



Étude de la faisabilité d'un système de production  
d'électricité pour une sablière à l'aide d'éoliennes  
mécaniques

Travail de fin d'études présenté par

**DHEN Mikaël**

en vue de l'obtention du diplôme

**d'Ingénieur Industriel Finalité électro-mécanique**

Années académique 2006–2007

Haute Ecole LEONARD de VINCI



Institut Supérieur Industriel

Tuteur : M. Philippe Tilman

Bureau for Investigation and  
Prospection

# BIP

Boulevard Neuf, 3  
1495 Villers-La-Ville

Tuteur : M. Paul Piessens

Étude de la faisabilité d'un système de production  
d'électricité pour une sablière à l'aide d'éoliennes  
mécaniques

Promoteur : PIESSENS Paul

Travail de fin d'études présenté par

Tuteur : TILMAN Philippe

**DHEN Mikaël**

en vue de l'obtention du diplôme

**d'Ingénieur Industriel Finalité électro-mécanique**

Années académique 2006–2007

**CAHIER DES CHARGES RELATIF**  
**AU TRAVAIL DE FIN D'ETUDES de**  
M. DHEN Mikaël inscrit en 2<sup>ème</sup> Licence électromécanique

Titre provisoire : « Elaboration d'un projet de production d'électricité hydro-éolienne. »

Objectifs à atteindre :

Général :

- Ecarter les points de consommation d'électricité de la sablière de Mont-St-Guibert

Techniques :

- Dimensionnement du bassin supérieur
- Dimensionnement de l'éolienne de pompage

Principales étapes :

- Analyse des besoins énergétiques de la sablière
- Dimensionnement du bassin supérieur
- Etude de la position de l'éolienne et de la pompe
- Calcul de la puissance de la pompe
- Dimensionnement de l'éolienne
- Etude économique de l'installation

Fait en trois exemplaires à Bruxelles, le .... 30/11/2006

**L'Étudiant**

NOM:

DHEN Mikaël

**Le Tuteur**

NOM:

TILMAN Philippe

**Le Promoteur**

NOM:

PIESSENS Paul

Signature :

Dhen Mikaël

Signature :

Présentation TFE

SOCIETE :

BIP sprl

Signature :

## RÉSUMÉ

---

Ce travail a pour objet l'étude de la faisabilité et le dimensionnement partiel d'une petite centrale de production d'électricité. Elle se base sur le principe suivant : de l'eau provenant d'un bassin supérieur fait tourner une roue à augets qui, raccordée à une génératrice, produit de l'électricité aux moments désirés. Cette eau, récoltée dans un bassin inférieur, est alors pompée mécaniquement par une ou plusieurs éoliennes multipales dans le bassin supérieur (il sert en réalité au stockage de l'énergie récupérée par l'éolienne sous forme hydraulique). Et le cycle peut continuer. Le dimensionnement de la pompe à balancier et le dimensionnement de l'ensemble constitué de la roue à augets, de l'électronique de puissance qui l'accompagne, ainsi que de l'automatisation du système font l'objet des travaux de fin d'études de **Rachid Essabih**, d'**Amin Gourad**. Ce travail abordera le reste du système, c'est-à-dire le dimensionnement de l'éolienne et du bassin supérieur.

Mais avant d'aborder son dimensionnement, il faut déterminer la puissance que l'installation devra produire, et surtout déterminer si elle serait rentable. Une étude de faisabilité est donc nécessaire, d'où le titre de ce travail. Ainsi, plusieurs possibilités concernant l'application de l'installation ont été envisagées :

- un assouvissement complet des besoins en électricité de la sablière,
- un assouvissement partiel des besoins,
- un écrêtage de pointes de consommation, qui sont en effet facturées à des tarifs plus élevés.

Au terme de cette étude, la conclusion est que ce système n'est malheureusement pas faisable, pour chacun de ces trois cas. En effet, le premier cas n'est pas faisable, l'énergie récupérable par une éolienne mécanique étant une goutte d'eau par rapport aux besoins en électricité de la sablière. Par contre, dans les deux derniers cas, c'est la rentabilité qui fait défaut : la sablière mettrait minimum 60 années pour rentabiliser l'installation.

Cependant, j'ai effectué en guise de perspectives une brève étude de rentabilité concernant l'implantation d'éoliennes électriques sur le site de la sablière de Mont-Saint-Guibert.

## REMERCIEMENTS

---

Je tiens à remercier, pour leur aides, soutiens, conseils et encouragements :

Gregoire de Kiarolis

Cédric Doutrelepont

Natchy Boumba

Paul Piessens

Angelika Francis

Philippe Tilman

Maxime Julien

Jonathan Pelfeur

Jérôme Berardo

Dimitri Rombois

Frédérique Vinçotte

Sébastien Franbroux

# TABLE DES MATIÈRES

---

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>1. PRÉSENTATION DU CADRE DU TFE.....</b>	<b>3</b>
1.1. La société BIP.....	3
1.2. La sablière SHANKS.....	3
1.3. Présentation de l'installation proposée et objectifs du TFE.....	6
<b>2. DONNÉES ET MÉTHODES .....</b>	<b>9</b>
2.1. Analyse de la consommation électrique.....	9
2.2. Etude topographique et anémométrique du terrain.....	16
<b>3. RÉSULTATS.....</b>	<b>26</b>
3.1. Méthodologie.....	26
3.2. Positionnement de l'installation .....	27
3.3. Cas d'un assouvissement complet des besoins électriques.....	29
3.3.1. Relations entre les différentes grandeurs et calculs .....	29
3.3.2. Faisabilité.....	33
3.3.3. <b>Conclusion concernant le cas envisagé</b> .....	34
3.4. Cas d'un assouvissement partiel des besoins électriques .....	35
3.4.1. Introduction.....	35
3.4.2. Système avec une seule éolienne de pompage mécanique.....	35
3.4.3. Système avec plusieurs éoliennes de pompage mécaniques .....	54
3.4.4. <b>Conclusion concernant le cas envisagé</b> .....	58
3.5. Cas d'un écrêtage des pointes de consommation .....	59
3.5.1. Introduction.....	59
3.5.2. La pointe quart-horaire.....	59
3.5.3. Détermination de la réduction de la pointe de puissance et rentabilité.....	60
3.5.4. <b>Conclusion concernant le cas envisagé</b> .....	63
<b>4. CONCLUSION GÉNÉRALE.....</b>	<b>64</b>
<b>5. PERSPECTIVES.....</b>	<b>68</b>
5.1. Introduction .....	68
5.2. Installation d'une ou plusieurs éoliennes électriques .....	68
5.3. Extension du système de production envisagé.....	74
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>79</b>
<b>ANNEXES</b>	

