

L'énergie éolienne et solaire: alternatives aux besoins énergétiques de la Suisse de demain?

Travail de Maturité réalisé au Lycée Denis-De-Rougement de Neuchâtel
sous la direction de M. Michel Favez

Vincent Trachsel

1. Introduction

Pour vivre, l'homme a toujours eu besoin d'énergies. Mais depuis le 18^e siècle, il puise dans des ressources non renouvelables qui s'épuisent tous les jours un peu plus. L'énergie la plus usitée dans le monde est d'origine fossile, comme le charbon, le pétrole ou le gaz... Cependant, ces réserves ne se trouvant pas en quantité suffisante sur la terre pour les besoins énergétiques des générations futures, il faut découvrir de nouvelles sources. De plus ces énergies polluent et aggravent l'effet de serre déjà bien prévalent. L'homme a remarqué que, sur le long terme, cette pollution pouvait constituer une réelle menace pour la terre et pour son équilibre.

Ainsi, au fil des années et des sommets écologiques, les énergies dites « propres » ont été mises en valeur. Il s'agit d'énergies fournies par le soleil ou qui en découlent, comme le vent, les chutes d'eau, les végétaux, les marées. L'astre jaune étant une source d'énergie quasiment inépuisable, ces types d'énergies résolvent la problématique expliquée précédemment. C'est ce qu'on appelle des énergies renouvelables.

Dans ce travail, nous traiterons en particulier de l'énergie fournie par le vent et qui se nomme : l'énergie éolienne. Après avoir découvert les nombreuses caractéristiques d'une éolienne et de son fonctionnement, nous envisagerons la situation en Suisse et nous nous demanderons si cette source d'énergie peut se substituer aux énergies d'origine fossile. De nombreuses questions se posent : les énergies éoliennes ont-elles un bon rendement ? Comment une éolienne fonctionne-t-elle ?

La Suisse est un pays très avancé technologiquement et socialement. Mais sur le plan des énergies éoliennes nous pouvons nous poser les questions suivantes : est-elle un pays « propre » énergétiquement ? Comment utilise-t-elle ce type d'énergie ? Ces énergies pourraient-elles remplacer peu à peu les énergies fossiles dans notre pays au profit de l'énergie éolienne ? La Suisse a-t-elle des projets, voire même un plan d'action ? Est-elle en retard par rapport au reste de l'Europe ? Et qu'en est-il spécifiquement du canton de Neuchâtel ?

2. Historique et fonctionnement de l'éolienne

Historique

Ce chapitre a pour but de tracer un bref historique de l'utilisation de l'énergie éolienne.

Les bateaux à voile peuvent être considérés comme la première utilisation d'énergie éolienne. En 3500 avant notre ère, les Sumériens naviguaient déjà à l'aide de voiles. Au VII^e siècle, les Perses ont utilisé la force du vent qui, en s'engouffrant dans des roues à aubes, pouvait actionner des pompes. Les Egyptiens ont eu recours à la même stratégie, mais afin d'irriguer la terre en faisant monter l'eau grâce à un système de pompage qui l'entraînait dans de petits réservoirs. Par la suite, les Perses ont perfectionné leurs machines en fixant des voiles sur un axe vertical. Ce stratagème a permis de mieux utiliser l'énergie du vent et de tendre à maximaliser le rendement de cette nouvelle machine, appelée aujourd'hui « moulin ». Les multiples invasions arabes et surtout les croisades ont pu permettre au monde occidental de

jouir de cette magnifique invention persique et de cette avancée technologique. Dès le début du XVI^e, les artisans européens ont amélioré les ailes du moulin et les ont nettement complexifiées. Les Néerlandais sont sûrement le peuple européen à avoir le mieux et le plus utilisé le moulin, qui leur a permis d'assécher la terre afin de créer les célèbres polders.

