Cours
Energies renouvelables

Presenté par :

Dr. Ing. Dhaker ABBES

Enseignant-chercheur (Maître de conférences)

Co-responsable du domaine ESEA

HEI-Lille

Niveau: MASTER

Thème : Energies renouvelables

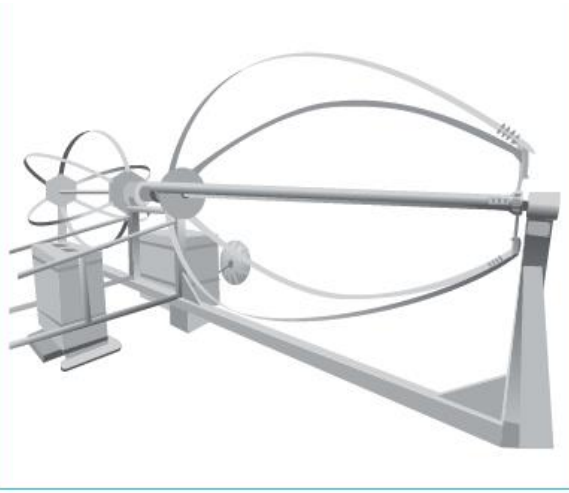
Version 2013-2014

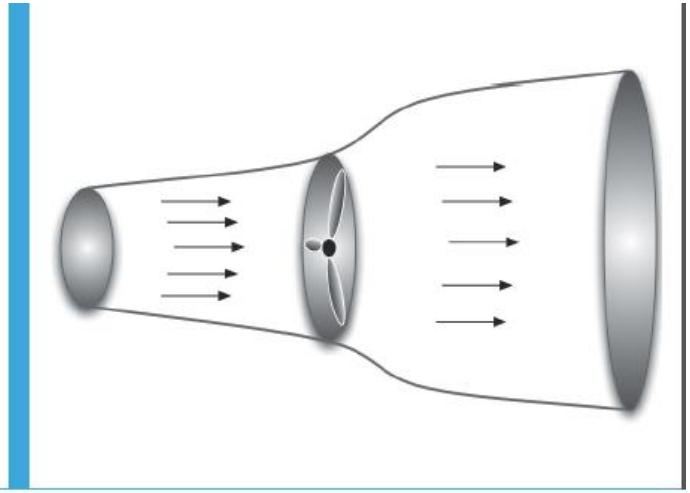
L'énergie éolienne

Partie I : Principe de fonctionnement et coûts

I. Introduction :

L'énergie éolienne est un moyen de production performant, efficace et durable. En termes de production d'électricité, elle est l'une des filières les plus propres, les plus sures et les plus rapides à mettre en place tout en étant renouvelable.





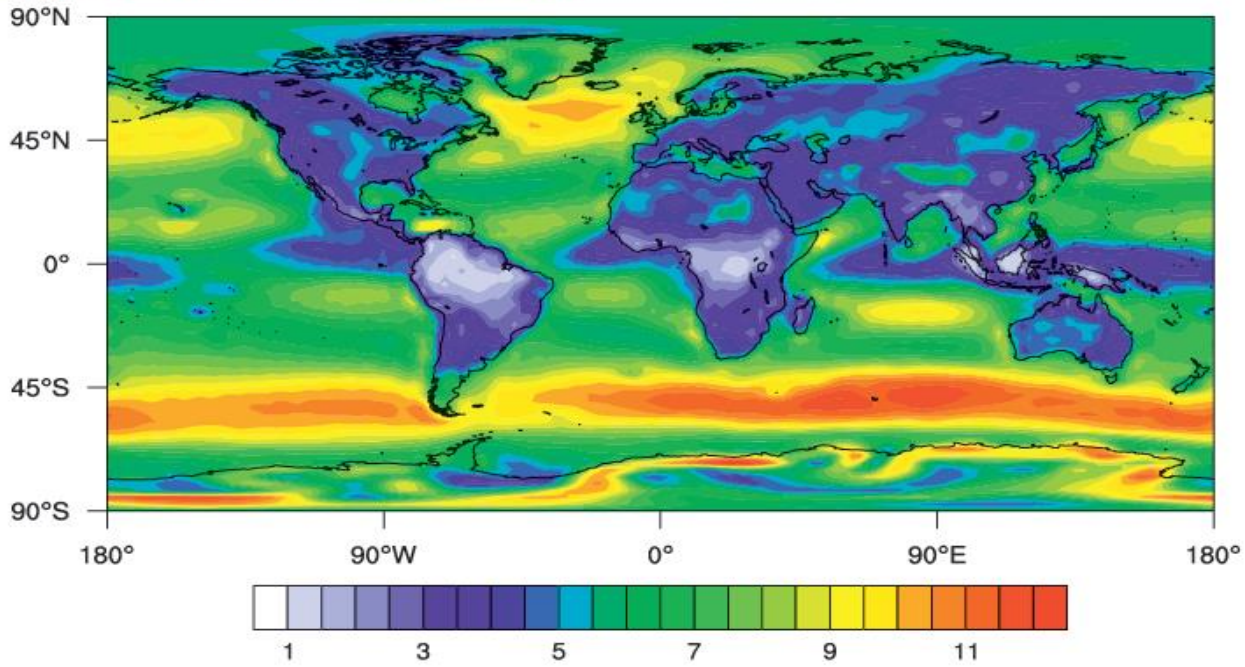
http://www.youtube.com/watch?v=kCYyrkBjdv4&list=PLzIRsteJDlNXnJa1iwXUtqbv50ttUUhR8

I. Introduction :

D'où vient le vent ?

Le vent est une masse d'air en mouvement dont le déplacement est provoqué par des différences de températures entre différents points de la Terre. Il y a de grandes convections bien connues des météorologues, et des convections plus locales dues à la topographie et aux effets de gradients thermiques locaux (en bord de mer par exemple). Certaines régions sont donc soumises à des vents plus ou moins violents de façon plus régulière que d'autres.

– L'un des atlas mondiaux des moyennes annuelles de vitesses de vent (en m/s, à 10 m).



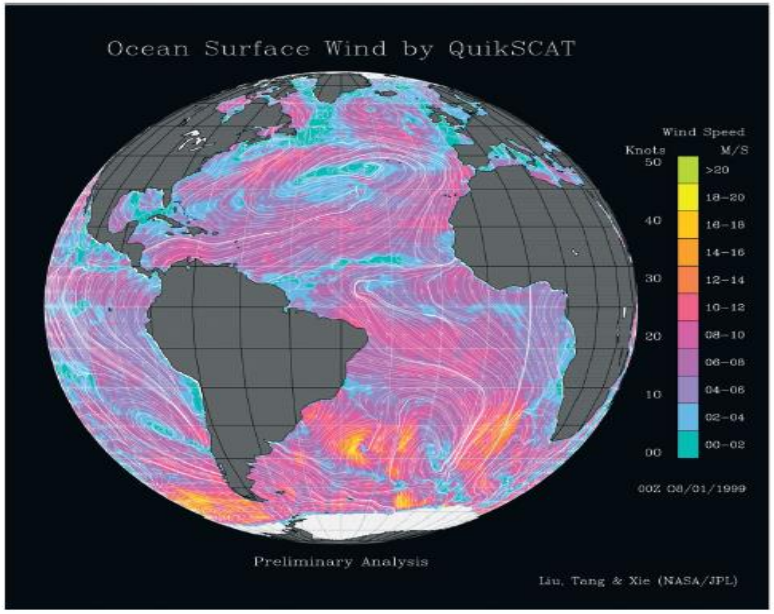
© Risø-DTU Wind Energy Division 2008

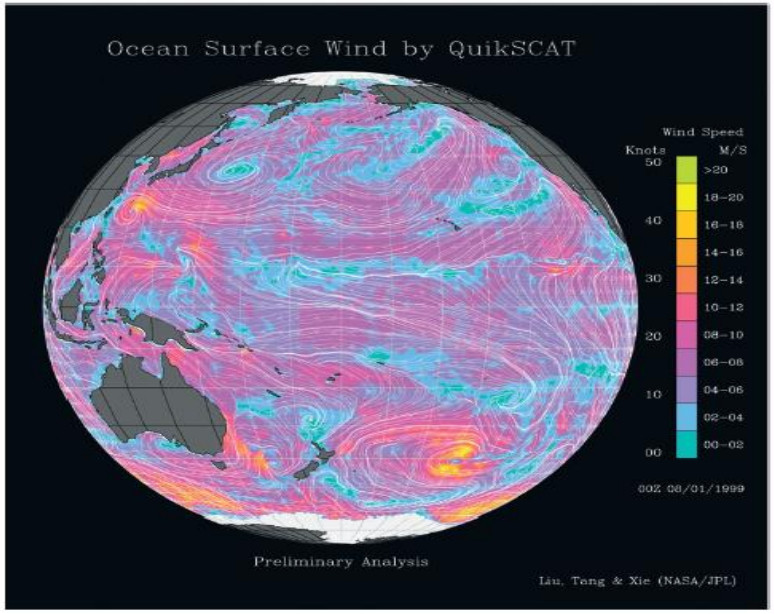
I. Introduction :

D'où vient le vent ?

Les vallées, lorsque le vent souffle dans leur axe, peuvent aussi connaître des vents violents. Un des plus connus est le Mistral. Ce phénomène se retrouve également dans les déserts : les importantes différences de température qui apparaissent sont à l'origine de tempêtes de sable. De même, sur les océans, l'absence d'obstacle permet au vent d'atteindre des vitesses élevées et régulières. On citera aussi les zones des Westerlies (vent d'ouest) dans l'hémisphère Nord, les quarantièmes rugissants et les cinquantièmes hurlants dans l'hémisphère Sud.

– Les vents marins du monde, vus par la NASA.

