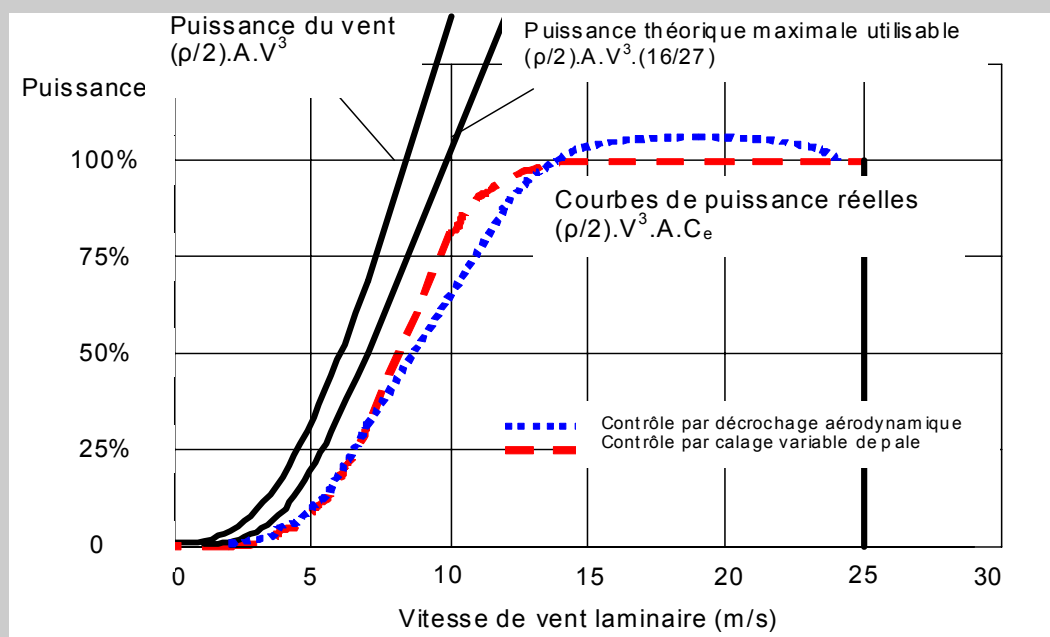


Ton van de Wekken, Fred Wien,
Kema Consulting
Avril 2009



Cogénération et énergies renouvelables

fr.leonardo-energy.org

Table des matières

<u>I. Introduction</u>	4
I.1 Qu'est-ce que l'énergie éolienne ?.....	4
I.1.1 Généralités	4
I.1.2 Principe de base	4
I.1.3 Puissance et rendement	5
I.1.4 Eléments de comparaison basiques entre les méthodes conventionnelles de production d'électricité et les éoliennes	7
I.2 Applications éoliennes	7
I.2.1 Description de situations types où la mise en place de l'éolien est possible ou approprié	7
I.2.2 Coûts de l'énergie éolienne.....	9
I.2.3 Sélection d'un site de production éolien	10
I.2.4 Evaluation des risques du projet	10
I.2.5 Contrôle de puissance d'une turbine éolienne	11
I.2.6 Applications éoliennes et opportunités dans différents secteurs	13
I.2.7 Statut actuel de l'éolien	13
I.2.8 Fabricants de turbines éoliennes	15
I.2.9 Tendances	15
<u>2. Technologies des turbines éoliennes</u>	16
2.1 Technologies	16

Energie éolienne

fr.leonardo-energy.org

2.1.1	Pales et Rotor	17
2.1.2	Nacelle	17
2.1.3	Boîte de vitesse	18
2.1.4	Générateur	18
2.1.5	Système de freinage	19
2.1.6	Dispositif de contrôle	19
2.2	Développements à venir	19
3.	Coûts et bénéfices	21
3.1	Bénéfices de l'éolien	22
3.2	Coûts futurs	22
3.3	Aides et taxes	23
4.	Normes et réglementations	23
4.1	Normes en vigueur, réglementation européenne et directives concernant l'éolien	23
4.2	Nuisances locales	24
4.3	Oiseaux	24
4.4	Poissons	24
4.5	Bruit	25
4.6	Ombres	25
4.7	Intégration dans le paysage	25
5.	Conclusions	26
6.	Références	26

1. Introduction

1.1 Qu'est-ce que l'énergie éolienne ?

1.1.1 Généralités

Les éoliennes représentent une part importante de la production d'énergie renouvelable. Suite à la crise pétrolière européenne des années 70, le développement et la commercialisation des turbines éoliennes ont été fortement encouragés. Depuis lors, l'exploitation des ressources éoliennes est de plus en plus performante et l'industrie éolienne a connu un essor considérable lors de la dernière décennie. Les turbines éoliennes sont de plus en plus puissantes, les rendements et la disponibilité augmentent et les parcs éoliens sont de plus en plus grands.

La consommation énergétique mondiale est en constante augmentation. Dans le but de limiter le réchauffement climatique, la plupart des gouvernements européens ont entrepris des démarches visant à réduire l'émission de dioxyde de carbone. Il est aujourd'hui acquis que ces objectifs ne seront atteints que par réduction des consommations énergétiques et par la mise en place de structures d'exploitation des énergies renouvelables de grande envergure.

Dans ce contexte, les turbines éoliennes présentent une alternative sérieuse. Plusieurs pays européens ont des projets de développement éoliens impressionnants pour les années à venir. Certains gouvernements favorisent ce type d'actions via des aides financières (réduction de taxes ou investissements).

Les pays d'Europe du nord bénéficiant de grandes surfaces côtières fortement ventées et de réseaux électriques puissants et finement maillés offrent des opportunités prometteuses aux investisseurs et aux entrepreneurs de parcs éoliens.

1.1.2 Principe de Base

Les turbines éoliennes produisent de l'énergie en convertissant l'énergie du vent soufflant sur les pales du rotor en énergie mécanique de rotation. Les pales du rotor agissent de façon similaire aux ailes d'un avion. Lorsqu'elles sont soumises au vent, les pales génèrent une force selon le principe de Bernoulli, telle que représentée sur la figure 1 (vue en coupe d'une pale du rotor).

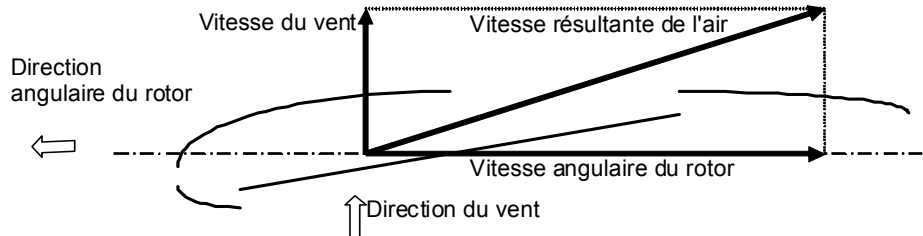


Figure 1 : section en coupe d'une pale de rotor, représentant les vitesses et directions

Du fait de la géométrie particulière de la pale, le flux d'air génère une surpression sur la face située au vent (face inférieure sur la figure 1) et une dépression sur la face située sous le vent (face supérieure sur la figure 1). La différence de pression entre les deux faces résulte en une force de poussée perpendiculaire à la direction de la vitesse résultante du vent, dont les deux composantes sont la vitesse du vent réel et la vitesse angulaire de la turbine en rotation (vent vitesse).