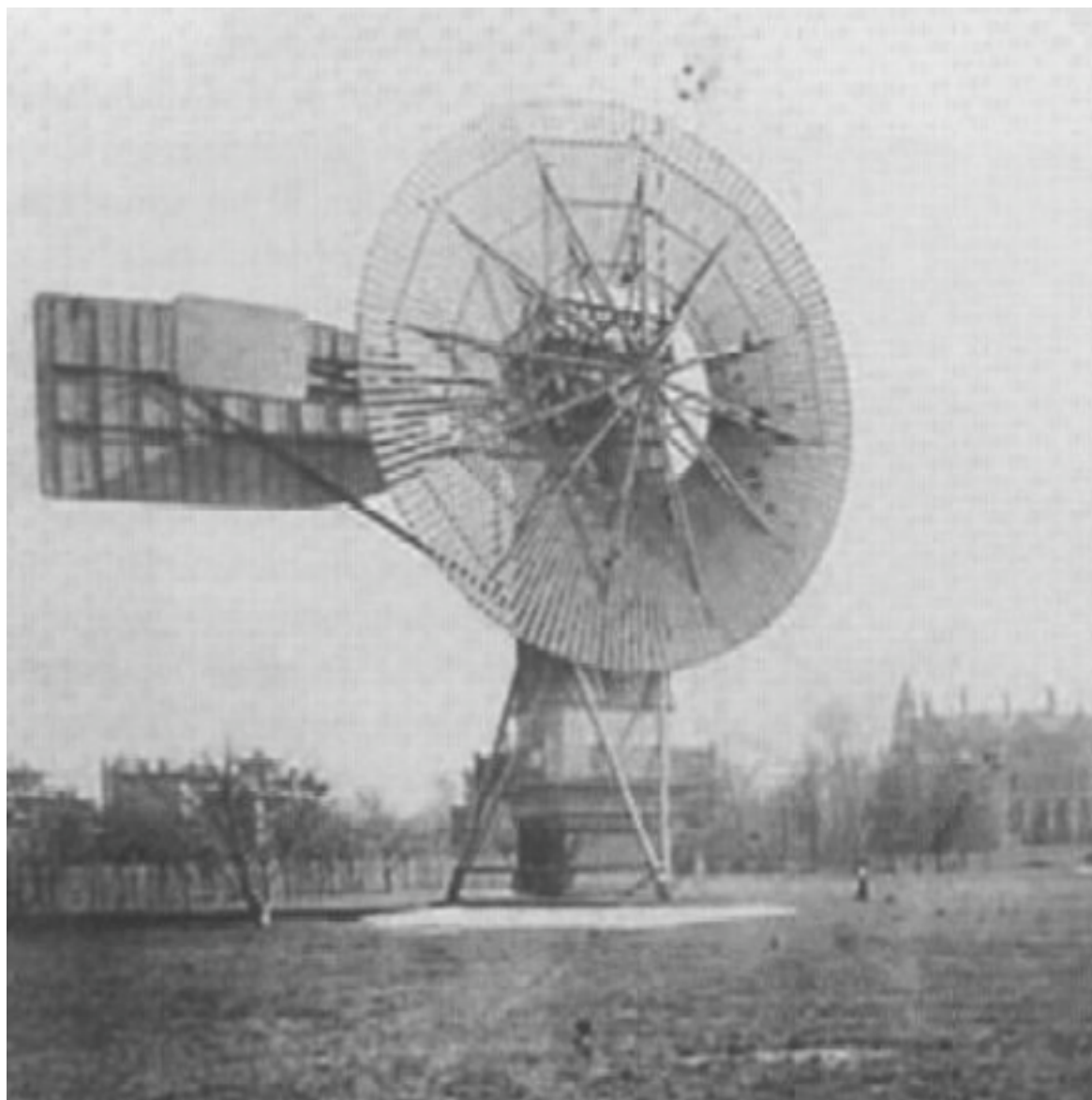


Figure 1 : Moulin de Berton

En 1839, un Français du nom de P. Berton, a inventé un nouveau système d'ailes de moulin afin d'éviter aux meuniers de devoir sans cesse monter dans les ailes pour installer et enlever les toiles en fonction des vents. Cette aile constitue le précurseur de nos éoliennes puisqu'il s'agissait d'un parallélogramme déformable non entoilé mais ayant de nombreuses planches fines disposées en tuiles, mobiles et rétractables (cf. Figure 1). En 1841, le Belge Nollet a pensé que le vent pourrait produire de l'électricité. En 1880, C. Brush, J. Blyth et V. de Feltre ont fait de multiples expériences et ont créé les premiers aérogénérateurs (ci-contre une éolienne de C. Brush). Sept ans plus tard, C. de Goyon a inventé une éolienne ayant deux dynamos. En 1956, J. Juul a fait construire une éolienne ayant une puissance de 200 kW. Celle-ci est devenue le modèle de référence des futures éoliennes qui peuvent avoir une puissance de l'ordre de plusieurs milliers de kW. Sur le territoire danois, l'éolienne s'est énormément développée. Devenue toujours plus performante et silencieuse, l'éolienne

s'impose aujourd'hui comme une source d'énergie potentielle non polluante à ne plus négliger.



Figure 2 : Eolienne de C. Brush

Fonctionnement d'une éolienne

L'énergie de base

Comme mentionné dans l'historique, les éoliennes sont devenues les moulins du 3^e millénaire. Elles fonctionnent à l'aide d'une source pratiquement inépuisable d'énergie : le vent. Comme dit précédemment, le vent est une énergie d'origine solaire. En effet, le rayonnement solaire chauffe inégalement les surfaces terrestres, créant ainsi des régions qui ont des densités et des pressions différentes. De ce fait, les masses d'air se mettent en mouvement. Cependant, leur direction est modifiée à cause de la force de Coriolis. En effet, du fait de la rotation de la terre, les vents ont tendance à dévier. D'autres vents plus locaux se créent notamment en raison de la différence de température entre eau et terre. Par exemple, dans notre canton, nous pouvons citer l'exemple du Joran.

Les constituants de l'éolienne

L'éolienne se compose de plusieurs parties qui lui sont caractéristiques. Chacune d'elles joue un rôle spécifique dans le fonctionnement de l'ensemble.

Dans un premier temps, nous évoquerons rapidement les principales parties d'une éolienne (tout en étant conscient de l'existence de spécificités d'une marque à l'autre) et nous en reparlerons plus en détail par la suite :

Le rotor : pales et moyeu

Le rotor est constitué des pales et du moyeu. Cet ensemble assure une fonction essentielle puisqu'il transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Il la transmet au reste de l'éolienne via l'arbre lent. Théoriquement, son fonctionnement est semblable à celui d'une hélice d'avion fonctionnant à l'envers. *Le moyeu* est la pièce qui reçoit les pales. Il est souvent protégé par une coque en polyester en forme d'obus qui lui donne une forme aérodynamique. *Les pales* sont montées sur l'axe du moyeu et servent à capter la puissance du vent. Leur profil ressemble à celui d'une aile d'avion. En général sur les éoliennes modernes, il y en a 1, 2, ou 3, mais leur nombre influe peu sur le rendement de l'hélice.

Le multiplicateur, l'arbre lent, l'arbre rapide

Le multiplicateur, comme son nom l'indique, est un système qui permet de multiplier la vitesse de rotation d'un arbre. D'un côté de ce multiplicateur entre *l'arbre lent* (entraîné par le rotor) et de l'autre sort *l'arbre rapide* qui tourne à une vitesse ~ 75 fois supérieure à celle de l'arbre lent. L'arbre rapide est muni d'un frein à disque, utilisé uniquement qu'en cas d'extrême urgence. *La génératrice* reçoit l'arbre rapide afin de transformer son énergie mécanique en énergie électrique.

La tour, les fondations, la nacelle

La tour permet à l'éolienne d'avoir une hauteur où la vitesse moyenne du vent est plus élevée et plus constante qu'au sol. C'est elle qui supporte la nacelle et le rotor. Elle est en général tubulaire ou en treillis (voir figures 3 et 4). La première structure offre plusieurs avantages : les oiseaux la voient de loin et la définissent comme quelque chose à éviter ; ils ne peuvent pas y faire de nid. De plus, en glissant sur la tour, le vent émet un son moins fort que sur une tour en treillis.



Figure 3 : Tour tubulaire

Finalement, une échelle placée à l'intérieur offre une meilleure sécurité pour le personnel. *La nacelle* placée au sommet de la tour abrite tous les dispositifs électroniques et mécaniques travaillant à la conversion du mouvement de la rotation en énergie électrique et de tous les systèmes soit hydraulique, d'orientation, de refroidissement, et de contrôle. Seules la girouette et les pales (rotor) tenues par la nacelle sont à l'extérieur. Dans les éoliennes modernes et de grandes puissances, un homme peut s'y tenir debout sans problème. Les fondations, cachées

sous terre ou à moitié dans l'eau dans les éoliennes offshore, sont en béton et soutiennent l'ensemble de la structure visible.