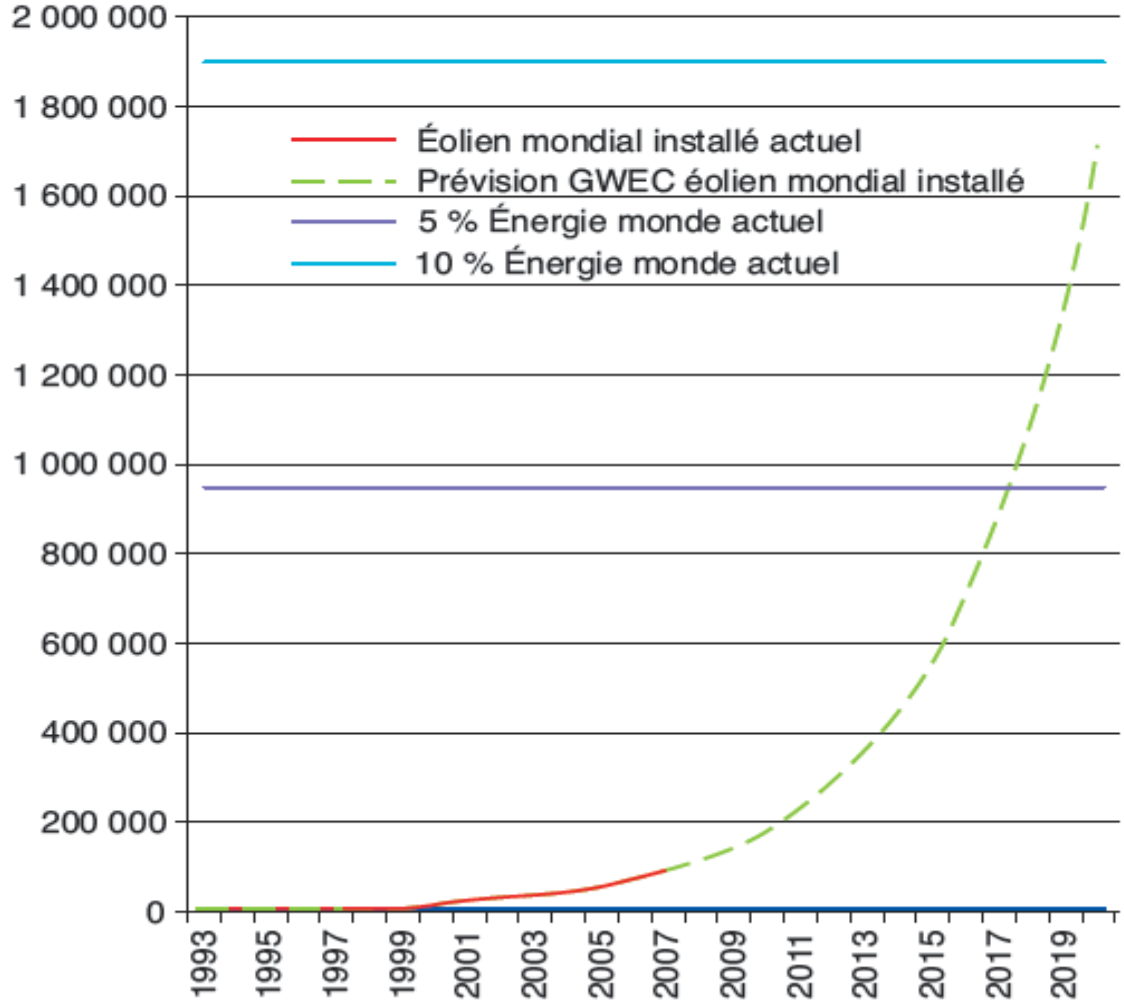




© NASA/JPL

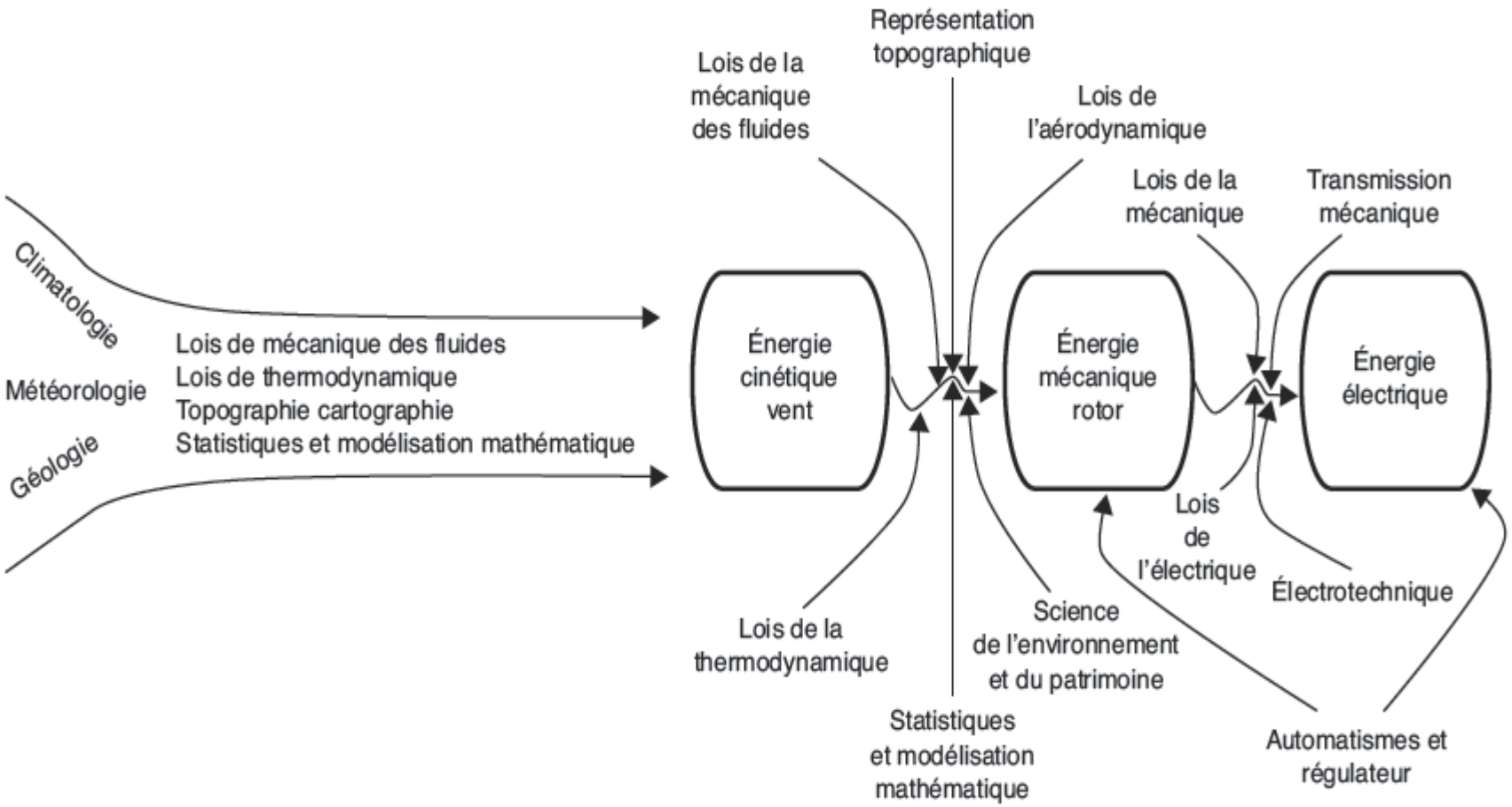
I. Introduction :

– Prospective de progression de la production éolienne mondiale par rapport à la demande électrique actuelle.



I. Introduction :

– Schéma des principes et des secteurs scientifiques et technologiques impliqués dans l'éolien.



II. Principe de fonctionnement :

Les données caractéristiques du vent

Pour caractériser le vent, il s'agit de connaître :
*** son profil directionnel, c'est-à-dire les tendances probabilistes de la direction du vent,**
*** son profil de vitesse, c'est-à-dire les tendances probabilistes de vitesse, ainsi que sa répartition, la vitesse la plus fréquente, les vitesses extrêmes et les vitesses de rafale etc.,**
*** ses variations annuelles, mensuelles et journalières (voire horaires),**
*** son profil énergétique, qui dépend de tous les points décrits ci-dessus, de la hauteur par rapport au sol, du relief environnant et des autres données climatiques (température, pression atmosphérique, hygrométrie).**

Les méthodes d'acquisition des données

Aujourd'hui, pour mesurer l'ensemble des données utiles, on dispose de plusieurs types d'outils :

- les mâts de mesure équipés de girouettes, d'anémomètres, de thermomètre et/ou de baromètre et/ou d'hygromètre, etc. ;
- les Sodars, qui sont des radars à effet Doppler sur les longueurs d'ondes sonores ;
- les Lidars, qui sont des radars à effet Doppler sur les longueurs d'ondes de la lumière (laser).
- Les méthodes de modélisation numérique.

II. Principe de fonctionnement :

Les méthodes d'acquisition des données

II. Principe de fonctionnement :

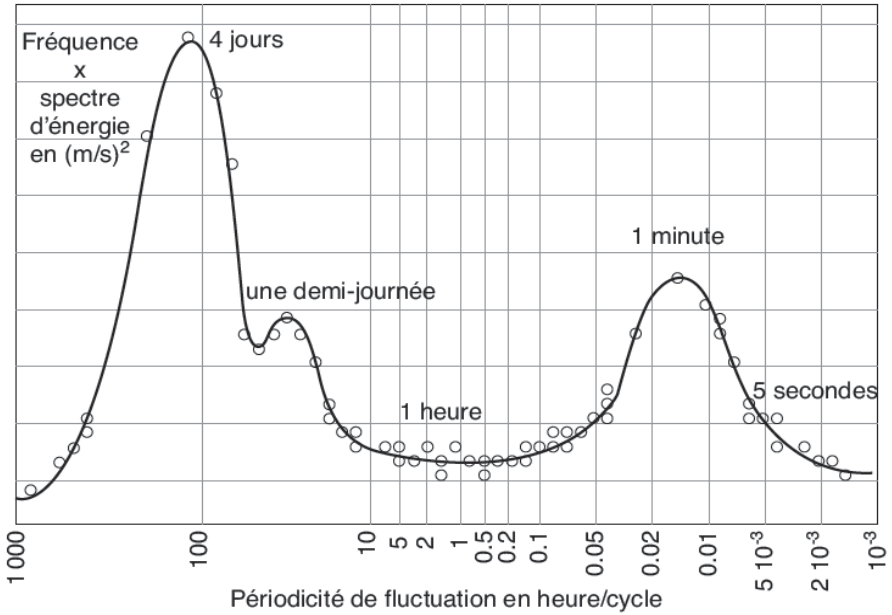
Les données physiques qui caractérisent le vent

■ la vitesse mesurée (qui correspond à la vitesse moyenne sur 10 mn), à l'écart-type qui donne une représentation des « turbulences », et à la variation du vent sur la hauteur ;
■ profil des vitesses du vent (lois de Weibull et de Rayleigh), aux rapports mathématiques existant entre les paramètres de la loi de Weibull, et aux vitesses moyennes, maximales et de rafale ;
■ à la rose des vents ;
■ à la vitesse moyenne, à la vitesse maximale et à la vitesse de rafale ;
■ et aux variations annuelles et variations journalières.

II. Principe de fonctionnement :

Les données physiques qui caractérisent le vent

– Distribution des fréquences de variation du vent.

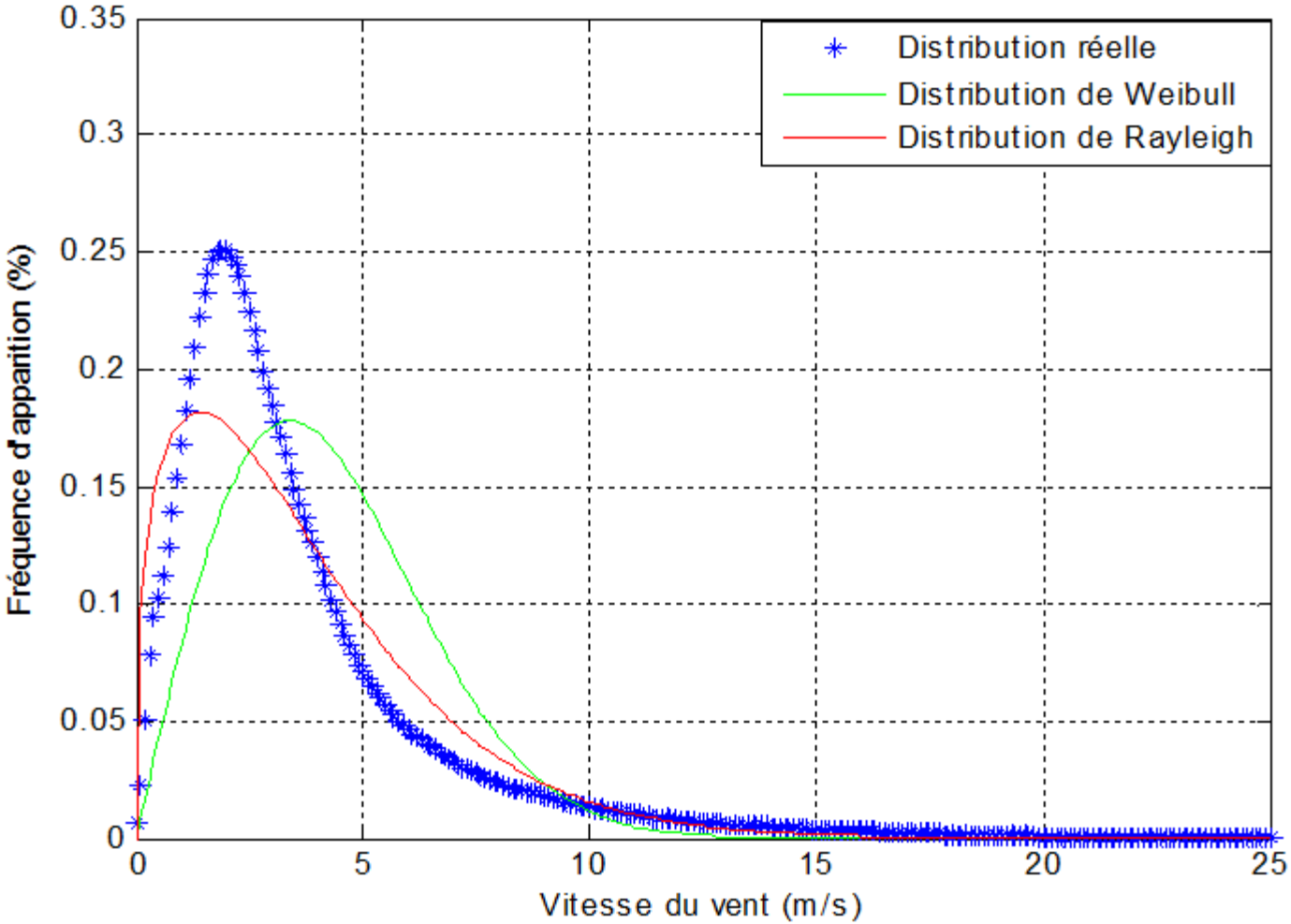


On constate un écart très net qui sépare les variations turbulentes du vent qui sont en dessous de la minute et les variations journalières. Et particulièrement, entre la période de 10 min et celle de 5 h, le contenu énergétique du vent atteint un de ses minima. On peut par conséquent être à peu près assurés que, en moyenne, les turbulences de fréquence inférieure s'y compensent.

■ Si l'on se positionne sur un rythme de moyenne de 10 min, tout en obtenant un bon échantillonnage par rapport à l'ordre de grandeur de 24 h, les données sont moins erratiques puisque l'on se situe dans la « période creuse » en variations. La mesure est donc plus fiable, et l'on peut obtenir une séquence d'apparence presque continue qui représente bien la valeur de la vitesse du vent de l'intervalle de temps.

