



www.arenidf.com



www.ademe.fr/ile-de-france

GENERALITES SUR L'ENERGIE EOLIENNE

**Document rédigé par Espace Eolien Développement
pour l'ARENE et l'ADEME**

Novembre 2002

Contact - ARENE :
Philippe SALVI :
01 53 85 61 81

Contact - ADEME
Wanda EDDI
01 49 01 45 71

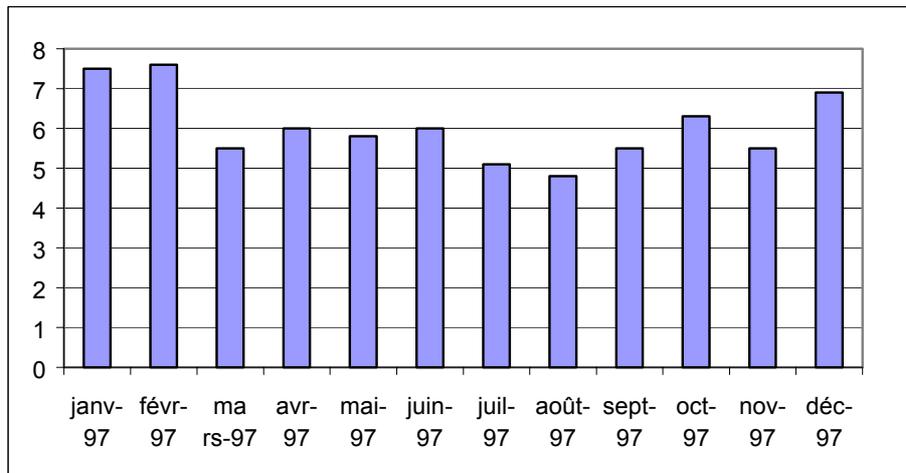
GENERALITES

ORIGINE DU VENT

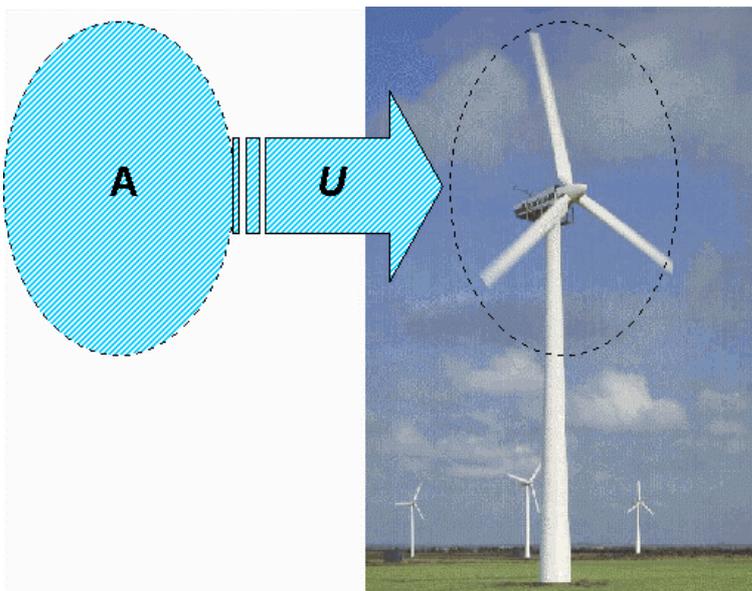
Le vent est causé par la circulation de masses d'air entre des zones de basse pression (dépression) et de haute pression (anticyclone). Dans la région Ile de France, cette circulation est gouvernée par l'anticyclone des Açores au Sud et les dépressions sur le Nord de l'Irlande, ce mouvement général est dévié vers l'Ouest compte tenu de la rotation de la terre. C'est pourquoi la direction dominante du vent (la direction d'où vient le vent) est l'Ouest.

REPARTITION ANNUELLE

Dans les régions tempérées, la vitesse du vent est plus élevée en hiver qu'en été.



ENERGIE DU VENT



L'énergie du vent ou énergie éolienne traversant une surface A perpendiculaire à la direction du vent est l'énergie d'une masse d'air en mouvement, encore appelée énergie cinétique.

A un instant donné, la puissance d'un vent de vitesse U est proportionnelle au cube de la vitesse du vent ainsi qu'à la surface traversée A.

$$P \sim A V^3$$

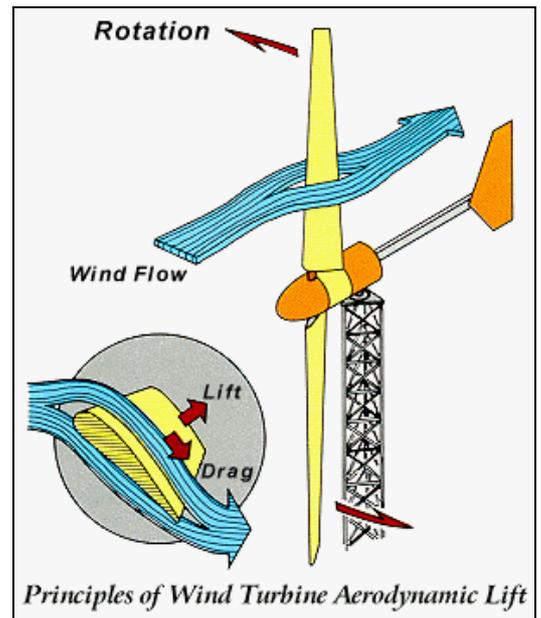
Donc, quand la vitesse du vent double, la puissance est multipliée par 8.