Figure 4 : Tour en treillis

La cabine de dispersion

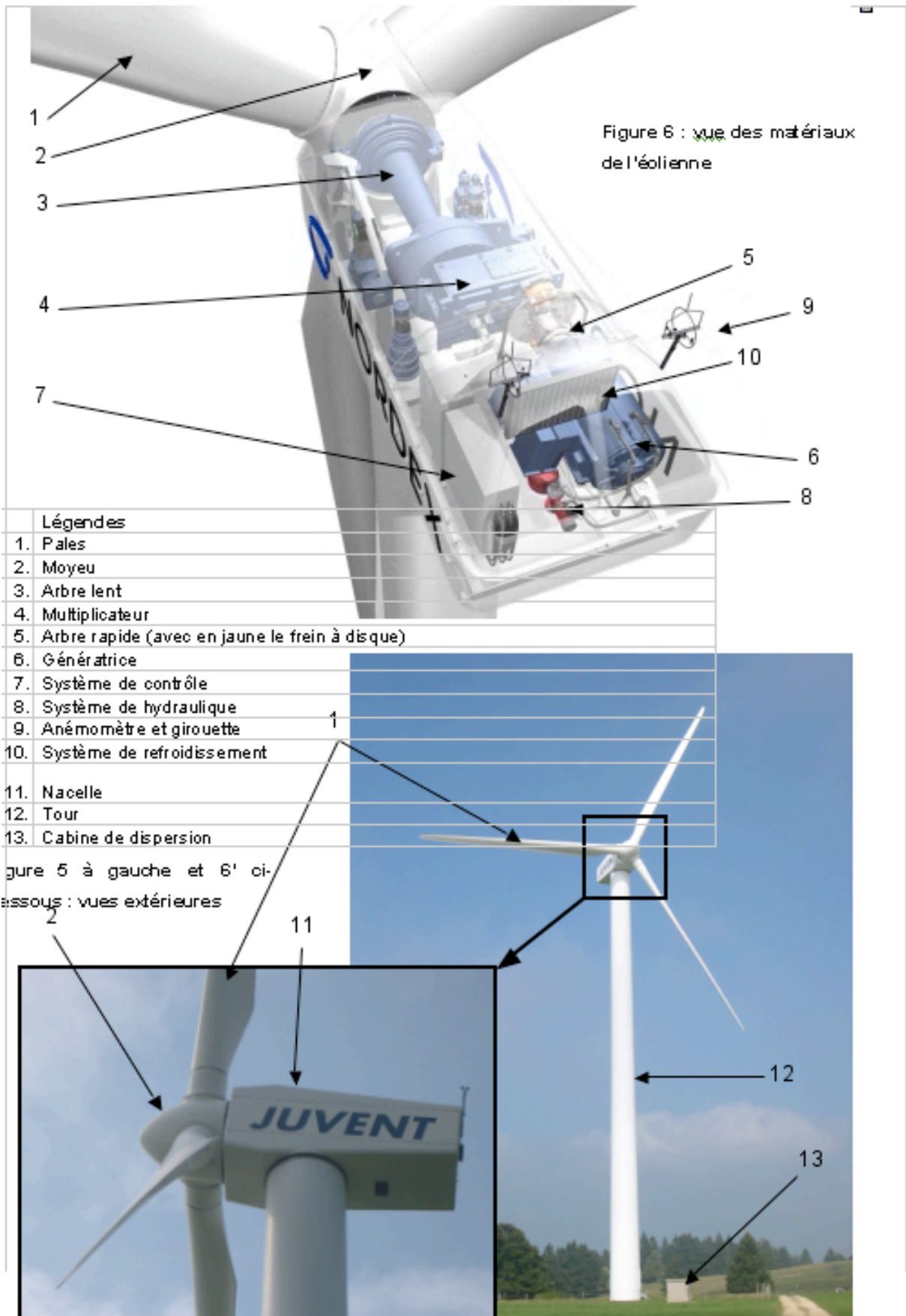
Elle est située au pied de la tour ; cette cabine abrite le transformateur qui permet la mise en haute tension de la tension faite par la génératrice ; la cabine de dispersion connecte l'éolienne au réseau.

Les systèmes : de contrôle, hydraulique, d'orientation et refroidissement

Pour le fonctionnement de l'éolienne, des systèmes ont été créés. Ils assurent différentes fonctions. *Le système de contrôle* constitue la tête de l'éolienne au niveau électrique ; c'est lui qui gère et donne les ordres aux différentes parties de l'éolienne. Pour surveiller l'état général de l'éolienne, un ordinateur enregistre chaque changement ; ce système de contrôle influe sur le système d'orientation. En cas de surchauffe de la génératrice par exemple, le système stoppe l'éolienne et le signale par câble téléphonique à l'opérateur. *Le système d'orientation* permet de pivoter la nacelle afin de permettre une orientation face au vent ; pour ce faire, quelques moteurs électriques sont utilisés. *Le système hydraulique* régule la vitesse de l'éolienne via les freins hydrauliques. Cependant, ce système n'est pas utilisé dans toutes les éoliennes. L'arbre rapide relie le multiplicateur à la génératrice. *Le système de refroidissement* permet de refroidir la génératrice par un ventilateur et/ou par un système d'eau froide.

L'anémomètre et la girouette

Elles mesurent la vitesse et la direction du vent. Ils envoient des signaux au système de contrôle. Grâce à eux, l'éolienne est en mesure d'être arrêtée lorsque le vent est trop faible et elle peut démarrer quand il est fort.



Approches techniques et scientifiques

Nous allons à présent étudier l'éolienne sur le plan technique et du point de vue de la physique. Nous l'approcherons au travers des différents constituants dans le sens de leur apparition depuis le vent arrivant sur les pâles à la fabrication d'électricité.

Principe de base

Le principe de base est très simple. Le vent s'engouffre dans les pâles – qui ont une forme spécifique – entraînent une hélice qui subit une rotation sous l'effet du vent. Dès qu'une certaine vitesse est atteinte, cette rotation peut être convertie en énergie électrique par le biais d'une génératrice. Cette électricité est ensuite envoyée à un réseau électrique.

Les pales

Les pales de l'éolienne sont profilées comme une aile d'avion, donc aérodynamiquement. Le profil évolue du pied de la pale jusqu'à son extrémité, tant en largeur qu'en épaisseur ainsi qu'en angle de vrillage. On comprend donc qu'une pale est une pièce complexe à réaliser. Sa structure est composée de deux demi-coques moulées. Celles-ci sont collées ensemble et rigidifiées par des nervures. Les matériaux ont évolué selon l'avancement technologique. Ainsi aujourd'hui, l'on peut trouver des pâles réalisées en fibre de verre, en bois-composite, voire encore en fibres naturelles. Ces matériaux dépendent du choix du fabricant.

Pourquoi une pale tourne-t-elle ? Lorsque le vent (indiqué par les droites jaune et rouge sur le schéma ci-dessous) souffle, il a une différence de vitesse entre la face supérieure et la face inférieure. Il en résulte une force de portance perpendiculaire à la surface de la pale (flèche en gris). Celle-ci étant vrillée, la direction de la force de portance va donc varier d'un bout à l'autre de la pale. C'est ce qui explique la différence de direction entre les deux forces de portance indiquées sur l'image de la figure 7.

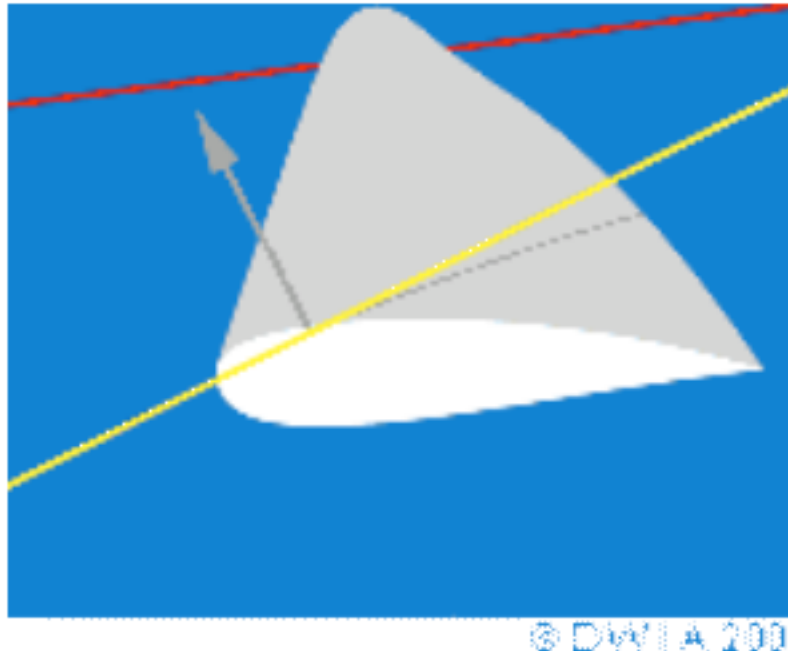


Figure 5 : coupe d'une pale

La force

La rotation des pales exploite l'effet *Bernoulli*, qui découle du principe de conservation de l'énergie.

