

# **DIMENSIONNEMENT D'UNE INSTALLATION EOLIENNE ET MODELISATION INFORMATIQUE D'UNE PALE D'EOLIENNE**



**Etudiants :**

**Elodie FOURNOT    Mathilde LAJOINIE**

**Adrien LEBLOND    Nian LIU**

**Yulin WANG**

**Enseignant-responsable du projet :**

**Ludovic HENRIET**

*Cette page est laissée intentionnellement vierge.*

Date de remise du rapport : **19/06/09**

Référence du projet : **STPI/P6-3/2009 – 41**

Intitulé du projet : **Dimensionnement d'une installation éolienne et modélisation d'une pale d'éolienne**

Type de projet : **Modélisation, calcul.**

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

**Première partie :**

- **Maîtriser l'utilitaire de calcul professionnel : Windpro**
- **Créer un petit parc éolien**
- **Etudier les ressources de vent ainsi que les caractéristiques de l'éolienne**
- **Effectuer des calculs de production, de bruit, ainsi que un photomontage**

**Deuxième partie :**

- **Savoir utiliser Solidworks et son module Solidworks Flow Simulation**
- **Modéliser une pale**
- **Effectuer des calculs à l'aide de Solidworks Flow Simulation afin de retrouver la courbe de puissance de l'éolienne**

## TABLE DES MATIERES

1.	Introduction .....	5
2.	Méthodologie / Organisation du travail .....	6
3.	Travail réalisé et résultats .....	8
3.1.	Historique, généralités.....	8
3.1.1.	Historique.....	8
3.1.2.	Eoliennes : fonctionnement et différents types .....	9
3.1.2.1.	Les différents types d'éoliennes.....	9
3.1.2.2.	Fonctionnement de l'éolienne classique .....	10
3.1.3.	Explication théorique des calculs .....	11
3.2.	Dimensionnement d'une installation éolienne.....	16
3.2.1.	Utilisation de Windpro .....	16
3.2.1.1.	Choix du site.....	16
3.2.1.2.	Choix de la carte et des éoliennes .....	16
3.2.1.3.	Ajout des données du site.....	18
3.2.2.	Exploitation des résultats .....	19
3.2.2.1.	Ressources de vent.....	19
3.2.2.2.	Courbes de puissance .....	20
3.2.2.3.	Calcul du bruit.....	20
3.2.2.4.	Production annuelle du parc .....	21
3.2.2.5.	Photomontage .....	21
3.3.	Solidworks.....	24
3.3.1.	Préambule.....	24
3.3.2.	Les travaux sur SolidWorks.....	25
3.3.2.1.	Création d'une portion d'aile .....	25
3.3.2.2.	Calculs à réaliser .....	26
3.3.2.3.	Utilisation de FlowWorks.....	26
3.3.2.1.	Comparaison avec la théorie .....	29
4.	Conclusions et perspectives.....	30
5.	Bibliographie .....	31
6.	Annexes.....	32

## 1. INTRODUCTION

Pour ce projet de physique, nous avons choisi de travailler sur les éoliennes. En effet, le vent est une des principales sources d'énergie renouvelable, et l'énergie éolienne a donc un bel avenir devant elle.

Dans ce domaine, nous avons eu le choix entre trois projets : le dimensionnement d'une installation éolienne, la modélisation d'une pale d'éolienne, ainsi que la création d'un utilitaire de calcul. Nous avons alors choisi de diviser notre projet en deux parties, chacune correspondant à un des projets proposés.

Pour la première partie, nous avons pensé qu'il serait intéressant de nous intéresser au dimensionnement d'une installation éolienne. Ainsi, nous avons créé notre parc éolien grâce à un logiciel professionnel, Windpro. Le but étant d'apprendre à manier ce logiciel, et ainsi d'effectuer tous les calculs nécessaires au dimensionnement de notre parc, notamment ceux de puissance, de bruit et de production.

Enfin, pour la deuxième partie, nous avons choisi de nous intéresser à l'éolienne elle-même, et plus particulièrement à ses pales. Nous avons alors modélisé une pale grâce à Solidworks, un outil de modélisation sur ordinateur. Le module Solidworks Flow Simulation nous a alors permis de simuler l'écoulement de l'air sur la pale. Le but était alors de retrouver la courbe de puissance de l'éolienne grâce à une série de calculs sur ordinateur.

Dans ce dossier, nous allons commencer par présenter les éoliennes, de leur histoire à leur fonctionnement. Ensuite, nous détaillerons la première partie de notre projet, soit le dimensionnement de l'installation éolienne, avant de finir avec la modélisation des pales.

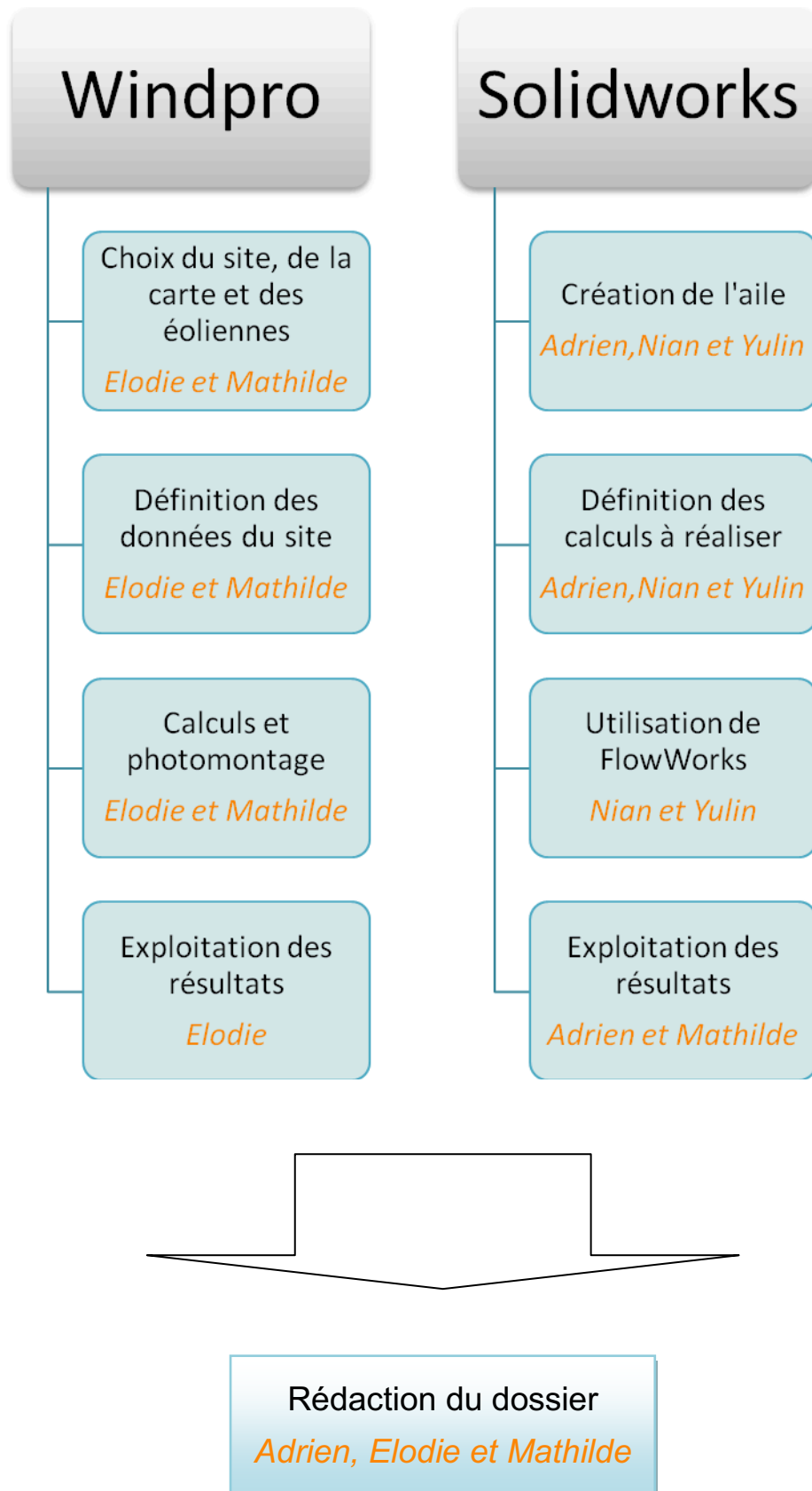
## 2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Travailler en groupe nécessite une bonne organisation, mais aussi beaucoup de communication. C'est pourquoi nous nous sommes réunis toutes les semaines afin de faire avancer notre projet tous ensemble. Entre deux réunions, chacun travaillait de son côté, mais nous nous étions échangés nos adresses e-mails ce qui nous permettait de communiquer pendant la semaine si nous avions un souci.

Comme notre projet était divisé en deux sous projets, il nous a paru plus pratique de diviser le groupe en deux : Elodie et Mathilde ont travaillé avec Windpro sur le premier projet, tandis qu'Adrien, Nian et Yulin, avec l'aide de Mathilde, se sont tournés vers la modélisation sous Solidworks.

L'organisation dans le temps de chacun des projets a été très différente. En effet, nous n'avons la licence pour Windpro que pendant quelques semaines. Il nous a donc fallu effectuer tous les calculs rapidement, et ensuite penser à l'exploitation des résultats. En revanche, pour Solidworks, nous n'avons pas eu de problème avec la licence, et nous avons donc pu faire tous les calculs nécessaires jusqu'à la fin, tout en rédigeant le dossier. Ce sont les français qui se sont chargés de cette tâche, étant donné les problèmes de langue que cela aurait posé avec les étrangers. Mais cela ne les a pas empêchés de bien s'intégrer au projet, notamment lorsqu'il s'agit de manier le logiciel Solidworks et d'effectuer les séries de calculs.

Sur la page suivante, un organigramme, permet de comprendre comment nous nous sommes répartis les tâches.



### 3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

#### 3.1. Historique, généralités

##### 3.1.1. *Historique*

Depuis longtemps, les hommes ont compris l'intérêt de l'utilisation du vent. C'est ainsi que cette source d'énergie renouvelable a été utilisée à divers usages. La première utilisation connue remonte à l'Antiquité avec les galères, qui sont des bateaux à voile. Plus tard, vers l'an 600, on a commencé à utiliser des moulins à vent, qui produisent de l'énergie mécanique à partir du vent. Les moulins à vent sont les ancêtres des éoliennes. C'est-à-dire qu'au lieu de broyer des grains de blé, les éoliennes modernes servent à produire de l'énergie électrique.

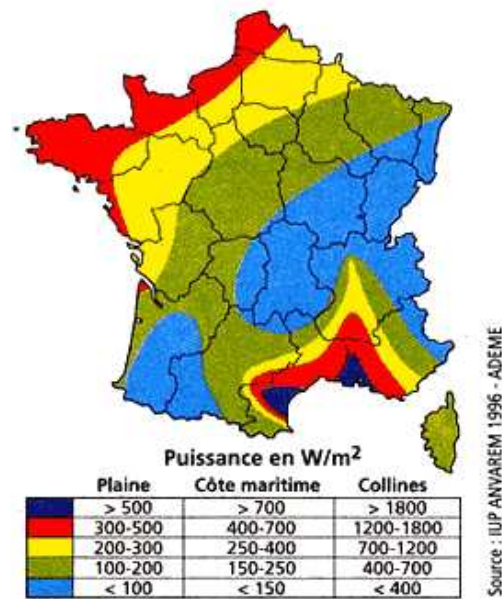
Les premières éoliennes étaient utilisées dans des endroits reculés et non-connectés à un réseau électrique. L'énergie ne pouvait pas être stockée, et par conséquent sans vent il n'y avait plus d'électricité. Mais le développement de maîtrises du stockage d'énergie par batteries a permis une utilisation plus étendue et plus performante des éoliennes. De plus, depuis les années 1990, des recherches ont rendu possible la création de puissants aérogénérateurs de plus de 1 MW.