La force de poussée se traduit par un couple mécanique qui, appliqué sur l'arbre du rotor, entraîne un mouvement de rotation du rotor. La puissance disponible sur l'arbre peut être utilisée de différentes façons. Durant de nombreuses années, cette puissance était utilisée pour moulin le grain dans les moulins à vent ou pour pomper de l'eau.

De nos jours, les turbines éoliennes utilisent cette puissance pour produire, grâce à un générateur, de l'électricité.

1.1.3 Puissance et rendement

Les masses en mouvement sont porteuses d'une certaine quantité d'énergie. Cette énergie cinétique est proportionnelle à la masse et au carré de la vitesse. La puissance s'exprime comme l'énergie par unité de temps.

L'énergie cinétique par seconde est :

$$P = 1/2.m.V^2$$

- P** : puissance (Nm/s ou watts)
- m** : masse de l'air par seconde (kg/s)
- V** : vitesse du vent (m/s)

Cogénération et énergies renouvelables

fr.leonardo-energy.org

Cette loi peut être appliquée à l'air en mouvement. La masse d'air brassée par le rotor peut être vue comme un disque cylindrique, dont la surface est égale à celle du rotor et la longueur est égale à la vitesse du vent.

La masse d'air traversant le rotor par seconde est :

$$m = \rho.A.V$$

ρ : densité de l'air (kg/m^3)

A : surface du rotor (m^2)

V : vitesse du vent (m/s)

En combinant ces deux formules, il est possible d'exprimer la puissance en fonction de la vitesse du vent :

$$P = C_p.1/2.\rho.A.V^3$$

C_p : Coefficient de puissance mécanique

Par exemple :

Pour une vitesse de vent de 6 m/s, la quantité de puissance disponible est de 132 W/m². Si la vitesse du vent augmente à 12 m/s, la puissance passe alors à 1053 W/m². Ce qui revient donc à dire qu'en multipliant par 2 la vitesse du vent, on multiplie par 8 la puissance disponible.

Toute l'énergie du vent ne peut pas être convertie en énergie mécanique disponible sur l'arbre. Il est possible de démontrer mathématiquement que le rendement maximal théorique est limité à 59 % environ.

Cette limite est exprimée par le coefficient de puissance : C_p .

La puissance électrique « nette » disponible en sortie est de :

$$P_{elec} = C_e.1/2.\rho.A.V^3$$

C_e : Rendement électrique (%)

Les turbines actuelles ont des rendements totaux nets (C_e) de 42 à 46 % prenant en compte un tube de vent incident non perturbé d'une section égale à la surface du rotor (alimentation en vent optimale du rotor).

1.1.4 Éléments de comparaison basiques entre les méthodes conventionnelles de production d'électricité et les éoliennes

Il y a plusieurs raisons au succès des éoliennes ces dernières années. En comparaison aux méthodes de production conventionnelles, les éoliennes produisent une énergie « propre ». En exploitation, les turbines ne rejettent pas de dioxyde de carbone dans l'air ni de pollution dans l'eau ou dans le sol.

Les autres avantages du « combustible éolien » sont sa gratuité, sa permanence, et son abondance. L'éolien est basé sur un concept de modularité (voir les autres guides introductifs de la section 8), ce qui facilite sa mise en œuvre, et est indépendant de l'importation de combustibles et des fluctuations des prix du pétrole dues aux politiques pétrolières.

Les turbines éoliennes modernes sont fiables et de disponibilité d'exploitation élevée (pourcentage du temps pendant lequel la turbine est disponible pour assurer la production d'électricité) de l'ordre de 98 %. Aucun autre mode de production d'électricité à une disponibilité d'exploitation aussi élevée.

L'inconvénient majeur de l'éolien est la non prédictibilité des vents. Les fronts orageux peuvent être source de bourrasques violentes et les accalmies empêchent la production d'électricité.

Transporter l'énergie produite par les éoliennes sur le réseau électrique est plus difficile qu'il n'y paraît et il est essentiel qu'une part importante d'énergie électrique provienne de centrales de production conventionnelles plus « stables ». Cette part dépend de la constitution et de la stabilité du réseau.

Il est possible de limiter les instabilités d'un réseau électrique en utilisant des systèmes de contrôle intelligents permettant d'interfacer les différents types d'unités de production, les consommateurs et les réseaux intermédiaires.

Des recherches sur le sujet sont menées par les entreprises de distribution électrique et des associations indépendantes européennes.

1.2 Applications éoliennes

1.2.1 Description de situations types où la mise en place de l'éolien est possible ou est approprié

La quantité d'énergie produite par la turbine dépend de la taille et du type de la turbine, ainsi que de l'endroit où se situe la turbine. La figure 2 représente la caractéristique de puissance de sortie d'une turbine en fonction de la vitesse du vent. A petite vitesse, la

Cogénération et énergies renouvelables

fr.leonardo-energy.org

production d'énergie est impossible. A partir de force 2 Beaufort (3 m/s environ), la turbine est entraînée et à force 6 Beaufort (12-13 m/s) environ, la turbine fournit son maximum de puissance.

Pour des vitesses de vent supérieures à 25 m/s, les anciennes générations de turbines éoliennes étaient conçues pour s'arrêter progressivement afin de ne pas occasionner de surcharge ou de causer des dégâts structurels. Les turbines modernes sont équipées d'un « contrôle à calage variable de pale » dont la fonction est de changer l'angle d'attaque au vent des pales du rotor en cas de vents trop violents. Il devient alors possible de garantir la production d'électricité même lorsque les conditions météo sont défavorables. Toutefois, il est toujours indispensable d'arrêter les turbines en cas de tempête.

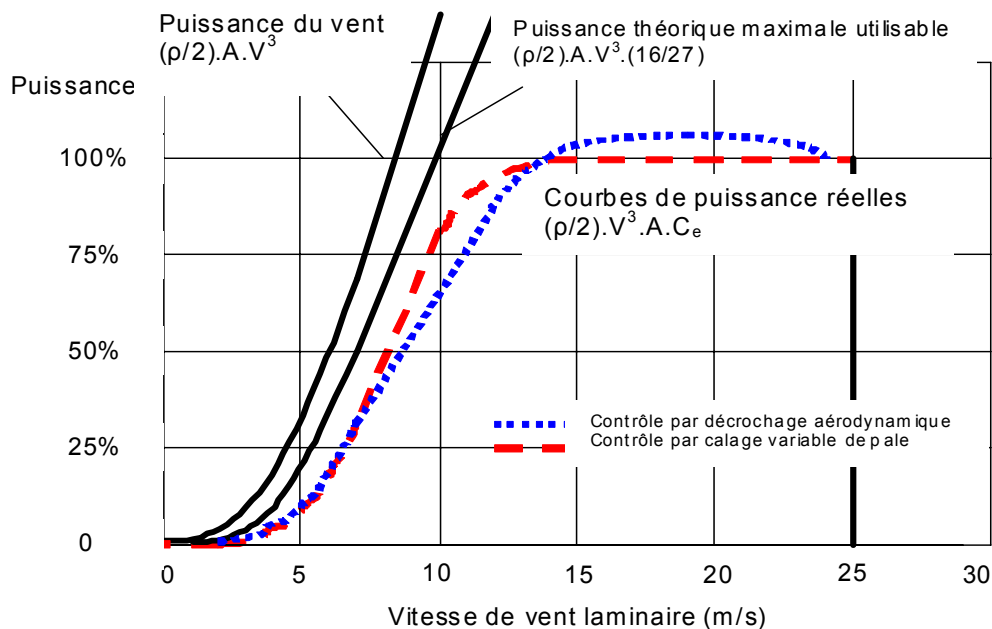


Figure 2 : caractéristiques types d'une turbine éolienne, puissance de sortie en fonction de la vitesse du vent

Une turbine moyenne idéalement située peut produire une puissance moyenne annuelle de 850 kWh/m² de surface de rotor. Une autre règle approximative permettant d'estimer la production énergétique annuelle d'une turbine éolienne est de prendre en compte un équivalent de 2000 heures de production à pleine charge pour un site moyennement venté et 3000 heures pour un site fortement venté.

