

Dans le monde, le vent est en mesure de remplacer largement l'atome, et même beaucoup plus. Ces vingt dernières années, il s'est révélée être une ressource renouvelable extrêmement intéressante pour produire du courant électrique. En Europe, en 2001, le parc éolien a produit 40 000 GWh, la production de plus de 5 grandes centrales nucléaires. La Suisse, relativement peu ventée, est restée pour l'instant à l'écart de ces changements importants. Mais qu'est-ce que l'énergie éolienne?

Les vents sont l'un des effets du rayonnement solaire: ils prennent naissance en raison des écarts de température qui s'établissent entre masses d'air différentes. Dans les zones tropicales, l'air se réchauffe et atteint des températures élevées. Il se dilate, sa densité diminue et un courant ascendant s'amorce. Ces importantes masses d'air chaud, parvenues en haute altitude, cherchent alors à s'écouler en direction des pôles où elles iront se refroidir. Dans l'hémisphère nord, ce mouvement est accompagné de courants d'ouest: près de l'équateur, les masses d'air qui ont acquis grâce à la rotation de la terre une vitesse tangentielle élevée vont être freinées en se dirigeant vers les pôles, où la vitesse de rotation est nulle (grandes brises d'ouest). De là, elles reviennent à faible altitude sous la forme de vents d'est arctiques froids. En pratique, ce n'est pas un seul grand courant qui agit de manière uniforme: il se divise en mouvements circulaires partiels plus ou moins stables. Sous nos latitudes, ce sont tantôt les courants de sud-ouest ou d'ouest qui "gagnent" (vent ou föehn), tantôt les vents du nord-est froids (bise).

L'énergie éolienne a la particularité de trouver ses sources à la fois dans le rayonnement solaire et dans la rotation de la terre. À basse altitude, on observe aussi des vents locaux dus aux différences de températures entre le jour et la nuit. Ces brises de vallée ou de montagne dépendent fortement du relief.

*figure* (Figure 2-4 p 14 meteonorm, avec quelques explications en plus, si possible figure 3 d pour montrer courants est-ouest).

Pour la plupart d'entre nous, le vent est un élément capricieux, invisible, qui se manifeste pour nous inquiéter, nous rafraîchir ou nous déranger si ce n'est pas pour nous glacer les os ou tout détruire sur son passage. Il frappe notre imagination car nous pouvons aussi bien nous le représenter sous la forme de grandes volutes que d'un courant rectiligne et rapide. Pour capter ces forces imprévisibles, les idées les plus folles sont nées: turbines, hélices de toutes sortes, ailes battantes, trains à voile...

### L'histoire du vent

Avant l'invention du moteur à vapeur, les animaux domestiques, puis le vent et la force hydraulique étaient les seuls moyens qui pouvaient quelque peu soulager l'homme des tâches harassantes de la mouture du grain ou de l'irrigation des cultures. Les navigateurs également ont appris très tôt à utiliser le vent pour se déplacer et transporter des marchandises. On peut imaginer qu'à l'avenir il soit à nouveau utilisé pour les transports à longue distance en mer, ou en altitude en utilisant les courants rapides qui y règnent, les jet streams.

Le plus ancien modèle d'éolienne connu est le moulin persan, daté de 644 avant J.-C. C'était un bâtiment ouvert conduisant l'air sur le côté d'une turbine verticale dont les aubes étaient constituées de gros ballots. La meule à grain, entraînée directement, se trouvait au dessous.

On suppose que Chinois et Égyptiens ont utilisé très tôt le vent pour la mouture ou le pompage, semble-t-il vers 3600 avant J.-C. Il s'agissait de panémons de bambou, rotors à axe vertical équipés de voilures. C'est vers l'an 1000 qu'elles se sont largement développées en Chine. En Europe, c'est aussi depuis cette période qu'ont été mis au point les modèles hollandais à voile de toile et de bois dont la technique s'est améliorée au XVI<sup>e</sup> siècle. D'abord destinés au pompage et à la mouture, leur emploi s'est étendu au pressage de l'huile, à la fabrication du papier, au sciage du bois ou de la pierre, au martelage des métaux. Les vents étant imprévisibles par nature, les moulins devaient être surveillés et réglés en permanence, tout comme la voile des bateaux. La technologie moderne a réussi progressivement à rendre le fonctionnement des éoliennes indépendant de cette surveillance, et enfin fiable. À la fin du siècle dernier, le "moulin américain", roue à pales multiples destinée au pompage, était fort répandu.

