

Intégration de l'énergie éolienne au réseau électrique



Amine BEN RHOUMA

« énergie éolienne »



Laboratoire
des Systèmes
Électriques



amine.benrhoouma@enit.rnu.tn

Plan du cours

Chapitre 1: Historique de l'éolien

Chapitre 2: Principe, structure, conversion $E_{\text{cinétique}}$ en $E_{\text{électrique}}$

Chapitre 3 : Architecture des éoliennes

Chapitre1: Historique de l'éolien

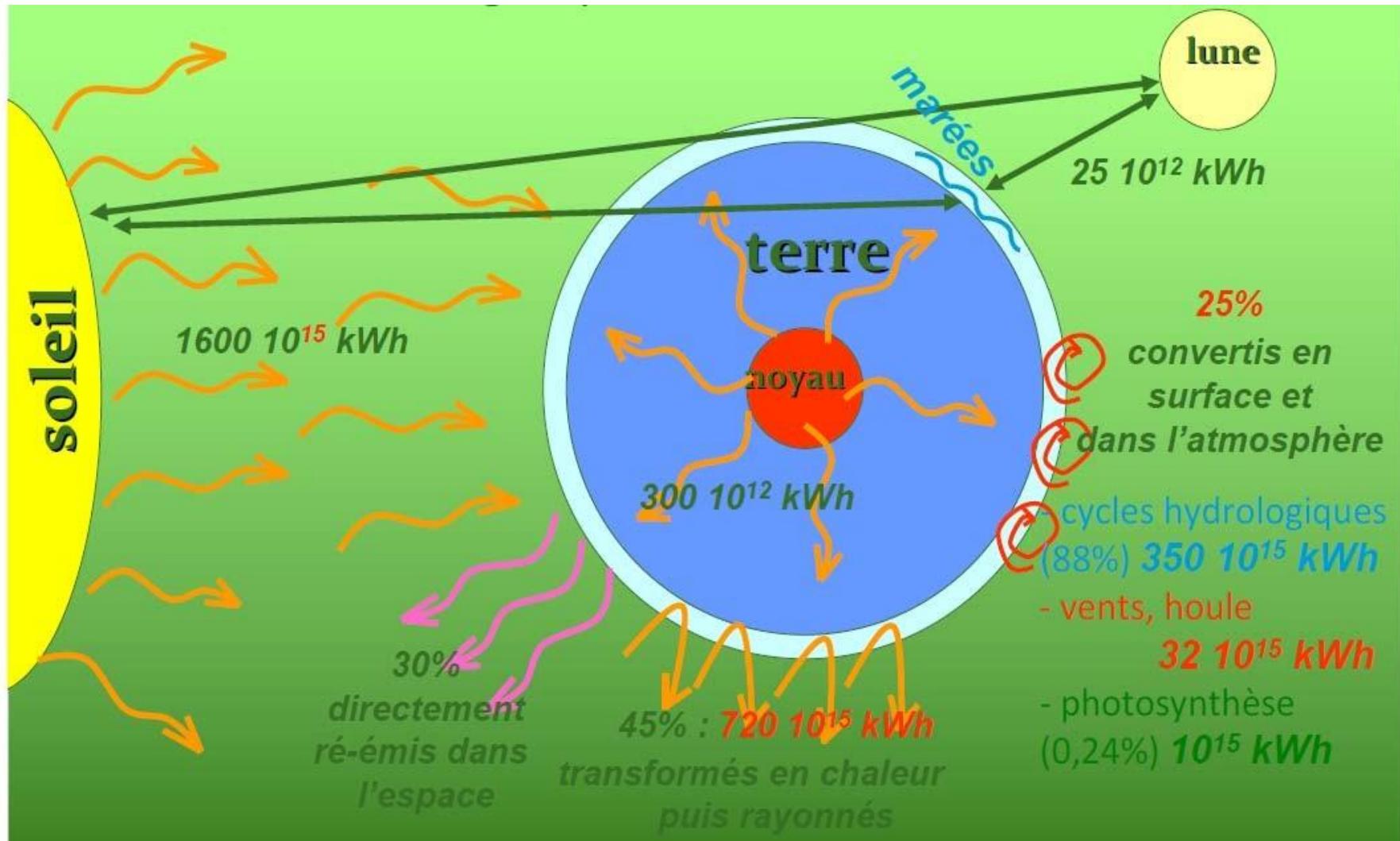
□Positionnement de l'éolien au monde:

- ❖Aspects Economiques
- ❖Aspects Techniques

□Positionnement de l'éolien en tunisie:

- ❖Aspects Economiques
- ❖Aspects Techniques

Les différentes ressources énergétiques renouvelables (chiffres annuels)



Activités énergétiques humaines : $140 \cdot 10^{12} \text{ kWh}$

Chapitre 1 : Historique des éoliennes

L'éolienne tire son énergie du vent



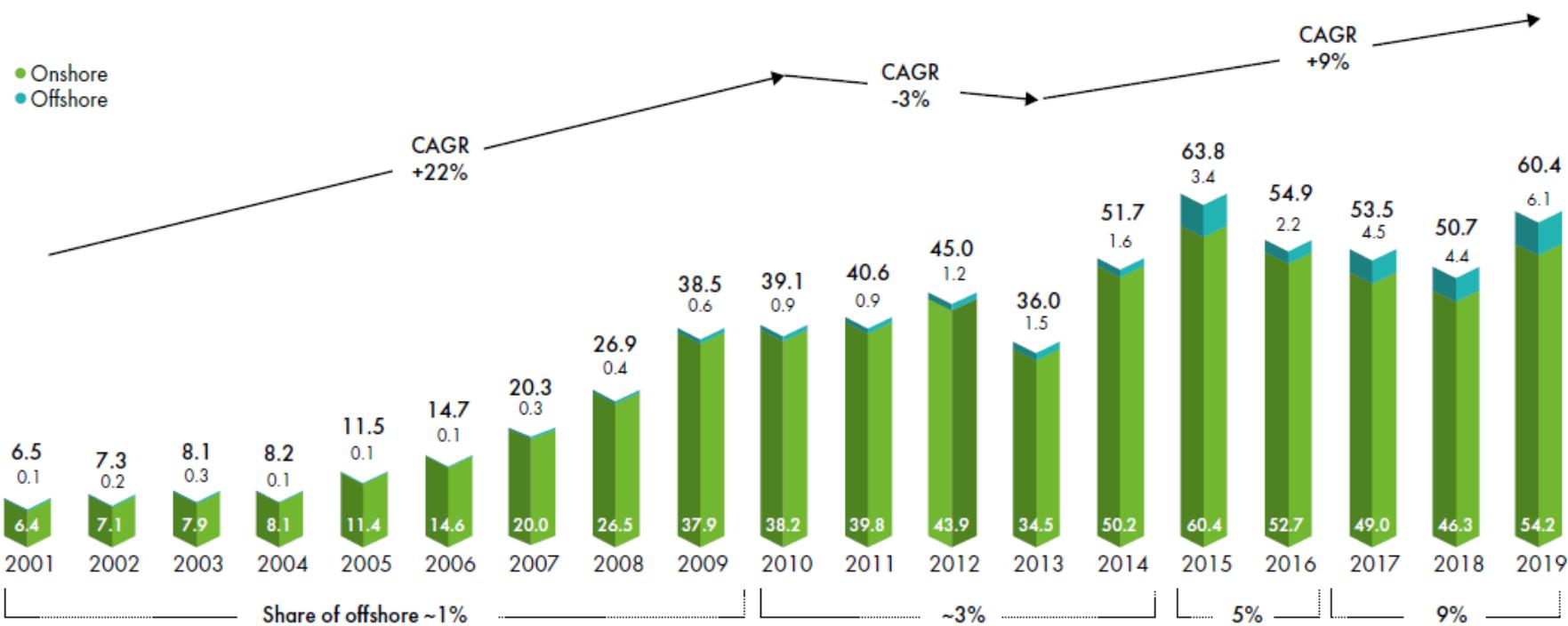
L'énergie éolienne est utilisée depuis l'Antiquité.

- le moulin à vent ou le meunier transformait le blé en farine.
- A partir de 1990, grand essor grâce aux avancées technologiques.

Transformation de l'énergie cinétique des molécules d'air en déplacement, rotation des pâles qui activent un générateur qui aliment un réseau local ou directement le réseau national: production d'électricité.

Capacité Eolienne Installée dans le monde

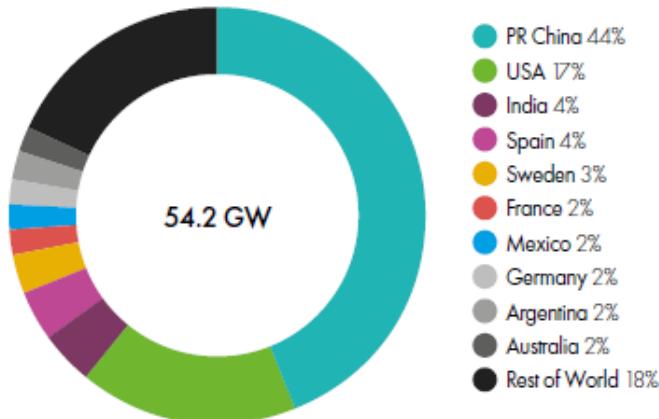
Historic development of new installations (onshore and offshore)



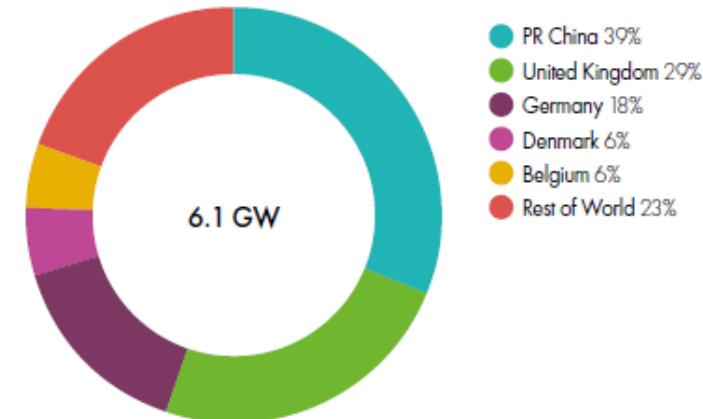
Capacité Eolienne Installée dans le monde

Top markets 2019

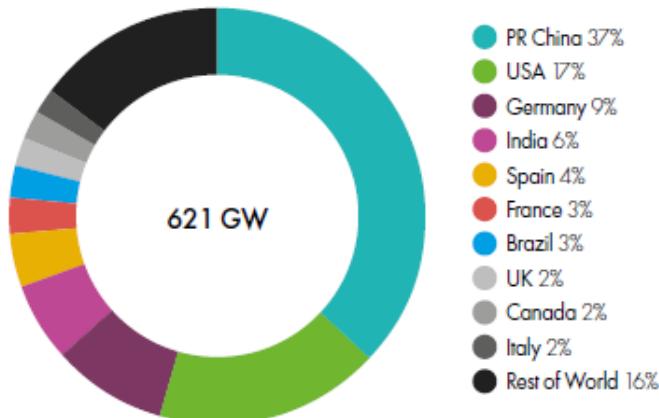
New installations onshore (%)



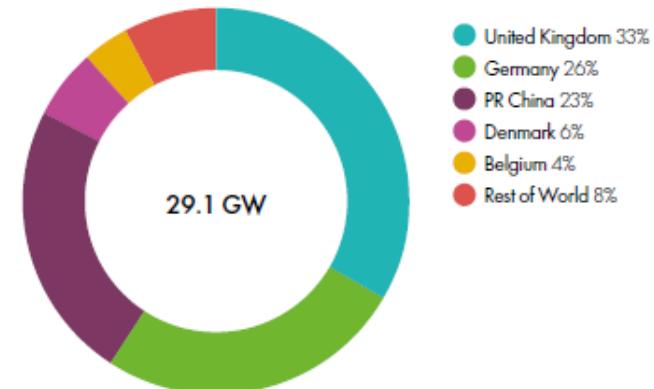
New installations offshore (%)



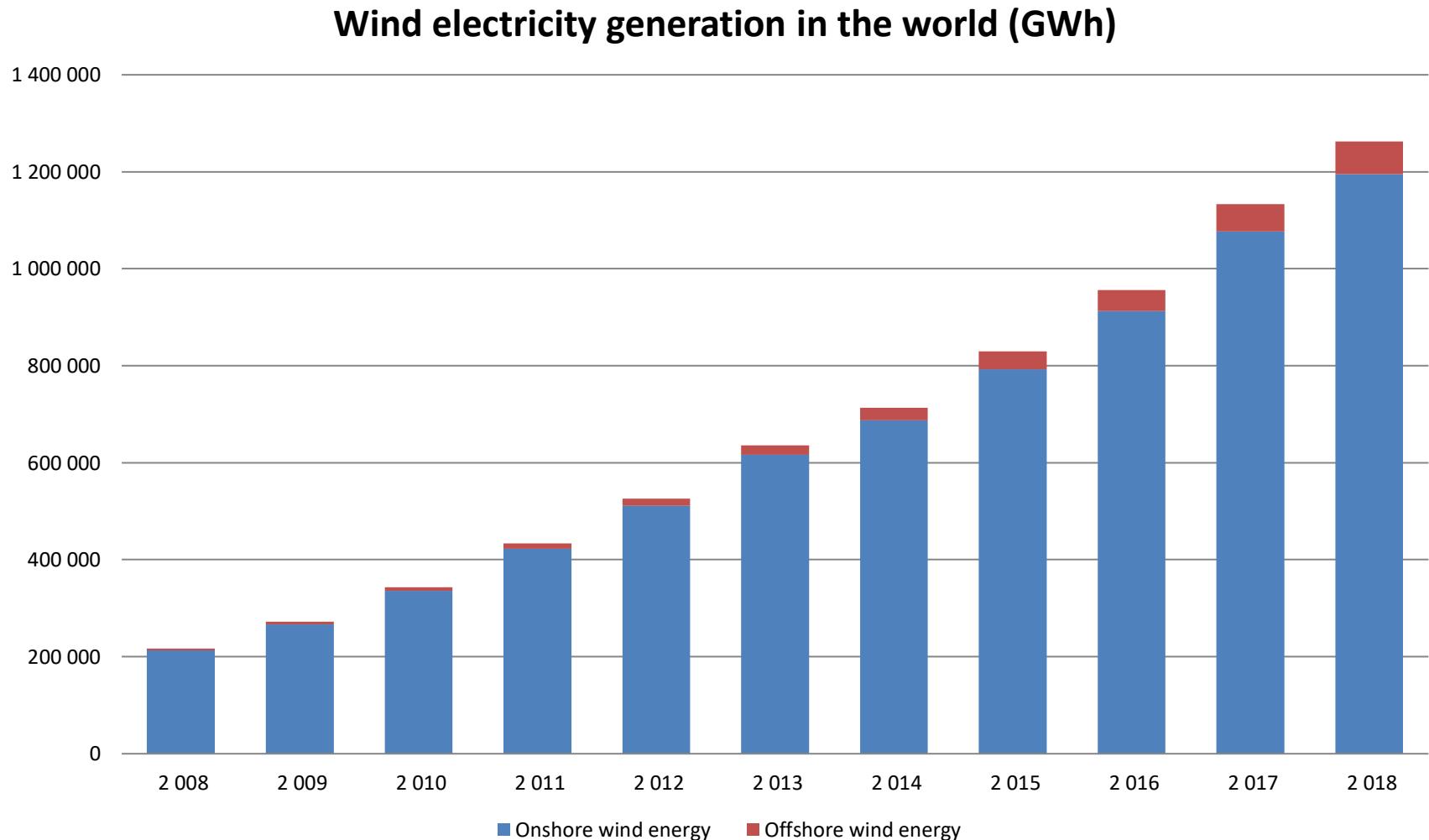
Total installations onshore (%)



Total installations offshore (%)

