



# **Groupe d'Analyses et d'Études de Loire-Atlantique**

## **L'ÉNERGIE ÉOLIENNE**

**RAPPORTEUR**

**Jean C GUYARD**

Mise à jour Octobre 2011



Groupement d'Analyse et d'Études  
de Loire-Atlantique

## FICHE D'IDENTITE

*Du*

### **GROUPEMENT d'ANALYSE et d'ETUDES de LOIRE-ATLANTIQUE**

En mai 2011, les principaux contributeurs et rapporteurs du Haut Comité Français pour la Défense Civile et Economique des Pays de la Loire ont décidé de prendre leur autonomie et de créer une nouvelle structure plus en adéquation avec leurs objectifs.

Ils ont intitulé leur nouvelle Association :

« **Groupement d'Analyse et d'Études de Loire-Atlantique (GAELA)** ».

Cette Association a pour objet :

- De travailler directement et/ou de participer, via des structures spécifiques, au développement de la Loire-Atlantique.
- De communiquer sur ses objectifs, de diffuser ses idées et propositions par tous les moyens légaux à sa convenance.
- D'exercer sa mission dans un apolitisme total, en-dehors de tout but lucratif, dans un souci constant de servir l'intérêt général.

Elle a pour vocation à être représentée au sein d'organismes ayant en charge des objectifs comparables, ou pour le moins compatibles, de poursuivre ses activités au service de la collectivité et de continuer à communiquer et à échanger avec les Conseils de Développement.

Le GAELA est une association régie par la Loi du 1<sup>er</sup> juillet 1901 qui a déposé ses statuts en Préfecture le 16 Juin 2011.

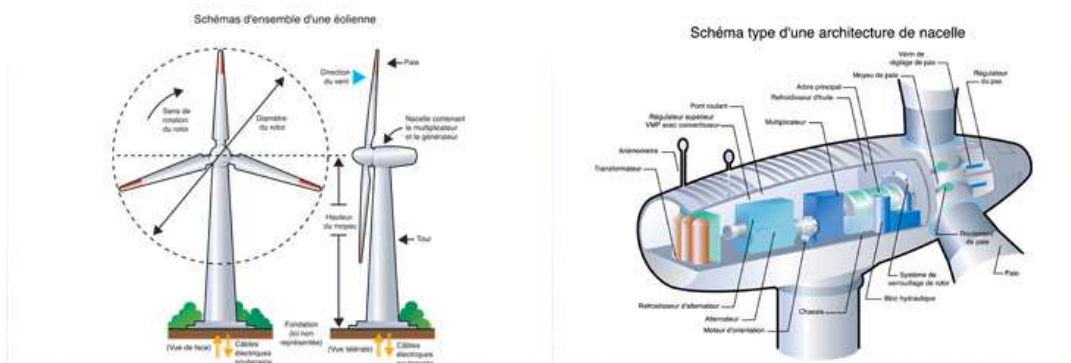
Son Conseil d'Administration est composé de la façon suivante :

<b>Président :</b>	<b>GUYARD Jean-Claude</b>	<b>Administrateurs :</b>	<b>CHATELIER Pierre</b>
<b>Vice-Président :</b>	<b>RENAULT Jean-Louis</b>		<b>DOUAULT Patrick</b>
<b>Secrétaire Général :</b>	<b>MOUSSION Marc</b>		<b>DUPONT Jean-Pierre</b>
<b>Secrétaire :</b>	<b>LEGEAY Guy</b>		<b>JEAN-ALBERT Daniel</b>
<b>Trésorier :</b>	<b>DOUZON Jean</b>		<b>LE LORRE Yannick</b>
			<b>STARKE Guy</b>

## L'éolien

### Les arguments contre l'éolien

- Ne diminue absolument pas les émissions de [gaz à effet de serre](#) (GES), bien au contraire.
- \* En matière de production d'électricité, augmente fortement les émissions de GES en raison de [son intermittence](#).
- \* Est nuisible car saccage le [Patrimoine Paysager et Historique](#) et sinistre le Tourisme vert, le Tourisme Littoral pour les projets en mer.
- \* Porte atteinte à la Qualité de Vie car [toujours trop près des habitations](#).
- \* Est Dangereux car il menace la [sécurité des riverains](#).
- \* Sans effets sur l'Emploi en France, ne créant [aucun emploi permanent](#).
- \* Handicape considérablement le recours aux Energies Renouvelables à Production Garantie.
- \* Institue un véritable [Racket](#) de la collectivité française (CSPE, TP...).
- \* Provoque un véritable massacre des oiseaux migrateurs en particulier et de [l'avifaune](#) en général.
- \* Enrichit scandaleusement [les Promoteurs \(privés\) et les Constructeurs \(étrangers\)](#) qui en demandent encore plus.



**1- Historique :** Les premiers moulins à vent dateraient de 1700 avant J-C. Vers 1100, ils auraient été découverts par les Croisés et les voyageurs de l'Occident. La France elle-même comptait, il y a deux siècles, quelques 20.000 moulins à vent.

Nos anciens n'avaient donc pas attendu les charbonniers, puis les pétroliers et autres gaziers ou nos centrales nucléaires pour puiser sur place l'énergie dont ils avaient besoin. On nous ressort donc aujourd'hui, une nouveauté vieille de près de 40 siècles, et que le pseudo progrès nous a fait abandonné, il n'y a pas si longtemps...

A titre indicatif, la capacité de production d'énergie éolienne de l'Espagne a augmenté de 20,3 % en 2005, pour atteindre 9.947 mégawatts, soit 8,25 % de la consommation électrique du pays.

En 2002, c'était déjà 20.000 MW qui étaient produits dans le monde...

### **2- Une lente implantation en France**

La France possède le second gisement éolien d'Europe.

Elle s'était engagée dans le cadre d'une directive européenne à atteindre 21% de ses besoins en électricité renouvelable à l'horizon 2010, et sept projets de centrales éoliennes ont ainsi été retenus sur notre territoire.

Ils ne sont pas tous en bord de mer puisqu'un des derniers en date concerne les communes d'Echalot, Etalante et Poiseul-le-Grange en Côte d'Or.

### **3- Présentation et caractéristiques des différents types de capteurs éoliens dynamiques**

Tout d'abord, il faut noter qu'il existe un grand nombre de dispositifs permettant de capter l'énergie éolienne pour la transformer en énergie mécanique de rotation, seulement il est important de se poser certaines questions essentielles telles que: quelle sera sa taille, son coût, la puissance qu'il pourra fournir, sa résistance à l'usure? Autant de questions qui font qu'un grand nombre de capteurs éoliens ont été mis de côté et que seul un petit nombre d'entre eux ont été largement exploités.

3,1 **-Paramètres de fonctionnement**: Une classification méthodique, universellement adoptée fait apparaître les groupes, les noms et les formes de ces capteurs. On distingue trois principaux paramètres de fonctionnement pour caractériser un capteur éolien et notamment son efficacité.