# LISTE DES FIGURES

---

Figure 1 : Photographie de la sablière.....	1
Figure 2 : Schéma général de l'installation.....	1
Figure 3 : Bassins de décantation.....	5
Figure 4 : Schéma du flux des matériaux dans l'unité de lavage.....	5
Figure 5 : Vue de biais de l'unité de lavage.....	5
Figure 6 : Schéma général de l'installation.....	6
Figure 7 : Cinématique de l'installation.....	7
Figure 8 : Installation de lavage.....	9
Figure 9 : Pompes de 55 kW.....	9
Figure 10 : Installation de lavage de roues de camions.....	10
Figure 11 : Pompe à boue de 30 CV.....	10
Figure 12 : Consommation totale par mois en kWh, jusqu'au mois d'octobre 2006.....	13
Figure 13 : Consommation totale HP et HC par mois en kWh.....	14
Figure 14 : Profil de consommation journalier.....	15
Figure 15 : Relief de la sablière.....	16
Figure 16 : Vue aérienne de la sablière 1.....	16
Figure 17 : Carte géographique de la région.....	17
Figure 18 : Vitesses moyennes journalières des vents à Ernage en 2004.....	18
Figure 19 : Vitesses moyennes journalières des vents à Ernage en 2005.....	18
Figure 20 : Rose des vents Ernage 2004 - 2005.....	19
Figure 21 : Distribution de Weibull de 2004.....	20
Figure 22 : Distribution de Weibull de 2005.....	20
Figure 23 : Distribution de Weibull générale.....	21
Figure 24 : La pompe à balancier de l'installation.....	22
Figure 25 : Comparaison entre les vitesses des vents à Ernage en 2004 et 2m/s.....	23
Figure 26 : Comparaison entre les vitesses des vents à Ernage en 2005 et 2m/s.....	24
Figure 27 : Schéma général de l'installation.....	26
Figure 28 : Profil général de l'écoulement du vent sur une butte.....	27
Figure 30 : Proposition de positionnement et structure de l'installation.....	28
Figure 31 : Schéma hydraulique de la partie descendante.....	29
Figure 32 : Débit fonction de la hauteur de chute pour une puissance de 375kW hydraulique.....	32
Figure 33 : Placement du bassin supérieur.....	33
Figure 34 : Schéma de principe de l'extension du système de production.....	34
Figure 35 : Schéma de l'installation à une éolienne de pompage.....	35
Figure 36 : Puissance récupérée en fonction du diamètre de l'éolienne et de la vitesse du vent.....	37
Figure 37 : Puissance transmissible par une éolienne de 5 mètres de diamètre en fonction.....	38
Figure 38 : Densité de puissance.....	39
Figure 39 : Schéma hydraulique de la partie montante.....	41
Figure 40 : Débit pompé en fonction de la hauteur manométrique totale pour une puissance de 200W.....	43
Figure 41 : Débit pompé en fonction de la vitesse du vent.....	44
Figure 42 : Débit remonté pour l'année 2004.....	44
Figure 43 : Débit remonté pour l'année 2005.....	44
Figure 44 : Longueur de la canalisation montante.....	45
Figure 45 : Diagramme de Moody.....	46
Figure 46 : Caractéristique du circuit.....	48
Figure 47 : Point de fonctionnement de la pompe.....	48
Figure 48 : Caractéristique du circuit avec et sans pertes de charge.....	49
Figure 49 : Schéma récapitulatif.....	50
Figure 50 : Schéma général de l'installation composé de plusieurs éoliennes de pompage.....	54
Figure 51 : Economies mensuelles sur la facture électrique en fonction de n.....	55
Figure 53 : Evolution du point mort en fonction de n.....	57
Figure 54 : Exemple de diagramme de charges.....	60
Figure 55 : Années d'amortissement en fonction de n.....	63
Figure 56 : Années d'amortissement en fonction de n pour les deux cas.....	64
Figure 57 : Courbe liant le prix d'une installation éolienne avec sa puissance.....	65
Figure 58 : Evolution de la vitesse des vents en fonction de la hauteur.....	69
Figure 59 : Photo de l'éolienne Jacobs 29-20.....	71
Figure 60 : Courbe de puissance de l'éolienne Jacobs.....	71
Figure 61 : Schéma de base de l'installation domestique.....	74
Figure 63 : Vitesses des vents sur une année type à Uccle.....	76
Figure 64 : Vitesses des vents sur une année type à Saint-Hubert.....	76

