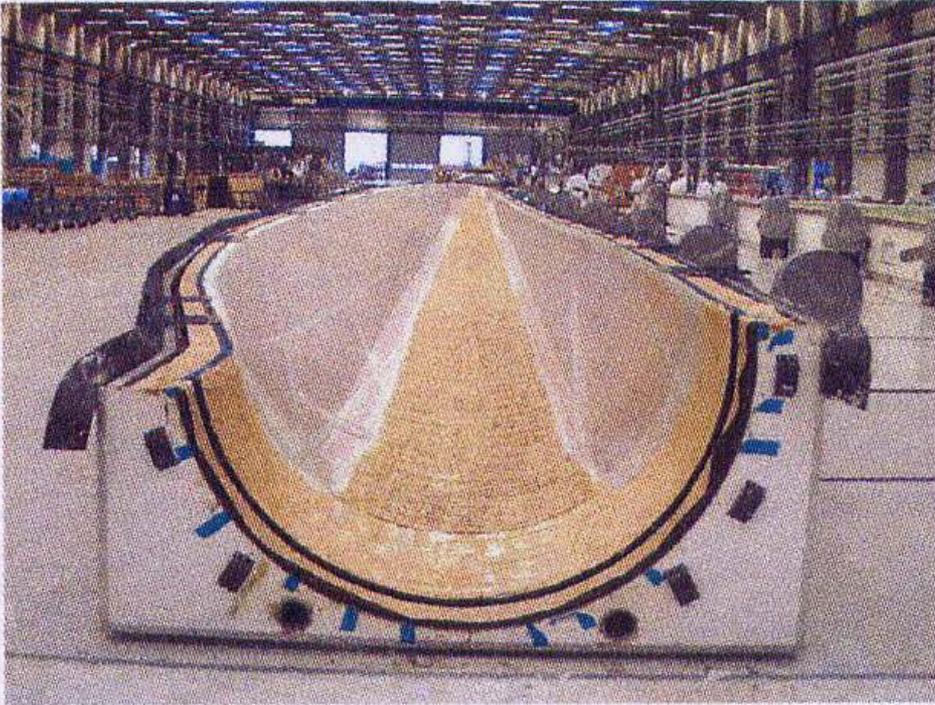
Les 2 parties qui vont permettre la fabrication du moule



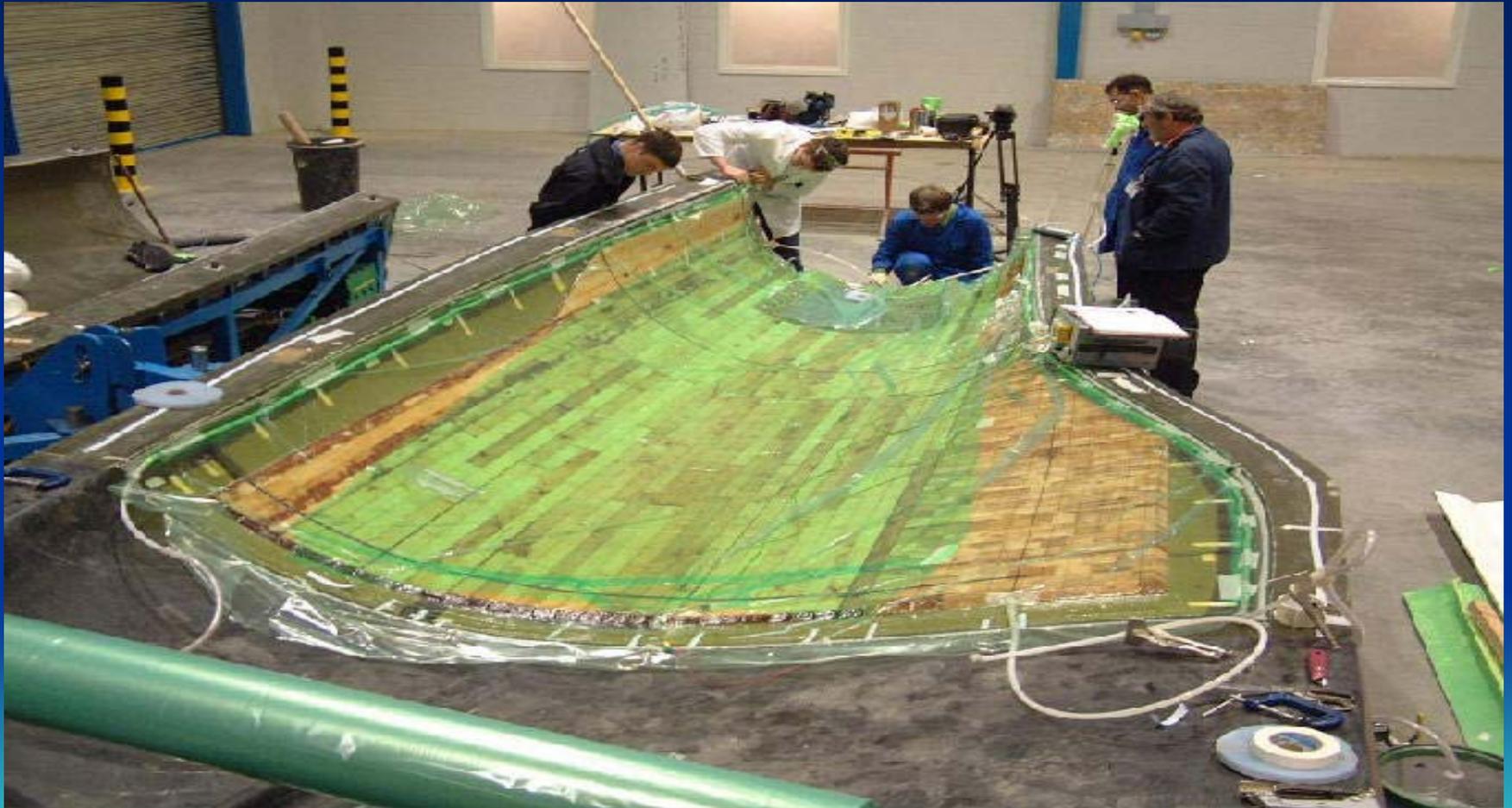
Préparation des surfaces pour la fabrication du moule