Aujourd'hui les éoliennes sont utilisées dans plusieurs pays du monde et servent à produire du courant électrique alternatif, comme les centrales nucléaires, les barrages hydro-électriques ... Cependant, les éoliennes produisent seulement 1% de la production de l'électricité dans le monde.

Les éoliennes se développent particulièrement dans les pays occidentaux même si des pays asiatiques comme la Chine ou l'Inde commencent à suivre le mouvement. L'entreprise EDF annonce dans un rapport que l'éolien est actuellement la filière énergétique la plus dynamique dans le monde. Et c'est principalement le cas dans l'Union Européenne avec une augmentation moyenne de 37,8% de la production d'électricité par an de 1993 jusqu'en 2002. En effet, l'Allemagne est le leader mondial dans cette filière avec 22 247 MW de puissance installée en 2007. Puis, suivent les Etats-Unis avec 16 819 MW et enfin l'Espagne avec 15 145 MW.

La France arrive en 8<sup>ème</sup> position mondiale et en 5<sup>ème</sup> position européenne avec 2 455 MW de puissance installée alors qu'elle possède un très grand potentiel éolien (le 2<sup>ème</sup> d'Europe) en 2007. La France accuse un retard assez important par rapport à d'autres pays de l'UE, mais elle est en train de le rattraper. En effet, les chiffres sont très prometteurs, puisqu'elle voit sa production d'électricité d'origine éolienne augmenter de 37% par an.





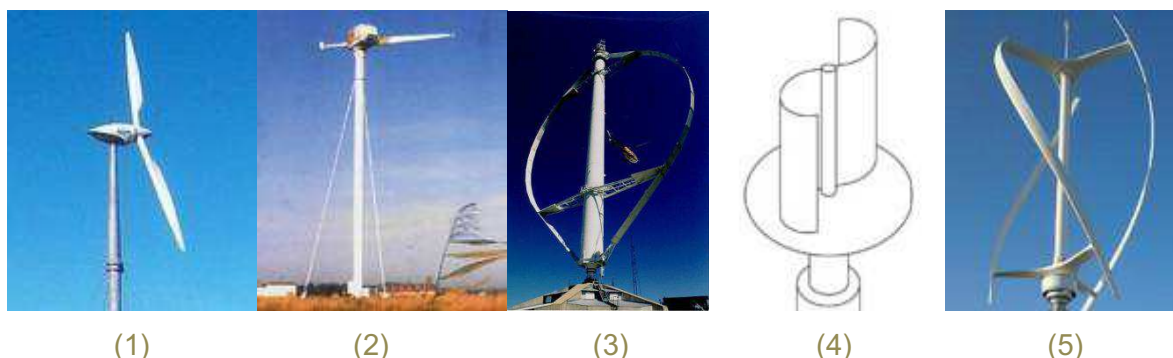
**Figure 1 : Carte de la puissance des vents en France**

Sur la carte représentant la puissance des vents en France, on peut en effet constater que la France possède plusieurs grandes régions à fort potentiel éolien, notamment la Normandie à laquelle nous allons tout particulièrement nous intéresser dans notre projet.

### 3.1.2. *Eoliennes : fonctionnement et différents types*

#### 3.1.2.1. *Les différents types d'éoliennes*

Il faut savoir qu'il existe différents types d'éoliennes : les éoliennes classiques, à axe vertical qui ont généralement trois pales, mais peuvent aussi en avoir deux (1), voire une seule(2). On peut aussi trouver des éoliennes à axe vertical, tel que les éoliennes de Darrieus (3), les éoliennes de Savonius (4), ou encore des éoliennes à hélices (5).



**Figure 2 : Les différents types d'éoliennes**

La seule éolienne à axe verticale qui ait été fabriquée industriellement est l'éolienne de Darrieus. Le moteur de cette éolienne se situant à sa base, elles sont plus économiques que des éoliennes classiques. Mais elles sont aussi moins productives.

C'est pourquoi, le plus souvent, on trouve des éoliennes à axe horizontal. Dans la majorité des cas, ce sont des éoliennes à trois pales : en effet, un nombre impair de pales permet d'assurer la stabilité de l'éolienne. Si on ne met que deux pales sur une éolienne, lorsque l'une des pales passera devant le mat et sera donc abritée du vent, la seconde pale sera tout en haut, la ou elle reçoit le plus de vent, ce qui déséquilibre l'éolienne.

Nous allons donc maintenant nous intéresser aux éoliennes les plus courantes qui sont les éoliennes à trois pales et à axe horizontal.

### 3.1.2.2. Fonctionnement de l'éolienne classique

Comme vous pouvez le voir sur le schéma ci-dessous, une éolienne classique est composée de différents éléments tels que le mat, les pales, et la nacelle, mais aussi un système d'orientation, un frein, un multiplicateur, un système de régulation électrique, un générateur, etc...

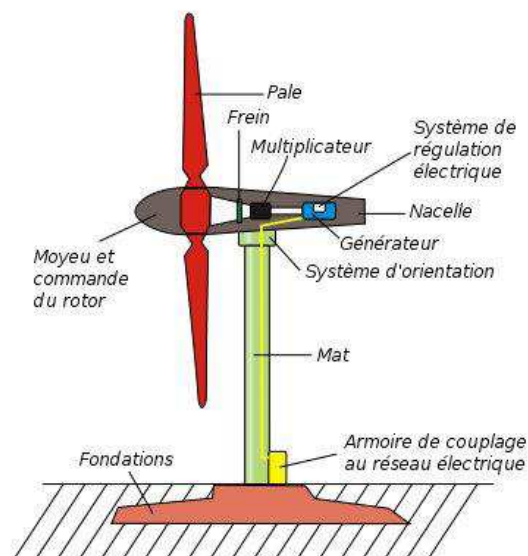
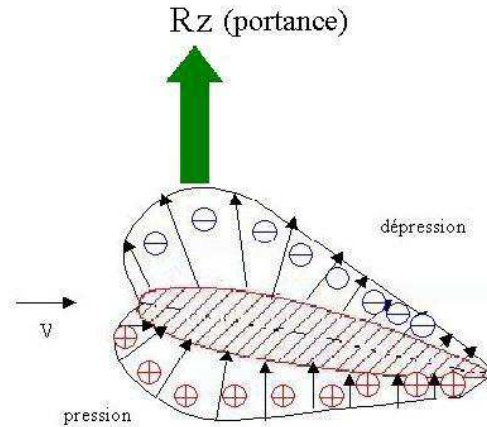


Figure 3 : Schéma d'une éolienne tripale

Il paraît évident que les pales de l'éolienne tournent grâce à la force du vent. Mais cela est plus compliqué qu'il n'y paraît. Une pale d'éolienne marche un peu comme une aile d'avion : lorsque le vent frappe le bord d'attaque de l'aile, cela crée une dépression sur l'extrados de l'aile, et une surpression sur son intrados. En effet, les filets d'air ont une vitesse plus importante sur l'extrados. Cette surpression et cette dépression forment la portance.



**Figure 4 : Profil d'une aile d'avion**

Comme les pales de l'éolienne sont en rotation, on doit les vriller pour avoir un angle d'incidence du vent optimal sur les pales.

En utilisant ce principe, on peut faire freiner l'éolienne, ainsi que réguler sa vitesse de deux façon :

- Par décrochage aérodynamique, ou Stall: dans ce cas, les différentes parties de la pale ne sont pas sollicitées de la même façon : pour un vent faible, c'est la base de la pale qui sera sollicitée, pour un vent fort, c'est son extrémité. Cela nécessite donc une pale très vrillée.
- Grâce au système de Pitch, ou « pas variable », on peut faire pivoter chacune des ailes de l'éolienne de 20°. On peut alors orienter les pales en fonction de la force du vent : les pales sont alors beaucoup moins vrillées.

Rentrons maintenant au cœur de l'éolienne : afin de convertir l'énergie éolienne en énergie électrique, il nous faut un générateur. Il existe deux types de générateurs : synchrone et asynchrone. Nous ne développerons pas ici les différences entre ces deux systèmes.

### **3.1.3. Explication théorique des calculs**

Le vent est un paramètre difficile à mesurer. En effet, il y a plusieurs facteurs qui le caractérisent : sa vitesse, sa direction, l'effet de la rugosité du sol, l'effet des obstacles, l'effet de la stabilité de l'atmosphère... C'est pourquoi, nous nous intéresserons à un cas idéal où seules la vitesse et la direction du vent seront prises en compte.

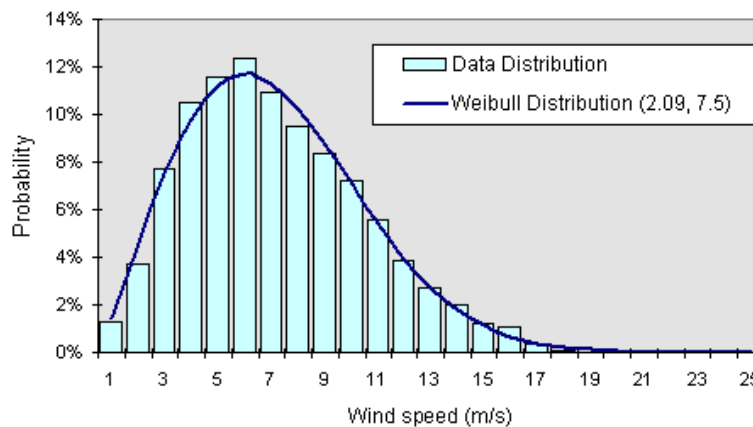
Tout d'abord, avant tout calcul il est nécessaire de se procurer des données indiquant la direction du vent pour une région donnée. Ces données sont accessibles notamment grâce au logiciel WindPro et sont mises à jour régulièrement pour chaque station météorologique. Pour créer ces données, chaque station météorologique enregistre la moyenne des vitesses et directions du vent pendant un intervalle de 10 minutes.

Ces données sont souvent résumées sous forme de rose des vents. Comme on peut le voir sur l'image, une rose des vents correspond à un compas divisé en douze secteurs de 30° chacun. Le rayon de chacun des secteurs correspond à la fréquence relative de chaque direction du vent. La rose des vents est outil très utile pour déterminer le site le plus approprié à l'installation d'éoliennes. En effet, la rose des vents permet d'évaluer la direction des vents dominants. Il faut ensuite veiller à limiter les obstacles et rugosité dans cette direction.

Au sein de chaque secteur/direction d'une rose des vents, on peut créer un histogramme représentant la fréquence des vents dans cette direction en fonction de leurs vitesses. Comme pour la rose des vents, cet histogramme est réalisé à partir des données météorologiques. On peut approximer cet histogramme par une densité de probabilité appelée loi de Weibull. Elle est de la forme :

$$f(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right)$$

Où  $V$  est la vitesse du vent,  $k$  le paramètre de forme et  $c$  le paramètre d'échelle. Ces paramètres sont déterminés par des méthodes qui visent à ce que la courbe de Weibull (en bleu foncé) modélise au mieux l'historgramme (en bleu turquoise) comme on peut le voir ci-dessous. (Méthode des moments).



**Figure 5 : Distribution de Weibull**

Cette densité de probabilité permet de faire différents calculs tels que la vitesse moyenne du vent ainsi que les puissances moyennes du vent et de la turbine...

- calcul de la vitesse moyenne : 
$$\bar{v} = \int_0^{\infty} v f(v) dv$$

- calcul de la densité de puissance moyenne disponible :

$$\overline{p_{disponible}} = \frac{1}{2} \rho \overline{v^3} \quad \text{avec} \quad \overline{v^3} = \int_0^{\infty} v^3 f(v) dv$$

C'est une puissance par unité de surface où  $\rho$  est la masse volumique de l'air et où  $\overline{V^3}$  est le moment d'ordre trois.

