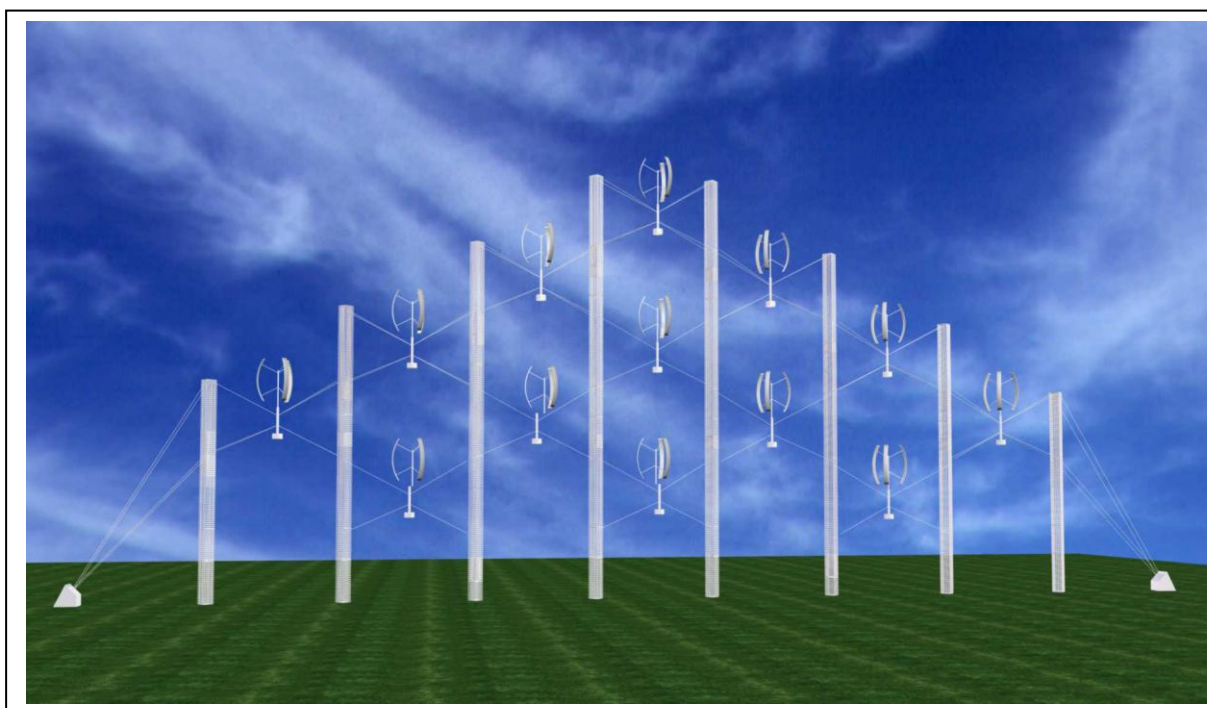


# Proposition d'un concept de mur éolien

- DEUXIEME PARTIE -



## Etudiants

Léonard Louise

## Encadreurs

Mme Nadia Hoyet  
Mme Manuela Sechilariu  
M. Loïc Couton

**DESS Matériaux pour l'architecture**  
**2003 / 2004**

Suite du travail « L'ENERGIE EOLIENNE & LA VILLE »

En remerciant,

- Monsieur Yvon BARBAZON, Ingénieur Industriel, en électromécanique : discussions et corrections des travaux électriques ainsi que des parties concernant la résistance des matériaux.
- Monsieur Bernard DELVILLE, Ingénieur Civil, Responsable, du bureau : « Allons en vent scrl » : correction des toutes les parties concernant l'aérodynamique.
- Monsieur MILOS, Ingénieur Industriel, en mécanique : discussions et détail de l'intérieur de l'arbre fixe (roulement à bille sur rotule) ainsi que du dimensionnement des poutres en treillis articulées.

## Introduction

Les éoliennes actuelles utilisées par l'homme (champs d'éoliennes, éoliennes à arbres horizontales, verticales,...). Rencontre souvent des difficultés d'intégrations, par de nombreux détracteurs qui leur attribuent bien des désagréments : pollution du paysage, bruit excessif, faible productivité, perturbations radioélectriques etc. D'autres au contraire considèrent cette source énergétique comme une opportunité s'inscrivant dans le respect du développement durable ou une alternative au lobby nucléaire, mais plus encore à une disponibilité universelle.