*figure*

Vers 1890, les premières éoliennes à génératrice électrique ont été réalisées. Dès les années 1930, des machines de grande taille furent construites en URSS et dans les pays industrialisés, plus de trois cent sociétés se mirent à fabriquer des aérogénérateurs utilisant les dernières connaissances de l'aérodynamique. En effet, on se rendit compte que, pour capter un maximum d'énergie, il n'était plus nécessaire d'utiliser des pales de grande surface: une plus grande vitesse de balayage dans l'air faisait gagner en poids et en rendement. L'éolienne rapide était née. Mais dès l'après-guerre, l'utilisation du pétrole à bon marché pour la production énergétique fit disparaître presque complètement cette industrie, lui laissant une petite place dans l'alimentation de phares, de balises, d'installations de communication ou de fermes isolées.

Pourtant, ses partisans restaient convaincus que cette énergie renouvelable et décentralisée pouvait répondre à de nombreux besoins dans le monde. Mais l'imagination des constructeurs s'est souvent heurtée aux dures lois de la physique, pas seulement de l'aérodynamique, mais aussi de la résistance de matériaux soumis à des efforts imprévisibles et violents, les plus tenaces se brisant sous l'effet de la fatigue.

Contrairement à l'énergie solaire, le vent présente l'avantage de souffler la nuit aussi, par mauvais temps et chez nous plus fort en hiver qu'en été.

### **Comment capter la puissance du vent ?**

Pour capter l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement, il s'agit de ralentir l'air qui traverse l'hélice en transformant les forces agissant sur les pales en puissance de rotation. Pour cela, les pales se présentent obliquement au vent avec un angle appelé angle de calage, provoquant la rotation par un effet de vis ou de tire-bouchon. La théorie (théorème de Betz) montre que, pour récolter une puissance de rotation maximum, l'hélice

doit réduire de trois fois la vitesse du vent, et non pas l'arrêter. L'énergie récoltée dépend du cube de la vitesse et de la surface balayée par l'hélice, donc du carré de son diamètre. La densité intervient également: de l'air humide ou froid, une haute pression atmosphérique (basse altitude) seront des facteurs favorables.

Formule de Betz donnant la puissance maximale qu'il est possible de capter :

$$P_{\max} = \frac{8}{27} \rho S V^3$$

avec  $\rho$  : densité de l'air, environ  $1,3 \text{ kg/m}^3$   
 $S$  : surface balayée par l'hélice en  $\text{m}^2$   
 $V$  : vitesse du vent en  $\text{m/s}$   
 $P$  : puissance en Watts

Formule pratique pour une éolienne rapide à axe horizontal, tenant compte d'un rendement moyen:

$$P = 0,2 D^2 V^3$$

$D$  : diamètre de l'hélice en mètres  
 $V$  : vitesse du vent en  $\text{m/s}$ .

La régularité du vent joue aussi un rôle important: une hélice ne s'adapte pas facilement à des sauts de vitesse ou de direction trop rapides. Au niveau du sol, l'écoulement de l'air est perturbé et ralenti par les obstacles rencontrés. Un arbre, une maison laissent un sillage de perturbation d'une longueur équivalant à dix fois leur hauteur. C'est pourquoi le lieu d'implantation devra être choisi soigneusement. Une grande machine aura l'avantage de se placer au-dessus des obstacles, là où le vent est plus fort et régulier.

Les éoliennes se répartissent en quatre catégories principales, selon que leur axe de rotation est horizontal ou vertical, et qu'elles sont dites lentes – la vitesse des pales restant du même ordre que celle du vent – ou rapides. Dans ce cas, la vitesse de l'extrémité de leurs pales peut atteindre dix fois la vitesse du vent.

