



Aérogénérateurs électriques

Historique

Ressources énergétiques du vent

Croissance de la filière

Caractérisation du vent

Turbines éoliennes

Systemes électromécaniques à axe horizontal

Chaînes de conversion électrotechniques



Bernard MULTON



Historique

Voiles bateaux → Premiers moulin à vent (Perse 600 AVJC)



Pompage dans les polders (Hollande)



Pompage de l'eau

Production d'électricité

1891 : 1er aérogénérateur **Danemark** (La Cour)

1941 : **USA** bipale de 1,25 MW

France : **1920** bipale ϕ 20 m (CEM)

1950-60 tripale ϕ 30 m 800 kW

bipale ϕ 35 m 1 MW

Californie : **années 1980** près de 400 MW en 1985



Wind-rush californien



Deux grands secteurs d'application :

- **sites isolés**, camping, bateaux... **qq 10 W à qq 10 kW**

Ex 1 : 400 W



Ex 2 : USA 10 kW



- **production au fil du vent couplé au réseau**
qq 100 kW à qq MW



Ex 3 Donzère : 5 x 600 kW



Ex 4 : OFFSHORE Danemark : 20 x 2 MW



Ressources énergétiques du vent

(sous produit solaire)

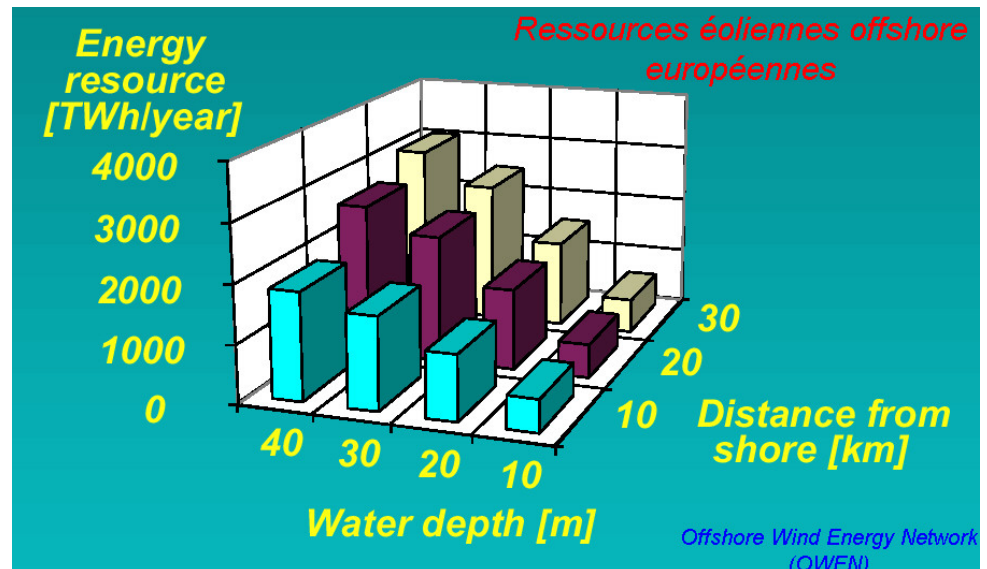
30.10^{15} kWh dans l'atmosphère terrestre

POTENTIEL mondial : 50.10^{12} kWh exploitables

Humanité : 140.10^{12} kWh primaires et 15.10^{12} kWh électriques

France : 70.10^9 kWh terrestres - 500.10^9 kWh offshore

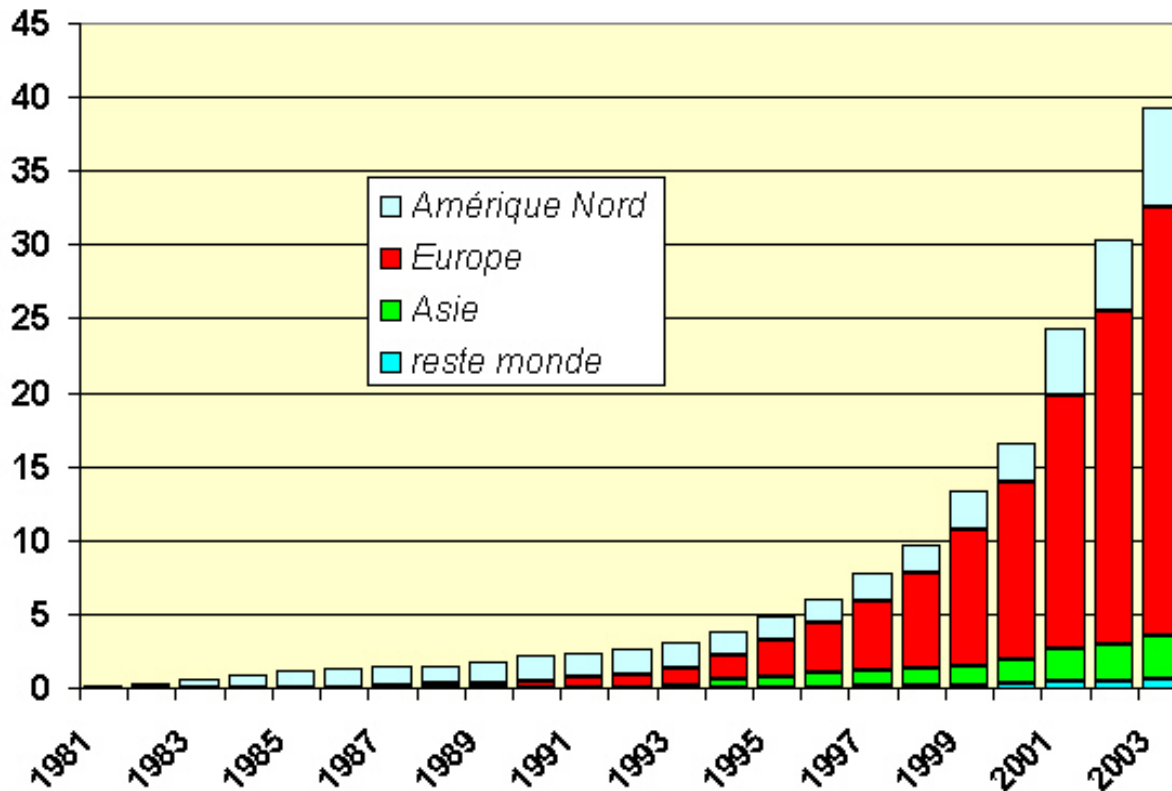
Europe : potentiel offshore
plus de 5.10^{12} kWh
(5000 TWh)
(triple de la
consommation électrique actuelle)





Croissance de la filière

La génération d'électricité éolienne : le plus fort taux de croissance actuel
(environ 30% par an en moyenne depuis plus de 10 ans)



Fin 2003 :

39,3 GW mondiaux
(1% de la puissance totale)

29 GW européens

14,6 GW Allemagne

253 MW France

En 2010 ?

120 GW mondiaux

70 GW européens

1 W installé produit annuellement

entre 2000 Wh et 3800 Wh selon les sites
6 m/s 9 m/s (offshore)



Emergence des fermes éoliennes offshore

Première ferme éolienne offshore en Baltique Danemark (Vindeby) 1991 : 11 x 450 kW



En 2001 : Middelgrunden (Danemark) 20 x 2 MW



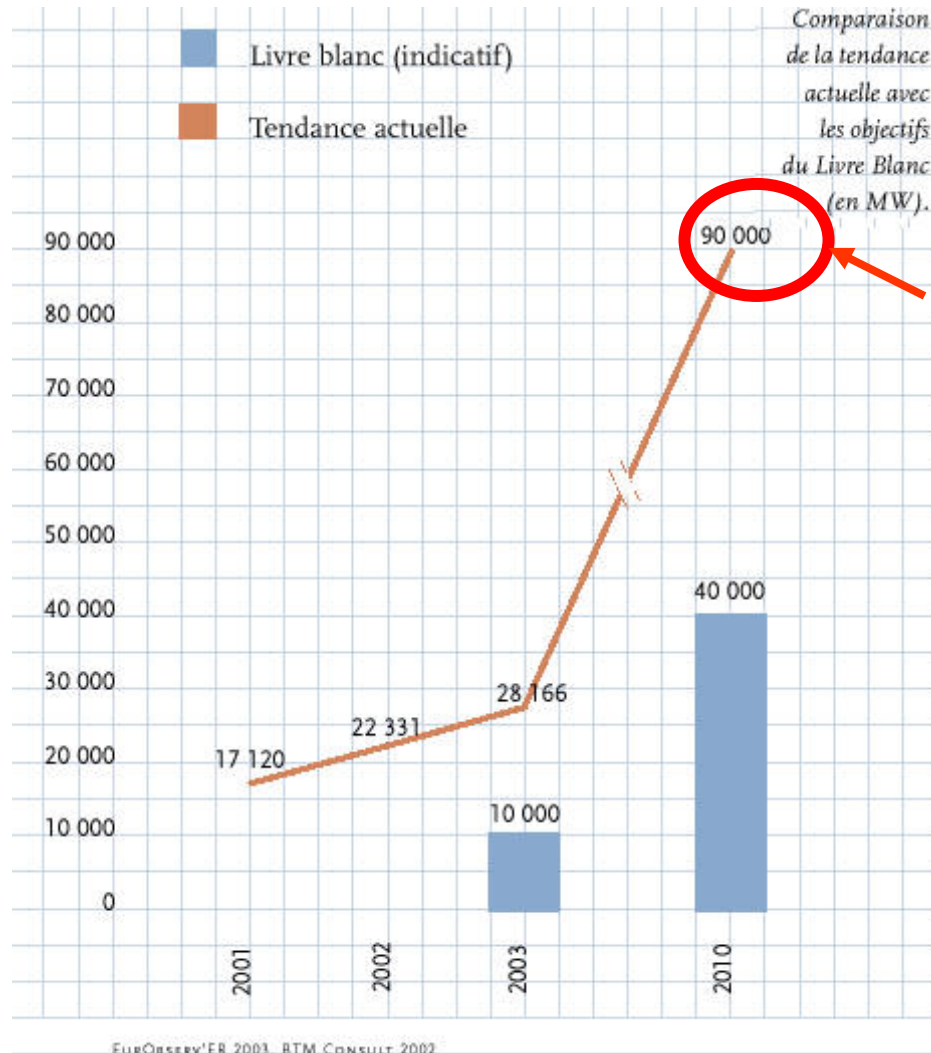
En dec. 2002 : Horns Rev Danemark : 80 x 2 MW



540 MW offshore installés en Europe fin 2003



Croissance de la puissance installée en Europe



90 000 MW
en 2010
(prév. BTM consult)

*Prévisions mondiales :
145 000 MW en 2010
(2,5% de la production
mondiale d'électricité)*

Les souhaits du livre blanc sont largement dépassés !

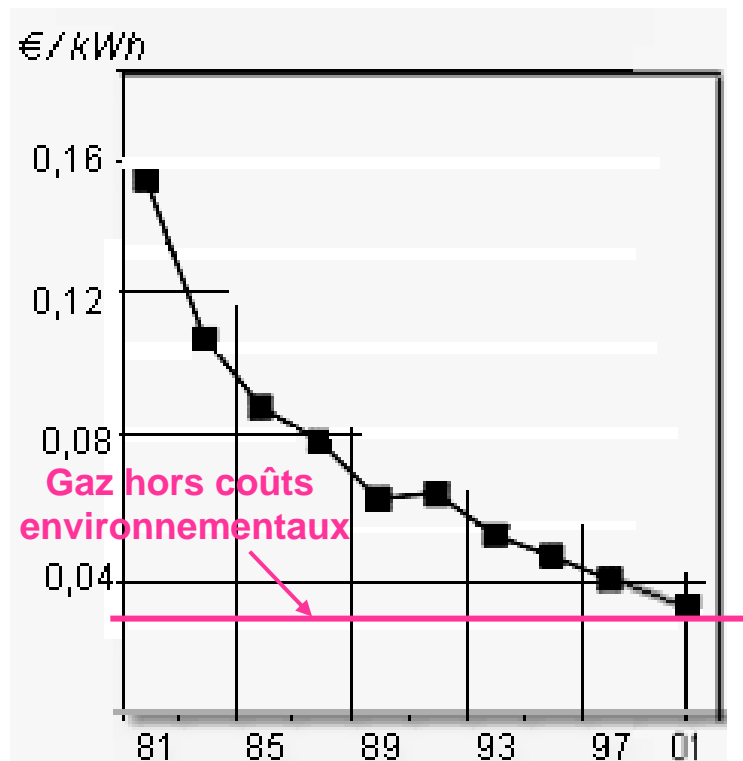


Evolution des puissances unitaires et des coûts de production

En 2002, coût d'investissement :

0,8 à 1,1 €/W (terrestre) et 1,1 à 2 €/W (offshore)

Coût du kWh produit :



Conditions : V_{moy} 6 m/s (2000 heures)
amortissement sur 20 ans (intérêts 5%/an)

Baisses de coût grâce aux effets de masse et d'échelle

Taille moyenne des éoliennes 2003

> 1,5 MW

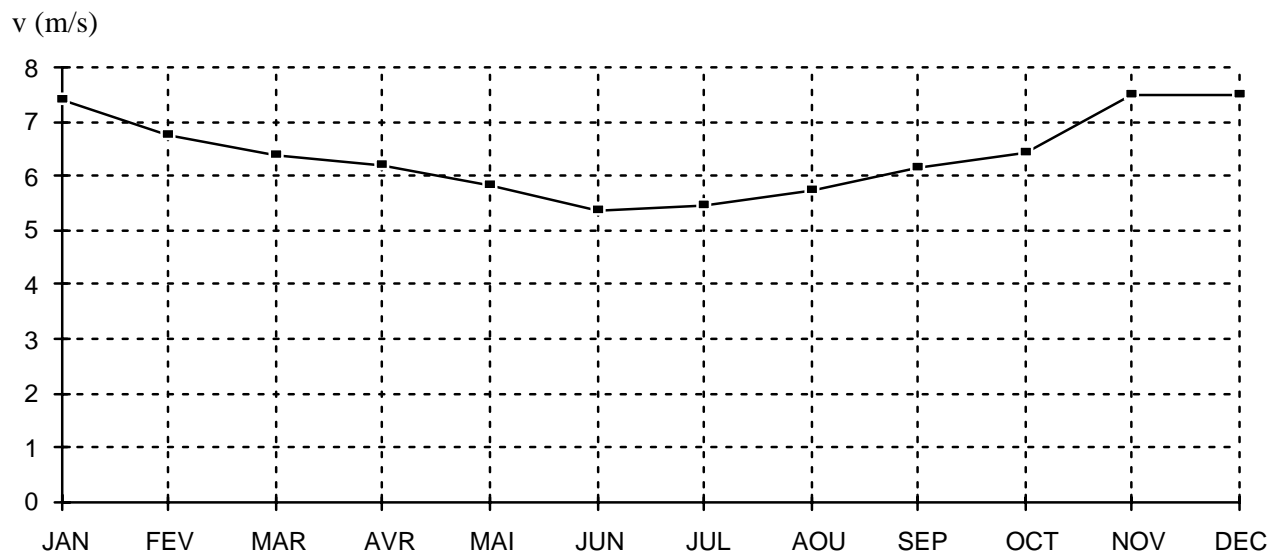


Pales de 39 m sur une Nordex N80 (2,5 MW)

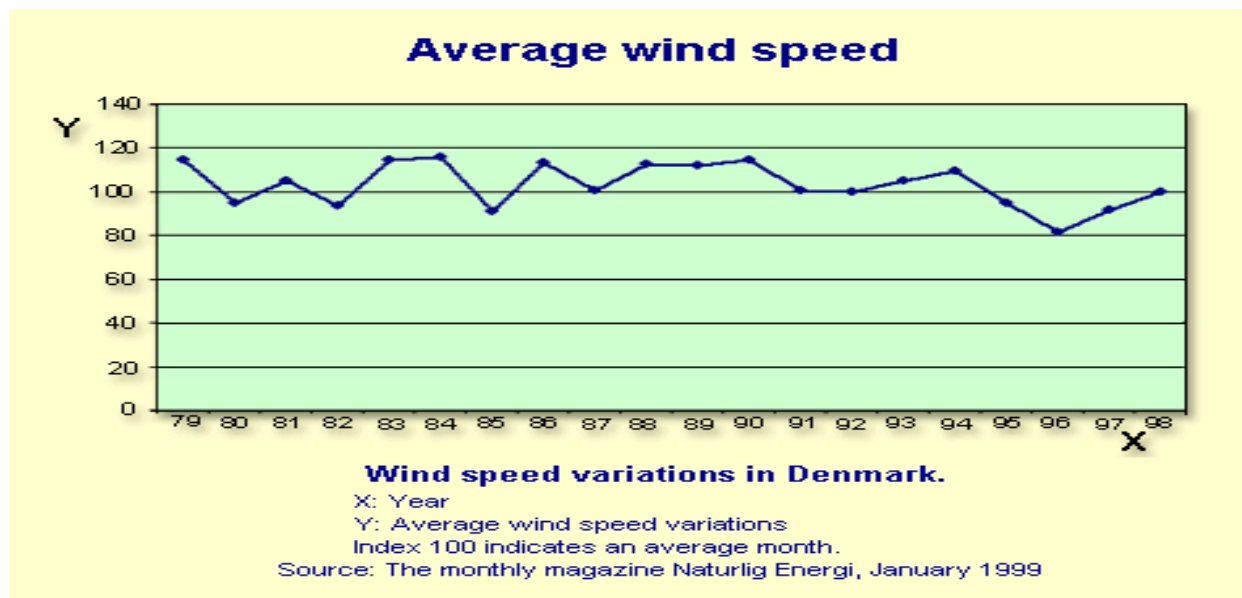


Variations mensuelles et annuelles des vitesses moyennes

Sur une année :