Par exemple, une turbine de 1,5 MW produira en moyenne 3 106 MWh, soit un équivalent de 2 000 heures à 1,5 MW.

1.2.2 Coûts de l'énergie éolienne

Si l'on ne prend pas en compte les avantages fiscaux et autres aides liées à la production d'énergie renouvelable, les coûts de l'énergie éolienne sont résumés sur le tableau 1 :

Analyse des coûts de production d'énergie éolienne	2 000 heures à pleine charge [EUR/MWh]	2 500 heures à pleine charge [EUR/MWh]
Investissement (emprunt à 4 % sur 12 ans)	40 à 50	30 à 40
Coût de maintenance et d'exploitation incluant les principales révisions	12	12
Autres dépenses d'exploitation	8	8
Total	60 à 70	50 à 60

Tableau 1 : répartition du coût de production de l'énergie éolienne

Les "Autres dépenses d'exploitation" prennent en compte la gestion quotidienne, les assurances, le bail, les indemnités pour nuisances sonores et/ou visuelles et les taxes.

Les coûts de l'énergie éolienne sont actuellement plus élevés que les tarifs appliqués pour l'énergie électrique produite à partir de combustibles fossiles ou par les centrales nucléaires.

Toutefois, la plupart des pays européens ont mis en place des aides pour favoriser la production d'électricité d'origine renouvelable, incluant l'éolien. Bien que chaque pays ou état appliquent ses propres règles, on observe certaines similarités :

- avantages fiscaux pour les investissements dans des projets éoliens ;
- subventions pour l'installation de nouvelles structures d'exploitation d'énergie renouvelable ;
- taux d'intérêts avantageux pour le financement de projet d'exploitation d'énergie renouvelable ;
- aides pour la production (kWh) d'énergie renouvelable (éolienne).

Les diverses aides contribuent à faire de l'investissement éolien un placement rentable. Par le passé, il n'était pas rare de constater des taux de rentabilité égaux à 50 % du coût d'investissement. Pour un tarif pratiqué compris entre 80 et 100 €/Mwh (incluant les différentes aides), le temps de retour d'investissement est compris entre 6 ans (>2700 heures de production à pleine charge) et 10 ans (>1 900 heures de production à pleine charge).

1.2.3 Sélection d'un site de production éolien

Les critères de choix d'un site éolien doivent favoriser les sites suffisamment grands, l'accessibilité pour les équipements de manutention (grues et camions), la limitation des nuisances pour le voisinage, ainsi que la proximité d'une sous-station moyenne tension de puissance suffisante. Toutefois, le critère essentiel reste bien entendu la présence de vent sur le site.

En première approche, investisseurs et promoteurs peuvent utiliser l'Atlas Européen des vents [Réf 2] pour estimer les vitesses de vent sur le long terme. D'autres informations peuvent être obtenues auprès des stations météorologiques situées dans le voisinage (30 à 40 km) du site envisagé. Si d'autres parcs éoliens se situent dans un voisinage proche (à moins de 10 km environ), les informations de production de ces parcs constituent un point de départ intéressant.

Plus les informations concernant les vitesses de vent sont précises et plus il est possible de prédire la production énergétique du site. Des logiciels tels que WasP sont spécialisés dans ce type de calcul mais nécessitent de connaître les distributions des vitesses de vent au long terme pour au moins 3 stations météorologiques situées dans le voisinage. Plus les stations météorologiques sont proches du site envisagé et plus les résultats fournis par le logiciel sont précis.

Les données concernant le relief du site doivent ensuite être renseignées pour connaître les vitesses de vent en chaque point du site en fonction du relief.

Pour des terrains très accidentés, vallonnés ou montagneux, il peut être nécessaire d'installer des anémomètres sur le site pour affiner les données. Ces mesures doivent être menées sur une période d'au moins un an et si possible de deux ans.

1.2.4 Évaluation des risques du projet

Le risque majeur encouru est de voir que les ressources en vent du site s'avèrent plus faibles que prévues pendant la phase de faisabilité. Du fait de la proportionnalité entre puissance disponible en sortie et valeur au cube de la vitesse du vent, une baisse, même faible, de la vitesse du vent aura pour effet de réduire fortement la production énergétique. En cas de baisse de production significative (de 10 à 15 %) le retour d'investissement peut être de 12 à 15 ans au lieu des 10 prévus et mettre en péril la rentabilité globale du projet.

Il est donc recommandé de prendre en compte dans les calculs économiques et financiers des vitesses moyennes de vent légèrement inférieures aux valeurs réellement attendues.

Par exemple, plutôt que de considérer des vitesses de vent ayant une probabilité d'être dépassée de 50 %, il est recommandé de se baser sur des vitesses de vent plus faibles ayant des probabilités d'être dépassées plus importantes (80 à 90 % par exemple).

En procédant ainsi, on s'assure que, sur une période totale de 10 ans, les vitesses de vent sont sous-estimées pour 8 à 9 années, et donc de garantir la production énergétique.

Les critères suivants doivent être respectés lors de l'installation d'une turbine éolienne :

- beaucoup d'espace autour de la turbine et beaucoup de vent, tout en évitant la présence d'obstacles dans le voisinage (collines, bâtiments hauts, etc.) ;
- autorisation d'exploitation d'un parc éolien sur le territoire. En pratique, toute zone répertoriée comme zone industrielle peut être retenue. Pour toutes les autres zones, il est nécessaire de procéder à un changement du plan d'urbanisme ou d'aménagement local ;
- l'endroit doit être suffisamment accessible. L'installation de la turbine nécessite l'utilisation de grues dont l'accès doit pouvoir être garanti ;
- la connexion de la turbine au réseau électrique doit être possible. Le niveau de tension au point de raccordement peut être de 10 à 30 kV. Pour un parc éolien de forte puissance il convient d'effectuer le raccordement au niveau de tension du réseau de transport. Pour plus de détails, se référer au guide « Intégration et Interconnexion » du Guide Power Quality (en téléchargement sur notre site internet).

1.2.5 Contrôle de puissance d'une turbine éolienne

Nous avons montré, dans le chapitre précédent, que la puissance en sortie de la turbine augmente comme le cube de la vitesse du vent. La plupart des turbines atteignent leur maximum de puissance pour des vitesses de vent de 12 à 14 m/s. Pour des vitesses de vent plus élevées, la puissance doit être maintenue constante pour ne pas surcharger la structure de la turbine ou la connexion électrique.