### *Éoliennes lentes*

Les plus connues sont les roues de pompage multipales. Les pales occupent la plus grande partie de la surface du cercle décrit par l'hélice. On obtient un fort couple de démarrage qui permettra par exemple d'entraîner une pompe. Elle est orientée par une queue. En cas de tempête, un mécanisme permet à la roue de se placer parallèlement au vent.

*figure*

Le rotor Savonius est aussi une éolienne lente, mais à axe vertical, constitué le plus souvent de deux demi-tonneaux décalés. Grâce à leur forme, la traînée que le premier présente au vent est plus élevée que celle du second qui remonte à contre-courant. Il en résulte un couple de rotation qui permet l'entraînement de l'axe quelle que soit la direction du vent. La puissance récoltée reste faible. Des versions plus élaborées permettent la production d'électricité.

### *Hélices rapides*

Grâce à la finesse de leurs pales, au nombre de deux ou trois, ces hélices modernes sont destinées à produire de l'électricité. Elles parviennent à capter l'énergie disponible avec un bon rendement, qui atteint environ 70 % de la limite théorique. Leurs pales sont profilées en forme d'aile afin de réduire les pertes, alors que la portance du profil assure le couple de rotation. Le démarrage et la protection sont obtenus en ajustant l'angle d'attaque des pales au moyen d'un servomécanisme. La génératrice électrique est couplée à l'hélice le plus souvent par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse. La turbine est orientée face au vent par un moteur commandé par une girouette.

L'éolienne Darrieus, à axe vertical, se présente souvent sous la forme d'un fuseau vertical à 2 ou 3 pales. Leur géométrie ne leur permet pas de démarrer seules. (*éolienne Darrieus installée près de Martigny*).

#### *éoliennes en sites isolé.*

Dans le monde, seule une petite partie de la population est reliée au réseau électrique. Dans de nombreuses fermes ou habitations isolées, des groupes électrogènes diesel ou à essence produisent du courant avec un mauvais rendement, une importante pollution et des coûts élevés. Combinées entre elles, les énergies renouvelables ont là un rôle important à jouer: éolienne couplée à des panneaux solaires ou à une petite turbine hydraulique, cogénération au biogaz ou au bois etc. Pour le stockage du courant, on utilise des batteries dont la capacité doit couvrir les périodes creuses. Une bonne complémentarité entre les différentes ressources et le contrôle de l'instant d'enclenchement des consommateurs permettent de limiter au minimum l'énergie à stocker. Il existe sur le marché de nombreux modèles d'éoliennes d'une puissance comprise entre 50 W et quelques dizaines de kW. Dans nos régions, le prix d'une petite installation se révèle inférieur à celui du raccordement au réseau dès que la longueur du raccordement dépasse quelques kilomètres.

Figure: à choisir parmi les photos ci-jointes,

#### **Mesure des vents.**

Pour évaluer l'énergie disponible, il faut disposer de données sur les vents de la région, et de manière plus précise au lieu d'implantation exact de la machine. La puissance récupérable étant proportionnelle au cube de la vitesse du vent, une erreur dans l'estimation de celle-ci peut conduire à des résultats très différents. En Suisse, des mesures effectuées systématiquement à plus de 160 endroits depuis 1978 permettent de se faire une idée d'ensemble.

#### *Figure*

Courbe des vents classés, exemple des vents de la Dôle  
(meteonorm p. 30, 31)

Dans le monde ,les régions terrestres les mieux ventées se trouvent en zone côtière des continents. Sans entrer dans les détails, c'est le cas de l'Ouest africain et européen, de l'Amérique du Nord et du Sud, de l'Inde, du Japon, de Chine, de la Sibérie, des îles de l'Océanie, de l'Australie...

La mise au point de machines de plus en plus puissantes et fiables a permis le développement d'une industrie importante aux États-Unis comme en Europe. Cette nouvelle situation a provoqué en vingt ans un changement complet d'attitude car cette ressource était auparavant considérée comme négligeable.