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + p_2$$

Avec ce calcul on peut voir que si $v_1 > v_2$ alors $p_1 < p_2$. Cette différence de pression $\Delta p = p_2 - p_1$ crée la force de portance qui, comme nous l'avons vu ci-dessus, entraîne les pâles en rotation. La force de portance $F_{portance}$ est donnée par la formule ci-dessous où $S_{pâles}$ est la surface d'une pale :

$$F_{portance} = \Delta p \cdot S_{pâles}$$

L'énergie

L'énergie cinétique du vent est pompée et transformée en énergie mécanique, en partie, lors de la rotation des pales. L'énergie cinétique d'une masse d'air en mouvement est donné par :

$$E_{cin} = \frac{1}{2} m v^2$$

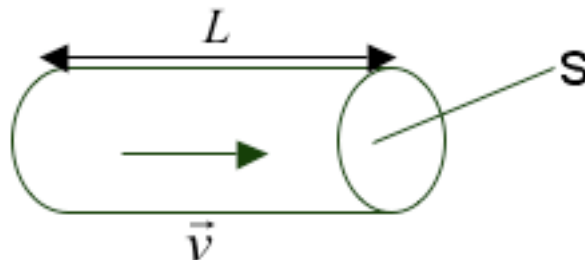
avec :

m : masse du volume d'air (en kg)

v : vitesse instantanée du vent (en m/s)

E_{cin} : énergie cinétique (en Joules)

Comme le montre le schéma ci-dessous, le vent peut être schématisé par une succession de disques d'air. Le schéma ci-dessous symbolise une masse d'air se déplaçant à une vitesse constante \vec{v} et avec une surface S égale à celle balayée par les pales.



Sachant que $m = \rho \cdot S \cdot L$ et $L = v \cdot t$, on obtient : $m = \rho \cdot S \cdot v \cdot t$.

Et l'énergie cinétique devient :

$$E_{cin} = \frac{1}{2} (\rho \cdot S \cdot v \cdot t) v^2$$

avec :

ρ : masse volumique de l'air (en kg/m^3)

S : surface disque d'air traversant l'éolienne (en m^2)

Nous pouvons à présent calculer la puissance P du vent passant à travers les pales. Elle est donnée par la formule :

$$P = \frac{E_{cin}}{t}$$

avec :

P : puissance (en Watts)

t : temps (en sec)

E_{cin} : énergie cinétique (en Joules)

Ainsi nous pouvons écrire :

$$P = \frac{E_{cin}}{t} = \frac{\frac{1}{2}(\rho \cdot S \cdot v \cdot t)v^2}{t} = \frac{1}{2}\rho \cdot S \cdot v^3$$

Finalement :

$$P = \frac{1}{2}\rho \cdot S \cdot v^3$$

Grâce à ce calcul, nous pouvons déduire que si la vitesse du vent double et que le reste est constant, la puissance sera alors 8 fois supérieure.

La limite de Betz

Cependant, l'énergie du vent ne peut être captée en totalité (si c'était le cas, aucun souffle de vent ne serait ressenti derrière une éolienne). Cela a été démontré par le théorème de *Betz*, physicien allemand, qui a prouvé que seuls quelques 59% ($\frac{16}{27} \cdot 100$ précisément) de l'énergie totale pouvait être récupérée. Ceci a été nommé « la limite de Betz » et vaut : $P = 0.37 \cdot S \cdot v^3$

Nous pouvons remplacer la surface S balayée par les pales, en l'exprimant par $S = \pi \cdot r^2$ où r est la longueur d'une pale. Ainsi, la limite de Betz se calcule comme suit :

$$P = 0,37 \frac{\pi}{4} \pi \cdot r^2 v^3$$

Une éolienne est en général créée pour avoir sa performance maximale à environ 15 m/s, moyenne généralement atteinte. Avec cette donnée, nous souhaitons illustrer les équations en prenant l'exemple d'une éolienne de 1750 kW du Mont-Crosin (figure 8) :

Vitesse du vent : 15 m/s

Longueur des pales du rotor : 33 m

Hauteur de l'axe du rotor : 67 m

Hauteur total de l'éolienne : 100 m

Masse volumique de l'air ρ : 1.25 kg/m³

Surface de l'air traversant l'éolienne : $\pi r^2 = \pi 33^2 \approx 3421.19 m^2$

Pour calculer la puissance nous utilisons l'équation : $P = \frac{1}{2}\rho \cdot s \cdot v^3$

$$P = \frac{1}{2} \cdot 1.25 \cdot 3421.19 \cdot 15^3 = 7216.58 kW$$

En prenant en considération la théorie de Betz, seuls 59% de cette puissance sera utilisée ; par conséquent, la puissance finale sera :

$$P_{finale} = 7216.58 - (7216.58 \cdot 0.41) = 4257.78 kW \approx 4250 kW$$

Il ne faut pas confondre la puissance que l'éolienne arrive à tirer du vent avec la puissance électrique que l'éolienne peut fournir ; 1750kW dans le cas de l'éolienne du Mont-Crosin.

Le système à calage variable et le décrochage aérodynamique

En cas de vent trop violent, l'éolienne doit prendre moins d'énergie au vent, évitant ainsi une surchauffe de la génératrice. Les ingénieurs ont donc inventé un système de régulation de la puissance afin de parer à ce problème. Pour ce faire, deux manières ont été mises au point : *le système à calage variable et le décrochage aérodynamique*.

Le système à calage variable est un dispositif qui permet de faire pivoter les pâles sur leur axe. Il s'agit donc de changer l'angle d'incidence du vent sur les pâles. Lorsque la surface de la pale est parallèle au sens du vent, cette dernière n'est plus entraînée. La manœuvre inverse peut aussi être réalisée. Les pâles peuvent être positionnées de façon à mieux capter le vent

lorsque celui-ci aura baissé. Ce système demande une grande ingénierie, car il requiert une extrême précision de positionnement des pâles. Notons encore que ce mécanisme utilise un système hydraulique.

Le décrochage aérodynamique. Dans ce système, les pâles sont complètement fixées au moyeu, elles ne peuvent pas bouger sur leur axe. Le phénomène physique est le décrochage. La pôle est profilée de façon à ce que le vent tourne en tourbillon (turbulence) sur la partie de la pôle qui n'est pas face au vent lorsque celui-ci est trop élevé. Le décrochage permet ainsi d'éviter une trop grande portance. Ce système a des avantages non négligeables. Il évite l'installation très coûteuse et complexe du système à calage variable.



Figure 6 : éoliennes au Mont-Soleil

Le multiplicateur

Avant d'expliquer comment marche un multiplicateur, il convient de se demander pourquoi il existe ; en effet, ne serait-il pas possible que la génératrice soit directement entraînée par l'arbre lent ?

La génératrice d'une éolienne doit généralement être entraînée à une vitesse variant entre 1000 et 3000 tours par minute pour fonctionner convenablement. Or, le rotor ne peut pas tourner à cette vitesse-là, car cela impliquerait que la vitesse tangentielle de l'extrémité des pâles dépasse de deux fois la vitesse du son ! Cependant il serait possible d'éviter l'emploi

d'un multiplicateur en augmentant le nombre de pôles et par conséquent d'aimants à la génératrice. Ceci lui permettrait de pouvoir utiliser la vitesse de rotation réelle du rotor (environ 30 tours par minute). En revanche, ce système serait très coûteux et très lourd, donc inacceptable. D'où la nécessité d'un multiplicateur ! Grâce à lui, la vitesse de rotation de l'arbre lent, entraîné par la pôle, est multipliée ~ 75 fois comme expliquer précédemment.