Il existe plusieurs technologies pour contrôler la puissance pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale :

1. Contrôle par décrochage aérodynamique

La vitesse de rotation du rotor est maintenue constante et le générateur asynchrone est directement connecté au réseau électrique public (50 ou 60 Hz), sans variateur de fréquence interfacé. Plus la vitesse de vent augmente et plus l'angle d'attaque du flux d'air incident sur les pales diminue. Passé un certain seuil (angle de décrochement), l'angle d'attaque devient trop faible et la pale

Cogénération et énergies renouvelables

fr.leonardo-energy.org

décroche, ce qui a pour effet de stabiliser (voire même de réduire) la force de poussée et donc le couple sur l'arbre moteur. Cette méthode présente l'avantage d'être particulièrement simple et de ne nécessiter aucun système mécanique ou électronique complexe.

Dans les années 80 et 90, ce système de contrôle de puissance était largement utilisé, notamment par les fabricants de turbines danois qui ont ainsi acquis une grande expérience dans le domaine

De nos jours, cette méthode de contrôle est de moins en moins mise en œuvre. La raison principale de cet abandon étant que sur les turbines de forte puissance (> 1 MW), on voit apparaître des phénomènes de résonance sur les pales du rotor et la chaîne de transmission; ainsi que la médiocre qualité de l'énergie produite par ce type de turbine

2. Rotors à vitesse variable

Bien que connu et appliqué depuis les années 80, ce n'est que vers la fin des années 90 que ce concept a été mis en œuvre à grande échelle. La vitesse du rotor est variable et augmente proportionnellement à la vitesse du vent. Une fois la vitesse du rotor correspondant à la puissance nominale atteinte, la puissance est maintenue constante par modification de l'orientation des pales par rapport à l'axe du vent. Lorsque l'angle d'attaque des pales à la direction du vent est diminuée, cela a pour effet de réduire la force de poussée et le couple sur l'arbre moteur.

Le générateur synchrone est raccordé au réseau via un convertisseur de fréquence.

L'avantage de cette technologie est d'être compatible avec les éoliennes de forte puissance (MW) sans engendrer de phénomènes de résonance mécanique. Le contrôle par orientation des pales, associé à d'autres méthodes de contrôle modernes, permet d'améliorer les rendements et donc de minimiser les puissances mises en jeu.

De plus, les technologies modernes d'électronique de puissance (convertisseurs à IGBT ou à IGCT) permettent d'améliorer fortement la qualité de l'énergie électrique produite.

3. Solutions intermédiaires

Plusieurs méthodes de contrôle ont été mises en place ces vingt dernières années, à mi-chemin entre l'une et l'autre des méthodes présentées ci-dessus, dont la méthode dite de « régulation active par décrochage ». Cette méthode combine la méthode de décrochage avec vitesse de rotor constante, et le

contrôle de l'angle d'attaque des pales pour améliorer les caractéristiques dynamiques de la turbine.

Une autre méthode est la combinaison de la méthode de décrochage et d'un variateur de fréquence interfacé pour améliorer la qualité de l'énergie électrique produite.

Des détails complémentaires sont fournis dans le document portant la référence [1].

1.2.6 Applications éoliennes et opportunités dans différents secteurs

Le propriétaire ou exploitant d'une turbine éolienne vend l'électricité produite à l'exploitant du réseau de distribution électrique local. Plusieurs barèmes de prix ont été mis en place pour réguler le marché de l'énergie électrique au sein de l'Union Européenne. Les propriétaires ou exploitants sont des :

- personnes morales ou entreprises privées : le financement est privé, provenant de fonds propres ou d'emprunts. Des régulations fiscales spécifiques s'appliquent aux entreprises.
- coopératives : plusieurs personnes morales créent une structure légale pour exploiter une turbine éolienne ou un parc éolien, selon un système d'actionnariat.
- gestionnaires de réseau : la puissance des turbines ne cessant de croître, de plus en plus de distributeurs investissent dans des projets éoliens. Ces structures sont particulièrement intéressées par les projets de très fortes puissances, notamment les parcs éoliens offshore.

1.2.7 Statut actuel de l'éolien

La commercialisation des turbines éoliennes a commencé dans les années 80, avec la technologie danoise en tête. Les premières unités avaient des puissances de 40-60 kW pour des diamètres de 10 m. Les turbines actuelles ont des puissances allant jusqu'à 5 MW pour des diamètres de 120 m.

Des améliorations constantes ont été apportées aux turbines pour capturer le plus d'énergie possible. Le dynamisme de ce secteur a généré un grand nombre d'emplois en Europe. Au Danemark par exemple, le nombre de personnes employées directement et indirectement dans ce secteur est passé de 2 900 en 1991 à plus de 21 000 en 2002.

D'après les estimations du scénario EWEA « Wind Force 12 », le nombre d'emplois dans

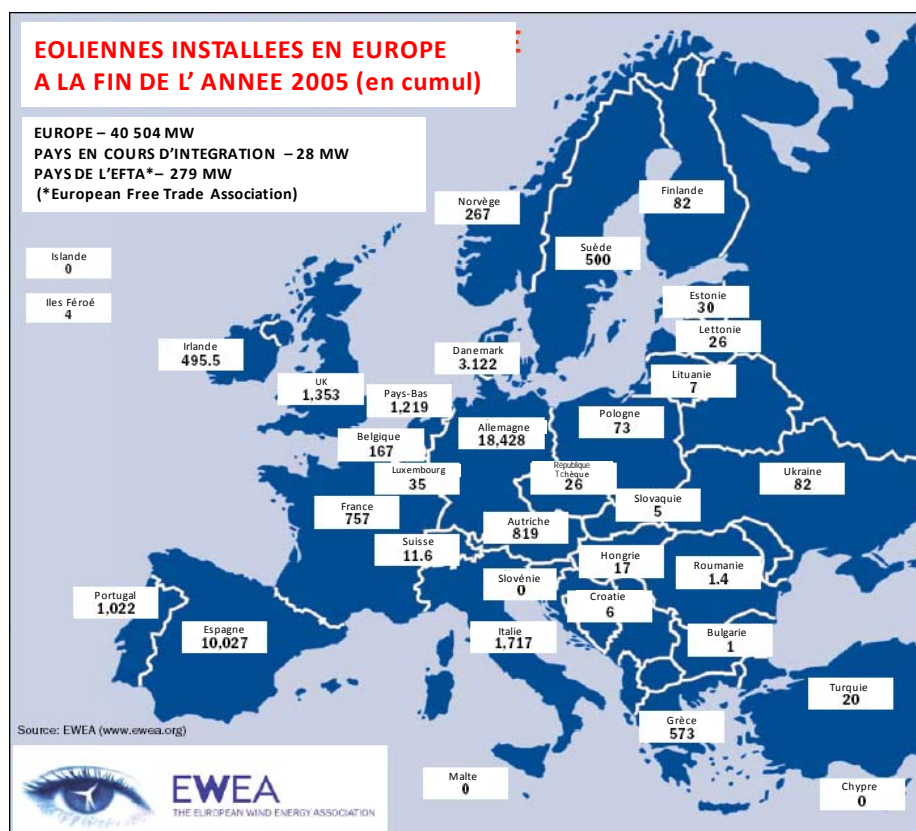
Cogénération et énergies renouvelables

fr.leonardo-energy.org

le secteur de l'éolien pourrait être de 200 000 en 2020.