II. Principe de fonctionnement :

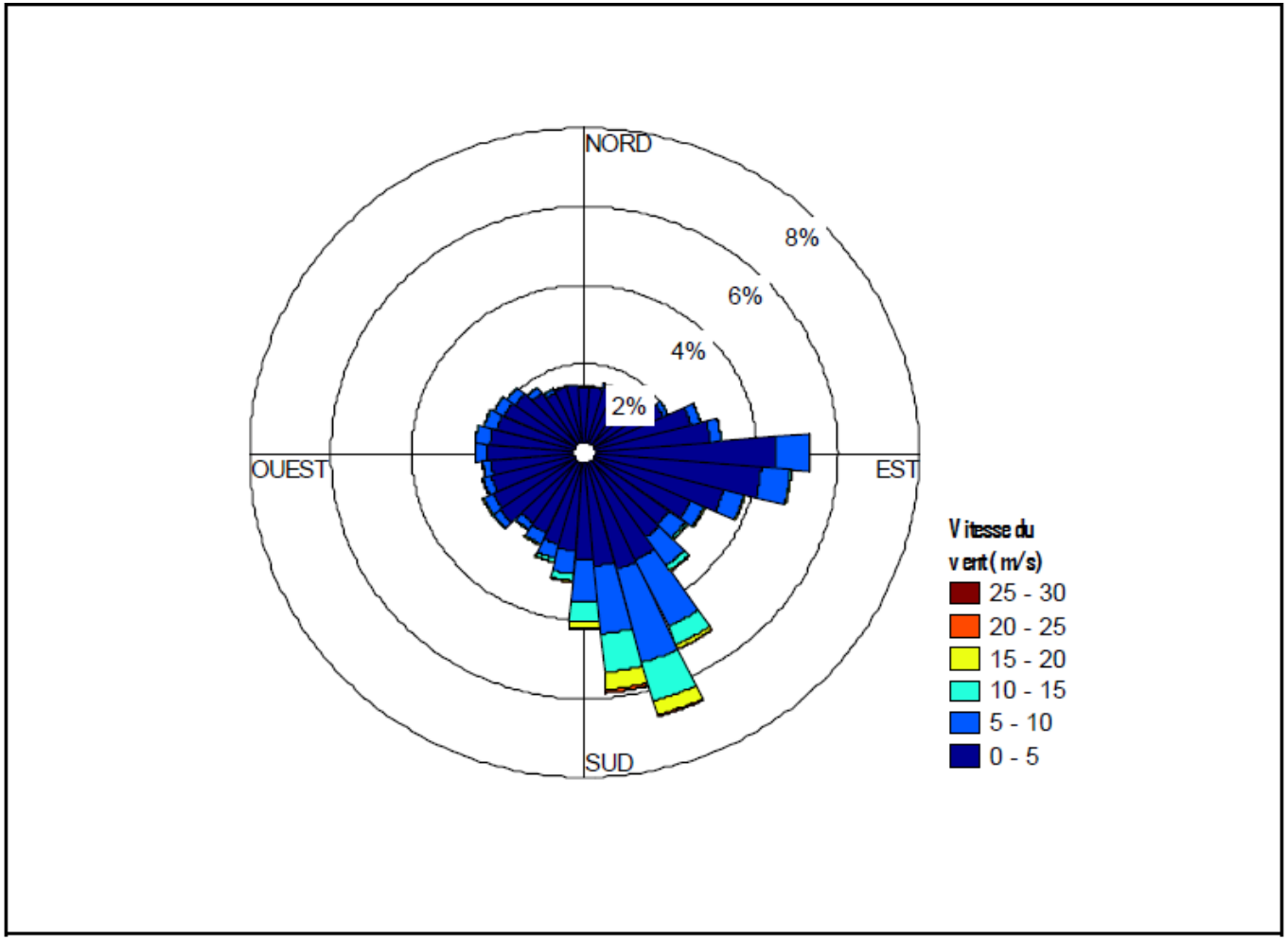
Les données physiques qui caractérisent le vent



Distribution de la vitesse du vent

II. Principe de fonctionnement :

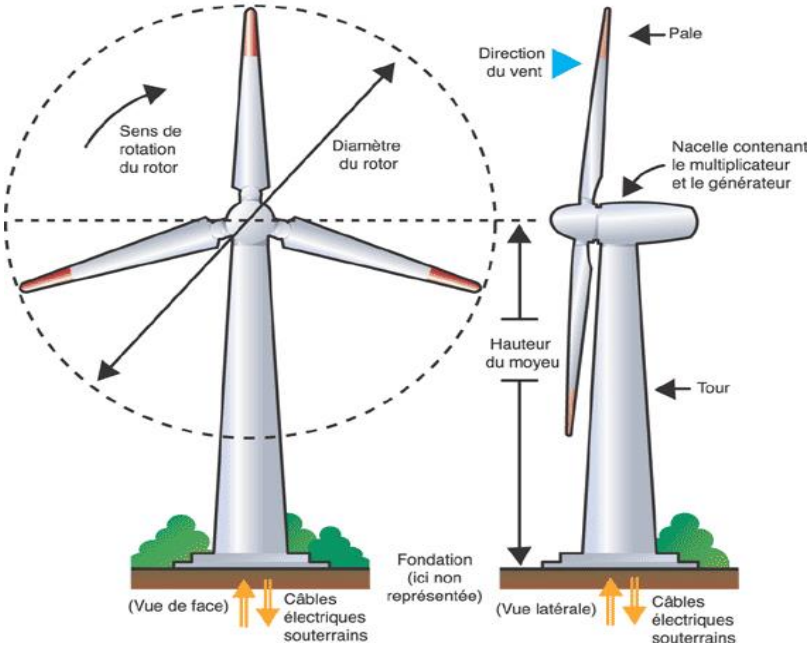
Les données physiques qui caractérisent le vent



Rose de vent enregistrée en 2009 dans le site du National Wind Technology Center, Latitude: 39° Nord, Longitude: 105° Ouest, Altitude : 1855 mètres

III. Les différents types d'éoliennes

Schémas d'ensemble d'une éolienne

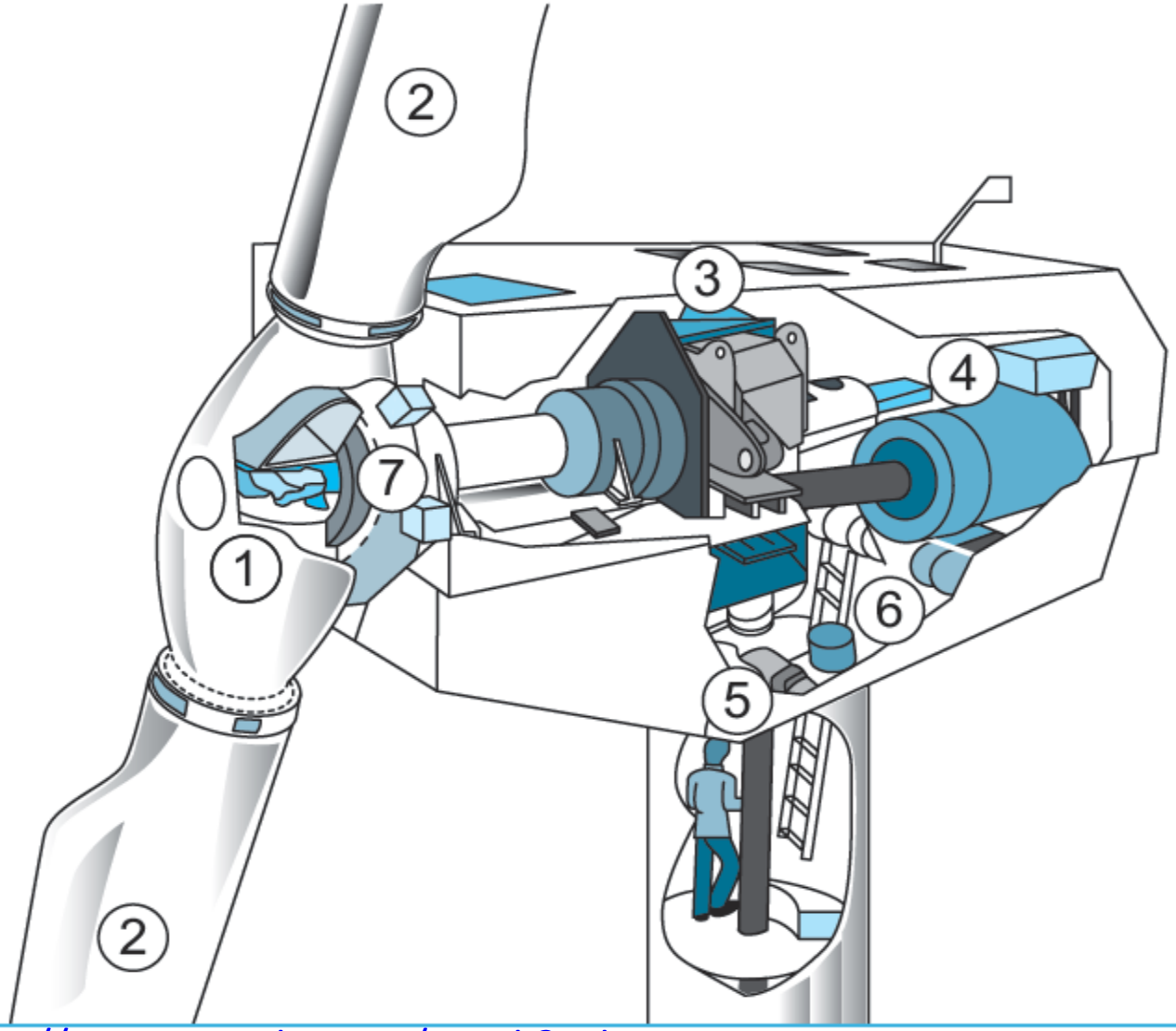


-**<u>Eolienne dont le rotor est à axe horizontal :</u>**
Ces éoliennes sont constituées d'un mat (ou tour) sur lequel tourne une hélice composée de 2 ou 3 pales (de diamètre allant de 40 à 100 mètres pour les plus grandes). Celles-ci interceptent l'énergie du vent pour faire tourner une génératrice qui produit du courant électrique. Un système électromécanique permet communément d'orienter les pales et ainsi de réguler sa vitesse de rotation en contrôlant le couple de la turbine.

-**<u>Eolienne dont le rotor est à axe vertical :</u>**
Hélicoïdal ou cylindrique, cette éolienne supporte mieux les turbulences et les rafales et elle présente continuellement la même surface au vent, elle est donc plus adapté aux zones urbaines. Cette éolienne ne nécessite pas d'être orienté à l'inverse des éoliennes dont le rotor est à axe horizontal.

IV. Vue global du système fonctionnel : éolienne

– Schéma global du système turbine.



1. Rotor
2. Pâles
3. Multiplicateur
4. Génératrice
5. Mécanisme d'orientation de la nacelle
6. Système hydraulique
7. Frein

http://www.youtube.com/watch?v=kWKQ9P6xYpw
http://www.youtube.com/watch?v=LNXTm7aHvWc

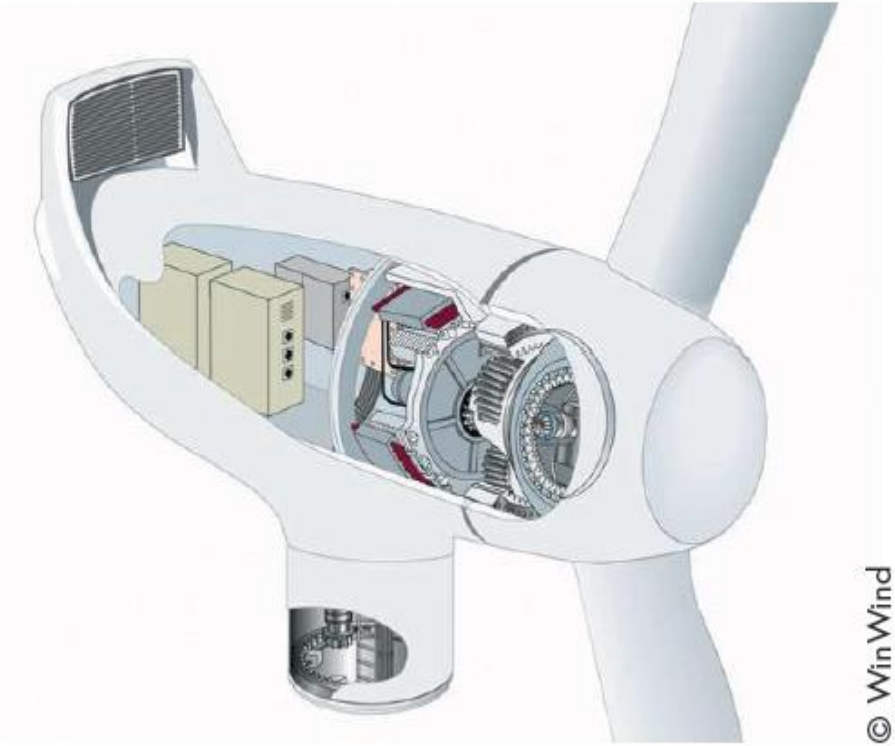
IV. Vue global du système fonctionnel : éolienne

– Les différents éléments constitutifs d'une turbine à génératrice asynchrone, avec arbre de transmission de différentes technologies et multiplicateur. À gauche, turbine 2 MW ou 3 MW, Alstom Ecotecnia. À droite, turbine 1 MW, Vergnet SA.