Le *premier* paramètre de fonctionnement est relatif à la vitesse périphérique (ou vitesse en bout de pale)  $U = \omega R$  (avec  $\omega$  la vitesse de rotation de la machine éolienne et  $R$  le rayon d'extrémité de la pale); ce **paramètre de rapidité** ou **vitesse spécifique** noté  $\lambda$  est le rapport de la vitesse  $U$  à la vitesse  $V$  du vent:

$$\lambda = U / V = (\omega R) / V$$

Les machines peuvent être classées en fonction de ce paramètre: si  $\lambda$  est inférieur à 3, l'éolienne est dite *lente*; au-delà, l'éolienne est dite *rapide*. A titre d'exemple, des éoliennes bipales peuvent avoir un paramètre  $\lambda$  égal à 20. Cependant, une grande vitesse de rotation peut entraîner des nuisances telles que le bruit.

Le *second* paramètre qui caractérise le capteur éolien est le **coefficient de puissance** noté  $C_p$ . Il est défini par le rapport de la puissance  $P_m$  recueillie sur l'arbre moteur du capteur à la puissance cinétique qui passerait dans le disque du rotor en son absence:

$$C_p = P_m / (0.5 \rho S V^3)$$

(La valeur maximale du  $C_p$  définie par BETZ, est égale à 0.592.)

Le *troisième* paramètre important est le coefficient du couple: c'est le rapport du couple moteur  $C_m$  qui s'exerce sur l'arbre de sortie du capteur éolien ( $C_m = P_m / \omega$ ) au couple aérodynamique  $C_a$ .

$$C_c = C_m / C_a = C_p / \lambda$$

Les paramètres  $C_p$  et  $C_c$  caractérisent les performances du capteur et sont habituellement représentés en fonction de  $\lambda$ .

3,2- **Classement des éoliennes**: Cependant plus généralement, on classe les capteurs éoliens par l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. On distingue de cette manière:

- les capteurs à axe horizontal
- les capteurs à axe vertical
- les capteurs qui utilisent le déplacement d'un mobile (peu exploitable)
- les dispositifs statiques de récupération de l'énergie éolienne

3,21- **Les capteurs à axe horizontal**: Ce sont les machines actuellement les plus répandues car leur rendement est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multipales pour le pompage de l'eau.

On peut distinguer les capteurs éoliens dont l'hélice est en amont par rapport au vent, « *hélice au vent* », et ceux dont l'hélice est en aval par rapport au vent, « *hélice sous le vent* ».

**Les moulins hollandais:** Bien que de conception ancienne; ils se caractérisent par un assez bon coefficient de puissance de la machine ( $C_p=0.3$ ) pour des vitesses de  $\lambda$  voisines de 2 à 3, et par un couple maximal pour ces deux vitesses.

**Les moulins américains:** Construits aux Etats-Unis dès 1870, les éoliennes multipales peuvent comporter de 12 à 30 pales. Le coefficient de puissance approche 0.3 pour des vitesses spécifiques proches de 1 ( $\lambda \cong 1$ ); le coefficient de couple est élevé au démarrage. Le plus souvent, ces éoliennes sont de petite taille; la roue à couramment un diamètre de 3 à 8 mètres. Ces éoliennes fonctionnent bien jusqu'à un vent de 7 à 8 m/s; au-delà, il faut prévoir un dispositif d'arrêt et d'éclipsage qui doit mettre la machine en sécurité. Ces éoliennes sont pourvues d'un gouvernail de direction pour orienter le disque normalement à la direction du vent .

**Les éoliennes rapides:** la puissance nominale de ces capteurs est très étendue, de quelques dizaines de watts à quelques mégawatts, de même que la taille du rotor (de 1 à 100 mètres de diamètre). L'optimisation du rotor a grandement bénéficié des travaux de recherche de l'aéronautique.

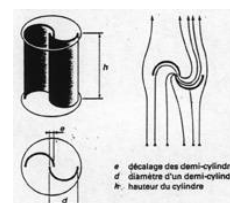
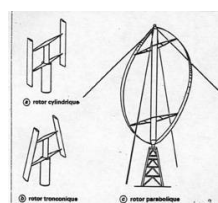
Les coefficients de moment et de puissance sont optimaux pour des valeurs de  $\lambda$  comprises entre 6 et 10. Les éoliennes rapides obtiennent des rendements élevés (voisins de 85% par rapport à la limite de Betz).

Le disque éolien peut être placé en amont (hélice au vent) ou en aval (hélice sous le vent) du support. La tendance actuelle est de situer le rotor en position aval.

3, 22- **Les capteurs à axe vertical** : Les principaux capteurs à axe vertical sont le rotor de Savonius, le rotor de Darrieus et le capteur à ailes battantes. Il existe également les machines à traînée différentielle comme le moulinet, les machines à écran et les machines à clapets battants.

**Le rotor de Savonius** est constitué de deux demi cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. L'écoulement interne favorise les caractéristiques de performance de la machine. Le coefficient  $C_p$  maximal atteint 0.3. Le rotor de Savonius est caractérisé par un grand couple de démarrage. A titre d'exemple, des machines de plusieurs kilowatts ont été réalisées pour assurer le pompage de l'eau dans les pays du Sahel; elles démarrent à des vitesses de vent faible, voisines de 2 à 3 m/s. Ces systèmes présentent cependant beaucoup plus d'inconvénients que d'avantages dans les réalisations actuelles, en particulier ils nécessitent comme les systèmes à axe horizontal parallèle « au vent » un dispositif d'orientation. La récupération de l'énergie produite est en général beaucoup plus compliquée et se traduit souvent par une perte sensible du rendement global.

**Le principe du rotor ou panéme de Darrieus**, inventé par l'académicien français Darrieus au cours des années 1920-1935, repose sur l'effet de portance d'un profil soumis à l'action d'un vent relatif. Il existe quatre sortes de rotors de Darrieus: le rotor cylindrique, le rotor tronconique, le rotor à variation cyclique et le rotor parabolique.



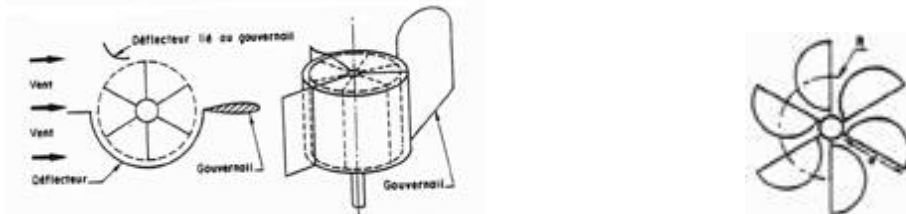
Toutes ces machines ont besoin d'être haubanées, c'est-à-dire soutenues par des câbles ou des cordages. Le comportement dynamique de la machine doit tenir compte des modes propres de vibration de tous les organes structuraux, y compris celle des haubans.

Le **moulinet** qui est une machine à traînée différentielle est constitué de plusieurs demi sphères ou de coquilles cylindriques (augets) montées sur des bras reliés à un axe vertical tournant.

La rotation est assurée par la traînée aérodynamique qui s'exerce différemment sur l'aube qui remonte face au vent et sur celle qui s'efface au vent. Le paramètre  $\lambda$  est inférieur à 1 ce qui dénote une assez faible vitesse de rotation. Le coefficient de puissance maximal  $C_{p \max}$  est voisin de 0.18 lorsque  $\lambda$  vaut 0,6. Les anémomètres à coupelles, à papillon et du type Ailleret fonctionnent suivant ce principe. Les vents de faible vitesse, 1 à 2 m/s, suffisent pour assurer leur démarrage.