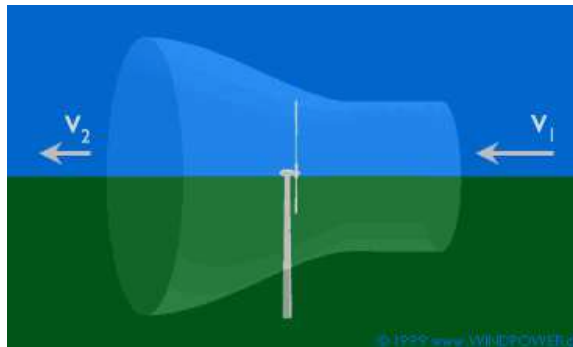
Cependant, on n'est pas obligé de raisonner en termes de moyenne mais il était intéressant de le montrer. La formule reste vraie sans moyenne. Et on peut écrire que :

$$p_{disponible} = \frac{1}{2} \rho V^3$$

Pour obtenir la puissance disponible d'une éolienne, il suffit de multiplier par S, la surface balayée par les pâles de l'éolienne.

$$P_{disponible} = \frac{1}{2} \rho S V^3$$

- calcul de la puissance récupérée :



**Figure 6 : Tube de courant du vent**

On peut voir d'après cette schématisation qu'à l'amont de l'éolienne le vent a une vitesse  $V_1$  et à l'aval le vent a une vitesse  $V_2$ . L'enveloppe blanche représente un tube de courant. Nous expliquerons ultérieurement pourquoi la section du tube de courant s'agrandit. On utilisera les notations  $V_1$  et  $V_2$  par la suite.

Avant de calculer la puissance récupérée, il est important de faire la différence entre la puissance disponible et la puissance récupérée par l'éolienne. L'éolienne ne récupère pas tout ce qui est disponible. On cherche l'expression de  $P_{recup}$  par la démonstration suivante :

On part de la loi de conservation des puissances et on peut donc écrire que :

$$P_{tot} = P_{dispo} = P_{recup} + P_{sortant}$$

Où  $P_{dispo}$  est la puissance disponible exprimée précédemment,  $P_{récup}$  est la puissance récupérée par le rotor et où  $P_{sortant}$  est la puissance du vent sortant de l'éolienne. En remplaçant pas les expressions respectives à chaque puissance, on obtient :

$$\frac{1}{2} D_m V_1^2 = P_{récup} + \frac{1}{2} D_m V_2^2 \quad \Leftrightarrow \quad P_{récup} = \frac{1}{2} D_m (V_1^2 - V_2^2)$$

Or,  $D_m$  est le débit massique de l'air identique à l'entrée et la sortie du rotor et peut s'exprimer de la sorte :

$$D_m = \rho S V_{rotor} = \rho S \left( \frac{V_1 + V_2}{2} \right)$$

Remarque : On est parti du principe que  $V_{rotor}$ , la vitesse du vent traversant balayée par le rotor, est égale à la moyenne de  $V_1$  et  $V_2$ .

Ainsi :

$$P_{récup} = \frac{1}{4} \rho S (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2)$$

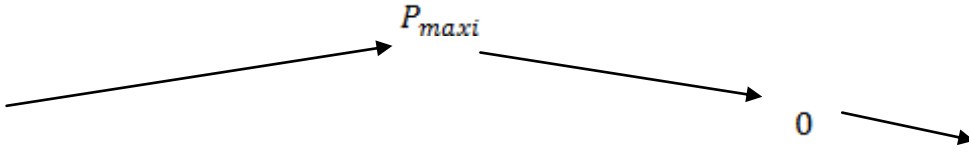
En posant  $x = V_2$ , et en dérivant  $P_{récup}$  par  $x$ , on obtient :

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\rho S}{4} (V_1^2 - 2 V_1 x - 3 x^2)$$

Cette dérivée partielle est un polynôme du second degré dont les racines sont les suivantes :

$$x_1 = -V_1 (<0 : impossible pour une vitesse) \text{ et } x_2 = \frac{1}{3} V_1$$

On peut tracer le tableau de variation suivant :

$V_2$	0	$V_1/3$	V <sub>1</sub>
$\frac{\partial P}{\partial V_2}$	+		-
$P_{récup}(V_2)$			

Avec :  $P_{maxi} = P \left( \frac{V_1}{3} \right) = \frac{8}{27} \rho S V_1^3$

Interprétation du tableau : Lorsque  $V_1 = V_2$ , il n'y a pas de puissance récupérée par l'éolienne. Lorsque  $V_2$  diminue,  $P_{récup}$  augmente jusqu'à la valeur limite de  $V_2 = V_1 / 3$ . La

puissance récupérée ne pourra pas dépasser  $P_{\text{maxi}}$ . On peut généraliser avec la formule suivante :

$$P_{\text{récup}} = C_p \frac{1}{2} \rho S V^3$$

Où  $C_p$  est un coefficient.  $C_p$  est égal à  $16/27$  dans  $P_{\text{maxi}}$  (On vient de redémontrer le coefficient de la loi de Betz). Donc dans la pratique,  $C_p$  appartient obligatoirement à  $[0 ; 16/27]$ . Aujourd'hui, pour une éolienne industrielle du marché,  $C_p$  vaut 0,43.

Remarque concernant le schéma :

On peut modéliser le vent entrant et sortant comme un tube de courant dont l'écoulement serait permanent. On peut par conséquent utiliser la relation :

$\rho S_1 V_1 = \rho S_2 V_2$  avec 1 : l'entrée et 2 : la sortie.  $\rho$  est identique à l'entrée et à la sortie.  $S$  est la section du tube de courant. Comme  $V_2$  diminue afin que  $P_{\text{récup}}$  augmente comme nous l'avons montré précédemment. Nécessairement la section du tube de courant à la sortie notée  $S_2$  augmente.

## 3.2. Dimensionnement d'une installation éolienne

Pour cette partie du projet, nous avons eu la chance de pouvoir utiliser un utilitaire de calcul professionnel : Windpro. Ce logiciel permet en effet de créer un parc éolien, et d'en calculer la production, la rentabilité, de faire des photomontages, etc... Grâce au serveur EMD qui y est rattaché, nous avons pu récupérer toutes les données nécessaires à notre projet : données de vents, mais aussi données de terrain, et caractéristiques des éoliennes. Mais avant d'effectuer les calculs, il y a un certain nombre d'étapes à ne pas oublier.

### 3.2.1. Utilisation de Windpro

#### 3.2.1.1. Choix du site

En effet, il nous a tout d'abord fallu choisir un site pour implanter nos éoliennes. Pour cela, nous avons cherché grâce à une carte des vents (voir introduction) un endroit où les vents moyens étaient forts. La côte normande nous a alors parue tout à fait appropriée pour l'installation de nos éoliennes.

Enfin, nous avons placé nos deux éoliennes au-dessus d'un petit vallon afin de bénéficier du phénomène d'accumulation du vent. En effet, lorsque le vent arrive devant le vallon, il se retrouve comprimé à l'entrée, ce qui fait considérablement augmenter sa vitesse lorsqu'il passe l'obstacle. Cela s'appelle l'effet de tunnel :

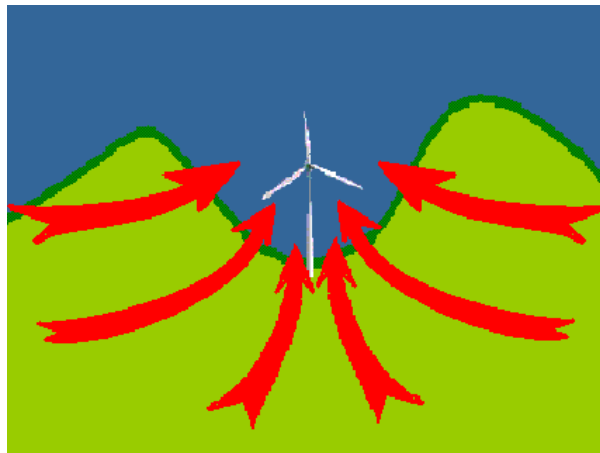


Figure 7 : L'effet tunnel

Le vent ayant une plus grande vitesse dans le vallon, lorsqu'il remonte le long de ses pentes, il conserve une partie de son accélération. De plus, nous connaissions le site de Saussemare, et il nous était donc facile d'aller le prendre en photo dans le but de réaliser un photomontage.

Il faut tout de même savoir que dans la pratique, la loi nous empêcherait de situer une éolienne à cet endroit : il est en effet interdit d'implanter une éolienne si près de la mer.

#### 3.2.1.2. Choix de la carte et des éoliennes

Une fois le site choisi, nous avons commencé à utiliser Windpro, un utilitaire de calcul de l'énergie éolienne.



Nous avons tout d'abord du choisir une carte. Comme celle fournie par le logiciel n'était pas assez précise, nous avons rentré notre carte IGN. Pour cela, nous avons utilisé une carte qui avait le format d'une image, il nous a donc fallu la géo référencer à l'aide de trois points : l'un situé à Mesnil Gaillard (1), le second sur la ferme de Saussemare (2), et le dernier à l'entrée de Saint Aubin sur Mer.

Pour les éoliennes, nous avons choisis le modèle Enercon E-66. Elles correspondent en effet au type d'éoliennes déjà utilisées dans la région : ce sont de grandes éoliennes adaptées aux vents forts. Elles peuvent produire 1800 kw/h. Ce modèle a une hauteur de mat plus petite que le diamètre du rotor : 65m de hauteur pour le mat, 70 m de diamètre pour le rotor. Cela n'est pas dérangeant ici, puisque la proximité de la mer nous assure peu de perturbations du vent, et donc un vent régulier et fort à une hauteur plus petite.



**Figure 8 : Enercon E-66**

La courbe de puissance d'une éolienne est un graphe qui représente la puissance de sortie de l'éolienne en fonction des différentes vitesses de vent. Celle de l'éolienne que nous avons choisie nous était fournie par Windpro :

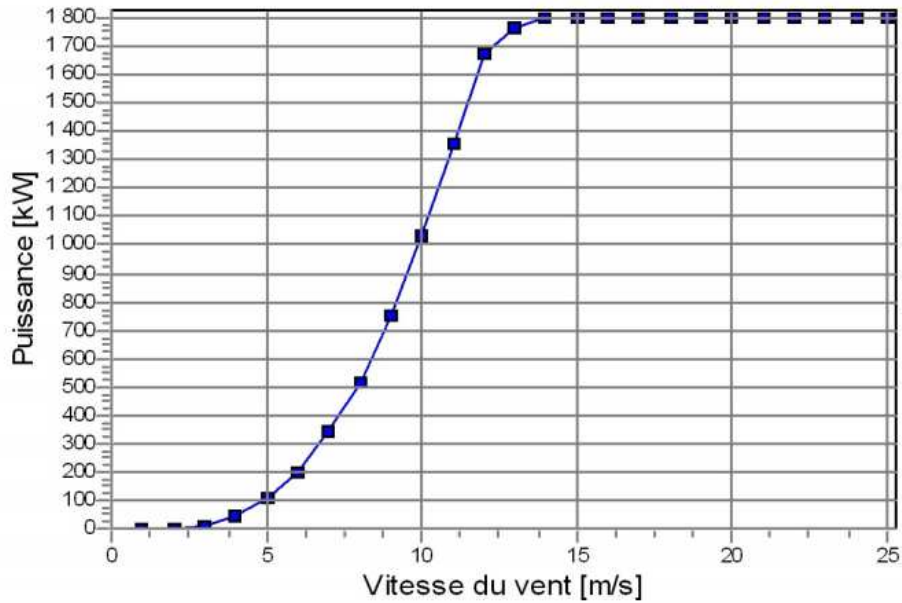


Figure 9: Courbe de puissance de l'éolienne

### 3.2.1.3. Ajout des données du site

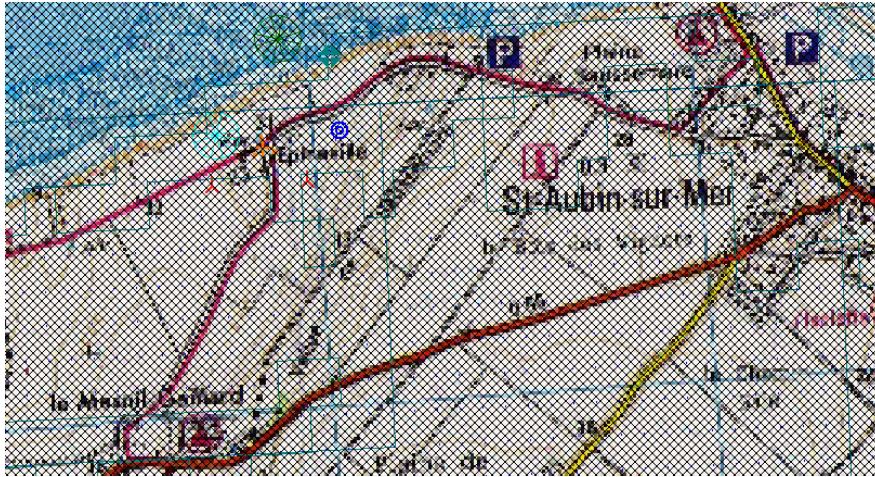
Enfin, nous avons placé l'objet météo au centre de notre installation éolienne. Nous avons ensuite récupéré les données météo sur le serveur EMD de Windpro. Ce sont les données moyennées pour les villes de Cherbourg, Caen et Amiens, qui sont enregistrées depuis 1979. Nous avons ainsi les vitesses du vent en fonction du temps, mais aussi la vitesse moyenne en fonction de chaque secteur de vent, ce qui nous permet de définir une rose des vents. De plus, ces données nous fournissent aussi les distributions de Weibull (pour chacun des douze secteurs de vent), dont nous reparlerons plus loin. Ses données vont nous permettre d'effectuer des calculs afin de connaître la quantité d'électricité que nos éoliennes vont pouvoir produire.