### **Tour du vent.**

Au début de 1995, une puissance de 540 MW ou 0.5 GW était installée au Danemark, de 630 MW (0.63 GW) en Allemagne. L'Europe avec 1750 MW (1.75 GW) , dépassait les États-Unis (1.7 GW) avec une production de 4 TWh, équivalent à la consommation de 3 millions de ménages. Six ans plus tard cette puissance avait été multipliée par 5 au Danemark, par 14 en Allemagne et plus que doublé aux États-Unis!

L'Allemagne est le plus grand producteur européen. 8.75 GW installés ont produit 12 TWh en 2001, rachetés au prix moyen de 0.08 Euro/kWh. 15.5 GW sont prévus pour 2005.

En Espagne, 6400 machines étaient installées fin 2001, soit 3.6 GW. En 2010, 15 GW sont prévus et 29 % de l'électricité espagnole sera renouvelable. Les constructeurs espagnols fournissent 18 % du marché mondial. Dans ce pays, les coûts d'installation, environ 850 Euros par kW installé, ont été divisés par deux en 15 ans.

La France, bien ventée mais suréquipée en nucléaire, ne comptait que 100 MW (0.1 GW) début 2002. Il est prévu de rattraper ce retard pour atteindre entre 7 et 14 GW en 2010.

L'Europe disposait de 17 GW en 2001, son parc aura probablement triplé en 2010.

*note: 1000 MW ou 1 GW représentent approximativement la puissance d'une grosse centrale nucléaire ou au charbon. Un parc éolien de 1000 MW produit l'équivalent de cette puissance environ un tiers du temps selon les vents sur le site.*

*voir le tableau p 48 de systèmes solaires*

Aux États-Unis, la progression est très forte (65% en 2001) après une pause qui a suivi l'installation de grands champs en Californie dans les années 1980. Au Texas, le prix de revient est compris entre 0.03 et 0.06 \$/kWh alors que le courant combiné (nucléaire, gaz et charbon) revient à 0.076 \$ /kWh. Les fermiers investissent très activement dans cette production qui leur rapporte plus que les cultures.

La Suisse est restée à l'écart de cette évolution puisqu'à fin 2001, 5 MW seulement étaient installés, principalement au Mont Crosin, près de St-Imier (Ju). Chez nous, en raison du régime des vents, le taux moyen de production est d'environ 13.5 % alors qu'en moyenne européenne il est de 28.5 %.

Dans le monde, 24.5 GW étaient installés au début de 2002; on prévoit plus de 60 GW en 2010, dont les trois quarts en Europe.

L'énergie théoriquement disponible est énorme, surtout dans l'hémisphère Nord; elle a même été évaluée à 30 milliards de GWh, plus de 100 fois la consommation actuelle de pétrole! Le potentiel estimé par Benjamin Dessus (Atlas des Énergies) dans le cadre d'un développement équilibré des différentes ressources renouvelables, est de 210 TWh, soit environ 100 000 MW (100 GW) installés. Mais c'est bien sûr d'autres considérations que la technique seule qui vont déterminer l'importance de l'exploitation de cette ressource: choix politiques en relation avec l'émission de gaz à effet de serre, sauvegarde des paysages, adéquation de la production avec la demande, équipements et stabilité des réseaux, lutte entre les différents lobbies qui verront d'un mauvais oeil ce nouveau concurrent...

### **Les champs offshore.**

L'exploitation des vents en mer se limite en principe à moins de 20 km des côtes et en zones peu profondes (moins de 20 m de fond). Encore très peu exploité, le potentiel utilisable est important. En effet, les conditions en mer sont particulièrement favorables: sans obstacles, les vents y sont plus stables, avec une vitesse moyenne de 8 à 9 m/s contre 6 à 7 m/s sur terre. La fatigue des machines y est moindre, le rendement meilleur. Les risques sont très limités, il n'y a semble-t-il aucun impact réel. Pour l'instant, les coûts y sont de 25 à 40 % plus élevés que sur terre, mais la conception des machines et les techniques d'installation évoluent rapidement: caissons autoporteurs coulés à l'endroit choisi, machines plus grandes (3 MW) équipées d'hélices à deux pales, plus faciles à construire. Les ressources off shore dans la seule mer du Nord permettraient de couvrir trois fois la consommation électrique des pays qui la bordent selon une étude commandée au German Wind Energy Institute (DEWI). On parle de 50 GW offshore installés en 2030.