UN PEU DE TECHNOLOGIE

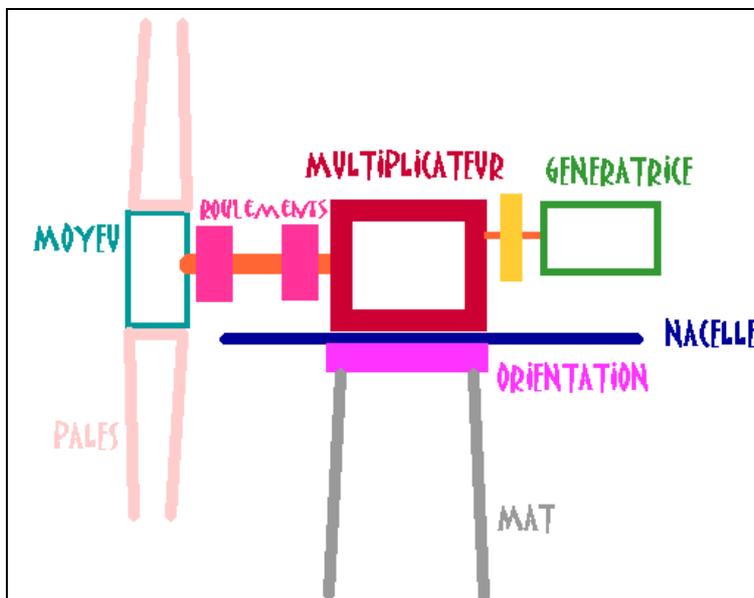
Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite.

La puissance mécanique est ensuite transformée soit en puissance hydraulique avec une pompe, soit en puissance électrique avec une génératrice.

En général, les éoliennes sont équipées de dispositifs annexes permettant de réguler la vitesse de rotation (pour éviter l'emballement pendant les périodes de grand vent). Elles disposent aussi d'un dispositif d'orientation qui place en permanence le rotor face au vent, le dispositif le plus simple étant le gouvernail.



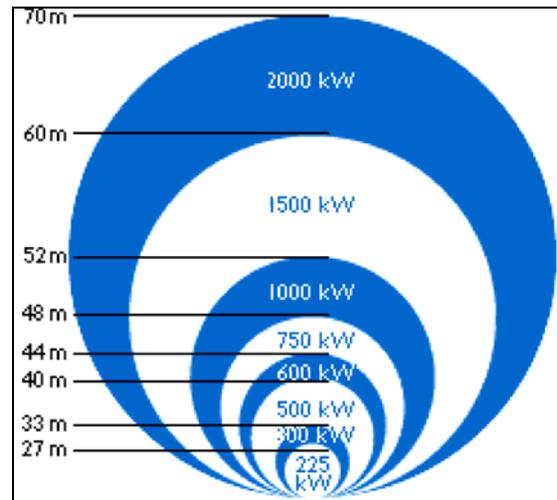
Une éolienne comprend de nombreux composants :



- ♦ le **rotor**, avec des pales montées sur un moyeu ;
- ♦ la **transmission mécanique**, qui transforme le mouvement de rotation du rotor en un mouvement utilisable par la charge ;
- ♦ une **génératrice électrique**, qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique ;
- ♦ une **nacelle**, qui supporte le rotor, la transmission et la génératrice ;
- ♦ un **système d'orientation**, qui oriente la nacelle face au vent ;
- ♦ un **mât**, qui supporte la nacelle ;
- ♦ un **système électrique**, qui gère la connexion au réseau et le fonctionnement de l'éolienne

Toutes les éoliennes commerciales utilisent aujourd'hui ce principe de fonctionnement : elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction du vent.

Plus le diamètre du rotor sera grand, plus la puissance récupérable sera importante dans un vent donné. La gamme des éoliennes disponible est très large, de 50 Watt (diamètre de 90 cm) à 2500 kW et plus (+ de 80 m de diamètre).