Les matériaux composites



Les matériaux composites

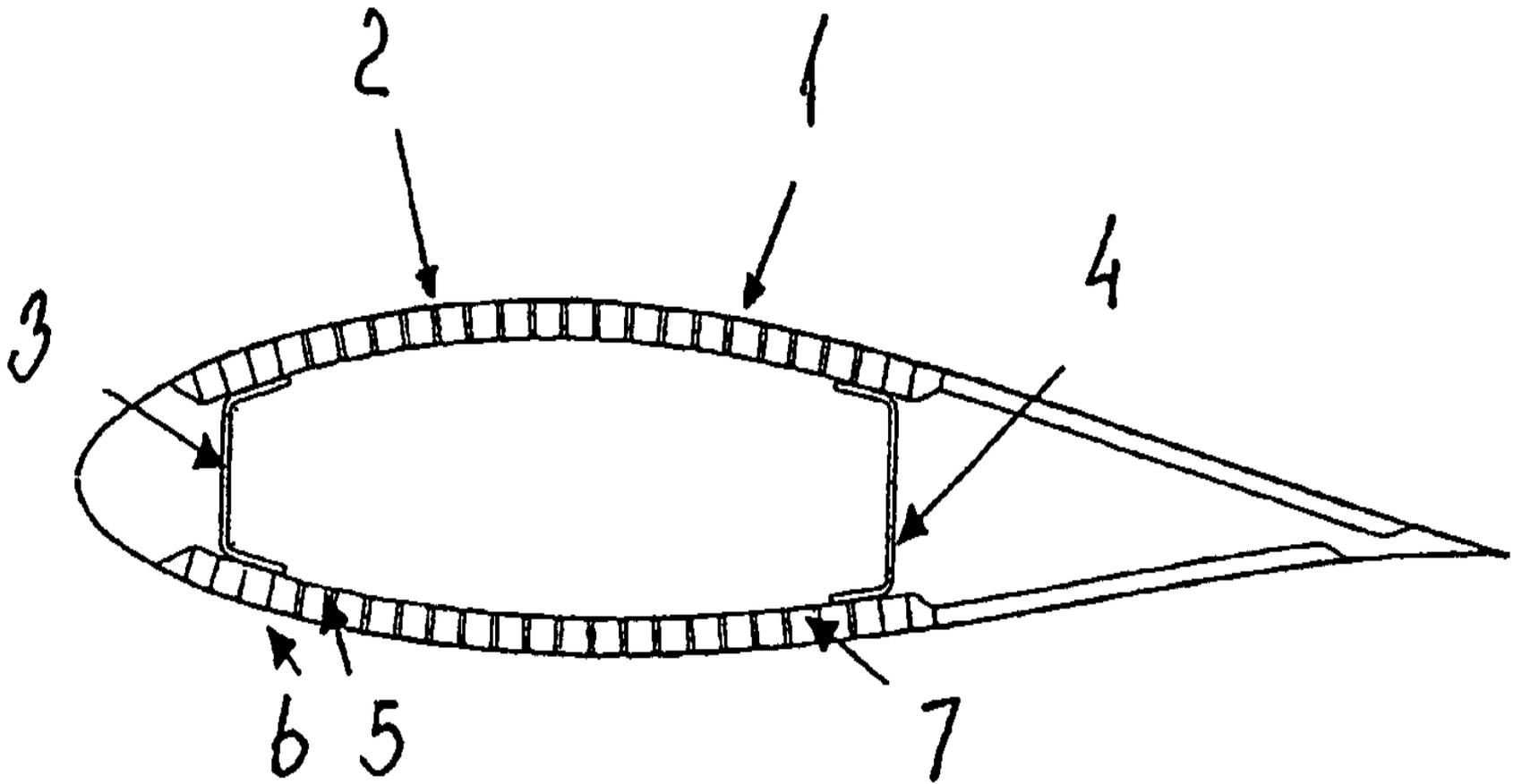


L'intérieur d'une pale

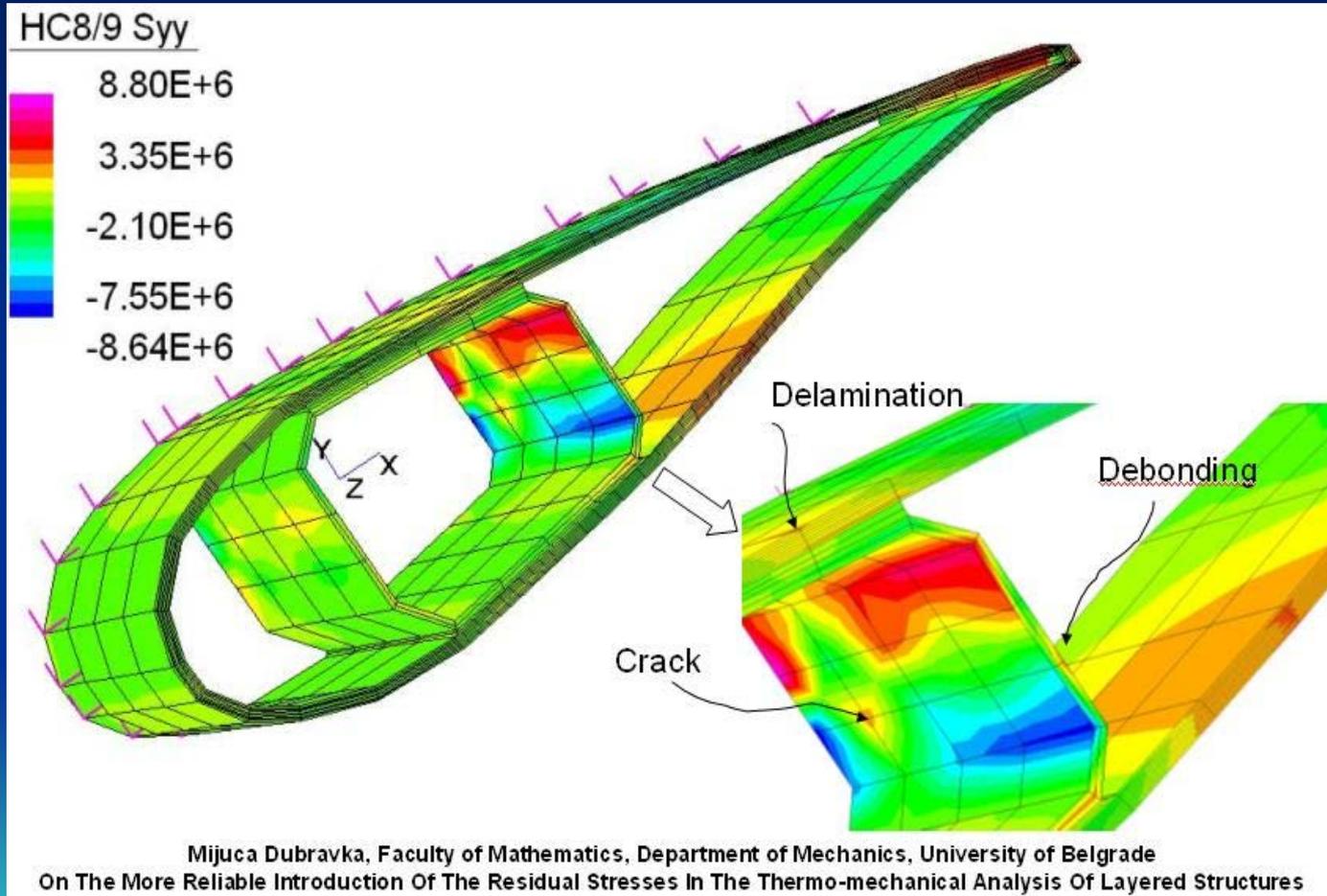


longeron

L'intérieur de la pale



Exemple de calcul

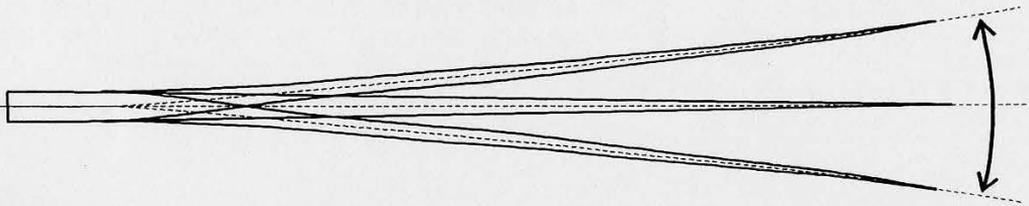


Les efforts sur l'hélice

DYNAMIQUE DE LA PALE

①

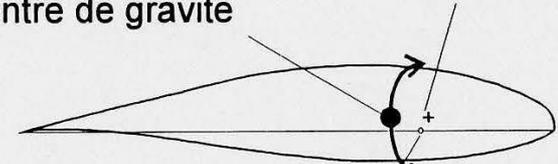
mouvement de battement



②

centre de gravité

centre de torsion



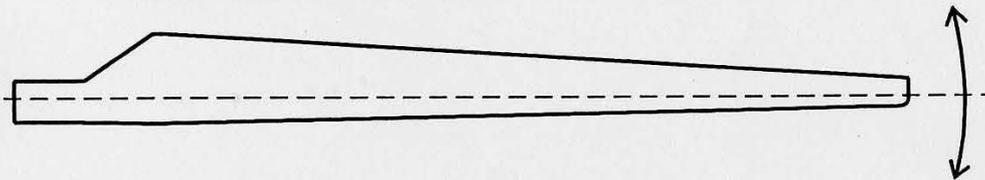
centre aérodynamique