### **Évolution technique.**

Les éoliennes industrielles supportent les pires tempêtes, leur fiabilité est très bonne. La taille des machines a progressivement augmenté pour atteindre environ 1 MW. Des prototypes de 5 MW existent, mais l'accroissement de la taille des machines est limité par la taille des pièces à transporter et par la vitesse de rotation de l'hélice qui diminue avec le diamètre.

Pour diminuer l'entretien et l'usure des pièces, certains constructeurs ont réalisé des machines de grande taille sans multiplicateur de vitesse, l'alternateur étant couplé directement à l'hélice. Depuis peu, plusieurs fabricants proposent des modèles qui atteignent leur puissance nominale par un vent de 8 m/s alors que pour la plupart une vitesse de 12 m/s est nécessaire. Le taux de production s'en trouve nettement amélioré, la puissance fournie est plus constante et la capacité des lignes d'aménée mieux utilisée. Le coût des lignes est l'obstacle principal à l'équipement des zones désertiques et peu peuplées.

L'énergie éolienne en montagne évolue également. En altitude, il faut éviter que de la glace se forme sur les pales. L'installation d'une machine est prévue près d'Andermatt à 2330 mètres d'altitude; ses pales seront chauffées automatiquement en cas de froid et d'humidité et elles sont prévues pour résister à des températures de - 40 °C . Les vents sont favorables puisque la vitesse moyenne sur le site est de 7 m/s à 45 m de hauteur. La machine de 800 kW fournie par ABB a un rotor de 51.5 m de diamètre directement couplé à la génératrice qui tourne à une vitesse de 18 à 32 tours/minute.

L'implantation des champs éoliens dépend évidemment de l'acceptation des populations concernées. Cette énergie offre de grands avantages: l'emprise au sol est faible et n'exclut pas le pâturage ou l'agriculture, elle est renouvelable. Une fois les machines démontées ou remplacées les matériaux de construction peuvent être recyclés. Cela n'est que partiellement le cas pour les pales, construites en matériaux composites et pour les fondations qui pourront rester enterrées. En ce qui concerne l'énergie grise, une machine produit entre 50 et 80 fois plus d'énergie qu'il n'en a fallu pour la construire. Parmi les inconvénients, on peut citer une atteinte au paysage naturel, l'aménagement des voies d'accès, le bruit. A partir d'une distance de 300 mètres environ, le chuintement des pales reste noyé dans celui du vent. A cette distance, le bruit résiduel est évalué à 35 db, 40 db étant défini comme la norme pour les zones de détente. Qu'on les trouve belles ou non, les grandes éoliennes modernes sont acquies une valeur de symbole, le mouvement lent de leurs pales animant les grandes étendues, comme en Hollande où les vieux moulins sont devenus des attractions touristiques.

### **Potentiel pour la Suisse.**

En Suisse, les endroits propices se trouvent principalement sur la chaîne du Jura ainsi que dans les Préalpes et les alpes, dans les régions dont l'altitude est comprise entre 800 et 3000 mètres. Une étude effectuée sur le plan fédéral a cherché à dénombrer les sites possibles en fonction de la vitesse moyenne du vent et de sévères critères environnementaux. Ceux-ci excluent les zones protégées, les réserves naturelles, les prairies maigres, les forêts, les agglomérations et les lacs. Les passages de migration ou d'habitat d'espèces d'oiseaux pour lesquelles elles représentent un danger ont été écartés. La protection du paysage a été prise en compte puisque les endroits où de telles installations pourraient le dénaturer ont été exclues. Les zones sélectionnées doivent être déjà perturbées visuellement par des installations existantes, routes, autoroutes, chemins de fer, antennes etc. En appliquant ces critères, le nombre possible d'installations d'une puissance unitaire de 250 à 500 kW a été évalué à 3300, produisant 1628 GWh (soit 5.8 PJ). Cela correspond à 3.4 % de la consommation d'électricité en Suisse en 1995.