Quant à ses caractéristiques, le multiplicateur est purement mécanique : une grande roue dentée entraîne une plus petite. Cela a pour effet d'augmenter la vitesse de la petite roue tout en abaissant le couple. Dans certaines éoliennes, le multiplicateur comprend plusieurs arbres rapides pour plusieurs génératrices (en général pas plus de deux).

Avant d'expliquer le fonctionnement des génératrices, il convient de donner quelques indications sur des points importants utiles à savoir pour comprendre la suite :

Rappel de notions d'électricité

La tension

Afin que le courant passe au travers d'un câble, il faut qu'il y ait une différence de tension entre les deux extrémités du câble. Par exemple une différence de pression entre les deux extrémités d'un tube est nécessaire afin qu'une masse d'air (flux d'air) se meuve au travers. Si la différence de tension est grande, la quantité d'énergie transférée sera alors importante. La tension générée par une éolienne est en général de 690 volts. Puis cette tension est augmentée par un transformateur de 10.000 à 30.000 volts.

Le courant continu (CC) et alternatif (CA)

Une pile produit du courant continu car les électrons se déplacent continuellement dans la même direction. Cependant, dans les réseaux électriques, le courant est alternatif. En d'autres termes, les électrons changent de direction très rapidement et indéfiniment (cf. graphe). En Suisse par exemple, le courant alternatif est de 230 volts et 50 Hz (cycles par seconde). Dans ce cas il faut 0.02 seconde pour effectuer un cycle complet. Durant ce laps de temps, la tension monte et descend à ± 325 volts (tension de crête). Mais l'énergie électrique moyenne par seconde de ce système de courant alternatif est équivalente à 230 volts dans un courant continu (tension efficace). Ces deux tensions sont liées par la formule suivante : $U_{\text{crête}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{efficace}}$. Dans un courant électrique, lorsqu'on calcule une tension, on utilise la tension efficace. C'est pourquoi on parle plutôt qu'un système est de 230 volts et non pas de 325 volts. Précisons que dans le cas d'une éolienne, le courant doit être alternatif pour pouvoir ensuite être transféré dans le réseau (voir chapitres : « La phase » et « La coordination et le raccordement au réseau »).

L'électromagnétisme et l'induction

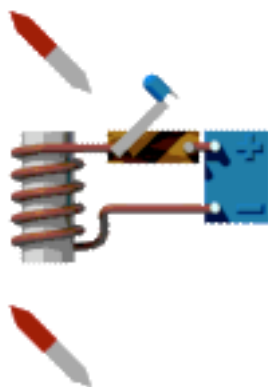


Figure 9 : schéma de l'induction 1

H.C. Ørsted, physicien danois, l'a découvert par hasard en 1821. On utilise l'électromagnétisme afin de convertir de l'énergie mécanique en énergie électrique, et c'est exactement ce que doit faire une éolienne. Sur le dessin de la figure 9, il se trouve un circuit électrique avec une bobine enroulé autour d'un noyau de fer. Lorsque le courant est enclenché, le courant magnétise le noyau de fer et crée une paire de pôles magnétiques communément appelés pôle nord et pôle sud. Ainsi les deux aiguilles s'orientent dans une direction opposée. Cependant dans une génératrice d'éolienne, le phénomène est inverse, car il s'agit non pas de faire passer du courant, mais au contraire d'en recevoir.

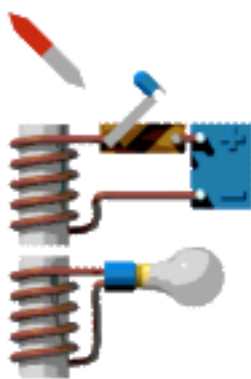


Figure 10 : schéma de l'induction 2

Le dessin de la figure 10 représente pratiquement le même circuit qu'avant, mais avec un phénomène d'induction. En effet, au-dessous du premier circuit se trouve un autre noyau de fer enroulé d'une bobine et connecté à une ampoule. Si un courant électrique passe dans le premier circuit, l'aiguille s'oriente à nouveau et l'ampoule s'allume ! Le champ magnétique créé par le premier circuit circule à travers le noyau de fer situé en dessous. Ainsi une différence magnétique est créée dans le circuit du dessous, ce qui induit un courant électrique dans la bobine et permet à l'ampoule de s'allumer. Cependant, lorsque le champ magnétique est stabilisé, le courant s'arrête et l'ampoule s'éteint. A présent, admettons qu'une bobine magnétique tourne à l'intérieur d'aimants ; il en résulte un courant. Tel est le phénomène qui se passe dans une génératrice (cf. dynamo ci-dessous).

La phase

Comme vu précédemment, la tension dans un système CA oscille sans cesse. Il est alors inimaginable et dangereux de connecter une génératrice au réseau électrique à moins que cette première ait la même oscillation, donc que la fréquence de tension de la génératrice coïncide avec la fréquence du réseau. En cas de disphase, la génératrice ou l'interrupteur du circuit pourrait griller. Quant à la manière dont une éolienne peut être mise exactement en coordination avec le réseau, la suite nous l'expliquera.

La coordination et le raccordement au réseau

Le raccordement au réseau peut se faire de deux façons. Soit directement, ce qui signifie que l'énergie produite par la génératrice est directement envoyée dans le réseau et oblige l'éolienne à tourner à vitesse constante, soit indirectement, ce qui impose la présence d'un dispositif électrique ajustant le courant de façon à correspondre au réseau, mais qui permet de faire fonctionner l'éolienne à des vitesses de rotations variables.

Dans le deuxième cas, l'éolienne produit en premier lieu un courant alternatif à fréquence variable. Elle a son propre réseau CA. Ce dernier est contrôlé par un inverseur qui permet la variation de la fréquence du CA dans le stator de la génératrice. L'éolienne tourne à des vitesses variables et produit donc un courant de même fréquence que celui s'appliquant sur le stator ; cependant un tel courant à fréquence variable ne peut être utilisé par le réseau. C'est pourquoi le courant est ensuite converti en un courant continu par l'emploi de thyristors et par

des transistors de puissance (ces derniers sont des interrupteurs semi-conducteurs). Ensuite, ce nouveau courant est converti en courant alternatif à fréquence fixe (donc la même que le réseau). Cependant ce courant alternatif doit encore être légèrement modifié car il ne ressemble pas à une belle sinusoïde mais plutôt à une courbe ayant plusieurs fluctuations (escaliers). Ce courant est alors « filtré » pour les atténuer, ce qui nécessite des inductances et des condensateurs. Le courant peut dès lors être injecté dans le réseau. En conclusion, le courant a été changé trois fois.

Pourquoi choisir un raccordement indirect ? On distingue deux avantages, dont le principal est l'augmentation de la vitesse de rotation lors de forts vents, ce qui permet à l'éolienne de stocker l'énergie supplémentaire sous forme d'énergie rotative en attendant la fin de ces vents, ainsi que de réduire l'usure de la génératrice. Un second avantage est lié à la possibilité de contrôler le déphasage du courant par rapport à la tension dans le courant alternatif, ce qui améliore la qualité du réseau électrique. Le principal inconvénient d'un tel système consiste dans le coût important, puisque plusieurs pièces telles que rectificateurs, inverseurs et transformateur sont nécessaires.