Il nous a de plus fallu définir la rugosité du terrain. L'indice de rugosité va de 0 à 4 : 0 pour un paysage non rugueux, tel que la mer ; 4 pour un paysage très rugueux avec des arbres par exemple.

Nous avons le choix entre deux méthodes.

La première consiste à définir manuellement la rugosité du terrain, par secteur de vent et en fonction de la distance par rapport à l'éolienne.

La seconde méthode, que nous avons choisie, consistait à récupérer les données de rugosité du terrain sur le serveur EMD de Windpro. L'inconvénient de cette méthode est que Windpro ne peut pas faire les calculs avec ces données.



**Figure 10: Carte du site avec la rugosité**

Nous avons enfin rajouté les courbes de niveau, symbolisées sur la carte par des points. Toutes ces données vont permettre d'effectuer les calculs avec un maximum de précision.

### **3.2.2. Exploitation des résultats**

Toutes les données que nous avons ainsi rentrées dans l'utilitaire de calcul Windpro nous ont alors permis d'effectuer un certain nombre de calculs, notamment des calculs de productible pour chacune des deux éoliennes, de production pour l'ensemble du parc, mais aussi de bruit. Windpro nous a permis de plus d'obtenir des courbes de puissance détaillées, et de résumer les données de vent principales sous forme de graphiques. Enfin, nous avons réalisé un photomontage, toujours grâce à ce logiciel.

#### **3.2.2.1. Ressources de vent**

(voir annexe 1)

Avant de nous lancer dans des calculs, il était primordial de bien connaître les ressources de vent dont nous disposions. Grâce à Windpro, nous avons obtenu un rapport concernant :

- La distribution de Weibull pour notre site. Celle-ci nous donne la fréquence d'apparition des vitesses de vent tous secteurs confondus.
- Un diagramme représentant la fréquence des vents en fonction de l'orientation. On voit ici que le plus souvent, on a un vent d'ouest sud-ouest.
- Un diagramme montrant la vitesse moyenne du vent en fonction de son orientation. On peut constater ici que les vents dominants sont aussi les plus forts sur notre site.
- La rose énergétique, qui nous donne la quantité d'énergie que l'éolienne pourra produire par secteur en une année. Elle permet ainsi de définir l'axe optimal pour l'implantation des éoliennes.

Le logiciel se sert de toutes ces données pour effectuer els calculs qui vont suivre.

### 3.2.2.2. Courbes de puissance

(voir annexe 2)

Généralement, la courbe de puissance d'une éolienne est fournie par le fabricant de l'éolienne (voir 3.2.1.2). Cette courbe est idéale. Mais on peut aussi calculer la courbe corrigée nous-mêmes. Windpro nous propose ainsi une comparaison entre la courbe idéale fournie par le fabricant, et la courbe HP, qui est une courbe simplifiée, basée sur la puissance du vent, la surface balayée par le rotor, ainsi que le type de génératrice et le système de contrôle (Stall ou Pitch). Dans l'annexe on trouve une courbe montrant les coefficients de traînée et de rendement en fonction de la vitesse du vent. Ces deux coefficients sont utilisés lors du calcul de la courbe HP.

Au final, on obtient un tableau comparatif des deux courbes :

V moy.	[m/s]	5	6	7	8	9	10
Valeur HP	[MWh]	1 796	3 067	4 390	5 766	6 910	7 892
ENERCON E-66/18 70 1800 70.0 !O! moyeu: 65,0 m	[MWh]	1 951	3 214	4 579	5 903	7 096	8 107
Valeur de contrôle	[%]	-8	-5	-4	-2	-3	-3

Figure 11 : Comparaison de la courbe théorique et de la courbe HP

Lorsque la valeur de contrôle est inférieure à -5%, on peut en conclure que le fabricant est optimiste quant à sa courbe de puissance. Il faudra s'attendre à ce que la puissance de l'éolienne soit moins importante pour les vitesses considérées. Cela peut-être du à des incertitudes sur les mesures.

C'est ici le cas lorsque la vitesse moyenne du vent est égale à 5m/s. Il faudra s'attendre à ce que la puissance de l'éolienne soit moins importante pour cette vitesse.

### 3.2.2.3. Calcul du bruit

(voir annexe 3)

Nous avons effectué des calculs relatifs au bruit pour une de nos deux éoliennes. Le résultat ainsi obtenu est à peu près le même que si on avait calculé pour nos deux éoliennes : en effet, si une seule éolienne donne 50 dB de bruit, deux éoliennes côte à côte en produirons seulement 53 dB. Pour effectuer ce calcul, nous avons indiqué au logiciel la vitesse moyenne du vent à cet endroit, mais aussi la hauteur à laquelle nous voulions nos mesures. Grâce à Windpro, nous avons pu obtenir les résultats sous forme de carte :

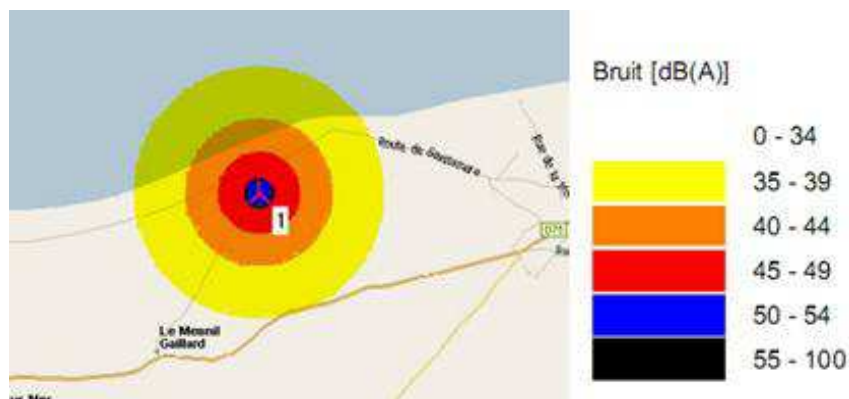


Figure 12 : Carte représentant le bruit autour d'une éolienne

On constate alors que au pied de l'éolienne, on a entre 50 et 54 décibels de bruit, ce qui correspond au bruit d'un lave linge. Mais quand on s'en éloigne, le bruit redescend en-dessous des 35 décibels, ce qui correspond tout simplement aux bruits que l'on entend normalement dans des champs ou dans une forêt.

On peut en conclure que les habitants de Mesnil Gaillard et de Saint Aubin sur mer ne seront pas gênés par le bruit des éoliennes. En revanche, les habitants de la ferme qui se trouve juste au pied des éoliennes seront probablement gênés. C'est la raison pour laquelle on n'aurait pas le droit d'implanter une éolienne si près d'une habitation : en France, on n'a pas le droit d'implanter une éolienne à moins de 500m d'une habitation, au Danemark et en Suède, la limite est de 300m.

### 3.2.2.4. Production annuelle du parc

(voir annexe 4)

Le calcul de la production du parc est très important lorsqu'on décide d'implanter des éoliennes. Grâce à la connaissance du type d'éolienne (et donc de sa courbe de puissance, de sa puissance nominale, etc...), mais aussi des données de vent (comme la distribution de Weibull, ou encore la vitesse moyenne du vent ; le logiciel Windpro calcule le productible annuel en mégawatts (MW) pour chacune des éoliennes :

Terrain	Type d'éolienne		Type-générateur	Puissance nominale	Diamètre rotor	Hauteur du moyeu	Courbe de puissance standard		Productible annuel		Parc	
	Valable	Fabricant					Source	Nom	Résultat	Résultat-10,0%	Rendement	V moy. du vent
1 A	Non	ENERCON	E-66/18.70-1 800	1 800	70,0	65,0	EMD	Level 0 - guaranteed - - 04-2003	4 475,6	4 028	98,5	7,0
2 A	Non	ENERCON	E-66/18.70-1 800	1 800	70,0	65,0	EMD	Level 0 - guaranteed - - 04-2003	4 352,2	3 917	95,8	7,0

Figure 13 : productible annuel pour chacune des éoliennes

Grâce à ces résultats, Windpro calcule alors la production annuelle pour l'ensemble du parc :

Combinaison d'éolienne	Productible annuel		Rendement	Production moyenne	Taux d'utilisation pour	
	Résultat	Résultat-10,0%			Résultat	Résultat-10,0%
Parc éolien	8 827,8	7 945,0	97,1	4 413,9	28,0	25,2

Figure 14 : production d'énergie annuelle du parc

Nous pouvons ici constater que nos deux éoliennes produiront entre 8827,8 MWh et 7945,0 MWh en une année, avec un rendement de 97,1%.

### 3.2.2.5. Photomontage

Enfin, afin d'avoir une idée concrète de notre projet, nous avons réalisé des photomontages, grâce à une fonctionnalité de Windpro. Tout d'abord, nous nous sommes rendus sur le site afin de prendre des photos sous différents angles. Pour chacune des photos, nous avons alors rentré les coordonnées de l'endroit d'où la photo a été prise, mais aussi l'angle auquel la photo a été prise. Le logiciel se charge ensuite de positionner les éoliennes, mais il faut souvent faire quelques retouches pour ne pas avoir des éoliennes qui paraissent soit trop grandes soit trop petites, ou encore qui ne touches pas le sol. Voici les trois photos que nous avons obtenues :





**Figure 15: photomontage à partir de Saint Aubin sur Mer**



**Figure 16: photomontage à partir de Sotteville sur Mer**



**Figure 17: photomontage à partir de la D68**

Nous avons ainsi effectué le dimensionnement d'une installation éolienne, du choix du site aux calculs de production. Mais dans la deuxième partie de notre projet, nous nous sommes aussi intéressés au fonctionnement d'une éolienne, et plus précisément à ses pales

### 3.3. Solidworks

#### 3.3.1. Préambule

Dans cette partie de notre projet, nous avons essayé de retrouver la courbe de puissance d'une éolienne à partir de nos propres calculs.

Tout d'abord il est nécessaire de savoir ce qu'est une courbe de puissance. Elle représente la variation de la puissance d'une éolienne en fonction de la vitesse du vent. Chaque éolienne a sa propre courbe de puissance. Cependant, on remarque que toutes les courbes ont la même allure.