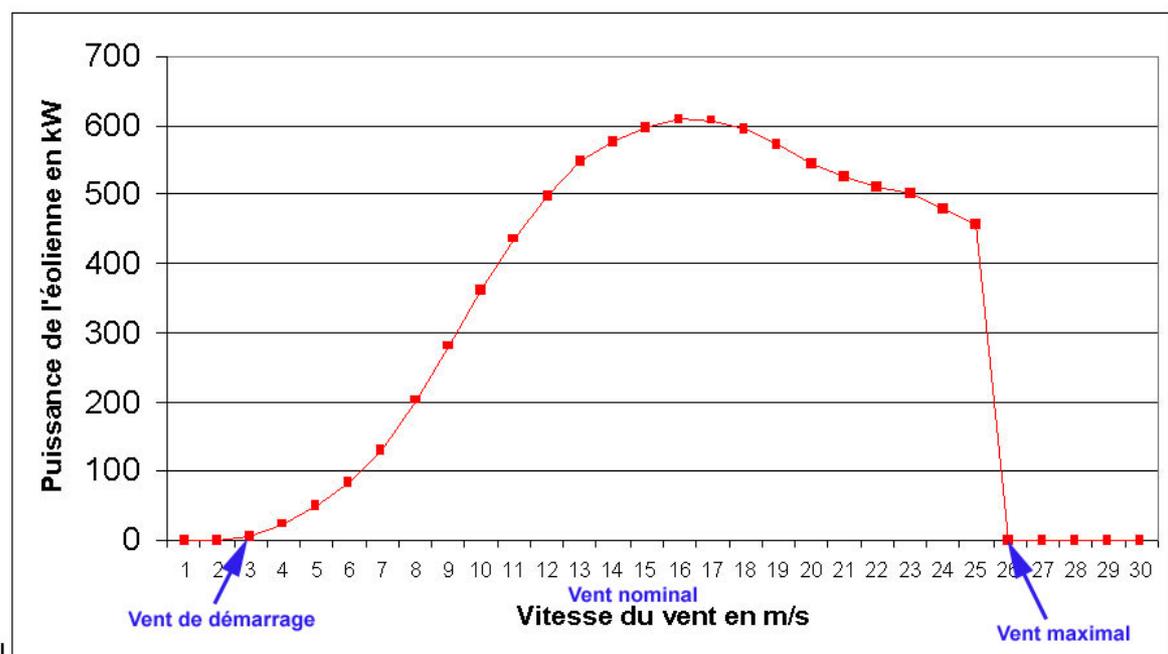


COURBE DE PUISSANCE

Ces puissances sont données pour un vent déterminé, appelé vent nominal, vent pour lequel l'éolienne fournit sa puissance nominale. Au-delà de cette vitesse de vent, la puissance est maintenue constante grâce au dispositif de régulation. Cependant, pour des vitesses de vent trop importantes (tempête), l'éolienne est arrêtée. Une fois arrêtée, l'éolienne peut résister à des vents beaucoup plus importants, jusqu'à 250 km/h ou plus suivant la conception de l'éolienne.

Par ailleurs, un vent trop faible ne réussit pas à entraîner le rotor qui ne démarre que pour un vent minimal, appelé vitesse de démarrage (3 ou 4 m/s). Pour les éoliennes multipales, utilisées pour le pompage de l'eau, cette vitesse s'avère légèrement inférieure (environ 2 m/s) puisque l'action recherchée consiste à assurer un pompage faible mais régulier et pas de capter les vents moyens à forts.

Une éolienne est caractérisée par sa courbe de puissance qui donne la variation de puissance disponible en fonction de la vitesse du vent.



ENERGIE RECUPERABLE

L'énergie récupérable par une éolienne dépend du site sur lequel elle est installée, et principalement de la distribution des vitesses de vent sur le site. En effet l'énergie récupérable est le produit de la puissance de l'éolienne dans un vent de vitesse V par le temps pendant lequel ce vent de vitesse V souffle.

Le calcul de l'énergie récupérable s'effectue par « tranche de vent » de 1 m/s de large. Si l'éolienne produit 10 kW pour un vent de 8 m/s (en fait, pour des vents compris entre 7,5 et 8,5 m/s), et si sur le site le vent souffle avec une vitesse comprise entre 7,5 et 8,5 m/s durant 800 heures par an, alors l'énergie récupérable sur l'année dans cette « tranche de vent » est de $10 \times 800 = 8\,000$ kWh/an. Il suffit de répéter ce calcul pour toutes les tranches de vent et l'on obtient l'énergie totale récupérable.