La génératrice à courant continu, synchrone à courant alternatif et asynchrone à courant alternatif

A présent nous pouvons parler de la génératrice : C'est l'une des pièces les plus importantes dans une éolienne. Elle est sous forme d'alternateur magnétique. C'est une machine qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Les génératrices d'éoliennes diffèrent un peu des autres car elles doivent fonctionner avec une source de puissance très changeante.

Il existe trois formes de génératrice. La première, communément appelé « dynamo », crée un courant continu (mais elle n'est que rarement utilisée dans les éoliennes). La deuxième est synchrone et crée un courant alternatif, tandis que la troisième est asynchrone et crée elle aussi un courant alternatif.

Le fonctionnement d'une génératrice à courant continu : la dynamo

Ce chapitre explique uniquement le fonctionnement d'une dynamo, son principe de base et non pas le système complet d'une génératrice d'éolienne.

La dynamo fut créée par Zénobe Gramme en 1871. Cette dernière est constituée de deux parties (figure 11) : un circuit magnétique (bobine) qui crée un champ magnétique, et un enroulement d'induit qui récupère l'énergie électrique produite par la rotation du rotor. La loi de l'induction de Faraday en constitue le principe de base. Selon elle, une tension électrique est créée dans un fil métallique mis en mouvement dans un champ magnétique. La tension peut changer suivant l'intensité du champ et la vitesse de déplacement du conducteur. La dynamo contient un aimant qui produit un champ magnétique constant. Puis, une bobine de fil métallique placée à l'intérieur du champ est parcourue par un courant induit (cf. induction et magnétisme ci-dessus). Pour récupérer l'énergie, l'induit est muni d'un collecteur. Celui-ci comporte deux secteurs dans lesquels tournent deux balais opposés qui entrent en contact successivement avec ces premiers. Cet exemple est un peu simplifié puisque normalement le collecteur a un plus grand nombre de secteurs correspondant à un plus grand nombre de conducteurs. Mais le principe reste identique dans les deux cas.

Si le flux créé par la bobine est constant, le courant fourni est alors proportionnel à la fréquence de rotation.

Fonctionnement d'une génératrice synchrone à courant alternatif

Etant donné que ce type de génératrice fonctionne à l'inverse d'un moteur synchrone à courant alternatif, nous allons commencer par expliquer le fonctionnement de ce dernier. Ce moteur utilise un champ magnétique tournant. Sur le dessin de la figure 12 nous pouvons voir trois électroaimants qui sont raccordés à leurs propres phases dans le réseau électrique triphasé. Ces derniers produisent alternativement un pôle sud et un pôle nord. L'aiguille,

aimantée au centre, tourne. En effet, elle suit le champ magnétique et fait un tour par cycle ; ainsi donc, dans un système à 50 Hz, elle fera 50 tours par seconde (donc 3000 tours par minute). Dans ce cas le moteur est synchrone puisque l'aiguille au centre tourne à vitesse constante et qu'elle est coordonnée et simultanée avec la rotation magnétique. Précisons encore que dans un vrai moteur, l'aiguille est remplacée par un électroaimant ou un aimant permanent fort. Cependant, comme mentionné plus haut, dans une éolienne, nous observons l'effet inverse. Ce ne sont pas les bobines qui font tourner l'aimant du centre, mais ce dernier est entraîné en rotation par les pâles. Ce qui permet au moteur de se changer en génératrice (loi de l'induction). En général, les aimants centraux (ceux sur le rotor de la génératrice) sont le plus souvent des électroaimants car un aimant permanent se démagnétise petit à petit dans le champ magnétique puissant de l'éolienne et il coûte cher. Ces premiers sont alimentés par le courant alternatif du réseau électrique qui est préalablement changé en courant continu. Il faut ajouter qu'une génératrice synchrone fournit des tensions proportionnelles à la vitesse de rotation de son rotor (ou de l'aiguille dans l'exemple).

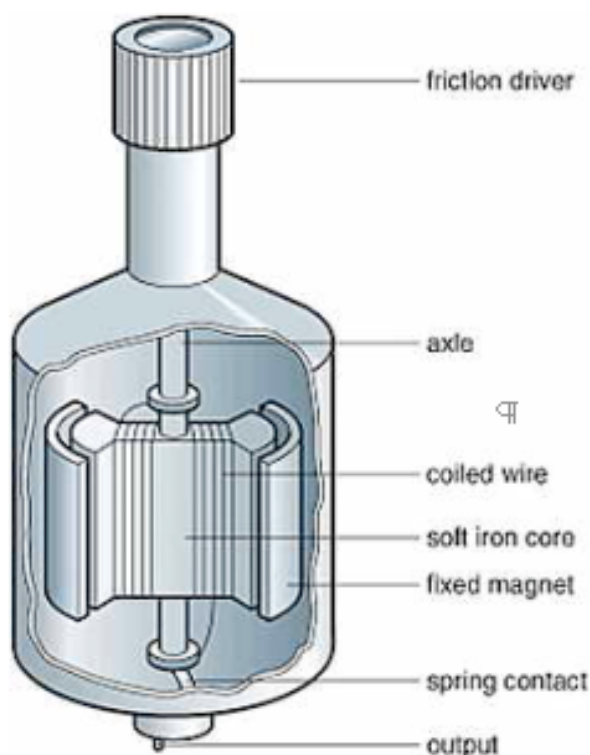


Figure 11 : dynamo

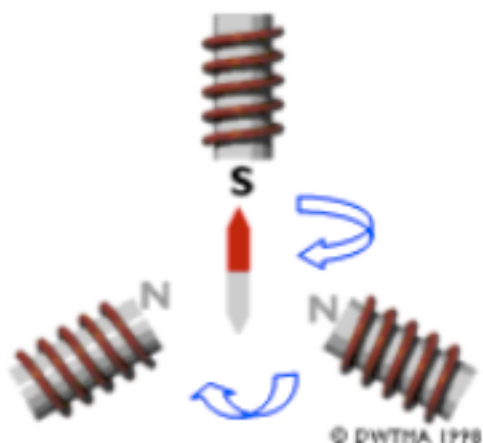


Figure 12 : champ magnétique tournant

Fonctionnement d'une génératrice asynchrone à courant alternatif

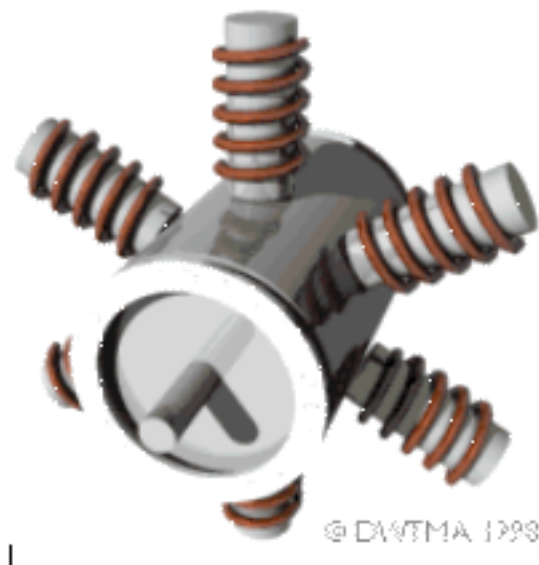


Figure 13 : génératrice asynchrone



Figure 14 : cage

En général c'est une génératrice asynchrone triphasée à cage d'écureuil (voir figure 13), couramment appelé « génératrice à induction ». Cette dernière est la plus usitée dans le monde des éoliennes. En effet, elle correspond bien aux besoins des éoliennes et comprend quelques avantages, comme le fait d'être particulièrement fiable et plutôt bon marché.