Les autres faits marquants du secteur éolien mondial et européen sont :

- fin 2005, la puissance mondiale totale installée était de 60000 MW ;
- ces dernières années, le taux de croissance de la puissance éolienne mondiale annuel moyen était de 25 % environ, avec 7500 MW installés en 2004 et 11600 MW en 2005 ;
- en majorité de 60 à 704 ;
- 15 000 MW devraient être installés d'ici la fin de 2006 ;
- après l'Europe, les USA, la Chine et l'Inde sont les pays les plus actifs dans le domaine de l'éolien ;
- entre 1992 et 2002 la puissance éolienne a été multipliée par 27 en Europe ;
- les pays européens leaders dans le domaine éolien sont : l'Allemagne, l'Espagne, le Danemark, et les Pays-Bas, qui détiennent 84 % de la totalité de la puissance installée en Europe. Les pays émergents sont l'Autriche, l'Italie, le Portugal, la Suède, et le Royaume Uni. Les 10 états membres ayant rejoint l'Union Européenne en mai 2004 ont aussi adopté des objectifs pour augmenter leur production d'énergie d'origine renouvelable ;
- l'année passée, le chiffre d'affaires en Allemagne pour l'industrie éolienne était de 4,2 milliards d'euros.



1.2.8 Fabricants de turbines éoliennes

Le marché mondial de la fabrication d'éoliennes est dominé par une poignée de grands fabricants, dont les 10 leaders détiennent 95 % du marché pour la production et l'installation (voir figure 4).

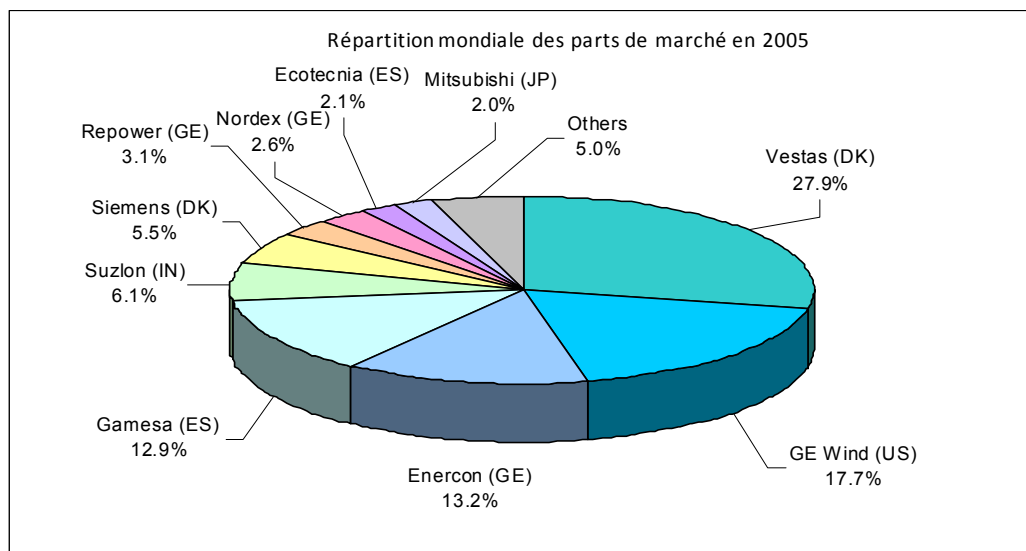


Figure 4 : répartition mondiale des parts de marché par fabricants de turbines éoliennes (production et installation)

Le leader du marché est incontestablement Vestas Wind Systems (VWS), dont la part de marché est de 30 %. Depuis l'an 2000, la tendance favorise les grandes multinationales spécialisées dans les équipements de production d'énergie étendant leur activité à l'éolien. Les exemples sont Mitsubishi, GE et Siemens, et Bonus au Danemark.

1.2.9 Tendances

Trois tendances économiques et technologiques majeures se dessinent concernant les turbines connectées au réseau électrique :

- **Les turbines sont de plus en plus puissantes et grosses**

La puissance moyenne des turbines installées en Allemagne et au Danemark est passée de 200 kW en 1990 à 1,5 MW en 2002. Les turbines de 1,5 à 2,5 MW ont plus que doublé leurs parts du marché global, passant de 16,9 % en 2001 à 35,3 % en 2003.

Cogénération et énergies renouvelables

fr.leonardo-energy.org

- **Les coûts d'investissement sont de moins en moins importants**

Le coût moyen par kW de puissance installée varie de 900 €/kW à 1 200 €/ kW. La turbine compte pour 80 % de ce coût total. Les 20 % incluent les fondations, l'installation électrique et le raccordement au réseau. Les autres coûts sont alloués au terrain, à la construction des routes, à l'assistance technique et aux coûts financiers.

- **L'efficacité des turbines ne cesse de croître**

L'augmentation de la taille des turbines, la performance des composants et de meilleurs emplacements ont permis d'augmenter l'efficacité globale de 2 à 3 % ces dernières années.

En plus des tendances listées ci-dessus, on voit apparaître de plus en plus de parcs éoliens offshore de forte puissance. Par le passé, les parcs éoliens offshore n'étaient que des versions marines adaptées (protection spécifique contre l'agressivité du sel notamment) des parcs éoliens terrestres.

Les nouvelles générations d'éoliennes offshore bénéficient aujourd'hui de technologies spécifiques telles que des vitesses périphériques de rotor plus élevées et des équipements intégrés pour les travaux de maintenance. Les turbines doivent être fermement arrimées au sol. Des kilomètres de câbles doivent être tirés entre chaque turbine et vers la terre pour alimenter le générateur de puissance connecté au réseau.

Afin de garantir la fiabilité des turbines, il est important de procéder à une maintenance efficace des turbines. Un tel service de maintenance nécessite l'utilisation de bateaux pouvant transporter les équipes de maintenance sur les plate-formes, même dans des conditions météorologiques défavorables.

Fin 2003, l'équivalent de 600 MW d'éolien offshore était en exploitation le long des côtes européennes, et plus particulièrement au Danemark, en Suède, au Pays-Bas et au Royaume-Uni.

2. Technologies des turbines éoliennes

2.1 Technologies

Si le principe de base des turbines éoliennes est resté inchangé, à savoir une double conversion énergétique (énergie cinétique du vent, énergie mécanique sur l'arbre et énergie électrique), les technologies mises en œuvre ont, quant à elles, énormément évolué ces deux dernières décennies. Les composants ayant subi les plus fortes évolutions sont :

- le rotor, dont la fonction est de convertir l'énergie cinétique du vent en couple mécanique,
- le générateur, dont la fonction est de convertir le couple mécanique en électricité pour alimenter le réseau.

Bien que simple en apparence, la turbine éolienne constitue un système complexe faisant appel aux domaines de l'aérodynamique, de la mécanique, de l'électricité et de l'ingénierie de contrôle.

2.1.1 Pales et Rotor

Les turbines modernes comptent parfois deux et, plus fréquemment, trois pales. Les pales sont fabriquées en polyester renforcé par de la fibre de verre ou de la fibre de carbone. On trouve dans le commerce des pales allant de 1 à plus de 100 mètres. Les pales sont montées sur un moyeu en acier. Certaines pales sont montées sur un dispositif permettant de faire varier l'angle d'attaque au vent.