Cependant, ce type de capteur éolien ne convient pas pour alimenter un générateur électrique car il ne produit qu'une très faible puissance.

**Les machines à écran**: Les aubages qui vont à contre-courant du vent sont protégés par un écran orientable grâce à la présence d'un gouvernail. Les aubes peuvent être réduites à de simples plaques planes ou légèrement cambrées.



**4- Fonctionnement et chiffres clés.** Le flux des rayons solaires chauffe inégalement les masses d'air de l'atmosphère, provoquant ainsi des mouvements de masse d'air entre zones de températures et donc de pressions différentes :

*2% de l'énergie solaire ( $3,2 \times 10^{24}$  puissance 24 Joules /an) est transformée en énergie éolienne.*

*35% de cette énergie est dissipée dans la 1ère couche d'air épaisse d'1 km et servant de couverture à la terre.*

Si on utilisait 10% seulement de cette énergie éolienne cela correspondrait à :

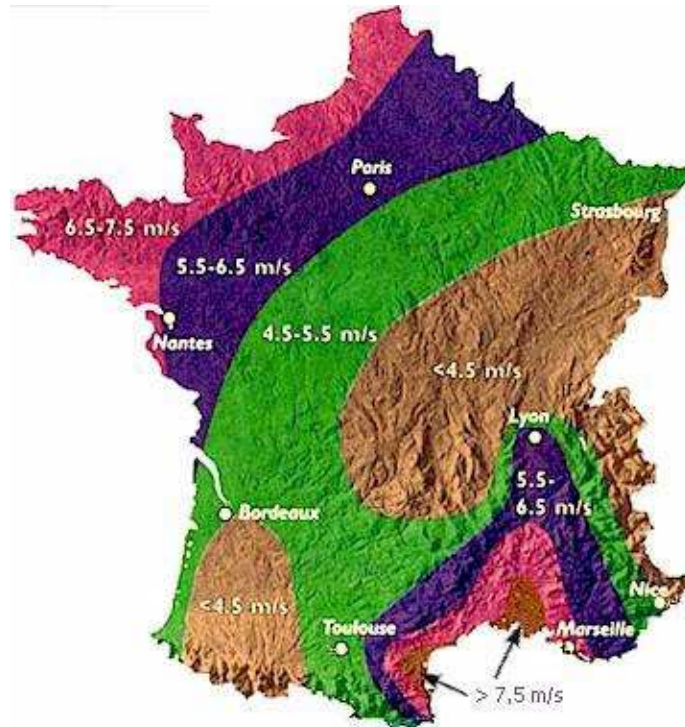
$$E (\text{énergie éolienne}) = 3,2 \times 10^{24} \times 0,02 \times 0,35 \times 0,1 = 2,24 \times 10^{21} \text{ Joules/an,}$$

A titre de comparaison, cela correspond quand même à 7 fois la consommation mondiale d'électricité !

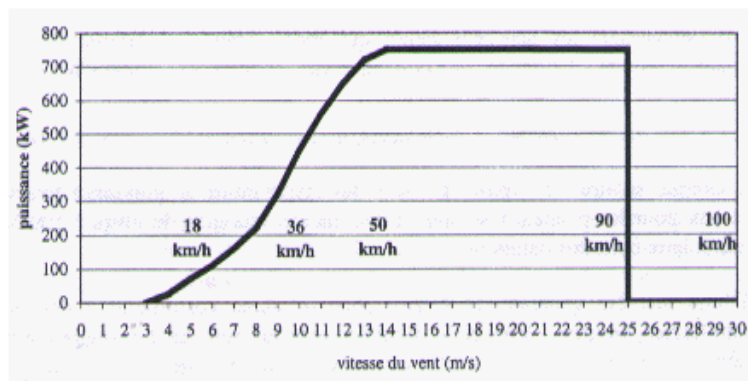


### Carte de France des moyennes de vents

Vitesse moyenne annuelle du vent, à 50 mètres au-dessus du niveau du sol, en plaines exposées.<sup>1</sup>

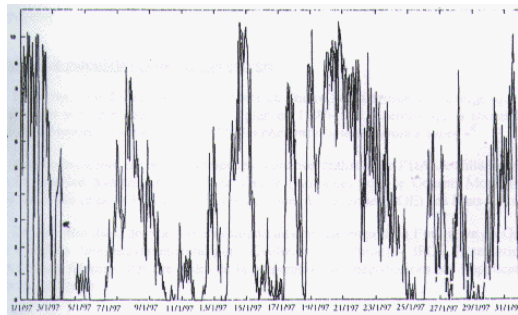


**Une éolienne commence à produire avec un vent d'environ 4 m/s et double sa production dès 7 m/s.  
A partir de 25 m/s environ, elle se met "en drapeau" et ne produit plus !**

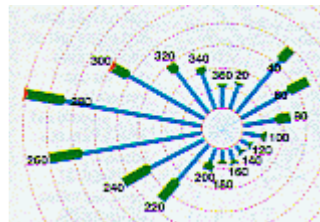


<sup>1</sup> (D'après l'étude : European Wind Energy Atlas, Troen & Pedersen - 1989).

L'estimation du potentiel éolien d'un site ne s'obtient pas seulement à partir du vent moyen : une bonne connaissance des variations du vent est aussi nécessaire.



Pour cela, on utilise la distribution dite de « Weibull » qui indique la répartition des vents par classes de vitesses. L'information obtenue permet de calculer l'énergie disponible (qui varie comme le cube de la vitesse, d'où la nécessité de connaître la répartition des vitesses).



Les éoliennes installées en ligne avec des distances inférieures à 1.000 mètres se trouvent déventées et se mettent en drapeau, à cause des vibrations, si le vent est dans l'axe de la ligne d'éolienne.

La prospection des sites possibles constitue donc le premier travail à effectuer pour juger de la possibilité d'utiliser le vent. Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année. Non seulement, il faut connaître la vitesse moyenne mais aussi la quantité d'énergie annuelle. Pour cela, des anémomètres spéciaux totalisateurs de l'énergie par mètre carré ont été mis au point.

Les vents les plus intéressants, qui donnent le maximum d'énergie annuelle, sont les vents réguliers, comme les alizés, ayant une vitesse moyenne de 6 à 8 m/s, voire jusqu'à 10 m/s.

Outre ceux ayant une quantité d'énergie annuelle insuffisante, il faut éliminer les sites soumis à des variations très brutales de la vitesse du vent (type mistral par exemple).

Le relief local joue un rôle très important. Aussi, y a-t-il lieu d'en tenir compte dans l'interprétation des mesures effectuées souvent à la hauteur standard de 10 m au-dessus du sol (hauteur adoptée par la Météorologie nationale).

Les constructeurs, en vue de la conquête des mers, planchent sur des machines de plusieurs mégawatts. En effet, installer des fermes de grande puissance à quelques kilomètres des côtes, où les ressources en vent sont bien plus élevées qu'à terre, permettrait de réduire encore le coût de l'électricité. De plus, l'impact visuel sera atténué.