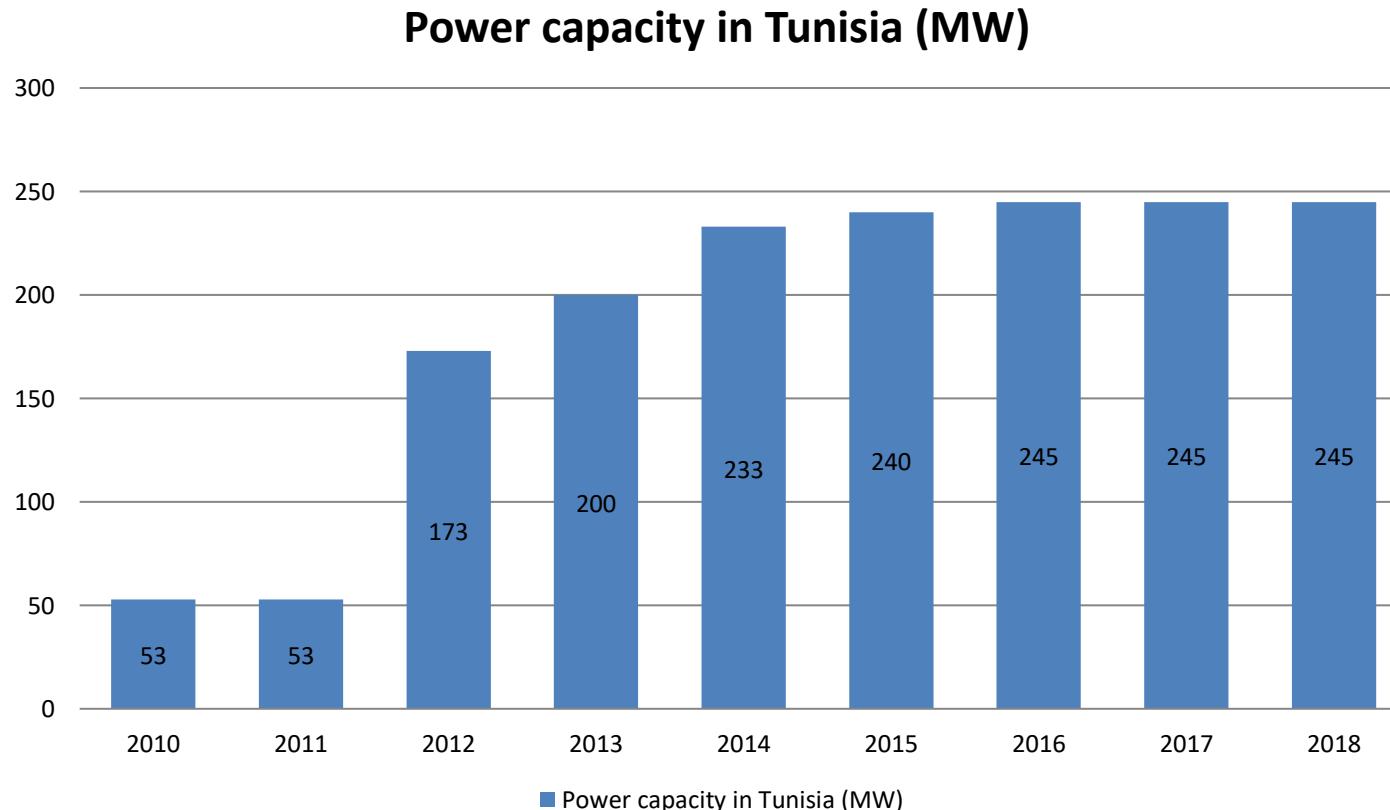


Capacité Eolienne Installée dans le monde



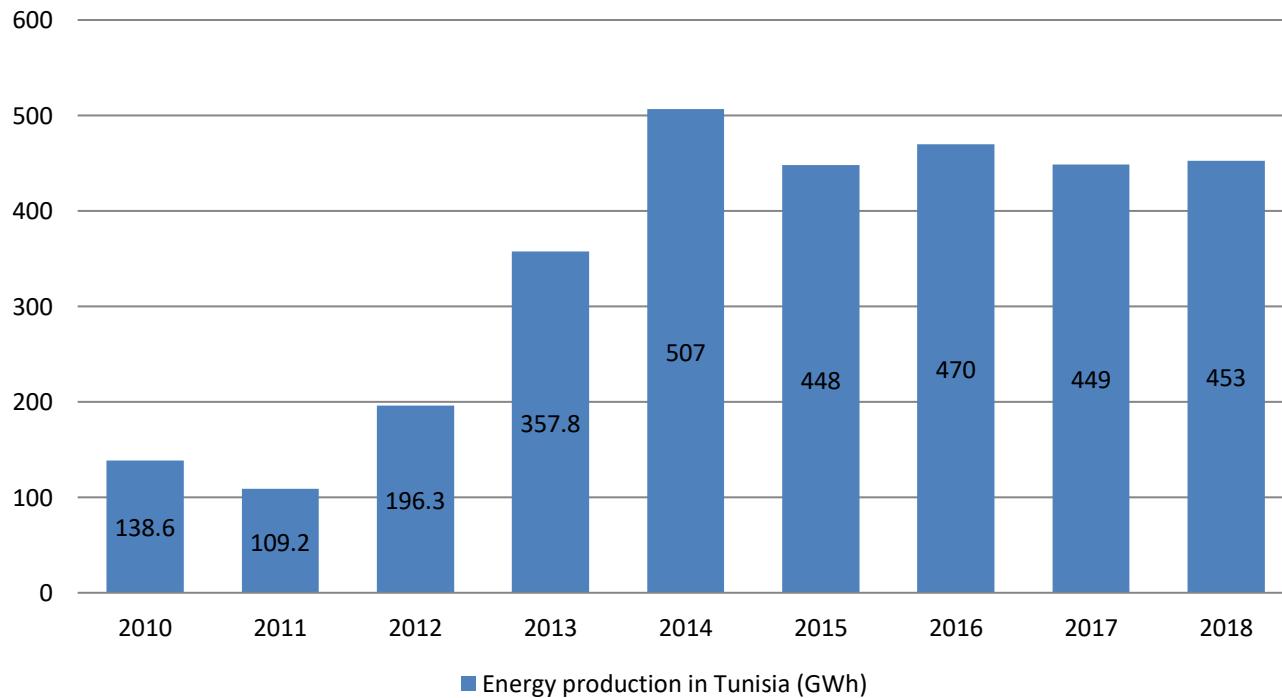
GWEC (The Global Wind Energy Council),

Capacité Eolienne Installée en Tunisie



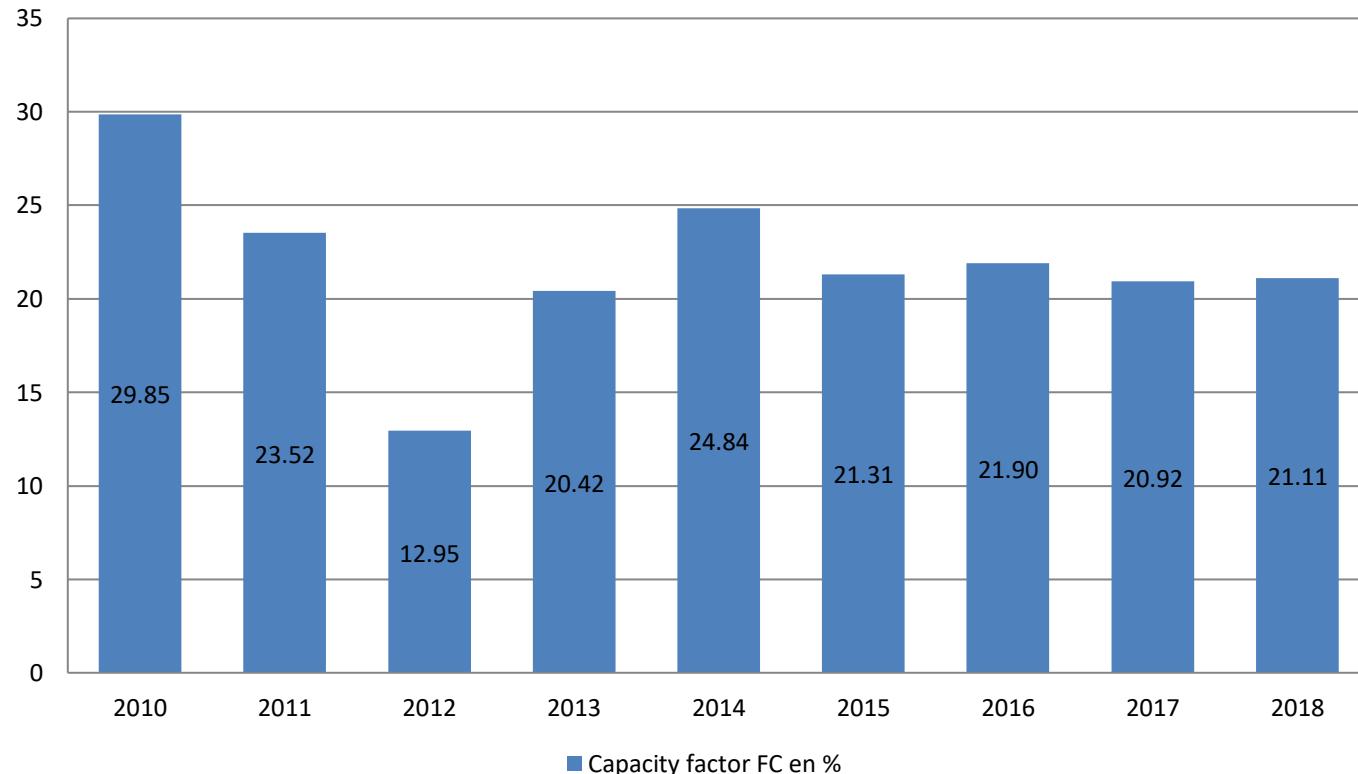
Energie éolienne produite en Tunisie

Energy production in Tunisia (GWh)



Facteur de capacité des fermes éolienne Tunisie

Capacity factor FC en %



Coût d'une éolienne

Ca coûte combien une installation éolienne ?

3 critères pèsent sur le coût

- **L'installation** (fondations, construction de voies ...) comprenant également le transport du système qui n'excède normalement pas 15 000 euros.
- **L'éolienne** elle-même: taille du rotor, du mât. Il faut compter 1 000 euros par kWh installé. Exemple : Une machine de 200 kWh coûtera 200 000 euros.
- **Le terrain**, le transport et le raccordement. Le rallongement d'une éolienne est possible mais il est adviendra 1 500 euros par mètre supplémentaire.

Quelques remarques

- Le coût des éoliennes a diminué d'un facteur 4 depuis 1980
- Peu d'appel au budget de l'état, quasi-absence de l'état sur le choix des sites
- Un marché garanti 15 à 20 ans (théorie!!)
- Un TRI sur fonds propres de 20 à 40%, faible visibilité des bilans investis

Coût d'une éolienne

Ca coûte combien une installation éolienne ?

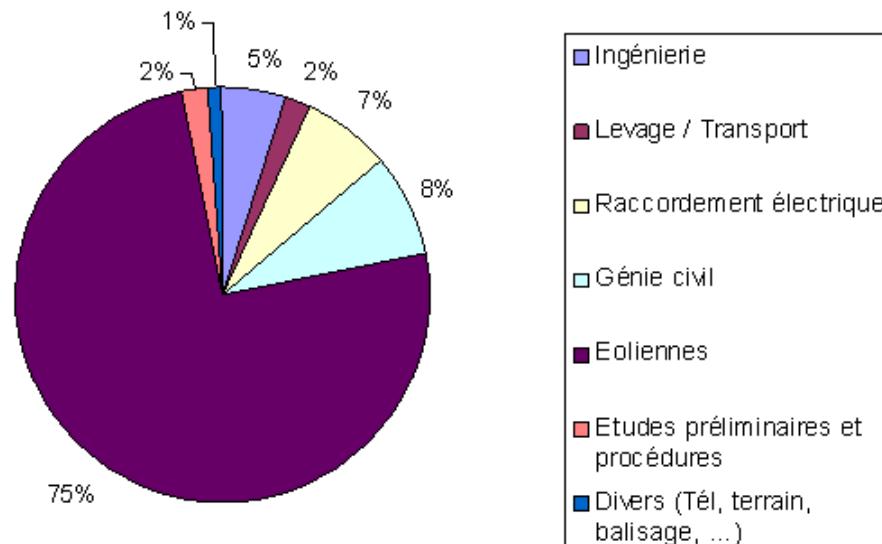
Grandes éoliennes (>600kW)

Eoliennes	760 à 920€ / kW
Génie Civil + divers	70 à 110€ / kW
Raccordement	70 à 110€ / kW
Total	900 à 1150€ / kW

Petites éoliennes 6kW

2500€ / kW
660 à 1500€ / kW
500€ / kW
3660 à 4500€ / kW

Structure du coût



Une ferme de 10GW coûtera environ 10M€ (3x plus en offshore) pour une production de 25GWh/an, soit l'équivalent d'une consommation de 10.000 foyers

Prix du kWh Éolien

□ Modèle de financement
(loan, interest...)

□ Durée de vie du projet,
the cost of capital;

□ Coût du Fonctionnement & de Maintenance

□ Technologies utilisées
(standard of the generator)

□ Onshore or Offshore
wind farm.....

□ Vitesse du vent du site et facteur de charge

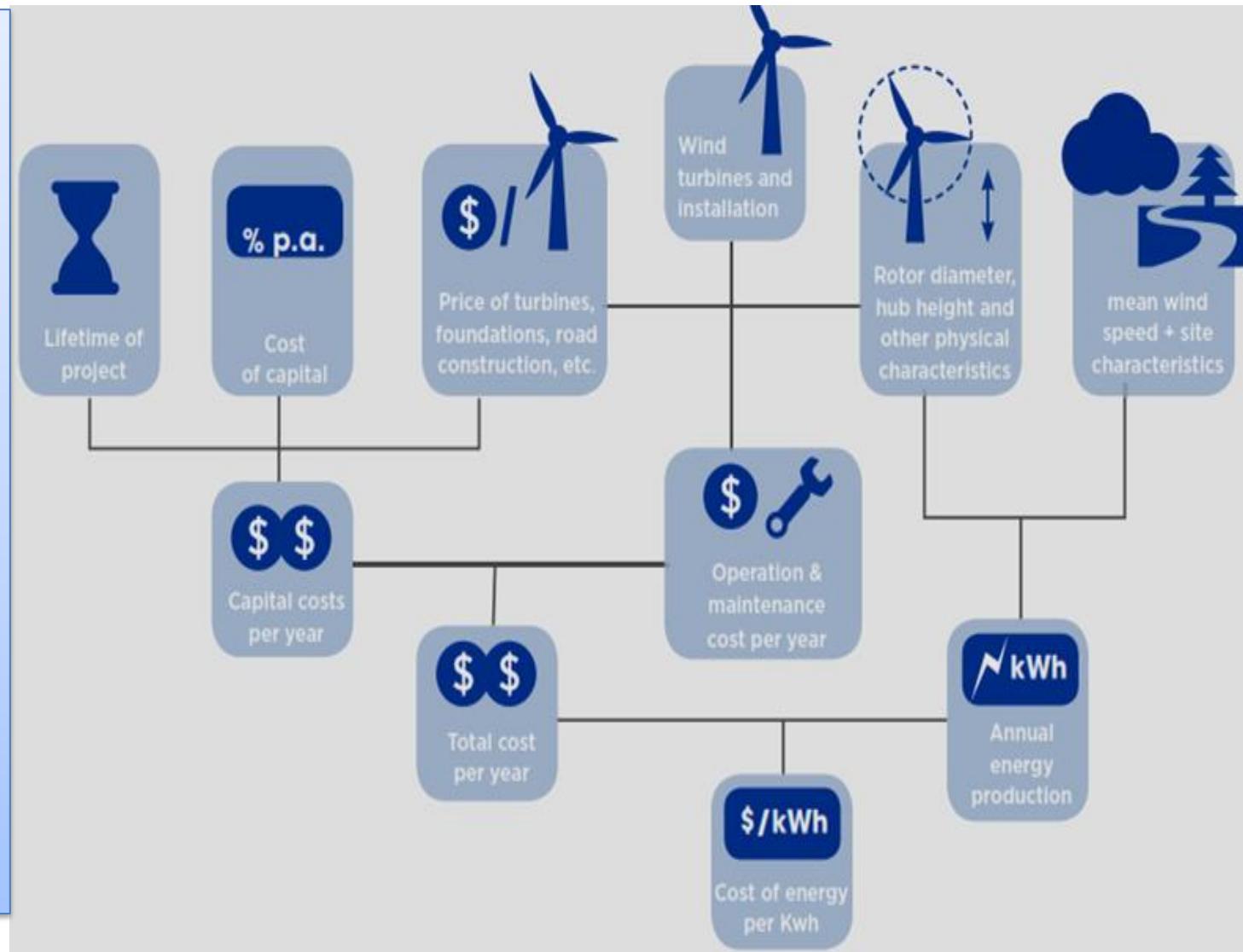
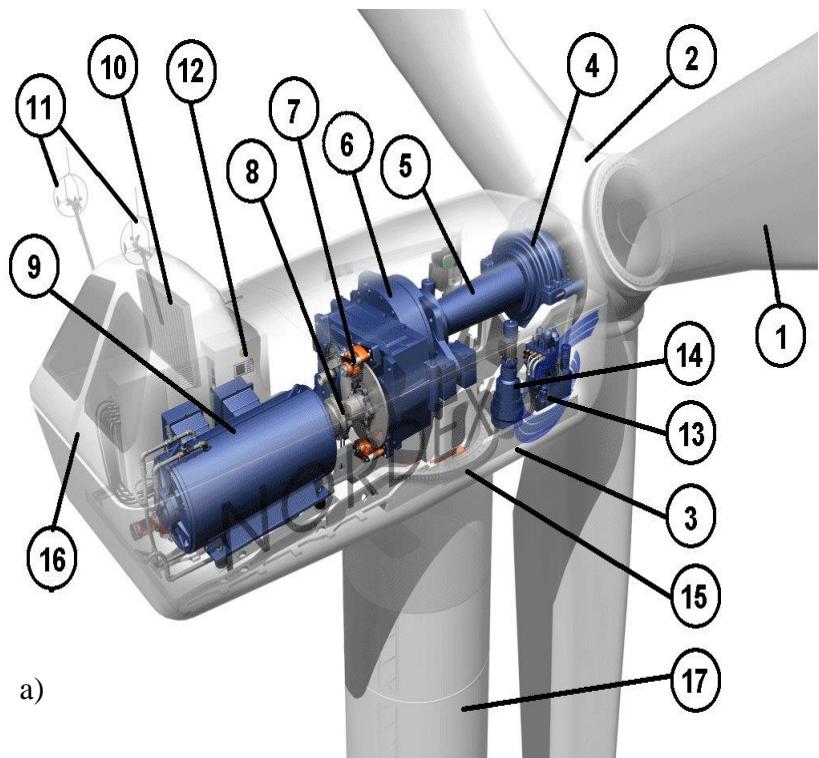
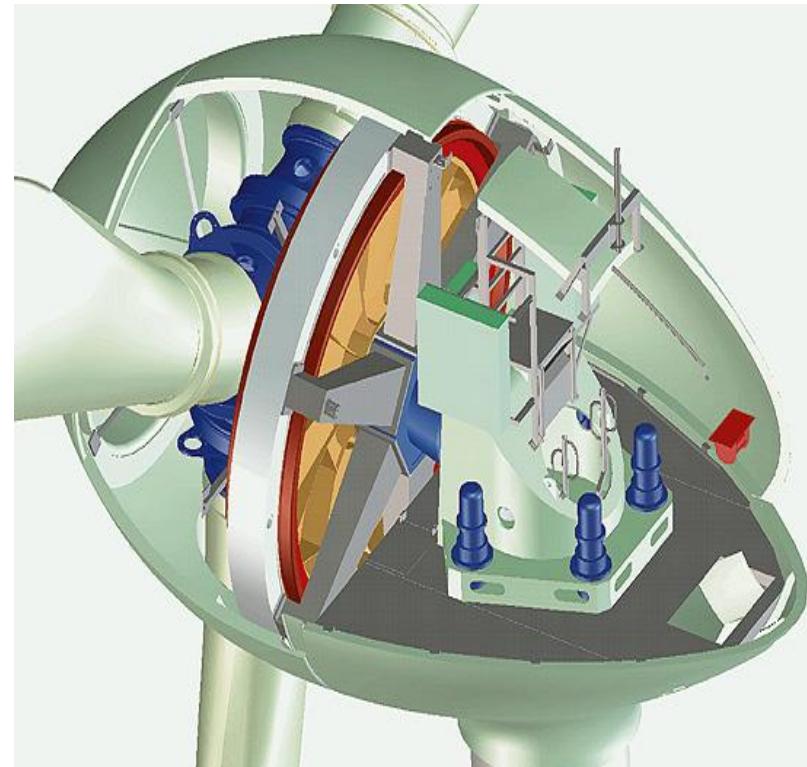


Schéma des 2 configurations à Vitesse variable



a)



b)

Schéma d'une éolienne

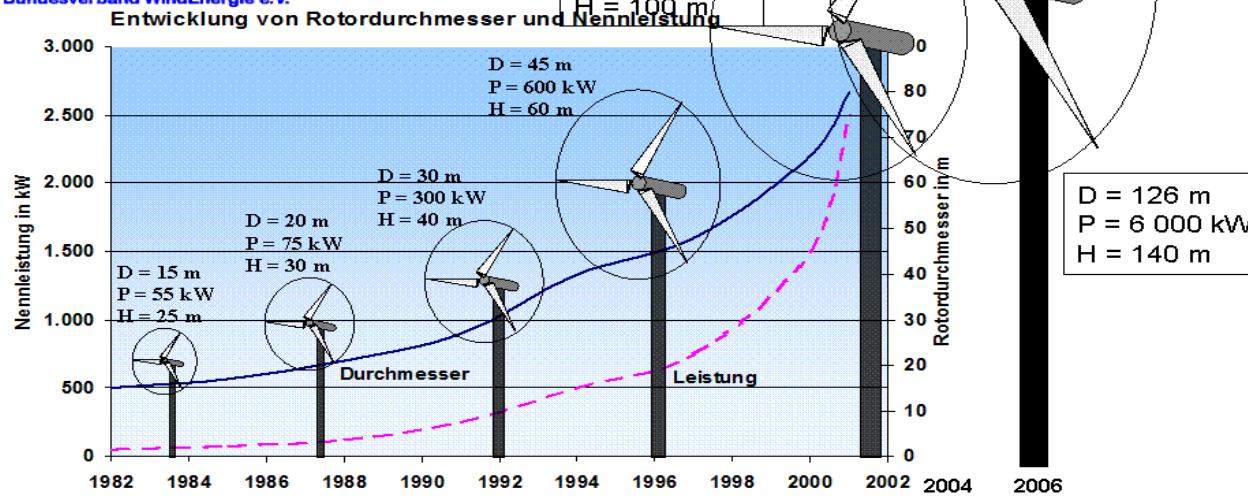
a) à multiplicateur de vitesse : Nordex N60 (1300 kW) b) à entraînement direct :Enercon.