Décrivons les différentes parties de cette courbe typique :

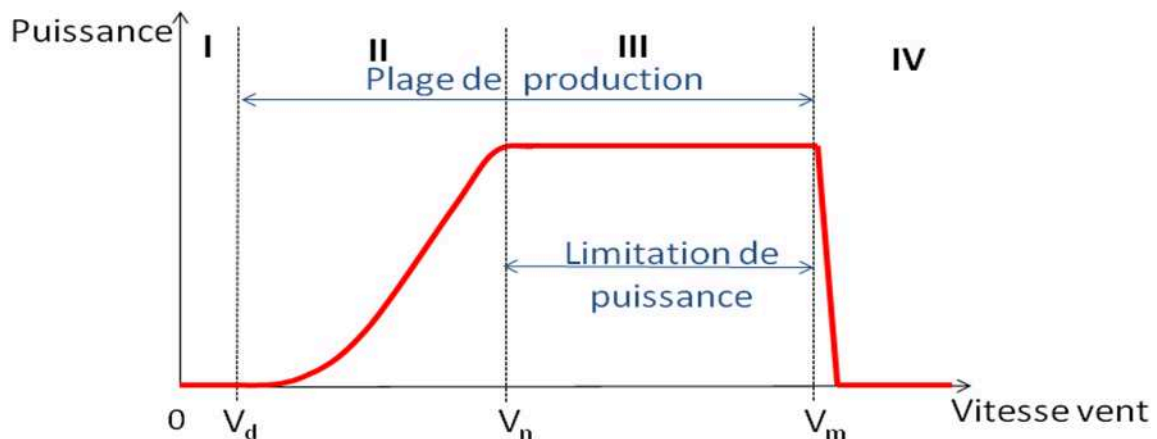


Figure 18 : Courbe de puissance théorique

Partie I (de 0 à  $V_d$ ): Le vent a une vitesse trop faible. Les pâles de l'éolienne peuvent tourner mais la puissance à capter est trop faible.  $V_d$ , la vitesse de démarrage, est de l'ordre de 3 m/s.

Partie II (de  $V_d$  à  $V_n$ ): Les pâles accélèrent progressivement et par conséquent la puissance augmente. Elle atteint son maximum vers 15 m/s qui est sa vitesse nominale  $V_n$ . Cette partie correspond au fonctionnement à charge partielle.

Partie III (de  $V_n$  à  $V_m$ ): La puissance reste constante dans le but de protéger l'éolienne. En effet, la vitesse de rotation des pâles est volontairement limitée par ce qu'on appelle le système pitch. Cet effet consiste à tourner les pâles de quelques degrés afin de limiter la force qui entraîne les pâles de l'éolienne. Cette partie correspond au fonctionnement à pleine charge.

Partie IV ( $> V_m$ ): la puissance devient nulle suite à l'arrêt de l'éolienne. La vitesse maximale  $V_m$  est de l'ordre de 25 m/s. Un vent supérieur à cette vitesse peut détériorer l'éolienne.

Maintenant que nous avons expliqué ce qu'est une courbe de puissance, nous allons essayer d'en retrouver une à l'aide de calculs réalisés grâce à SolidWorks. Pour cela, il nous faudra trouver les angles de pitch.



### 3.3.2. Les travaux sur SolidWorks

#### 3.3.2.1. Création d'une portion d'aile

Comme nous l'avons vu dans la première partie, une approche simplificatrice consiste à dire qu'une pale d'éolienne ressemble et se comporte comme une aile d'avion. Nous avons donc créé un profil d'aile d'avion de la manière suivante :

1<sup>ère</sup> étape : Nous avons récupéré dans le programme JavaFoil 60 points caractérisant le contour d'une section droite d'une aile d'avion. Nous avons choisi une aile Joukovsky. Nous avons multiplié les coordonnées des points, donnés par JavaFoil, par 10000 afin d'avoir la bonne taille en millimètres dans SolidWorks. De plus, il était nécessaire de faire la section droite de l'aile en deux fois : d'un côté les points qui ont formé la courbe du dessus et de l'autre ceux qui ont formé la courbe du dessous (voir les tableaux en annexe 6). Ce qui nous a donné la forme ci-dessous dans SolidWorks :



Figure 19 : Section d'une pale d'éolienne

2<sup>ème</sup> étape : Dans un plan parallèle, nous avons fait une même section réduite de manière proportionnelle. Nous l'avons placée à une distance d'environ 2,6 mètres de l'autre section.

3<sup>ème</sup> étape : Nous avons relié ces deux sections pour obtenir le volume suivant :

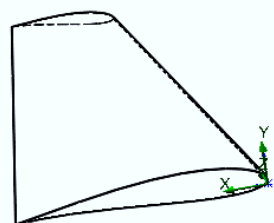
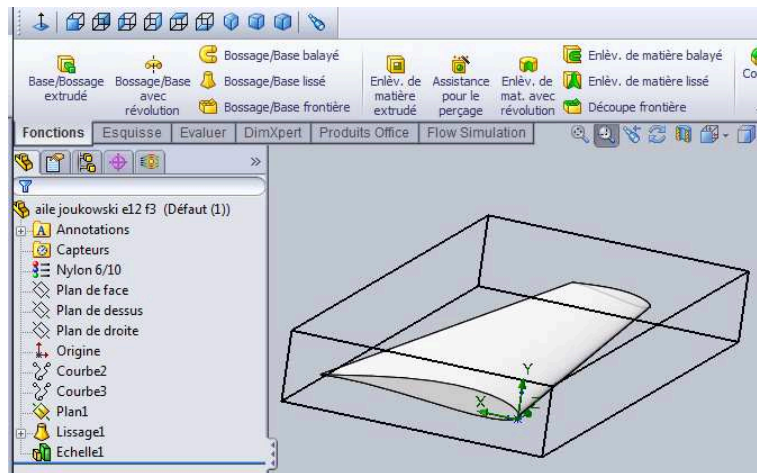


Figure 20 : Portion de pale d'éolienne

4<sup>ème</sup> étape : Nous avons rempli ce volume par le plastique couramment utilisé pour les avions, nommé Nylon 6/10 sur SolidWorks. Les pâles d'éoliennes sont normalement constituées de matériaux composites c'est-à-dire des fibres de verre imprégnées de résines polyester ou époxyde. Cependant, comme on ne considère pas l'effet de la gravitation, nous voulions utiliser n'importe quel matériau qui ne se déforme pas. Dans notre cas, nous avons choisi le Nylon 6/10.



**Figure 21 : Portion de pâle d'éolienne remplie de Nylon 6/10**

Ainsi, nous avons réalisé notre portion d'aile de Joukovski. Nous avons choisi de restreindre notre étude à une portion d'aile dans le but de limiter les temps de calculs sur SolidWorks. A ce niveau, on peut noter qu'il faudra multiplier les résultats finaux par un coefficient afin d'obtenir les résultats sur l'aile entière.

### 3.3.2.2. *Calculs à réaliser*

Une fois ce dessin terminé, nous pouvons utiliser les divers modules mis à disposition par SolidWorks. Dans notre cas, nous voulons simuler les forces exercées sur la pâle pour différentes vitesses de vent.

Comme nous l'avons vu dans la première partie, la force résultante de l'action du vent sur la pâle est la résultante aérodynamique. Cette force se décompose en trainée et en portance. Nous voulons donc calculer ces deux composantes pour différentes vitesses de vent.

De plus, la puissance fournie par la pâle peut être obtenue par la formule suivante :

$$P = C \cdot \Omega$$

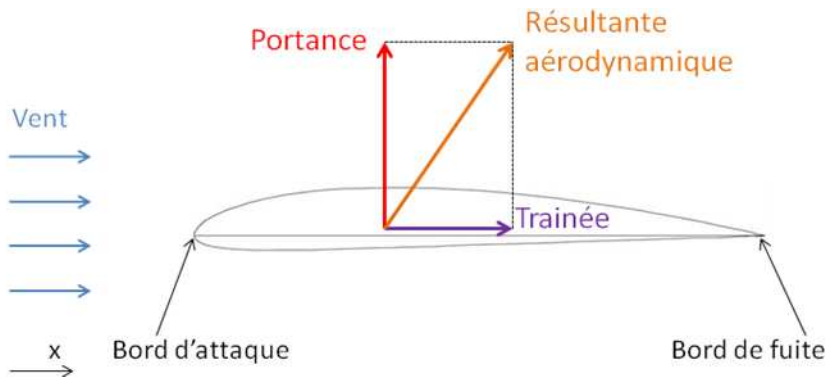
où C correspond au couple qui assure la rotation des pâles de l'éolienne et  $\Omega$  à la vitesse nominale de rotation angulaire de l'éolienne (pour une grande éolienne  $\Omega \approx 23$  tours/min = 2,4 rad/s). Nous voulons donc aussi calculer le couple de la portance pour différentes vitesses de vent.

Ainsi, on choisit l'utilitaire de SolidWorks qui se nomme FlowWorks. Ce dernier permet de calculer les composantes de trainée, de portance et le couple pour divers vitesses et angle de vent.

### 3.3.2.3. *Utilisation de FlowWorks*

Grâce à ces calculs, nous cherchons à obtenir une courbe de puissance d'une éolienne. En effet, nous allons faire attaquer des vents différents en vitesse et en direction. Pour simuler le système de pitch, nous allons orienter le vent avec divers angles au lieu de tourner la pâle, ce qui revient aux mêmes calculs. Sur SolidWorks, nous avons effectivement trouvé que c'était plus simple.

Comme nous l'avons vu dans le préambule de cette partie, jusqu'à la vitesse nominale, il n'y a pas de système pitch pour réguler la puissance. Nous avons donc fait attaquer un vent horizontal sans angle d'incidence (c'est-à-dire seulement selon l'axe 0x). Nous l'avons schématisé ci-dessous :



**Figure 22 : Schéma des forces dues au vent horizontal sur la pôle**

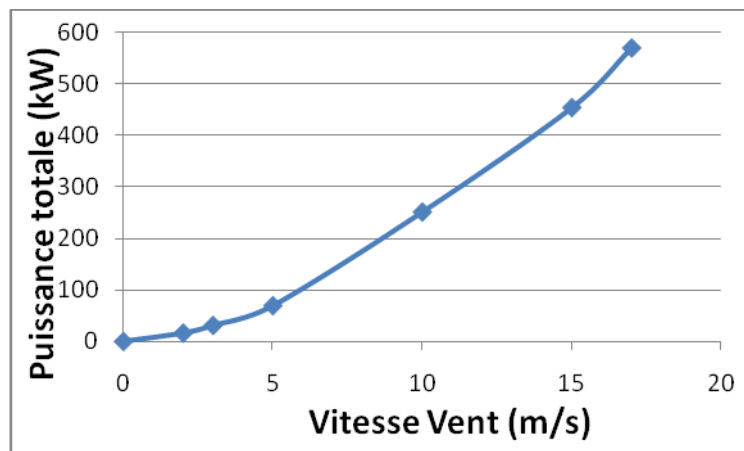
Remarque : Lors de nos calculs, nous avons considéré une vitesse nominale d'environ 17 m/s.

Nous obtenons les résultats de couple que nous avons résumés sous forme d'un tableau mis en annexe 7.

Dans le tableau en annexe, la colonne nommée *Puissance Portion* (notée  $P_p$ ) correspond à la puissance fournie par notre portion d'aile. Nous l'avons calculée en utilisant la formule

$P_p = C \cdot \Omega$  où C correspond à la colonne de notre tableau notée *Couple assurant la rotation*

(en  $kN.m$ ) et où  $\Omega$  égal à 23 tours/min soit 2,4 rad/s (ce qui correspond à une vitesse nominale de rotation angulaire d'une éolienne de grande taille). Ensuite nous l'avons multiplié par le nombre de Reynolds afin d'avoir la puissance fournie par toute la pôle (notée  $P_e$ ). Dans notre cas la pôle mesure environ 23 mètres, ce qui correspond à une éolienne ayant un rotor placé à une hauteur d'une quarantaine de mètres. Enfin, nous avons multiplié ce dernier résultat par 3 pour obtenir la puissance fournie par trois pôle, c'est-à-dire la puissance totale fournie par l'éolienne (notée  $P_t$ ). Nous avons pu tracer la puissance en fonction de la vitesse du vent :



**Figure 23: Partie I et II de la courbe de puissance**

Nous avons donc réalisé le début de notre courbe de puissance à savoir ce qu'on a nommé les parties I et II. La courbe coïncide plutôt bien avec la courbe de puissance présente dans le préambule de ce chapitre sauf la vitesse de démarrage qui semble plus faible ici. Ceci peut s'expliquer par le fait que nous avons pris un cas idéal. En réalité, pour des vitesses faibles, les pâles ont du mal à se mettre en rotation à cause de ce qu'on nomme le couple résistant. De plus, lorsque les pâles commencent à tourner, la puissance est trop faible pour être récupérée. Or dans notre cas, nous avons fait comme s'il n'y avait pas de résistance et comme si nous pouvions récupérer de l'énergie d'un mouvement très lent.