## LISTE DES TABLEAUX

---

Tableau 1 : Renseignements généraux concernant la sablière .....	3
Tableau 2 : Facture électrique d'Octobre 2006 de la sablière .....	11
Tableau 3 : Consommation du mois de Novembre 2006.....	12
Tableau 4 : Consommations mensuelles depuis 2003, en kWh .....	13
Tableau 5 : Consommations HP et HC mensuelles en kWh depuis 2003 .....	14
Tableau 6 : Jours de l'année 2004 où les vitesses de vent ont été inférieures à 2m/s à Ernage .....	24
Tableau 7 : Jours de l'année 2005 où les vitesses de vent ont été inférieures à 2m/s à Ernage .....	25
Tableau 8 : Caractéristiques d'éoliennes de pompage mécanique de l'entreprise JBornay.....	36
Tableau 9 : Premières caractéristiques de l'éoliennes choisie .....	37
Tableau 10 : Caractéristiques générales de l'éolienne choisie.....	39
Tableau 11 : Valeurs approximatives de coefficient $\xi$ pour quelques accessoires courants .....	47
Tableau 12 : Facture électrique de la sablière d'Octobre 2006 .....	52
Tableau 13 : Coûts de l'installation avec une éolienne de pompage .....	53
Tableau 14 : Estimation des coûts de l'installation avec n éoliennes de pompage.....	56
Tableau 15 : Coûts de l'installation composée d'une éolienne et d'une roue à augets de 10kW .....	61
Tableau 16 : Coûts de l'installation composée de 3 éoliennes et de deux roues à augets de 15kW .....	62
Tableau 17 : Récapitulatif des différents temps d'amortissement.....	64
Tableau 18 : Caractéristiques générales de l'installation .....	65
Tableau 19: Caractéristiques principales de l'éolienne AOC 15/50 50Hz.....	69
Tableau 20 : Caractéristiques principales de l'éolienne FL30 de FUHLÄNDER.....	70
Tableau 21 : Caractéristiques de l'éolienne Jacobs 29-20 de Wind Turbine Industries .....	71
Tableau 22 : Caractéristiques principales de l'éolienne AEP 10000 d'Auroville.....	72
Tableau 23 : Récapitulatif de la rentabilité des différents cas envisagés .....	72
Tableau 24 : Caractéristiques principales de la Turbowinds T600-48.....	73
Tableau 25 : Comparaison des potentiels énergétiques avec l'étude de l'IRM .....	73
Tableau 26 : Répartition de la consommation électrique annuelle d'un ménage belge .....	75
Tableau 27 : Puissances électriques récupérables par l'installation domestique .....	77
Tableau 28 : Détermination de la facture électrique d'un ménage belge consommant 6MWh/an .....	77
Tableau 29 : Economies annuelles sur la facture électrique suivant les cas envisagés .....	78
Tableau 30 : Estimation des coûts liés au système domestique .....	78
Tableau 31 : Années d'amortissement du système .....	78

## Introduction

Ce travail a pour objet la faisabilité et le dimensionnement partiel d'une petite centrale de production d'électricité. Basée sur le principe des STEP (stations de transfert d'énergie par pompage<sup>1</sup>), elle devrait permettre à une sablière de diminuer sa facture électrique. Celle-ci s'élève en effet à en moyenne 6000 € TVAC par mois, ce qui n'est pas négligeable !



Figure 1 : Photographie de la sablière

La microcentrale électrique envisagée se base sur le principe suivant : de l'eau provenant d'un bassin supérieur fait tourner une roue à augets qui, raccordée à une génératrice, produit de l'électricité aux moments désirés. Cette eau, récoltée dans un bassin inférieur, est alors pompée mécaniquement par une éolienne dans le bassin supérieur. Et le cycle peut continuer.

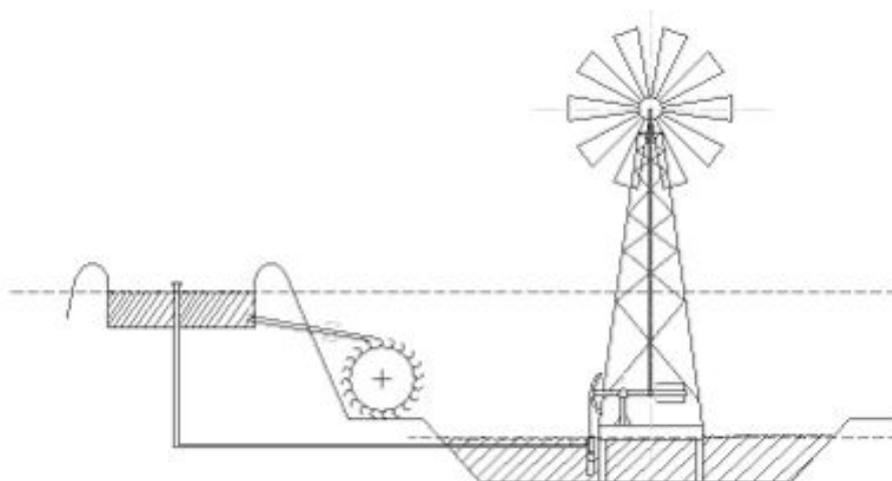


Figure 2 : Schéma général de l'installation

---

<sup>1</sup> Voir Annexes I p.3 chapitre I.II

Ce projet a été scindé en trois parties distinctes :

- 1) le dimensionnement de la pompe à balancier, qui fait l'objet du travail de fin d'études de *Rachid Essabih*,
- 2) l'ensemble constitué de la roue à augets, l'électronique de puissance qui l'accompagne, ainsi que l'automatisation du système qui fait l'objet du travail de fin d'études d'*Amin Gourad*,
- 3) la partie faisant l'objet de ce travail de fin d'études, et qui abordera le reste du système, c'est-à-dire :
  - l'étude de la faisabilité et de la rentabilité du système ;
  - le dimensionnement du bassin supérieur ;
  - le dimensionnement de l'éolienne ;
  - le positionnement de l'installation.

L'étude du système abordera différents domaines tels que la météorologie, l'éolien, l'hydraulique, la mécanique ou encore l'électricité. Le système projeté serait entièrement propre.