1 : pales, 2 : moyeu rotor, 3 : nacelle, 4 : cardan, 5 : transmission, 6 : multiplicateur de vitesse, 7 : frein à disque, 8 : accouplement, 9 : génératrice, 10 : radiateur de refroidissement, 11 : centrale de mesures du vent, 12 : contrôle, 13 : centrale hydraulique, 14 : mécanisme d'orientation face au vent, 15 : paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque, 16 : capot, 17 : mât.

Evolution de la puissance par éolienne



Bundesverband WindEnergie e.V.

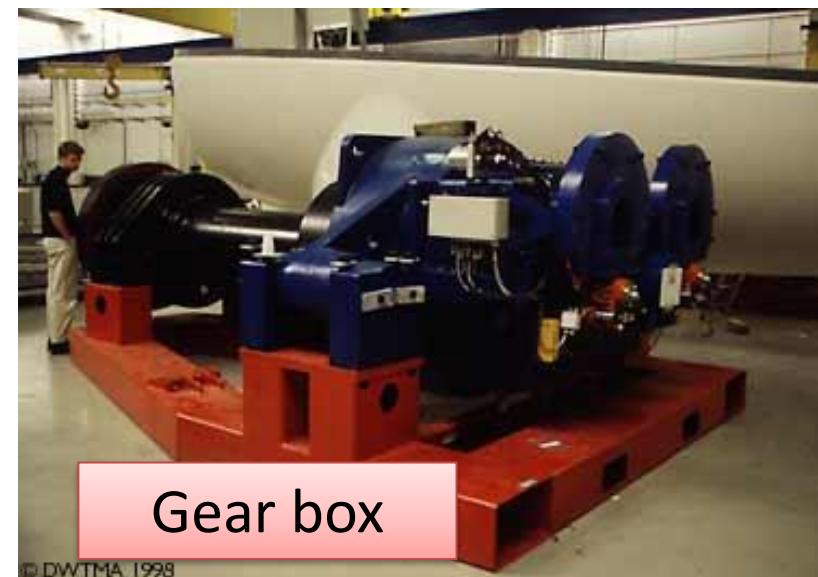
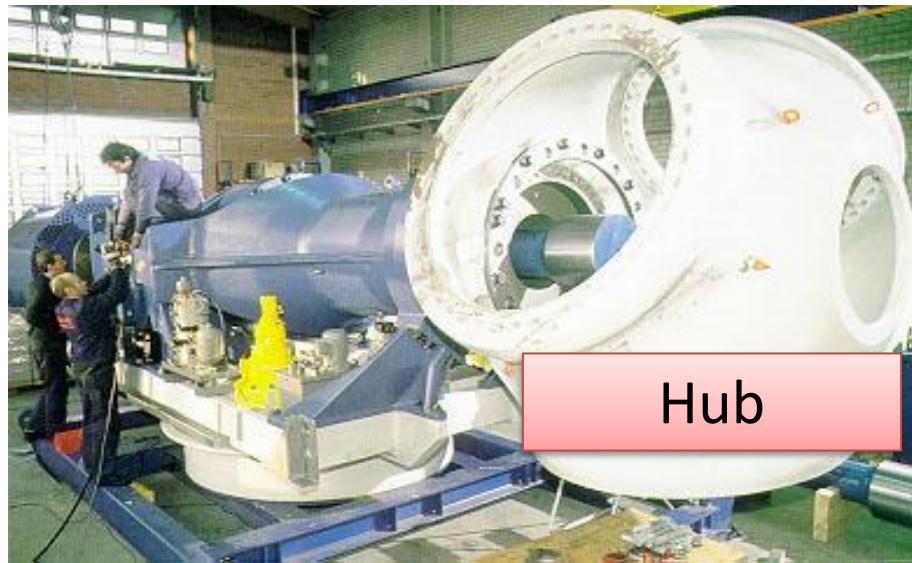
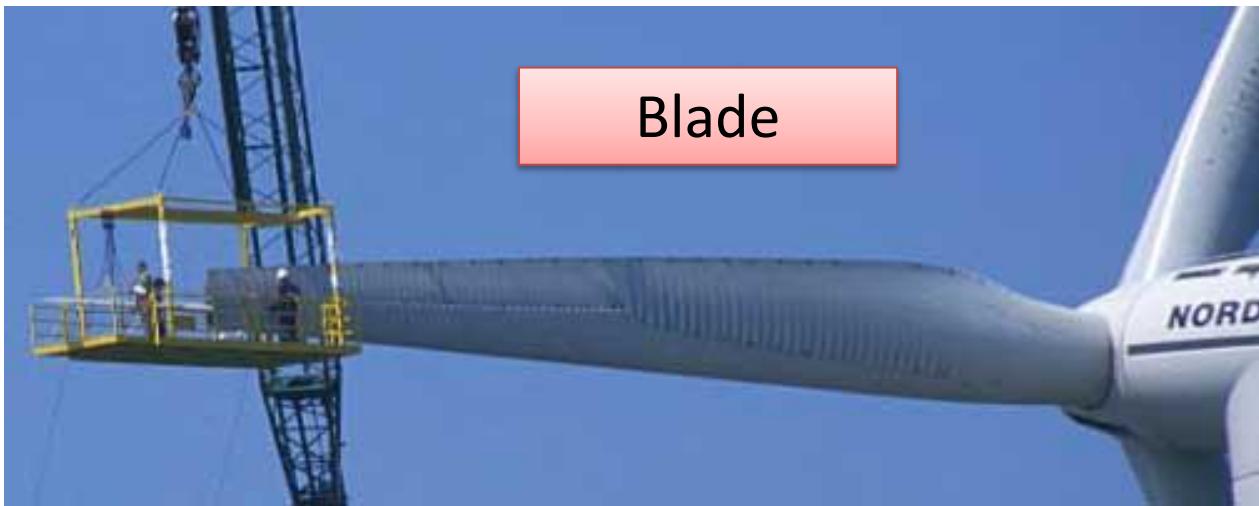


L'installation d'éoliennes de 6-7 MW est un challenge défis à relever:

- **transport, levage,**
- **coût d'investissement relatif,**
- **productivité**

- In 2012 wind turbine Enercon E-126
- Total height: 198 m
- hub height: 132 m
- rotor diameter: 127 m
- swept area: 12,668 m²
- location: Estienne park
- Power: With an output of 6 MW to its design in 2007, it reached 7.58 MW in 2011
- mass approximately 6000 tons

Challenge des grandes turbines (1)



Challenge des grandes turbines (2)



Challenge des grandes turbines (3)



Challenge des grandes turbines (3)

ENERCON E126 – 6 MW

**Mât (éléments béton) : 135 m,
> 250 t**

Rotor : diamètre 126 m, 500 t

Hauteur totale : 198 m

**Fondations : diamètre 30 m,
1300 m³ béton, poids > 3000 t**



Montage réalisé en moins de 10 semaines

Challenge des grandes turbines (3)



Challenge des grandes turbines (3)

Un des modèles le plus utilisé



Principaux Constructeurs

		MW fournis en 2011 <i>MW supplied 2011</i>	MW fournis en 2012* <i>MW supplied 2012*</i>	Chiffre d'affaires 2012 (en millions €) <i>Turnover 2012 (€Million)</i>	Salariés en 2012 <i>Employees in 2012</i>
GE Wind	United States	3 170	> 6 200	n.a.	n.a.
Vestas	Denmark	5 054	6 171	7 200	17 800
Siemens	Germany	2 591	n.a.	5 066	8 200
Enercon	Germany	3 203	4 000	3 500	13 000
Suzlon Group	India	3 116	3 600	2 768	13 000
Sinovel	China	3 700	n.a.	n.a.	5 000
Goldwind	China	3 600	n.a.	n.a.	n.a.
Guodian United Power	China	3 042	n.a.	n.a.	n.a.
Mingyang	China	1 500	n.a.	n.a.	n.a.
Gamesa	Spain	2 802	2 119	2 294**	6 700

*Estimation. Estimate. **Sur 9 mois de l'année 2012. 9 months 2012 only. Source: EuroObserv'ER 2013

L'éolien en Tunisie

Le Site de SIDI DAOUD

Les avantages du site choisi

sont :

- *potentiel éolien important*
- *Vitesse et orientation des vents*
- *Proximité du réseau MT*
- *accès facile*
- *Isolement relatif du site*



Centrale Éolienne de SIDI DAOUD

L'eolien en Tunisie

LA CENTRALE DE SIDI DAOUD:

2000:mise en service de la 1ère étape avec 10,56 MW

2003:mise en service de la 2éme étape avec 8,72 MW

(première extension)

2007: la mise en service de la 3éme étape avec 34,32 MW (deuxième extension)

Ce qui amènerait la puissance installée sur ce site à environ 55 MW en 2007.

L'éolien en Tunisie

COMPOSITION :

A/ Aérogénérateurs :

	<i>Nombre d'AG</i>	<i>Types</i>	<i>Puissance unitaire</i>	<i>Hauteur de la tour</i>	<i>Longueur des pâles</i>
<i>Étape A</i>	32	AE 32	330 Kw	30 m	15.5 m
<i>Extension 1</i>	12	10	AE 46	660 Kw	45 m
		1	AE 52	800 Kw	50 m
		1	AE 61	1320 Kw	60 m
<i>Extension 2</i>	26	AE 61	1320 Kw	60 m	30 m

B/ Un bâtiment d'exploitation:

Le bâtiment d'exploitation comprend :

- La salle électrique (Tableaux MT)
- La salle de commande avec des PC de contrôle commande
- Le magasin
- L'administration



Centrale Éolienne de SIDI DAOUD

L'éolien en Tunisie

C/ Postes de transformation:

1^{ère} Étape: 8 postes

Chaque poste de transformation de la première étape est équipé de :

- Des cellules BT regroupant la production de 4 Aérogénérateurs
- Un transformateur 1600 kVA
- 3 cellules MT

Extension:

Chaque machine de l'extension est équipé de son propre transformateur et de ses cellules BT et MT intégrés dans la Tour.



L'éolien en Tunisie

D/ 4 mats météorologiques:

Quatre stations météorologiques mesurent à différentes altitudes :

- la vitesse des vents
- l'orientation des vents
- La température de l'air
- L'hygrométrie de l'air

Mât 1 et 2 à 20 et 30 m

Mât 3 à 45 et 50 m

Mât 4 à 45 et 60 m



L'éolien en Tunisie



Travaux de génie civil



Montage de la tour et des pales

Centrale Éolienne de SIDI DAOUD

IV- COUT ET FINANCEMENT DU PROJET

1- Coût du Projet

Coût	39 Millions Euro

V- MAINTENANCE DE LA CENTRALE

Pour assurer une bonne disponibilité des équipements, la STEG a signé un contrat de maintenance d'une durée de 3 ans avec MADE-TUNISIE.

Ce contrat, entré en vigueur le 12/04/02, consiste à assurer les maintenances préventives et curatives des équipements de la centrale.

Gains énergétiques et environnementaux de la Centrale de Sidi Daoud

- □ Économie totale en combustible depuis la mise en service 48 000 tep, soit l'équivalent environ 10 Millions DT
- □ Émissions de CO2 évitées de 113 000 tonnes soit l'équivalent des émissions annuelles d'un parc de 25000 voitures

LA PRODUCTION EOLIENNE

Elle dépend essentiellement:

- de la vitesse effective durant l'année (m/s)
- du nombre d'heures de disponibilité du vent (h)

Année	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006 (fin juillet)
Production (GWh)	23,5	24,5	31	38,6	45	44	26

La disponibilité enregistrée depuis la mise en service de la centrale en 2000 est supérieure 95 %.

3- Facteur de Capacité

Le facteur de capacité en % est défini comme suit :

$$\begin{aligned} \text{-Facteur de capacité en \%} &= \frac{\text{Nombre d'heures équivalentes}}{\text{Nombre d'heures du mois}} \\ \text{-Nombre d'heures équivalentes} &= \frac{\text{Production du mois en kWh}}{\text{Puissance nominale}} \end{aligned}$$

Il s'élève à :

en 2001 : 26,39 %

en 2002 : 33,60 %

en 2003 : 28,32 %

*en 2004 : 27,89 % pour l'étape A
25,06 % pour l'extension*

VI- EXPLOITATION DE LA CENTRALE

L'exploitation de la Centrale est assurée par la STEG.

Les Agents de la centrale ont suivi des formations sur l'exploitation des machines sur site et chez le Constructeur dans le cadre du marché.

VII- RESULTATS D'EXPLOITATION

1- Énergie

- ❑ **La capacité totale éolienne installée par la STEG en 2009 est l'ordre de 245 MW**
- ❑ **Les économies gagnées en 2009 seraient de l'ordre de 134 000 tep de combustible**
- ❑ **Les émissions évitées seraient des d'environ 330 000 tonnes de CO₂**

L'éolien en Tunisie

Le Site de Bizerte

*Les avantages du site choisi
sont :*

- *potentiel éolien important*
- *Vitesse et orientation des vents*
- *Proximité du réseau MT*
- *accès facile*
- *Isolement relatif du site*



L'eolien en Tunisie

Capacité : 190 MW

Metline: 95 MW

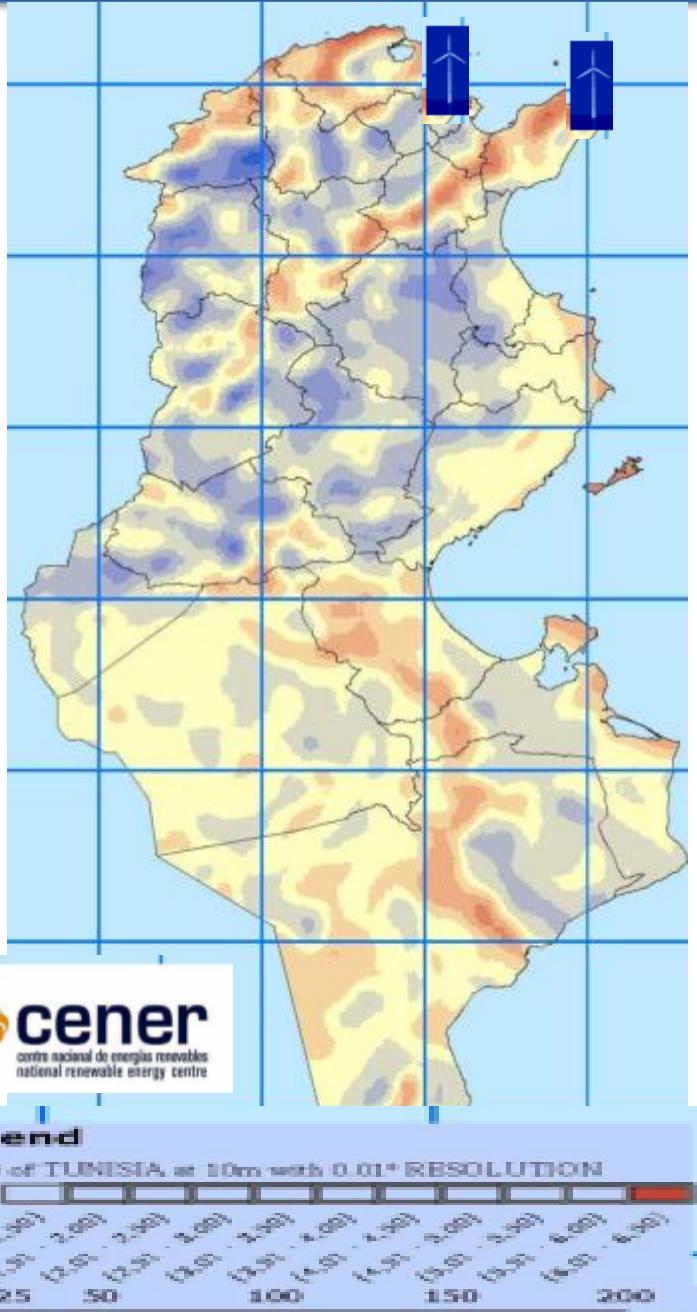
Kchabta: 95 MW

Répartie sur 4 délégations EL ALYA, Ras jebel, Menzel bourguiba et Utique

A/ Aérogénérateurs :

	<i>Nombre d'AG</i>	<i>Types</i>	<i>Puissance unitaire</i>	<i>Hauteur de la tour</i>	<i>Longueur des pâles</i>	<i>Date</i>	<i>Puissance totale</i>
<i>Étape 1</i>	91	<i>AE 61</i>	<i>1320 Kw</i>	<i>60 m</i>	<i>30 m</i>	<i>2009-2012</i>	<i>120 MW</i>
<i>Étape 2</i>	52	<i>AE 61</i>	<i>1320 Kw</i>	<i>60 m</i>	<i>30 m</i>	<i>2012-2014</i>	<i>70 MW</i>

Expérience Tunisiennes



Centrale éolienne Sidi Daoud

✓ Disponibilité centrale: env. 93%

✓ Facteur de charge*: env. 25 %

✓ Temps de retour sur investissement: 5 ans

Centrale Sidi Daoud : 54 MW

Centrale Kechabta et Metline : 190 MW

(Partie mise en service Novembre 2013 : 146 MW)

- Génératrices à vitesse fixe
- première génération
- Sans GCR

L'eolien en Tunisie

Aérogénérateurs :

Données générales

- Constructeur : [Made](#) (Espagne)
- Nom de l'aérogénérateur : AE-61
- Puissance nominale : 1 320 kW
- Diamètre de rotor : 61 m
- Ancien modèle, non disponible à la vente
- Classe de vent : IEC Ia
- Non compatible offshore
- Surface balayée : 2 923 m²
- Densité de puissance : 2.22 m²/kW
- Nombre de pales : 3
- Limitation de puissance : Pitch

Rotor

- Vitesse minimale de rotation : 13 tours/minute
- Vitesse maximale de rotation : 18,8 tours/minute
- Vitesse minimale de vent : 3,5 m/s
- Vitesse nominale de vent : 17 m/s
- Vitesse maximale de vent : 25 m/s
- Fabricant : LM Glasfiber

Masses

- Nacelle : 49 tonnes
- Mât : 89,5 tonnes
- Rotor + hub : 23 tonnes
- Total : 161,5 tonnes

Boîte de vitesse

- Boîte de vitesse : oui
- Nombre de rapports : 3
- Ratio : 1:81
- Fabricant : Flender