La souplesse et la répartition des masses sur la pale lui permettent d'osciller autour d'une position d'équilibre à des fréquences caractéristiques.

Si la pale est "excitée" par des forces ayant des fréquences voisines de ses fréquences propres il peut se produire des phénomènes de résonance très dangereux pour l'ensemble de l'éolienne.

③

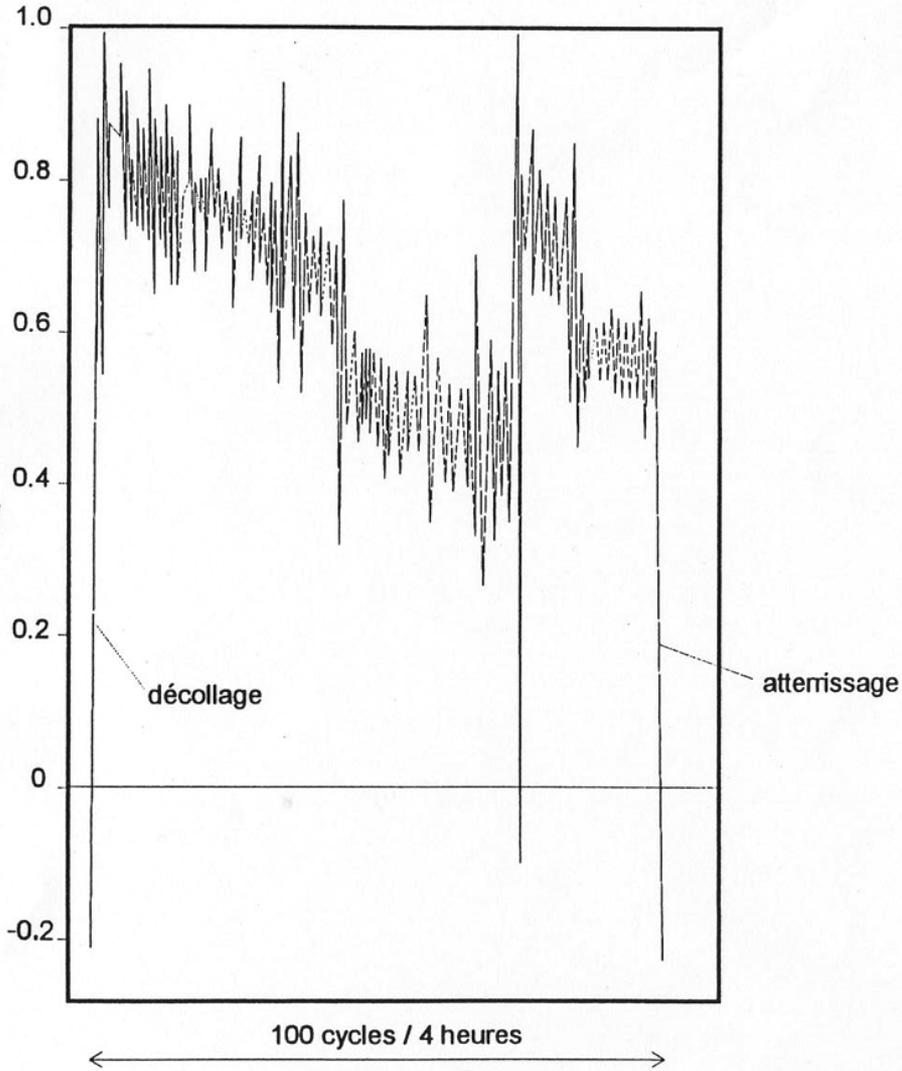
mouvement de traînée



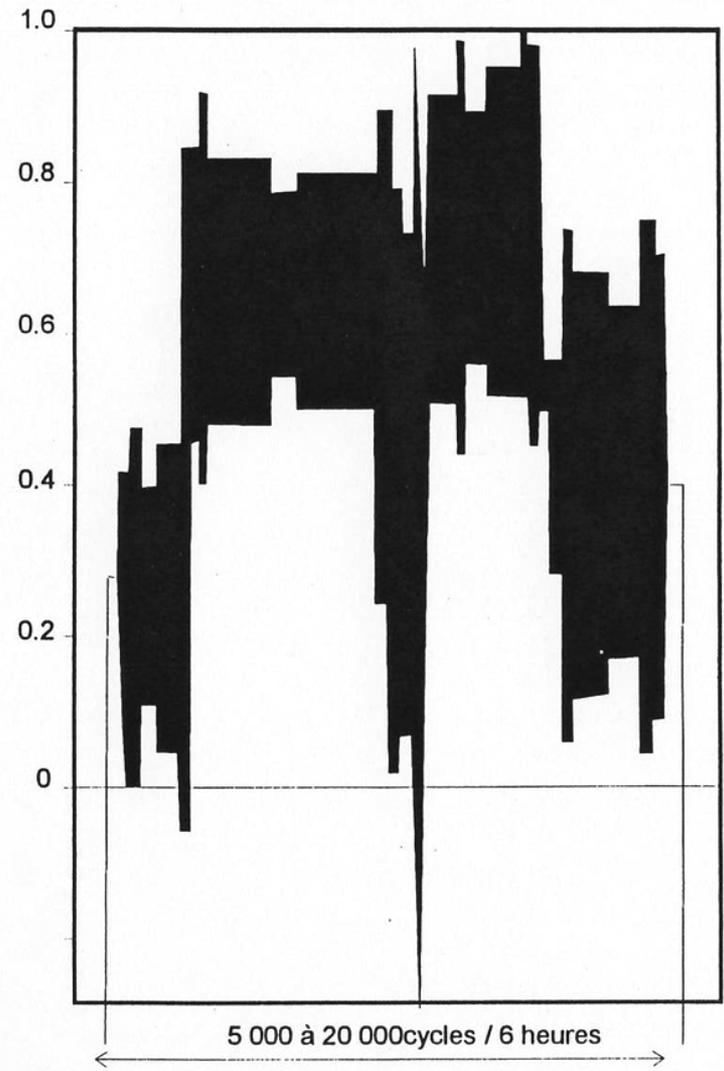
Moment fléchissant 10 fois supérieur au couple moteur