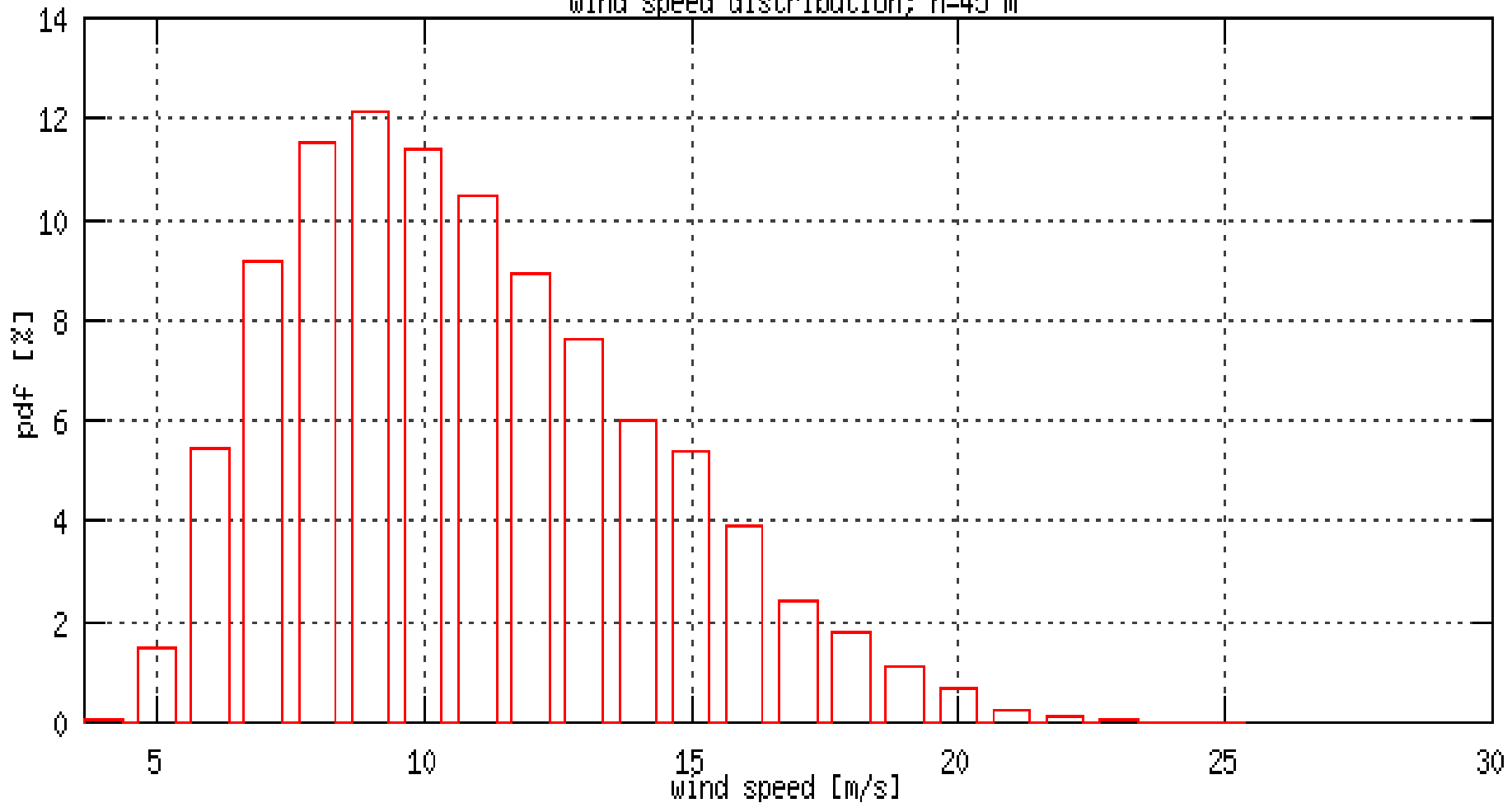
Sur 20 ans :





Distribution des vitesses sur une année

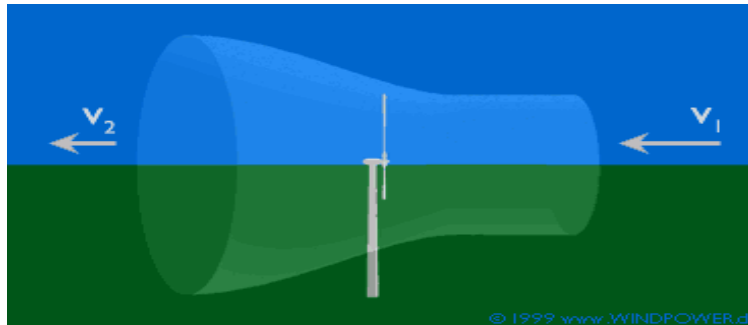
Exemple : site = Vindeby , sea mast wast(vindeby), Denmark
wind speed distribution; h=45 m





Turbines éoliennes

Puissance aérodynamique :
$$P = C_P \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_{\text{balayée}} \cdot V^3$$



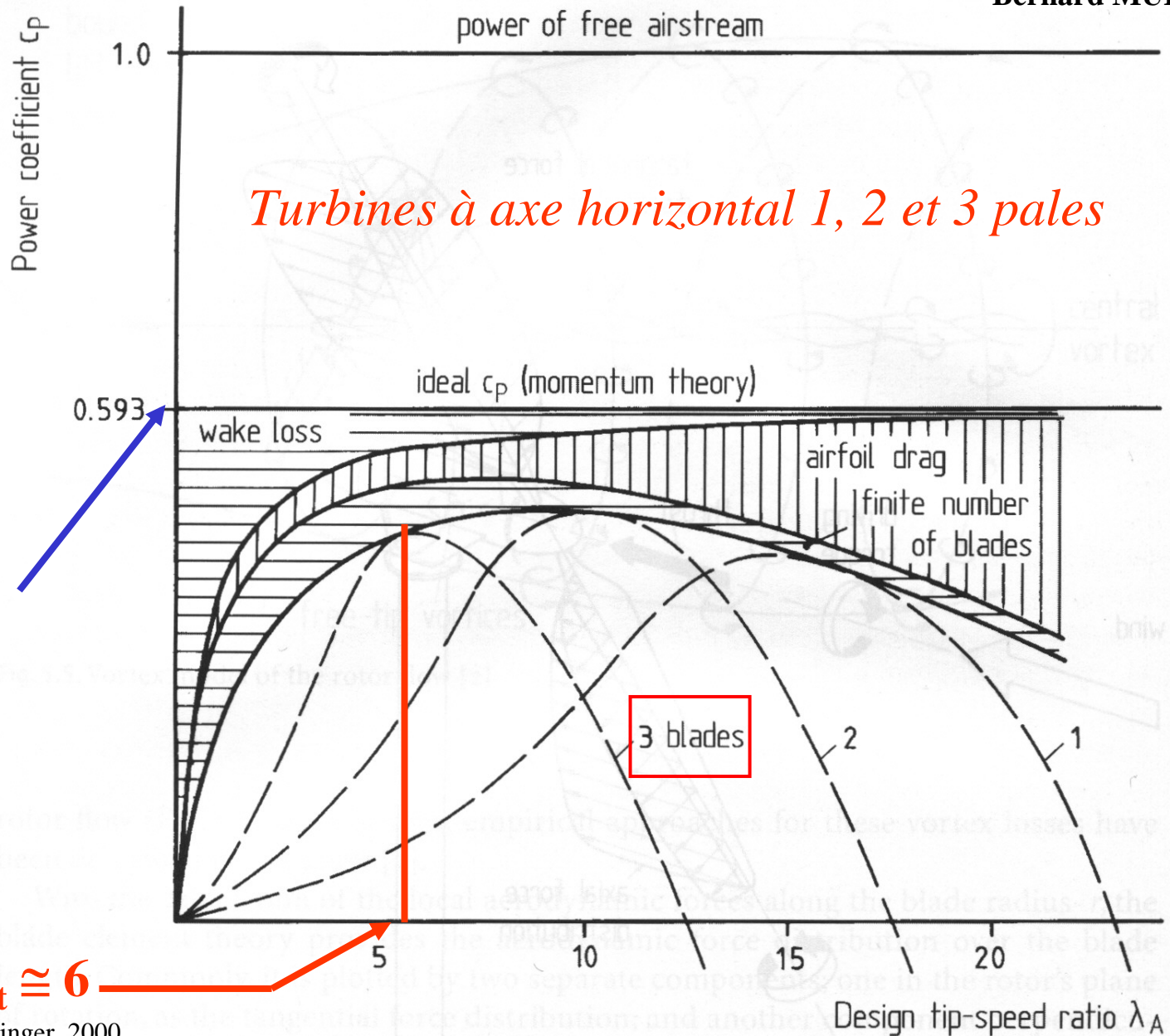
Théorie de Betz : C_P maximal pour une certaine vitesse $16/27 = 0,59$

$$P_{\text{Limite}} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot S_{\text{balayée}} \cdot V^3$$

Vitesse de rotation normalisée :
$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V}$$



Allures de C_p en fonction de λ



$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V}$$

« Limite »
de Betz

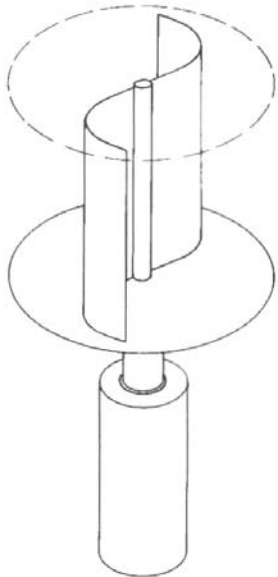
$$\lambda_{opt} \cong 6$$



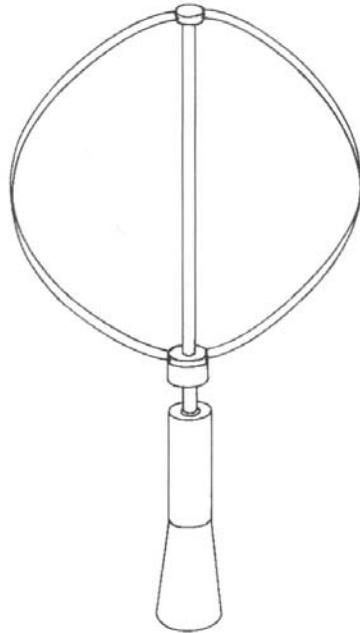
Types de turbines

Axe vertical

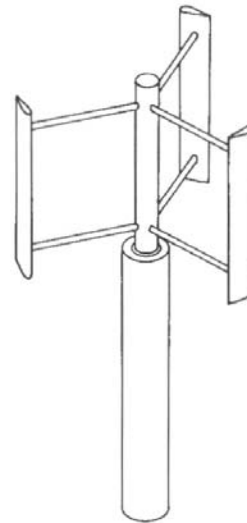
Savonius Rotor



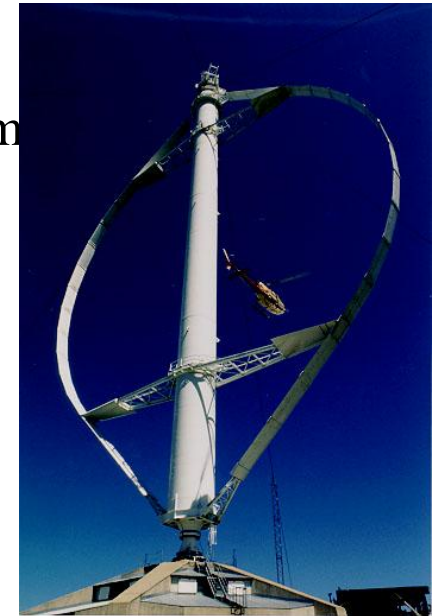
Darrieus Rotor



H-Rotor



Darrieus
4 MW 110m



Av. : lentes (faible bruit)
machinerie au sol
pas de dispositif d'orientation

Inc. : faible rendement aérodynamique
grande sensibilité de C_p à la vitesse

E. HAU, *Wind-Turbines*, Springer, 2000.

AG Windrotor qq kW



Types de turbines

Axe horizontal : dispositifs les plus fréquents



Bipale Lagerwey 250 kW



Tripale Nordex 1,5 MW



Rotor sous le vent (Vergnet 220 kW)



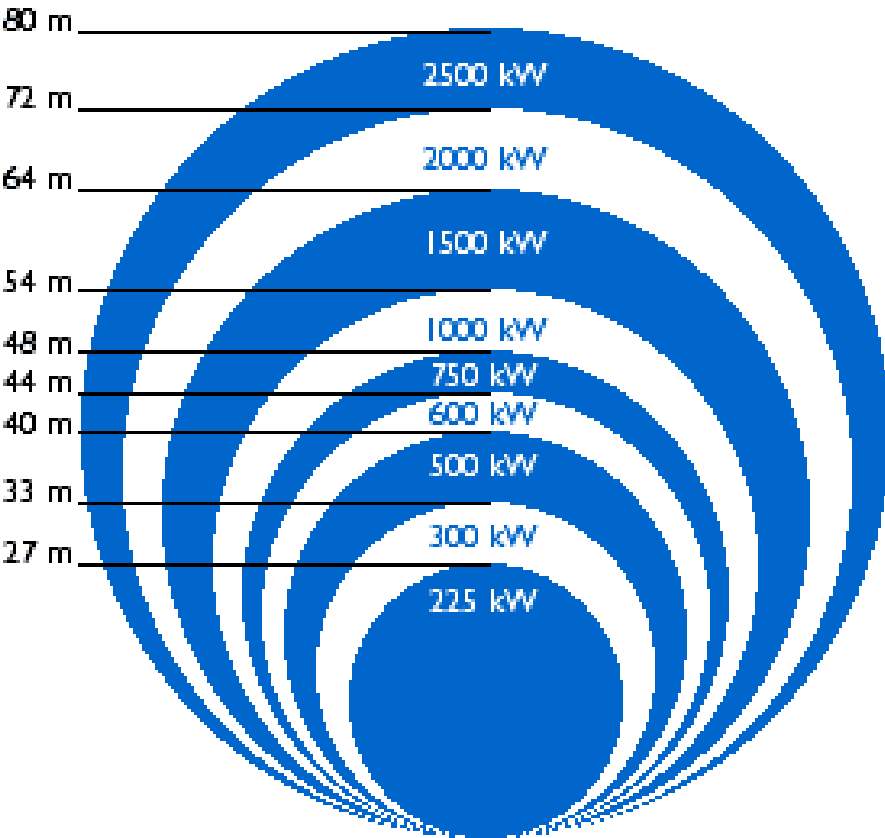
Tripale flexible (Airwind 400 W)



Système à concentrateur
(expérimental)