Pour réaliser la suite de la courbe de puissance (partie III), nous avons dû simuler le système pitch. Pour cela, nous avons créé les composantes de la vitesse selon Oy et Ox afin que FlowWorks projette le vent avec l'angle d'incidence souhaité.

Ainsi :  $V_x = V * (\cos \alpha)$  et  $V_y = V * (\sin \alpha)$

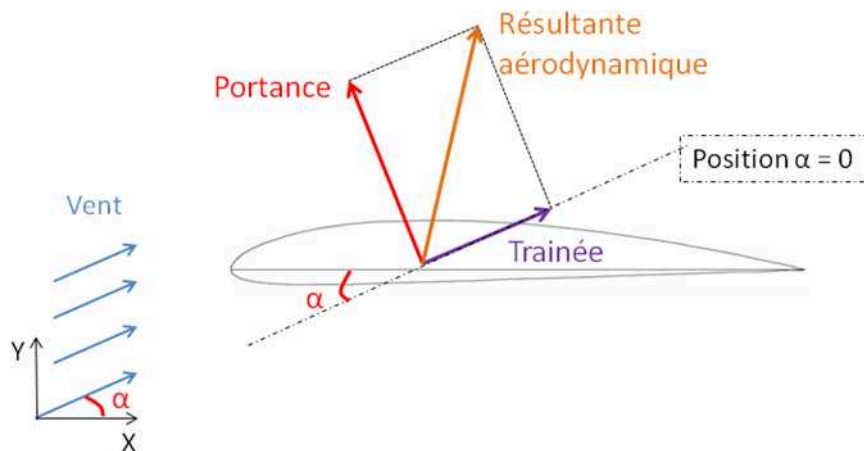


Figure 24: Schéma des forces dues au vent incliné sur la pale

Comme nous pouvons le voir sur le schéma, nous avons donné un angle  $\alpha$  au vent mais en réalité c'est la pale qui tourne d'un angle  $\alpha$ .

Cette partie fut délicate car nous ne savions pas exactement la valeur des angles à donner pour chaque vitesse. Nous savions seulement que l'angle variait de 0 à 7-8° pour des vitesses allant de 17 à 25 m/s. Nous avons donc fait beaucoup de calculs sur SolidWorks afin de déterminer les angles pour certaines vitesses de vent (19 m/s, 21 m/s, 23 m/s et enfin 25 m/s). Nous avons réussi à obtenir le tracé de la courbe de puissance suivante:

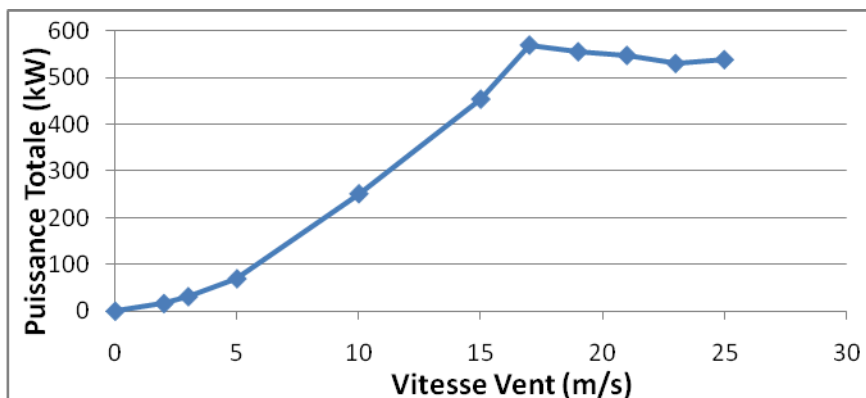


Figure 25 : Partie I, II et III de la courbe de puissance

Nous avons bien remarqué que globalement plus la vitesse augmentait, plus l'angle d'incidence devait être important pour maintenir la puissance constante. En effet, dans notre cas, pour avoir ce plateau, nous avons les angles suivant :

V = 17 m/s: 0°

V = 21 m/s: 3,5°

V = 25 m/s: 6,5°

V = 19 m/s: 3°

V = 23 m/s: 6,35°

### 3.3.2.1. Comparaison avec la théorie

Nous avons cherché sur Internet la courbe de puissance d'une éolienne de 40 mètres de hauteur afin de la comparer avec notre courbe. Nous avons trouvé la courbe suivante :

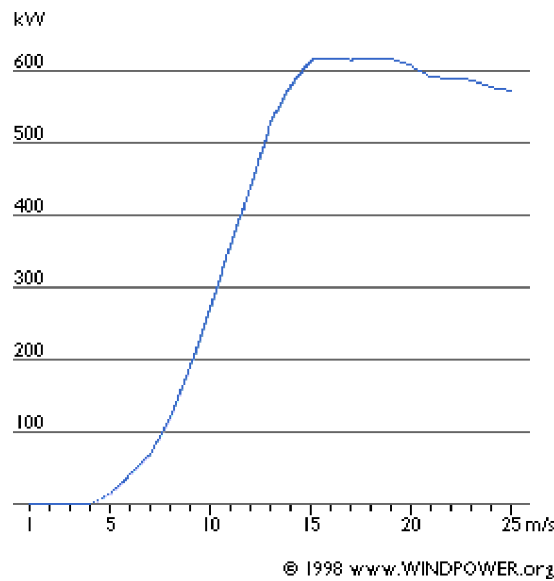


Figure 26 : Courbe théorique de la puissance d'une éolienne

Cette courbe montre une puissance maximale d'environ 600 kW, ce qui correspond assez bien avec ce que nous avons trouvé c'est-à-dire 590 kW.

#### Limites et propositions pour dépasser ces limites :

De manière générale, nous sommes satisfaits de nos résultats, notamment celui de la puissance maximale de l'éolienne modélisée. Cependant, les angles du pitch semblent un peu faussés. Ils sont bien dans l'intervalle prévu c'est-à-dire entre 0 et 7-8° pour des vitesses de vent de 17 à 25m/s. Cependant, les angles varient parfois beaucoup et parfois peu.

Afin d'améliorer notre modélisation, nous pensons qu'il faudrait faire le dessin de la pale petit à petit sur Solidworks ainsi que les calculs. Nous avons modélisé une pale d'éolienne par une pale d'avion droite (sans vrillage) alors qu'une vraie pale d'éolienne se vrille petit à petit

#### 4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

En conclusion de ce projet, nous pouvons dire que, pour chaque sous-projet, nous avons atteint nos objectifs. Nous avons en effet créé une installation éolienne et effectué différents calculs tels que la puissance, le bruit, ainsi qu'un photomontage. Pour le second projet, nous sommes parvenus à nous rapprocher de la courbe de puissance d'une éolienne, grâce la modalisation d'une pale sous Solidworks, et de séries de calculs grâce au module de Solidworks, Flow Simulation. Enfin, nous avons du prendre en main les outils professionnels mis à notre disposition, ce qui n'a pas été le plus facile.

Plusieurs aspects de ce projet ont été très intéressants pour nous :

- L'apprentissage du travail en groupe multiculturel, ce qui pose régulièrement des problèmes de compréhension, et demande une organisation particulière.
- L'utilisation de logiciels professionnels, et ainsi la connaissance de ces outils informatiques particuliers.
- Pour la plupart, nous ne connaissions pas vraiment l'énergie éolienne en dehors des éoliennes que l'on voit un peu partout. Cela a donc été l'occasion d'en apprendre beaucoup plus sur cette énergie renouvelable en pleine expansion.

Nous pouvons donc dire que ce projet a été bénéfique à tous tant sur le plan de l'acquisition de connaissances que sur le plan humain.

C'est pourquoi nous aimerions proposer des perspectives afin d'améliorer ce projet, pour que d'autres puissent en profiter. Nous pensons notamment à la partie concernant Solidworks : notre pale était constituée de deux profils Joukovsky reliés. Pour de meilleurs résultats, il serait intéressant d'utiliser un plus grand nombre de profils et de les relier. Concernant la première partie du projet, plusieurs variantes sont possibles, comme créer un grand parc, implanter des éoliennes off-shore, ou encore utiliser Wasp comme utilitaire de calcul.



## 5. BIBLIOGRAPHIE

### Source pour introduction :

- [http://colleges.ac-rouen.fr/prfenelon/article.php3?id\\_article=306](http://colleges.ac-rouen.fr/prfenelon/article.php3?id_article=306) (valide à la date du 18/06/2009)
- <http://www.windpower.org/composite-8.htm> (valide à la date du 18/06/2009)

### Source WindPro :

- <http://www.cr-limousin.fr/IMG/pdf/fiche8.pdf> (valide à la date du 18/06/2009)

### Source SolidWorks :

- <http://www.windpower.org/composite-8.htm> (valide à la date du 18/06/2009)

\*\*\*\*\*

### Illustrations :

Image couverture : [lasoeurkaramazov.net/.../champ\\_eoliennes.jpg](http://lasoeurkaramazov.net/.../champ_eoliennes.jpg)

Figure 1 : [http://www.msmelectric.com/mediac/400\\_0/media/Carte\\_vents\\_de\\_la\\_France.JPG](http://www.msmelectric.com/mediac/400_0/media/Carte_vents_de_la_France.JPG)

Figure 3 : <http://eedd.lecrivainpublic.net/galerie/3.png>

Figure 5 : <http://www.cres.gr/windrose/joomla/images/weibull.png>

Figure 6 : <http://www.windpower.org/fr/tour/wres/tube.htm>

Figure 7 : <http://perso.numericable.fr/~flopark/tpe/image/tunnel.gif>

Figure 8 : <http://www.thewindpower.net/fiche-eolienne-171-enercon-e66-2000.php>

Figure 9 : [http://users.swing.be/compagnons-eole/images/divers/e40\\_p.gif](http://users.swing.be/compagnons-eole/images/divers/e40_p.gif)

## 6. ANNEXES

### WindPro :

- 1 : PARK - Analyse des conditions de vent
- 2 : PARK - Analyse courbes de puissance
- 3 : DECIBEL - DynMap3428-253
- 4 : DECIBEL - Résultat principal
- 5 : PARK - Résultat principal sans rugosité

### SolidWorks :

- 6 : Coordonnées des points de la courbe de dessus et la courbe de dessous
- 7 : Résultats qui ont servis à tracer la courbe de puissance



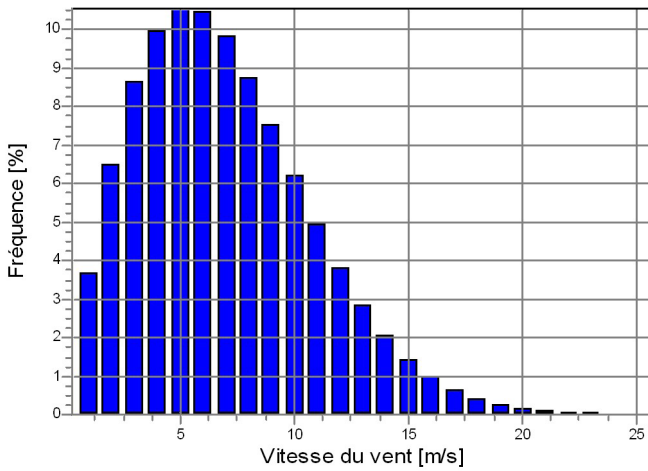
**PARK - Analyse des conditions de vent**