CYCLES DE FATIGUE

contrainte sur une aile d'avion pendant un vol



contrainte sur une pale d'éolienne



COMPARAISON ENTRE DIFFERENTES TECHNOLOGIES

Durée de vie

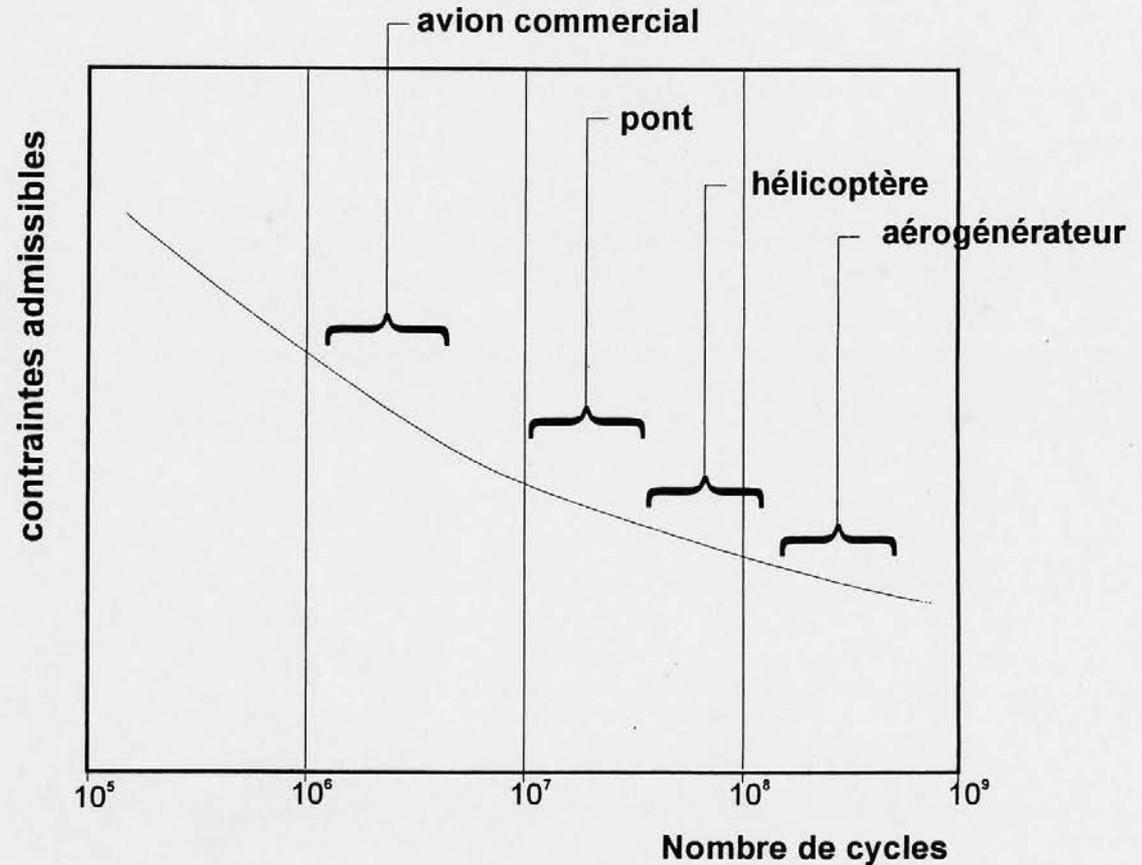
Automobile : 4 000 heures
(200 000 kms à 50 km/h)

Avion : 10 000 heures

Aérogénérateur : 150 000 heures
(20 ans x 7500 heures)

nombre de révolutions pour une
éolienne de 15 m de diamètre :

$$100 \text{ tr/mn} \times 60 \times 24 \times 365 \times 20 = 10^9$$



Les générateurs électriques

Géné Asynchrone

1 paire de pôle => 1
impulsion /tour => il faut
tourner à 50 tr/s pour produire
du 50Hz (3000 tr/mn)

2 paires de pôle 25 tr/s
(1500tr/mn)

3 paires de pôle 1000 tr/mn

Glissement nul => couple nul

Glissement 1% => couple
maxi

Avec rotor bobiné, on peut
faire varier la résistance du
rotor => glissement 10%

Possibilité d'avoir 2 vitesses
de rotation en modifiant la
connexion des bobinages 6 et
8 pôles soit 1000 et 750
tr/mn)

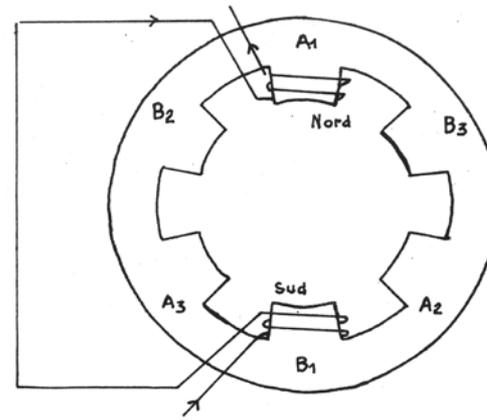


Fig. 2 - Stator de moteur triphasé à 2 pôles

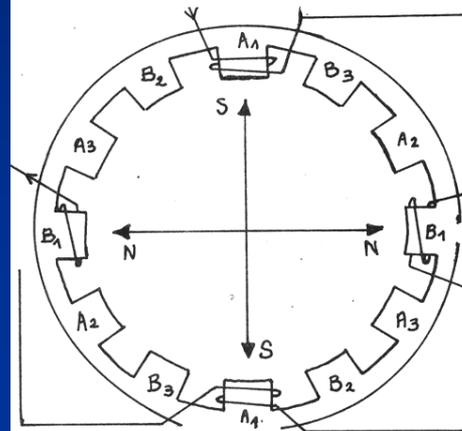


Fig. 3. - Stator de moteur triphasé à 4 pôles.