La grande différence entre les STEP et ce projet réside dans la source de l'énergie de pompage : dans le cas des STEP, l'eau est pompée électriquement la nuit car l'électricité y est meilleur marché, tandis que dans ce projet, c'est par le biais d'une éolienne de pompage que l'eau est remontée, le pompage étant alors dépendant de la vitesse du vent. L'on devine aisément les avantages d'un tel système : premièrement, la source d'énergie, c'est-à-dire le vent, est entièrement gratuite, ce qui fait que l'électricité finalement créée l'est aussi (en ne tenant pas compte de l'amortissement de l'installation, de la maintenance, etc.), et deuxièmement, le bassin sert au stockage de l'énergie, ce qui permet de l'utiliser aux désirs, et ainsi ne plus être dépendant de la présence de vent. Le bassin supérieur devra donc être dimensionné de manière à ne jamais être trop rempli, ou trop plein au risque de déborder.

Commencer par présenter le cadre dans lequel s'inscrit ce travail de fin d'études.

# 1. Présentation du cadre du TFE

## 1.1. La société BIP

Fondée en 1989, et actuellement dirigée par M. Paul Piessens, la société BIP (Bureau for Investigation and Propection) est un bureau d'études indépendant proposant des solutions et des projets concrets aux entreprises dans le but pour celles-ci de réduire leur consommation énergétique, ou la pollution qu'elles dégagent. Ce bureau s'est illustré dans différents travaux, tels que la gestion de sites abandonnés pour éviter la pollution par les gaz, l'automatisation de réseaux de dégazage, ou encore dans des systèmes de production d'électricité par le biogaz.

Pour ce travail de fin d'étude, BIP offre ses services à la sablière SHANKS qui désire réduire sa facture électrique.

## 1.2. La sablière SHANKS

### 1.2.1. Coordonnées

Tableau 1: Renseignements généraux concernant la sablière

<b>Société</b>	SHANKS
<b>Usine</b>	Shanks Brabant Division Sablières
<b>Adresse</b>	rue des trois Burettes, 65 1435 Mont-St-Guibert
<b>Téléphone</b>	+32 10 65 53 12
<b>Fax</b>	+32 10 65 08 57
<b>Directeur du Site</b>	Vincent Peetroons
<b>E-mail</b>	info.brabant@shanks.be
<b>Type d'activité</b>	Sablière
<b>Fournisseur électrique</b>	SPE

### 1.2.2. Domaine d'activités de la société SHANKS

Shanks Group PLC est une des plus grandes sociétés indépendantes européennes dans la gestion de déchets. Elle emploie environ 3000 personnes au Royaume-Uni, en France, aux Pays-Bas ainsi qu'en Belgique. Dans chacun de ces pays, elle constitue un acteur majeur dans la gestion des déchets industriels. Shanks offre en effet une large gamme de solutions innovantes dans le domaine de la gestion de déchets telles que la collecte, le transport, le recyclage, le traitement et l'enfouissement ; le nettoyage industriel faisant aussi partie de ses activités. Elle traite ainsi près de 2 millions de tonnes de déchets par an et a réalisé, lors de l'année comptable 2005-2006, un chiffre d'affaires de 161,6 millions d'euros.

Cette entreprise couvre un large domaine d'activité. De la collecte au tri des déchets, de la destruction de bâtiments à l'exploitation d'une carrière de sable. C'est justement cette sablière qui nous intéresse, alors présentons les activités qui s'y déroulent.

### 1.2.3. La sablière de Mont-St-Guibert

L'exploitation assure depuis des décennies l'extraction, le tamisage et le lavage de sables provenant de gisements siliceux bruxellois. Les produits qu'on y propose sont du sable de maçonnerie (sable fin et gras), du sable pour la bétonnerie (sable rude), du sable demi-rude, du sable lavé, des pierres de tamisage et de lavage, ainsi que la location d'engins de génie civil.

Elle est située à une cinquantaine de kilomètres au sud de Bruxelles, sur le bord sud du socle rocheux du massif cambro-silurien<sup>2</sup> du Brabant. Il s'agit d'un socle constitué de quartzophyllades<sup>3</sup>, tectonisé et érodé. Ce socle est surmonté par les formations tertiaires et principalement par les sables du Bruxellien<sup>4</sup> qui font ici l'objet d'une exploitation en sablière.

La sablière s'étend sur une surface totale de quelques 80 hectares. Actuellement, et depuis l'ouverture du site en 1986, 55 hectares sont autorisés et ouverts à l'exploitation, ce qui correspond à encore 10 années d'extraction au rythme actuel de 1 million de tonnes par an. Une nouvelle demande d'autorisation pour 36 hectares supplémentaire est en cours, ce qui augmenterait la durée de vie à 22 années. Ainsi, pour produire 1 million de tonnes annuellement, il faut mettre en exploitation environ trois hectares.

Les sables sont extraits par excavation mécanique avec des chargeuses sur pneus. Ils sont ensuite calibrés afin de parfaire leur qualité ou transportés vers l'installation de lavage. On les retrouve généralement dans des secteurs tels que le bâtiments (travaux de béton,

---

<sup>2</sup> Le Silurien est un système géologique s'étendant de 444 à 416 millions d'années, tandis que le Cambrien s'étend de 542 à 488 millions d'années.

<sup>3</sup> Quartzites (pierres plates et dures) d'aspects feuilletés.

<sup>4</sup> Le Bruxellien fait partie de l'ère paléozoïque.

fondation drainante des routes,...) ou voir même dans les sculptures sur sable de Blankenberghe.

En plus de l'extraction, l'entreprise utilise une installation de lavage du sable (a) composée principalement d'une trémie d'alimentation avec extracteur, d'un crible écrêteur, d'un ensemble de cyclones et d'égoutteurs ainsi que de deux convoyeurs à bande pour l'évacuation et la mise en stock au sol des produits lavés. Alimentée par chargeuse, cette unité peut traiter plus de 180 tonnes de sable en une heure. Les eaux de lavage chargées (b) sont évacuées, décantées dans trois bassins successifs (c et d) et pompées pour alimenter le lavage en circuit fermé (f).

Cette unité de lavage constitue la principale source de consommation électrique: une puissance de 255 kVA est nécessaire pour l'entraînement des machines (pompes, vibreurs, sauterelles,...).