Une haie joue le rôle de brise-vent ; il en est de même des rideaux d'arbres ; ces obstacles s'avèrent défavorables à l'implantation des éoliennes de faible hauteur.

Des phénomènes cycliques apparaissent avec des périodes qui peuvent être de l'ordre de la dizaine de minutes, de quelques heures, de plusieurs jours ou de la durée des saisons. La connaissance de la fréquence de ces manifestations s'avère utile pour la sécurité des machines. Certaines régions ont la réputation de voir naître ou de voir passer un ou



plusieurs cyclones par an, ou encore des tempêtes ou des tornades. De ce fait, les pays à riche implantation de stations météorologiques édictent des règles destinées à mieux cerner les hypothèses de calcul pour donner aux constructions un degré de sécurité accrue.

**Ces courbes et ces valeurs permettent de déterminer le rendement escompté d'un parc éolien : Il est de 27 à 30 % du potentiel installé.**

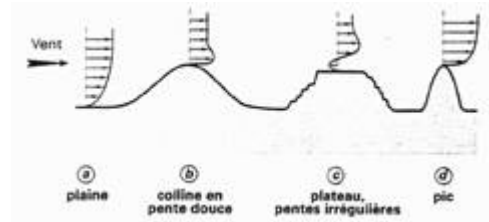
**On ne connaît pas avec certitude si un parc éolien produira deux heures plus tard.**

**Dans des périodes anticycloniques de grand froid et de forte demande, le réseau ne peut compter sur l'éolien, il doit démarrer des centrales thermiques génératrices de CO<sub>2</sub>, surtout si elle ne fonctionne pas de façon régulière.**

**5- Une énergie à consommer près du lieu de production.** : Le vent est présent partout sur la planète à des degrés et des moments différents et directement en rapport avec la météorologie.

Par suite de l'irrégularité des vents, la rentabilité d'une machine éolienne dépendra beaucoup du site sur lequel elle est installée et sera liée aussi à son utilisation.

Les sites les plus intéressants sont situés au bord de la mer ou aux sommets de collines et de montagnes bien dégagées. Toutefois dans ces premiers lieux se posent des problèmes de corrosion et dans les seconds des risques de givrage.



Sa force permettrait donc d'approvisionner localement fermes, hameaux, villages et agglomérations sans avoir à déplorer les pertes dues au transport de l'électricité, les frais de construction et d'entretien des lignes à haute tension et des transformateurs.

L'énergie éolienne est très utilisée pour alimenter en énergie électrique des sites très isolés dont les besoins énergétiques sont réduits, ou pour pomper de l'eau à peu de frais et de façon plus silencieuse qu'avec un moteur thermique. Elle peut être une solution dans les pays où les lignes d'interconnexion ne parviendront pas du fait de la faible densité de population.

Dans le cas où toute autre source d'énergie peut être envisagée, l'hydroélectricité par torrent ou rivière dans le domaine privé, ligne de distribution E.D.F... Une petite étude économique est nécessaire.

Cependant, les projets actuels s'orientent vers d'énormes projets, n'allant pas sans poser des problèmes d'intégration et privant de fait les populations équipées d'éoliennes de tout contrôle sur leur propre production. D'autant que les parcs éoliens fournissent du 20.000 V ce qui entraîne dans le cas de transport sur longue distance des pertes en ligne.

Il faut donc ramener l'éolienne au niveau qui était le sien au temps des moulins, c'est à dire au plus proche du consommateur, en construisant de petites installations de captage locales, à taille humaine, gérées directement par les populations. (On peut voir à ce sujet les lampadaires d'éclairage public de BOUVRON (Loire Atlantique) alimentée chacun par leur éolienne et leur batterie)

A titre indicatif, une maison européenne consomme en moyenne entre 6 et 10 kWh par jour soit : environ 2500 kWh/an et par foyer.

6- **La limite de Betz** : L'énergie récupérable est celle qu'il est possible de prélever de l'énergie cinétique du vent. Betz a montré que, pour une machine à axe horizontal, cette quantité avait une limite.

Après démonstration, en prenant pour la masse volumique de l'air une valeur moyenne de  $1,25 \text{ Kg/m}^3$ , la puissance maximum pratiquement récupérable par un dispositif de surface S est égale à :

$$P = 0,37 S \cdot V^3$$

C'est la limite de Betz avec V la vitesse instantanée du vent. Toutes les grandeurs sont exprimées en unité SI

Cette puissance récupérable est celle que recueillerait une machine idéale.

Bien qu'établie pour une éolienne à axe horizontal, il est admis que cette valeur limite s'applique à la plupart des machines.

**Le rendement maximal théorique** d'une éolienne est de 59 %. Grâce à l'amélioration du profil et du revêtement des pales, les machines actuelles peuvent approcher les 50 %. Mais l'utilisation de systèmes de carénage permet d'élargir la surface balayée et donc de dépasser les fameux 59 %.

## 7- **Eolienne, les avantages écologiques**

7,1- **Gaz carbonique évité** : Les centrales électriques traditionnelles génèrent des émissions de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) suivant le combustible utilisé. L'énergie éolienne n'en générant pas, on peut évaluer la quantité de CO<sub>2</sub> évitée par ce moyen de production.

On évalue le taux d'émission de CO<sub>2</sub> par kWh marginal (le dernier kWh appelé) à 443 g de CO<sub>2</sub>/ kWh produit<sup>2</sup>

On doit cependant intégrer au calcul, le CO<sub>2</sub> produit par la construction, le transport<sup>3</sup> et l'installation des éoliennes.

Il faut aussi intégrer le CO<sub>2</sub> produit par les centrales thermiques, durant les arrêts des éoliennes par manque de vent. (*Rappel le rendement réel d'une éolienne est de 27/28%*)

7,2- **déchets nucléaires évités** : Les centrales nucléaires produisent plusieurs types de déchets.

On évalue à 3 g /MW/h le ratio de production massique de déchets nucléaires à haute activité et longue durée de vie (classes B et C)<sup>4</sup>.

Ce ratio permet de calculer la quantité de déchets nucléaires évités, en remplaçant le nucléaire par de l'éolien.

8 -**L'éolien, une affaire juteuse pour qui ?** : Outre le fait de donner du travail aux entreprises qui les fabriquent, et à celles qui les installent, les centrales éoliennes sont financièrement intéressantes à 2 niveaux :

– Les collectivités en retirent une taxe professionnelle rondelette, et qui est stable sur le temps, permettant des investissements à long terme !

<sup>2</sup> Source ADEME, B. Chabot

<sup>3</sup> Il n'existe pas aujourd'hui de constructeurs d'éoliennes en France

<sup>4</sup> Source ADEME, B. Chabot

- Les exploitants revendent l'électricité produite à un tarif de l'ordre du double ou triple de celui du marché !

**Prix de revente de l'électricité** : Les tarifs d'achat de l'électricité produite à partir d'éoliennes dépendent de la production annuelle, exprimée en nombre équivalent d'heures de fonctionnement à la puissance nominale, et sont définis par l'arrêté du 8 juin 2001. Ils sont volontairement dégressifs en fonction de la production de façon à éviter que les demandes d'installations se concentrent trop dans les zones les plus ventées du territoire, et assurer ainsi une bonne répartition de la production d'électricité d'origine éolienne.