Génératrice

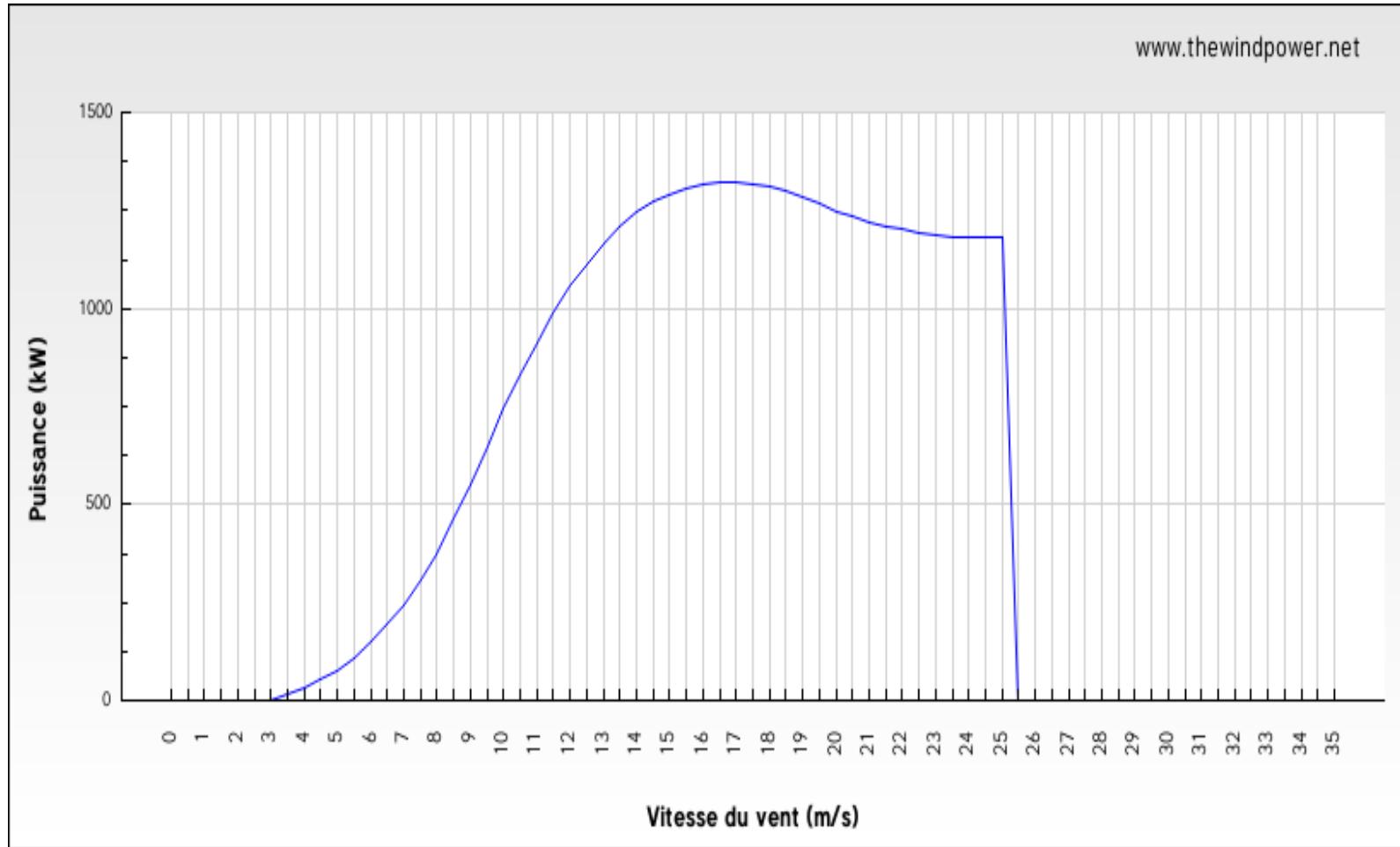
- Type : ASYNC
- Nombre : 1
- Vitesse maximale : 1520 tours/minute
- Tension de sortie : 690 V
- Fabricant : Siemens

Mat

- Hauteur : 58,5 m

L'eolien en Tunisie

Courbe de puissance



L'éolien avantages et inconvénients

Sa perception par la population

Energie renouvelable favorite du public

Parfaite harmonie avec les communautés locales / propriétaires financiers

Crée des emplois (enfin c'est ce que l'on dit)

Politique de rachat, aides de l'état, collectivités, prix fixe (enfin presque....)

Dévalorisation immobilière, des sites, nuisance sonore (55dB), visuelle (impact visuel), lumineuse

Perturbation des transmission télévisuelles, brouillage, endommagement des récepteurs

Danger sanitaire, danger d'explosion des pâles, chute de glace, migration des oiseaux...

Sa pollution et l'énergie produite

Energie verte, propre, renouvelable, inépuisable (indépendance énergétique)

Remplace les combustibles fossiles en voie d'épuisement

Limite les émissions de gaz à effet de serre et leur impact sur l'environnement ~20%

Taux à vie d'émissions faibles (0t-9t de CO₂ contre 900t-1100t de CO₂ pour le charbon)

Peu de déchets toxiques

Production de CO₂ tout de même (fabrication alternateur, rejets toxiques lors de la construction)

Production infime comparée à une centrale nucléaire.

Ne suffit pas à elle seule, doit être couplée à d'autres sources d'énergie

L'éolien avantages et inconvénients

Sa construction

Déplacement lent du vent (pas d'arrêt total), risques faibles

Fabrication peut être délocalisée

Modulaire, rapide à installer, et recyclable (même si le démantèlement coûte cher)

Ne tourne que s'il y a du vent et régulièrement, production électrique ~30% du temps

Dépendante de la météo (produit plus quand il fait froid), dépend de la nature du sol

Environnement salin pour les installations Offshore

Nécessite une superficie importante (publique ou privée), encombrement spatial

Vent irrégulier : stockage (~7t de batteries pour une maison), nécessite une régulation

Son coût

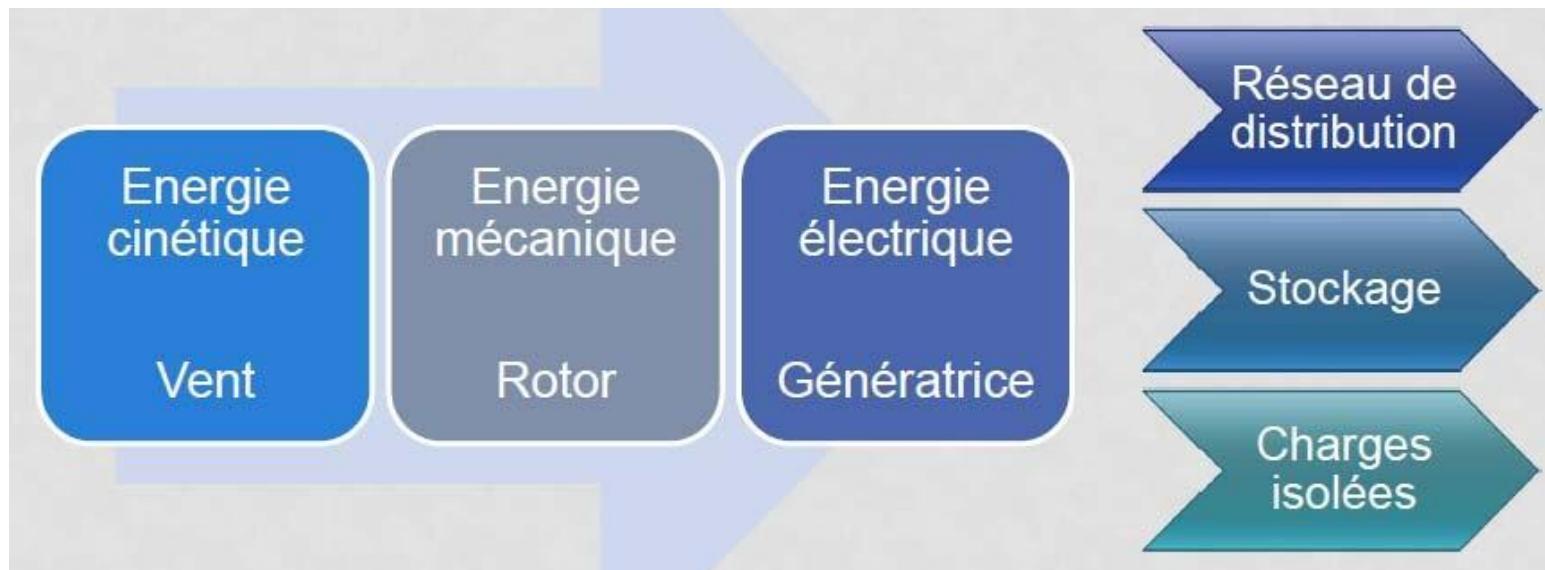
Cout de production en baisse, la moins chère normalement, coût d'installation peu élevé

Association éolien/hydraulique et éolien/gaz compatibles éolien/photovoltaïque

Économie d'énergie ~-20%, représente ~20% de la production d'énergie en Europe (23% pour la France)

Chapitre 2:

Principe, structure, conversion Ecinétique en Eélectrique



Principe

Eolienne à axe vertical



Type Savonius



Type Darrieus



Type Darrieus

Eolienne à axe horizontal



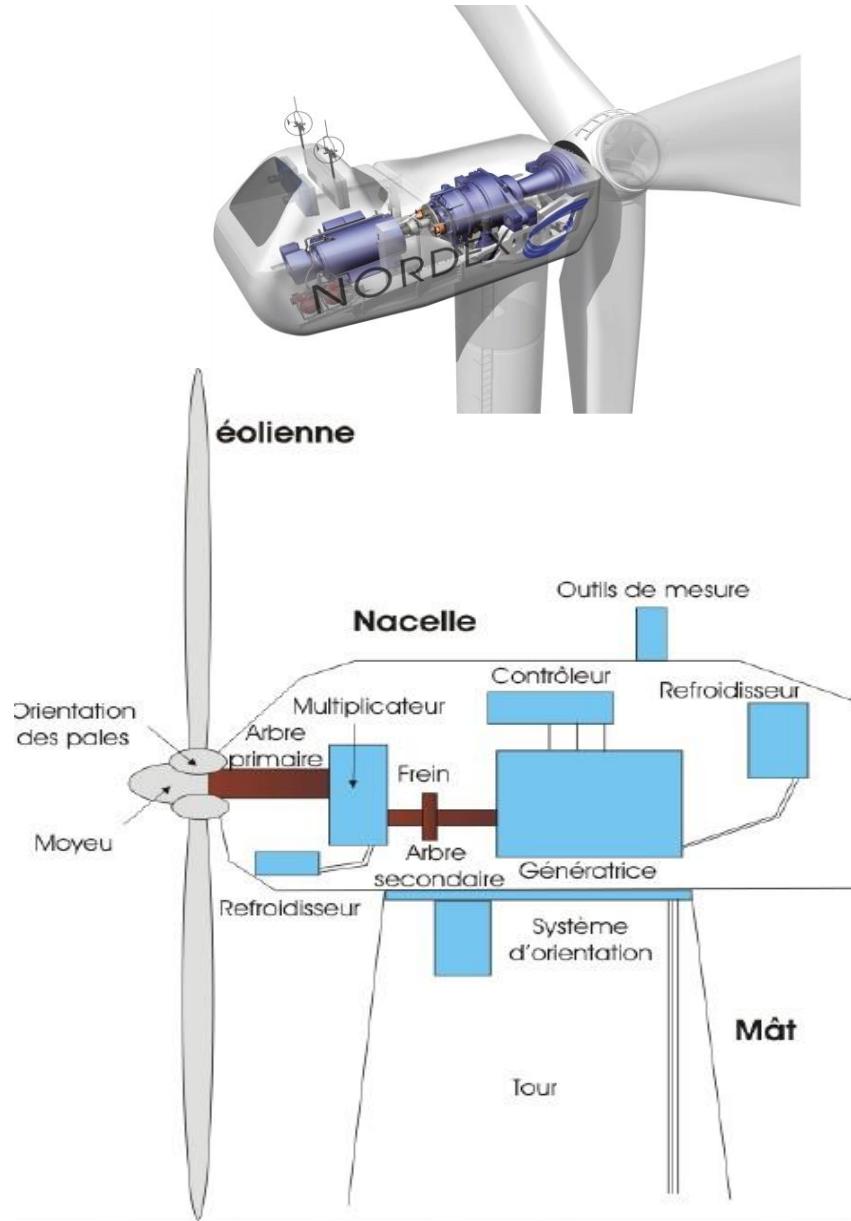
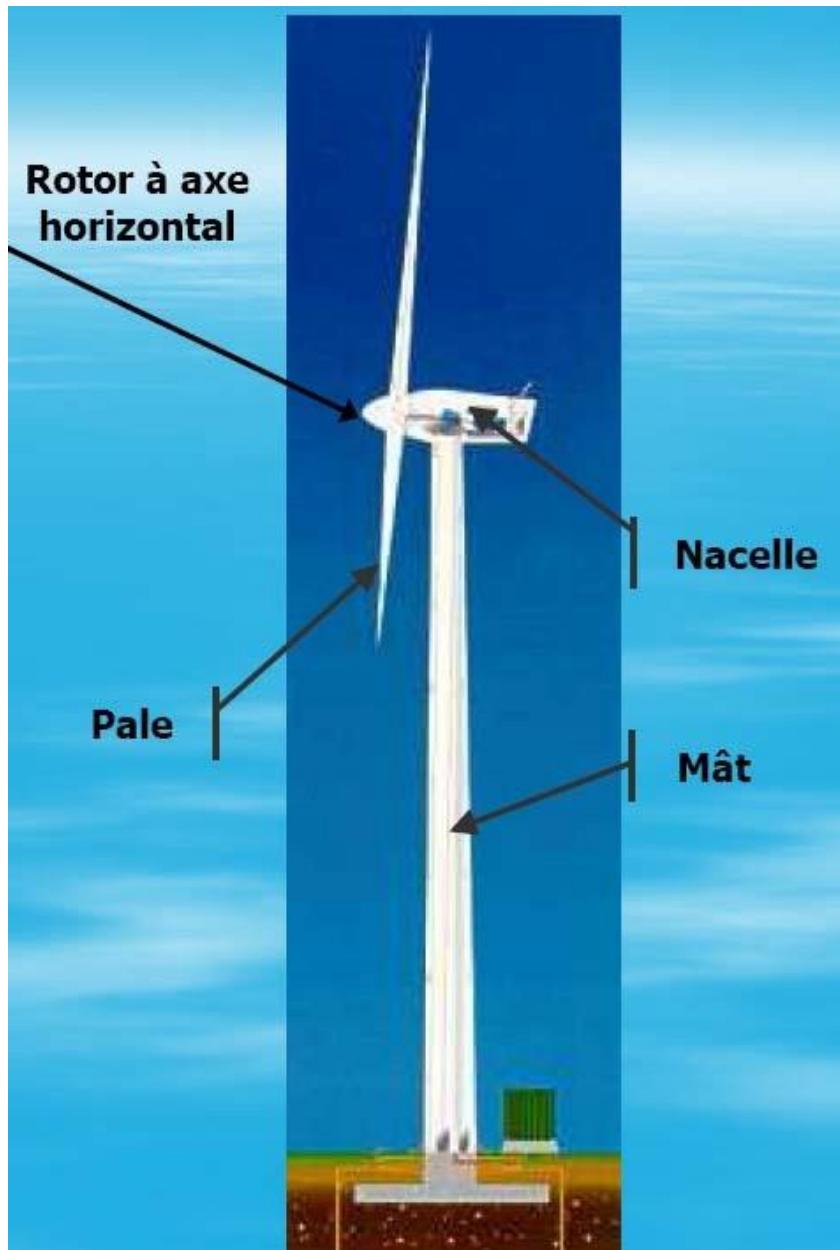
Avantages et inconvénients

- Générateur au sol
- Structure / construction simplifiée
- Peu bruyantes, plus petites et esthétiques
- Résistance forte aux variations climatiques
- Démarrage à faible vitesse (Savonius)
- Rendement faible
- Masse non négligeable

Avantages et inconvénients

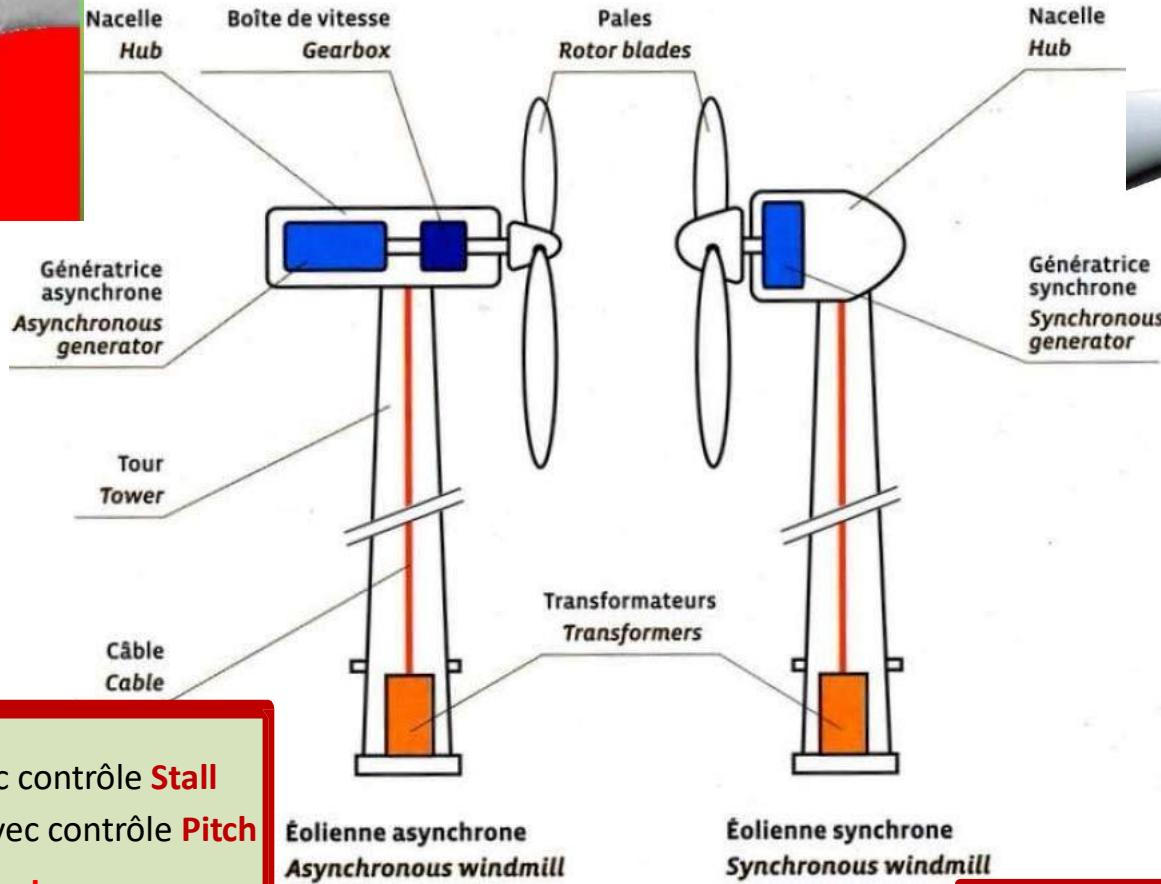
- Stabilité de la structure
- Bon rendement
- Bruyantes, peu esthétiques

Principe



Aspects Techniques: Types d'éoliennes

Pour commencer : 2 grands principes



Pâles à pas fixe avec contrôle **Stall**
Pâles à pas variable avec contrôle **Pitch**

Machine asynchrone

Vitesse rotation élevée

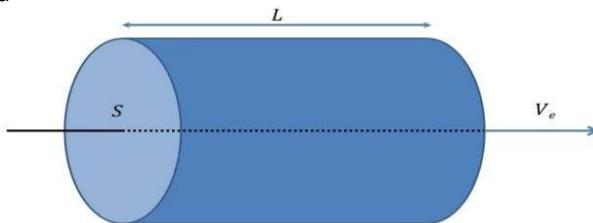
Multiplicateur mécanique

Pâles à pas variable avec contrôle **Pitch**
Machine synchrone
Rotor à vitesse variable (faible)
Suppression multiplicateur
Maintenance et bruit diminués
Rendement mécanique augmenté

Aspects Théorique: énergie cinétique

Calcul de la puissance cinétique disponible

- 1) En considérant une masse d'air m_a se déplaçant à la vitesse V_e à travers la surface S balayée par l'éolienne, l'expression de l'énergie cinétique de l'air E_c en fonction de la vitesse du vent V_e (m/s) et de cette masse m_a .