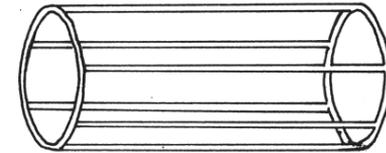


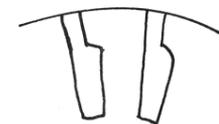
Fig. 4
Cage
d'écureuil



Simple cage



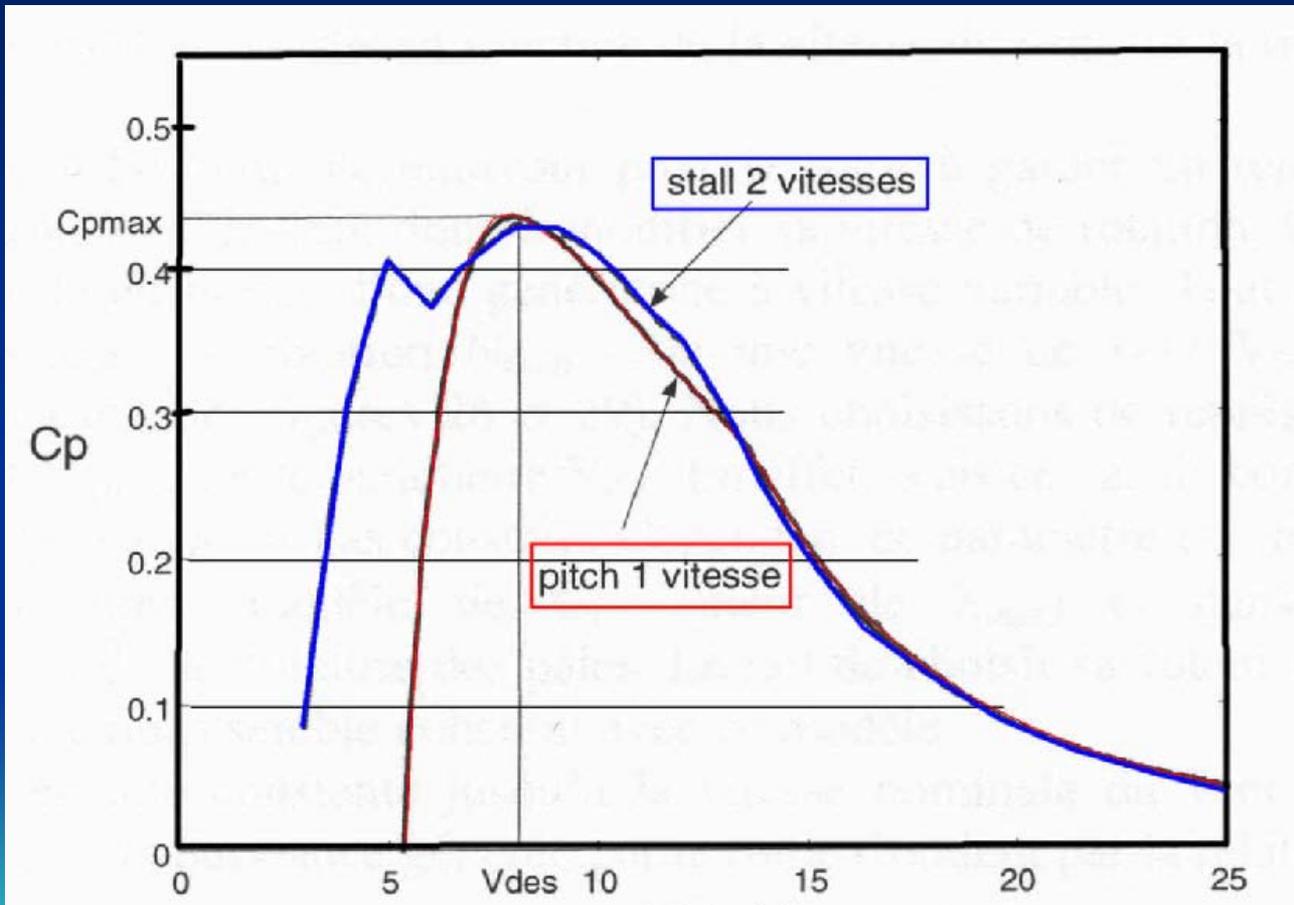
Double cage



Encoches
profondes

Fig. 5 Types de cages d'écureuil.