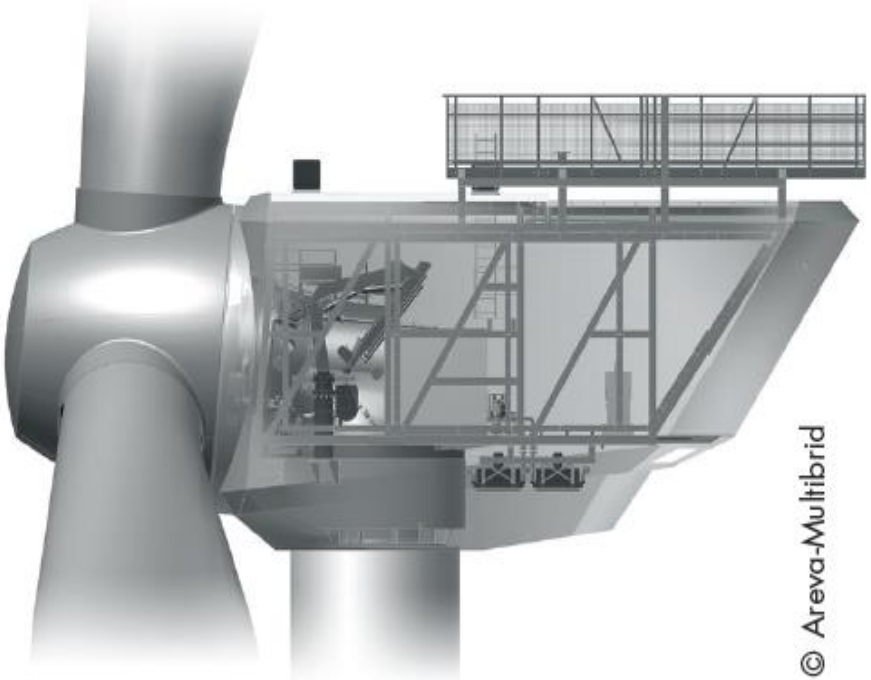
Schéma de gauche : © Alstom Ecotècnia ; Schéma de droite : © Vergnet SA

IV. Vue global du système fonctionnel : éolienne

– Les différents éléments constitutifs d'une turbine à génératrice synchrone à attaque directe. À gauche, turbine 1 MW ou 3 MW, WinWind. À droite, turbine 5 MW offshore, Areva Multibrid.



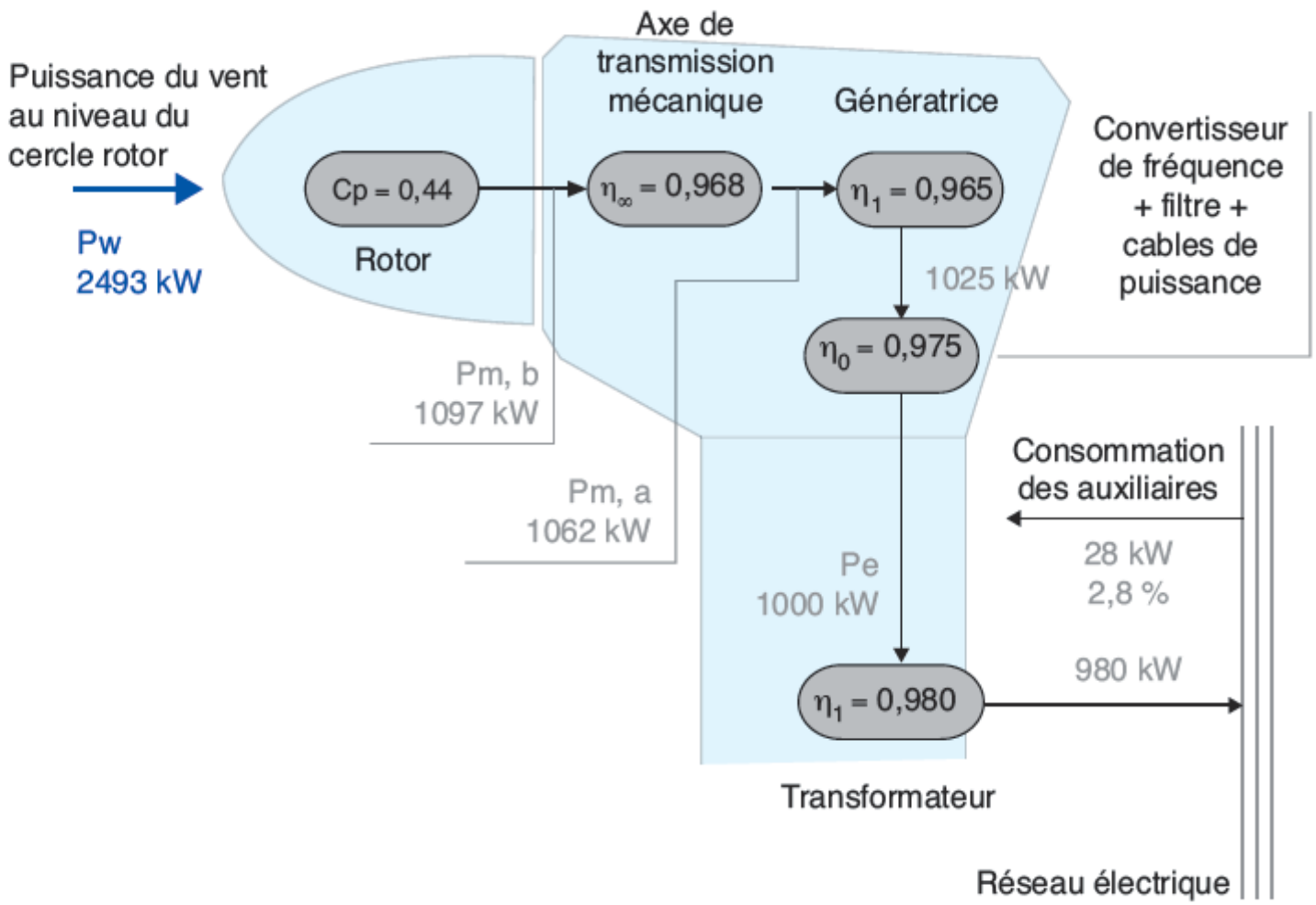
© WinWind



© Areva-Multibrid

IV. Vue global du système fonctionnel : éolienne

Ordres de grandeur des rendements des systèmes internes de la turbine.



V. Coût

Détermination du coût économique selon l'analyse du cycle de vie

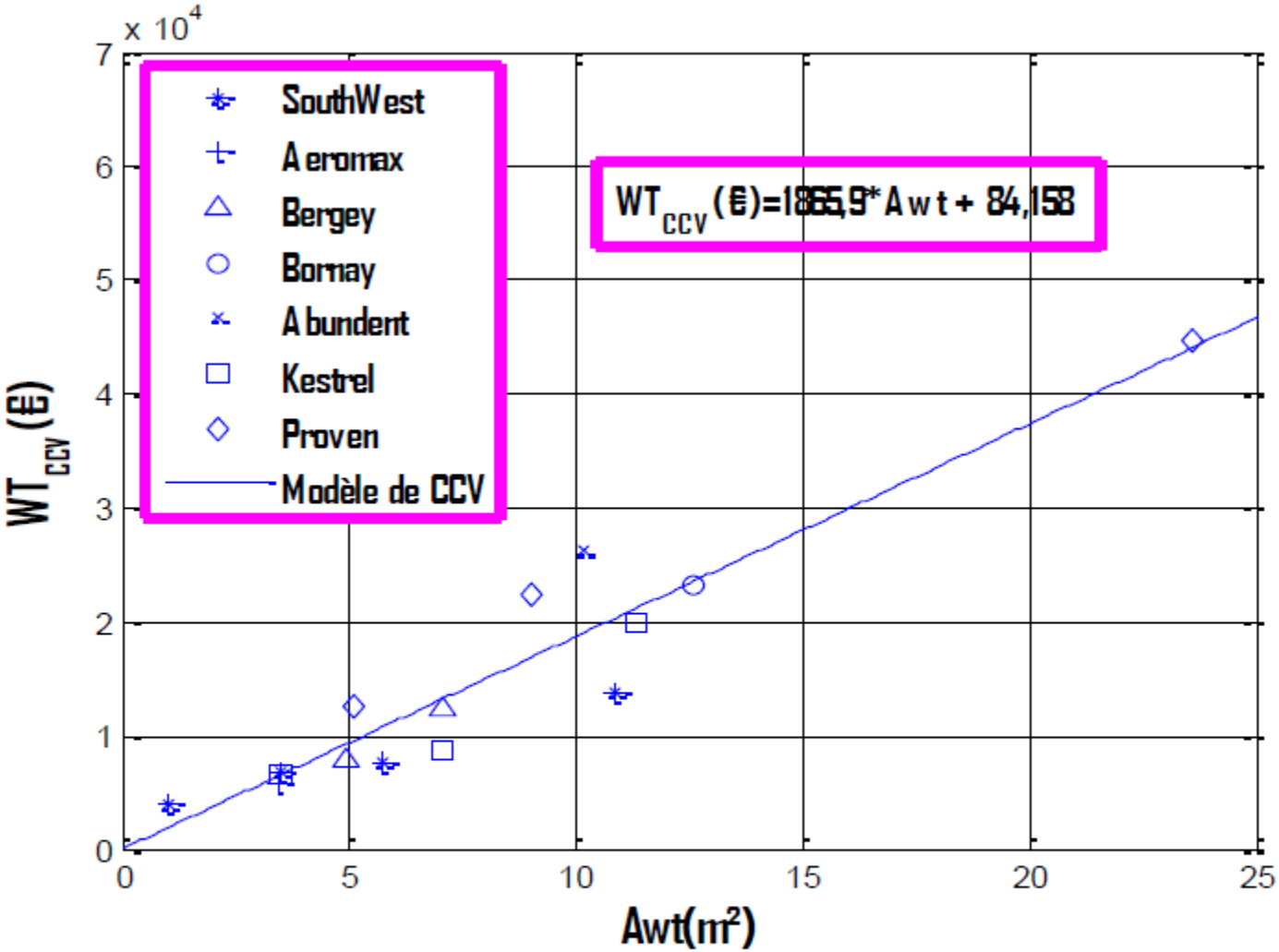
Pour les éoliennes à axe horizontal, nous avons estimé approximativement leurs coûts du cycle de vie (CCVs) en fonction de la surface balayée par leurs rotors. Cette considération, fait du diamètre du rotor le paramètre le plus significatif et est représentative de la taille d'une éolienne.

On présente les résultats de calcul du CCV pour des petites éoliennes tripales à axe horizontal disponibles sur le marché et considérées parmi les plus utilisées en Europe. Le prix d'achat de chacune d'entre elles est déterminé à partir de différents catalogues constructeurs .

Vu l'aspect domestique de l'installation, une tour de 10 m a été sélectionnée pour toutes les éoliennes. Les calculs supposent que le coût initial du système éolien est partagé entre l'éolienne et sa tour (environ 55%), l'installation (25%), les composants nécessaires au bon fonctionnement du système (Balance-of-System components BOS) tels que les câbles, les connecteurs, les protections, etc. (10%) et le convertisseur statique (10 %). Les coûts récurrents concernent seulement la maintenance annuelle qui représente environ 2,5% du coût investi initialement. Le convertisseur est remplacé tous les 10 ans. Tous les CCVs sont donnés en dollars $ et convertis en euros € (1$ = 0,71854€, valeur moyenne en 2011 donnée par l'institut national de la statistique et des études économiques.

V. Coût

Détermination du coût économique selon l'analyse du cycle de vie



l'évolution du coût du cycle de vie des éoliennes choisies (WT_{CCV}) en fonction de la surface balayée par leurs rotors (Awt)

V. Coût

Détermination du coût énergétique selon l'analyse du cycle de vie

Hypothèses
1- Les pales du rotor sont soit en plastique renforcé de verre, soit en bois avec résine époxy, soit en fibres de verres moulé avec de la résine époxy ou en plastique moulé par injection avec des fibres de carbone. Pour la normalisation des calculs, nous avons considéré la fibre de verre moulé comme matériau pour les pâles car nous connaissons son énergie intrinsèque. 2- En raison du manque de données, une hypothèse a été faite d'inclure les aimants permanents dans la catégorie d'aluminium en raison de son énergie intrinsèque élevée. 3- On assume une amélioration annuelle de 1% dans le traitement des matériaux et les processus de fabrication. Ainsi, l'énergie primaire incarnée par le convertisseur statique diminue d'un remplacement à un autre.