$$E_c = \frac{1}{2} m_a V_e^2$$

- 2) En fonction de la masse volumique ρ de l'air, de la surface balayée S et de la vitesse du vent V_e , la quantité de masse Δm_a traversant la section S pendant un temps Δt .

$$\Delta m_a = \rho \cdot S \cdot V_e \cdot \Delta t$$

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_e^3 \cdot \Delta t$$

- 3) A partir de cette énergie cinétique, la puissance soumise à l'éolienne P_{dispo} , c'est-à-dire la puissance théoriquement disponible avant conversion est donnée par:

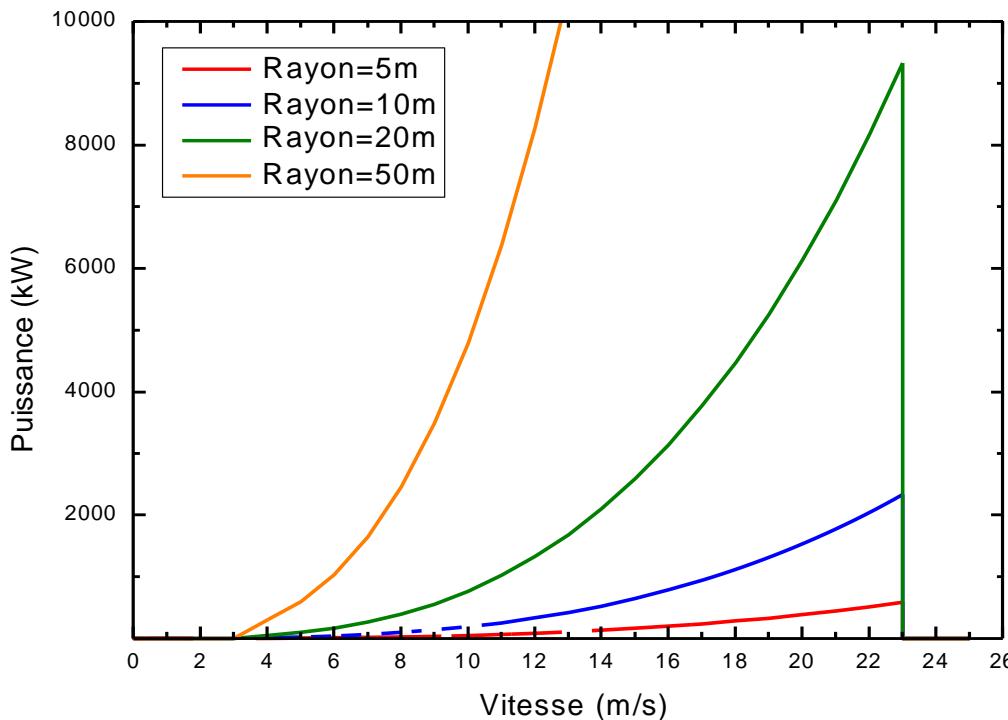
$$P_{dispo} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_e^3$$

Aspects Théorique: énergie cinétique

Calcul de la puissance cinétique disponible

$$P_{dispo} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_e^3$$

La puissance dépend donc **de la vitesse, de la surface des pales** (qui doivent être face au vent) mais aussi d'autres paramètres structuraux qui soulignent l'importance portée à la qualité de la conception de l'éolienne, notamment son rotor (orientable).



Procédure:

- Mesure de la vitesse des vents entre 6 mois et 1 an
- Mesure à 10m ou 50m du sol (minimal requis 6m/s)
- Calcul de la vitesse moyenne des vents
- Tracé de la Rose des vents locale (analyse des vents)
- Modélisation du gisement (distribution de Weibull)

Anémomètre girouette-hélice



Mesure dans plan cardinal
Influencée par
changement
rapide de direction

Anémomètre girouette-ultrason



Mesure rapide (>20hz)
Adaptée aux vents
perturbés
Mesure 2D / 3D
Mesure perturbée par pluie

Anémomètre girouette-coupelles



Souple et robuste
Mesure dans plan
cardinal
Girouette séparée

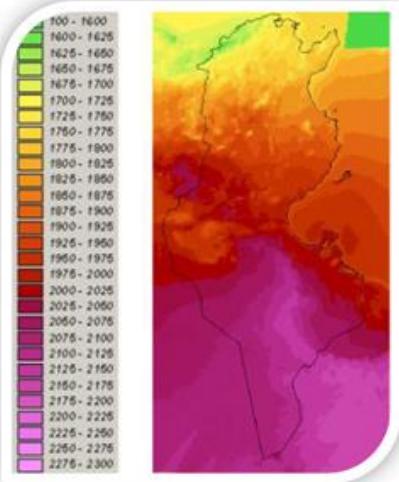
Etape 1: je mesure la vitesse du vent

4,5m/s	16,2km/h	bien que cela varie en fonction du type d'éoliennes, il faut un minimum de vent pour qu'elle se mette à tourner, c'est la vitesse d'amorçage
6m/s	21,6km/h	voilà une vitesse moyenne des vents qui vous permet d'exploiter sérieusement une éolienne pour produire de l'énergie, si, au site où vous projetez installer une éolienne, votre moyenne annuelle est plus basse , il n'est pas sûr du tout que ce soit une opération rentable
8m/s	30km/h	les choses sérieusement commencent! C'est un seuil idéal pour installer une éolienne
15m/s	55km/h	un bon vent pour votre éolienne, elle est en pleine production, le propriétaire d'un parc éolien voudrait des vents comme ceux-là tous les jours!
25m/s	90km/h	votre petite éolienne doit être arrêtée , cela va trop vite pour sa frêle constitution! Sa grande sœur fonctionne bien, mais déjà les contrôles automatiques réduisent sa capacité,
30m/s	115km/h	toutes les éoliennes sont arrêtées, les autres risquent des dommages considérables: perte de pales , rupture de la tour

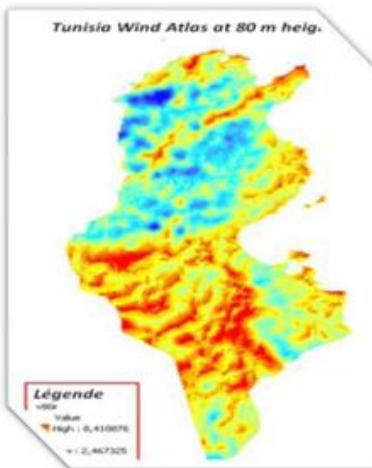
Etape 1: je mesure la vitesse du vent (ici 80m)

Potentiel des Energies Renouvelables en Tunisie

Gisement solaire



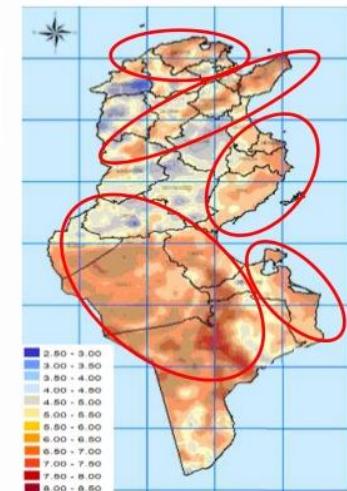
Gisement éolien



POTENTIEL EOLIEN

Gisement éolien important

Vitesse > 6m/s



Production d'électricité: 900 GW

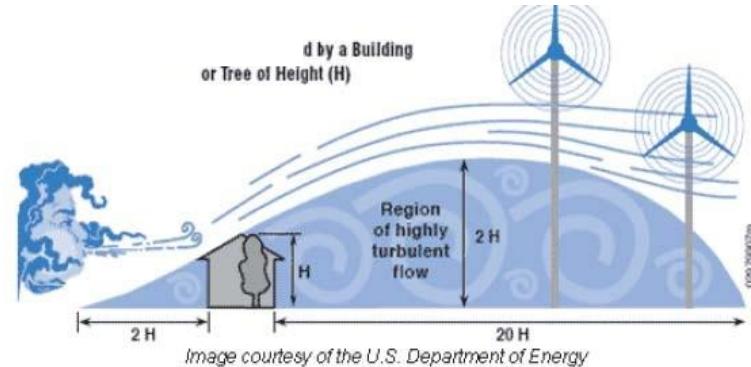
Production d'électricité: 8 000 MW

Aspects Théorique: calcul du gisement

Mais voilà: la puissance disponible dépend de la hauteur

$$P_{dispo} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_e^3 \quad \rightarrow \quad \frac{V_e}{V_o} = \left(\frac{h}{h_o} \right)^\alpha$$

V_e vitesse du vent à la hauteur h du rotor
 h_o hauteur de référence pour la vitesse mesurée V_o
 V_o vitesse du vent à la hauteur h_o
 α le coefficient de gradient vertical de la vitesse du vent



Type de paysage	Rugosité (α)
Surface d'eau	0,0002
Terrain agricole dégagé, sans clôtures ou haies vives, et avec très peu de constructions. Seulement des collines doucement arrondies	0,03
Terrain agricole avec des constructions, arbisseaux et plantes, ou des haies vives de 8 m de haut situées à environ 250 m les unes des autres	0,2
Villages, petites villes, terrain agricole avec de nombreuses constructions ou de hautes haies vives, des forêts et un terrain très accidenté	0,4
Grandes villes avec de hauts immeubles	0,8

Aspects Théorique: calcul du gisement

Etape 1: je mesure la vitesse du vent

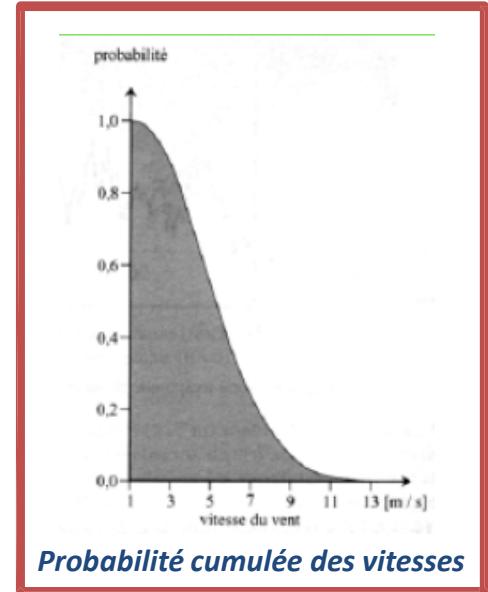
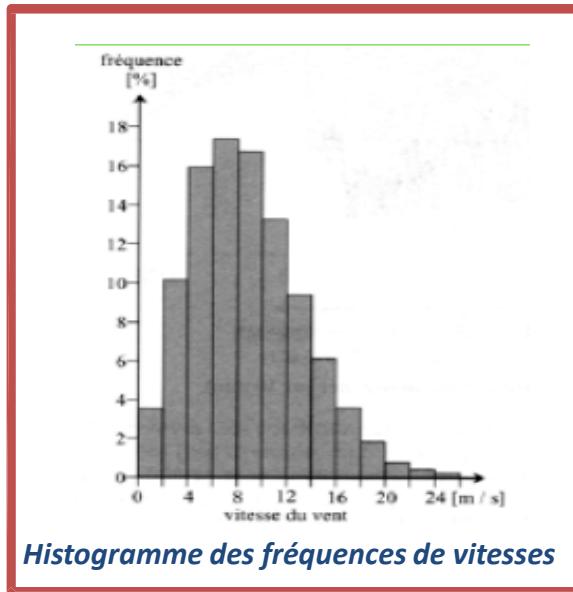
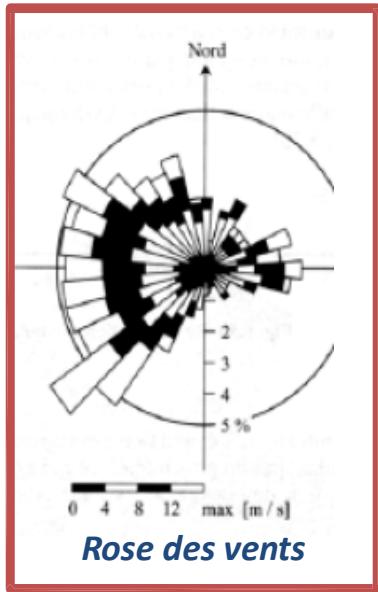
Vitesse à 10 m d'hauteur			Echelle de Beaufort	Nature du vent
m/s	km/h	nœud		
0 à 0,4	0 à 1,4	0 à 0,9	0	calme
0,4 à 1,8	1,4 à 6,5	0,9 à 3,5	1	
1,8 à 3,6	6,5 à 13	3,5 à 7	2	léger
3,6 à 5,8	13 à 21	7 à 11	3	
5,8 à 8,5	21 à 31	11 à 17	4	modéré
8,5 à 11	31 à 40	17 à 22	5	frais
11 à 14	40 à 50	22 à 28	6	fort
14 à 17	50 à 61	28 à 34	7	
17 à 21	61 à 76	34 à 41	8	tempête
21 à 25	76 à 90	41 à 48	9	
25 à 29	90 à 104	48 à 56	10	tourmente
29 à 34	104 à 122	56 à 65	11	
> 34	> 122	> 65	12	ouragan

Aspects Théorique: calcul du gisement

Etape 2: j'analyse la répartition du vent de mon site

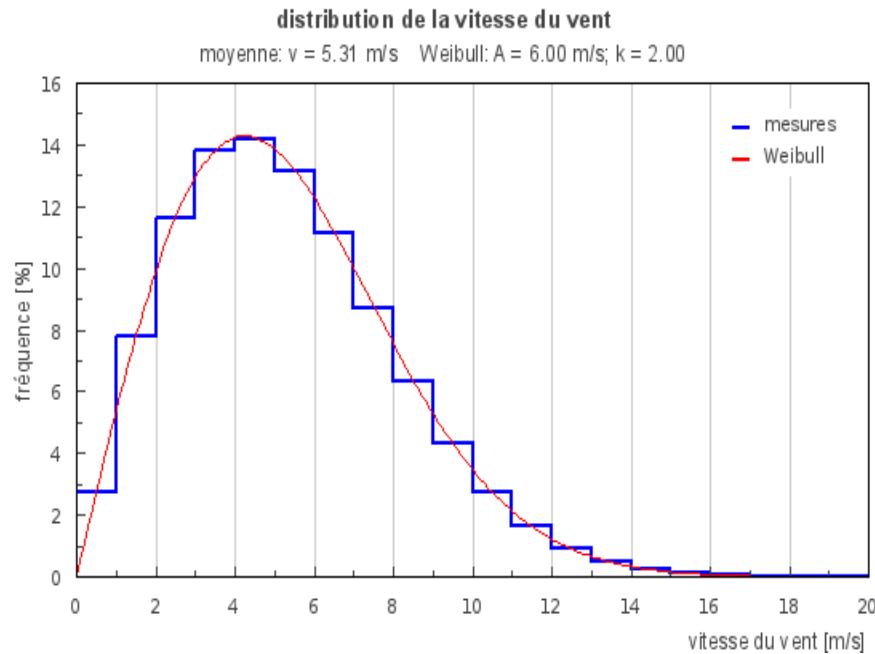
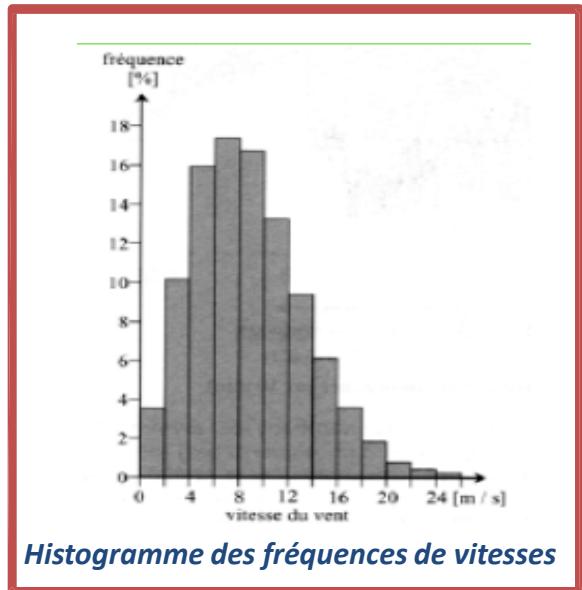
Vitesse (m/s)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Nord	0.4	1.4	2.4	2.8	2.3	1.5	0.9	0.5	0.2	0.2	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	
NE	0.3	0.8	1.3	1.2	0.8	0.5	0.3	0.2	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05			
Est	0.3	1.0	1.2	1.0	0.9	0.7	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	
SE	0.2	0.9	1.2	1.5	1.9	1.8	1.5	1.1	0.8	0.3	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	
Sud	0.3	1.3	2.0	2.5	3.0	2.4	1.9	1.2	0.8	0.4	0.2	0.1	0.05	0.05	0.05	
SO	0.4	1.6	2.5	2.9	2.9	2.6	2.0	1.5	0.8	0.4	0.2	0.05	0.05			

Fréquences des vitesses suivant les directions



Aspects Théorique: calcul du gisement

Etape 3: je modélise le gisement du site (probabilité)



On lisse par une fonction qui représente la densité de probabilité de mesurer une vitesse V

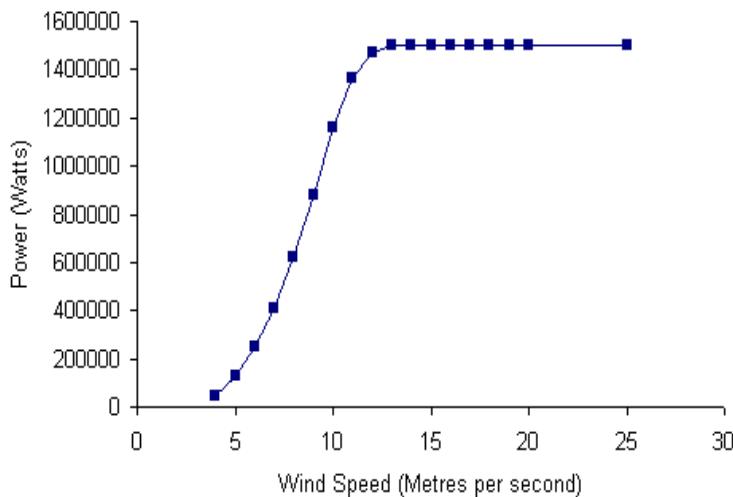
Fonction de Weibull $f(v)$

$$f(v) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{v}{\lambda} \right)^{k-1} \exp \left(\left(\frac{-v}{\lambda} \right)^k \right)$$

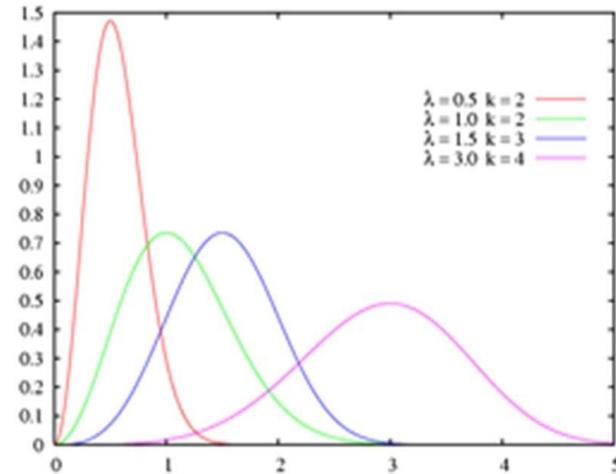
- λ le facteur d'échelle (m/s) généralement supérieur à V_{moy}
- k le facteur de forme généralement entre 1 et 3
- k=2 correspond à ce que l'on appelle la courbe de Rayleigh