Dans ce cas pourquoi ne voit on pas d'éoliennes à proximités des zones urbaines?  
De telles réalisations ne sont pas courantes.

C'est pourquoi le souhait se porte vers une proposition d'un produit éolien qui puisse se lire en tant qu'architecture semi-urbaine.

C'est ainsi que le développement d'un concept par le dessin à vu le jour avec la collaboration de professionnels. En ayant pour fonction : la production d'énergie électrique ainsi qu'une sensibilisation de l'opinion publique. Etant donné l'intégration en ville d'un tel projet est particulièrement difficile, l'enjeu est d'en faire un lieu d'animation au bord des plages, dont le but est une prise de conscience pour les énergies renouvelables.

## 1. Les nouveaux alternateurs discoïdes

On peut considérer qu'en dessous de 10 kW, la plupart des éoliennes sont de type « direct drive » c'est-à-dire que l'alternateur est en lien direct avec le rotor. Les premières boîtes de vitesses (multiplicateurs) apparaissent pour de puissances supérieures (par ex. : 50 kW), comme chez le fabricant français Vernet.

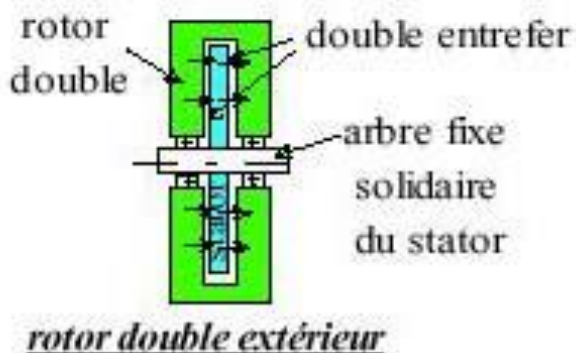
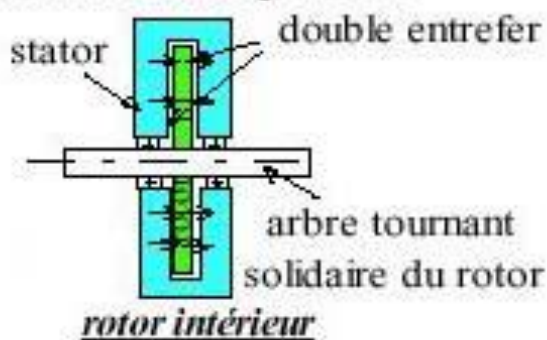
Ces nouvelles éoliennes ne comportent pas de boîtier de vitesses, le rotor entraîne directement une génératrice très particulière possédant de nombreux pôles avec des aimants permanents. Ceci lui permet de produire un courant à 50 Hz, même si la rotation est beaucoup plus lente (50 tours/min) que les générateurs conventionnels (1 500 tours/min.).

### Pourquoi les utiliser

Lorsque l'on souhaite optimiser différemment l'encombrement et la masse. Pour des géométries d'axes courts, la surface d'entrefer active est plus grande que dans les machines cylindriques. L'accroissement du nombre de pôles à le même effet que dans les structures cylindriques et se traduit ici par une diminution de la longueur, le volume étant parfaitement occupé contrairement aux structures cylindriques qui deviennent creuses. Les structures discoïdes donnent également la possibilité de la modularité, le couple peut être accru en disposant sur la même ligne d'arbre de plusieurs modules.

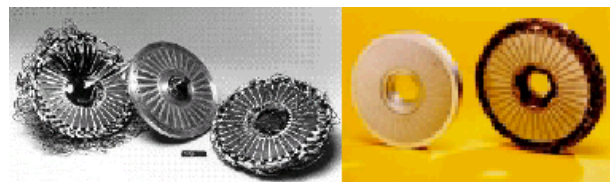
### Exemple de moteurs de type discoïde

#### *discoïde champ axial*



**Figure -4-**

Moteur à aimants à champ axial (Lynx Motion Technology Corp.T468)  
 $T_{\max} = 1350 \text{ N.m}$   $P_{\max} = 35 \text{ kW}$ , 58 kg (27 N.m/kg)



**Figure -5-**

Moteurs asynchrones à champ axial  
(à gauche : Satcon Corp. 26,5 kW à 4500 tr/mn - 67 kg, à droite : Electrodrives Ltd.)