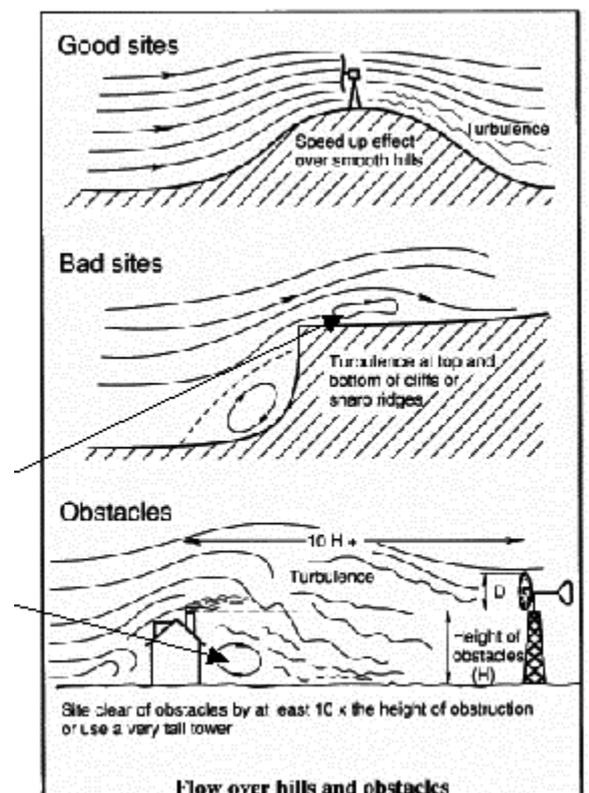
VARIATION AVEC LA HAUTEUR

La vitesse du vent varie avec la hauteur : plus l'on monte, plus le vent est élevé et ceci d'autant plus que le vent est perturbé en surface. Le vent est en effet ralenti par le frottement sur le sol et ce frottement est plus important en milieu urbain qu'en milieu rural ouvert par exemple.

OBSTACLES

Quand le vent rencontre un obstacle isolé, il est fortement perturbé sur une distance d'environ 20 fois la hauteur de l'obstacle : dans le sillage de l'obstacle, le vent est plus irrégulier et turbulent et donc de moins bonne qualité.

Ce phénomène arrive aussi quand on place plusieurs éoliennes sur un même site : les éoliennes se gênent les unes les autres si elles ne sont pas suffisamment écartées entre elles (en général, une distance de 6 fois leur diamètre est à respecter entre plusieurs éoliennes).



QUEL USAGE ?

L'énergie produite par une éolienne peut être utilisée de différentes manières :

- Pour fournir de l'énergie sur un site particulier qu'il s'agisse d'un site raccordé ou non au réseau électrique ;
- Pour fournir de l'énergie sur le réseau électrique.

Dans le premier cas, ce qui va déterminer la taille de l'éolienne seront les besoins à fournir sur le site. Dans le second cas, toute l'énergie produite est vendue au réseau électrique : il s'agit d'un producteur autonome.

a) Besoin de pompage



Photo 1 : Eolienne multipale de pompage

Si les besoins d'énergie sont de type pompage d'eau (arrosage, fourniture d'eau dans les champs...), il est préférable d'utiliser une éolienne de pompage. On évite ainsi de passer par l'électricité et le système est plus simple. Pour pomper 20 m³ par jour à 20 m de profondeur une éolienne de 3 mètres de diamètre est suffisante. La vitesse de démarrage est comprise entre 2 à 3 m/s suivant les modèles.

b) Besoin d'électricité sur un site non raccordé au réseau

Pour une fourniture d'électricité sur un site non équipé en électricité (péniche, grange isolée...), l'éolienne électrique de petite puissance, de 50 W à 10 kW, est suffisante dans la plupart des cas. L'éolienne produit du courant qui est régulé et stocké dans des batteries qui assurent l'autonomie pendant les jours de vent nul ou faible. On utilise ensuite soit directement du courant continu venant des batteries, soit du courant alternatif produit par un onduleur alimenté par les batteries.

Dans cette gamme de puissance, la vitesse de démarrage est comprise entre 3 et 5 m/s. A titre indicatif, une éolienne de 100 Watts, bien exposée, fournirait, indépendamment de la hauteur, une centaine de kWh/an dans des vitesses moyennes de 4 à 5 m/s à hauteur du moyeu (Cas de l'électrification de voiliers...). Pour une puissance de 10 kW et une vitesse moyenne à hauteur du moyeu d'environ 5 m/s, la production d'électricité approcherait 12 000-14 000 kWh/an.



Photo 2 : Système hybride en site isolé

c) Fourniture d'électricité sur un site raccordé au réseau électrique



Photo 3 : Eolienne raccordée au réseau interne du Lycée HQE de Calais

Il s'agit ici d'utiliser l'énergie éolienne pour alimenter une usine, une ferme par exemple déjà alimentée par le réseau électrique. Dans ce cas, l'énergie produite par l'éolienne viendra diminuer la facture d'électricité sur le site. L'éolienne est raccordée sur le réseau interne de l'utilisateur : quand elle produit, l'énergie éolienne sera utilisée en priorité par celui-ci. Si la production est trop faible, le réseau électrique fournira le complément. Aucun automatisme n'est à prévoir, l'énergie sera appelée sur le réseau quand cela sera nécessaire.

Généralement, ces installations ne dépassent pas une puissance installée supérieure à 200 – 300 kW.