Plusieurs projets de parc éoliens existent: à Ste Croix (VD) 7 machines totalisant 11 MW devraient produire du courant à un prix de 14 à 16 ct/kWh; Dans le Canton de Neuchâtel, projets à la Montagne de Buttes, au Grand-Coeurie près de Rochefort et au Crêt-Meuron où 7 turbines (12.25 MW) produiraient du courant à 15-20 ct/kWh. Leur réalisation se trouve pour l'instant reportée en raison de la résistance des milieux de la protection du paysage ou du

patrimoine national, et par certains riverains. L'objectif fixé par Suissénergie est de couvrir 20 % des 500 GWh de nouveau courant renouvelable en 2010 par des aérogénérateurs, soit 5 à 8 parcs semblables au Mont Crosin. Chez nous, ce potentiel reste inférieur aux possibilités de l'énergie solaire qui en utilisant une partie seulement des toits des bâtiments déjà construits, apporterait une contribution plus importante. Mais les qualités propres de l'énergie éolienne, son prix intéressant, sa complémentarité avec le solaire et l'hydraulique constituent pour elle des atouts précieux.

#### Bibliographie:

Le Gourières, D. << Énergie éolienne >> éd. Eyrolles 1982  
Le Chapellier, P. << Le vent, les éoliennes et l'habitat >> Eyrolles 1981  
Meteonorm vent, Office fédéral de l'énergie  
Éoliennes et protection du paysage, déc. 1996, Office fédéral de l'énergie  
Systèmes Solaires, no 135 et 147, 146 rue de l'Université, 75007 Paris  
Wind turbine market, SunMedia GmbH, Querstr.31 D-30519 Hannover  
[www.suisse-eole.ch](http://www.suisse-eole.ch)  
[www.systèmes-solaires.com](http://www.systèmes-solaires.com)

(encadré)

#### **Les éoliennes du Mont-Crosin**

En 1996, l'entreprise Juvent SA, réunissant les Forces Motrices Bernoises, Électricité neuchâteloise, IWK de Bâle, AEW Aarau, et les Forces électriques de la Goule (Saint-Imier) a réalisé la première étape de ses projets en installant trois éoliennes au Mont-Crosin. Une bonne concertation avec les milieux concernés a permis d'obtenir le permis de construire rapidement. Une quatrième machine a été installée deux ans plus tard. Celle-ci, pour mieux capter les vents moyens, dispose de pales plus grandes et de deux alternateurs. Un projet d'extension en cours prévoit trois machines supplémentaires de 850 KW pour l'automne 2002 sur le territoire de la commune voisine de Courtelary.

#### *Caractéristiques*

|                           |   |
|---------------------------|---|
| Vitesse moyenne des vents | 5 à 5.5 m/s à 10 m du sol<br>(les vents du Chasseral sont plus forts) |
| marque des machines       | Vestas, Danemark  |
| transport des 3 éoliennes | 13 camions  |
| hauteur du mât            | 45 m  |
| diamètre de l'hélice      | 44 m, 3 pales   |
| vitesse de rotation       | 28 t/mn soit 232 km/h en bout de pale                                 |
| puissance nominale        | 600 kW pour un vent de 15 m/s (1)                                     |



|   |                                       |
|---|---------------------------------------|
| production annuelle                                     | environ 600 000 kWh                   |
| taux de production par rapport à la puissance installée | 11 %                                  |
| poids du mât  | 32 tonnes                             |
| poids de l'hélice                                       | 8 tonnes                              |
| poids du fuseau avec alternateur                        | 20 tonnes                             |
| socle   | 10x10x1 m béton, soit env. 300 tonnes |

- 1) Cette valeur est trop élevée pour les vents du Jura. Une machine fournissant sa puissance à une vitesse de vent plus faible conduirait à un coefficient de production supérieur. Ici, le critère a été économique (machines de série), le réseau pouvant facilement absorber les pointes.