Les alternateurs asynchrones de types discoïdes (développé par la société Jeumont Industrie) sont utilisés dans notre projet.

### Qualités

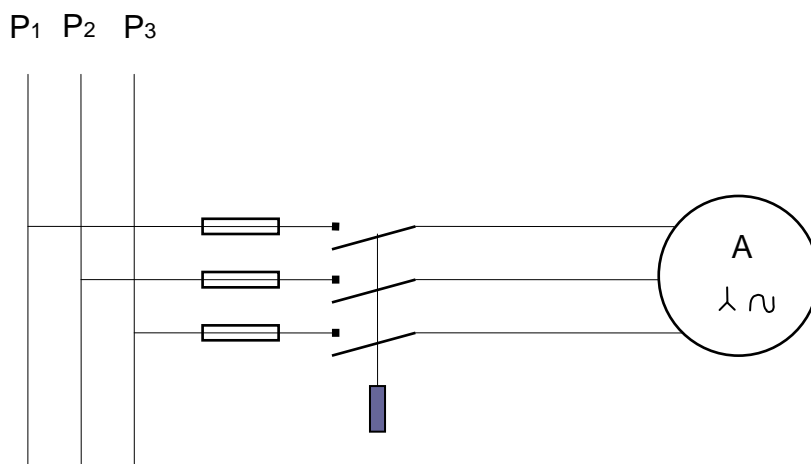
- La configuration développée par ces alternateurs est mieux adaptée pour une production en électricité de faible puissance. A savoir une puissance inférieure à 50 kW.
- La forme discoïde fait disparaître l'arbre de rotation et le volume de la cage moteur diminue considérablement.
- La réductions des pertes, d'où une augmentation du rendement.
- La diminution du poids.

Ces nouveaux types d'alternateurs discoïdes n'ont plus besoin d'éléments complexes pour se mettre en route. Par leurs formes simplifiées, ils sont rentables en tout point de vue, ainsi que leurs raccordement au réseau. Autrefois, les alternateurs avaient besoin de diodes redresseuses de courant, maintenant ce n'est plus nécessaire. Les schémas de raccordement électrique deviennent très simples par leurs aimants permanents intégrés. Ceux-ci se raccorderont toujours en parallèles et seront indépendant les uns des autres. En cas de panne ou de problèmes sur une éolienne, les autres cellules peuvent continuer à fonctionner sans problèmes.

### Conditions du bon fonctionnement

- Respect du même ordre des phases sur chaque borne
- Même tension partout
- Même fréquence
- Même intensité
- Raccordement en parallèle obligatoire
- Raccordement sur les plaques de borne en étoiles

### Schéma électrique simplifier de l'alternateur discoïde à champ radial



## 2. Proposition du rendement éventuel fourni par les éoliennes

Cette proposition par calcul, de la puissance est une valeur approximative, permettant de comprendre ce que nous pourrions éventuellement récupérer de la force du vent. En considérant un rendement final de 50%, sachant que ces éoliennes à axes verticales sont les petites cousines des éoliennes de types *Darius*.

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot S \cdot \eta \cdot V^3 \\
 P &= \frac{1}{2} \cdot 0,4 \cdot 1,225 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 1,8 \cdot 2) \cdot 0,5 \cdot V^3 \\
 P &= 2,7685 \cdot V^3
 \end{aligned}$$