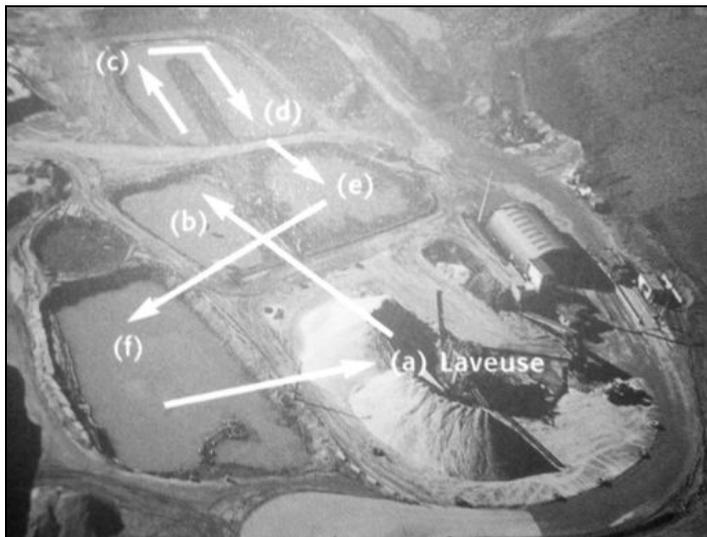


Figure 3 : Bassins de décantation

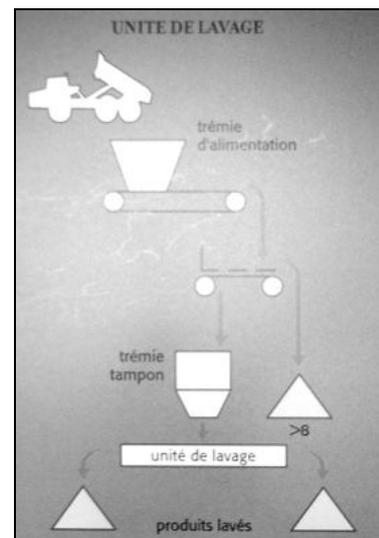


Figure 4 : Schéma du flux des matériaux dans l'unité de lavage

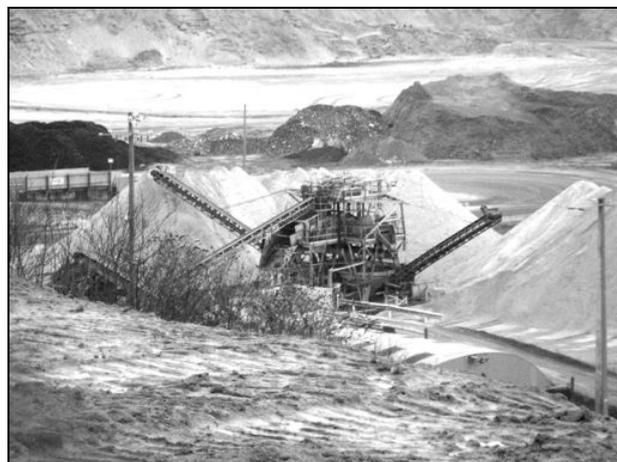


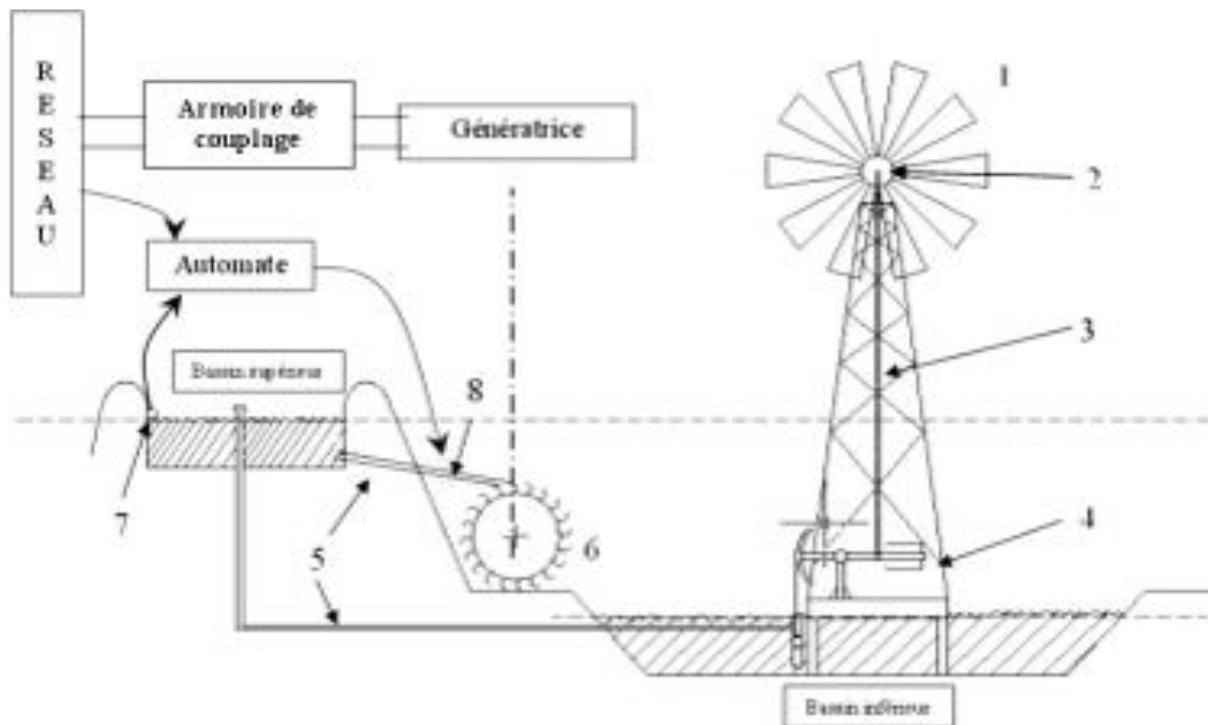
Figure 5 : Vue de biais de l'unité de lavage

### 1.3. Présentation de l'installation proposée et objectifs du TFE

La facture électrique de la sablière s'élève en moyenne à 6000 €/mois TVAC pour une consommation mensuelle moyenne totale de 40,5 MWh. La société BIP a alors proposé de la réduire à l'aide d'un système de production d'électricité le plus économique possible.