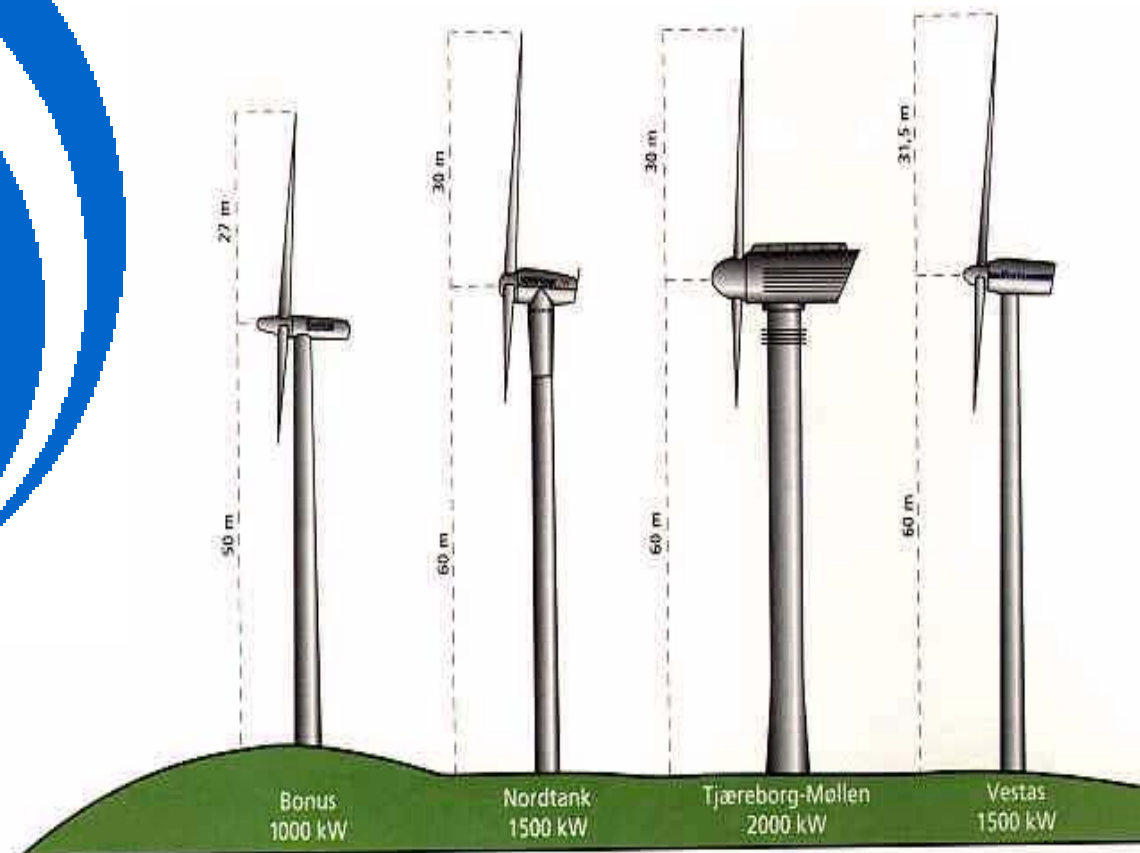


Tailles machines



www.windpower.dk

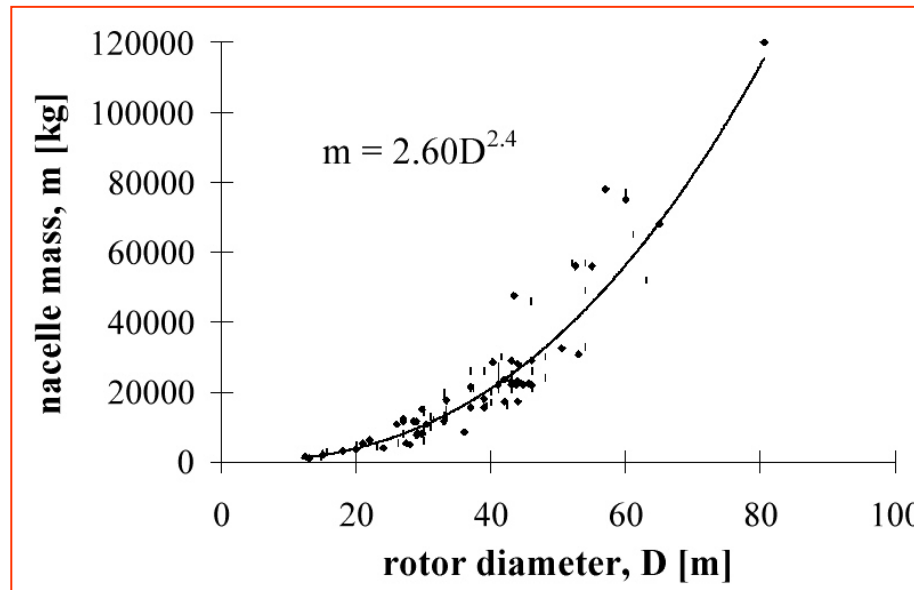
110 m : 5 MW



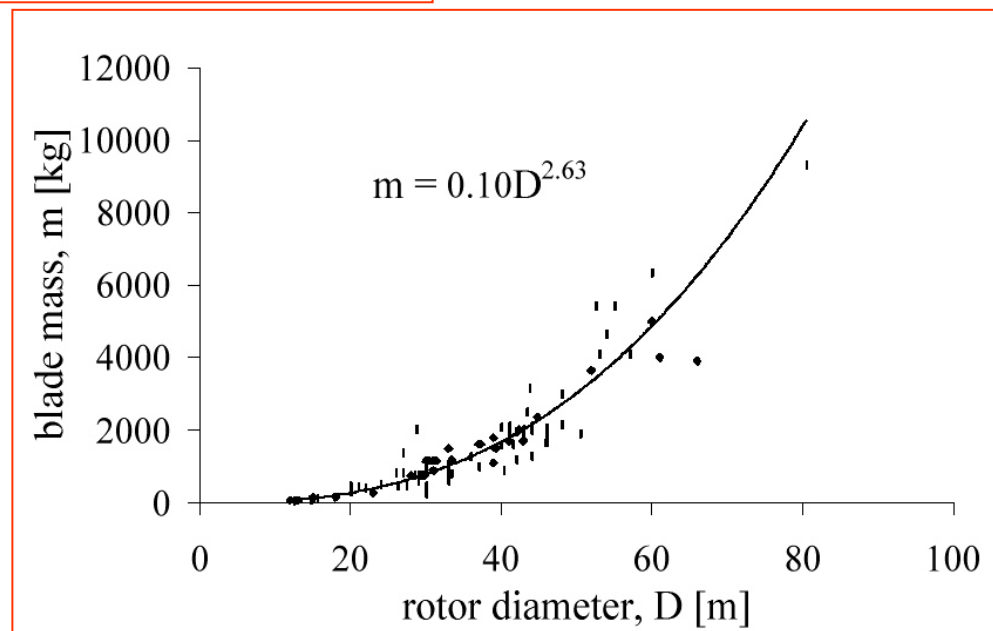


Données de masse

nacelle

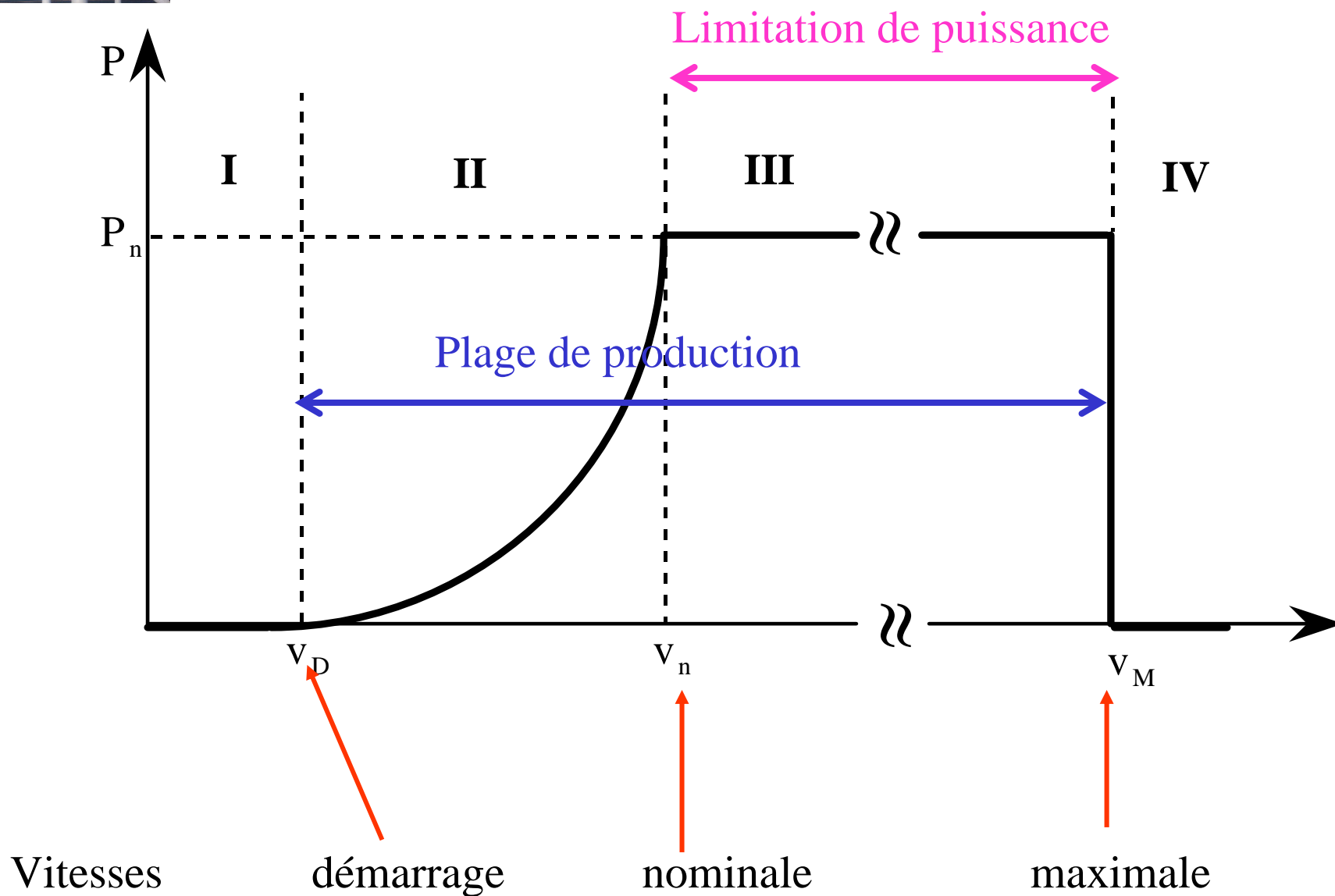


pales





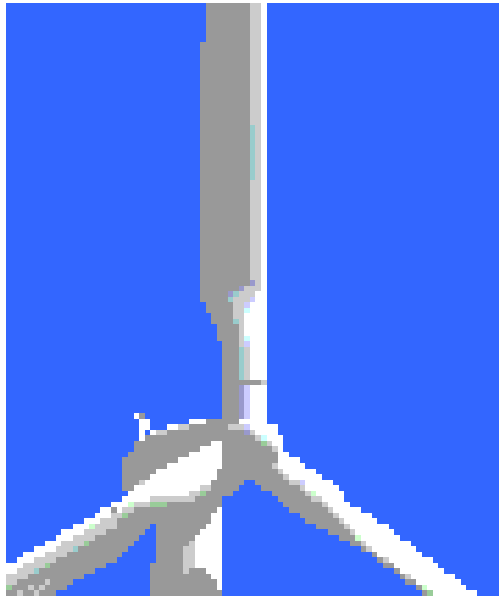
Régulation de puissance



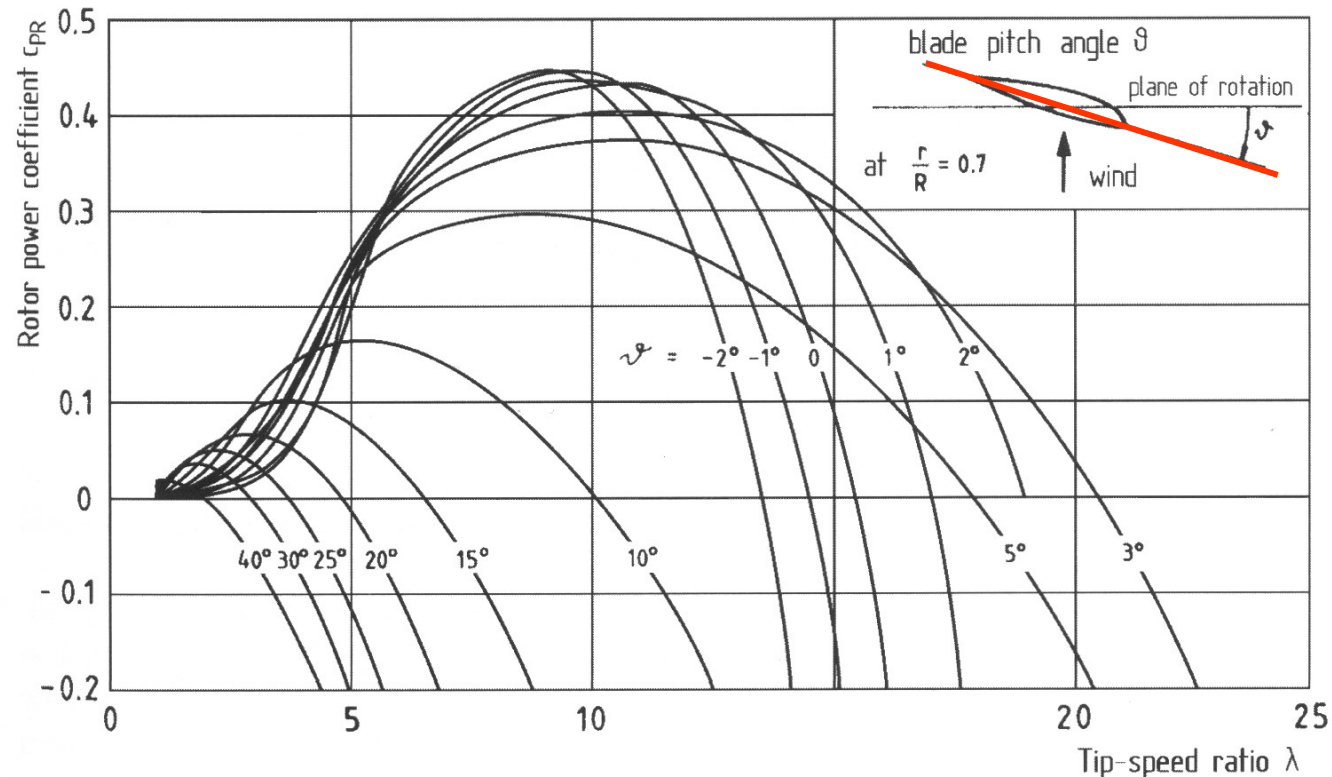


Régulation de puissance

Système « **pitch** » à pas variable :
orientation des pales pour réduire la puissance à haute vitesse de vent



www.windpower.dk

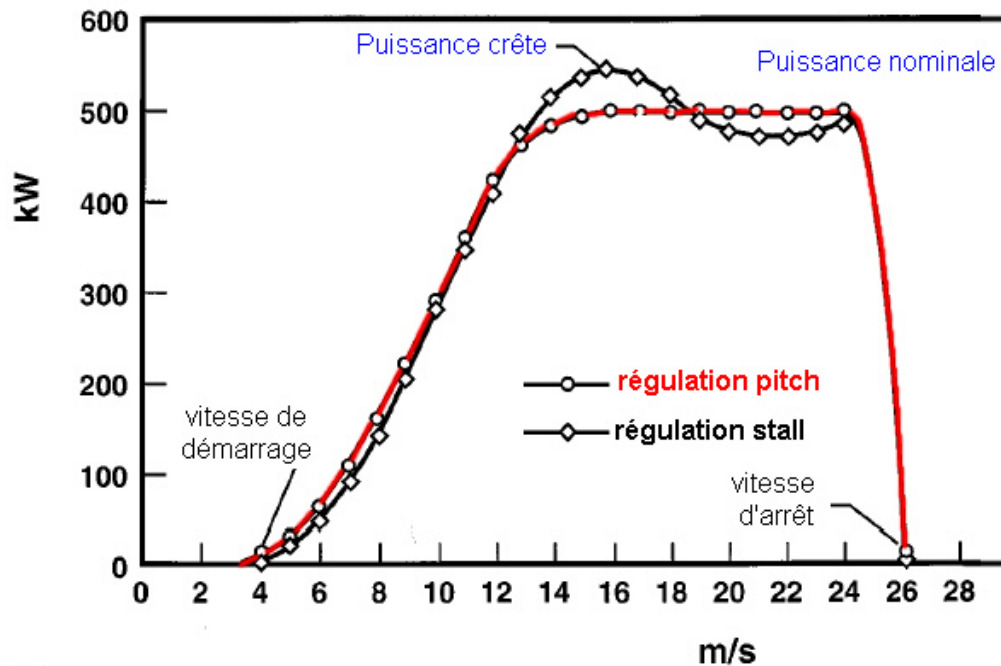


Efficace mais complexe et coûteux, très utilisé pour quelques 100 kW



Régulation de puissance

Système « **stall** » à décrochage aérodynamique
profil des pales tel que au-delà d'une certaine vitesse de vent,
les turbulences font naturellement chuter la puissance



Simple, fiable
mais moins bonne exploitation de la puissance aux vents forts



Sécurités

Arrêt :

en cas de vents excessifs (et mise en drapeau éventuelle)
en cas de problème réseau (sur ou sous-tension)

Freins aérodynamiques : dissipent une grande partie
de l'énergie cinétique sans usure

Freins mécaniques : à disques en cas d'urgence

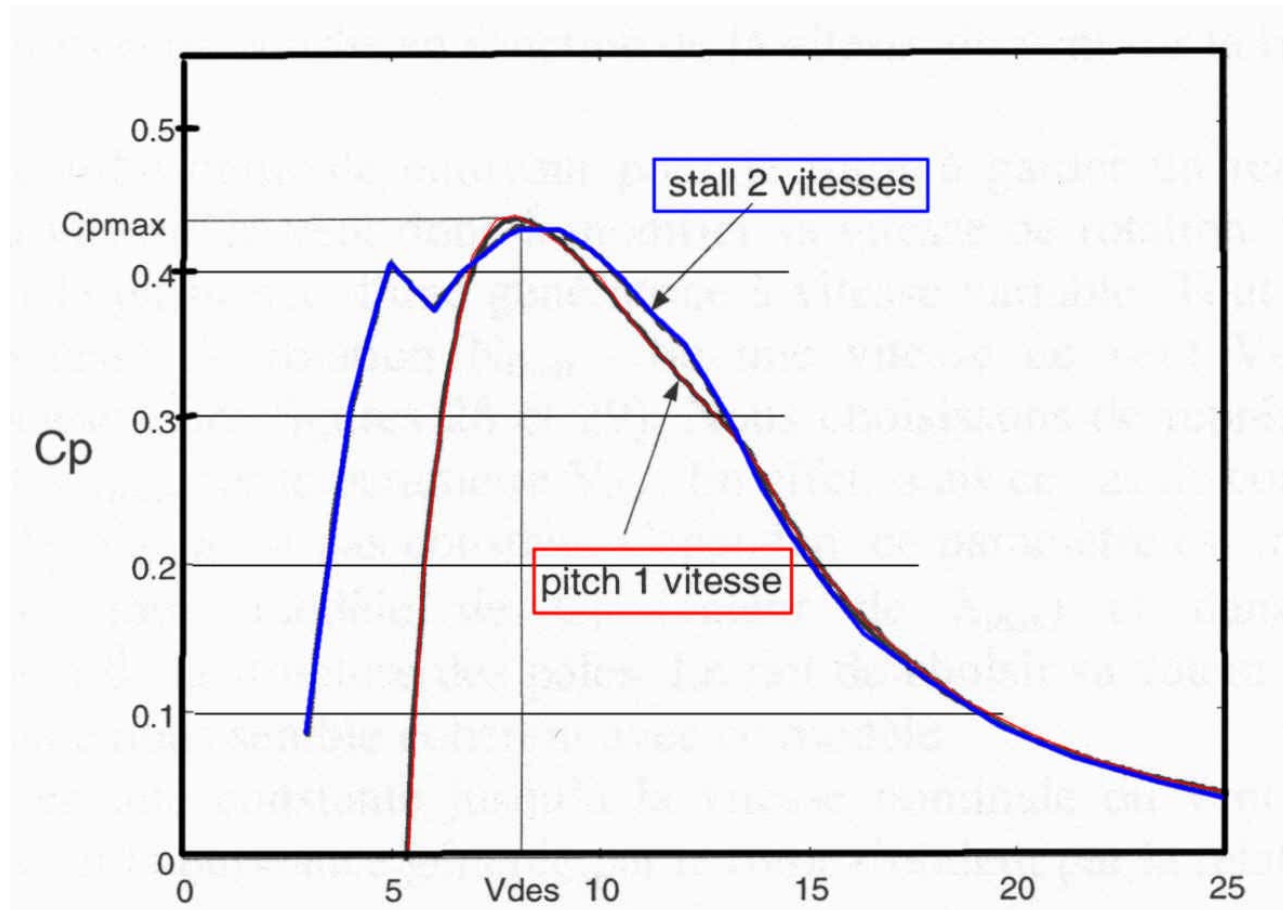




Variation de vitesse

Systemes à 2 vitesses fixes (changement de n^{bre} de pôles)