**Pour la France métropolitaine** : (en centimes d'euros par kWh)

Durée annuelle de fonctionnement de référence	Tarif des 5 premières années	Tarif des 10 années
2000h et moins	8,38	8,38
Entre 2000 et 2600h	8,38	Interpolation linéaire
2600h	8,38	5,95
Entre 2600h et 3600h	8,38	Interpolation linéaire
3600h et plus	8,38	3,05

Ces tarifs sont également dégressifs d'un coefficient de 0,967 par an depuis 2003.

Ils sont aussi ajustés en fonction de l'indice du coût horaire du travail dans les industries mécaniques et électriques ainsi que sur l'indice des produits et services divers à l'année de demande de raccordement.

Pour un investissement initial de 1 million d'euros nécessaire à l'implantation d'une grande éolienne de 1MW raccordée au réseau, la rentabilité annuelle moyenne calculée (pour un fonctionnement équivalent à 2500 heures par an, avec un amortissement sur 15 ans) avoisine donc les 8%.

En Europe : A titre de comparaison, le kWh est acheté 8,42 centimes d'euros en Italie et, aux Pays-Bas, le prix d'achat éolien correspond au prix de marché plus une prime additionnelle de 4,9 centimes d'euros pour le kWh on shore et 6,8 centimes d'euros le kWh offshore.

Voir Annexe 1

### **Bibliographie**

- Contribution de l'Institut MONTAIGNE sur les éoliennes de juillet 2008<sup>5</sup>.
- L'impoture : Pourquoi l'éolien est un danger pour la France de Jean Louis BUTRE
- Ecologie : La grande Arnaque de Christian GERAUDEAU.
- Association Vent de Colère.
- Articles de presse.

<sup>5</sup> <http://www.ventdecolere.org/archives/amicus-eolien-montaigne.pdf>

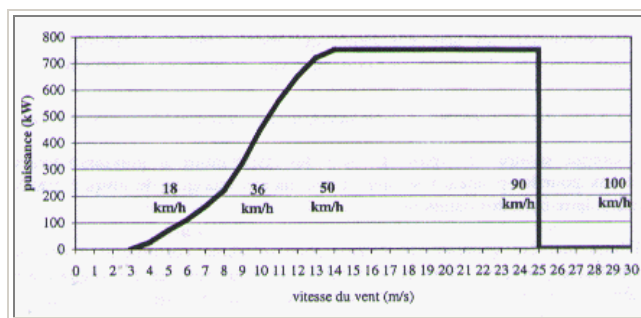
## Annexe 1- Quelle surface faut-il couvrir d'éoliennes pour fournir à la France le courant dont elle a besoin ?<sup>6</sup>

L'énergie électrique fournie par une éolienne est fortement variable au cours du temps. En effet, une éolienne ne délivre sa puissance maximale (dite encore nominale) que dans une fourchette de vitesses de vent assez restreinte : trop lent, le vent n'entraîne pas les pales assez vite - trop rapide, il les entraînerait trop vite et il faut alors réduire la vitesse de rotation (en faisant pivoter les pales).

Exemple ci-dessous pour une éolienne de 175 kW de puissance nominale.

Vitesse du vent (m/s)	8	10	12	14	16	18	20	22
pour info : en km/h	28,8	36	43,2	50,4	57,6	64,8	72	79,2
pour info : en noeuds	15,6	19,4	23,4	27,2	31,1	35	38,9	42,8
pour info : en force Beaufort	4	5	6	7	7	8	8	9
Puissance délivrée (kW)	30	60	115	175	180	172	168	165

Voici, pour une autre éolienne (Jeumont 750 kW) la courbe de puissance délivrée en fonction de la vitesse du vent



Les éoliennes modernes ont certes des puissances unitaires qui peuvent aller jusqu'à 2,5 MW sur terre, et 5 MW en mer, mais cela ne change pas la manière dont la puissance est délivrée en fonction de la vitesse du vent. Or, cela semblera peut-être une évidence, le vent n'est constant ni en force ni en direction (ce deuxième point n'est pas sans importance car dans les champs d'éoliennes ces dernières ne sont pas placées aux sommets d'un maillage carré mais d'un maillage rectangulaire, le grand côté de la maille devant être dans le lit du vent dominant). On donne l'exemple ci-dessous de deux roses des vents pour des sites littoraux, donc particulièrement favorables *a priori*.

Explications pour interpréter les roses des vents ci-dessous.

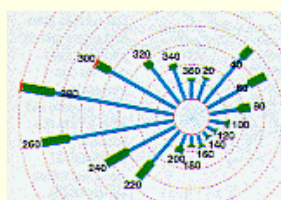
La rose est représentée sur un fonds de cercles gradués qui représentent la probabilité d'avoir du vent d'une force et d'une orientation donnée. Chaque cercle représente 2% de probabilité.

<sup>6</sup> (juin 2000 - révisé en décembre 2001-site de l'auteur : [www.manicore.com](http://www.manicore.com) - contacter l'auteur : [jean-arc@manicore.com](mailto:jean-arc@manicore.com))

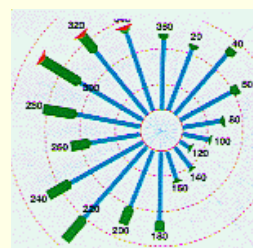
Par exemple, à Batz, la probabilité d'avoir du vent venant du Nord (cap 360) est de 2% environ, celle d'avoir du vent venant d'ouest + ou - 10° est de 30% (14% pour le 260 et 16% pour le 280).

Par ailleurs, l'épaisseur et la couleur du trait représentent la force Beaufort : 1 à 4 : bleu ; 5 à 7 : vert ; 8 à 9 : rouge ; 10 et plus : noir. A Batz, par exemple, la probabilité d'avoir un vent de forces 4 ou inférieures venant du 240 est donc de 6% ; celle d'avoir un vent venant du 240 de force 5 à 7 est d'un peu plus de 2%.

On voit immédiatement sur ces roses que le vent "tourne" et que sa force n'est pas régulière. En particulier, les occurrences de vent inférieures à 8 m/s (force 4, trait bleu) sont loin d'être négligeables, et l'on voit que la force 7, à partir de laquelle notre éolienne ci-dessus donne sa pleine puissance, souffle bien moins de 50% du temps.

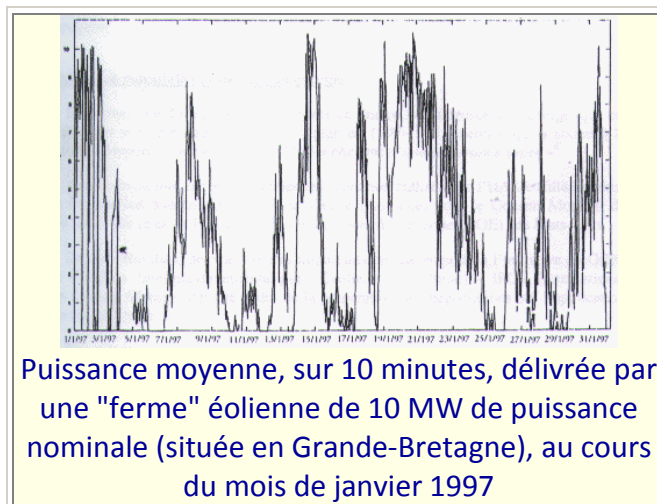


Distribution des vents à l'île de Batz (Bretagne Nord).