#### 1.3.1. Concept de base

La société BIP a imaginé un système de production d'électricité hydraulique par le biais d'une éolienne mécanique. Voici le schéma général de l'installation :



1	Eolienne mécanique à axe horizontale	5	Canalisations
2	Vilebrequin	6	Roue à augets
3	Axe vertical de transmission	7	Sonde de niveau
4	Pompe à balancier	8	Vanne de réglage

**Figure 6 : Schéma général de l'installation**

Ce système devrait permettre, à faible coût, d'amoinrir la facture électrique de la sablière. Mais comment ? La cinématique du système est décrite ci-après.

### 1.3.2. Cinématique de l'installation

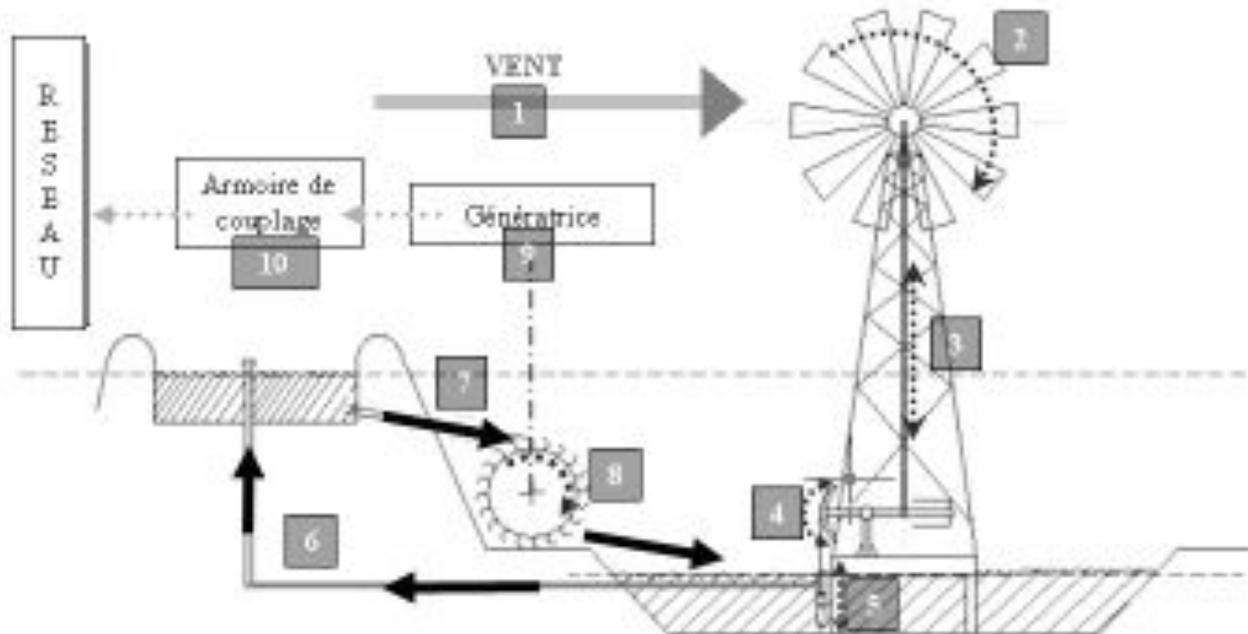


Figure 7 : Cinématique de l'installation

Le vent (1), caractérisé par sa direction et sa vitesse, va engendrer deux forces au contact des pales de l'éolienne : l'une de traînée, l'autre de poussée. C'est cette dernière qui créera le mouvement de rotation du rotor (2). De part la loi de Betz<sup>5</sup>, seul un rapport maximum de 16/27 de la puissance contenue dans le vent est transmis au rotor. Comme celui-ci est couplé à un vilebrequin, son mouvement de rotation est transformé en un mouvement alternatif d'un axe vertical (3). Cet axe est fixé à une pompe à balancier (4 et 5) qui, par un système de clapets va permettre de remonter l'eau (6) dans un bassin supérieur, qui se remplira au fur et à mesure. Lorsque les besoins se feront ressentir, la vanne de réglage (7) réglera son ouverture afin que la roue à augets produise la puissance souhaitée. Celle-ci récupère alors la puissance hydraulique de l'eau (8), et, couplée à une génératrice (9), va permettre de renvoyer de l'électricité soit sur le réseau basse tension de la sablière, soit sur le réseau haute tension, par l'intermédiaire d'un couplage (10).

Nous remarquons que l'installation peut être subdivisée en deux parties distinctes, mais dépendantes l'une de l'autre :

- la partie « descendante », englobant le bassin supérieur, la roue à augets et l'électronique de puissance associée, ainsi que la vanne et la canalisation entre le bassin supérieur et la roue à augets.
- la partie « montante », englobant la pompe, l'éolienne, et la canalisation du bassin inférieur au supérieur.

<sup>5</sup> Voir Annexes III p.59 chapitre III.I

### 1.3.3. Objectifs et subdivisions du projet

#### **Objectif principal du projet**

L'objectif principal du projet est donc clairement de réduire la facture électrique de la sablière à l'aide du système proposé ci-avant, qu'il faut dimensionner.