Aspects Théorique: calcul du gisement

Etape 4: j'en déduis le potentiel énergétique



Puissance de l'aérogénérateur $P(v)$



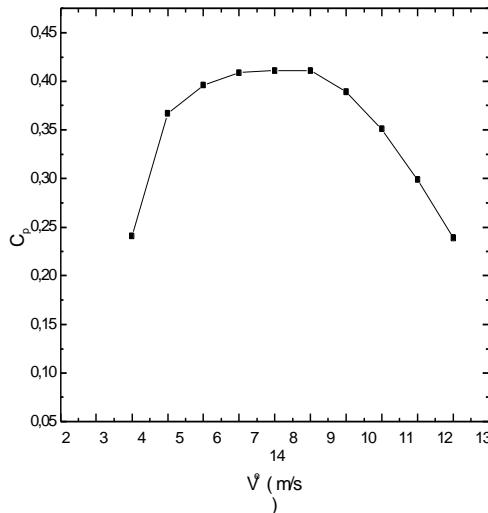
Distribution de Weibull $f(v)$

La combinaison des deux courbes permet d'évaluer le potentiel énergétique W du site

$$E_w(Wh) = 8760 \cdot \int_0^{\infty} P(v) \cdot f(v) \cdot dv$$

Aspects pratique: Validation d'un site

*L'Energie mécanique récupérée
Cas concret d'une éolienne Nordex S77 de 1500kW*



Diamètre du rotor : 77m avec 3 pâles

Vitesse de rotation du rotor : 9.6 à 17.3 tr/min

Puissance nominale : 1500kW (pour un vent de 13m/s)

Vent de démarrage : 3m/s

Poids : 34000kg (sans la tour)

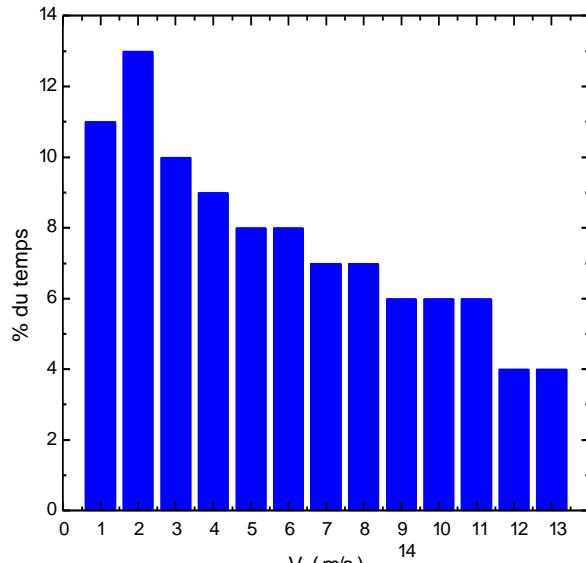
Hauteur de la tour : 80m

Vitesse du Vent (m/s)	4	5	6	7	8
Puissance P _{recup} (kW)	44.9	133.5	248.9	408.2	612.4

Vitesse du Vent (m/s)	9	10	11	12	13
Puissance P _{recup} (kW)	871.9	1132.1	1359.6	1503.8	1528.2

Aspects pratique: Validation d'un site

L'Energie mécanique récupérée Cas concret d'une éolienne Nordex S77 de 1500kW



Relevé du vent à
Pierrelatte.

Vitesse du Vent (m/s)	4	5	6	7	8
Puissance P _{recup} (kW)	44.9	133.5	248.9	408.2	612.4
% du temps	9	8	8	7	7
Temps/an (h)	788	701	701	613	613
Energie E _{recup} (MW.h)	35.38	93.58	174.48	251.86	375.40

Vitesse du Vent (m/s)	9	10	11	12	13
Puissance P _{recup} (kW)	871.9	1132.1	1359.6	1503.8	1528.2
% du temps	6	6	6	4	4
Temps/an (h)	525	525	525	350	350
Energie E _{recup} (MW.h)	457.75	594.35	713.79	526.33	534.87

E_{recup_max} que pourrait récupérer l'éolienne: $E_{recup_max} = P_{recup_max} \cdot 8760h = 13385MW.h$

E_{tot_reelle} récupérée sur une année par l'éolienne $E_{max} = \sum Energies = 3758MW.h$

:

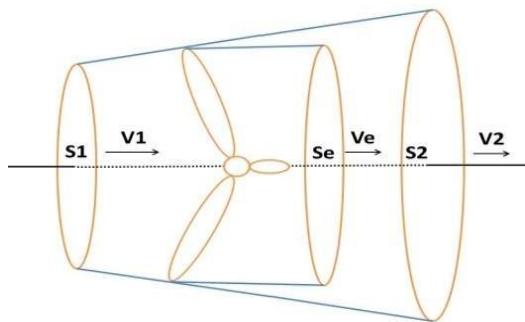


soit **28%** du maximum récupérable,
1 année produit autant qu'une centrale nucléaire 1200MW en
3h

Aspects Théorique: performance d'une éolienne

la puissance a une limite, celle de Betz!!!

Si l'on suppose que l'air est incompressible, ce qui permet d'écrire la conservation du débit volumique $S_1 V_1 = S_2 V_2 = S_e V_e$, **le théorème d'Euler**, qui traite de la variation de la quantité de mouvement de la veine de vent entre l'amont (S_1, V_1) et l'aval (S_2, V_2) de l'hélice, permet d'écrire la force \mathbf{F} s'exerçant sur les pales de l'aéromoteur sous la forme :



$$F = \rho \cdot S \cdot V_e (V_1 - V_2) P_{disponible1} = F \cdot V_e$$

$$P_{dispo1} = \rho \cdot S \cdot V_e^2 (V_1 - V_2)$$

le théorème de betz

$$\Delta E_e = \frac{1}{2} m_a (V_1^2 - V_2^2)$$

$$P_{dispo2} = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_e \cdot (V_1^2 - V_2^2)$$

Aspects Théorique: performance d'une éolienne

En déduire des deux expressions P_{dispo1} et P_{dispo2} la relation reliant les trois vitesses V_e , V_1 et V_2 .

$$P_{dispo1} = P_{dispo2} \Rightarrow V_e = \frac{(V_1 + V_2)}{2}$$

En déduire expression de la puissance disponible P_{dispo} en fonction de ρ , S , V_1 et V_2 .

$$P_{dispo} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2)^2 \cdot (V_1 - V_2)$$

$$\frac{dP_{dispo}}{dV_2} = 0 \Rightarrow V_1 = 3V_2$$

$$P_{dispo_max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_1^3$$

En déduire la valeur maximum du coefficient de puissance C_{pmax} .

Au maximum, 59% de la puissance reçue sera disponible

Aspects Théorique: performance d'une éolienne

Mais voilà: la puissance disponible dépend du facteur de puissance C_p de la machine

$$P_{dispo} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_e^3$$

Puissance en entrée
de l'aérogénérateur



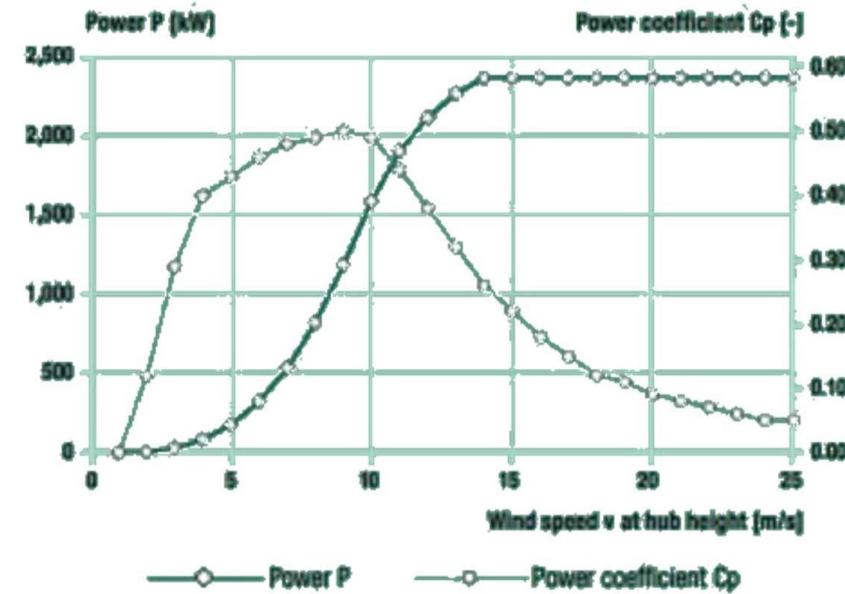
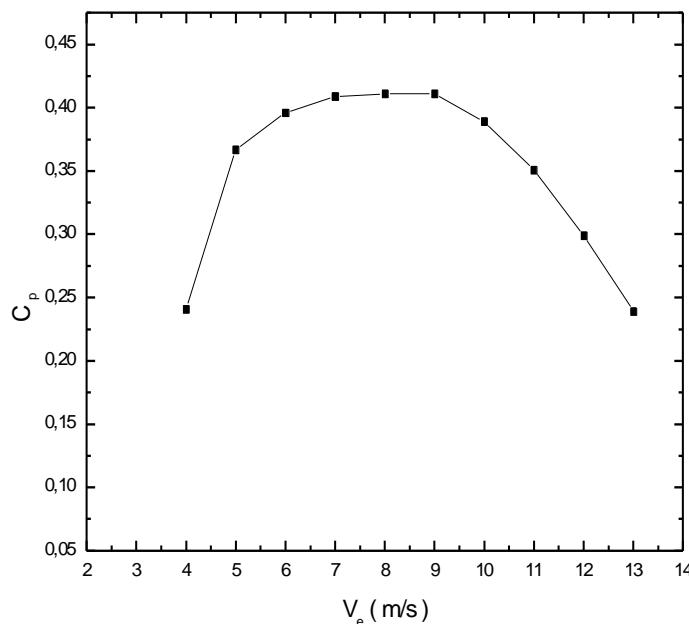
$$C_p$$

Coefficient de performance
(0.4 pour les éoliennes actuelles)



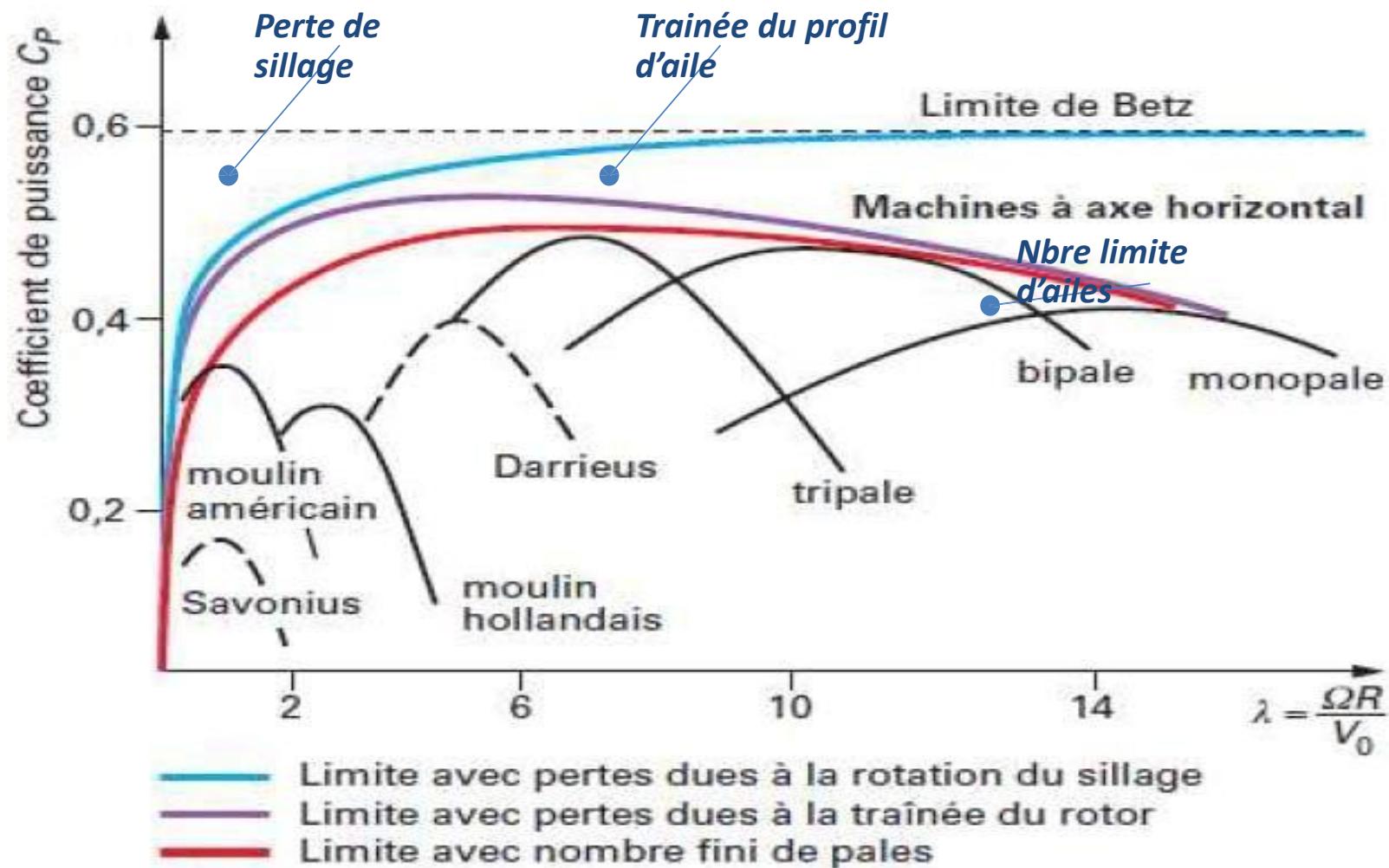
$$P_{méc} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_p \cdot S \cdot V_e^3$$

Puissance mécanique
récupérée de l'éolienne

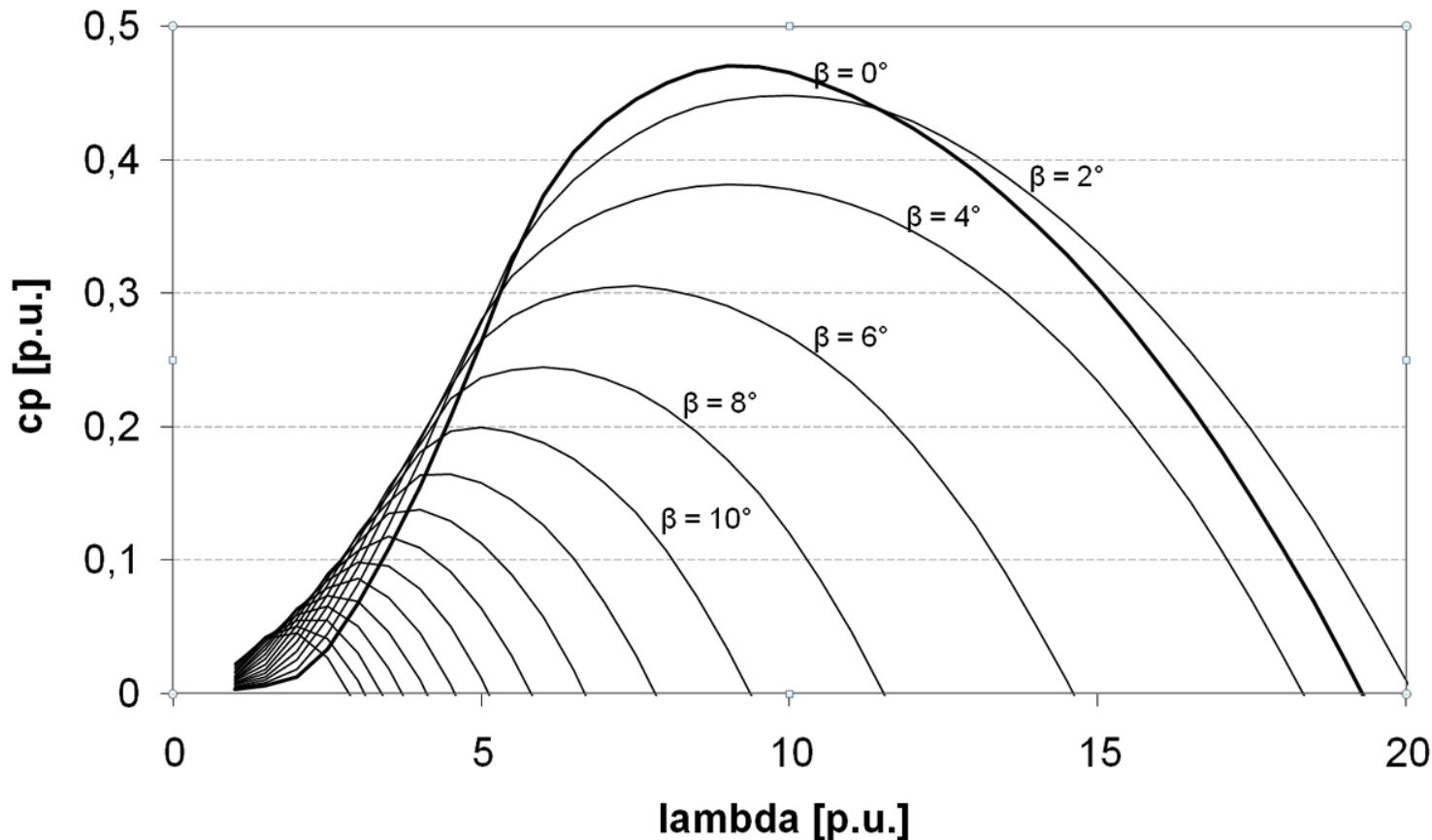


Aspects Théorique: performance d'une éolienne

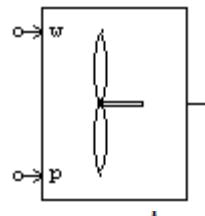
Mais voilà: la puissance disponible dépend du facteur de puissance C_p de la machine



Aspects Théorique: performance d'une éolienne



Wind Turbine in PSIM



$$P = \frac{1}{2} \cdot A \cdot v_{wind}^3 \cdot \rho \cdot C_p$$

where A is the area of the rotor blade, v_{wind} is the wind speed, ρ is the air density, and C_p is the power coefficient. The power coefficient C_p is a function of the tip speed ratio λ and the blade pitch angle β . It can be expressed as [Heier¹]:

$$C_p = c_1 \cdot (c_2 - c_3\beta - c_4\beta^x - c_5) \cdot e^{-c_6} + c_7$$

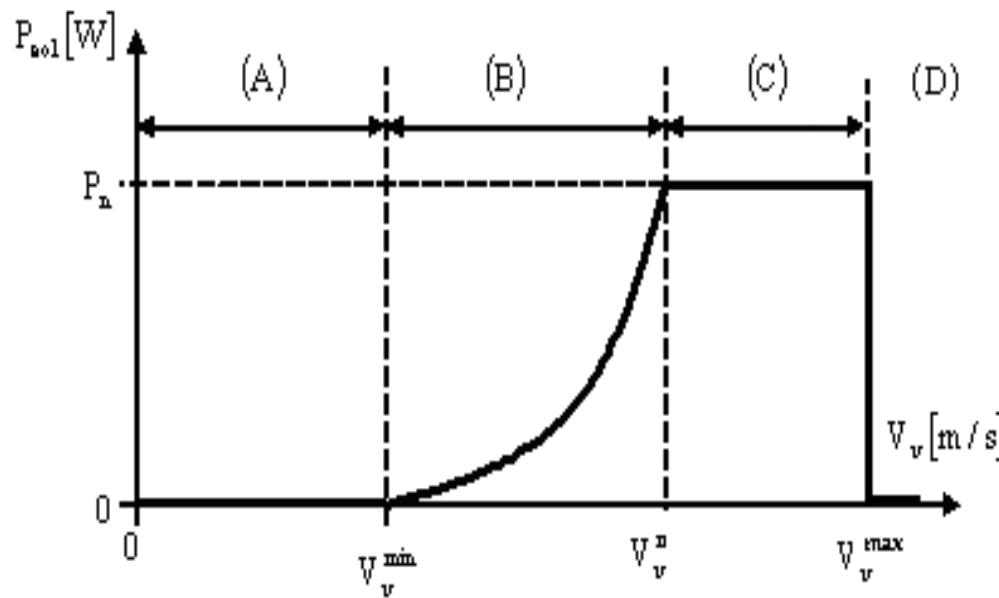
where $c_1 = 0.5$, $c_2 = 116 * \lambda'$, $c_3 = 0.4$, $c_4 = 0$, $c_5 = 5$, $c_6 = 21 * \lambda'$, $c_7 = 0.01 * \lambda$, and

$$\lambda' = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

The relationship between the power coefficient C_p and the tip speed ratio λ and the blade pitch angle β can be plotted in the figure below.