Générateur à 2 vitesses



Entraînement indirect

-gén. **asynchrone**

-multiplicateur obligatoire car faible couple résistant

-Liaison directe avec le réseau

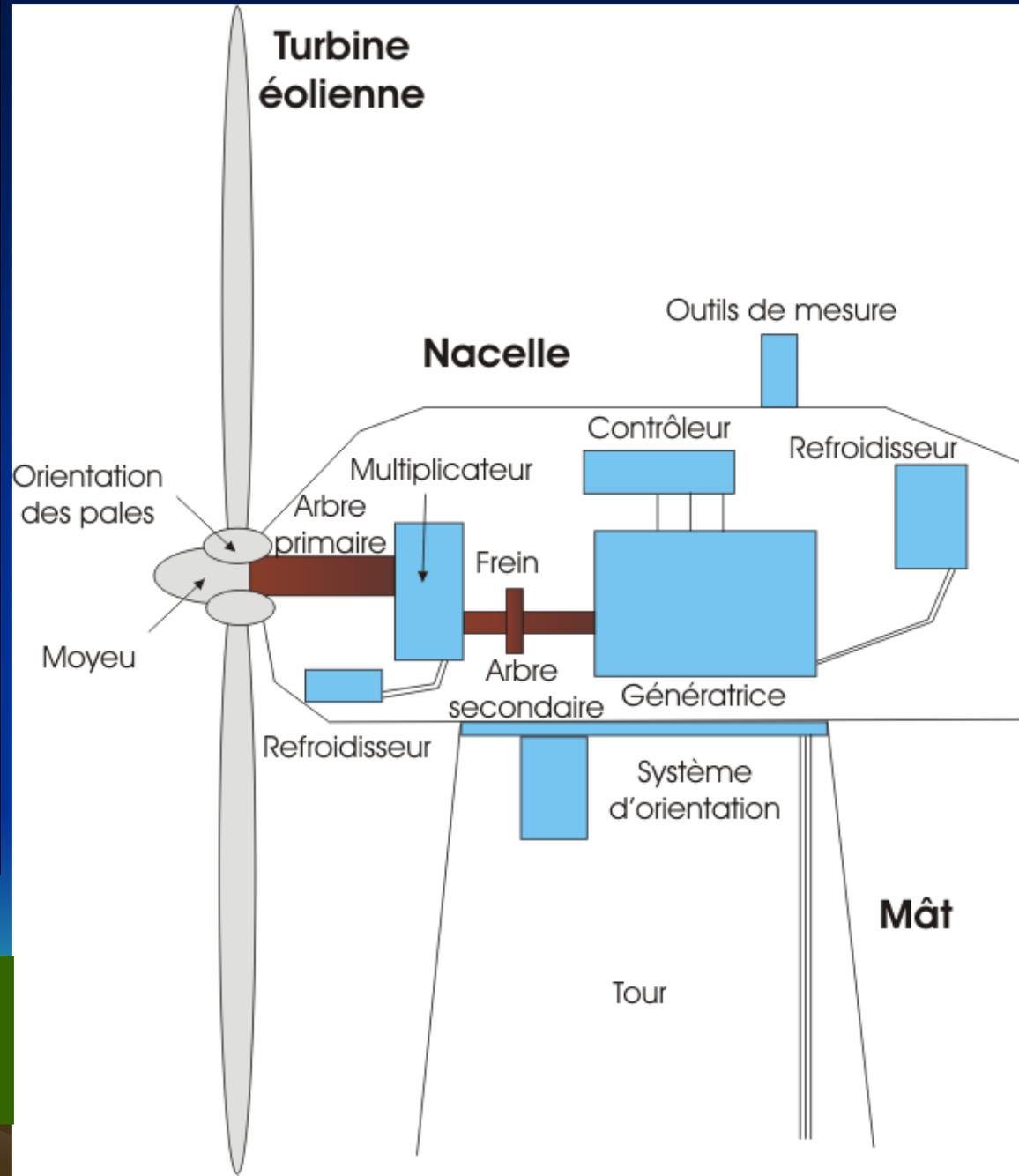
-Solution économique

-Vitesse de rotation fixe

-Actuellement les gén. Asyn. ont toutes 2 vitesses de rotation

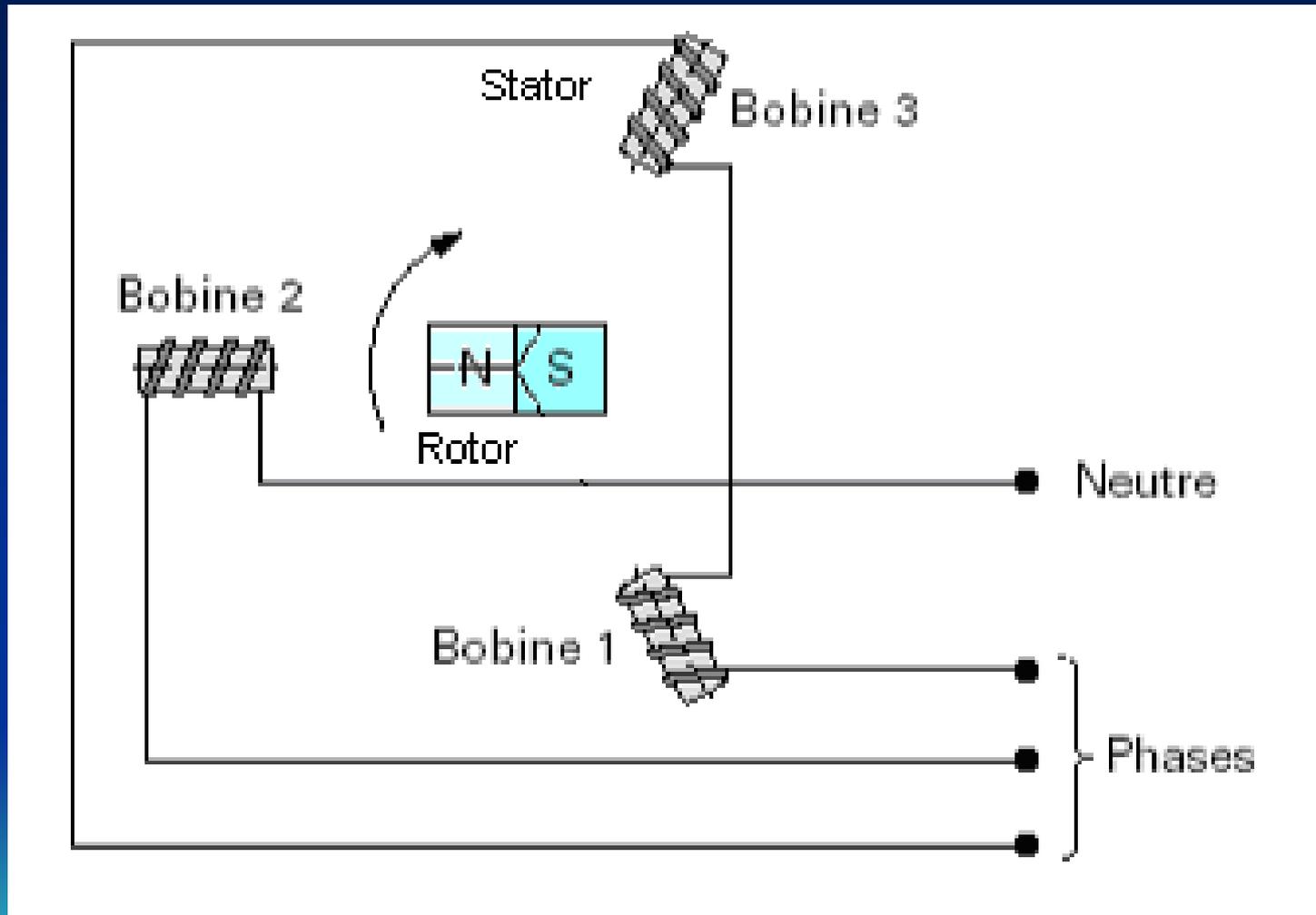
-Glissement => Souplesse dans la chaîne => sollicitations mécaniques moins importantes

-Chez Vestas système optislip pour augmenter le glissement



La puissance réactive est fournie par le réseau pas besoin de batterie de condensateurs

Principe du générateur synchrone



Stator identique aux générateurs asynchrones mais le rotor possède des pôles magnétiques et est alimenté en courant continu par une excitatrice. Pas de glissement. Couple résistant important si le nombre de paires de pôles est élevé.

Entraînement direct

-gén. **Synchrone** =>
construction spécifique car
il faut un grand nombre de pôles.

-Pas de glissement => Chaîne
de transmission trop rigide =>
Nécessite une électronique de
puissance pour relier au réseau