Cette génératrice comprend une pièce maîtresse et nouvelle par rapport à une génératrice synchrone : le rotor à cage. Ce dernier est fabriqué comme une cage (voir figure 14) avec des barreaux longitudinaux.

Ceux-ci sont reliés électriquement par les cercles conducteurs (aluminium) en haut et en bas de leurs extrémités. Un phénomène, à première vue étrange, apparaît lorsque la génératrice tourne à une vitesse synchrone. Absolument aucune électricité n'est produite. Pourquoi ? Si le champ magnétique tourne exactement à la même vitesse que le rotor, l'induction ne peut avoir lieu ! Cependant si la vitesse n'est pas synchrone, donc si le rotor tourne plus vite que le champ magnétique, le rotor induit alors un courant fort dans le stator. Ajoutons que plus le rotor tourne vite, plus la force électromagnétique transférée est élevée. Cette dernière est ensuite convertie en électricité. Pour être activée, cette génératrice a besoin d'un raccordement au réseau. En effet, le stator a besoin d'être alimenté pour créer le champ

magnétique nécessaire au bon fonctionnement de la génératrice, qui fournit des tensions non proportionnelles à la vitesse de rotation du rotor.

3. Rôles de l'énergie éolienne dans le monde

Situation mondiale et européenne concernant l'énergie éolienne

Pratiquement partout dans le monde se trouvent des éoliennes. Dans ce chapitre, nous regarderons avec un œil attentif les différents rôles propres à chaque continent, puis à certains pays en particulier.

Au niveau mondial, l'Europe se classe en tête dans la production d'énergie éolienne. En effet, en 1999, par exemple, elle a produit de 9008 MW, suivie de l'Amérique du Nord (USA et Canada) avec 2831 MW. Pour cette même année, l'Asie a produit 1330 MW, dont 1062 rien que pour l'Inde. Le reste des continents et du monde n'est pas significatif, étant donné que le nombre de MW ne dépasse guère la centaine. En pourcentage en fin 2004, l'Europe à elle seule a produit plus du 70% de la puissance éolienne mondiale, l'Amérique du nord 23%, l'Asie 6% et le reste du monde 1% (figure 15).

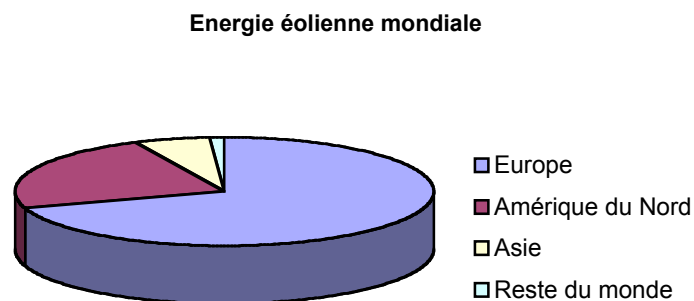


Figure 15: graphique

Pourquoi l'Europe a opté pour l'éolien ? Depuis quelques années, le vieux continent construit et installe de plus en plus d'éoliennes. Ce phénomène résulte d'un certain engouement politique en faveur de ce type d'énergie propre. Le développement durable aujourd'hui devenu très à la mode dans le monde politique, est aussi un facteur certain de cet engouement. Bien entendu quelques pays restent perplexes face à la rentabilité des éoliennes. Cependant, 6 pays se distinguent en Europe de par leur production d'énergie éolienne : l'Allemagne, l'Espagne, le Danemark, l'Italie, les Pays-bas, et l'Angleterre. L'Allemagne, à elle seule, produit le tiers de l'énergie éolienne européenne soit 16'629 MW (année 2004). En effet, ce pays ne cesse de construire des parcs éoliens sur la terre et même dans la mer. Dans ce même pays, des mastodontes de plus de 183 mètres de haut ayant des pâles de 61.5 mètres sont en voie de construction. Ce type d'éolienne sera construit en Allemagne pour produire plus de 5 MW par éolienne. L'Angleterre, restée longtemps sur le banc des absents, tend à rattraper son retard et mise aujourd'hui beaucoup sur l'énergie éolienne avec 888 MW. L'Allemagne, l'Espagne et le Danemark se positionnent aujourd'hui en leaders du point de vue du nombre de Mégawatts produits. Par rapport aux autres grands pays européens, la France fait pâle figure avec une production de seulement 386 MW ! Pourtant avec ses kilomètres de côte, la France a un immense potentiel (le deuxième européen) qu'elle n'exploite pas ou extrêmement peu pour le moment.

D'après des experts, l'Europe, avec ses nombreuses côtes et ses possibilités de parcs offshore, aurait largement assez de vent pour couvrir les 100% de ses besoins électriques. Et la Suisse dans tout cela ?

Situation de la Suisse et du canton de Neuchâtel concernant l'énergie éolienne

Notre pays ne reste pas indifférent lorsqu'on aborde le sujet de l'énergie éolienne. La Suisse entreprend beaucoup de démarches dans ce domaine. Malheureusement, ce pays se heurte régulièrement à de nombreuses difficultés lorsqu'un projet d'implantation d'éoliennes est proposé. On peut citer l'affaire du Crêt-Meuron dans le canton de Neuchâtel (cf. document feuille de l'Express en annexe). Cette situation explique le faible chiffre de 9 MW sur la carte de production d'énergie éolienne européenne. En Suisse, les opposants aux éoliennes mettent en exergue la pollution visuelle et sonore, ou estiment qu'une centrale nucléaire aurait moins d'impact sur le paysage qu'une éolienne.

Malgré les difficultés rencontrées, la Suisse a quand même multiplié sa production énergie éolienne de 135 entre 1993 et 1998. Mais attention, il faut préciser qu'il n'y avait pratiquement pas d'éoliennes en 1993 ! Il est donc peu difficile de multiplier la production énergétique autant vite !

Le pays a créé depuis 1998 une association pour la promotion de l'énergie éolienne nommée : « *Suisse Éole* » preuve d'un certain engouement. Cette association fait partie du programme Suisse Energie, créé par le Conseil fédéral, qui voudrait produire le 1% de l'énergie électrique suisse par des énergies renouvelables. Dans ce 1%, 10 à 20% seront produits par la construction d'éoliennes, ce qui correspond de 50 à 100 GWh. Pour cela *Suisse Éole* a pour mission de soutenir et développer 5 à 10 sites éoliens jusqu'en 2010. Le Mont-Soleil et le Mont-Crosin sont des exemples types.

La Suisse pourrait encore améliorer nettement sa production d'énergie éolienne. En effet, l'implantation d'éoliennes ne se limite pas à des régions côtières comme au Danemark ou au Pays-bas. L'Autriche en est la preuve avec ces 606 MW : elle produit plus de 70 fois plus d'énergie éolienne que la Suisse¹.