A titre indicatif, une éolienne de 100 kW assure une production à une vitesse de démarrage de 3-4 m/s. Sa production, par un vent moyen de 6 m/s à hauteur du moyeu avoisine 150 000 à 200 000 kWh/an.

d) Production d'énergie éolienne vendue sur le réseau

Ce type d'usage correspond en fait à l'installation d'une centrale électrique : toute l'énergie produite est achetée par le réseau comme s'il s'agissait d'une centrale hydroélectrique ou au charbon. Un tarif d'achat est prévu.

Récente application de l'éolien puisque les progrès technologiques ont contribué à l'émergence de cette filière. En effet, dans les années 80, les éoliennes atteignaient des puissances encore faibles et ne pouvaient convenir à un approvisionnement de « masse ». En 20 ans, la capacité des éoliennes a été multipliée par un facteur de plus de 10. La stratégie actuelle conduit à regrouper plusieurs machines sur un même site afin de constituer une « Centrale Eolienne » ou « Wind Farm ». Ces installations atteignent plusieurs MW de puissance totale. Les recherches se tournent, à présent, vers des centrales installées en mer (offshore), pouvant représenter une capacité de production de plus de 50 MW. Ce développement devrait permettre à l'éolien de représenter un moyen de production significatif.



Photo 4 : Centrale éolienne de Goulien (6 MW)

En 2001, les éoliennes installées disposent d'une puissance comprise entre 750 kW et 1500 kW (Vitesse de démarrage de 3-4 m/s).

A titre indicatif, le taux moyen de fonctionnement recherché est compris entre 2500 et 3000 h/an. Ce qui représente une vitesse moyenne du vent d'environ 6 à 7 m/s à hauteur du moyeu, soit une production attendue de 2,5 à 3 GWh/an/MW.

LES TROIS CONDITIONS DE MISE EN OEUVRE

1a - ANALYSER LES BESOINS EN ENERGIE

Dans le cas d'un usage pour un site isolé, une analyse préalable des besoins en énergie est nécessaire. Si le site est alimenté par le réseau électrique, une analyse des consommations mensuelles est nécessaire compte tenu des variations saisonnières de vitesse de vent. Sinon, on identifie les différentes puissances installées et leur durée respective d'utilisation pour évaluer la consommation prévisionnelle.

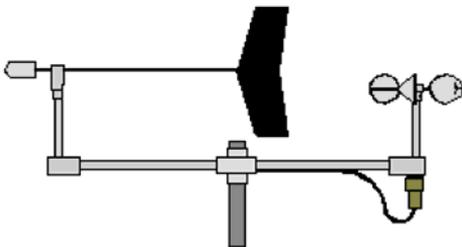
1b - CONNAITRE LE POTENTIEL EOLIEN DU SITE

La connaissance du potentiel éolien, et donc de la distribution des vitesses de vent, sur le site choisi est d'une importance primordiale. Celle-ci peut être connue soit à partir d'un atlas du potentiel éolien, soit à partir de mesures réalisées sur le site.

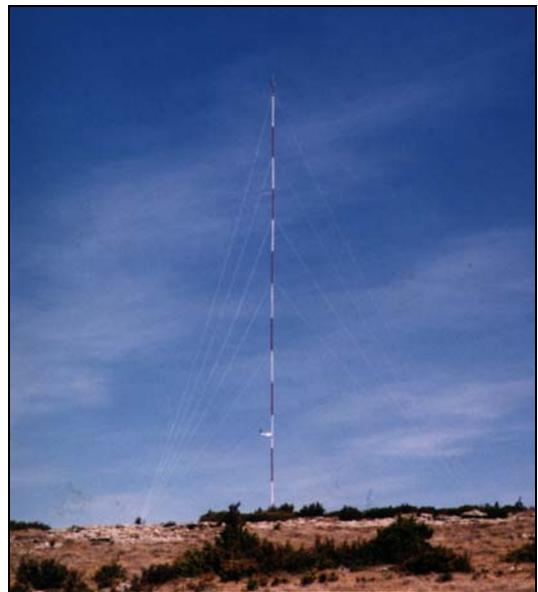
Approche globale : atlas éolien

Analyse locale

Pour obtenir une analyse fine du potentiel éolien, une campagne de mesure est nécessaire. Des capteurs tels que des anémomètres, des girouettes ou encore tout dispositif précisant le contexte aérologique local (pression, hygrométrie, température) sont installés sur un mât de mesure.



La hauteur du mât de mesure doit être égale à la hauteur de l'éolienne prévue sur le site. La durée de mesure est de plusieurs mois, couvrant les périodes présentés comme favorables pour l'exploitation de l'énergie éolienne.