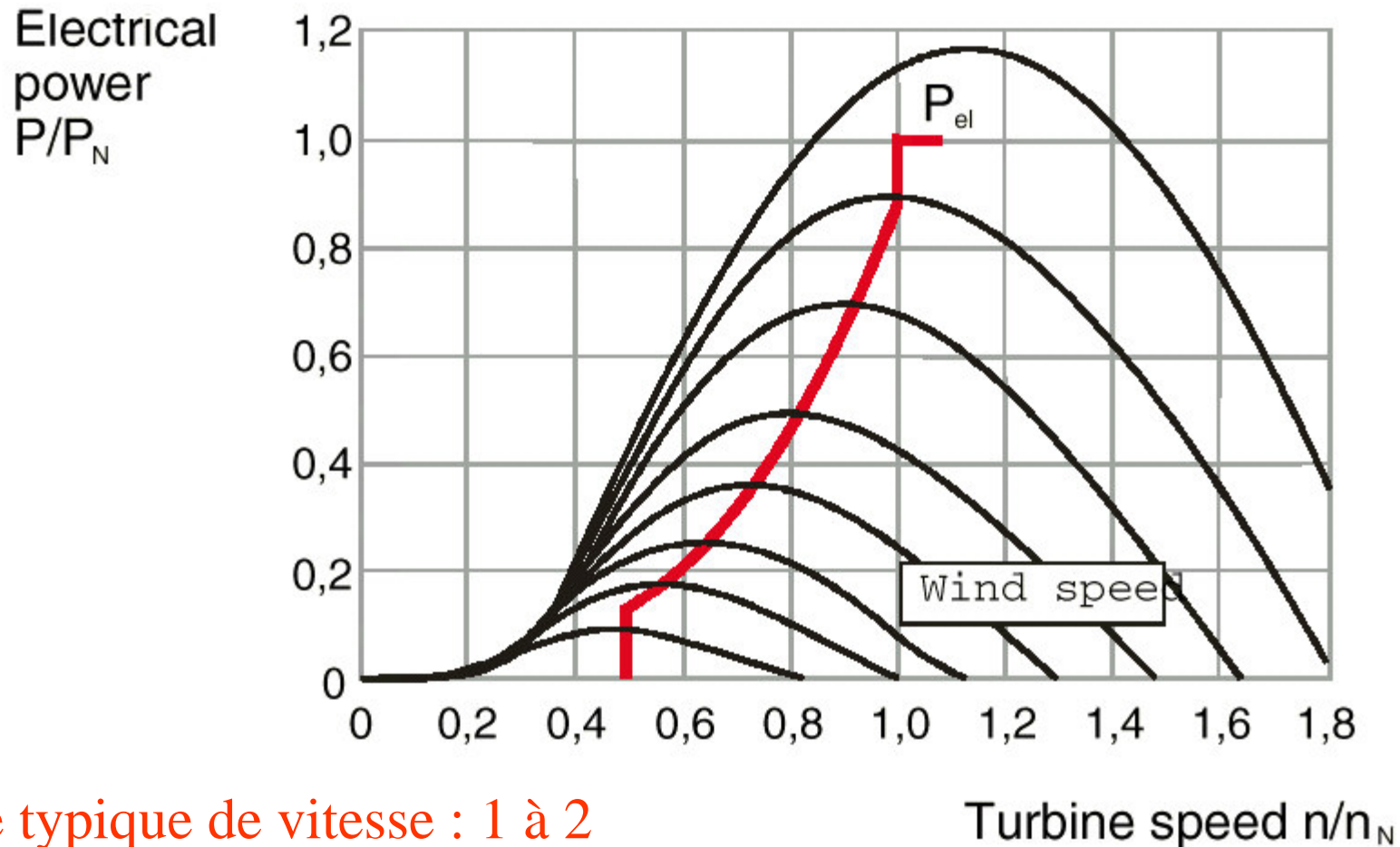
Exemple : extension de la plage de production du système stall





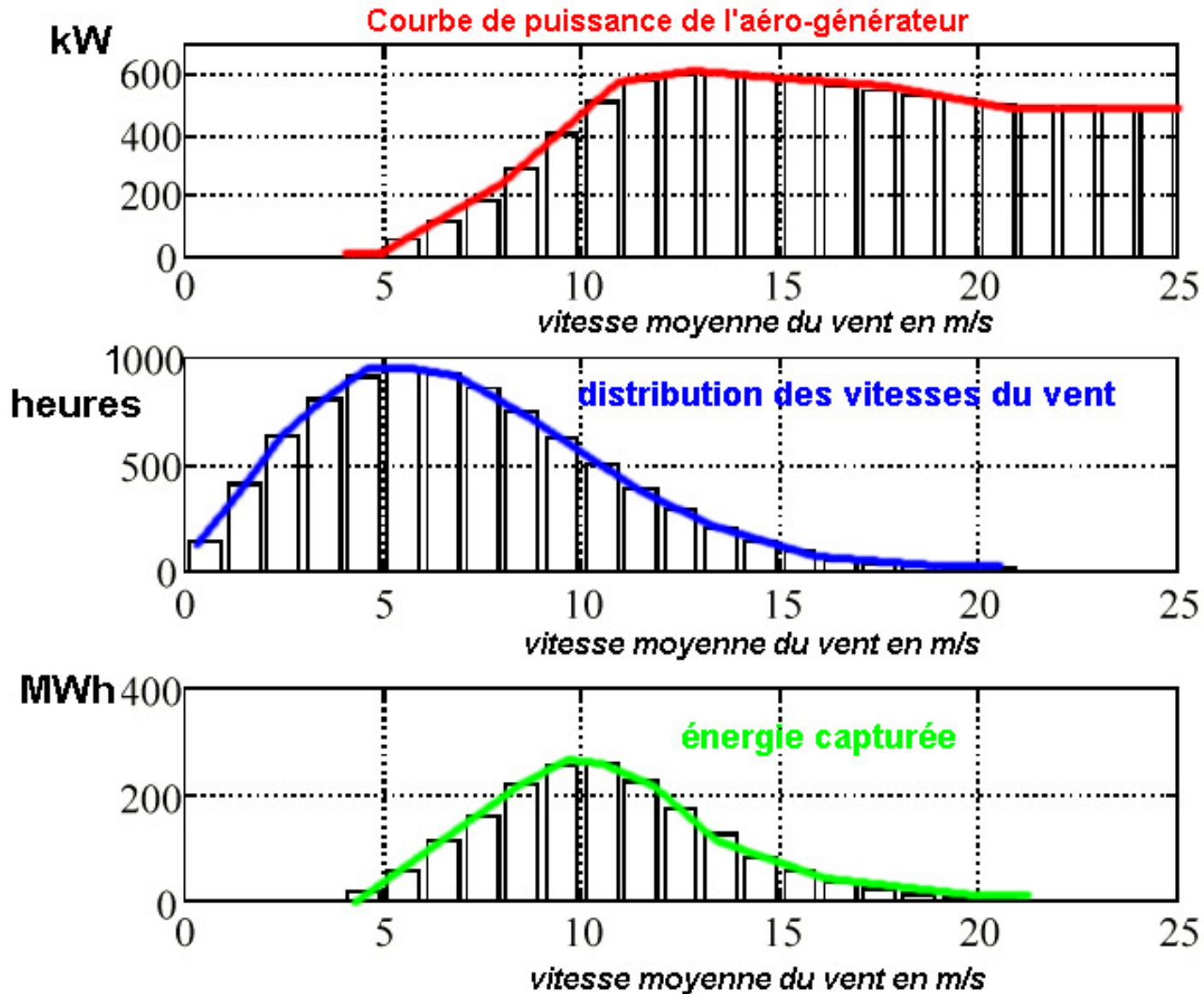
Variation de vitesse

Systemes à vitesse continûment variable





Relation courbe de puissance distribution du vent et énergie capturée





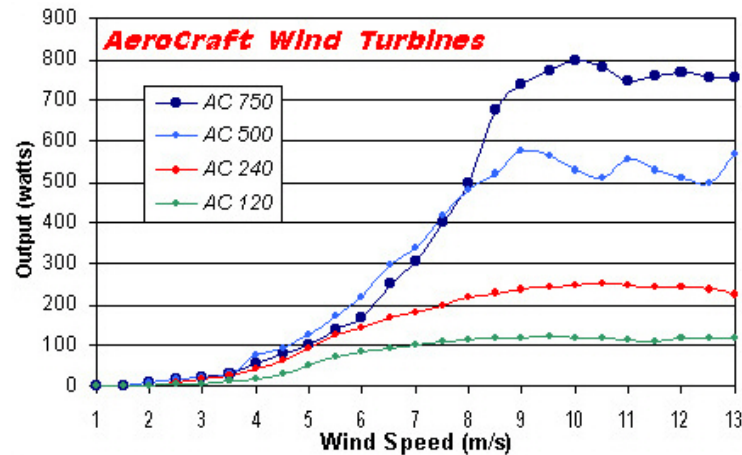
Systemes électromécaniques à axe horizontal

Faibles puissances (< 10 kW) :

Rotors rapides : 300 W 2000 tr/mn
1 kW 600 tr/mn
10 kW 200 tr/mn



Entraînements
directs possibles,
voire quasi naturels



Fortes puissances :

Rotors lents :

- 80 kW : 60 à 120 tr/mn
- 750 kW : 15 à 35 tr/mn

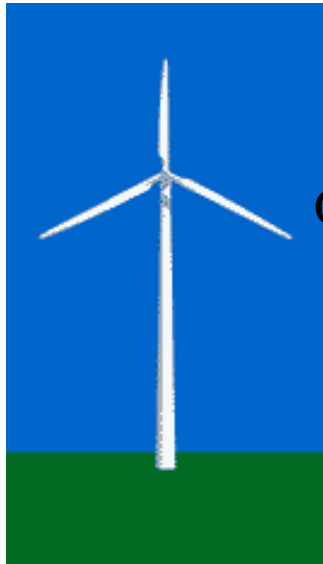


Entraînements
directs plus difficiles

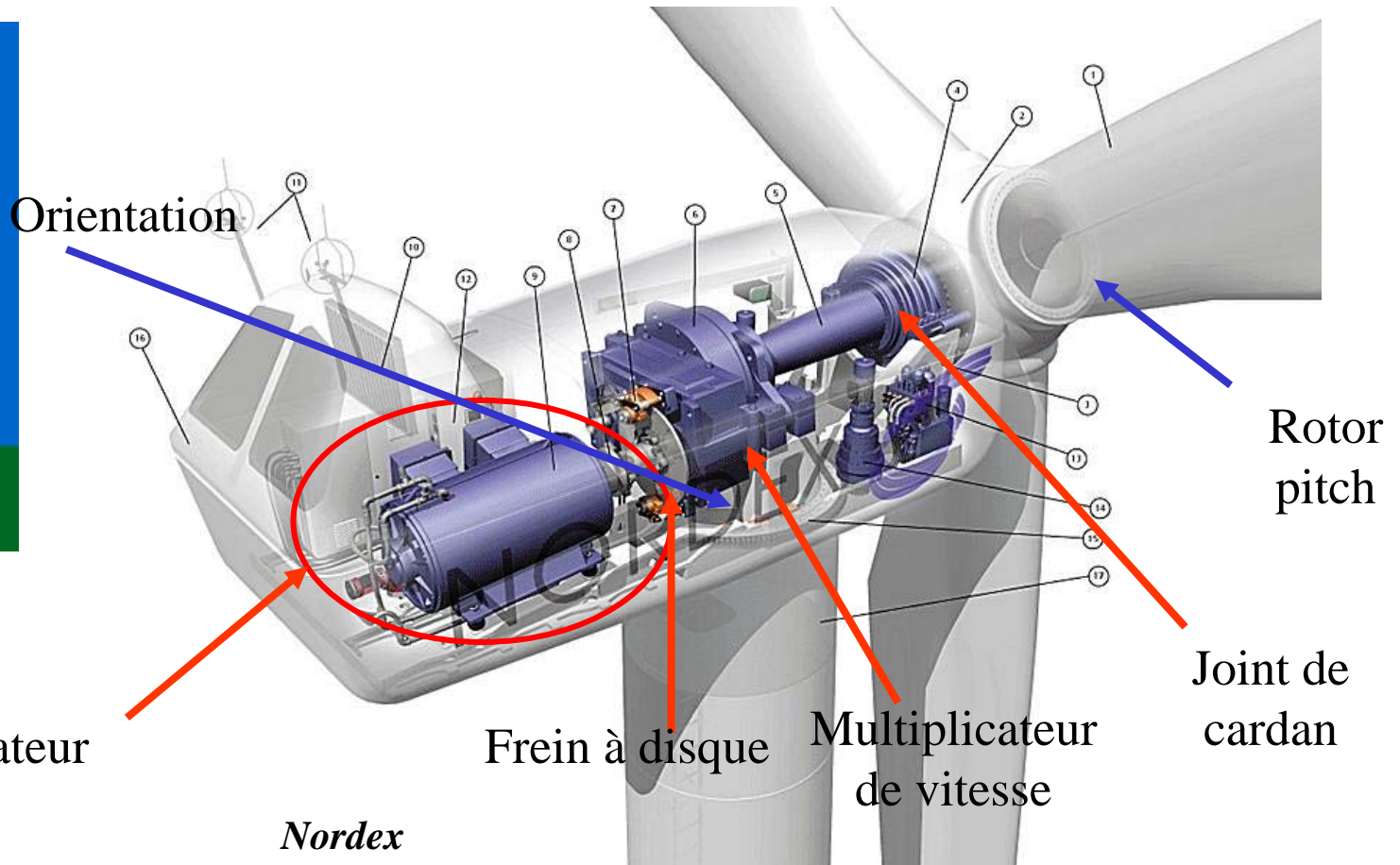


Chaîne « classique » de conversion avec multiplicateur de vitesse

Objectifs : alléger les équipements en nacelle (génératrice rapide)
 utiliser des générateurs standards



www.windpower.dk



Générateur

Frein à disque

Multiplicateur de vitesse

Joint de cardan

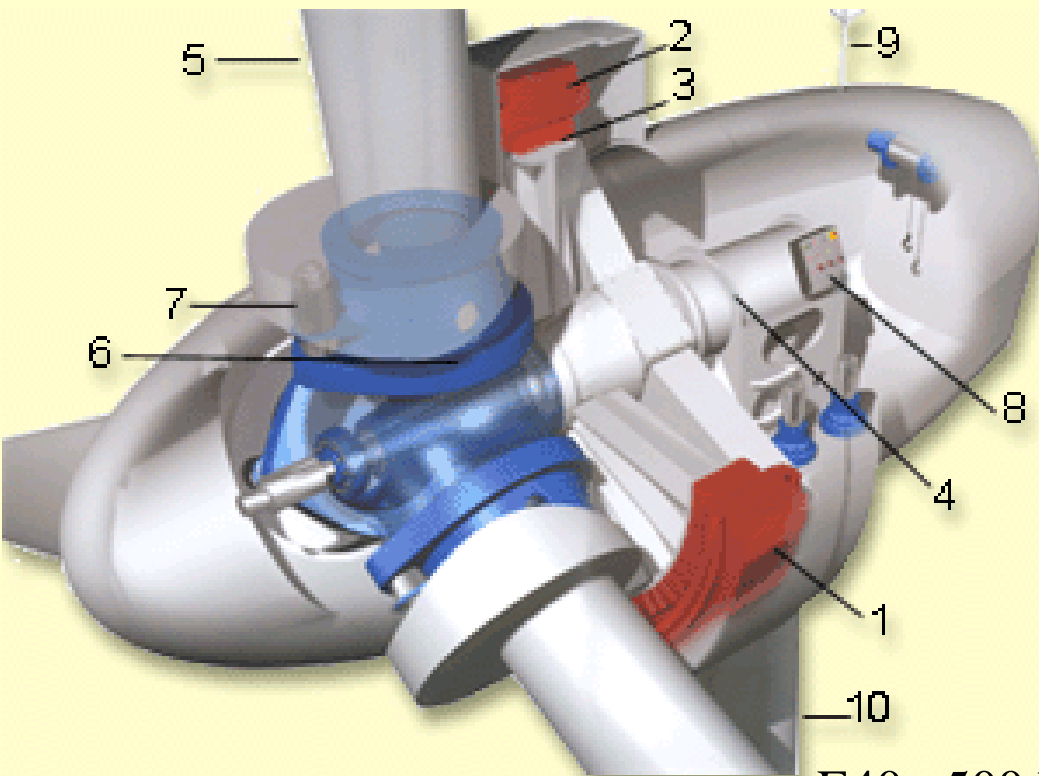
Rotor pitch

Nordex

Chaîne à entraînement direct



Objectifs : améliorer la fiabilité,
réduire la maintenance et le bruit
exploiter les turbulences
(performances accrues et fatigue réduite)



The ENERCON gearless drive concept.