2.1.2 Nacelle

La nacelle est la salle des machines de la turbine. La nacelle repose sur le mat et peut s'orienter pour placer le rotor perpendiculairement à la direction du vent. Ce système d'orientation est entièrement automatique et contrôlé par une girouette située sur la nacelle. La salle des machines est accessible depuis le mat et contient les éléments principaux : paliers, boîte de vitesse, générateur, freins et système de rotation, ainsi que la chaîne de transmission permettant de transmettre le couple rotor à la boîte de vitesse.

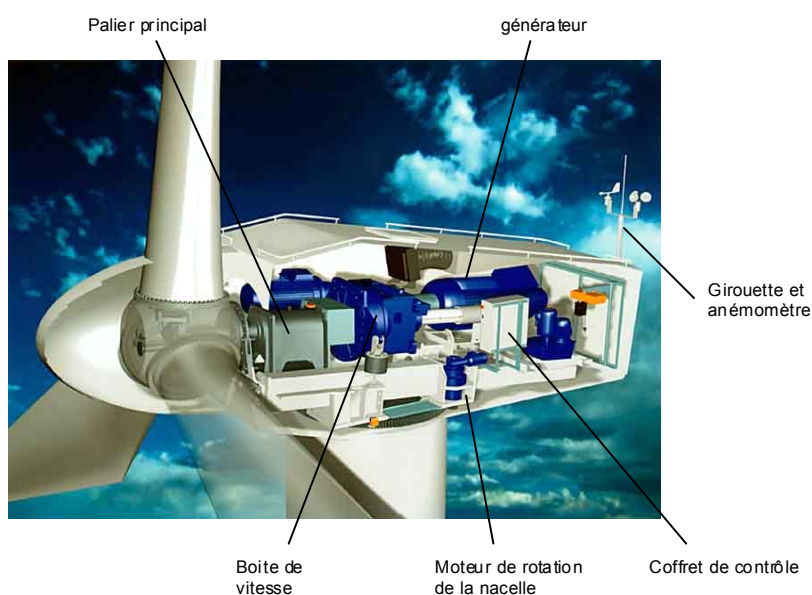


Figure 5 : vue en coupe d'une nacelle de turbine éolienne

2.1.3 Boîte de vitesse

La boîte de vitesse permet d'augmenter la vitesse de rotation du moyeu à la vitesse de rotation du générateur. Une turbine d'une capacité de 1 MW avec un rotor de 52 m de diamètre tourne à la vitesse de 20 tours/minute, alors que le générateur tourne à 1 500 tours/minute. Le rapport de transmission de la boîte est alors égal à $1\,500/20$ soit 75.

2.1.4 Générateur

Il existe trois principaux types de turbines éoliennes, dont les différences principales concernent la technologie du générateur et la méthode de contrôle mise en œuvre pour prévenir les risques de surcharge en cas de vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale. Les différentes technologies de générateur sont :

- le générateur à cage d'écureuil
- le générateur à rotor bobiné à double alimentation
- le générateur synchrone à transmission directe

Générateur asynchrone à cage d'écureuil : du fait de la différence de vitesse entre les vitesses de rotation du rotor et du générateur, il est nécessaire de les interfacer par une boîte de vitesse. Les enroulements statoriques sont connectés au réseau. Ce concept ne peut fonctionner que si la vitesse de rotation du rotor est constante (en pratique, des variations de l'ordre de 1 % sont tolérées). Le générateur à cage d'écureuil présente l'inconvénient de consommer de la puissance réactive sur le réseau. Il est alors nécessaire de relever le facteur de déplacement par des batteries de condensateurs.

Les deux autres technologies de générateur autorisent des variations de vitesse du rotor (facteur 2 entre les vitesses maximales et minimales environ). Il convient pour cela de découpler, grâce à un convertisseur de fréquence (dispositif basé sur de l'électronique de puissance), la fréquence de rotation du rotor de la fréquence du réseau.

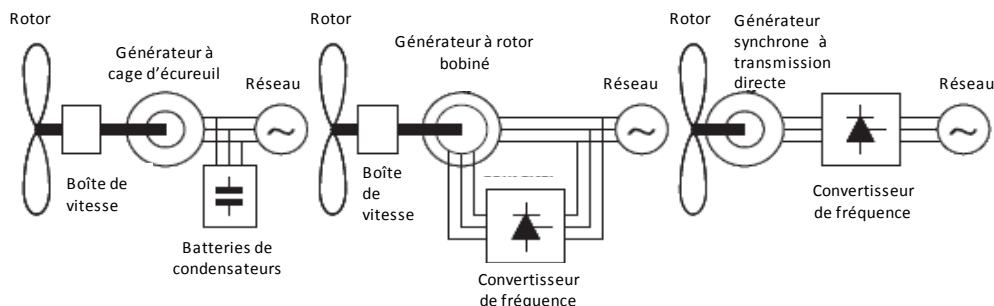


Figure 6 : différentes technologies de générateur pour éolienne avec, de gauche à droite : générateur à cage d'écureuil, générateur à rotor bobiné et générateur synchrone à transmission directe

La première technologie permettant des vitesses de rotation variables est le générateur à rotor bobiné à double alimentation. L'électronique de puissance permet d'alimenter en courant les enroulements du rotor du générateur. Les enroulements statoriques du générateur sont directement connectés au réseau.

La fréquence du courant alimentant les enroulements du rotor est variable, ce qui permet de découpler les fréquences mécaniques et électriques. Il est alors possible de fonctionner pour différentes vitesses de rotation de rotor. Une boîte de vitesse est toujours nécessaire pour adapter les vitesses du rotor et du générateur.

Autre technologie permettant de faire fonctionner la turbine pour différentes vitesses de rotation : le générateur synchrone à transmission directe. Le terme « transmission directe » fait référence au fait qu'il n'y a pas de boîte de vitesse sur ce type de turbine. Le générateur est connecté au réseau via un convertisseur de fréquence. Les fabricants ont recours à des générateurs spéciaux fonctionnant à basse vitesse.

Les turbines utilisant cette technologie sont facilement reconnaissables à la taille importante du générateur situé au plus près du rotor.

Nous pouvons conclure, à travers ce chapitre, que les méthodes de production d'énergie électrique utilisées dans le domaine de l'éolien sont fondamentalement différentes des méthodes classiques (générateurs synchrones) utilisées dans les centrales thermiques ou nucléaires.

2.1.5 Système de freinage

Les turbines éoliennes sont équipées de systèmes de sécurité ultra performants. En plus d'un dispositif de freinage aérodynamique, les turbines disposent d'un frein de sécurité (à disque), utilisé pour les opérations de maintenance et pour le parking.

2.1.6 Dispositif de contrôle

Les turbines éoliennes sont des machines de haute technologie. Après mise en service, les turbines éoliennes sont entièrement contrôlées par un système informatique interne. Les mesures de contrôle effectuées peuvent être mises à disposition sur un réseau et consultées à distance par l'exploitant ou le fabricant de la turbine.