Données du vent:A - NCAR\_BASIC N50.0 E0.0; Hauteur du moyeu: 42,0

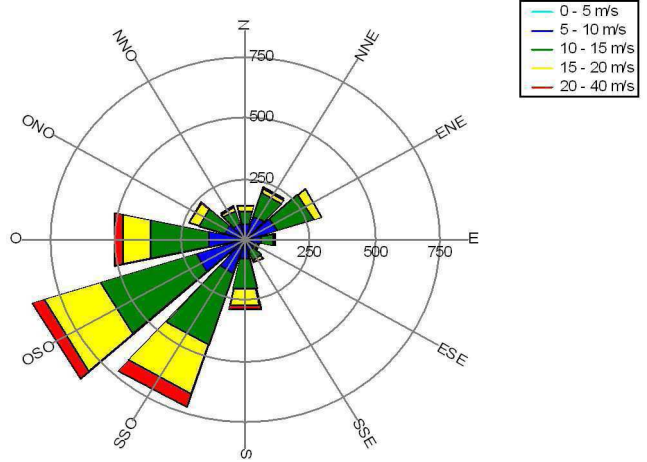
**Données Weibull**

Secteur	Paramètre A	Vitesse du vent	Paramètre k	Fréquence	Exposant du gradient du vent (Hellmann)
	[m/s]	[m/s]		[%]	
0 N	6,59	5,87	1,774	5,9	0,000
1 NNE	7,39	6,54	2,139	8,2	0,000
2 ENE	7,72	6,84	2,164	10,1	0,000
3 E	6,52	5,78	1,979	5,9	0,000
4 ESE	5,87	5,21	1,894	3,8	0,000
5 SSE	6,50	5,78	1,798	4,5	0,000
6 S	8,31	7,37	1,921	6,8	0,000
7 SSO	9,56	8,47	2,109	12,1	0,000
8 OSO	9,27	8,21	2,149	16,0	0,000
9 O	8,20	7,27	1,927	12,4	0,000
10 ONO	7,12	6,33	1,817	7,9	0,000
11 NNO	6,45	5,74	1,778	6,4	0,000
Tout	7,87	6,98	1,905	100,0	

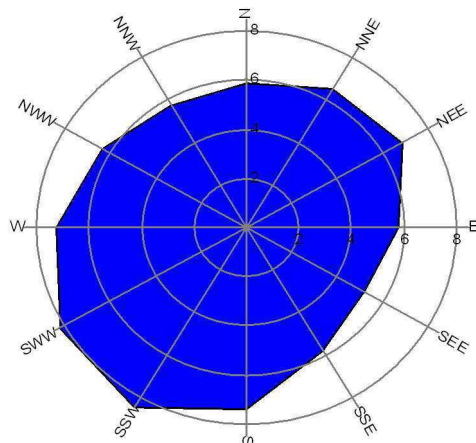
Distribution Weibull



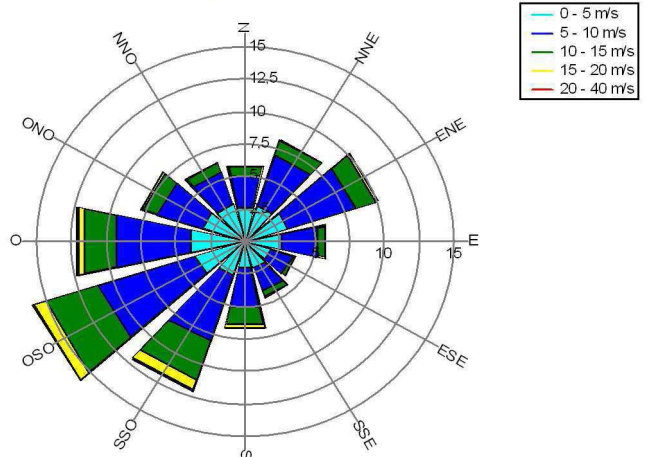
Rose énergétique (kWh/m2/an)



V moy. du vent (m/s)



Fréquence (%)



Projet:  
TP\_MC\_ET5\_GE2A du 23 mars

Imprimé/Page  
23/03/2009 18:25 / 1  
Utilisateur avec licence:  
**TEST VERSION**  
Time-limited until April 15, 2009

Calculé:  
23/03/2009 18:20/2.6.0.235

### PARK - Analyse courbes de puissance

**Eolienne:** 1 - ENERCON E-66/18.70 1800 70.0 !O! Level 0 - guaranteed - - 04-2003, Hauteur du moyeu: 65,0 m

Nom: Level 0 - guaranteed - - 04-2003  
Source : Manufacturer

Origine/date	Auteur	Création	Modification	Vitesse de coupe	Contrôle de puissance	Type de courbe CT
01/04/2003	EMD	13/06/2001	28/06/2005	[m/s] 25,0	Pitch	Défini par l'utilisateur

Calculated by Enercon

### Comparaison courbes HP Note: pour densité d'air standard et Weibull paramètre k = 2

V moy.	[m/s]	5	6	7	8	9	10
Valeur HP	[MWh]	1 796	3 067	4 390	5 766	6 910	7 892
ENERCON E-66/18.70 1800 70.0 !O! moyeu: 65,0 m	[MWh]	1 951	3 214	4 579	5 903	7 096	8 107
Valeur de contrôle	[%]	-8	-5	-4	-2	-3	-3

Comparaison entre les productibles calculés avec les courbes de puissances des fabricants et les courbes de puissance HP (ces courbes simplifiées sont basées sur la puissance du vent kW/m<sup>2</sup> et la surface balayée par le rotor, sur le type de génératrice simple ou double et sur le type de contrôle "Stall" ou "Pitch"). Les pertes dues aux sillages ne sont pas prises en compte. Pour plus de détails, voir l'agence de l'énergie danoise, rapport du projet J.n° 51171/00-0016 (voir aussi chapitre 3.5.2 du manuel WindPRO). La méthode a été affinée dans le rapport EMD "20 Detailed Case Studies comparing Project Design Calculations and actual Energy Productions for Wind Energy Projects worldwide" en janvier 2003. Utilisez le tableau pour estimer si les courbes de puissances indiquées sont valables. Si la valeur de contrôle est en dessous de -5%, la courbe de puissance est éventuellement trop optimiste en raison des incertitudes lors des mesures.

### Courbe de puissance standard

Données du catalogue, densité de l'air: 1,225 kg/m<sup>3</sup>

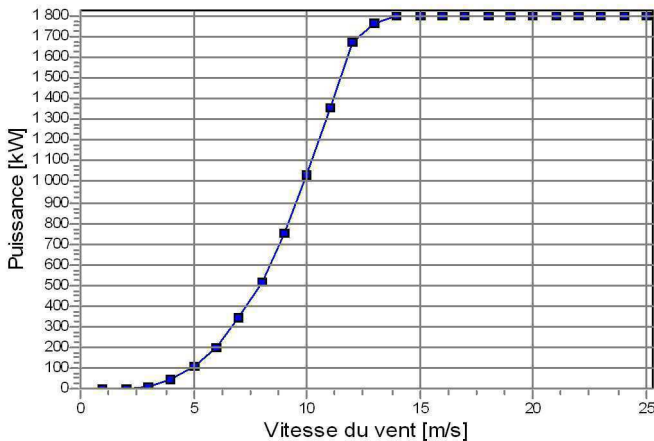
Vitesse du vent [m/s]	Puissance [kW]	Ce	Vitesse du vent [m/s]	Ct
1,0	0,0	0,00	1,0	0,00
2,0	0,0	0,00	2,0	0,00
3,0	7,5	0,12	3,0	0,94
4,0	48,0	0,32	4,0	0,92
5,0	104,0	0,35	5,0	0,86
6,0	200,0	0,39	6,0	0,83
7,0	340,0	0,42	7,0	0,81
8,0	515,0	0,43	8,0	0,79
9,0	748,0	0,44	9,0	0,76
10,0	1 025,0	0,43	10,0	0,75
11,0	1 348,0	0,43	11,0	0,73
12,0	1 670,0	0,41	12,0	0,71
13,0	1 760,0	0,34	13,0	0,51
14,0	1 800,0	0,27	14,0	0,38
15,0	1 800,0	0,22	15,0	0,30
16,0	1 800,0	0,18	16,0	0,25
17,0	1 800,0	0,15	17,0	0,20
18,0	1 800,0	0,13	18,0	0,17
19,0	1 800,0	0,11	19,0	0,15
20,0	1 800,0	0,09	20,0	0,13
21,0	1 800,0	0,08	21,0	0,11
22,0	1 800,0	0,07	22,0	0,10
23,0	1 800,0	0,06	23,0	0,09
24,0	1 800,0	0,05	24,0	0,08
25,0	1 800,0	0,05	25,0	0,07

### Courbe de puissance corrigée

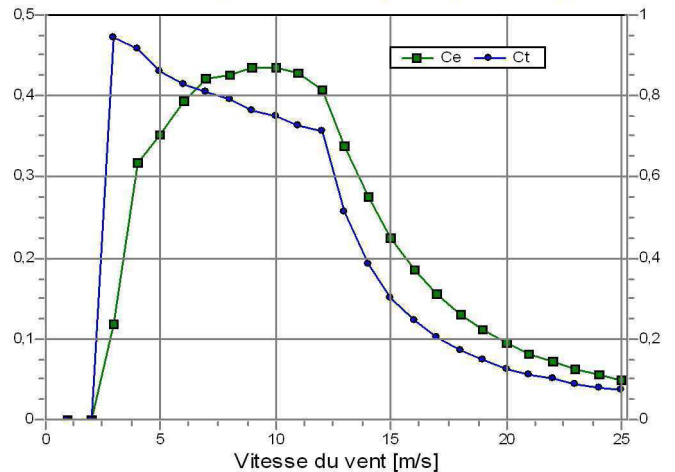
Données utilisées dans le calcul, densité de l'air: 1,235 kg/m<sup>3</sup>

Vitesse du vent [m/s]	Puissance [kW]	Ce	Intervalle [m/s]	Energie [MWh]	Cumul [MWh]	Relatif [%]
1,0	0,0	0,00	0,50-1,50	0,0	0,0	0,0
2,0	0,0	0,00	1,50-2,50	1,2	1,2	0,0
3,0	7,6	0,12	2,50-3,50	12,5	13,6	0,3
4,0	48,4	0,32	3,50-4,50	47,2	60,9	1,3
5,0	104,9	0,35	4,50-5,50	111,7	172,5	3,8
6,0	201,7	0,39	5,50-6,50	207,4	379,9	8,4
7,0	342,8	0,42	6,50-7,50	323,1	703,0	15,5
8,0	519,3	0,43	7,50-8,50	436,9	1 139,9	25,1
9,0	754,1	0,44	8,50-9,50	529,6	1 669,4	36,8
10,0	1 031,7	0,43	9,50-10,50	583,0	2 252,4	49,7
11,0	1 354,6	0,43	10,50-11,50	585,2	2 837,6	62,6
12,0	1 675,5	0,41	11,50-12,50	521,5	3 359,1	74,1
13,0	1 762,9	0,34	12,50-13,50	405,1	3 764,1	83,0
14,0	1 800,0	0,28	13,50-14,50	285,2	4 049,3	89,3
15,0	1 800,0	0,22	14,50-15,50	190,0	4 239,3	93,5
16,0	1 800,0	0,18	15,50-16,50	121,5	4 360,7	96,2
17,0	1 800,0	0,15	16,50-17,50	74,9	4 435,7	97,8
18,0	1 800,0	0,13	17,50-18,50	44,6	4 480,3	98,8
19,0	1 800,0	0,11	18,50-19,50	25,6	4 505,9	99,4
20,0	1 800,0	0,09	19,50-20,50	14,1	4 520,0	99,7
21,0	1 800,0	0,08	20,50-21,50	7,5	4 527,5	99,8
22,0	1 800,0	0,07	21,50-22,50	3,8	4 531,4	99,9
23,0	1 800,0	0,06	22,50-23,50	1,9	4 533,3	100,0
24,0	1 800,0	0,05	23,50-24,50	0,9	4 534,2	100,0
25,0	1 800,0	0,05	24,50-25,50	0,3	4 534,4	100,0