Pourcentage des poids des composants de l'éolienne		
Turbine		
Composant	**% poids de l'éolienne**	**Repartition des matériaux**
Rotor		
Moyeu	4%	95% Acier, 5% Aluminum
Pâles[1]	10%	100% fibre de verre moulé
Nacelle		
Boite de vitesse	6%	100% Acier
Génératrice	15%	25% aimants, 40% Acier, 35% Cuivre
Autres composants		
Châssis et carcasse	35%	30% Aluminum, 12 % Cuivre, 5% plastique renforcé de verre, 53% Cuivre
Câbles, supports internes et cartes électroniques	30 %	80% Acier, 20% Cuivre
Tour		
Tour	30 kg/m² de surface balayée*	98% Acier, 2 % Aluminum
Fondations		
Pieux de fondations et plate-forme	65 kg/m² de surface balayée*	97% Béton, 3% Acier

V. Coût

Détermination du coût énergétique selon l'analyse du cycle de vie

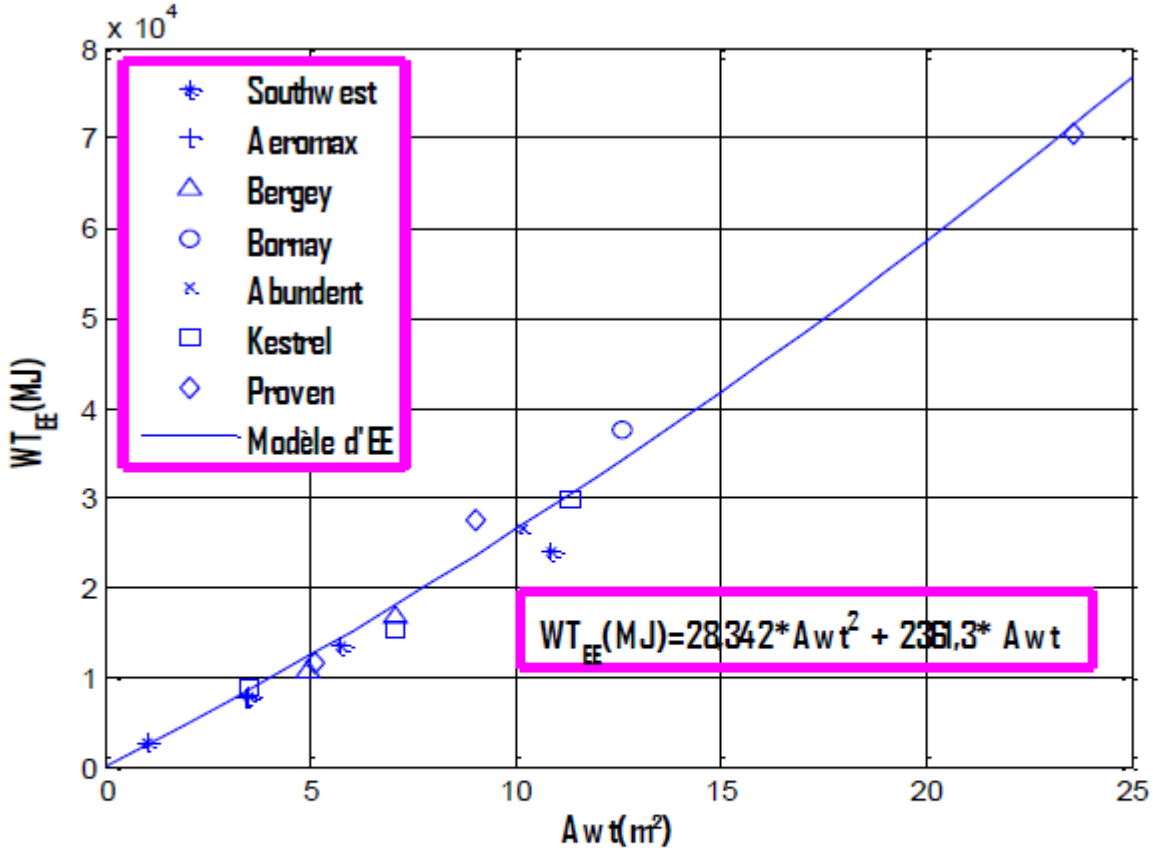
Energie primaire intrinsèque des différents matériaux		
Type de matériau	**Energie intrinsèque (MJ/kg)**	**Energie intrinsèque (kWh/kg)**
Acier	24,4	6,783
Aluminum &aimants permanents[2]	155	43,09
Cuivre	48	13,344
Fibre de verre moulé	28	7,784
Plastique renforcé de verre	100	27,8
Béton**	0,9	0,25
Energie nécessaire pour la fabrication de l'éolienne		
Processus de fabrication de l'éolienne	100 MJ/m² de surface balayée*	27,8 kWh/m² de surface balayée*
Energie primaire contenue dans les autres composants du système éolien		
BOS [estimation]	250 MJ/m²	69,5 KWh/m²
Convertisseur statique (acquisition initiale)	1MJ/W	0,278 KWh/W
Convertisseur statique[3] (après 10 ans)	0,904 MJ/W	0,251KWh/W
Convertisseur statique[3] (après 20 ans)	0,818 MJ/W	0,227 KWh/W

* Approximation basée sur une translation d'échelle en fonction du poids et de la puissance // ** Béton type RC30 utilisé pour les fondations

Hypothèses et données utilisées pour le bilan énergétique des petites éoliennes

V. Coût

Détermination du coût énergétique selon l'analyse du cycle de vie



l'évolution de l'énergie primaire incarnée par les éoliennes choisies (WT_{EE}) en fonction de la surface balayée par leurs rotors (*Awt*)

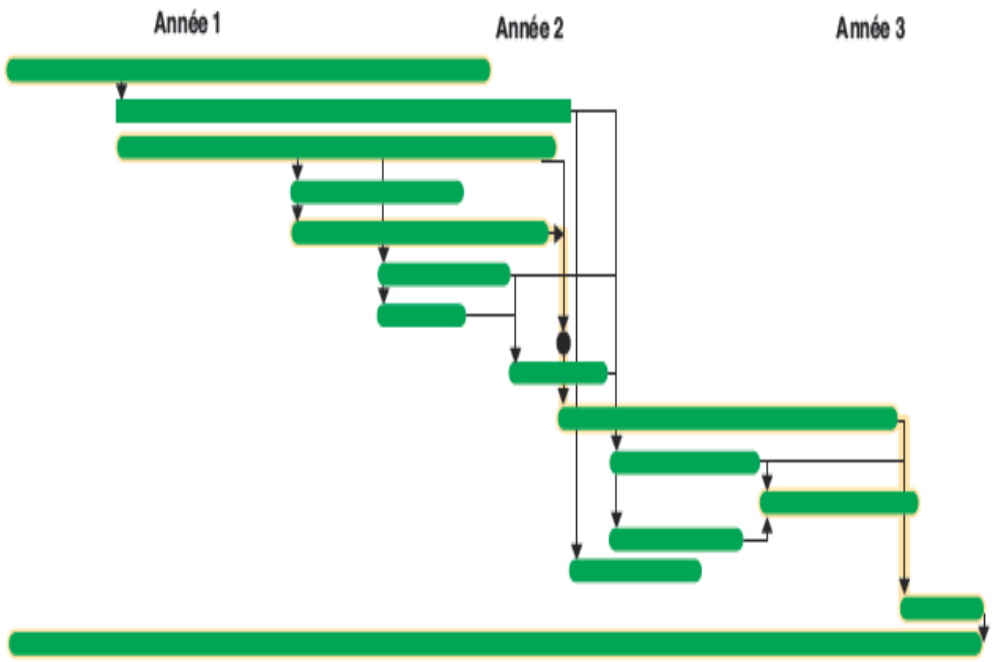
Organigramme des tâches de développement

Une fois un site particulier validé par une étude de préfaisabilité, le développement porte sur les aspects suivants, qui seront repris un par un par la suite :

- effectuer l'étude du gisement éolien ;
- définir le productible ;
- préparer l'étude environnementale pour l'étude d'impact ;
- élaborer le dossier permis de construire (ou équivalent) ;
- élaborer l'implantation définitive des éoliennes ;
- préparer la maîtrise du foncier ;
- concevoir les installations techniques ;
- gérer le raccordement au réseau ;
- préparer les éléments de dossiers administratifs ;
- préparer la consultation des fabricants d'éoliennes ;
- préparer les consultations pour la construction ;
- conclure le dossier foncier final ;
- finaliser le dossier sur les aspects juridiques et financiers.

VI. Contenu d'une étude de développement type

– Schéma synthétique d'un planning de développement de parc éolien «simple».



Tâche	Durée
• 1) Enquêtes préliminaires. Concertation et communication :	> 18
• 2) Études techniques :	> 17
• 2.1) études d'évaluation du productible	16,5
• 2.2) études et processus de raccordement électrique au réseau	6,5
• 2.3) études d'impact	10
• 2.4) études de conception du parc	5
• 2.5) constitution dossier relevé cadastral XXXX	3,25
• 2.6) validation plans implantation projet	0,5
• 3) Dossiers permis de construire	3,75
• 4) Dossier turbines	13
• 5) Dossiers préparation chantier construction parcs	5,75
• 6) Chantier	6
• 7) Dossier foncier	> 5
• 8) Dossier juridique et financier	5
• 9) Dossier administratif et gestion pour mise en exploitation	3,25
• 10) Organisation, planification, suivi global et coordination	>

L'énergie éolienne

Partie II : Modélisation, configurations et commande

I. Modélisation :

La ressource vent : son énergie et notre capacité à la capter

la puissance que l'on va capter est de la forme :

$$P_{Captée} = \frac{1}{2} C_p A \rho V^3$$

où $P_{captée}$ est la puissance instantanée qui est captée «aérodynamiquement» par l'éolienne ; et C_p est un coefficient d'efficacité de transfert aérodynamique qui varie avec la vitesse d'entrée, $V_{entrée}$, qui n'a pas d'unité et qui va essentiellement dépendre de l'aérodynamisme des pales + rotor.

On voit au passage que C_p est une fonction de $V_{sortie}/V_{entrée}$ et représente donc bien une faculté à «capter».
Le lecteur notera aussi une limite intéressante, déterminée par la **loi de Betz**, qui prouve que C_p maximal = 16/27, c'est-à-dire ~ 0,59.

I. Modélisation:

$$P_{Captée} = \frac{1}{2} C_p A \rho V^3$$

Que signifie tout ceci, en termes simples ?

■ la vitesse instantanée intervient au cube dans la puissance générée;
■ la densité de l'air instantanée intervient elle aussi, mais au facteur 1 ;
■ la surface du rotor intervient, de même, au facteur 1.

Nous venons de comprendre ici :

■ pourquoi les industriels qui fabriquent les éoliennes font des rotors (ensemble des pâles + leur point d'attache) de plus en plus grands ;

■ pourquoi ce n'est pas forcément en montagne que l'on trouve le plus de parcs éoliens (la densité de l'air diminue avec l'altitude) ;

■ pourquoi tant de personnes s'échinent à faire des mesures de vitesse de vent aussi précises.

En effet, la question essentielle de l'éolien est que le vent en est le facteur le plus influent, mais aussi le plus « apparemment » variable, le plus « apparemment » capricieux, le plus « apparemment » imprévisible, et le plus intrinsèquement dépendant de son environnement topographique et saisonnier.

Petites questions pour montrer l'importance de la vitesse du vent et de sa précision

Toutes choses restant égales par ailleurs, que devient la puissance captable d'un site lorsque sa vitesse moyenne annuelle passe de 4 à 5 m/s (soit une augmentation de 25 %) ? La puissance est quasiment multipliée par 2…

P (à 5 m/s) = P (à 4 m/s) x $(1 + 0{,}25)^3$, soit P (à 4 m/s) x (1,95).

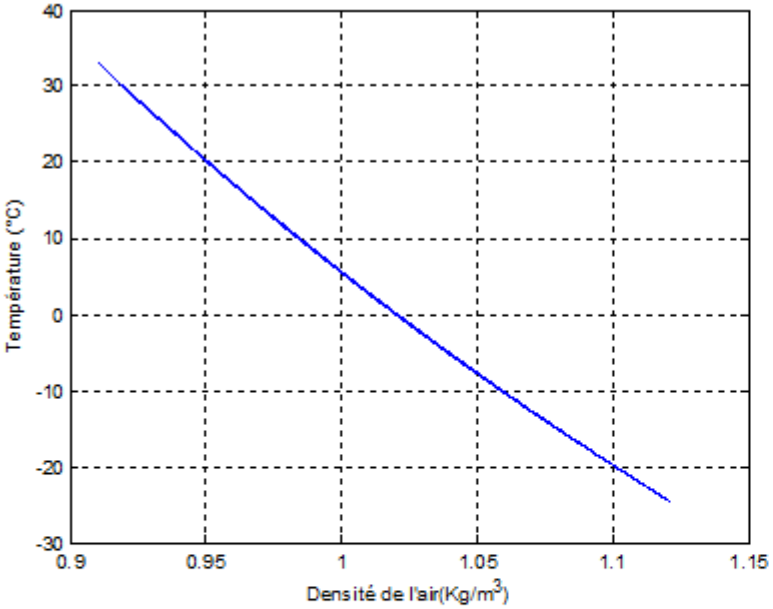
Quelle doit être la précision sur la vitesse moyenne du vent si on veut connaître la puissance captable avec une précision de 33 % ?

Environ 10 %. Cela signifie, par exemple, que pour une vitesse moyenne de 5 m/s +/– 0,5 m/s, la production électrique peut varier de +/– 1/3 en moyenne…

Quel être humain pourrait se vanter de déceler sans instrument une variation de 0,5 m/s dans une vitesse moyenne de vent ?