#### **Subdivisions du dimensionnement de l'installation**

Le dimensionnement de l'installation étant fort longue, elle a été scindée en trois parties distinctes :

- 1) le dimensionnement de la pompe à balancier, qui fait l'objet du travail de fin d'études de *Rachid Essabih*,
- 2) l'ensemble constitué de la roue à augets, l'électronique de puissance qui l'accompagne, ainsi que l'automatisation du système qui fait l'objet du travail de fin d'études d'*Amin Gourad*,
- 3) la partie faisant l'objet de ce travail de fin d'études, et qui doit aborder le reste du système, c'est-à-dire :
  - le dimensionnement du bassin supérieur ;
  - le dimensionnement de l'éolienne ;

#### **Objectifs de ce travail de fin d'études**

Au départ, le travail que l'on m'a proposé avait pour seuls objectifs le dimensionnement de l'éolienne multipale et le dimensionnement du bassin supérieur. Mais sur quelles puissances se baser ? Quelle puissance électrique doit fournir le système, et pendant combien de temps ? Ces données essentielles doivent avant tout être déterminées.

Afin d'y arriver, je vais reprendre la facture électrique et voir sur quels termes il serait possible d'agir pour la réduire. Mais il va de soi qu'avant de dimensionner l'éolienne et le bassin supérieur, l'installation doit s'avérer faisable et rentable. J'analyserai donc, pour différents cas, la faisabilité du systèmes composés d'une ou plusieurs éoliennes multipales et de leurs pompes à balancier. C'est pour cela que ce travail de fin d'étude se nomme « Étude de la faisabilité d'un système de production d'électricité pour une sablière à l'aide d'éoliennes mécaniques ».

Mais nous ne pouvons commencer l'étude sans au préalable poser certaines hypothèses de départ et disposer de certaines données concernant la sablière (sa consommation en électricité, les vents qui y soufflent, etc.). C'est pourquoi, dans le chapitre suivant intitulé « Données et méthodes », nous allons analyser :

- premièrement, les besoins énergétiques de la sablière,
- et deuxièmement, comme le système est composé d'une éolienne, la topographie du terrain et une étude des vents qui y soufflent.

Quant aux hypothèses, elles seront posées au fil de l'étude.

## 2. Données et méthodes

### 2.1. Analyse de la consommation électrique

Dans un premier temps, recherchons les origines de la consommation électrique.

#### 2.1.1. Equipements électriques de la sablière

La sablière est en majeure partie équipée de machines fonctionnant au Diesel, comme des camions transporteurs, des extracteurs, ou des ensembles mobiles de criblage. Celles-ci ne nous intéressent guère car l'objectif de ce travail est bien de produire de l'énergie pour les appareils électriques de la sablière, la consommation par énergie fossile n'étant pas remplaçable par l'installation envisagée.

#### **L'unité de lavage**

La principale source de consommation électrique est l'installation de lavage. Comme nous l'avons vu plus haut, elle est très gloutonne en énergie électrique : 255 kVA pour l'ensemble de l'installation. Elle est principalement constituée de pompes, de sauterelles, de vibreurs, de cribleuses, de transporteurs, etc.<sup>6</sup>

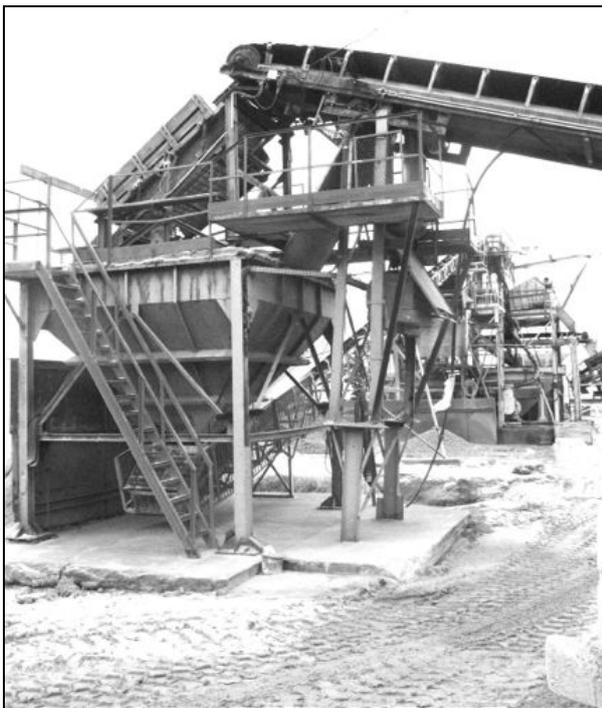


Figure 8 : Installation de lavage



Figure 9 : Pompes de 55 kW

<sup>6</sup> Les différents éléments la constituant sont décrits en Annexes I p.4, chapitre I.III

Son utilité est de laver le sable afin de le rendre plus propre, et donc de le revendre à un prix plus élevé. Elle fonctionne en général de 7h à 16h, soit durant 9 heures par jour. Sachant que la sablière l'utilise 5 jours sur 7 (du lundi au vendredi), nous trouvons aisément qu'en un mois, soit plus ou moins 20 jours, la laveuse consomme :

$$E_{\text{cons}} = 255\text{kVA} \times 3600\text{s} \times 9(\text{h}) \times 20(\text{j}) / 3600\text{s} = 45.900 \text{ kVAh}$$

Comme son  $\cos\phi$  est d'approximativement 0,8, l'installation de lavage consomme en moyenne 205 kW et donc 37 MWh par mois. Cette consommation représente plus de 80% de la consommation totale mensuelle.

### Eclairage de nuit

Il constitue la principale source de consommation pendant les heures creuses. Elle est tout de même constituée de 25 spots de chacun 500W, ce qui représente en moyenne 3,5 MWh par mois.

### Autres

- L'installation de lavage des roues de camions : cette installation ne fonctionne pas en permanence et peut donc être négligée. Elle est constituée de 2 pompes de 25 CV chacune.

- Mentionnons également la présence de pompes diverses de plus ou moins grosses puissances telles que des pompes à boues (30 CV  $\approx$  22 kW). Elles servent à pomper les eaux de pluies dans les 2 bassins d'orage. Elles sont donc elles aussi utilisées exceptionnellement.