- 1: Generator
- 2: Generator stator
- 3: Rotor disc
- 4: Main pin
- 5: Rotor blade
- 6: Blade flange bearing
- 7: Pitch drive
- 8: Machine support
- 9: Wind sensor
- 10: Tower

Source: ENERCON, Aurich - Germany

E40 : 500 kW plus de 2000 exemplaires en service

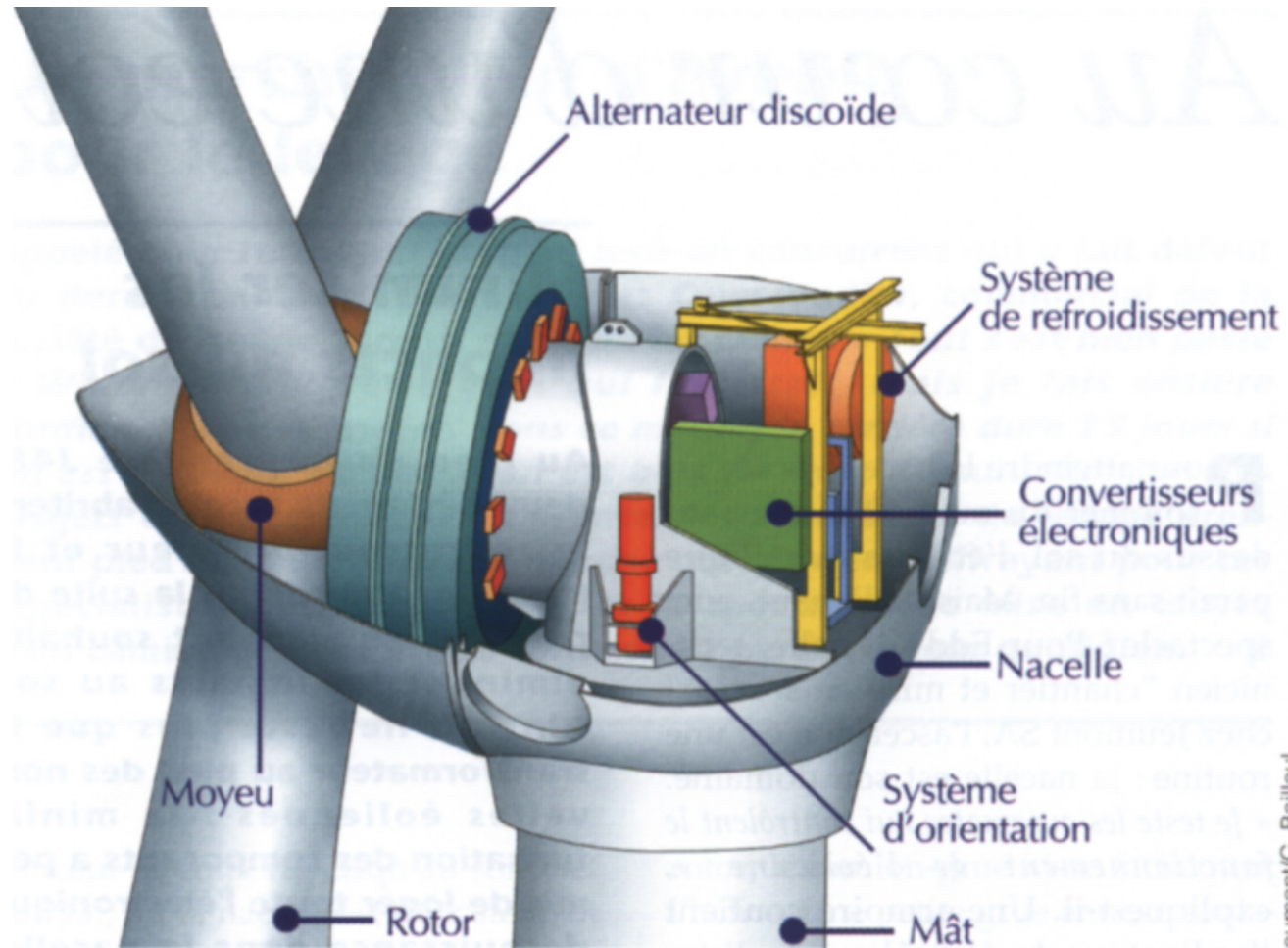


Chaîne à entraînement direct

Autres systèmes :

Jeumont Industrie : J48 750 kW génératrice à aimants discoïde

Stall actif

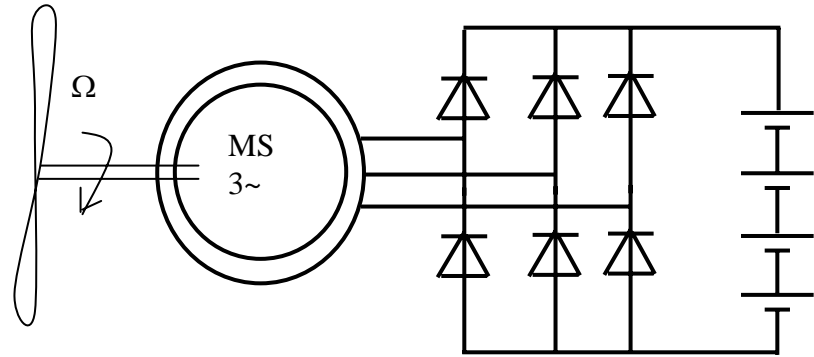
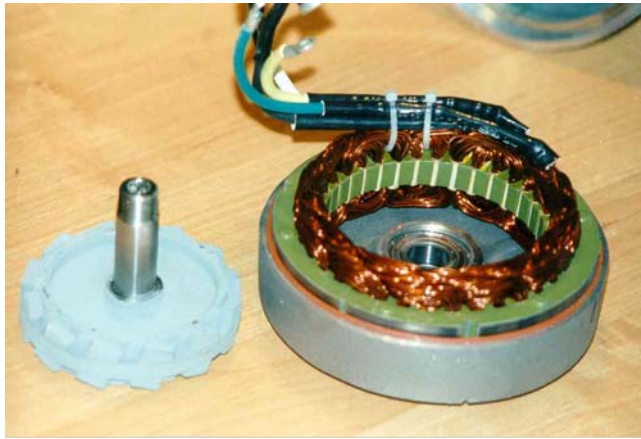




Chaînes de conversion électrotechniques

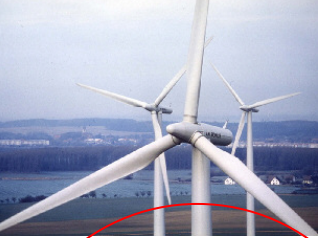
Petites puissances :

Généralement génératrice à aimants :

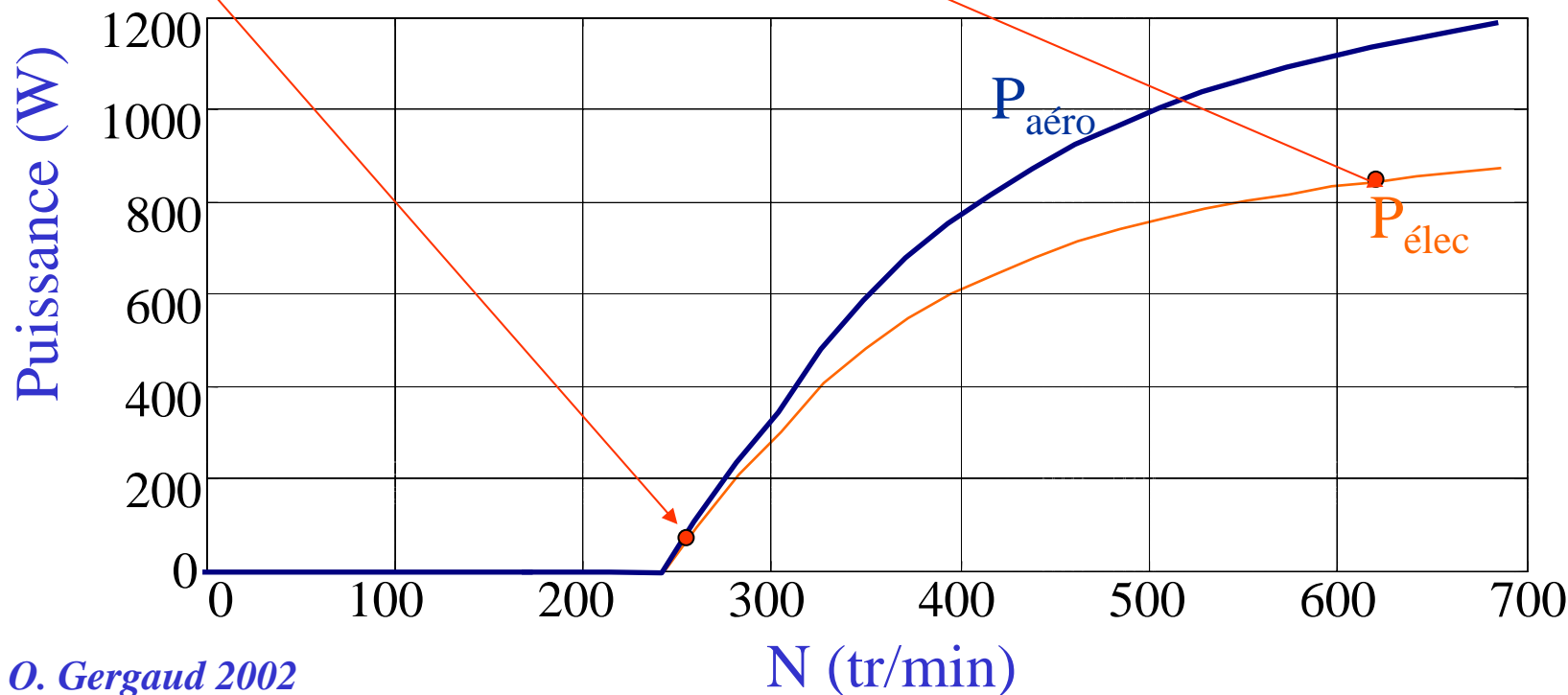
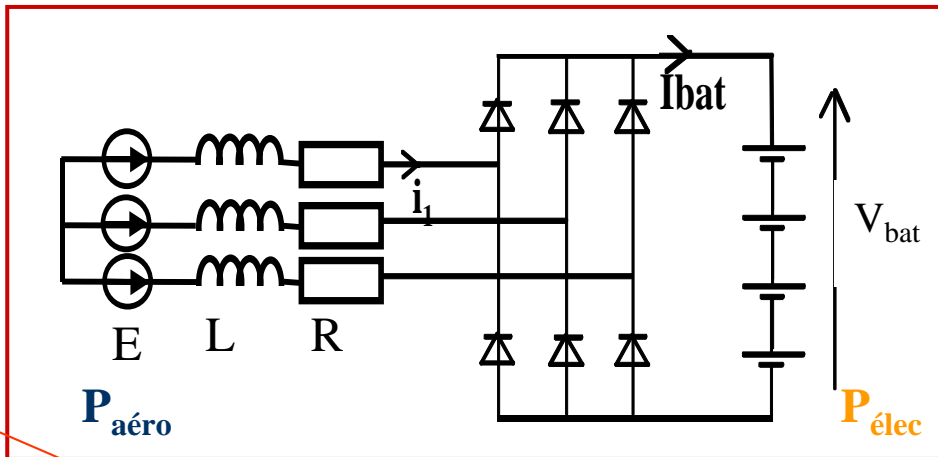
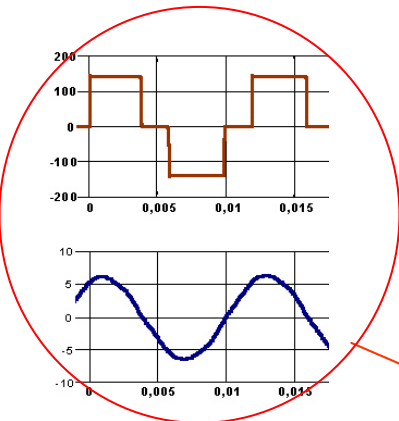
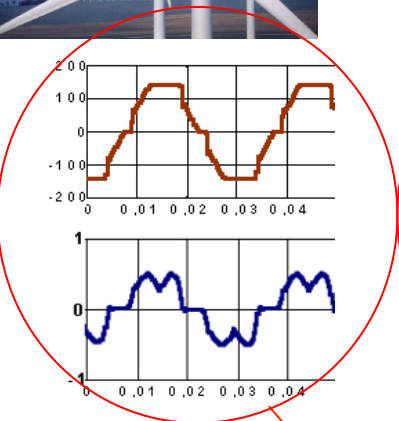


Limitation de charge par

- régulateur électronique
- mise en court-circuit de l'induit par contacteur



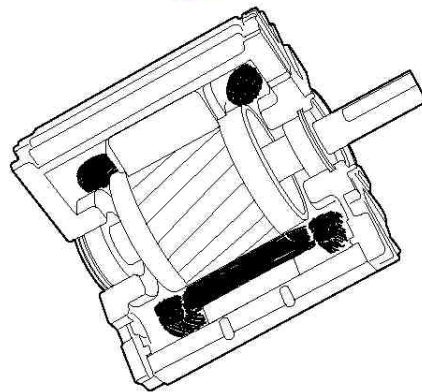
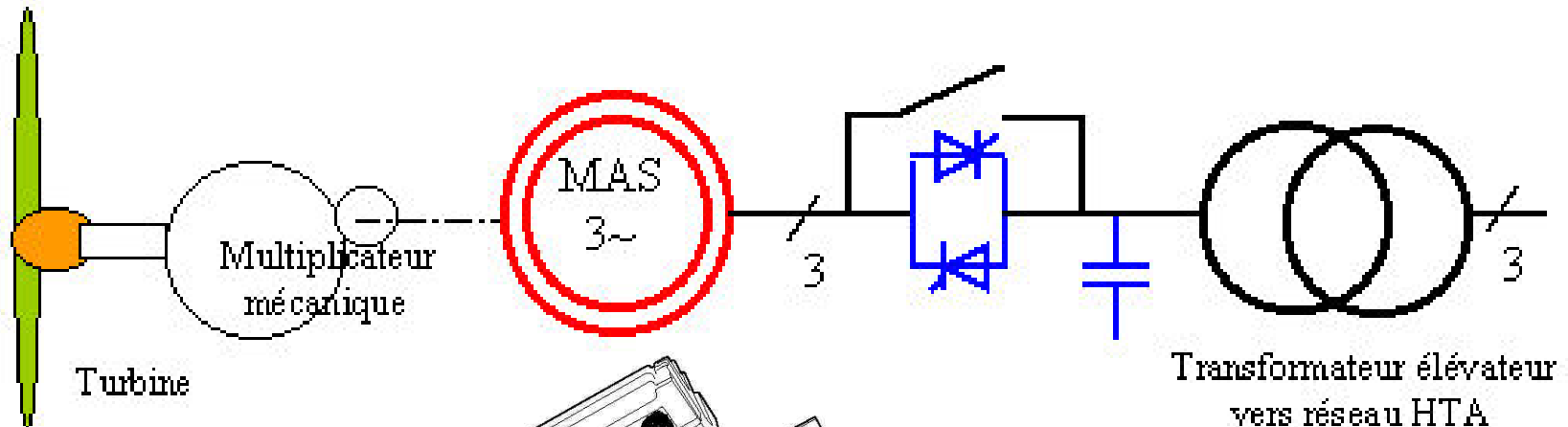
Génératrice à aimants débitant sur bus continu :





Chaînes de conversion électrotechniques de grande puissance couplées au réseau

1- Génératrice **asynchrone** vitesse « fixe » généralement à 2 vitesses



Nordex N54 1000 kW

Commutation 4/6 poles, 1000/200 kW

1513 et 1014 tr/mn

Turbine 21,5 et 14,3 tr/mn (multiplicateur 1:70)