2 - IDENTIFIER LES CONTRAINTES LIEES A LA CONSTRUCTION

Parallèlement à la validation du gisement éolien, il convient de répertorier toutes les contraintes potentielles qui pourraient freiner le montage du projet. Plusieurs éléments doivent être pris en compte : la propriété des terrains, le caractère juridique des terrains (Plan d'Occupation des Sols, Règlement d'Urbanisme) ainsi que les servitudes techniques et les contraintes réglementaires

Si la hauteur totale de l'éolienne dépasse 12 mètres (généralement une puissance supérieure à 10 kW), un permis de construire est nécessaire. Déposé en Mairie, il est signé par le Préfet du Département, s'il s'agit d'éoliennes dont la totalité de la production est vendue au réseau électrique.

Par ailleurs, pour la fourniture d'énergie sur un site spécifique, l'éolienne doit se situer sur le terrain de l'utilisateur final : il est en effet interdit de traverser une voie publique compte tenu de l'existence du monopole de la distribution d'EDF.

Pour une centrale éolienne de forte puissance, une étude d'impact doit être réalisée et jointe au dossier de permis de construire.

3 - DIMENSIONNER LA CENTRALE EN FONCTION DU RESEAU ELECTRIQUE

Dans le cas d'une centrale éolienne, l'évacuation de l'énergie éolienne produite peut constituer un problème majeur. Si la puissance du réseau électrique est trop faible, il pourra en effet se produire des surtensions qui gêneront les autres consommateurs.

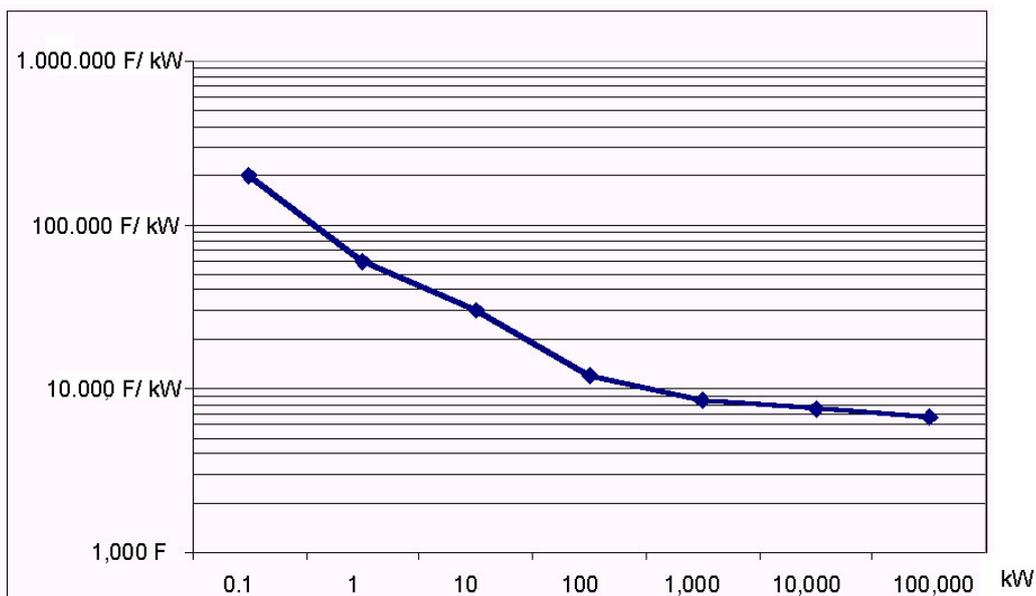
En règle générale, la taille d'une centrale éolienne est limitée par la capacité du réseau.

QUELQUES CHIFFRES

LES COÛTS

Le prix des éoliennes baisse fortement avec la taille de l'installation. Ceci est lié à deux phénomènes :

- d'une part le marché des « petites » éoliennes est relativement restreint et donc leur prix unitaire est élevé (effet de série limitée) ;
- d'autre part, les petites éoliennes induisent des coûts d'installation et des investissements annexes importants en comparaison de l'éolienne elle-même.



Le graphique ci-dessus présente l'évolution de l'investissement par kW installé. Exemple : Pour 0,1 kW installé, l'investissement est approximativement de $0,1 \times 200\ 000$ F/kW soit 20 000 F pour une éolienne de 100 W.

Quelques indications chiffrées sont présentées ci-dessous pour différents aérogénérateurs :