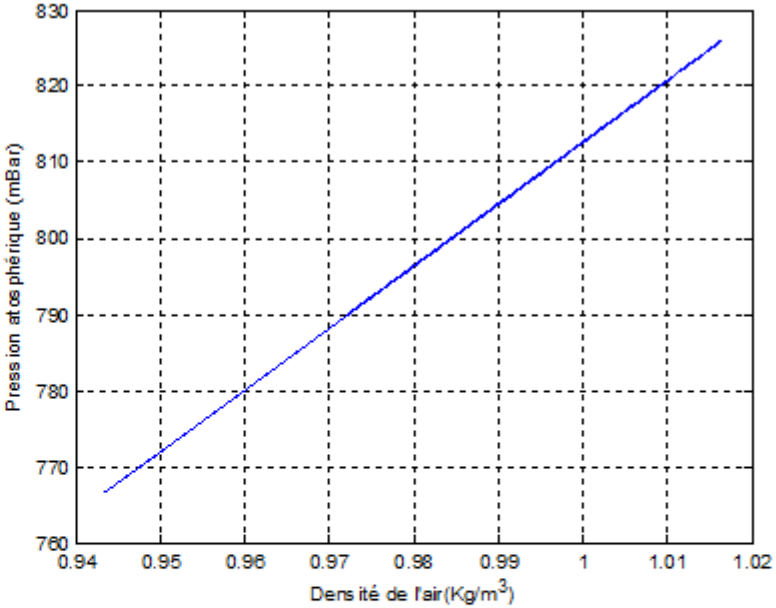
I. Modélisation :

$$\rho = \frac{P}{RT}$$



a)

Evolution de la densité de l'air en fonction de la température à la pression moyenne du site soit 813,5 mBar



b) Evolution de la densité de l'air en fonction de la pression à la température moyenne du site soit 9,3°C

Evolution de la densité de l'air en fonction de la température et de la pression

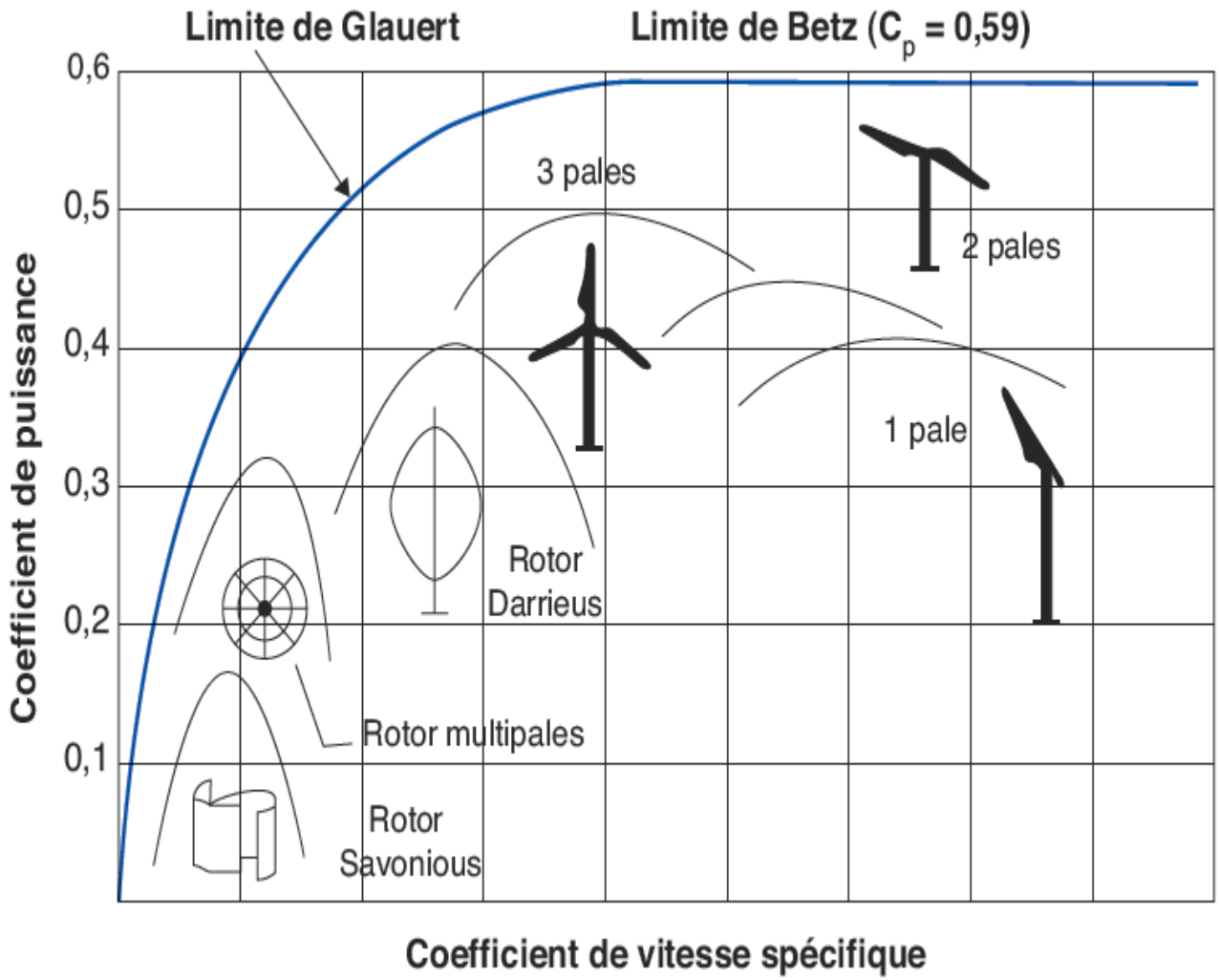
I. Modélisation :

Il est aussi intéressant de connaître, à ce niveau, un facteur clef lié à la conception de l'éolienne : λ, le coefficient de vitesse spécifique de l'éolienne (sans unité). λ représente le rapport entre la vitesse du bout de la pale et celle du vent au niveau de l'axe rotor (on parle aussi de *hub*). On a donc :

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_{hub}}$$

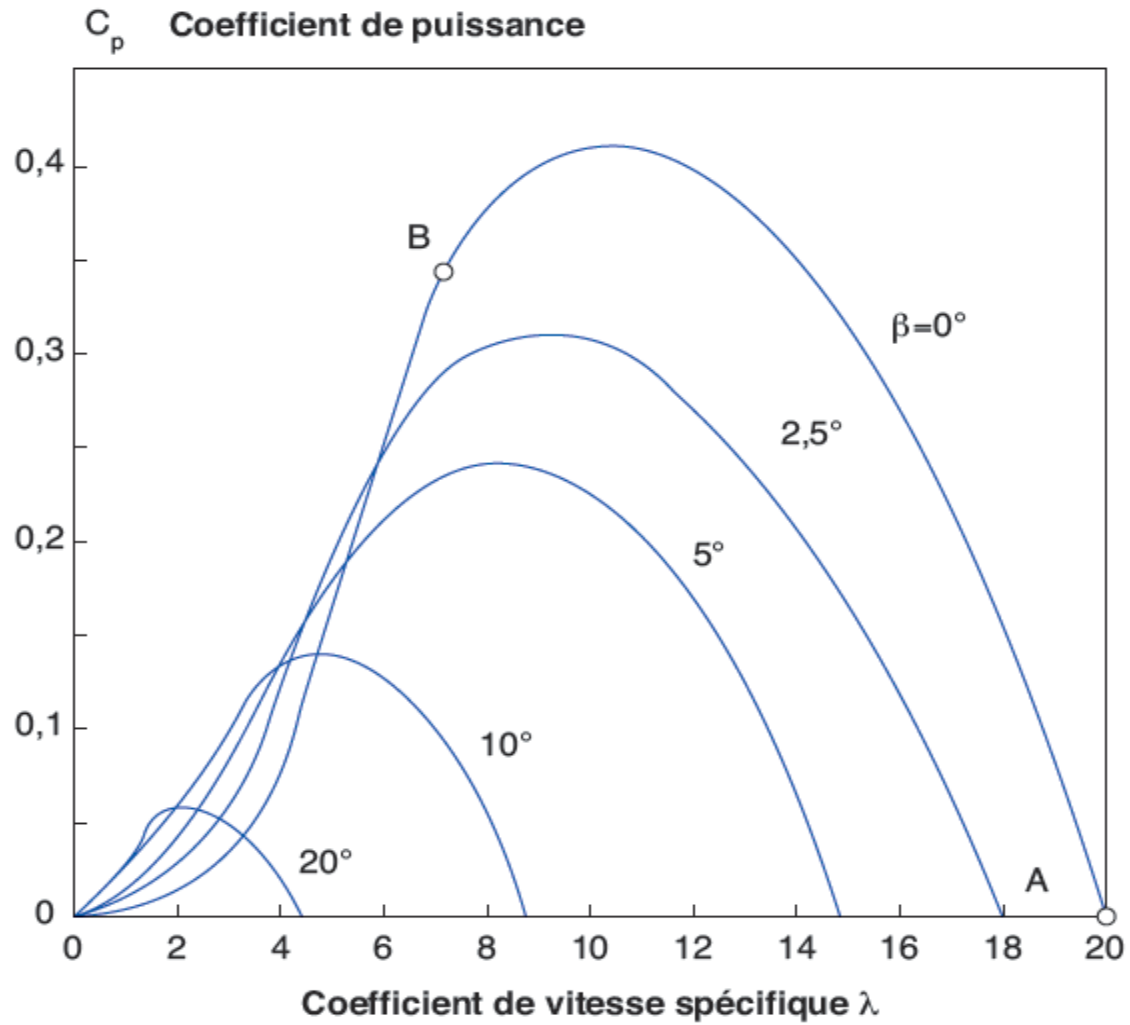
où Ω est la vitesse de rotation et R le rayon, donc la longueur de pale jusqu'au centre du moyeu.

I. Modélisation :



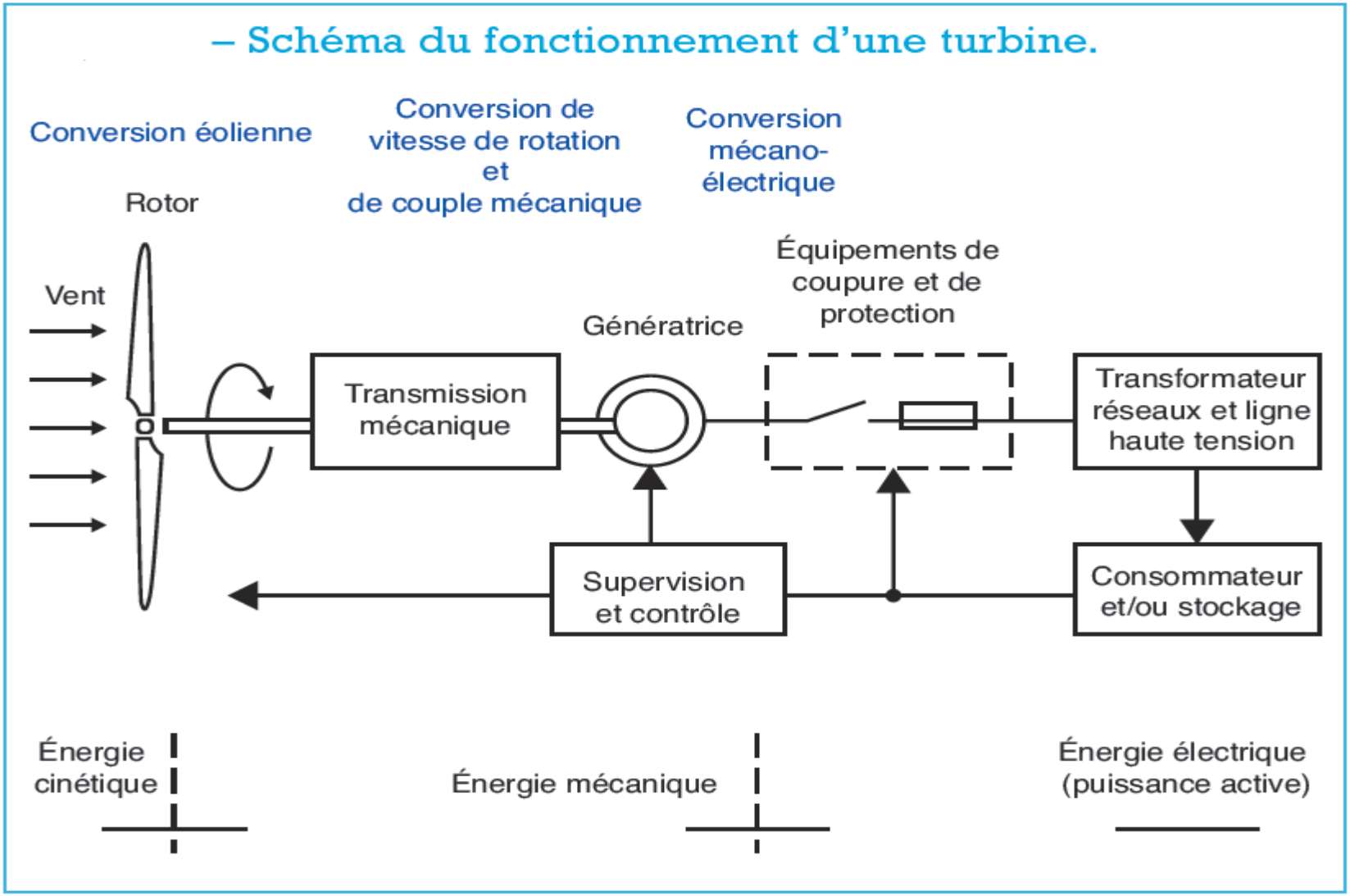
Les courbes des coefficients de puissance obtenues selon le type de machine et selon leur coefficient de vitesse spécifique λ.