Avec

- C<sub>p</sub>** = Coefficient de puissance (de 0,3 < C<sub>p</sub> < 0,56)
- ρ** = Masse volumique de l'air (1,225 kg/m<sup>3</sup>)
- η** = Rendement de la turbine (40 %)
- S** = Surface balayée au vent par les pâles de l'éolienne (m<sup>2</sup>)
- V** = Vitesse du vent (m/s)
- P** = Puissance fournie par l'arbre (W)

| Vitesse du vent<br>Km/h | Vitesse du vent<br>m/s | Puissance fournie<br>par l'arbre<br>Watts | Puissance fournie<br>par l'alternateur<br>Avec $\eta = 0,8$<br>Watts |
|-------------------------|------------------------|---|--|
| 14,4                    | 4                      | 177                                       | 140  |
| 18                      | 5                      | 346                                       | 275  |
| 21,6                    | 6                      | 598                                       | 475  |
| 25,2                    | 7                      | 950                                       | 760  |
| 28,8                    | 8                      | 1 417                                     | 1 100  |
| 32,4                    | 9                      | 2 018                                     | 1 600  |
| 36                      | 10                     | 2 768                                     | 2 200  |
| 39,6                    | 11                     | 3 685                                     | 2 940  |
| 43,2                    | 12                     | 4 784                                     | 3 820  |
| 46,8                    | 13                     | 6 082                                     | 4 860  |

Ci-dessus, la formule faite référence à une formule fréquemment utilisée en aérodynamique (annexe)

### 3. Quelques principes de bases sur les éoliennes à axe vertical

Pour la rentabilité de notre projet et une sensibilisation grande publique, il faut respecter quelques règles de base.

Distances réglementaires minimums imposées pour un groupement d'éoliennes (voir la vue en plan en annexe).

- *Dans le sens du vent dominant :*  
Les éoliennes doivent être espacées de minimum de 5 fois le diamètre de la surface balayé par les pâles.
- *Dans le sens du vent non dominant :*  
Les éoliennes doivent être espacées de minimum de 9 fois le diamètre de la surface balayé par les pâles.
- *L'effet d'obstacle :*  
Il ne peut y avoir aucun obstacle à proximité des éoliennes, sur une distance de plus de 500 m (grandes éoliennes) et de 300 m (groupement de petites éoliennes, notre projet).
- *Perturbation :*  
Il faut tenir compte, que lorsqu'un vent entre dans la surface balayée par les pâles ; à sa sortie sera perturbé de 2 fois le diamètre de la surface balayé par les pâles sur une trajectoire de 9 fois le diamètre de la surface balayé par les pâles.

Ce type d'éoliennes à besoin d'un vent de minimum 4 m/s pour qu'elles puissent commencer à tourner, quelque soit sa taille.

A ce jour, aucune firme n'a encore trouvé de solution pour diminuer les grandes vibrations provoquées par les éoliennes de types Darius.

Un site est dit correct quand le vent moyen sur une année est de 6 m/s. Pour notre projet, un des sites idéals en France serait dans les bouches du Rhône ou en Bretagne, près des côtes. Ces régions offrent de grands vents. Cependant, il est à remarquer qu'en cas de trop grand vent (mur éolien 20 m/s) le système doit être arrêté, car ce type de pâles risque de faire l'effet hélicoptère et ainsi de s'envoler.

Sur les feuilles de dessins en annexes, vous trouverez une proposition pour un type de pâles. Ce n'est très probablement pas la seule solution.

Les tubes de soutiens doivent respecter le même profil que les pâles avec une même orientation pour que le vent puisse pousser les pâles dans un même sens.

Afin d'obtenir un minimum de rendement, il faut au minimum des éolienne faisant 2 m de haut sur un diamètre de 1,80 m.

## 4. Résistance des matériaux

Tous les calculs sont fait à partir des planches se trouvant en annexes  
Pour plus de détails voir feuilles annexes

### 4.1. Poids des éléments récapitulatifs

|  |         |
|--|---------|
| Pâles et tubes d'attaches en fibre de carbones (donné) | ~ 35 kg |
| Arbre mobile   | 33,2 kg |
| Arbre fixe   | 67 kg   |
| Pattes d'attaches                                      | 2,6 kg  |
| Patte de raccord de la boîte moteur                    | 11 kg   |
| Cage moteur  | 100 kg  |

### Calculs

#### Arbre mobile (alliage alu)

L = 320      diamètre = 6

$$\begin{aligned} P_{am} &= \pi \cdot r^2 \cdot h \cdot \rho \\ &= \pi \cdot (0,03)^2 \cdot 3,2 \cdot 2\,800 \\ &= 24,4 \text{ kg} \end{aligned}$$