Eolienne de moins de 10 kW non raccordée au réseau

Prix de l'éolienne seule : 10 000 F/kW

Coût total de l'installation* : 30 à 50 000 F/kW

**Equipement annexe : Mât, Fondation, Régulateur de charges, Batteries, Convertisseurs de tension (Onduleurs)*

Eolienne de moins de 1 MW pour un site

Prix de l'éolienne seule : 6 000 à 8 000 F/kW

Coût total de l'installation* : 8 000 à 12 000 F/kW installé

**Equipement annexe : Fondation, Voirie, Réseau électrique interne, Installation de raccordement*

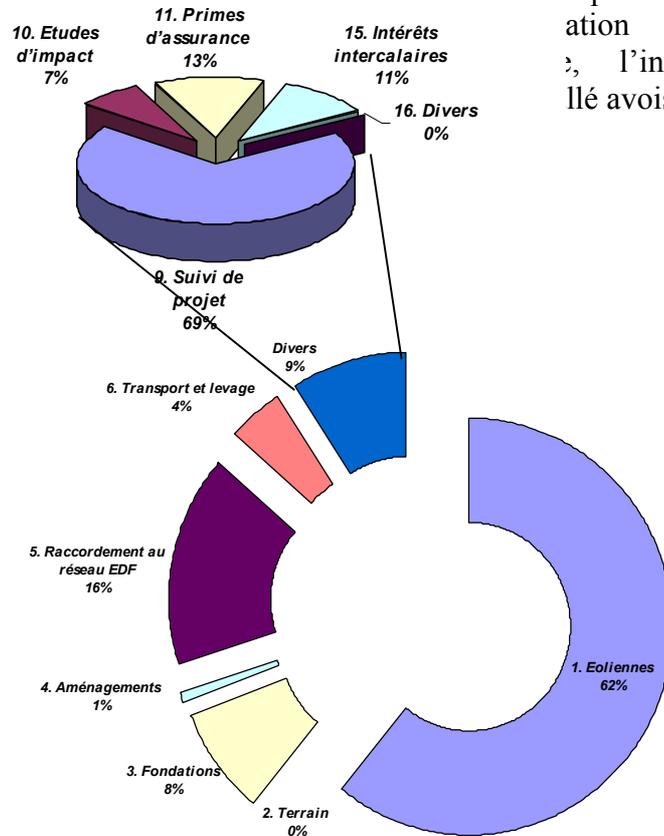
Centrale éolienne raccordée au réseau

Prix de l'éolienne seule : 4 à 5 000 F/kW

Coût total de l'installation* : 6 000 à 7 500 F/kW installé

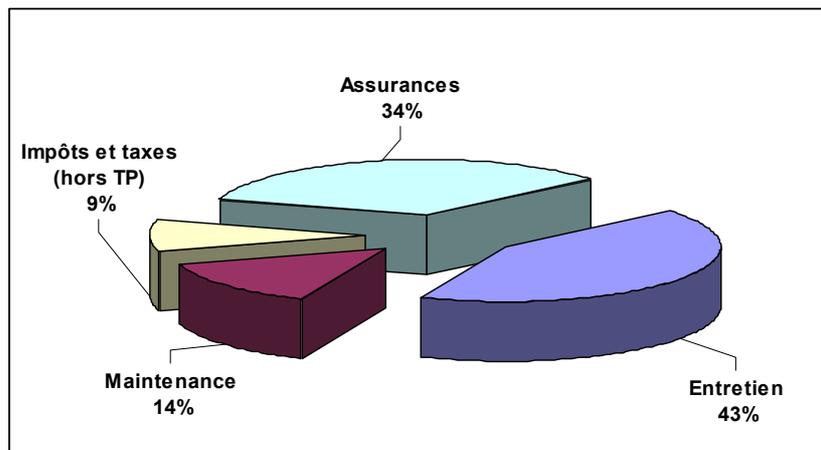
**Equipement annexe : Fondation, Voirie, Réseau électrique interne, Poste de livraison avec le réseau*

L'inv



Les postes budgétaires nécessaires à la réalisation du projet. A l'heure actuelle, l'investissement par MW installé avoisine 1 million d'euro :

La phase d'exploitation fait intervenir des frais non négligeables qui nécessitent une prise en compte rigoureuse puisque associée à une période long terme (environ 15 à 20 ans). Les frais annuels d'exploitation représentent environ 2 à 3 % de l'investissement.