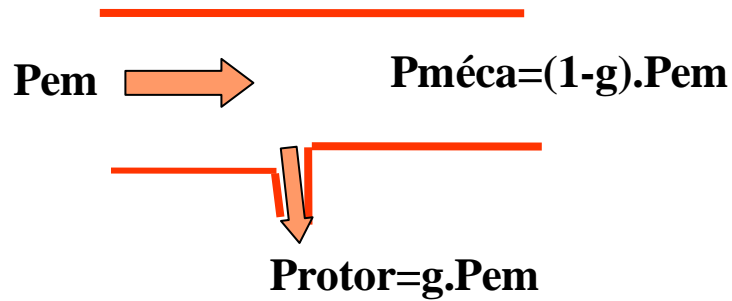
Bernard MULTON



Bilan énergétique simplifié : machine asynchrone à cage

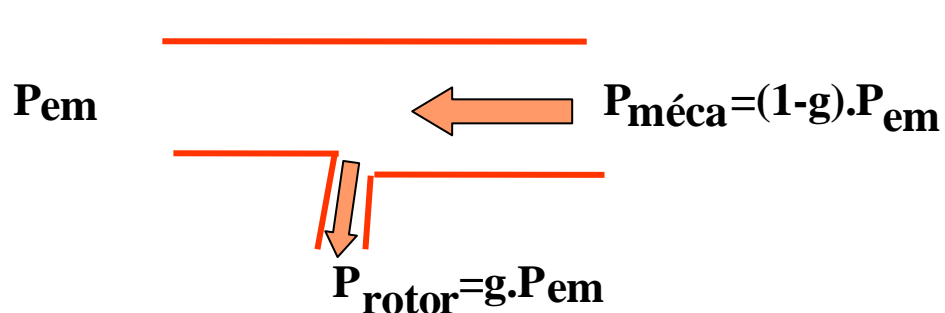
Rendement électromagnétique

En fonctionnement moteur $P_{\text{méca}} > 0$ et $g > 0$



$$\eta_{\text{moteur}} = \frac{P_{\text{méca}}}{P_{em}} = 1 - g$$

En génératrice $P_{\text{méca}} < 0$ et $g < 0$

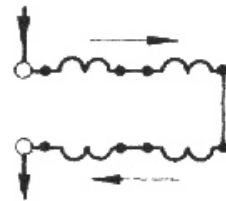
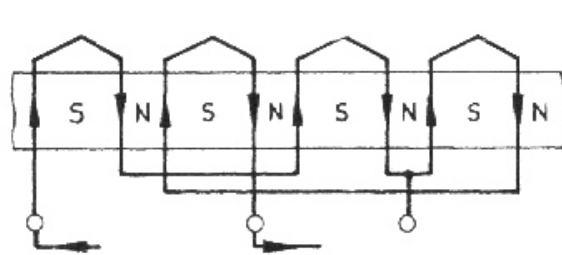


$$\eta_{\text{généré}} = \frac{P_{em}}{P_{méca}} = \frac{1}{1 - g}$$

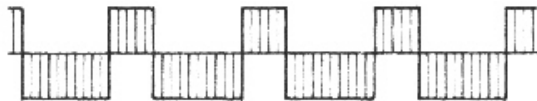


Génératrice asynchrone à cage couplée au réseau

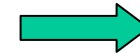
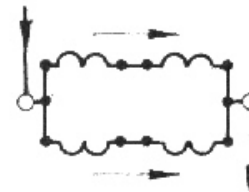
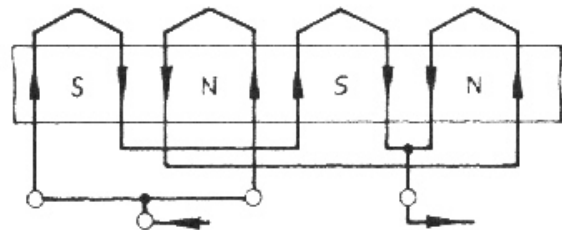
Machines à « 2 vitesses » : changement du nombre de pôles



synchronisme
750 tr/mn



motif 8 pôles



synchronisme
1500 tr/mn



motif 4 pôles

Systemes très fréquents dans la gamme 200 kW/2 MW

avec machines 4/6 pôles

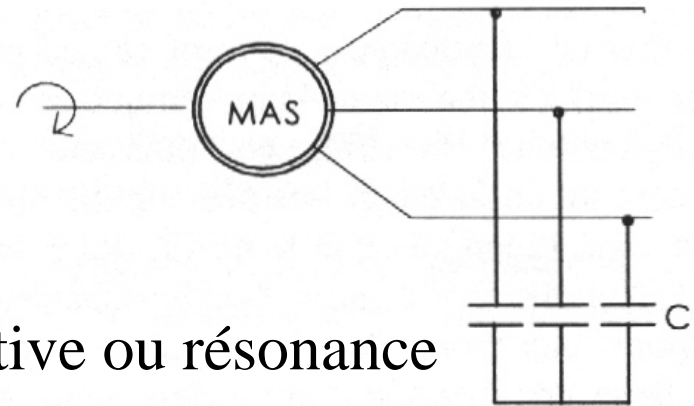


Bernard MULTON

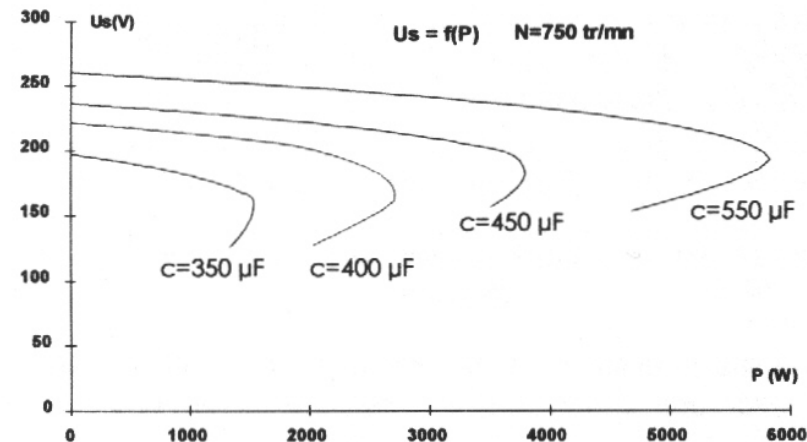
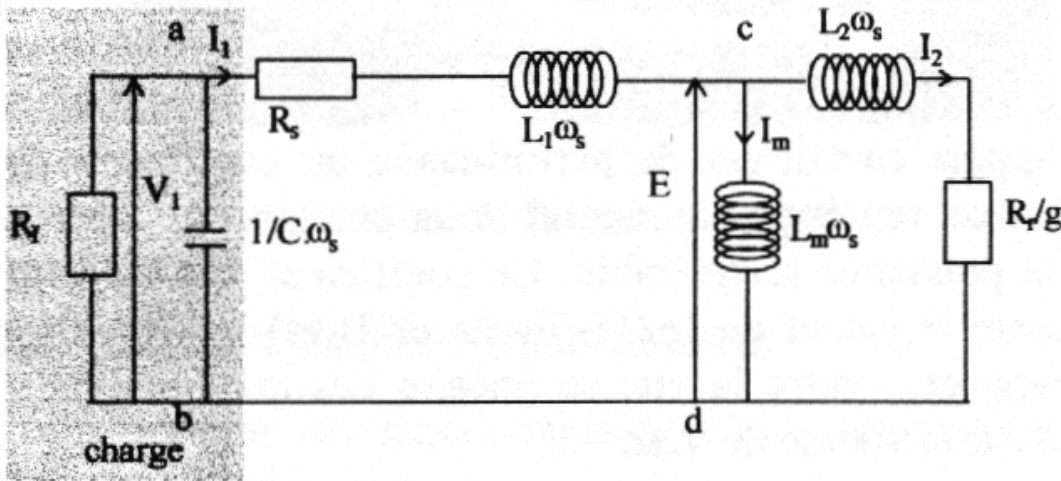


Génératrice asynchrone à cage auto-excitée par condensateurs en réseau autonome

Auto-amorçage par condensateurs



Compensation totale de puissance réactive ou résonance (la stabilisation s'effectue par ferro-résonance)



Difficultés à stabiliser tension et fréquence

Tounzi, « Utilisation de l'énergie éolienne dans la production de l'électricité », JEEA 1999

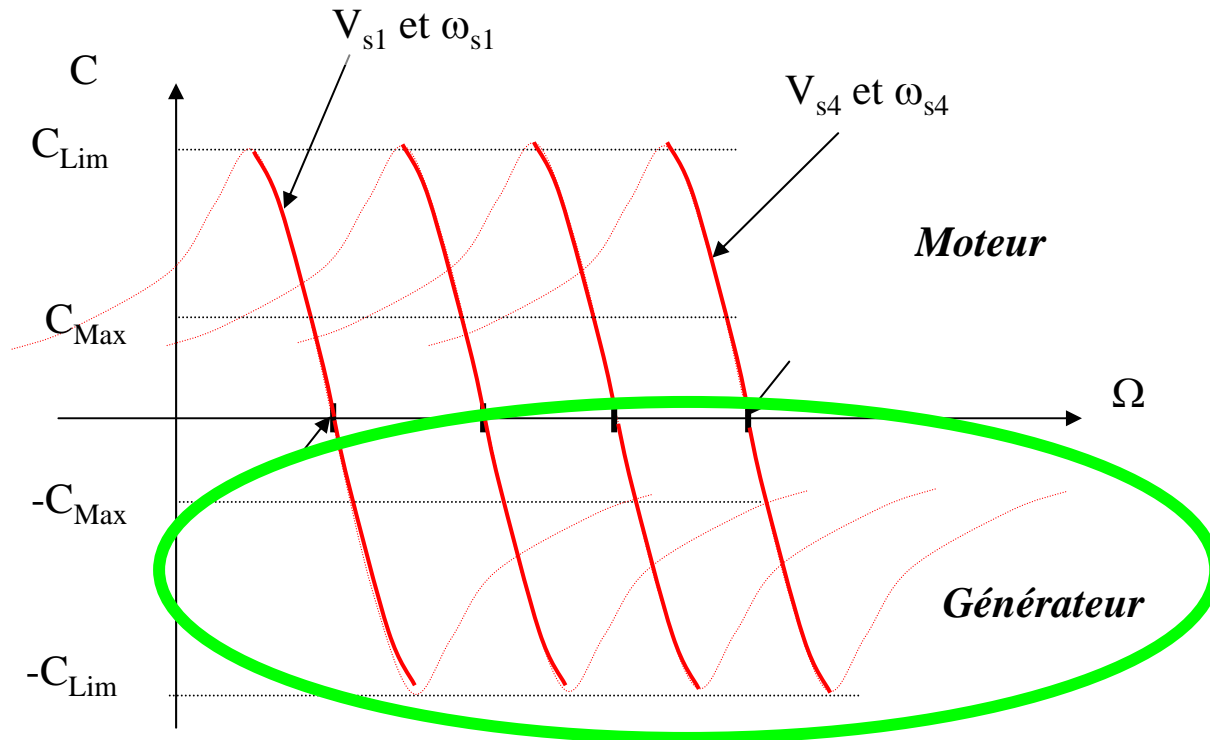
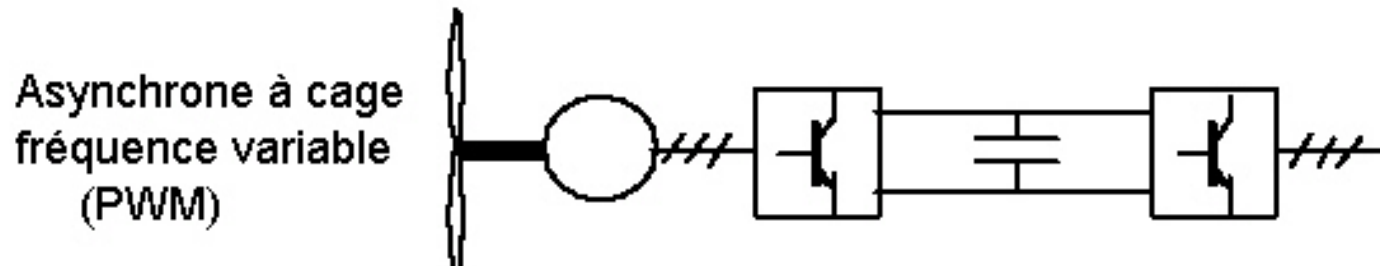


Bernard MULTON



2- Génératrice asynchrone à cage à vitesse variable

nécessité de faire varier la fréquence statorique



Pas d'applications en éolien : problème de compétitivité

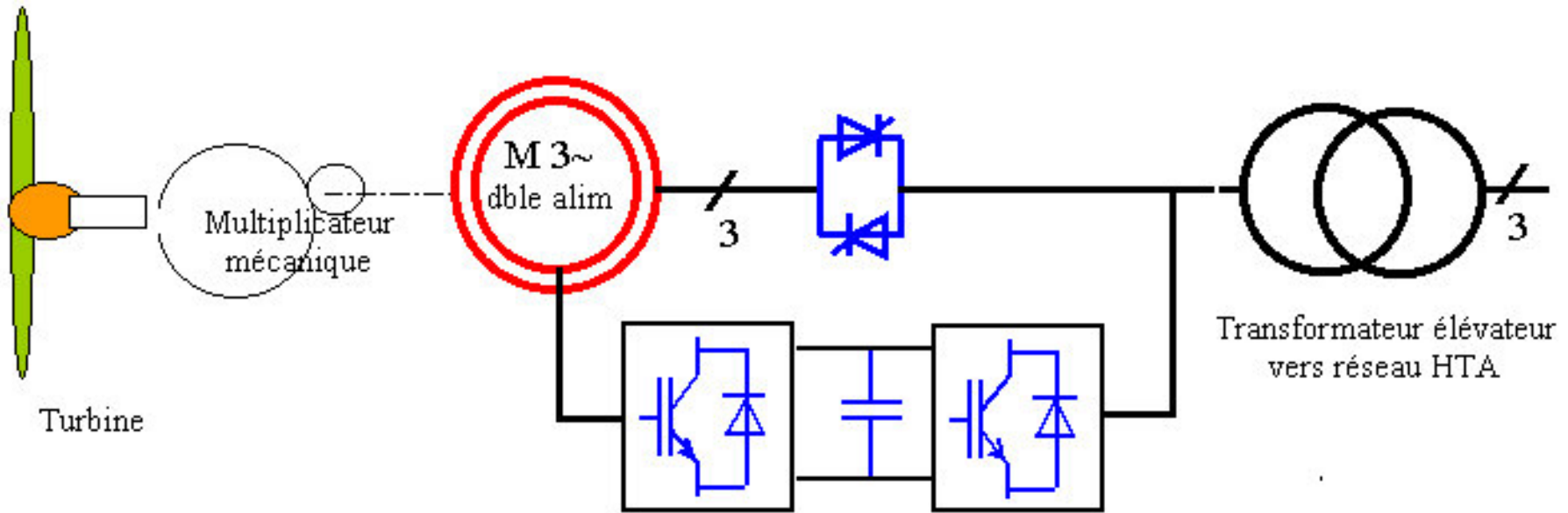


3- Machine à double alimentation

Génératrice asynchrone à rotor bobiné

$(N_N \pm 25 \text{ à } 40\%)$

Solutions :



Nordex N80 2500 kW

6 pôles 700 à 1300 tr/mn (1000 +/- 300 tr/mn)

Turbine 10,9 à 19,1 tr/mn (multiplicateur 1:68,1)

convertisseur IGBT 750 kVA

Génératrice : 12 tonnes (1,6 N.m/kg)

Multiplicateur : 18,5 tonnes

Nacelle complète : 83 tonnes (+ 65 tonnes turbine)



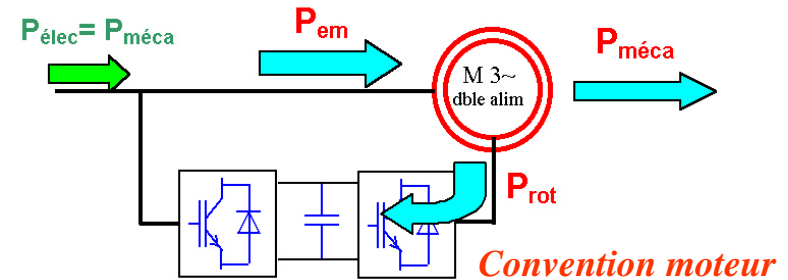
Bernard MULTON



3- Machine asynchrone à double alimentation

Analyse énergétique simplifiée autour de Ω_s

$$P_{em} = P_{stat} = \frac{P_{méca}}{1-g} \quad \text{et} \quad P_{rot} = \frac{g}{1-g} P_{méca}$$



	<p><i>Ex. : $g = g_{Max} = +0,5$</i> hyposynchrone $\Omega = 0,5 \cdot \Omega_s$</p>	<p><i>Ex. : $g = -g_{Max} = -0,5$</i> hypersynchrone $\Omega = 1,5 \cdot \Omega_s$</p>
<p>Récepteur Moteur $P_{méca} > 0$</p>	<p>$P_{rot} = P_{méca}$</p>	<p>$P_{rot} = \frac{1}{3} \cdot P_{méca}$</p>
<p>Générateur Frein $P_{méca} < 0$</p>	<p>$P_{rot} = P_{méca}$</p>	<p>$P_{rot} = \frac{1}{3} \cdot P_{méca}$</p>

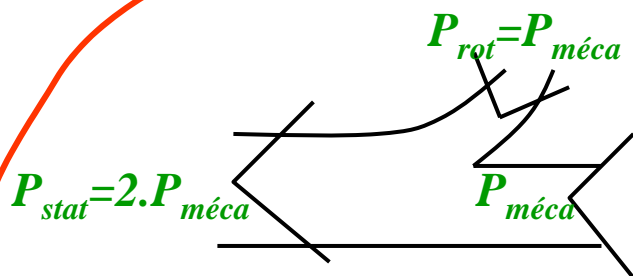


Génératrice asynchrone à double alimentation

Intérêt en terme de dimensionnement du convertisseur

hyposynchrone

$$\Omega = (1 - g_{Max}) \cdot \Omega_s$$

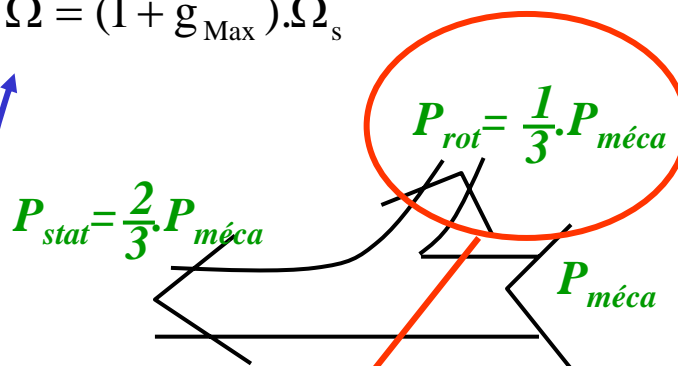


exemple : $g = +/- g_{Max} = 0,5$

$$\frac{\Omega_{Max}}{\Omega_{min}} = \frac{1,5 \cdot \Omega_s}{0,5 \cdot \Omega_s} = 3$$

hypersynchrone

$$\Omega = (1 + g_{Max}) \cdot \Omega_s$$



Cas d'une turbine éolienne :

si Ω varie dans un rapport 1:3

$P_{méca}$ varie dans un rapport 1:27

$$P_{méca}(\Omega_{Max}) \cong 27 P_{méca}(\Omega_{min}) \implies P_{rot} \cong \frac{1}{3} P_{méca_Max}$$