-Pas de multiplicateur

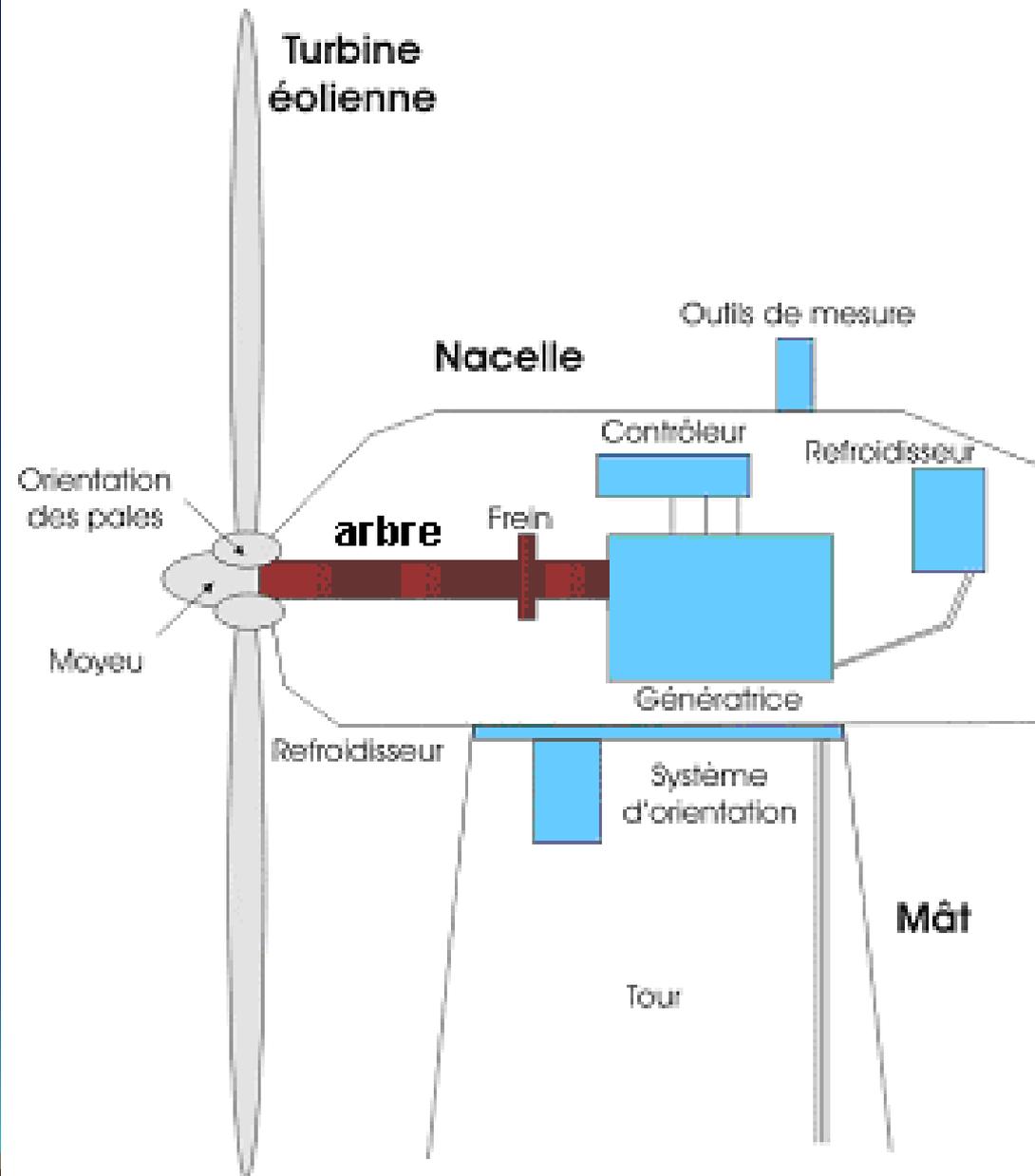
-Solution plus coûteuse

-Vitesse de rotation **variable**

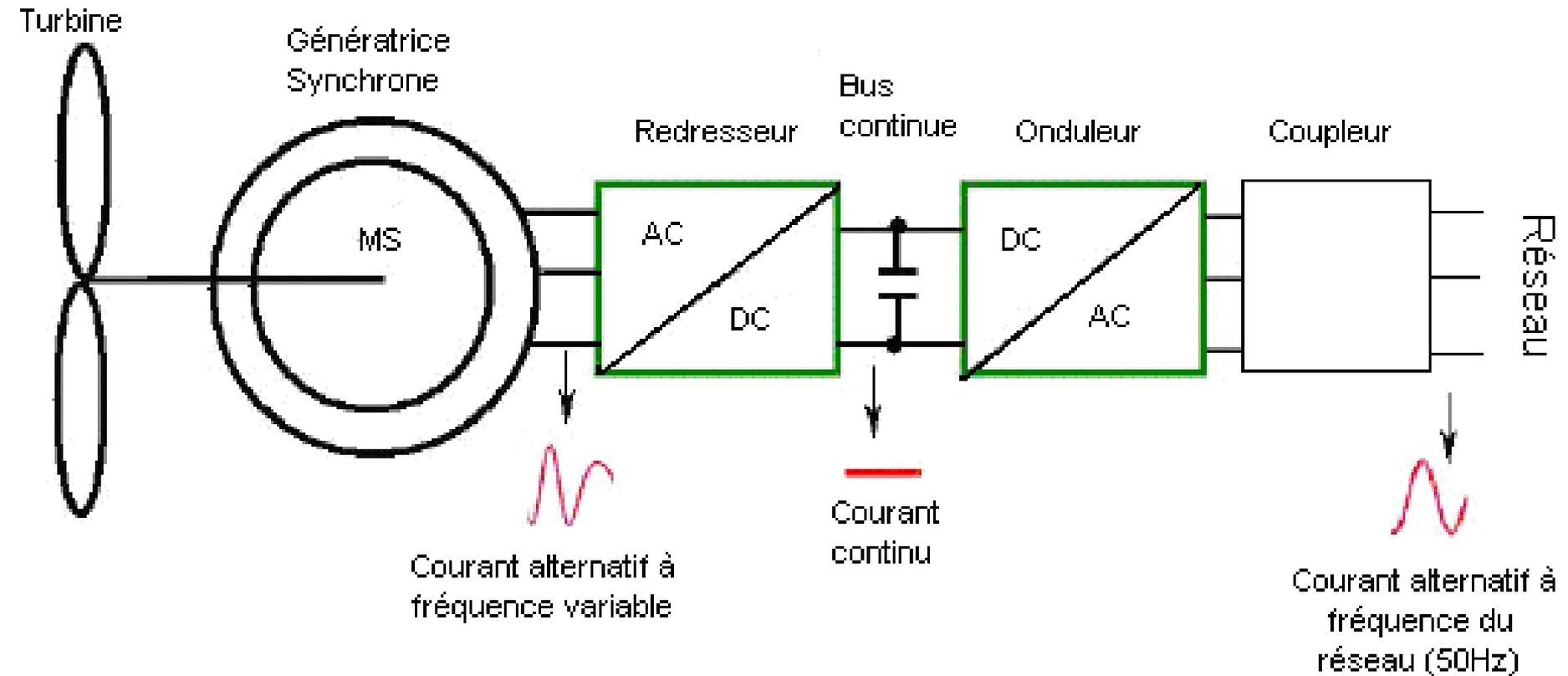
-Gain d'énergie jusqu'à 25%

-Moins de sollicitations
mécaniques car le rotor joue le
rôle de volant d'inertie