Courbe de puissance standard  
Données utilisées dans le calcul



Courbes Ct (coef. de traînée) et Ce (rendement)



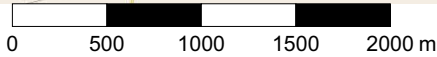
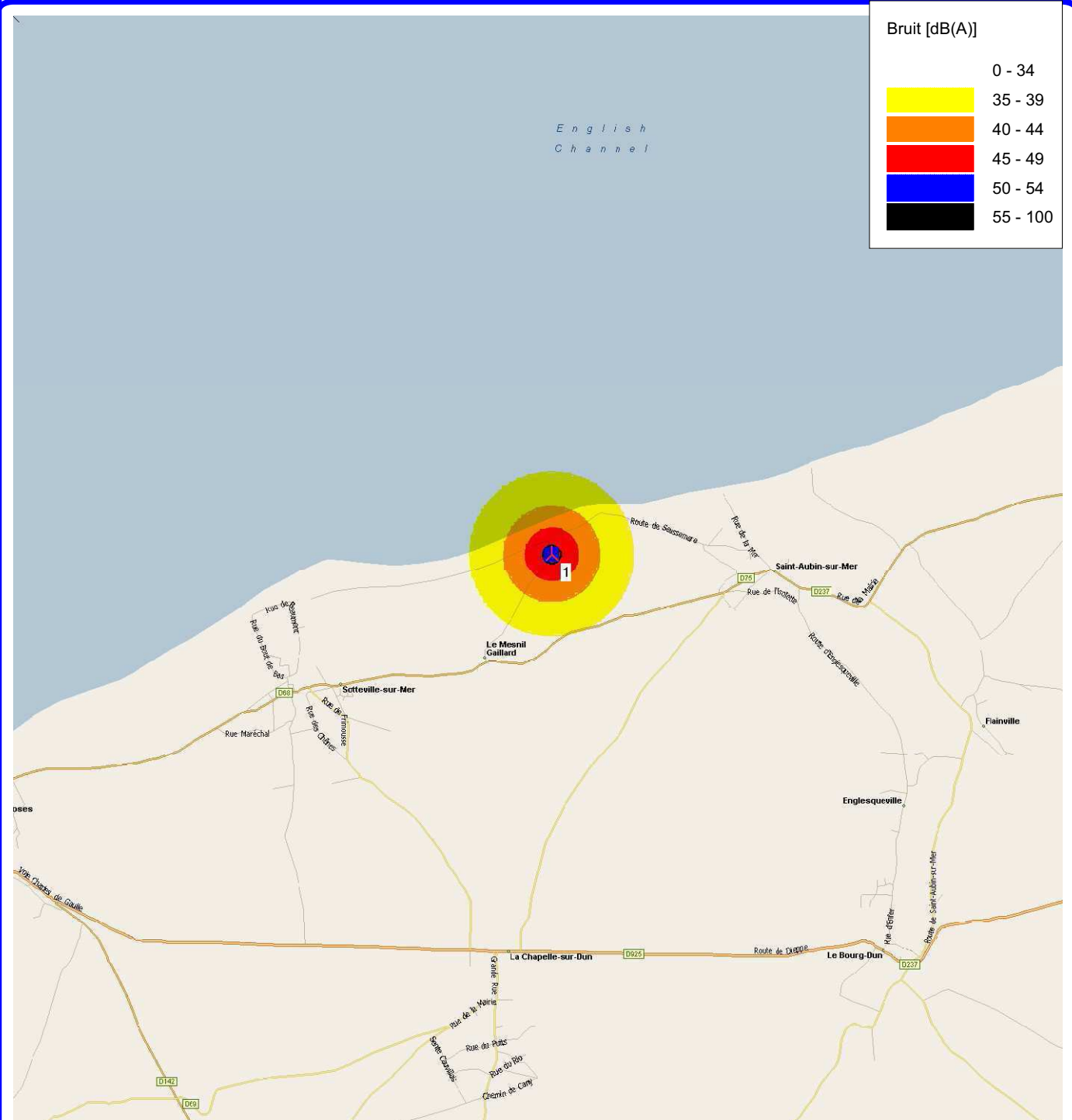
Projet:  
TP\_MC\_ET5

Imprimé/Page  
20/03/2009 16:27 / 1  
Utilisateur avec licence:  
**TEST VERSION**  
Time-limited until April 15, 2009

Calculé:  
20/03/2009 16:23/2.6.0.235

**DECIBEL - DynMap3428-253**

Fichier: DynMap3428-253.bmi



Carte: WindPRO map , Echelle d'impression 1:40 000, Centre de la carte UTM ED50 Zone : 31 Est: 345 997 Nord: 5 528 814  
Modèle de calcul de bruit: ISO 9613-2 France . Vitesse du vent: 6,9 m/s

Nouvelle éolienne

Hauteur au-dessus de la mer de l'objet courbe actif

35,0 dB(A)    
 40,0 dB(A)    
 45,0 dB(A)    
 50,0 dB(A)    
 55,0 dB(A)

Projet:  
TP\_MC\_ET5

Imprimé/Page  
20/03/2009 16:29 / 1  
Utilisateur avec licence:  
**TEST VERSION**  
Time-limited until April 15, 2009

Calculé:  
20/03/2009 16:23/2.6.0.235

## DECIBEL - Résultat principal

### Modèle de calcul de bruit:

ISO 9613-2 France

### Vitesse du vent:

6,9 m/s

### Distribution spectrale:

De 125,0 Hz à 4 000,0 Hz

### Atténuation du sol:

Aucune

### Coefficient Météorologique, C0:

0,0 dB

### Type de contrainte utilisée dans le calcul:

2:L'émergence due aux éol. est comparé à l'émergence réglementaire (FF

### Expression de la puissance de la source acoustique utilisée dans les calcul:

Toutes les valeurs sont exprimées en Lwa

### Tons isolés:

En augmentant la contrainte de la valeur de la pénalité indiqué ci-contre: 0

### Hauteur au-dessus du sol, en l'absence de valeur dans l'objet bruit.:

5,0 m Interdire de substituer la hauteur définie dans le modèle par celle de

### Modification de la contrainte "officielle": plus restrictive si la valeur es

< 0, moins restrictive si > 0:

0,0 dB(A)



Nouvelle éolienne

Echelle 1:25 000

## Eoliennes

UTM ED50 Zone : 31 Est	Nord	Z	Description	Type d'éolienne		Puissance nominale [kW]	Diamètre du rotor [m]	Hauteur du moyeu [m]	Données de bruit		Vitesse du vent [m/s]	Etat	Hauteur du moyeu [m]	réf.lwA [dB(A)]	Tons isolés	Bande d'octaves
				Valable	Fabricant				Type-générateur	Source						
1	345 997 5 528 814	[m]	40,0 ENERCON E-66/1..Non	ENERCON	E-66/18.70-1 800 1 800	70,0	65,0	EMD	Level 0 - guaranteed	-- 07-2003	6,9	Extrapolé	65,0	99,9	Non	Générique *)

\*)Note: une ou plusieurs des données de bruit sont génériques ou entrées par l'utilisateur

## Résultats du calcul

\*)Emergence spectrale: voir les résultats dans la page "Résultats détaillés"

## Distances (m)

Eolienne  
1

Projet:

**Projet Saussemare du 23 mars**

Imprimé/Page

11/04/2009 10:18 / 1

Utilisateur avec licence:

**TEST VERSION**

Time-limited until April 15, 2009

Calculé:

11/04/2009 10:15/2.6.0.235

## PARK - Résultat principal

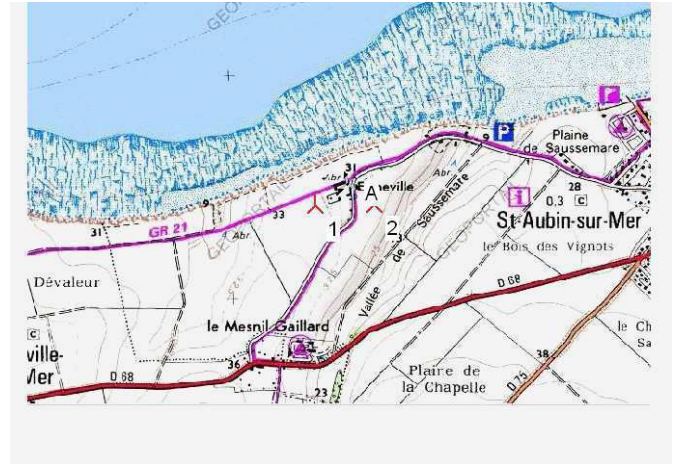
**Modèle de sillage** N.O. Jensen (RISØ/EMD)

**Configuration des calculs**

Calcul de la densité de l'air Individuellement pour chaque éolienne  
 Densité de l'air à hauteur de moyeu 1,240 kg/m3  
 Altitude du moyeu: 65,0 m  
 Tp° annuelle moy à hauteur de moyeu 9,3 °C  
 Pression à l'emplacement des éol. 1 005,3 hPa

**Paramètres modèle de sillage**

Constante d'effet de sillage 0,075



Echelle 1:32 000  
 Nouvelle éolienne Objet Météo

### Emplacement des éoliennes

UTM ED50 Zone : 31

	Est	Nord	Z	Description
	UTM ED50 Zone : 31		[m]	
1 Nouvelle	345 811	5 528 809	0,0	90,0°, 250,0 m
2 Nouvelle	346 062	5 528 801	0,0	

### Valeurs à hauteur de 50,0 m au-dessus du sol

**Terrain** UTM ED50 Zone : 31

Est	Nord	Nom de la distribution du vent	Type	Energie du vent	V moy. du vent
			[m]	[kWh/m2]	[m/s]
A	345 950	5 528 900	NCAR_BASIC_N50.0_E0.0	42,0 WEIBULL	3 584 7,0

### Calcul production d'énergie annuelle du parc

Combinaison d'éolienne	Productible annuel		Parc	Production moyenne	Taux d'utilisation pour	
	Résultat [MWh]	Résultat-10,0% [MWh]			Rendement [%]	Résultat [%]
Parc éolien	8 827,8	7 945,0	97,1	4 413,9	28,0	25,2

### Productible annuel pour chaque 2 de nouvelles éoliennes avec un total 3,6 MW de la puissance nominale

Terrain	Type d'éolienne		Type-générateur	Puissance nominale	Diamètre rotor	Hauteur du moyeu	Courbe de puissance standard		Productible annuel		Parc	
	Valable	Fabricant					Source	Nom	Résultat [MWh]	Résultat-10,0% [MWh]	Rendement [%]	V moy. du vent [m/s]
1 A	Non	ENERCON	E-66/18.70-1 800	1 800	70,0	65,0	EMD	Level 0 - guaranteed -- 04-2003	4 475,6	4 028	98,5	7,0
2 A	Non	ENERCON	E-66/18.70-1 800	1 800	70,0	65,0	EMD	Level 0 - guaranteed -- 04-2003	4 352,2	3 917	95,8	7,0

## Annexe 6

Courbe du dessus		
X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
10000	136	0
9978	140	0
9911	151	0
9797	170	0
9638	198	0
9432	234	0
9181	280	0
8885	334	0
8547	397	0
8169	466	0
7751	541	0
7299	619	0
6814	698	0
6302	775	0
5768	847	0
5217	910	0
4657	962	0
4094	1000	0
3536	1020	0
2992	1022	0
2470	1004	0
1980	965	0
1529	907	0
1125	830	0
776	739	0
487	636	0
263	525	0
106	411	0
18	297	0
0	189	0

Courbe du dessous		
X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
0	189	0
48	89	0
161	0	0
334	-73	0
564	-133	0
845	-176	0
1172	-203	0
1539	-215	0
1939	-214	0
2368	-200	0
2820	-177	0
3290	-145	0
3772	-108	0
4261	-67	0
4752	-26	0
5242	15	0
5726	54	0
6199	90	0
6659	121	0
7101	146	0
7522	166	0
7919	179	0
8289	187	0
8628	190	0
8935	187	0
9208	181	0
9639	162	0
9794	152	0
9975	138	0
10000	136	0