¹. S. Heier and R. Waddington, *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, Wiley, 2006

Aspects Théorique: performance d'une éolienne



Partie (A) : aucune puissance n'est délivrée pour des vitesses du vent inférieures à la vitesse du démarrage V_v^{min} .

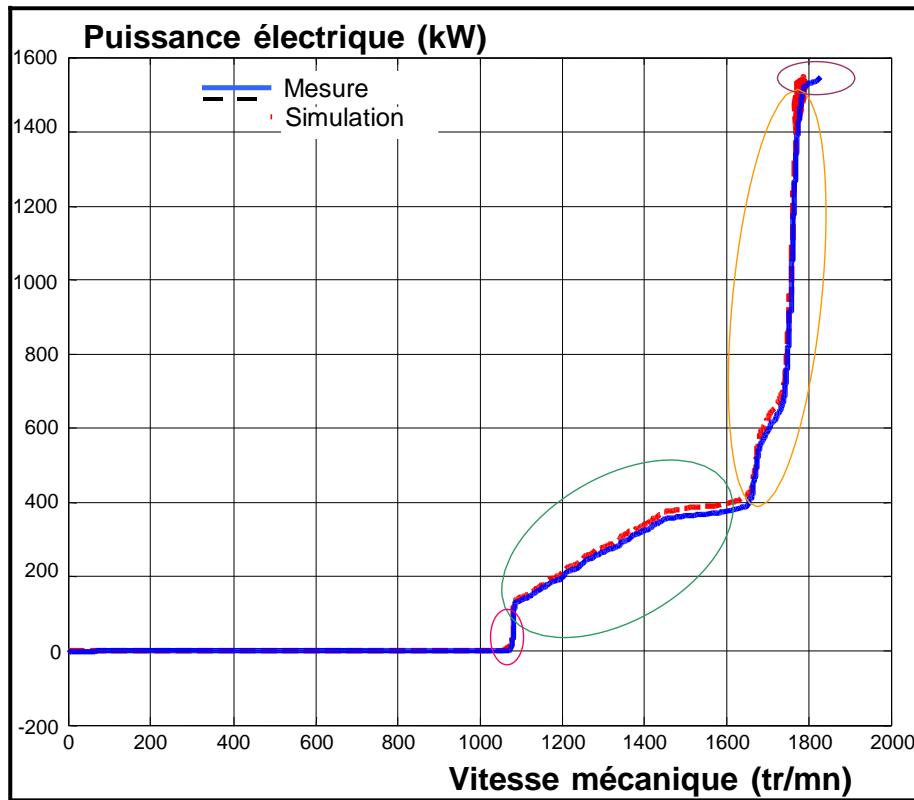
Partie (B) on extrait alors de la puissance maximale de la turbine (MPPT) celle ci évolue alors selon le cube de la vitesse du vent.

Partie (C) la puissance nominale P_n est atteinte, elle doit être limitée par la régulation mécanique (stall ou Pitch).

Partie (D) au delà d'une certaine limite de vitesse du vent $V_{v\text{max}}$ la turbine doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

Aspects Pratique: performance d'une éolienne

Caractéristique Puissance/ vitesse d'une éolienne
à base de génératrice asynchrone à double alimentation



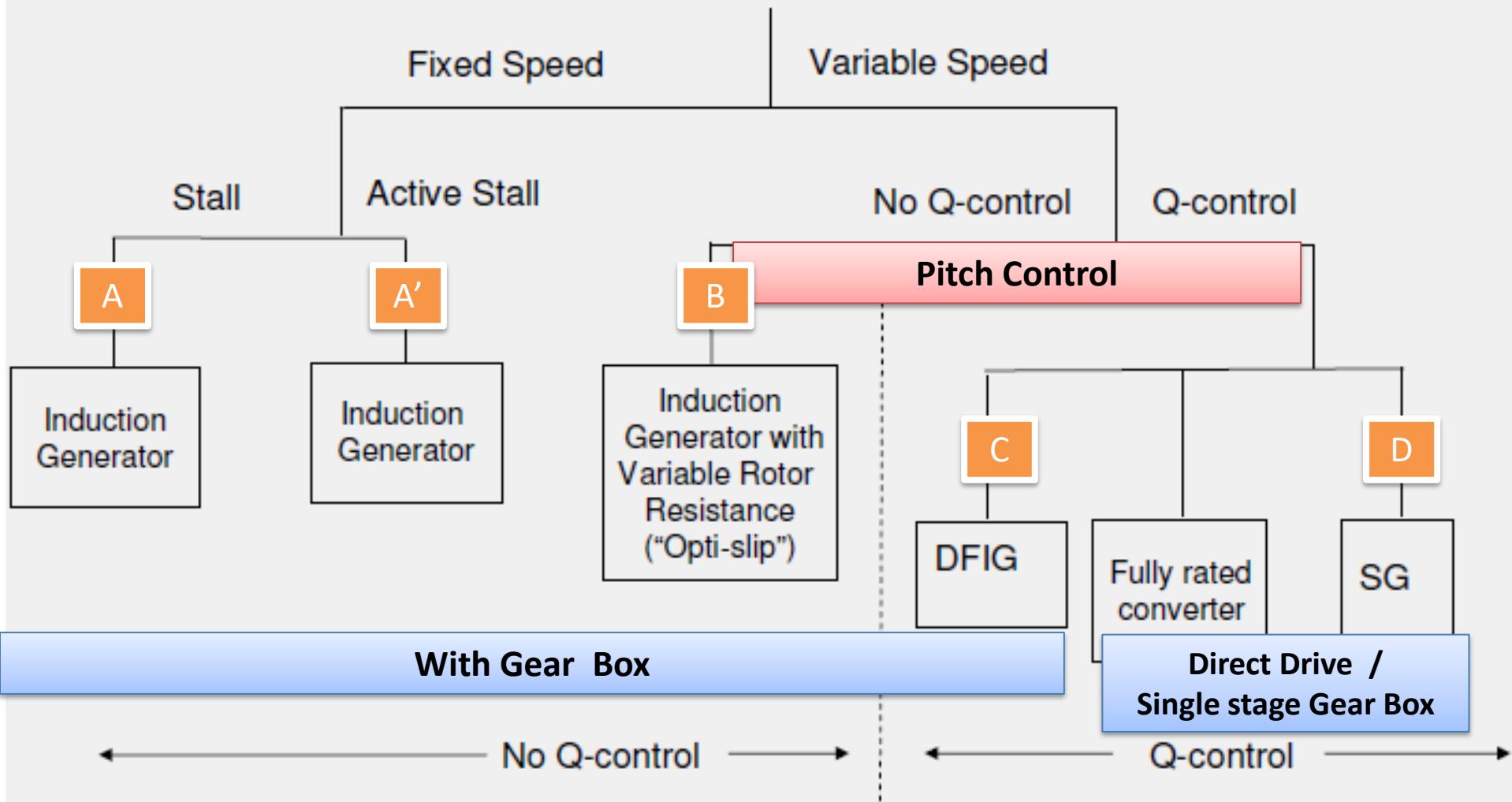
Puissance constante

Vitesse constante

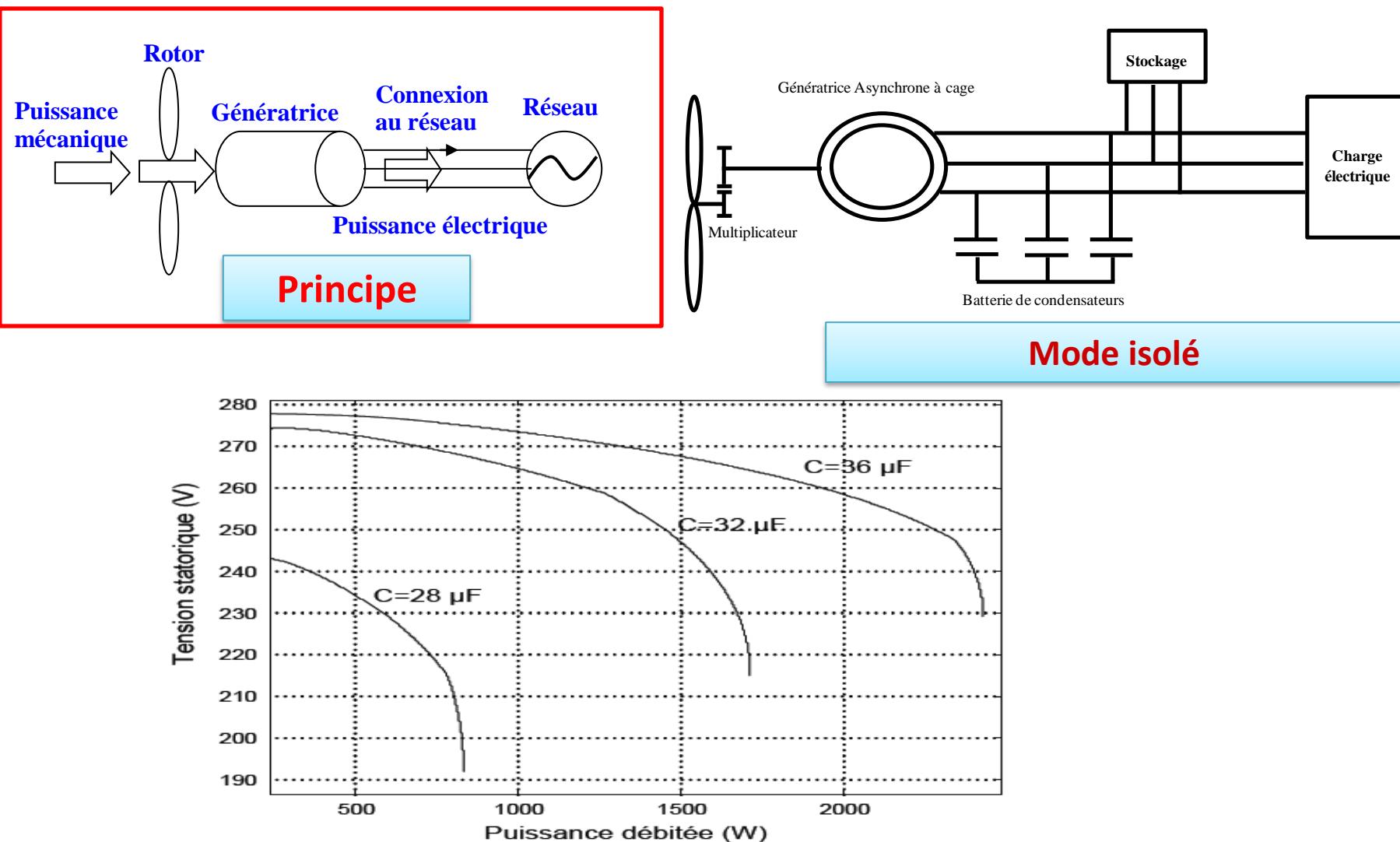
MPPT

Démarrage

Wind-Generator Concepts

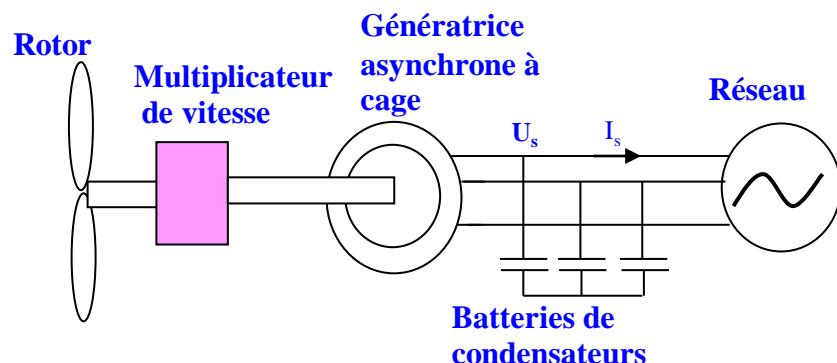


Aspects Techniques: éoliennes à vitesse fixe

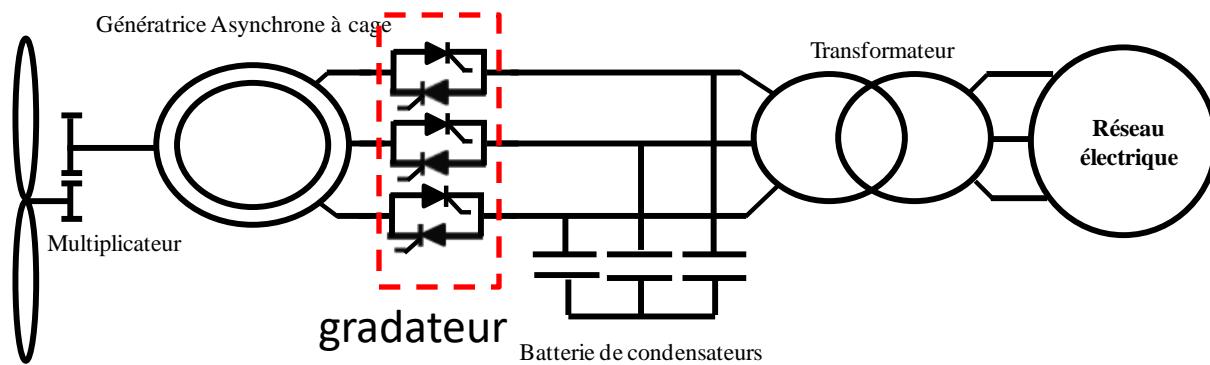
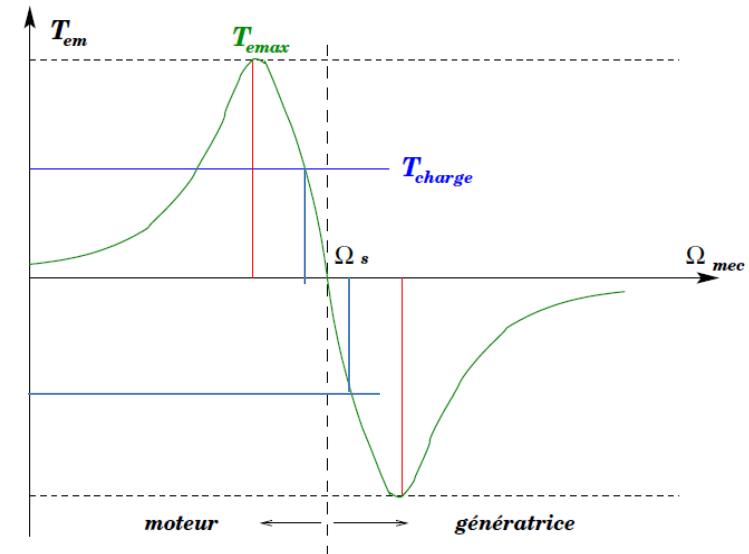


- Impossibilités d'utiliser des charges exigeantes en tension et fréquence.
- Risque de démagnétisation.
- Fonctionnement sur une plage de vitesse restreinte.

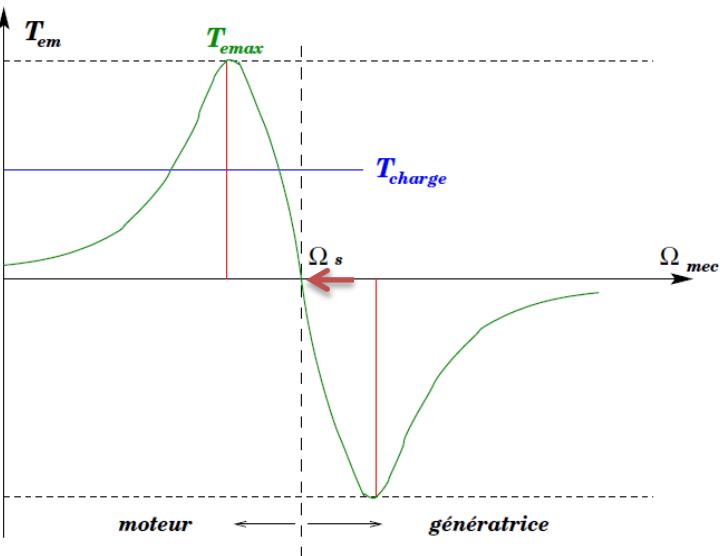
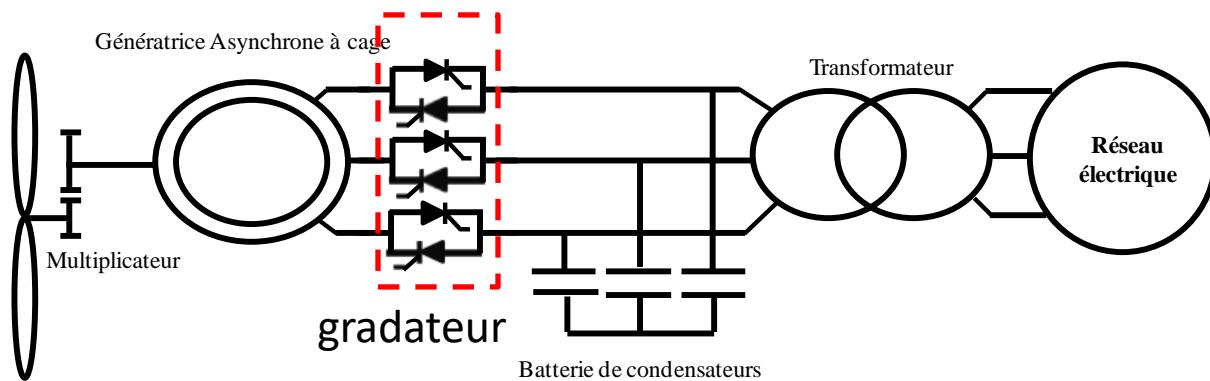
Aspects Techniques: éoliennes à vitesse fixe