I. Modélisation :



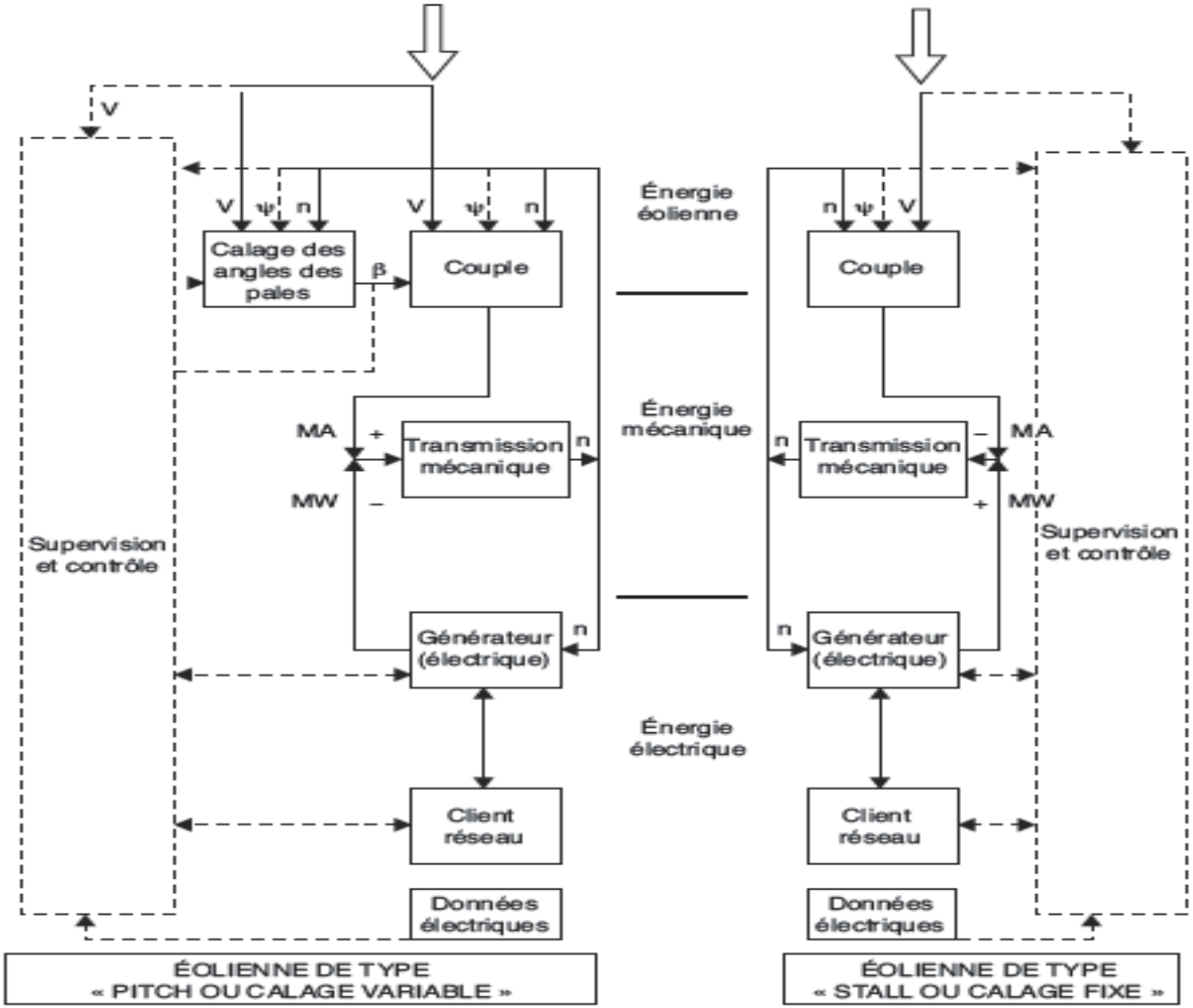
Les courbes des coefficients de puissance obtenues selon l'angle de calage β des pales et selon le facteur de vitesse spécifique λ d'une éolienne type.

II. Configurations et commande



II. Configurations et commande

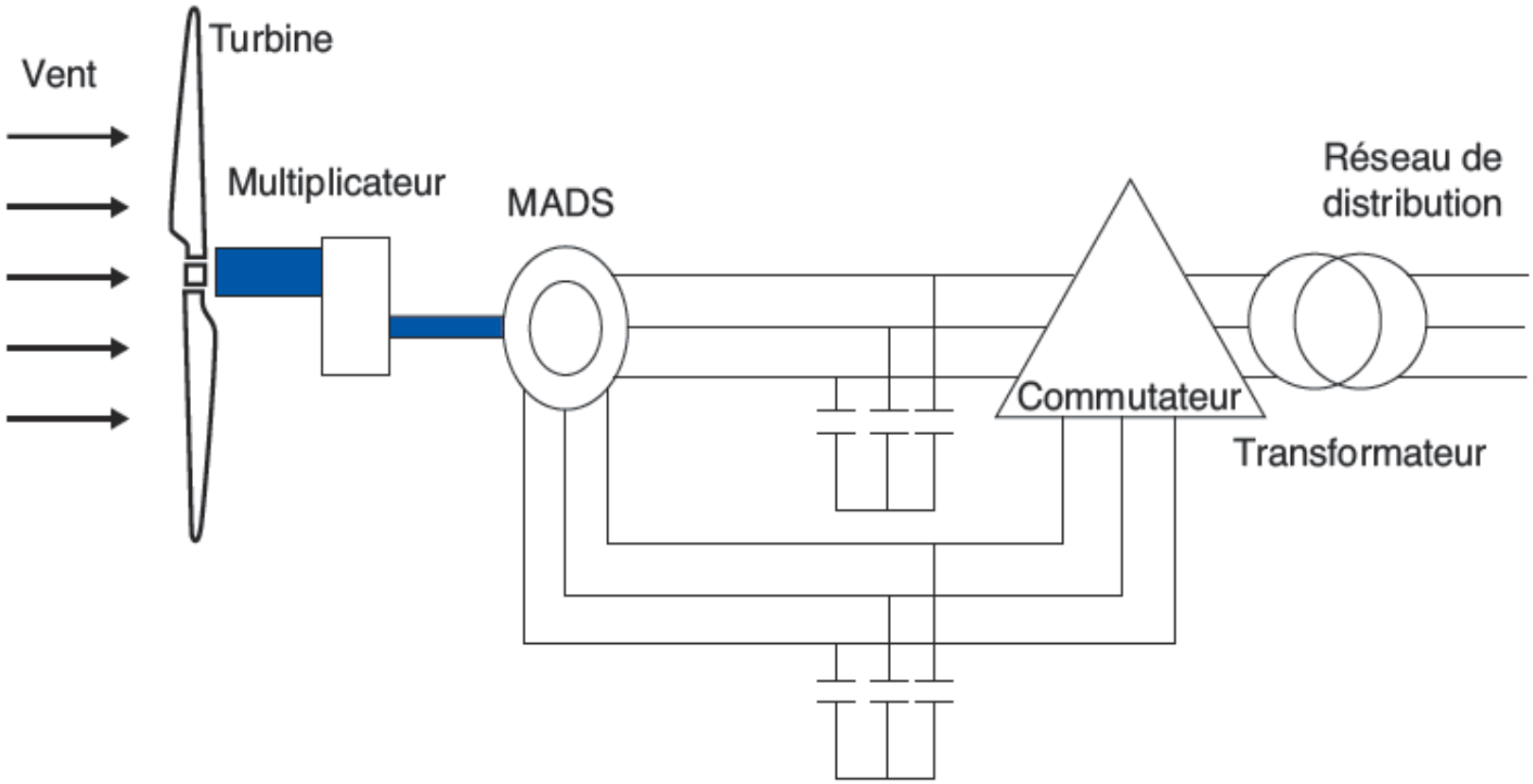
– Structure fonctionnelle d'une éolienne.



MA = Couple Moteur de l'éolienne
Mw = Couple de charge de éolienne
ψ = position des pales
n = Vitesse de rotation rotor
V = Vitesse du vent
β = Calage des pales

II. Configurations et commande

– Schéma de la connexion au réseau de l'éolienne avec une machine asynchrone à double stator.



Le cas particulier du fonctionnement en vitesse fixe et en mode autonome (non relié à un réseau)

Les éoliennes non raccordées au réseau fonctionnent en mode autonome. Elles alimentent des charges isolées avec éventuellement un ou plusieurs groupes électrogènes en appoint. Pour cette configuration, le recours à un système de stockage présente un intérêt significatif en cas de vent faible, notamment en l'absence de groupes électrogènes. Les batteries sont un moyen envisageable de stockage d'énergie à long terme.

D'autres systèmes de stockage peuvent être envisagés, comme le stockage inertiel à court terme. Ce procédé évite l'utilisation de batteries, qui présentent un caractère polluant. L'énergie se présente sous forme d'énergie cinétique stockée dans un volant d'inertie. La génératrice utilisée peut être une machine synchrone à aimants permanents ou une machine asynchrone à cage munie de capacités indispensables pour son excitation.

II. Configurations et commande

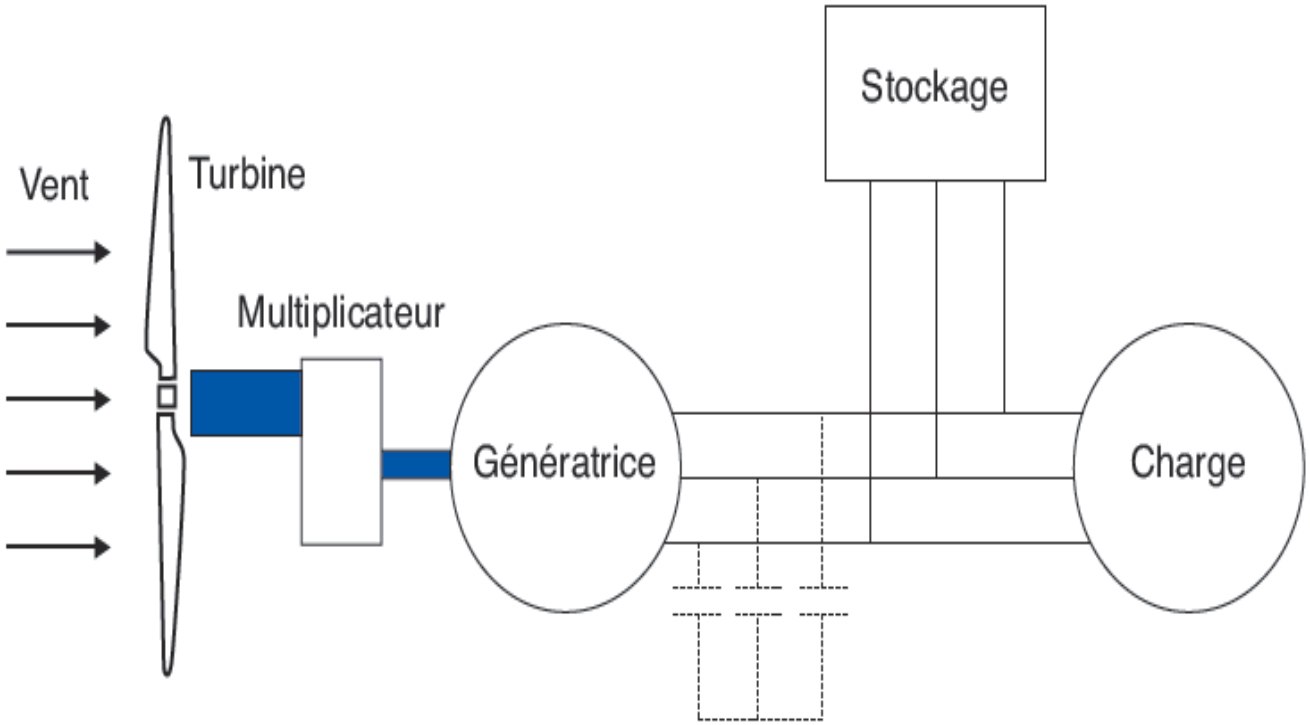
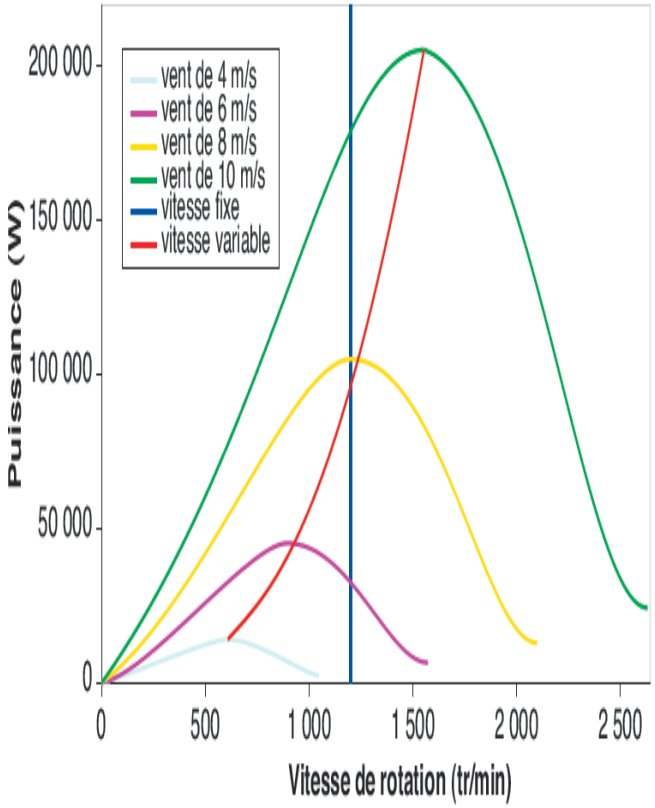


Schéma général en mode autonome pour une petite éolienne à vitesse fixe.