Distribution des vents au Cap Camarrat (Littoral méditerranéen).

En conséquence des vents qui sont rarement optimum, la puissance instantanée délivrée est souvent loin du maximum, et surtout varie très rapidement.



Puissance moyenne, sur 10 minutes, délivrée par une "ferme" éolienne de 10 MW de puissance nominale (située en Grande-Bretagne), au cours du mois de janvier 1997

L'observation montre alors que pour passer de la puissance nominale installée d'une éolienne (en W) à l'énergie fournie sur une année (en W/h) il faut multiplier par un coefficient 2.000 environ, et non par 8.760 (le coefficient 8.760 représente le produit 365 (jours) x 24 (heures), soit ce qui correspond à une installation tournant en permanence à plein régime). En d'autres termes, une éolienne produit autant d'électricité, pendant toute l'année, que si elle tournait à puissance maximum pendant 2000 heures environ.

Pays	Puissance installée en MW		production en 2002 (Twh)	Equivalent heures à pleine puissance
	2001	2002		
Allemagne	8 754	12 001	19,4	1 869
Espagne	3 337	4 830	7,66	1 875
Danemark	2 417	2 889	5,92	2 231
Italie	697	785	1,47	1 983
pays-Bas	493	688	1,2	2 032
Royaume-Uni	474	552	1,48	2 884
Suède	293	328	0,62	1 996
Grèce	272	276	0,68	2 481
Portugal	125	179	0,31	2 039
France (y/c DOM)	94	153	0,29	2 348
Autriche	83	139	0,25	2 252
Irlande	125	138	0,33	2 509
Belgique	32	44	0,05	1 315
Finlande	39	41	0,08	2 000
Luxembourg	15	16	0,03	1 935
<b>Total Union Eur.</b>	<b>17 250</b>	<b>23 059</b>	<b>39,77</b>	<b>1 973</b>

Ce tableau représente, pour un certain nombre de pays d'Europe, le nombre d'heures "équivalent pleine puissance", estimée en supposant que la puissance moyenne installée sur l'année est la médiane des puissances début 2001 et début 2002. On constate que la valeur moyenne, pour l'Europe, est très légèrement inférieure à 2000 "heures équivalent pleine puissance".

Source Obser'ver

Ainsi une éolienne de 1 MW de puissance nominale fournira, en moyenne, 2 GW/h (soit 1 x 2000) sur l'année. Ainsi que le tableau ci-dessus le confirme, ce coefficient de 2.000 résulte de l'observation sur des éoliennes déjà installées, lesquelles, par la force des choses, sont situées en zone favorable, voire très favorable (sur le littoral, et sur un littoral bien venté, car tous les littoraux ne se valent pas).

Par ailleurs on a noté que pour un champ d'éoliennes la puissance délivrée par unité de surface est en première approximation indépendante de la taille des éoliennes. En effet, des éoliennes plus puissantes sont aussi plus grandes et doivent être plus espacées pour que le vent soit efficace sur toutes les éoliennes (car l'écoulement immédiatement derrière une éolienne est perturbé).

Concrètement la densité de puissance nominale installée dans un champ d'éoliennes situé dans une zone favorable est de l'ordre de 10 MW par km<sup>2</sup>, soit une production annuelle de



l'ordre de 20 GW/h par km<sup>2</sup>, quelque soit la taille des éoliennes concernées (en fait cela va de 7 à 12 MW par km<sup>2</sup>, donc 10 est valable pour un calcul en ordre de grandeur).

### **L'éolien est-il une solution pour l'approvisionnement énergétique ?**

En partant de ce constat, quelle surface de zones favorables faudrait-il couvrir d'éoliennes pour produire en moyenne la consommation française d'électricité ? Il s'agit bien sur d'un exercice académique, mais qui sera illustratif pour cadrer le potentiel vraisemblable de cette forme de production d'électricité.

La production française d'électricité a été de 506 TW/h en 1997 (1 TW/h = 1.000.000.000.000 W/h). Certes une partie est exportée, mais cela ne change pas les ordres de grandeur.

Il en résulte que pour fournir 506 TW/h (soit 506.000 GW/h) avec des éoliennes fournissant 20 GW/h par km<sup>2</sup>, il faudrait "planter" une surface favorable de  $506.000 \div 20 = 25.000$  km<sup>2</sup>, soit environ 5% du territoire métropolitain, ce qui représente à peu près la superficie actuellement occupée par les villes, les routes et les parkings (voir chiffres sur l'urbanisation), même si en fait les surfaces ne sont pas mobilisées en totalité et restent largement disponibles pour un autre usage (cultures notamment). Il est bien évident que si le nombre d'heures "équivalent pleine puissance" n'est égal à 2000 que sur 1% du territoire, alors les calculs ci-dessous sous-estiment le nombre de machines à installer et la surface mobilisée, car une partie des éoliennes serait alors installée dans des endroits où l'énergie annuelle produite serait bien inférieure à ce qu'elle est aujourd'hui, pour une éolienne de même puissance nominale bien sûr.

Avec des éoliennes de 1 MW de puissance nominale (qui font de l'ordre de 80 m de haut), fournissant donc environ 2 GW/h par an en zone favorable, il en faudrait plus de 250.000 pour produire les 506 TW/h mentionnées plus haut.

Mais comme le vent est intermittent, alors que la demande n'est pas dépendante du vent (personne n'entend avoir un frigidaire qui ne fonctionne pas les jours sans vent !), une électricité uniquement éolienne devrait pouvoir être stockée au moment où il y a du vent, puis restituée au moment où le consommateur entend être servi. Sous forme chimique, les possibilités de stockage sont l'utilisation d'un accumulateur (une "batterie") ou la conversion en hydrogène, sous forme mécanique cela peut consister à remonter de l'eau dans un réservoir d'altitude (ce que fait déjà EDF).

Si toute l'énergie électrique du pays était éolienne, le stockage de l'électricité dans des batteries représenterait probablement des consommations de matériaux (et des problèmes d'environnement pour leur fabrication et leur fin de vie...) hors de proportion avec les moyens disponibles : dimensionner des accumulateurs pour stocker l'équivalent d'une semaine de production d'électricité (à raison de 1,5 TW/h par jour en gros) demanderait la fabrication de 7 tonne(s) de batteries plomb-acide par Français (une telle batterie stocke environ 30 Wh par kg de poids).

Une solution probablement plus réaliste consiste à produire de l'hydrogène par électrolyse puis à la stocker afin de l'utiliser dans des piles à combustible lors des jours sans vent. Le rendement de l'électrolyse est de 80% au mieux, celui du stockage de l'hydrogène 80% au mieux également (il faut bien utiliser de l'énergie pour le comprimer !), et enfin les meilleures piles ont des rendements de 80% en cogénération (ce qui revient à promouvoir le chauffage électrique alors que ce mode est présenté comme une hérésie aujourd'hui !) mais de 45% en production électrique seule.