2.2. Développements à venir

Les turbines actuelles sont commercialisées jusqu'à des puissances de 3,0 MW. La

Cogénération et énergies renouvelables

fr.leonardo-energy.org

gamme de puissance des turbines la plus utilisée en Europe occidentale par les entrepreneurs de parcs éoliens et par les distributeurs locaux est de 2 à 3 MW. Tous les grands constructeurs de turbines proposent un ou plusieurs modèles dans la gamme du MW.

Dans certains pays, comme ceux du Sud de l'Europe, l'Asie et l'Amérique latine, où les infrastructures routières et de transport sont moins développées et où le relief est accidenté, des éoliennes de plus faibles dimensions sont plus adaptées. Ce sont les raisons qui expliquent que les éoliennes dans la gamme 0,8 à 1,3 MW, soit les plus demandées au niveau mondial.

Il existe des prototypes de turbines dans la gamme de puissance de 5 à 6 MW. Ces turbines ont un mat de plus de 120 mètres et des diamètres de rotor de plus de 110 mètres. Ces prototypes seront probablement commercialisés courant 2006. Mis à part leurs coûts élevés, ces turbines présentent l'inconvénient d'être lourdes et particulièrement encombrantes, et sont difficilement transportables sur les infrastructures routières européennes.

Certains constructeurs contournent cette difficulté en ne proposant ce type de turbine que pour des projets offshore ou pour lesquels l'accès est possible par voie navigable. D'autres proposent de construire la structure ou une partie de la structure en béton (directement sur site) plutôt qu'en acier.

Les développements à venir concernent :

- les technologies à vitesse variable (convertisseurs de fréquence) dont les parts de marché augmentent fortement ;
- dans la gamme du MW, les boîtes de vitesse sont le point faible car ce sont des éléments fragiles et coûteux nécessitant des opérations de maintenance régulières. Certains fabricants proposent des turbines sans boîte de vitesse et utilisant des générateurs synchrones multi-pôles. Ces générateurs présentent l'inconvénient d'être particulièrement massifs (certains dépassent les 5 mètres de diamètre). Il existe aussi des solutions hybrides utilisant une boîte de vitesse à étage unique associé à un générateur multi-pôle de plus petite taille. Les experts s'accordent à dire que ce type de solution sera probablement le plus développé dans les 10 années à venir ;
- le développement de turbines de puissances supérieures au MW est axé sur le gain de poids et la réduction des tailles, et ce afin de réduire les problèmes de transport et de manutention sur site. Les efforts sont principalement portés sur la réduction du poids des composants ainsi que sur de nouvelles méthodes d'assemblage et d'intégration de fonctionnalités spécifiques permettant de réduire le nombre de composants ou en compactant certaines parties ;
- les turbines offshore sont, à ce jour, des dérivés des turbines onshore. On voit cependant émerger de nouvelles technologies propres aux turbines offshore. Les principales caractéristiques d'une turbine offshore

sont : la fiabilité, le contrôle à distance et une puissance installée importante (supérieure à 10 MW). Les avantages des parcs éoliens offshore sont l'absence de nuisance (visuelle et sonore) pour le voisinage, des rendements élevés, des coûts plus faibles, la facilité de transport vers le site et une installation rapide, notamment grâce à des grues de puissance limitée (de 6 à 8 MW).

3. Coûts et bénéfices

Le coût de l'énergie éolienne dépend en grande partie de l'emplacement de la turbine. Les vitesses de vent ainsi que le coût de raccordement au réseau local dépendent fortement du site retenu. Pour une production énergétique commerciale (budgétisation et dépréciation sur une période de 10 ans), les coûts peuvent varier de 5 cents (€) / kWh, pour des emplacements ventés, à 8 cents (€) / kWh à l'intérieur des terres. En comparaison, les coûts de production énergétique d'origine fossile sont de 4 cents (€) / kWh. Le prix de l'énergie distribuée est indépendant du coût des énergies fossiles et dépend, pour partie, d'une éco-taxe (pour production d'énergie d'origine renouvelable) et du marché des énergies renouvelables.

Les hypothèses pour ce calcul de coûts sont les suivantes :

- une turbine neuve d'une puissance de 850 à 2 500 kW,
- des coûts d'exploitation et de maintenance d'environ 1,2 cent (€)/kWh sur une durée de vie de 20 ans. Les coûts globaux d'exploitation (location du site, taxes, assurance, exploitation quotidienne, O&M) sont d'environ 2 cents (€)/kWh.

Au cours des 20 dernières années, le coût d'investissement au kW installé a fortement baissé. Les coûts moyens pour un projet de parc éolien varient entre 900 et 1 200 €/kW installés. Comparés aux premiers projets de ce type dans les années 70, les coûts d'investissement ont baissé de plus de 80 %. Cette tendance devrait continuer dans les années à venir.

Les coûts d'exploitation et de maintenance représentent une part importante du coût de l'énergie éolienne. Ces coûts incluent les opérations de maintenance régulières, les réparations diverses, les assurances, les pièces de rechange et les coûts de gestion. Le nombre de turbines de plus de 20 ans étant très rares, peu de données sont disponibles. Pour des machines neuves, les coûts d'exploitation et de maintenance répartis sur la durée de vie de la turbine représentent 20-25 % du coût total amorti par kW produit.

Les fabricants essaient de réduire ces coûts en développant de nouvelles conceptions de turbines nécessitant moins de maintenance régulière et donc moins d'arrêts de production.

Cogénération et énergies renouvelables

fr.leonardo-energy.org

Les turbines de fortes puissances permettent de réduire les coûts d'exploitation et de maintenance par kW produit.

Les autres éléments de coûts sont :

- le développement de projet
- la préparation du site
- le socle de la turbine
- le raccordement au réseau
- les taxes immobilières

3.1 Bénéfices de l'éolien

L'exploitant d'une turbine ou d'un parc éolien revend l'électricité à un distributeur d'énergie. La valeur de l'énergie éolienne estimée par le distributeur est à calculer en fonction du coût de remplacement d'énergie d'origine fossile.

Le prix moyen de cette énergie « grise » est de 2 à 3 cents (€)/kWh. A ce tarif, l'exploitation d'une turbine n'est pas rentable.

Les distributeurs payent pour une fourniture garantie d'énergie. Une source d'énergie de secours n'est pas nécessaire si l'énergie produite a un degré de disponibilité élevé. Il est prouvé statistiquement que, même par petite vitesse de vent, l'éolien peut subvenir à 25 % de l'énergie.

3.2 Coûts futurs

La compétitivité de l'éolien par rapport aux méthodes conventionnelles (basées sur les énergies fossiles) de production d'électricité est difficilement estimable. La comparaison aux centrales thermiques existantes, par exemple, est défavorable à l'éolien. Mais si l'on se projette dans l'avenir, les usines de production d'électricité conventionnelles du futur devront intégrer des méthodes, probablement coûteuses, de traitement des gaz d'échappement et de stockage de CO₂. De plus, les prix des combustibles fossiles ne cessent d'augmenter du fait de leur raréfaction. Tandis que les coûts de l'éolien ne cessent de diminuer. Si la tendance actuelle se confirme, l'éolien se présentera dans un futur proche, comme un concurrent sérieux des méthodes de production conventionnelles.

3.3 Aides et taxes

A ce jour, et pour de nombreux pays européens, la pérennité de l'éolien dépend des aides et contributions mises en place par les différents gouvernements.