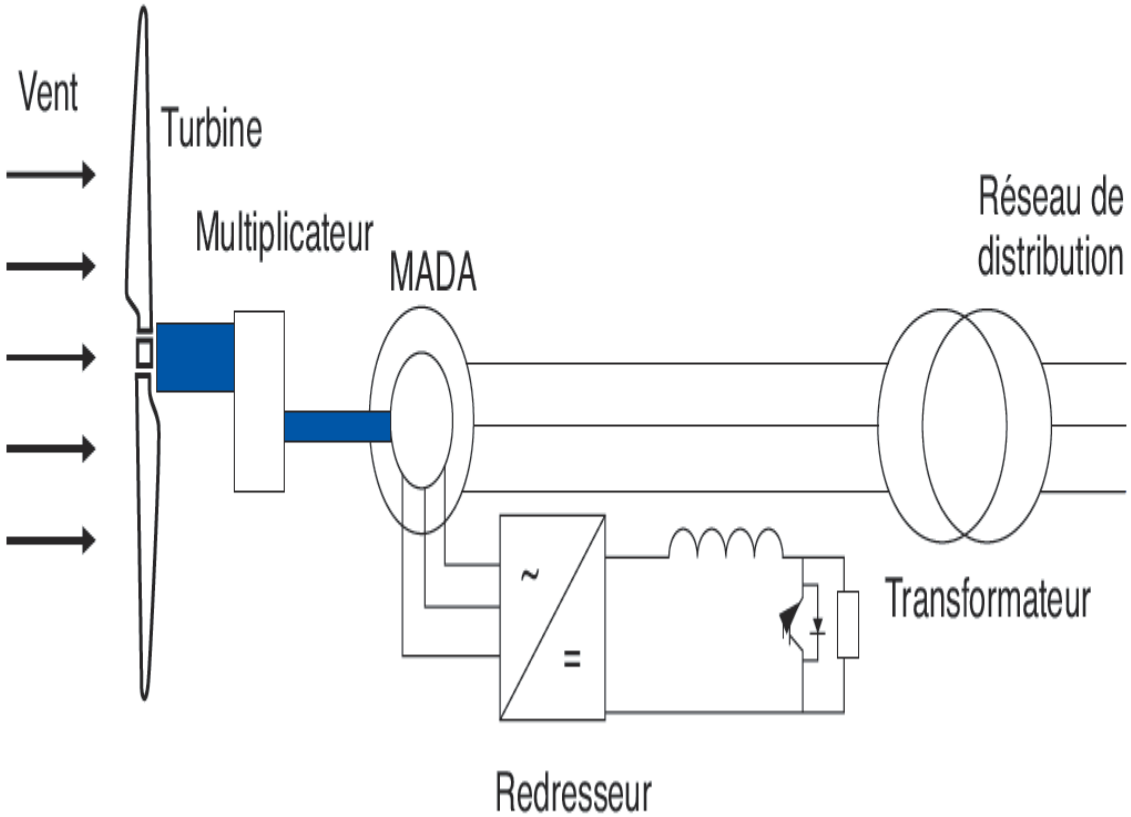
II. Configurations et commande

Cas le plus courant de génératrice asynchrone utilisée en vitesse variable

– Puissance dégagée en fonction de la vitesse de rotation du rotor de la génératrice, pour plusieurs vitesses de vent au niveau du rotor de l'éolienne.

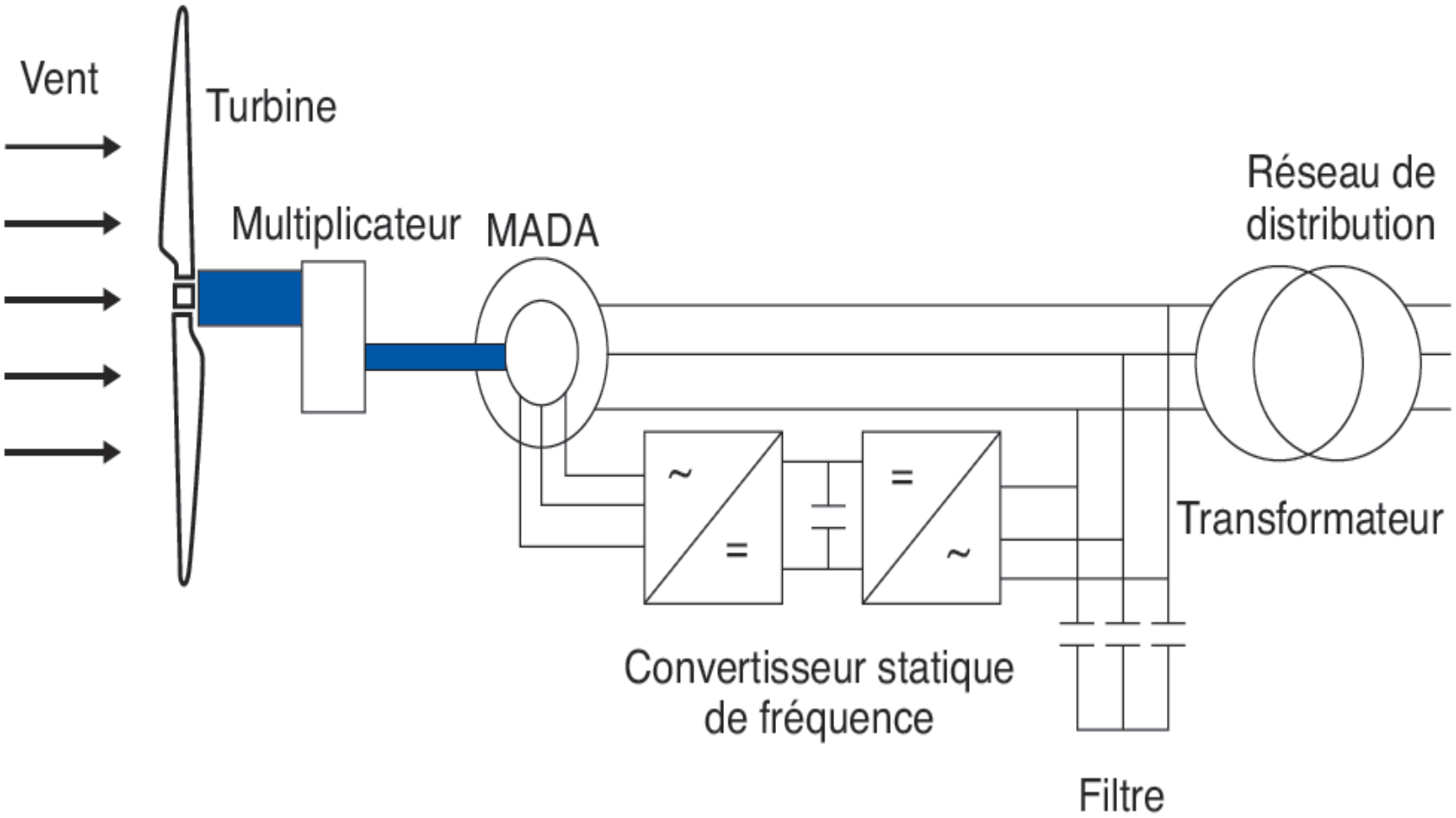


– Schéma de la connexion au réseau d'une éolienne avec machine asynchrone équipée d'une résistance variable.



II. Configurations et commande

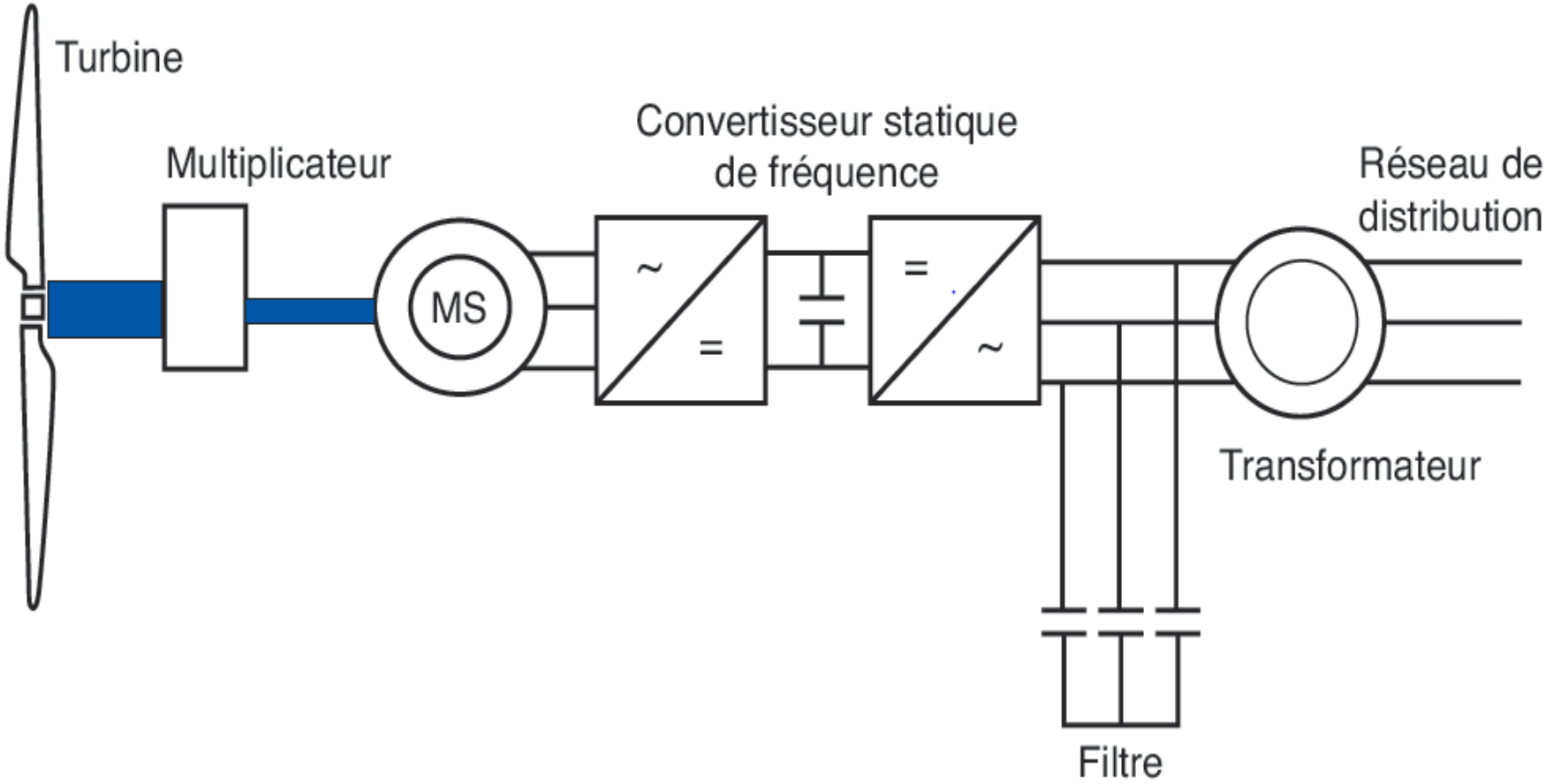
– Schéma d'une machine asynchrone associée à un double convertisseur MLI.



II. Configurations et commande

Cas le plus courant de génératrice synchrone utilisée en vitesse variable

– Schéma d'une machine synchrone associée à un convertisseur statique de fréquence.



II. Configurations et commande

http://www.youtube.com/watch?v=kCYyrkBjdv4&list=PLzIRsteJDlNXnJa1iwXUtqbv50ttUUhR8&feature=share&index=2