Dans ce dernier cas, le rendement global de la chaîne est de 28%. Si nous supposons que la moitié de l'électricité éolienne est consommée lorsqu'elle est produite, mais que pour l'autre moitié il faut stocker, avec un rendement de 25%, alors il faut environ 600.000 éoliennes pour produire 500 TW/h (soit 125.000 qui produisent sans stockage, et 500.000 qui produisent avec stockage, donc une fourniture utile divisée par 4, la même chose que 125.000 sans stockage, et on retrouve bien la production brute de 250.000 éoliennes au total).

Pour le stockage de l'eau, un exemple sera éclairant : les lacs de barrage fournissent actuellement de l'ordre de 7% de la production d'électricité en France (mais représentent 20% de la puissance installée). Cela signifie qu'un stockage d'eau pouvant alimenter la France entière un jour sans vent revient à multiplier les lacs amont par 5 à 6 au moins (pour que la puissance installée soit égale à la puissance maximale délivrée sur le réseau), puis encore par 5 à 6 pour récupérer l'eau en aval pour pouvoir la remonter à la demande, et enfin par un facteur inconnu lié au fait que remonter l'eau ne se fait pas sans pertes (frottements, efficacité de la pompe, etc.) .

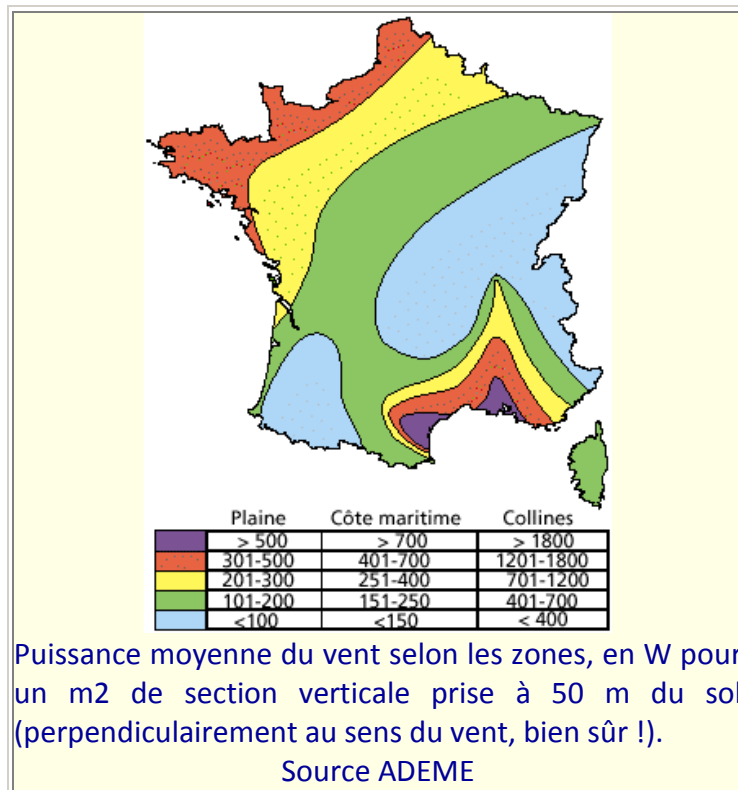
En 2002 l'éolien a produit 0,3 TW/h en France, soit environ 0,06% de notre production électrique totale. Le programme Eole 2005, qui prévoit 500 MW de puissance installée en 2005, soit 250 à 500 éoliennes de grande taille, permettra ainsi à la France de produire 1 TW/h dans les meilleures conditions, soit 2,5% de la production électrique à base de combustibles fossiles, 0,25% de la consommation d'électricité française, ou encore moins de 0,1% de notre consommation d'énergie totale.

Les chiffres montrent que les pays qui ont investi massivement dans l'éolien, comme le Danemark, n'ont pas beaucoup changé la structure de leur approvisionnement énergétique, ni leurs émissions de gaz à effet de serre.

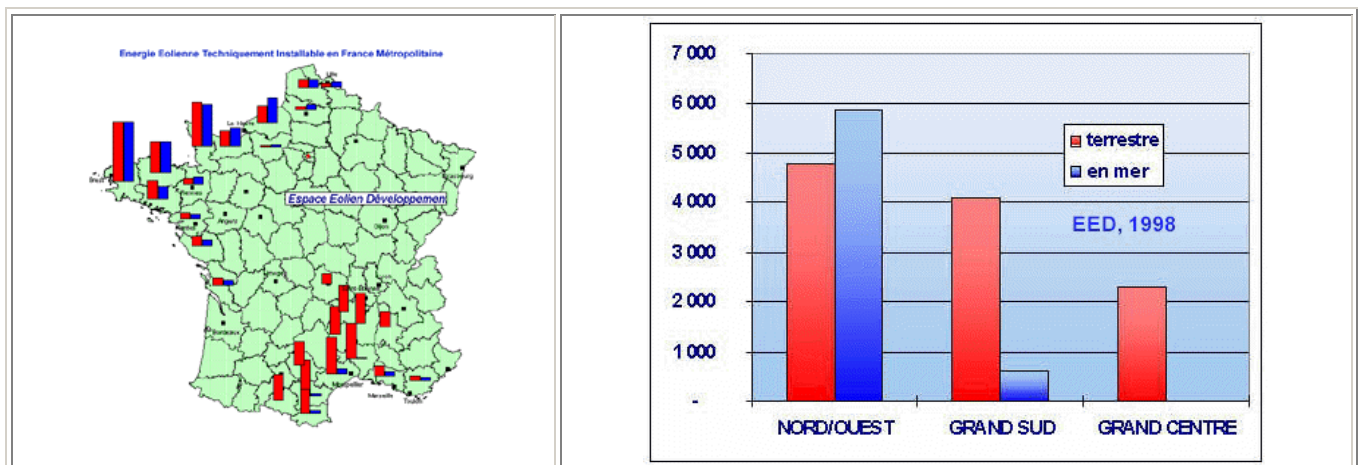
Faut-il passer des années à se focaliser sur 0,1%, quand, dans le même temps, un programme un peu sérieux d'économies d'énergie - comme par exemple l'isolation des logements existants, qui ne demanderait pas plus d'argent public - pourrait facilement faire baisser la consommation d'énergie de 10%, c'est à dire 100 fois plus, en attendant de diviser notre consommation par 2 à 3, seule condition pour envisager la "durabilité" autrement que dans les discours ?

Et en plus....

Et nous n'en avons pas fini avec nos malheurs : le coefficient de 2.000 mentionné plus haut est exceptionnel : il n'est atteint qu'en de rares endroits ventés abondamment et régulièrement.



Dans les faits il se pourrait qu'il faille mobiliser une surface bien supérieure : la société Espace Eolien Développement a établi une carte détaillant le potentiel "techniquement installable" d'énergie éolienne en France métropolitaine (ci-dessous), mais ce potentiel ne se monte qu'à 10% de notre production électrique actuelle.



La lecture de cette carte montre déjà que, rien que pour avoir 10% d'électricité éolienne, il faudrait couvrir quasiment toutes les Cévennes, la Bretagne et la Normandie.

Comme les vents moyens décroissent très vite dès que l'on s'éloigne des zones les plus favorables (crêtes ou littoral), un coefficient moyen "raisonnable" de 1500 (qui reste supérieur à celui constaté en Belgique) et un rendement de 30% pour le stockage obligeraient alors à couvrir près de 20% du pays, avec 1 million d'éoliennes !