Donc $P_{méca_Max} = P_{méca}(\Omega_{Max})$





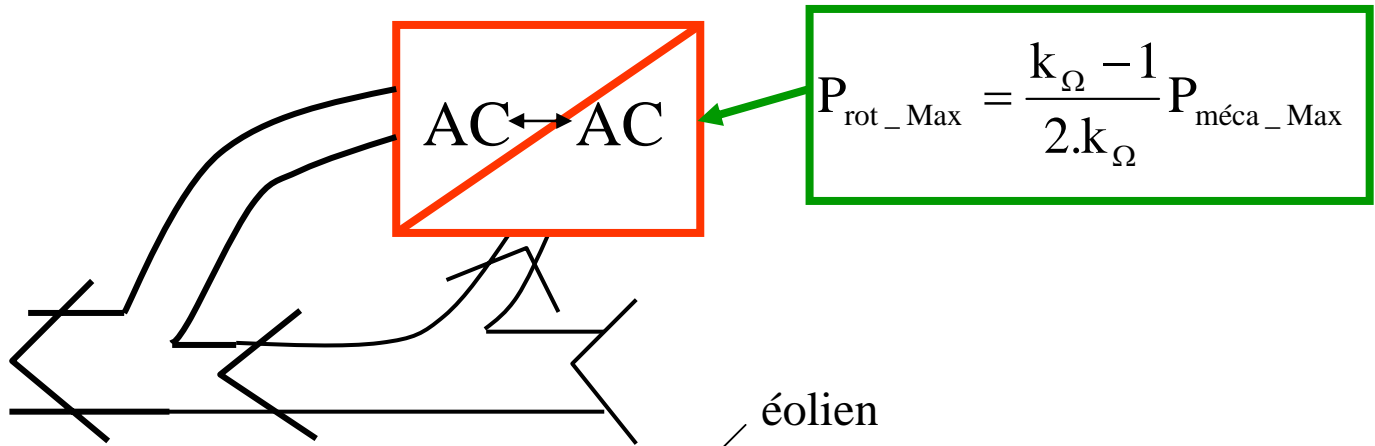
Génératrice asynchrone à double alimentation

Dimensionnement du convertisseur rotorique

à $g = -g_{Max}$: puissance convertie maximale $\longrightarrow P_{rot}$ Maximale

Plage de réglage de vitesse : $k_{\Omega} = \frac{\Omega_{Max}}{\Omega_{min}} = \frac{1 + g_{Max}}{1 - g_{Max}}$

Stator alimenté à tension et fréquence fixes



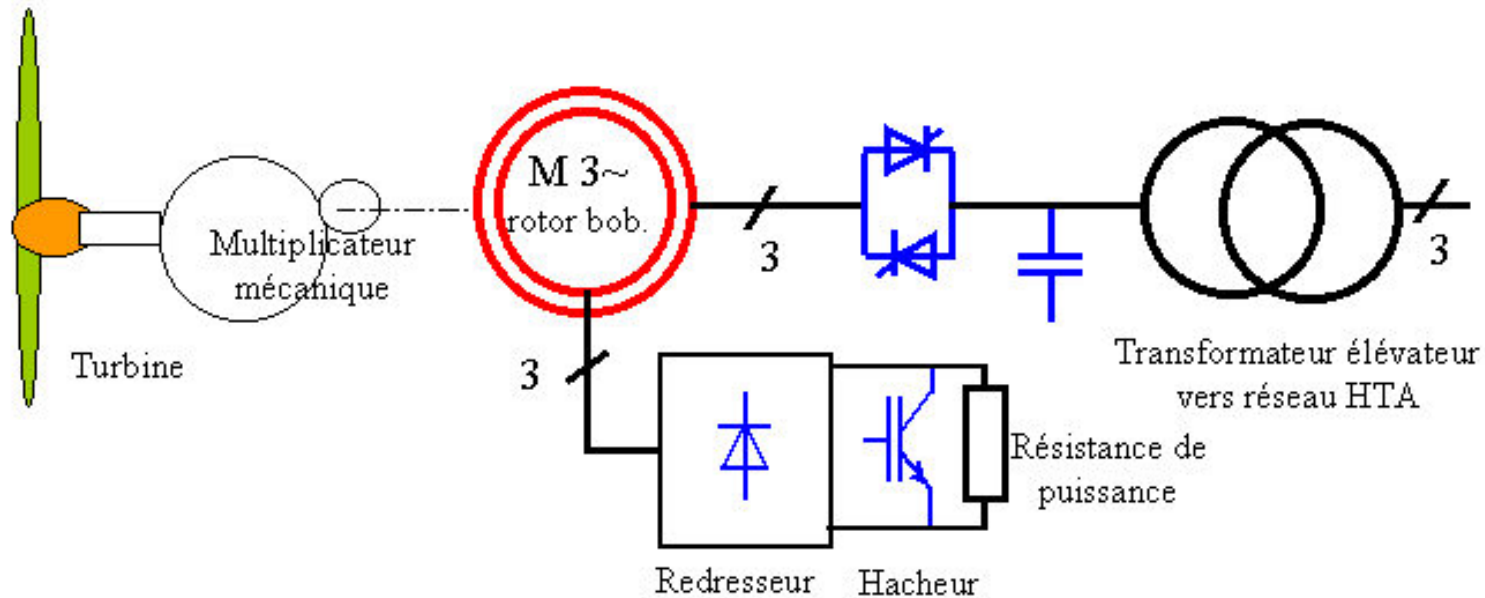
k_{Ω}	2	3	4	5
g_{Max}	0,33	0,5	0,6	0,666
$\frac{P_{rot_Max}}{P_{méca_Max}}$	0,25	0,333	0,375	0,4





3suite- Machine à rotor bobiné et à glissement contrôlé

$$N_{\text{synch}} + 1 \text{ à } 10\%$$

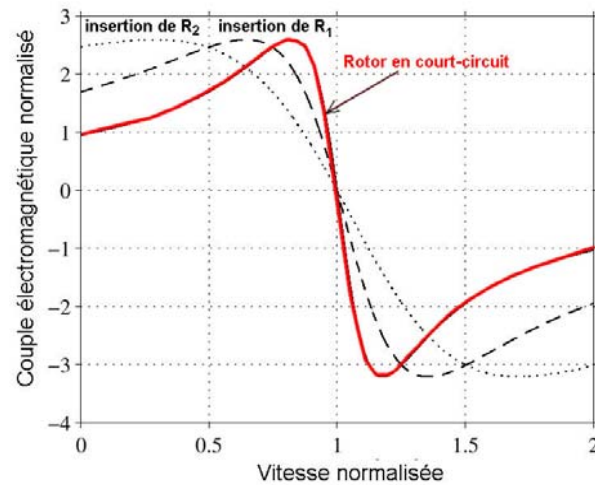


Avantages :

- durant les rafales, réduction du flicker
- amélioration du rendement global

Exemples : Vestas système « optislip »
Gamesa

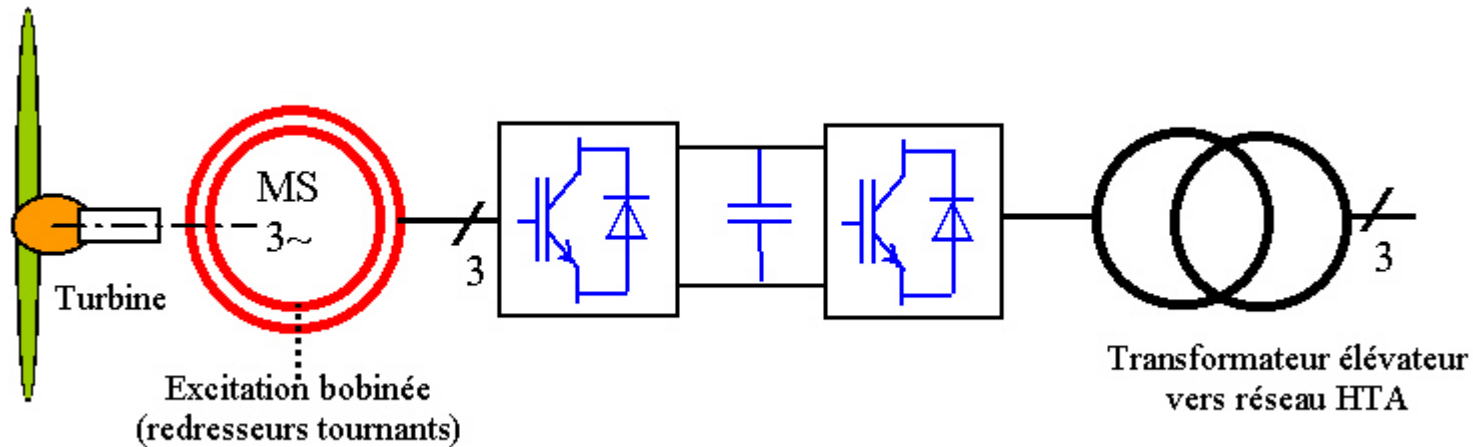
jusqu'à 2 MW





Grandes puissances couplées au réseau :

5- Génératrice synchrone à grand nombre de pôles (structures annulaires)
et excitation bobinée sans balais

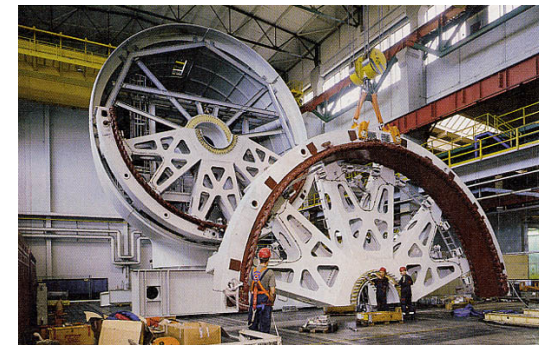


Enercon E66 1800 kW

10 à 22 tr/mn

Nacelle complète : 71 tonnes

(machine à multiplicateur même puissance :
60 tonnes environ)



Assemblage : la structure mécanique
représente une part importante de la masse

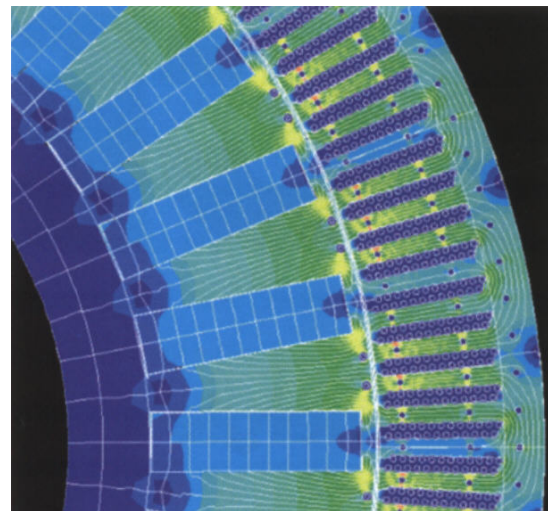


Génératrices directes : amélioration des performances

Aimants : réduction de masse d'environ 25%



*Rotor à pôles saillants bobinés
Enercon*



Rotor à aimants ABB

Génératrice à aimants **500 kW à 32 tr/mn**, avec 188 pôles
masse active de 2,7 tonnes (dont 125 kg d'aimants haute énergie)
masse totale de 10 tonnes (\cong 2/3 inactifs)
soit un couple massique global de **15 N.m/kg** ($58 \text{ N.m/kg}_{\text{actif}}$).

4,5 MW à 12 tr/mn :
50 tonnes dont 13 tonnes actifs et 600 kg d'aimants.



Bernard MULTON



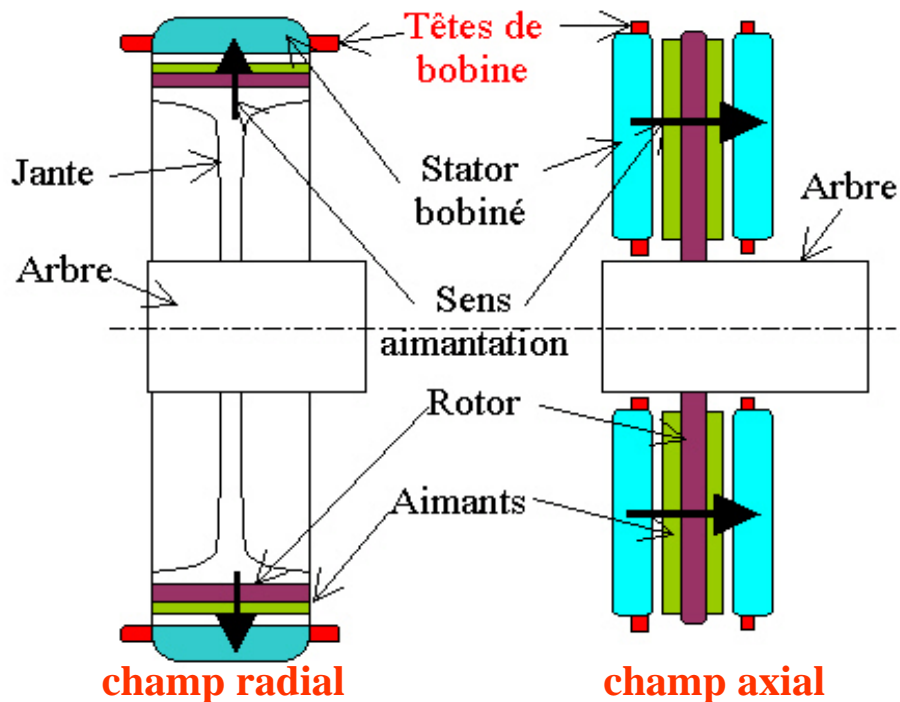
Architectures :

Machines multipolaires :

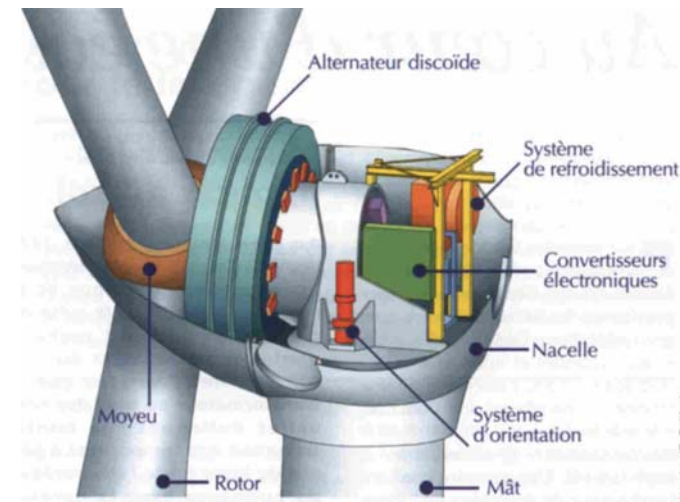
couple massique en $C^{0,5}$ au lieu de $C^{0,14}$ ($p = C^{te}$).