L = 20      diamètre = 3

$$\begin{aligned} P_{am'} &= \pi \cdot r^2 \cdot h \cdot \rho \\ &= \pi \cdot (0,015)^2 \cdot 0,2 \cdot 2\,800 \\ &= 0,4 \text{ kg} \end{aligned}$$

#### Bagues d'attaches des tubes d'attaches (alliage alu)

$$\begin{aligned} P_b &= L \cdot h \cdot \pi \cdot r_{moy} \cdot 2 \cdot \rho \\ &= 0,04 \cdot 0,07 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 2\,800 \cdot 2 \\ &= 7,4 \text{ kg} \end{aligned}$$

#### Arbre fixe

L = 110      diamètre int. = 94  
Diamètre ext = 134

$$\begin{aligned} P_{af} &= L \cdot h \cdot \pi \cdot r_{moy} \cdot 2 \cdot \rho \\ &= 1,1 \cdot 0,02 \cdot \pi \cdot 0,057 \cdot 2 \cdot 7\,800 \\ &= 61,5 \text{ kg} \\ &= 67 \text{ Kg} \end{aligned} \qquad \begin{aligned} &0,14 \cdot 0,012 \cdot \pi \cdot 0,067 \cdot 2 \cdot 7\,800 \\ &= 5,5 \text{ kg} \end{aligned}$$



### **Pattes d'attaches des câbles métalliques**

$$\begin{aligned} P_{\text{pacmé}} &= L \cdot l \cdot h \cdot \text{Poids} \cdot N_{\text{bs}} & ((b \cdot h)/2) \cdot l \cdot \text{Poids} \cdot N_{\text{bs}} \\ & 0,02 \cdot 0,07 \cdot 0,01 \cdot 7\,800 \cdot 8 & ((0,08 \cdot 0,07)/2) \cdot 0,01 \cdot 7\,800 \cdot 8 \\ & 0,87 \text{ kg} & 1,7 \text{ kg} \\ & = 2,6 \text{ kg} \end{aligned}$$

### **Pattes d'attaches de la cage moteur**

$$\begin{aligned} P_{\text{pacmo}} &= L \cdot h \cdot \pi \cdot r_{\text{moy}} \cdot 2 \cdot 7\,800 \\ (1) &= 0,02 \cdot 0,03 \cdot \pi \cdot 0,035 \cdot 2 \cdot 7\,800 \\ & 1 \text{ kg} \\ (2) &= 0,10 \cdot 0,01 \cdot \pi \cdot 0,1 \cdot 2 \cdot 7\,800 \\ & 5 \text{ kg} \\ (3) &= 0,085 \cdot 0,015 \cdot \pi \cdot 0,0425 \cdot 2 \cdot 7\,800 \\ & 2,5 \text{ kg} \\ & = 11 \text{ kg} \end{aligned}$$

### **Cage moteur**

$$\begin{aligned} P_{\text{cm}} &= L \cdot h \cdot \pi \cdot r_{\text{moy}} \cdot 2 \cdot 7\,800 \\ (1) &= 0,01 \cdot 0,26 \cdot \pi \cdot 0,13 \cdot 2 \cdot 7\,800 \\ & 16,56 \text{ kg} \\ (2) &= 0,012 \cdot 0,18 \cdot \pi \cdot 0,234 \cdot 2 \cdot 7\,800 \\ & 26,89 \text{ kg} \\ (3) &= 0,01 \cdot 0,24 \cdot \pi \cdot 0,14 \cdot 2 \cdot 7\,800 \\ & 16,46 \text{ kg} \\ & = 60 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\text{Poids du moteur} = 40 \text{ kg}$$

$$P_t = 100 \text{ kg}$$

#### 4. 2. Dimensionnement de certains éléments appartenant au mur éolien

A l'aide du diagramme des forces nous obtenons 1920 N répartis dans chaque câbles

##### Dimensionnement de la section des câbles

Calcul en Traction

$$\gamma < R_p \quad (120\text{N/mm}^2)$$

$$R_p > F / S$$
$$120 \text{ N / mm}^2 > F / S$$

Considérons un vent fort de 2 000 N

$$S > 3\,920 / 120$$
$$S > 32,6 \text{ mm}^2$$

$$S = (\pi \cdot D^2) / 4$$

$$D = \sqrt{(4 \cdot S) / \pi}$$
$$D = \sqrt{(4 \cdot 32,6) / \pi}$$
$$D = 6,5 \text{ mm}$$