Il est facile de déduire du calcul qui précède qu'un plan ambitieux de production d'électricité à base d'énergie éolienne (par ambitieux, il faut comprendre "qui ne soit pas

ridicule comparé à notre consommation actuelle") n'est pas nécessairement réaliste, quelle que soit l'échéance.

Le Danemark, champion toutes catégories de l'éolien dans le monde, fait un peu plus de 10% de son électricité par ce moyen en 1999, alors qu'il y consacre - sans mauvais jeu de mots - beaucoup d'énergie. Cet approvisionnement a représenté un peu plus de 1% de sa consommation totale d'énergie cette même année, et ce alors que la consommation d'énergie de ce pays a augmenté d'un peu plus d'1% par an sur la décennie 1990-1999, comme ce fut le cas en France sur la période 1960-2000.

### **L'éolien est-il une solution pour lutter contre les émissions de gaz à effet de serre ?**

Attendu que de régler le problème du changement climatique nécessite de diviser la consommation d'énergie fossile mondiale par 2 au moins, et, dans les pays développés, par 4 à 12 (soit une diminution de 75% à 92% !), nous voyons tout de suite que l'éolien, qui ne peut substituer que 1% à 2% de cette même consommation, dans un monde en perpétuelle croissance, ne pourra pas grand chose pour nous.,.

Comme en outre stocker des quantités massives d'électricité n'est pas possible aujourd'hui, recourir à l'éolien "autant que possible" signifie, en pratique (et c'est bien comme cela que procèdent les pays très engagés) :

➤ Que les éoliennes soient reliées au réseau, et fournissent de l'électricité quand il y a du vent,

➤ Que, nécessairement, une autre forme de production d'électricité soit utilisée les jours sans vent.

Supposons par exemple que nous souhaitions produire 25% de notre électricité avec de l'éolien couplé au réseau, cela veut dire que la capacité installée correspond à la totalité de la consommation du pays quand le vent souffle assez fort (à cause du fameux facteur 4 mentionné plus haut). Cela signifierait en fait que nous produirions 100% de notre électricité avec de l'éolien les jours où il y a assez vent, mais que, les jours sans vent, soit nous avons 100% d'électricité en moins sur le réseau, soit... nous la produirions autrement. A moins que le consommateur n'accepte des restrictions importantes (réparties comment ?) les jours avec peu de vent, ou imposerait de construire aussi des centrales thermiques (donc fonctionnant au charbon, au gaz ou au pétrole) qui seraient mises en route en l'absence de vent.

En effet, les centrales nucléaires ne peuvent pas être arrêtées et mises en route "à la demande" sur des créneaux de quelques heures (lorsqu'un réacteur nucléaire est fortement ralenti de manière rapide, il se produit un processus appelé "empoisonnement xénon" qui empêche le redémarrage à pleine puissance dans les heures qui suivent). Par ailleurs, les lacs de barrage sont déjà utilisés au quasi-maximum : en France, le "potentiel techniquement installable" est considéré comme déjà occupé à 90%.

A consommation constante, installer des éoliennes pour produire l'essentiel de notre électricité nous forcerait donc à construire en plus des centrales thermiques, dont la capacité nominale serait celle des éoliennes installées. J'ai entendu il n'y a pas longtemps un producteur d'électricité au charbon (ce que l'on fait de pire en matière d'émissions par kWh produit) se réjouir du développement de l'éolien, qui va permettre de "donner un nouvel essor à la production d'électricité au charbon" !

En France, un plan massif d'éolien raccordé au réseau signifierait donc, dans les faits, une augmentation des émissions de gaz à effet de serre. Par contre, si un pays produit déjà massivement son électricité de manière thermique, le bénéfice est réel mais... à condition de conserver des centrales thermiques (cas du Danemark et de l'Allemagne par exemple, ceci expliquant peut-être cela). Une conversion au nucléaire - qui a ses inconvénients par ailleurs, mais il n'a pas que des inconvénients ! - permet d'espérer des gains considérablement supérieurs en matière d'économies d'émissions.

Cela étant, nous avons bien quelques centrales thermiques en France, qui pourraient donc être arrêtées un peu plus souvent les jours avec vent, soit 25 à 30% du temps tout au plus, mais là s'arrête le bénéfice. Notre production thermique étant de 30 à 40 TW/h, nous pouvons alors viser 10TW/h d'éolien tout au plus, soit quelques % de notre production électrique. Notons qu'installer un ou deux grands barrages supplémentaires permettrait d'arriver dans les mêmes ordres de grandeur, et que je laisse chacun libre de savoir si il préfère une vallée pleine d'eau ou des côtes et des montagnes pleines d'éoliennes.

#### **En guise de conclusion...**

L'engouement auquel nous assistons actuellement pour l'éolien est curieux. Cette solution n'apparaît dans les bons ordres de grandeur, ni pour lutter efficacement contre les émissions de gaz à effet de serre, ni pour concourir de manière significative à notre consommation d'énergie actuelle.

Si la première priorité pour l'avenir est de diminuer les émissions de gaz à effet de serre, il y a bien plus efficace à faire que de mettre des éoliennes partout. La Suisse, qui n'a quasiment pas d'éoliennes, a des émissions par habitant deux fois moindres que celles du Danemark (qui fait partie des premiers pollueurs par habitant en Europe question gaz à effet de serre), une fois et demi moindre que les nôtres, et pourtant il y fait froid l'hiver (30% de la consommation d'énergie en France est liée au "confort sanitaire", chauffage pour l'essentiel et eau chaude). L'Allemagne, qui vient juste après le Danemark (pour la production éolienne) a aussi des émissions de gaz à effet de serre par habitant bien au-dessus de la moyenne européenne.

Plus généralement, si notre première priorité est de minimiser notre impact sur l'environnement, penser qu'il suffit de mettre des éoliennes partout pour y parvenir est hélas un rêve. Il nous faudra pour cela renoncer à la poursuite de la croissance en volume. Dans quelle mesure les éoliennes ne sont-elles pas "aimées" parce que bien des gens y voient une alternative aux économies d'énergie, pensant que quelques éoliennes suffiront à nous éviter de changer quoi que ce soit à notre consommation d'énergie actuelle ?

Si la première priorité est de faire uniquement appel aux renouvelables pour notre consommation d'énergie, il est incontournable de diminuer au préalable notre consommation d'énergie d'un facteur deux à trois : aucune solution à base de renouvelables n'est dans les bons ordres de grandeur pour nous permettre un approvisionnement à notre niveau actuel, et il s'en faut de beaucoup.

Et enfin, toutes les renouvelables ne sont pas égales ! Mettre sur un pied d'égalité la biomasse, les carburants d'origine agricole, l'éolien, le solaire, la géothermie et l'énergie hydroélectrique est ignorer que chaque forme a ses avantages et ses inconvénients, et que toutes sont très loin d'avoir le même potentiel. Au niveau actuel de consommation d'énergie que nous avons, l'éolien servira juste d'alibi sans rien changer sur le fond, au prix d'une dégradation supplémentaire des paysages et d'une augmentation, dans certains cas, des émissions de gaz à effet de serre. Hum.....