Le système d'aide est basé sur le fait que le vent ne coûte rien et ne présente pas de « coût externe ».

Une étude européenne définit la notion de « coût externe » comme suit : « des coûts externes doivent être pris en compte lorsque que l'activité sociale ou économique d'un groupe influence un autre groupe, et que cette influence n'est pas entièrement prise en compte ou compensée ». Par exemple, une usine de production d'énergie conventionnelle produit du SO₂. Ce gaz est la cause d'insuffisance respiratoire chez certaines personnes (notamment les asthmatiques) et détériore les bâtiments. Pourtant, l'exploitant de l'usine responsable n'a pas à sa charge les assurances maladies ou la réparation des bâtiments. Ces coûts sont affectés à d'autres personnes.

L'union Européenne pourrait décider d'imposer une éco-taxe pour les dommages subis, auquel cas le coût de l'énergie serait de 2 ou 7 cents (€)/kWh plus cher.

Une autre façon d'encourager les sources d'énergie renouvelable est de mettre en place des aides spécifiques en mettant en avant le fait que ce type de production énergétique permet d'éviter des coûts sociaux et environnementaux importants. Ce type d'aide est déjà mis en place en Europe où des primes de 8 à 9 cents (€) / kWh sont allouées aux projets éoliens.

4. Normes et réglementations

4.1 Normes en vigueur, réglementation européenne et directives concernant l'éolien

La dépendance aux importations de combustibles fossiles, la fluctuation des prix du pétrole, l'épuisement des réserves pétrolières, et les considérations environnementales (émission de CO₂, stockage des déchets nucléaires, etc.) contribuent à changer les politiques énergétiques.

De nombreux pays industriels concentrent leurs efforts dans le développement des énergies renouvelables, notamment le solaire, l'éolien, la biomasse, l'éolien et l'hydro-électricité.

La compagnie pétrolière Shell prévoit que, d'ici 2050, un tiers de l'énergie produite sera

Cogénération et énergies renouvelables

fr.leonardo-energy.org

d'origine renouvelable. Certains pays européens se sont fixés un objectif de 9 % d'électricité d'origine renouvelable d'ici 2010 dont la moitié pourrait provenir de l'éolien.

Ces objectifs restent toutefois modestes en comparaison avec les objectifs fixés par l'Union Européenne. Certains pays européens voient déjà la part du renouvelable augmenter dans leur production énergétique, notamment grâce à l'hydro-électricité, à la biomasse et à l'éolien.

Les pays de l'Europe des 15 se sont engagés à ce que 22 % de l'électricité produite soit d'origine renouvelable d'ici à 2010. L'union Européenne encourage tous les pays à suivre cet exemple. (voir le guide correspondant dans notre collection).

4.2 Nuisances locales

Les turbines éoliennes peuvent engendrer certaines nuisances. Des études détaillées permettent de limiter les nuisances à un niveau acceptable.

4.3 Oiseaux

Les oiseaux peuvent percuter les pales du rotor ou être aspirés par les turbulences en aval du rotor. Toutefois, des études montrent que les risques de collision sont très faibles. On estime à 21 000 par an le nombre de victimes de collision pour une puissance installée de 1 000 MW. Ce chiffre peut paraître élevé mais reste faible devant le nombre d'oiseaux victimes du trafic (routier et ferroviaire) estimé à 2 millions par an, et du nombre d'oiseaux électrocutés sur les lignes aériennes estimé à 1 million par an.

La plupart des collisions d'oiseaux avec les éoliennes ont lieu la nuit, au crépuscule ou par mauvaises conditions météorologiques.

En règle générale les oiseaux évitent les turbines, mais il convient de bien étudier les emplacements potentiels et de s'éloigner des zones de reproduction ou d'alimentation des oiseaux.

4.4 Poissons

Les parcs éoliens offshore présentent l'avantage d'offrir aux poissons un espace protégé, la navigation est interdite à proximité des parcs, et donc de lutter efficacement contre la pêche intensive.

Les biologistes marins espèrent que ces zones profiteront au développement de certaines espèces et permettront de renouveler les stocks de poissons. Des études récentes semblent confirmer cette tendance.

4.5 Bruit

Le rotor, le générateur et la boîte de vitesse des éoliennes sont des éléments bruyants. Les émissions sonores peuvent être réduites en soignant le design des pales, en ralentissant la vitesse de rotation des pales et en utilisant des boîtes de vitesse et des générateurs isolés phoniquement.

Les nuisances sonores peuvent être limitées en éloignant les parcs éoliens des habitations.

4.6 Ombres

En rotation, les turbines exposées au soleil projettent au sol des ombres mouvantes. En hiver, lorsque le soleil est bas, l'ombre des éoliennes s'étend jusqu'aux fenêtres des habitations environnantes et peut gêner les riverains. Il convient de bien étudier la position des turbines par rapport aux habitations pour limiter la gêne occasionnée.

Si la projection d'ombre ne dure que quelques heures par an, il est envisageable de stopper la turbine sans perte de production significative.

4.7 Intégration dans le paysage

Les éoliennes sont des ouvrages étonnants dans le paysage. Leur disposition est étudiée pour s'intégrer dans le paysage en prenant en compte le relief (alignées le long d'une digue ou d'une voie navigable par exemple). Des études montrent que les riverains sont plus enclins à accepter une organisation regroupée des éoliennes, s'il leur a été expliqué que cette organisation permettait une meilleure productivité des éoliennes.

L'esthétisme de l'agencement des turbines (alignement des turbines, etc.) est une affaire de goût et dépend de chacun. Par contre le rapport de la hauteur du mat au diamètre des pales est un critère important, de même que la taille du rotor.

De plus, les rotors ayant de grands diamètres tournent plus lentement, et sont donc moins bruyants.

5. Conclusions

Pendant des milliers d'années, l'énergie du vent a été utilisée pour différentes applications. Le développement de l'éolien pour la production d'électricité s'est fortement accéléré avec les crises pétrolières et a permis la mise en place de projets éoliens de grande envergure.

Les technologies de l'éolien sont en pleine expansion. Les turbines sont de plus en plus performantes, les puissances en jeu sont de plus en plus importantes, notamment grâce à l'intégration de l'électronique de puissance.

Les projets offshore sont de plus en plus nombreux et présentent, pour les investisseurs et les entrepreneurs, plusieurs avantages (environnementaux, baisse des coûts d'investissement et de maintenance).

6. Références bibliographiques

- [1] "Wind Power in Power Systems" Thomas Ackermann (ed.) John Wiley & Sons, Ltd, 2005 ISBN 0-470-85508-8
- [2] "European Wind Atlas" Troen, I. and E.L. Petersem, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark ISBN 87-550-1482-8
- [3] "WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program)", software version 8. Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark
- [4] "Alles in de wind, answers and questions concerning wind power", Jos Beurskens, Gijs van Kuik, October 2004
- [5] "Wind power technology, operation, commercial developments, projects, grid distribution", EWEA, December 2004
- [6] "Wind power economics, wind energy costs, investment factors", EWEA, December 2004
- [7] "The current status of the wind industry", industry overview, market data, employment, policy EWEA, December 2004
- [8] "Windenergie winstgevend" Ministry of the Flemish Community, department of renewable sources and energy, 1998