Par sécurité et par les données du commerce nous prendrons du métrique M8 (diamètre 8 mm)

##### Dimensionnement de la section des boulons d'attaches des câbles

Calcul en Traction

$$\gamma < R_p \quad (60\text{N/mm}^2)$$

$$R_{pg} > F / S$$
$$60 \text{ N / mm}^2 > F / S$$

$$S > F / 60$$
$$S > 3\,920 / 60$$
$$S > 65,3 \text{ mm}^2$$

$$S = (\pi \cdot D^2) / 4$$

$$D = \sqrt{(4 \cdot S) / \pi}$$
$$D = \sqrt{(4 \cdot 65,3) / \pi}$$
$$D = 9,12 \text{ mm}$$

Par sécurité et par les données du commerce nous prendrons du M10

## Dimensionnement de l'épaisseur des pattes d'attaches liées à l'arbre fixe pour les câbles métalliques

Calcul en traction

$$\gamma < R_p \quad (60\text{N/mm}^2)$$

$$R_{pg} > F / S$$
$$60 \text{ N / mm}^2 > F / S$$

$$S > F / 60$$
$$S > 3\,920 / 60$$
$$S > 65,3 \text{ mm}^2$$

$$e > 65,3 / 14,5$$
$$e > 4,5 \text{ mm}$$

L'épaisseur sera donc de minimum 5 mm, par sécurité nous prendrons une épaisseur de 10 mm, car ces éoliennes émettent de très fortes vibrations.

## Dimensionnement de la section des boulons d'attache de la cage moteur

$$P_t = 100 \text{ kg}$$
$$F = 1\,000 \text{ N}$$

Considérons 4 point d'attaches

$$1\,000 / 4 = 250 \text{ N}$$

$$\text{Donc } 250 / 120 = 2,083 \text{ mm}^2$$

Calcul en traction

$$\gamma < R_p \quad (120\text{N/mm}^2)$$

$$R_p > F / S$$
$$120 \text{ N / mm}^2 > F / S$$

$$S > 250 / 120$$
$$S > 2,083 \text{ mm}^2$$

$$S = (\pi \cdot D^2) / 4$$

$$D = \sqrt{(4 \cdot S) / \pi}$$
$$D = \sqrt{(4 \cdot 2,083) / \pi}$$
$$D = 1,63 \text{ mm}$$

Calcul au cisaillement

$$\gamma < R_p \quad (60\text{N/mm}^2)$$

$$R_{pg} > F / S$$

$$60 \text{ N / mm}^2 > F / S$$

$$S > F / 60$$

$$S > 250 / 60$$

$$S > 4,16 \text{ mm}^2$$

$$S = \pi \cdot D \cdot h \quad \text{comme nous considérons un cylindre}$$

$$S = \pi \cdot 0,8 \cdot D^2$$

$$S = 2,5 D^2$$

$$D = \sqrt{(4,16 / 2,5)}$$

$$D = 1,3 \text{ mm}$$

Par sécurité et par les données du commerce nous prendrons 4 boulons de métrique M4 afin de mieux résister aux grandes vibrations.

#### 4 . 3 . Poteaux en treillis articuler

Les poteaux seront composés de tubes creux ronds en acier, de 50 mm de diamètre extérieur avec une épaisseur de 15 mm d'acier. (dimensions & trame communiquées par des ingénieurs). Pour la modulation de la trame voir feuille annexe

#### Dimensionnement de la semelle de fondation

Surface totale de la poutre offerte au vent

$$\begin{aligned} S_{pv} &= 4 \cdot 0,05 \cdot 15 \\ &= 3 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{ph} &= 0,65 \cdot 0,05 \cdot 30 \cdot 2 \\ &= 1,95 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{po} &= 0,6 \cdot 0,05 \cdot 120 \\ &= 3,6 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_t &= 3 + 1,95 + 3,6 \\ &= 9,15 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Force du vent en le considérant de 500 N / m<sup>2</sup>

$$F = 500 \cdot 9,15$$

$$F = 4\,575 \text{ N}$$

Vu que ce mur éolien est maintenu par des câbles, il faut considérer le moment au 2 / 3