De 500 kW (32 tr/mn) à 4,5 MW (12 tr/mn),
le couple augmente d'un facteur 24 et le couple massique d'un facteur 4,9

Structure discoïdes : gain en encombrement et
en masse des parties inactives



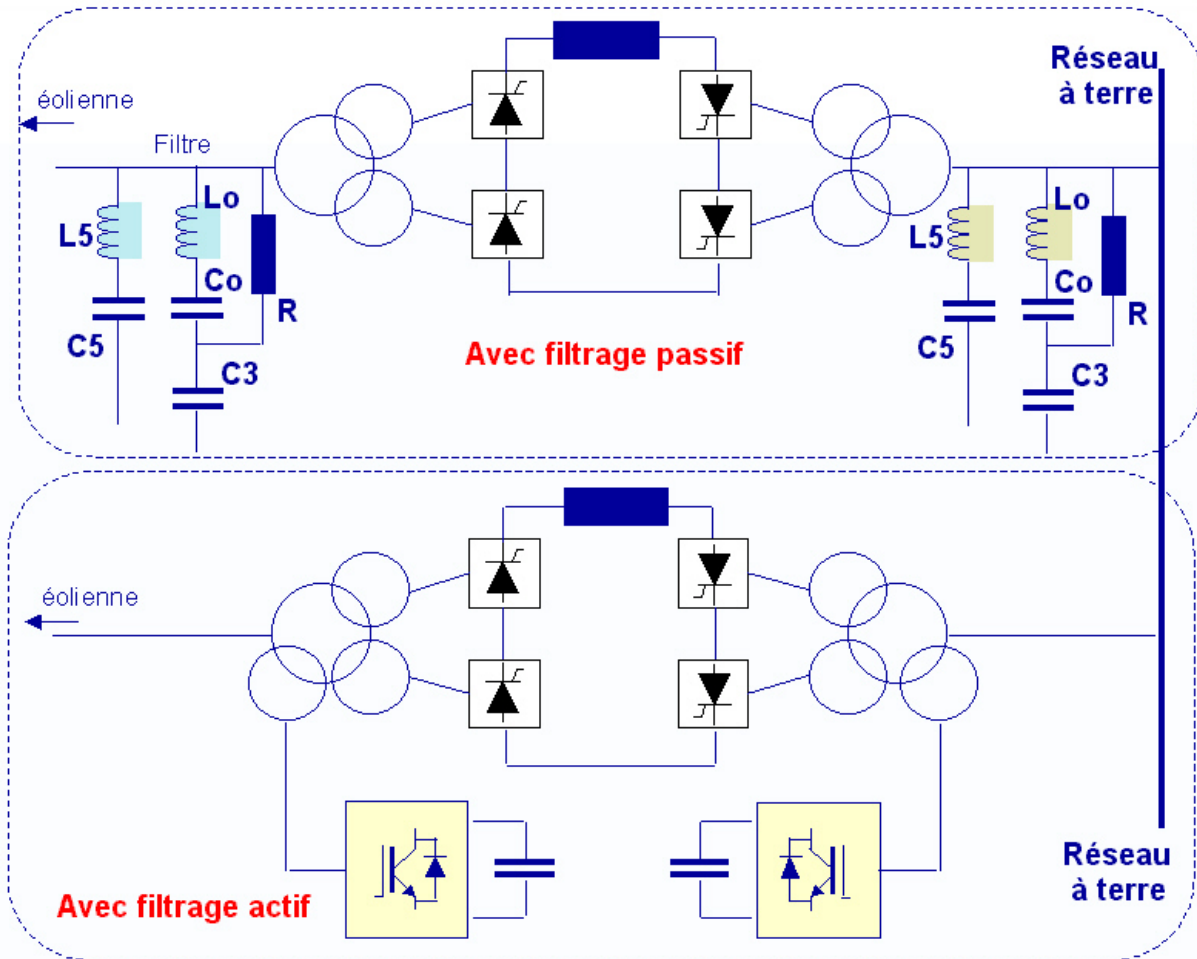
Jeumont Industrie J48 :
aimants et discoïde





Systèmes de transport d'énergie à distance (applications offshore)

Systèmes HVDC de transport en courant continu



Siemens, 675 MW,
50 x 50 m² sur 28 m de haut

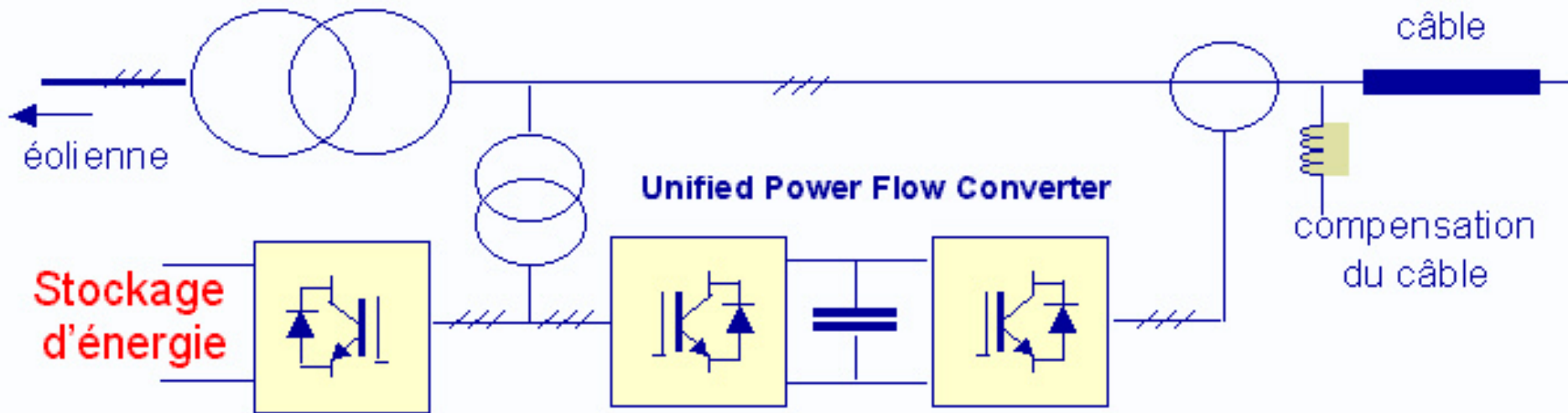


Bernard MULTON



Systemes de transport d'energie à distance (applications offshore)

Systemes de transport en courant alternatif



Le stockage d'énergie permet d'améliorer le service système :

- puissance active
- puissance réactive

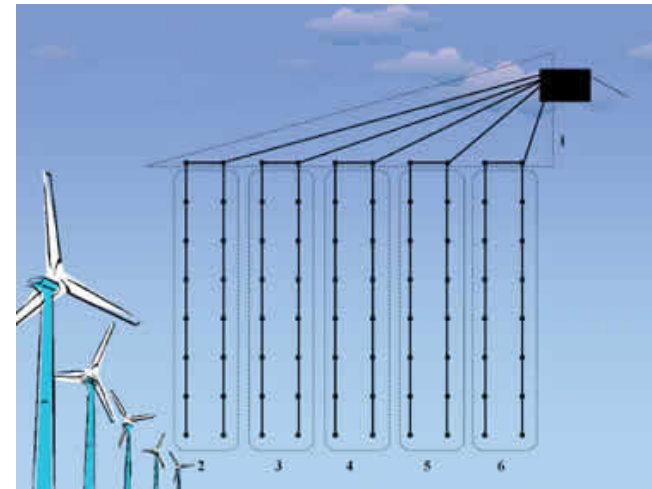
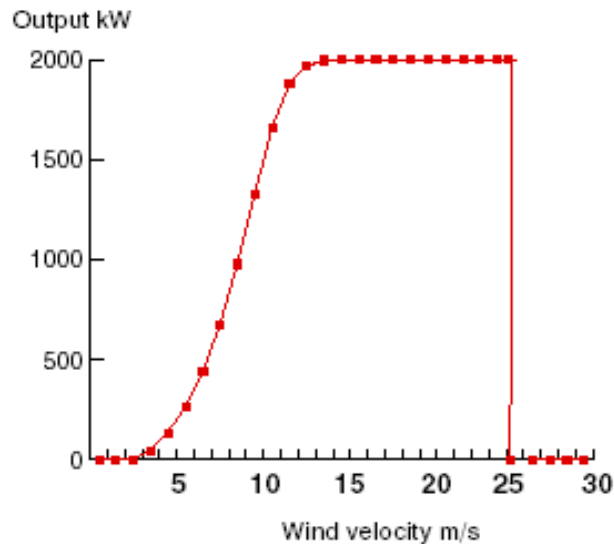


Bernard MULTON



Grande Centrale Offshore de Horns Rev 160 MW (Danemark, mise en service dec. 2002)

80 aérogénérateurs Vestas V80 de 2 MW
génératrices double alimentation 690 V – transfo. 690 V- 34 kV en nacelle



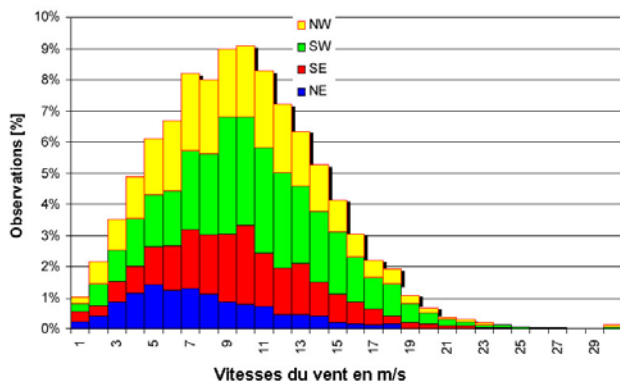
5 clusters de 16 machines

Transports par câbles en 150 kV (17 km de la côte)

Productivité annuelle : 600 GWh
soit 3750 h à P_{max}

Investissement : 268 M€ (40 M€ pour le transport de l'énergie)
soit 1,68 €/W

Distribution des vitesses de vents à 62 m de hauteur, site de Horn Rev (mer du Nord, Danemark)

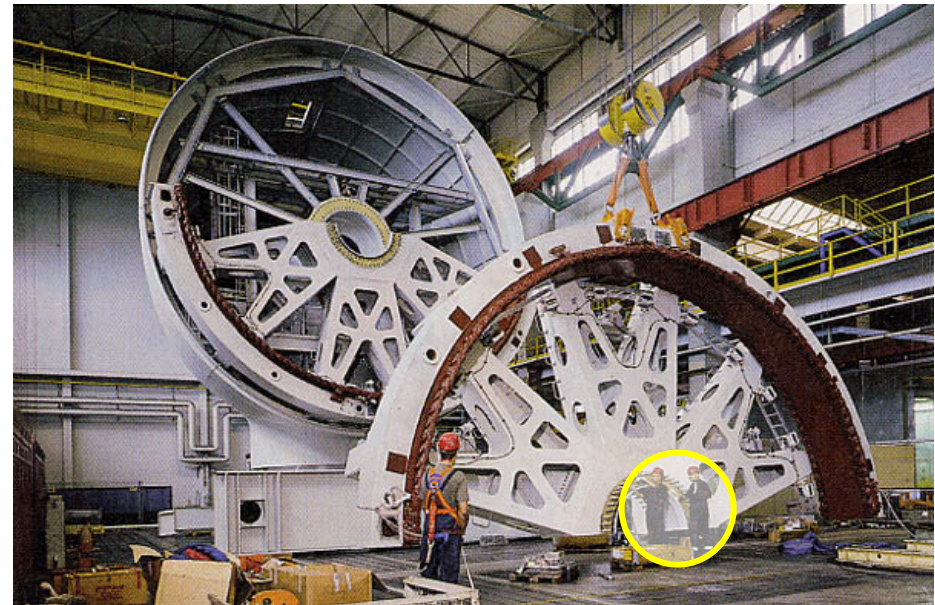




Perspectives en offshore 3 à 5 MW par unité

Aérogénérateur ENERCON E112 : 4,5 MW (1^{ers} essais été 2002)

production annuelle offshore : 12 millions de kWh (consommation de 3400 familles)



Générateur synchrone entraînement direct,
vitesse variable 8 à 12 tr/mn, convertisseur MLI

Des pales de 52 m, une nacelle de 440 tonnes...



Bibliographie

1/2

- [CHAB_EU97] B. CHABOT, “*Énergies renouvelables*” Encyclopaedia Universalis 1997.
- [CEE_LivreBlanc] Commission Européenne «*Énergie pour l’avenir : les sources d’énergie renouvelables. Livre blanc établissant une stratégie et un plan d’action communautaires*».
- [Mul_JEEA99] B. MULTON «*L’énergie électrique : analyse des ressources et de la production.*», Journées électrotechnique du club EEA, 28-29 janvier 1999, Paris, 8 p.
- [Toun_JEEA99] A. TOUNZI «*Utilisation de l’énergie éolienne dans la production de l’électricité.*», Journées électrotechnique du club EEA, 28-29 janvier 1999, Paris.
- [Mul_3EI98] B. MULTON, «*L’énergie sur la terre : analyse des ressources et de la consommation. La place de l’énergie électrique.*», Revue 3E.I n°13, septembre 98, pp.29-38.
- [Mul_02] B. MULTON, O. GERGAUD, H. BEN AHMED, X. ROBOAM, S. ASTIER, B. DAKYO, C. NIKITA, «*Etat de l’art des aérogénérateurs*», Ouvrage collectif «*L’électronique de puissance vecteur d’optimisation pour les énergies renouvelables*», Ed. NOVELECT - ECRIN, mai 2002, pp.97-154.
- [Mul_04] B. MULTON, X. ROBOAM, B. DAKYO, C. NICHITA, O. GERGAUD, H. BEN AHMED «*Aérogénérateurs électriques*», Techniques de l’Ingénieur, Traités de Génie Electrique, D3960, nov. 2004.
- [Mul_03a] B. MULTON, O. GERGAUD, G. ROBIN, H. BEN AHMED, «*Ressources énergétiques et consommation humaine d’énergie*», Techniques de l’Ingénieur, Traités de Génie Electrique, D3900, novembre 2003, 14p.
- [Mul_03b] B. MULTON, «*Production d’électricité par des sources renouvelables*», Techniques de l’Ingénieur, Traités de Génie Electrique, D4005/6, mai 2003, 11p.
- [Hau_00] E. HAU, *Wind-Turbines*, Springer, 2000.
- [Hlad_84] Jean HLADIK, *Énergétique éolienne : applications pratiques, chauffage éolien, production d’électricité, pompage*, Masson, 1984.
- [Patel_99] M.R. PATEL, *Wind and Solar Power Systems*, CRC Press, 1999.
- [Mül_IAS00] S. MÜLLER, M. DEIKE, R.W. DE DONCKER, «*Adjustable Speed Generators for Wind Turbines based on Doubly-fed Induction Machines and 4-Quadrant IGBT Converters Linked to the Rotor*», CDROM of the IEEE IAS Conf., oct. 2000.
- [Bau_IAS00] P. BAUER, S.W.H. DE HAAN, C.R. MEYL, JTG. PIERIK, «*Evaluation of Electrical Systems for offshore Windfarms*», CDROM of the IEEE IAS Conf., oct. 2000.
- [Hoff_IAS00] R. HOFFMANN; P. MUTSCHLER, «*The Influence of Control Strategies on the Energy Capture of Wind Turbines*». CDROM of the IEEE IAS Conf., oct. 2000.
- [BWEA_rep98] British Wind Energy Agency, «*Offshore Wind Energy : Building a new industry for Britain*», report June 1998.
- [Obser_Jan00] EurObserv’ER, *Le baromètre éolien : 13 356 MW dans le monde début 2000*, revue Systèmes Solaires n°135, janvier 2000, pp.29-36.
- [Diveux_TH00] Thierry DIVEUX, «*Implantation d’un système éolien. Optimisation par algorithmes génétiques*», Thèse LEPT-ENSAM Bordeaux, 29 septembre 2000.
- [Hender_EWEA99] A.R. HENDERSON, M.H. PATEL, J. HALLIDAY, G. WATSON, «*Multiple Turbine Floating Offshore Windfarms*», Europ. Wind Energy Conf. Nice, march 1999.
- [Perez_HP98] R. PEREZ, «*Wind Power*», Home Power, Oct.Nov 1998, pp.56-60.
- [Sagr_HP98] M. SAGRILLO, «*Wind Power*», Home Power, June/July 1998, pp.18-32.
- [NREL_99] P.R. GOLDMAN, R.W. THRESHER, S.M. HOCK (US-NREL) «*Wind Energy in the United States : Market and Research Update*», Europ. Wind Energy Conf., Nice, 1-5 March 99.
- [Cor-NREL_99] CORBUS D., BARING-GOULD I., et. al. «*Small Wind Turbines Testing and Applications Development*», NREL, Windpower’99, Burlington, June 99.
- [Gipe_93] Paul GIPE, *Wind Power for Home and Business*, Chelsea Green Publishing Comp, 1993.



Bibliographie

2/2

- [**ABB_3-00**] M. DAHLGREN, H. FRANK, M. LEIJON, F. OWMAN, L. WALFRIDSSON, « *Windformer. Production à grande échelle d'électricité éolienne* », Revue ABB n°3-2000, pp.31-37.
- [**Budi_00**] M. BUDINGER, D. LERAY, Y. DEBLEZER, « éoliennes et vitesse variable », revue 3EI N°21 Juin 2000.
- [**Mutsch_97**] P. MUTSCHLER, B. HAGENKORT, S. JÖCKEL, « Control method for variable speed stall control wind turbines », European wind energy conf, October 1997, Dublin, Ireland.
- [**Chen_00**] CHEN, S. A. GOMEZ, M. Mc CORMICK, « a fuzzy logic controlled power electronic system for variable speed wind energy conversion systems », IEE PEVD conf, September 2000, London, Conf publication N° 475.
- [**EGG_87**] D.M. EGGLESTON, F.S. STODDARD, *Wind turbine engineering design*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1987.
- [**GOUR_82**] D. Le GOURIERES, *Energie éolienne, théorie, conception et calcul pratique des installations*, Eyrolles, 1982.
- [**WAL_97**] J.F. WALKER, N. JENKINS, *Wind energy technology*, John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [**SPE_94**] D.A. SPERA, *Wind turbine technology. Fundamental concepts of wind turbine engineering*. New York ASME Press, 1994.
- [**FRE_90**] L.L. FRERIS, *Wind energy conversion system*, Prentice Hall International Ltd., England, 1990.
- [**NICH_94**] C. NICHITA, E. CEANGA, A. PIEL, J.J. BELHACHE, L. PROTIN, *Real time servosystem for a wind turbine simulator*, IEEE 3rd International Workshop on Advanced Motion Control, Berkeley, USA, 1994, pp. 1039-1048.
- [**NICH_95**] C. NICHITA, *Etude et développement de structures et lois de commande numériques pour la simulation en temps réel d'actionneurs. Application à la réalisation d'un simulateur d'aérogénérateur de 3 kW*. Thèse de Doctorat, Université du Havre, 1995.

Sites Web

- [CompEole] Compagnons d'Eole : <http://users.swing.be/compagnons-eole/>
- [PaulGippe] Paul Gipe Association : <http://rotor.fb12.tu-berlin.de/overview.html>
- [WindPower] Site des constructeurs Danois : <http://www.windpower.dk/>
- [OWEN] Offshore Wind Energy Network : <http://www.owen.eru.rl.ac.uk/>
- [EoleWeb] Eole, les éoliennes et l'énergie du vent : <http://www.eole.org/>
- [EWEA] European Wind Energy Association : <http://www.ewea.org/>
- [AWEA] American Wind Energy Association : <http://www.awea.org/>
- [EED] Espace Eolien Développement : <http://www.espace-eolien.fr/>
- [RISO] Risø National Laboratory (Danemark) : <http://www.risoe.dk/>
- [LIOR] LIOR international, <http://www.lior-int.com/>
- [GEFER] Groupe Eolien Francoph. d'Etudes et Rech., <http://www.gefer.univ-artois.fr/>