-Solution obligatoire en
OffShore



Raccordement au réseau d'une géné. synchrone

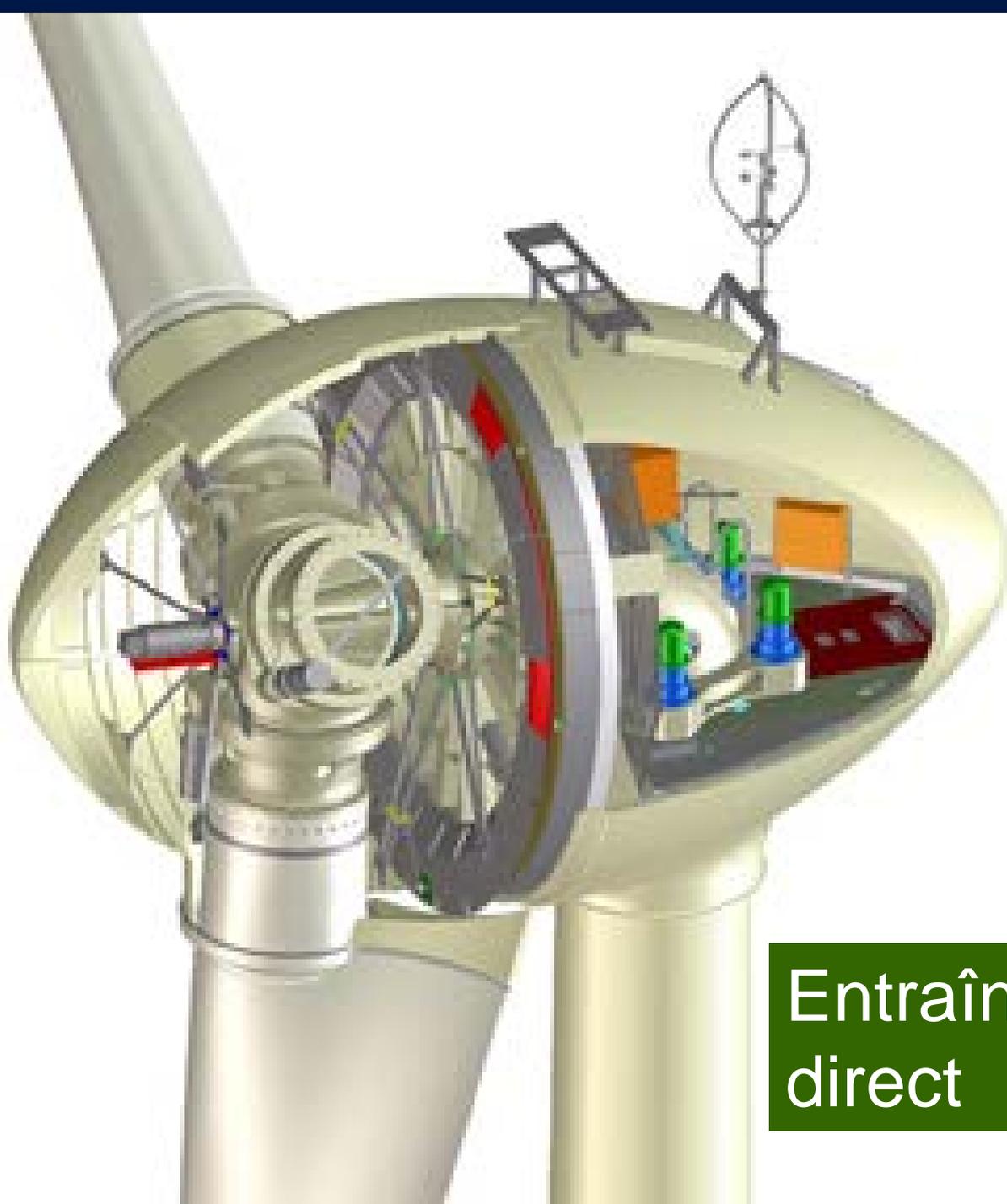






Entraînement direct





Entraînement
direct

Entraînement indirect



Entraînement direct obligatoire en offshore



Pour les petites éoliennes

	Avantage	Inconvénients
Génératrice asynchrone	Coût d'investissement moindre. Simplicité d'utilisation.	Pas de possibilité de l'utiliser comme groupe électrique de secours. Nécessité de placer une batterie de condensateurs.
Génératrice synchrone	Possibilité de l'utiliser comme groupe électrique de secours. Solution adaptée à toutes les configurations techniques.	Coût d'investissement plus élevé. Obligation d'auxiliaires électroniques (convertisseur, protection par disjonction).

Conclusion sur les générateurs

- 85% du parc éolien possède des générateurs asynchrones. Solution moins coûteuse à l'achat mais les sollicitations mécaniques entraînent une maintenance importante sur les sites à fortes turbulences.
- Générateurs synchrones à entraînement direct plus coûteux mais obligatoire en offshore (*et conseillé dans le Lauragais*).

Comparatif des coûts

LE BUDGET D'UN PROJET EOLIEN TERRESTRE

<u>Eoliennes</u>	75%
Génie Civil	8%
Electricité	10%
Levage/Transport	2%
Ingénierie	5%
Total :	100.0%

COMPOSANTS	%(en valeur)
Pales	22,2%
<u>Moyeu</u>	1,4%
<u>Calage de pales</u>	2,7%
Roulements rotor	1,2%
Arbre lent	1,9%
Multiplificateur	12,9%
<u>Génératrice</u>	3,4%
Convertisseur	5,0%
<u>Nacelle</u>	2,8%
Freinage	1,3%
Capot nacelle	1,4%
<u>Système orientation</u>	1,3%
Câbles	1,0%
Visserie	1,0%
Mât	26,3%
Transformateur	3,6%
Assemblage	2,5%
Réserves garantie	1,5%
Charges	2,0%
Frais de crédit	3,0%
Maintenance 2 ans	1,5%
	100,0%

Attention à la casse!



Casque obligatoire!









Nur noch eine rauchende Ruine blieb gestern von dieser Windkraftanlage in Tüttendorf bei Rendsburg übrig. Durch Blitzschlag hatte sich die Gondel in 60 Meter Höhe entzündet und brannte aus. Foto: dpa



Déracinement!

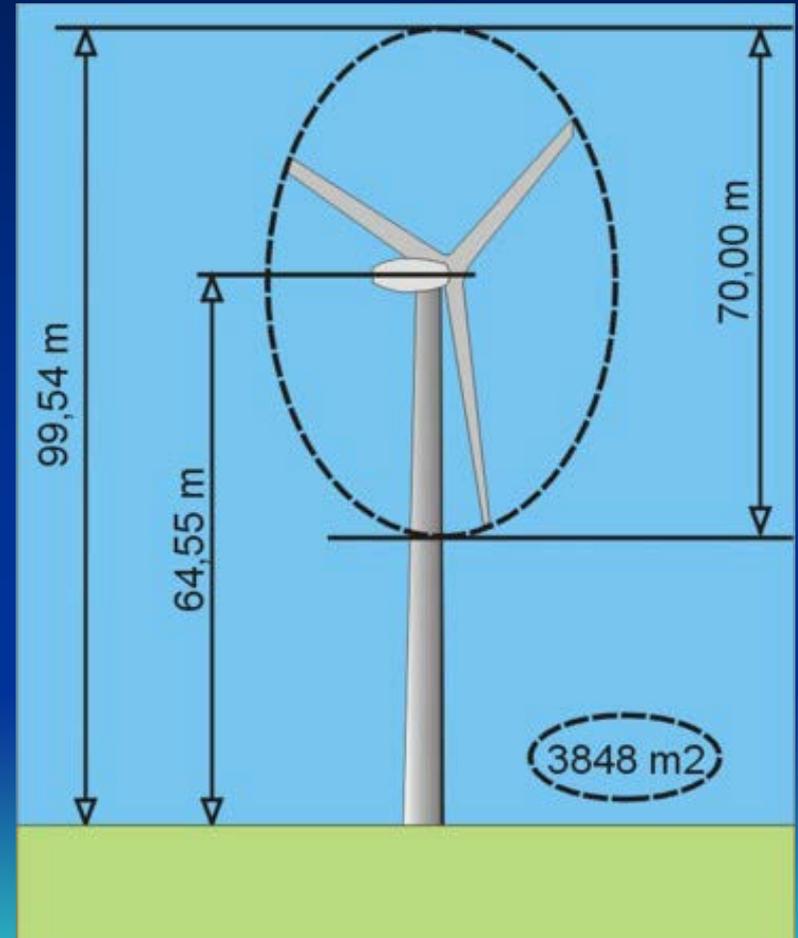






Quelques dimensions

- **Les caractéristiques techniques sont les suivantes :**
- Longueur des pales : 35 mètres
- Diamètre du rotor : 70 mètres.
- Hauteur du mat : 65 mètres.
- Surface balayée par le rotor : 3848 m²
- Vitesse de rotation, de sens horaire, de 10,6 à 19 tours/minutes.
- Tripale, à régulation pitch.
- Le mat est du type " acier tronconique " de 4 mètres de diamètres à la base, et de 3 mètres au sommet.
- Le tableau de commande répondra à la logique suivante :
- Démarrage : Vents de 3 m/s
- Vitesse nominale : 11,6 m/s
- Arrêt : Vents supérieur à 25 m/s.
- La génératrice est de type asynchrone, développant une puissance nominale de 1500 KW, 50 Hz, 690 Volts, en tournant entre 1000 et 1800 tours/min. Ce qui nécessite un multiplicateur (équivalent d'une boîte de vitesse, voir chapitre " aspects techniques ") permettant de multiplier la vitesse de rotation du rotor jusqu'à 94,7 fois. Refroidissement eau/huile.
- Les masses en jeu sont :
- Rotor : 32 tonnes.
- Nacelle : 56 tonnes.
- Tour (ou mat) : 95 tonnes.
- Total : 183 tonnes.
- Auquel il convient d'ajouter, mais non précisé dans les documents consultés, une masse d'environ 400 tonnes pour les fondations.



FIN