$$\begin{aligned} M_{2/3} &= 4\,575 \cdot 10 \\ &= 45\,750 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Considérons une semelle de 1,50 m de profondeur

$$\begin{aligned} F &= 45\,750 / 0,75 \\ &= 61\,000 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{C-à-d } P &= 61\,000 / 10 \\ &= 6\,100 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume } V &= 6\,100 / 2\,400 & \text{Masse volumique du béton } 2\,400 \text{ kg/m}^3 \\ &= 2,54 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Dimension des semelles

$$\begin{aligned} \text{Surface haute de la semelle} &= 2,54 / 1,5 \\ &= 1,7 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Considérons une surface carrée} &= \sqrt{1,7} \\ &= 1,3 \text{ m} \end{aligned}$$

La dalle aura comme dimensions : 1,5 m de profondeur et une section carrée de 1,3 m

### Dimensionnement des boulons d'encrages de la semelle de fondation

$$\begin{aligned} F \cdot d &= 45\,750 \cdot 0,75 \\ &= 34\,312,5 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Calcul en traction

$$\sigma < R_p \quad (120 \text{ N/mm}^2)$$

$$\begin{aligned} R_p &> F / S \\ 120 \text{ N / mm}^2 &> F / S \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S &> 34\,312,5 / 120 \\ S &> 285,93 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$S = (\pi \cdot D^2) / 4$$

$$\begin{aligned} D &= \sqrt{(4 \cdot S) / \pi} \\ D &= \sqrt{(4 \cdot 285,93) / \pi} \\ D &= 19,08 \text{ mm} \end{aligned}$$

Par sécurité et par les données du commerce nous prendrons 4 boulons de métrique M22 (diamètre 22 mm).

## Conclusion

- Un relief plat et dégagé avec un minimum d'obstacles
- Des dimensions à l'échelle humaine pour une intégration réussie
- Un rendement énergétique économiquement exploitable
- Ou encore une réduction du bruit produit par la rotation des pales

SONT DES IMPERATIFS QUI NE SONT PAS ENCORE REMPLIS  
POUR LES EOLIENNES A AXE VERTICAL

L'objectif n'est pas de recréer des éoliennes existantes, mais de les adapter à une configuration pour laquelle elles ne répondent pas encore.

Ce Mur est une proposition d'un model d'adaptation, il tente de répondre au mieux aux critères du principe de fonctionnement. Il est certain, que ce n'est très probablement pas une des meilleurs solutions. Et qu'au point vue de l'entièreté du projet, il reste encore beaucoup de chemins à parcourir.

Celui-ci est une démonstration et une idée à mettre en place, pour produire de l'électricité sous une nouvelle forme.

# Bibliographies

## Livres

- Catalogue général, SKF, Catalogue 4000/IF, 1992 – 12
- Guide du dessinateur industriel, M. Chevalier, Hachette technique, Paris, réed. 2003
- Introduction à l'analyse des structures, Presses Polytechniques et universitaires romandes, Marc-André Studer & François Frey, Academy Editions, Londres, 1995
- Marc-Gérard, Visserie de qualité, 1983
- René Basquin, Mécanique, Deuxième Partie, Delagrave, Paris

## Personnes ressource

- Monsieur Yvon BARBAZON, Ingénieur Industriel, en électromécanique  
12 A rue de la Bovery, B-6921 CHAMLY, Belgique  
Tél. : + 32 (0)84 38 97 35  
Email : [cehg@caramail.com](mailto:cehg@caramail.com)
- Monsieur Bernard DELVILLE, Ingénieur Civil, Responsable, du bureau : « Allons en vent scrl », Vent d'Houyet asbl  
1 rue du monument, B-5560 MESNIL- EGLISE, Belgique  
Tél. : + 32 (0)82 74 45 84 – Fax : + 32 (0)82 74 41 11  
email : [info@vents-houyet.be](mailto:info@vents-houyet.be)  
Site : [www.vents-houyet.be](http://www.vents-houyet.be)
- Monsieur MILOS, Ingénieur Industriel, en mécanique, Chargé de cours à l'Institut Libre Georges Cousot Dinant