LES DELAIS DE REALISATION

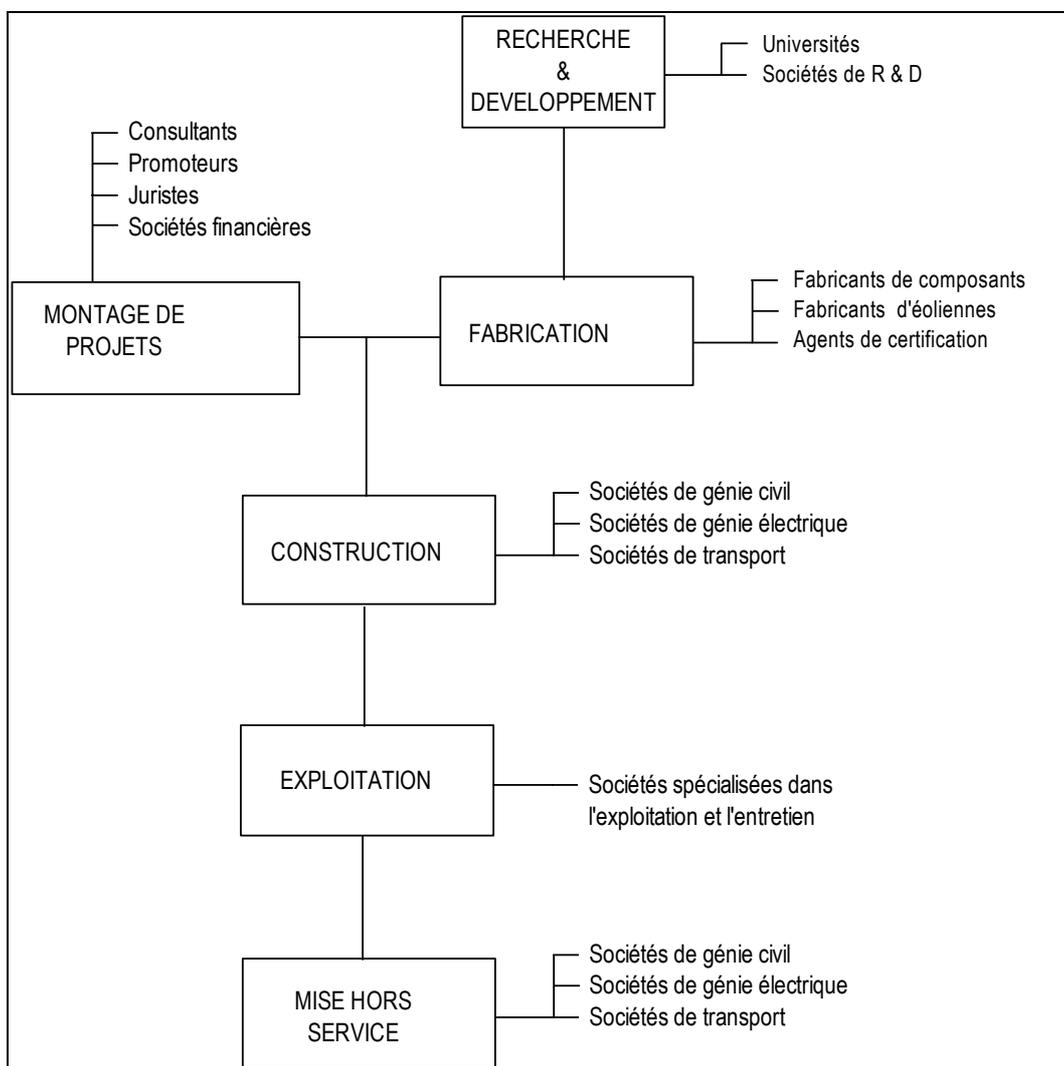
Pour une centrale éolienne, les principaux délais de réalisation sont :

- La période de mesure du vent sur le site, de 6 à 12 mois ;
- Le délai d'acceptation du permis de construire avec ou sans étude d'impact, de 3 à 6 mois ;
- Le délai de fabrication des éoliennes, de 4 à 8 mois ;
- Le délai de construction et de mise en service, de 4 à 8 mois.

Le délai total est donc d'environ de 3 ans au minimum.

Pour une éolienne de petite taille, les délais sont faibles car les procédures réglementaires sont limitées. Le délai total est d'environ 6 mois.

Au cours de l'élaboration et du montage opérationnel du projet, plusieurs acteurs interviennent dans des activités très variées mais complémentaires. L'industrie éolienne génère ainsi une multitude d'emplois directs et indirects :



EXEMPLES DE REALISATION (EED)

EOLIENNE RACCORDEE SUR RESEAU INTERNE

Eolienne du Lycée HQE de Calais (62)

Puissance installée : 1 éolienne de 150 kW

Date de mise en service : Octobre 1998

**Exploitant : Lycée HQE de Calais – Conseil Régional
NPDC**



EOLIENNE RACCORDEE EN BT SUR LE RESEAU

**Eolienne de l'Aire de la Baie de Somme (80) –
Puissance unitaire de 250 kW**

**Puissance installée : 1 éolienne Nordex de 250 kW –
Production annuelle moyenne d'environ 400 000
kWh.**

Investissement : 2 400 000 F

Date de mise en service : Juillet 1998

Exploitant : Conseil Général de la Somme



CENTRALES EOLIENNES



← Centrale éolienne de Goulien – (8 x 750 kW) – (29)

Eoliennes : NEG-Micon (Danemark)

Investissement : 22 000 000 F

Date de mise en service : Avril 2000

Exploitant : Centrale éolienne de Goulien

Centrale éolienne de Donzère (5 x 600 kW) – (63)

Eoliennes : Nordex (Allemagne/Danemark)

Investissement : 22 000 000 F

Date de mise en service : Juillet 1998

Exploitant : SINERG (Filiale de la Caisse des Dépôts et Consignations)



← Centrale éolienne de Widehem (6 x 750 kW) – (62)

Eoliennes : Jeumont SA (France)

Investissement : 33 500 000 F

Date de mise en service : 2000

Exploitant : SAEML « Eoliennes Nord-Pas-de-Calais »