En sachant qu'une éolienne moyenne (1750 kW) s'enclenche à une vitesse de vent égale ou supérieure à 4 m/s et commence à produire à 4.5 m/s, il ressort que la Suisse a de nombreux sites adéquats, surtout dans le Nord-ouest et dans les Alpes. Ainsi, rien que dans les cantons suivants 104 sites d'implantations potentiels ont été retenus : Berne, Jura, Neuchâtel, Valais et Vaud. Malheureusement pour *Suisse Energie* le canton de Neuchâtel a rejeté 14 sites sur les 29 choisis. Mais ce canton est le seul à refuser de cette façon les sites. En effet, par exemple Berne en a éliminé seulement 4 sur les 32 enregistrés.

Pour un pays tel que la Suisse, la combinaison d'énergies propres entre éoliennes et barrages pourrait constituer une part importante de la production d'énergie helvétique. En effet, en cas de chute de vent et de baisse de production d'énergie éolienne, les barrages pourraient librement augmenter leur production et combler une partie du manque.

4. Conclusion

Le recours à l'énergie éolienne n'est pas récent puisque les Perses l'utilisaient déjà. Cependant, depuis lors, l'éolienne a nettement évolué, et spécialement dans la deuxième partie du vingtième siècle, étant donné qu'elle sert à présent à la production d'énergie électrique. De plus, il est à noter que la puissance électrique d'une éolienne est toujours plus conséquente et un parc éolien rivalise même avec d'autres sources d'énergie électrique.

Une éolienne est le fruit d'une énorme recherche technologique en constante évolution. Pour être rentable, elle utilise largement des notions élaborées de physique tant au niveau mécanique qu'électrique. Les éoliennes d'aujourd'hui peuvent atteindre des productions de 5 MW, ce qui est considérable.

¹ Voir photo des vents de la Suisse et sites possibles :

<http://www.suisse-eole.ch/images/1140/CH/ConceptenergieeolienneCHf.pdf>

Il s'agit d'une énergie propre, qui en Europe, est en plein essor. Même si la Suisse n'a pas de côte, elle possède un potentiel d'implantation d'éoliennes non négligeables. Aussi est-elle en mesure, malgré la présence de ses montagnes, d'améliorer grandement sa production d'énergie électrique au moyen d'éoliennes, sans parvenir toutefois à répondre à la globalité de ses besoins énergétiques, mais cette option permettrait d'abaisser à plus ou moins long terme l'utilisation d'énergie de sources fossile et nucléaire.

Ce travail de maturité m'a permis de constater que mes préjugés sur la rentabilité et la recherche technologique des éoliennes étaient erronés. Premièrement, les éoliennes produisent une énergie non-négligeable qui, dans le futur, sera même moins chère que le nucléaire. Avec un bon environnement, le rendement des éoliennes est excellent ; en effet, il suffit de trois mois pour qu'elles produisent l'énergie nécessaire à leur fabrication et à leur démantèlement.

En outre, m'étant personnellement déplacé au Mont-Crosin, j'ai pu juger par moi-même de leurs impacts visuels et sonores. Et, ce qui était pour moi avant de la propagande d'écologistes pro-éoliens ou anti-nucléaires s'est finalement avéré vrai. En effet, je constate que l'impact des éoliennes sur le paysage est moindre et leurs capacités électriques excellentes. Pour prendre l'exemple du site du Mont-Crosin, je trouve les éoliennes même jolies au milieu de ce paysage jurassien. Elles ne dérangent ni choquent guère et se mêlent même très bien au paysage. Mais peut-être n'est-ce là qu'une question de goût.

Quant aux inconvénients sonores, je dois admettre que les éoliennes émettent un peu de bruit. Cependant en Suisse, tous les sites éoliens ont été pensés et réalisés avec la conscience de ce problème, de sorte qu'une distance minimale par rapport aux habitations a été systématiquement respectée; ainsi donc, les habitations à proximité des sites ne sont pas du tout dérangées. Tous les lieux d'implantation d'éoliennes répondent aux mêmes exigences de *Suisse Energie* que le Mont-Crosin et que le Mont-Soleil. On peut donc espérer la mise en place de nouveaux sites. Une histoire à suivre dans les années à venir...

Bibliographie

Livres et revues

- CUNTY, G, Eoliennes et aérogénérateurs guide de l'énergie éolienne, Aix-en-Provence, Edisud, 2001.
- LHOMME, J-C, *Les énergies renouvelables. Histoire, état des lieux et perspectives*, Paris, Delachaux et Nestlé, 2001.
- VERNIER, J, *Les énergies renouvelables*, Paris, PUF, 1997.
- WALISIEWICZ, M, *Les énergies renouvelables, Un guide d'initiation sur les énergies du futur*, Paris, Pearson, 2003.
- National Géographique, N°73, France octobre 2005 : Que ferons-nous sans pétrole ? Ces énergies qui nous sauveront.
- GEO N°320 Octobre 2005 : Europe, La magie des grands espaces.
- Suisse Eole 2000 (documentation de la Confédération, sans auteur ni édition).

Sites Internet

- Site de l'Université du Québec à Rimouski concernant les éoliennes et l'énergie du vent : <http://www.eole.org/>
- Site de la Confédération (*Suisse Énergie*) concernant la promotion, et l'information de l'énergie éolienne :
- http://www.suisse-eole.ch/images/1700/SuisseEole2005_WEB.pdf
 - . <http://www.suisse-eole.ch/images/1140/CH/ConceptenergieeolienneCHF.pdf>
- Site officiel de l'association européenne de l'énergie éolienne : <http://www.ewea.org>
- Site de l'institut de recherche de l'énergie et de l'environnement de **Marc Fioravanti** : http://www.espace-eolien.fr/lille/pu_wind/puwch2.htm (offshore)

Site du WWF concernant l'énergie éolienne :

<http://www.wwf.ch/fr/lewwf/notremission/climat/styledevie/energieeolienne/index.cfm>

Site officiel de Vestas (firme d'éolienne Danoise) : <http://www.vestas.com/>

Site secondaire de Vestas : <http://www.windpower.org/>

Site officiel de Nordex (firme d'éolienne Danoise) : <http://www.nordex-online.com/>

Source des images dans l'ordre d'apparition

Page de titre : Photo d'éoliennes : <http://www.ewea.org/>

Figure 1 : Moulin de Berton : <http://www.eole.org>

Figure 2 : Eolienne de C. Brush: <http://www.windpower.org/>

Figure 3 : Tour tubulaire : <http://www.windpower.org/>

Figure 4 : Tour en treillis : <http://www.wapa.gov/>

Figure 5 : Vue extérieure : photo de l'auteur de ce travail

Figure 6 : Vue des matériaux de l'éolienne : <http://www.nordex-online.com/>

Figure 6' : Vue extérieure : photo de l'auteur de ce travail

Figure 7 : Coupe d'une pale

Figure 8 : Eoliennes au Mont-Soleil : <http://www.espace1to1energy.ch/>

Figure 9 : Schéma de l'induction1 : <http://www.windpower.org/>

Figure 10 : Schéma de l'induction2 : <http://www.windpower.org/>

Figure 11 : Dynamo : <http://www.tiscali.co.uk/>

Figure 12 : Champ magnétique tournant : <http://www.windpower.org/>

Figure 13 : Génératrice asynchrone : <http://www.windpower.org/>

Figure 14 : Cage : <http://www.windpower.org/>

Figure 15 : Graphique : fait par l'auteur de ce travail