Générateur à vitesse fixe
raccordée au réseau électrique



Aspects Techniques: éoliennes à vitesse fixe



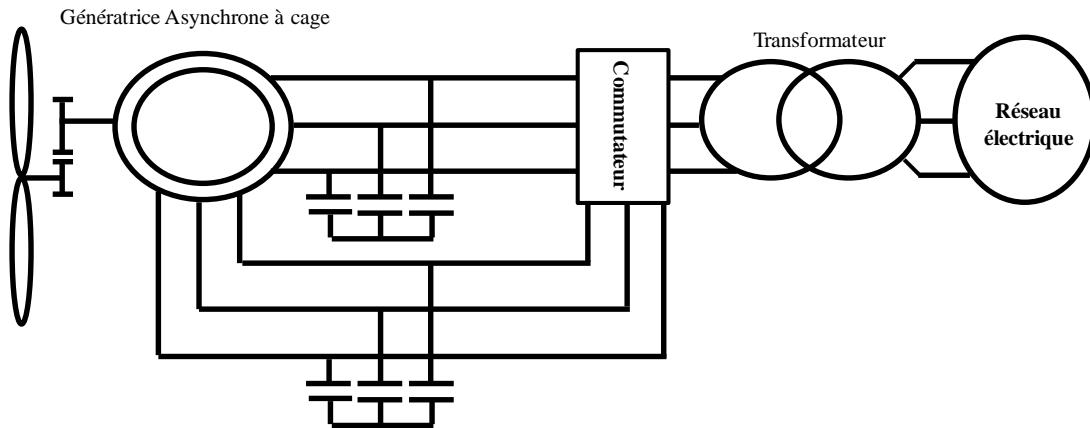
Méthode de raccordement au réseau

- 1- les pales de l'éolienne sont orientées de façon à ce que le couple fourni soit nul,
- 2- Diminuer l'angle d'amorçage de gradateur de $\pi \rightarrow 0$, ce qui permet d'augmenter la tension efficace imposée à la génératrice par le réseau.
- 3- remettre les pales à l'angle initial qui permet d'extraire le maximum du couple (maximum de puissance)

Inconvénients

Plage de variation de vitesse restreinte → éolienne à vitesse fixe

Aspects Techniques: éoliennes à vitesse fixe



$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$$

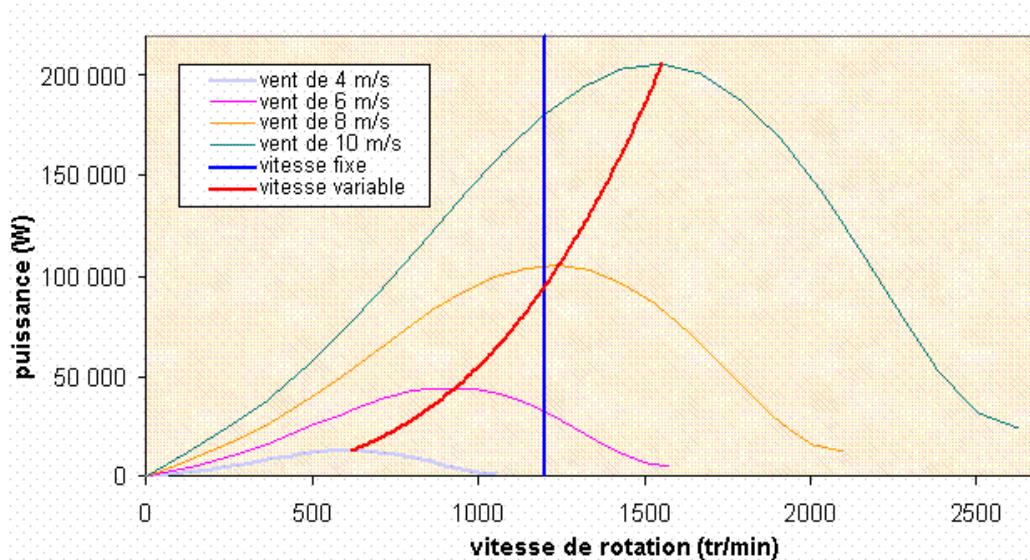
Générateur asynchrone à double stator

On peut imposer 2 vitesses de synchronisme par changement du nombre de pôles.

- D'une part, on a un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent.
- D'autre part, on a un stator de forte puissance correspondant à une vitesse élevée et donc à faible nombre de paires de pôles pour les vitesses de vent élevées.

Aspects Techniques: éoliennes à vitesse variable

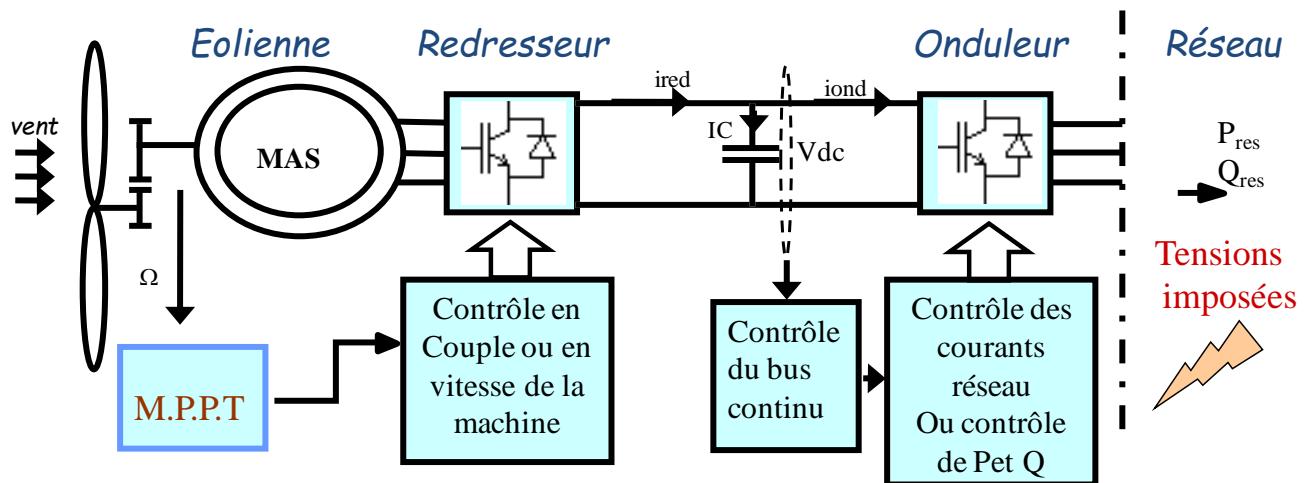
Génératrices à Vitesse variable



Avantage

- ⇒ Maximum power point tracking
- ⇒ Réduction du bruit (lors des fonctionnements à faible puissance)
- ⇒ Réduction des efforts mécaniques
- ⇒ Un peu moins de variations de puissance (stockage mécanique dans la turbine, stockage électrique dans le bus continu)
- ⇒ Une plus grande flexibilité par l'électronique de puissance, augmentation de la contrôlabilité (contrôle possible en puissance active, réactive, en tension, ...)

Aspects Techniques: éoliennes à vitesse variable



Chaine de puissance d'une éolienne à base de génératrice asynchrone à cage

Avantage

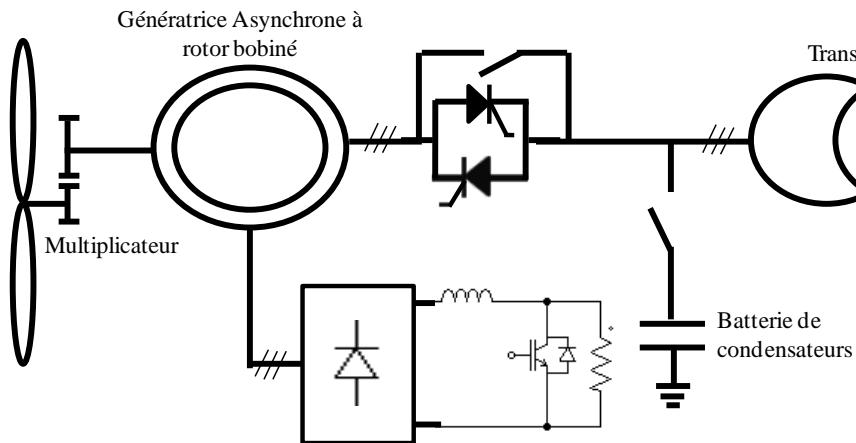
Contrôle totale du flux de puissance injecté

Inconvénient

La totalité de la puissance transite à travers les convertisseurs statique (redresseur & onduleur) :
coût et dimensionnement considérable

Aspects Techniques: éoliennes à vitesse variable

Générateur asynchrone à rotor bobiné



Configuration à glissement optimal (opti-slip)

Avantages :

- Variation de vitesse,
- Optimisation de la puissance.

Inconvénient :

- Pertes de la puissance en sursynchrone

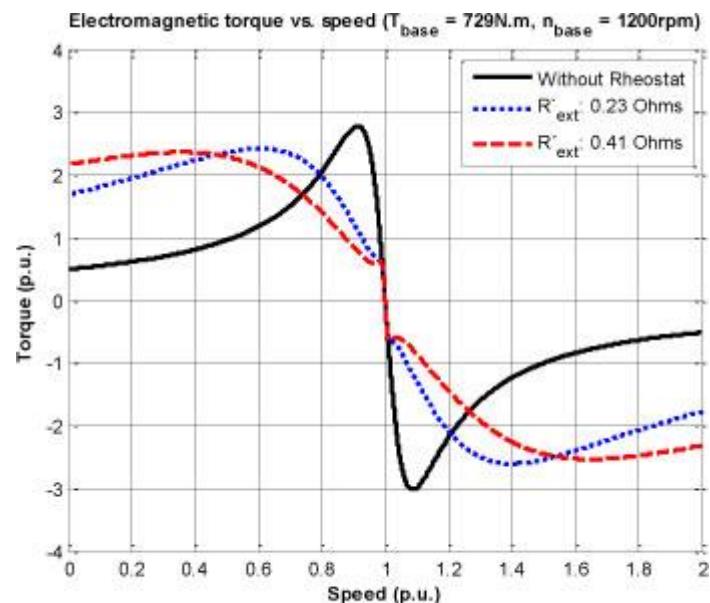
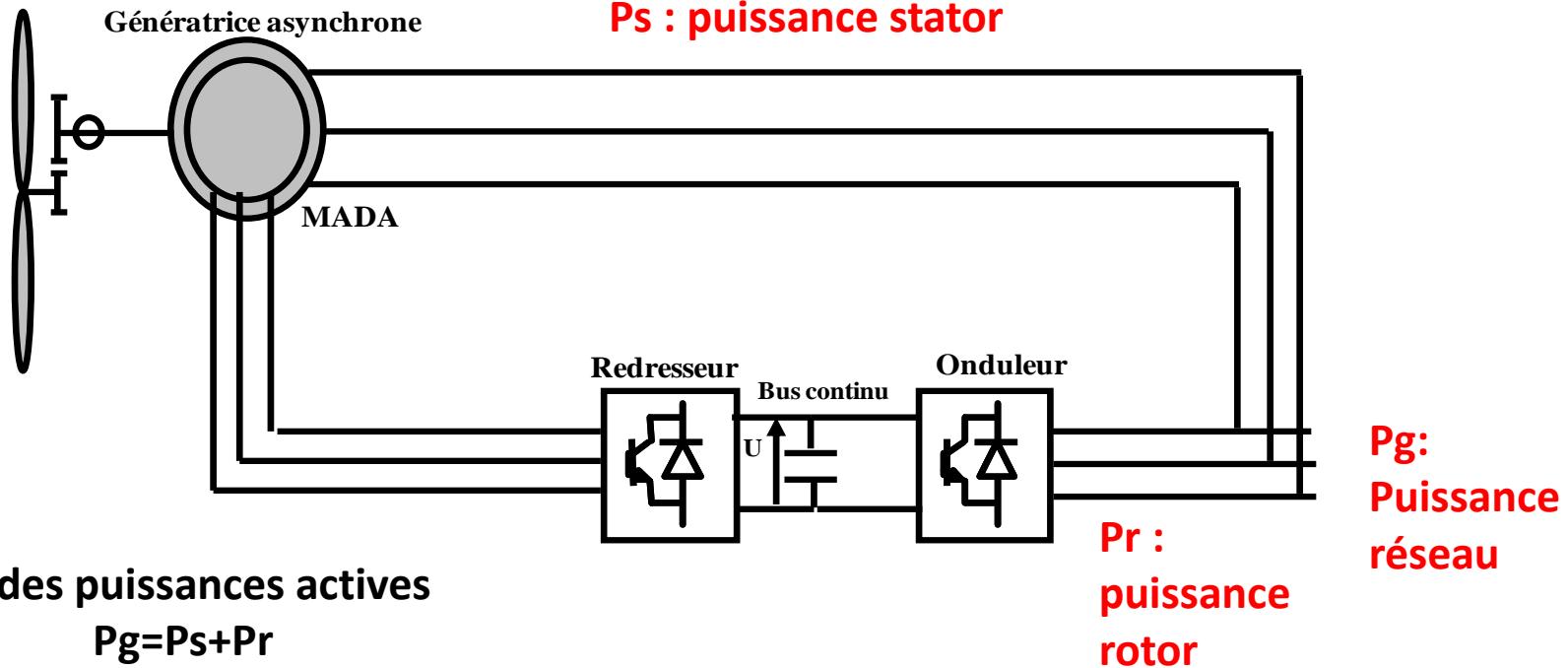


Figure 8 – Torque and current vs. speed c

Aspects Techniques: éoliennes à vitesse variable

Générateur asynchrone à double alimentation (DFIG)

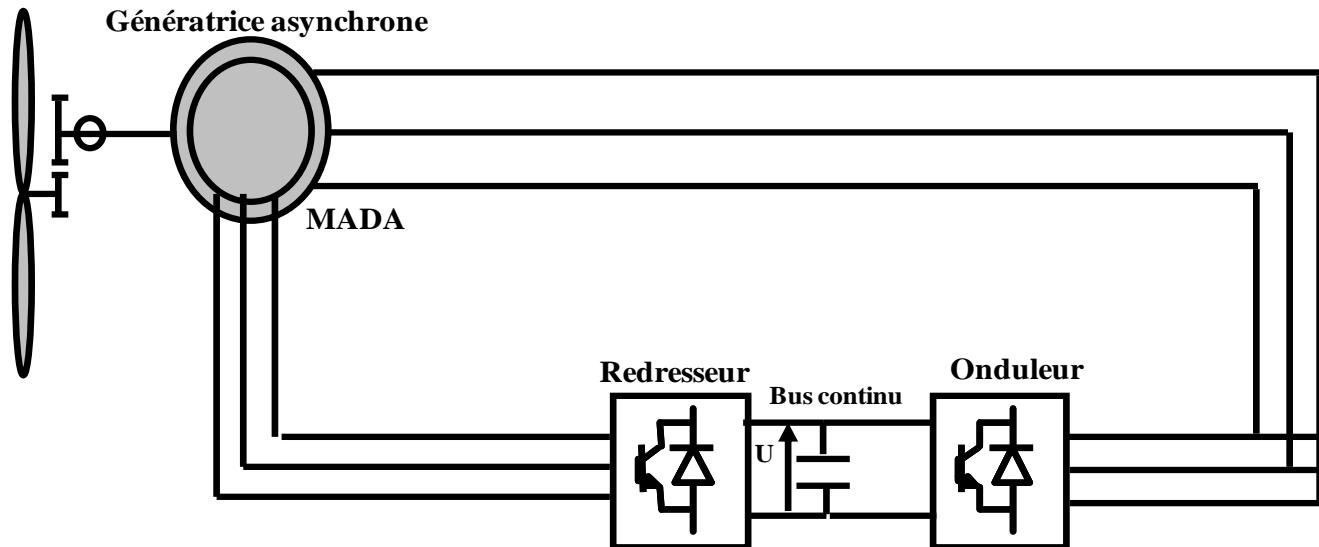


3 modes de fonctionnement sont possibles

- $N < N_s$: mode sous-synchrone donc $g > 0$ le rotor consomme de la puissance active et le stator fournit de la puissance au réseau.
- $N = N_s$: mode synchrone $Pr = 0 \rightarrow Pg = Ps$
- $N > N_s$ mode sur-synchrone $g < 0$ le stator et le rotor fournissent de la puissance au réseau

Aspects Techniques: éoliennes à vitesse variable

Générateur asynchrone à double alimentation

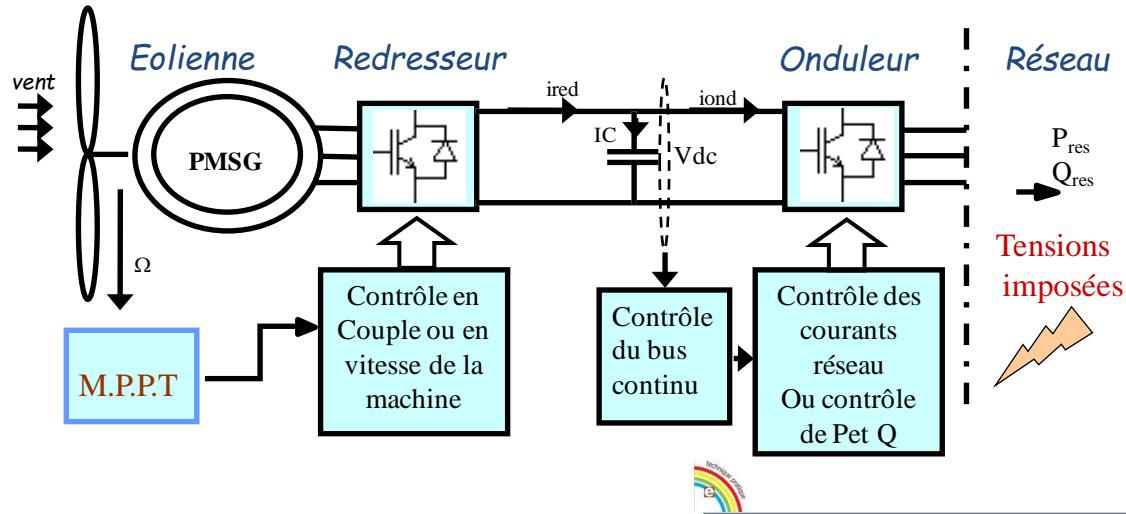


Avantages additionnels :

- Plus performante par rapport à la configuration opti-slip car on récupère la puissance en sur-synchrone pour l'injecter au réseau.
- L'électronique de puissance est dimensionnée à 30% de la puissance totale
- Intérêt économique

Aspects Techniques: éoliennes à vitesse variable

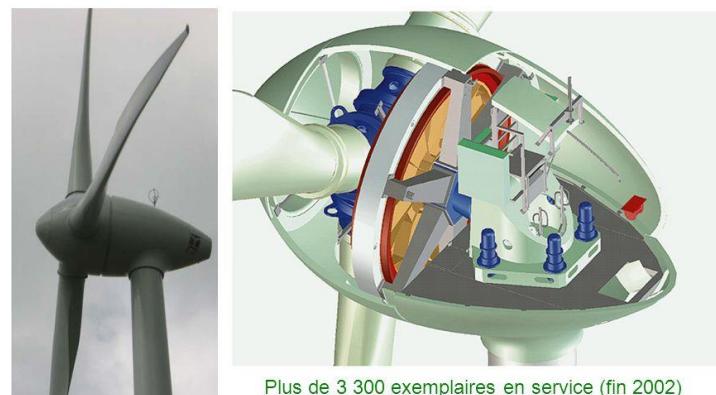
Génératrice synchrone



Production électrique éolienne de grande puissance

Exemple d'éolienne synchrone :

Modèle Enercon E40 – 500 kW



Plus de 3 300 exemplaires en service (fin 2002)

Avantages :

- Machine plus performante que la machine asynchrone (couple massique).
- Utilisée au-delà de 4MW
- Possibilité de supprimer le multiplicateur de vitesse entraînement direct: direct drive)



Merci pour votre
Attention