Figure 10 : Installation de lavage de roues de camions



Figure 11 : Pompe à boue de 30 CV



Le gros de la facture provient indéniablement de la consommation électrique en heures pleines.

Remarquons la pointe mensuelle, s'élevant à 242 kW, et représentant à elle seule 7% de la facture électrique, hors TVA. Il s'agit en fait de la puissance maximale relevée par le compteur durant le mois facturé. Cette puissance n'est pas la pointe instantanée (celle entraînée par le démarrage de la laveuse, par exemple) mais bien la pointe maximum enregistrée durant un quart d'heure du mois. En quelque sorte, c'est le maximum de l'énergie demandée durant 1/4 d'heure du mois, divisée par le temps d'un 1/4 d'heure, et c'est le maximum de ces puissances moyennes qui servira de base à la facturation. C'est la pointe « quart-horaire » :

$$\text{kW} = \text{kWh max en 15 minutes} / 15 \text{ minutes}$$

Aussi, pour le mois de novembre 2006 :

Tableau 3 : Consommation du mois de Novembre 2006

	MWh	€/MWh	€
<b>Consommation Heures Pleines</b>	36,21340	67,6000	2448,03
<b>Consommation Heures Creuses</b>	5,68080	39,9000	226,66
<b>Consommation totale</b>	41,8942		
<b>Pointe mensuelle</b>			
	245,5 kW	1,5 €/kW	368,25
<b>Autres</b>			2056,02
<b>Coût totale de la facture HTVA</b>			5098,96
<b>Coût totale de la facture TVAC</b>			6169,74

Nous retrouvons les mêmes ordres de grandeurs.

Trois possibilités concernant l'application de l'installation vont alors être envisagées :

- L'assouvissement complet des besoins électriques de la sablière (plus de facture),
- L'assouvissement partiel des besoins électriques de la sablière (diminution de la consommation en heures pleines),
- L'écrêtage des pointes de consommation (diminution de la pointe quart-horaire).

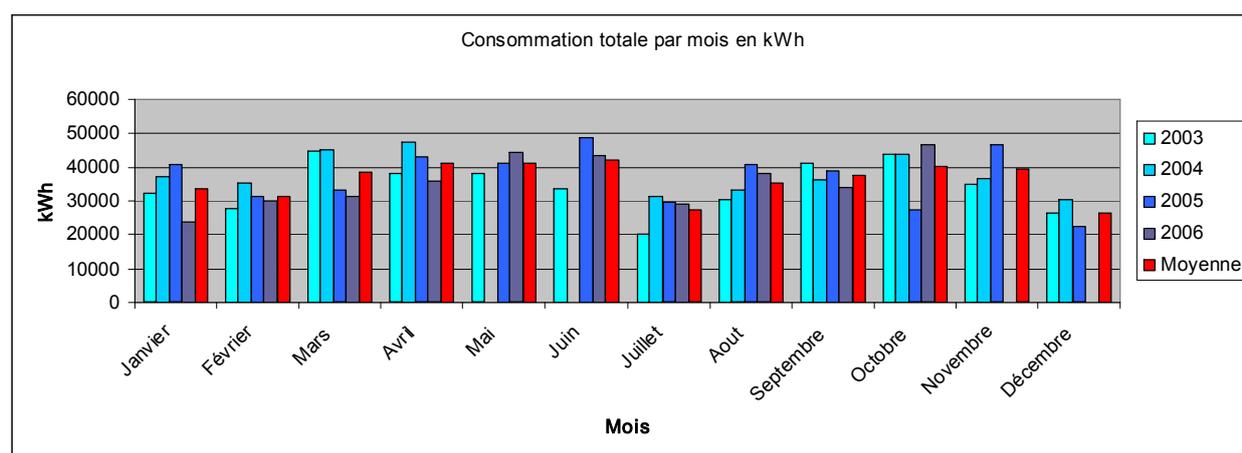
### 2.1.3. Consommation électrique de la sablière

#### Consommations totales par mois en kWh

Voyons maintenant l'évolution des consommations électriques mensuelles de la sablière. Nous remarquons que les besoins électriques varient en permanence, oscillant autour des 35MWh/mois.

**Tableau 4 : Consommations mensuelles depuis 2003, en kWh**

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Consommation totale annuelle	Moyenne mensuelle
2003	32 358	27 712	44 569	37 989	37 902	33 574	19 964	30 351	41 013	43 790	34 890	26 267	410379	34198
2004	37 308	35 347	45 014	47 493	0	0	31 148	32 929	36 107	43 695	36 499	30 287	375827	37583
2005	40 588	31 543	32 947	42 958	41 291	48 824	29 703	40 666	38 948	27 430	46 705	22 417	444020	37002
2006	23 727	29 887	31 431	35 632	44 409	43 469	29 313	37 893	34 133	46 426	41 894	0	398214	36201
Moyenne	33495	31122	38490	41018	41201	41956	27532	35460	37550	40335	39997	26324	407110	33926



**Figure 12 : Consommation totale par mois en kWh, jusqu'au mois d'octobre 2006**

Les variations de consommation mensuelles s'expliquent par les différents temps d'utilisation de l'unité de lavage. J'ai pris précédemment un temps d'utilisation de 9 heures, alors qu'en réalité, ce temps peut très fortement varier d'un jour à l'autre.

#### Consommation heures pleines (HP) et heures creuses (HC) par mois en kWh

Dans un premier temps, il est important de définir quelles sont les heures pleines et les heures creuses pour le fournisseur électrique SPE :

- heures pleines - HP : 15 heures en journée, du lundi au dimanche, de 7 à 22h

=> 62 % du temps, 5475 h/an.

- heures creuses - HC : les nuits (de 22h à 7h) + week-end et jours fériés légaux (du vendredi 22h au lundi 7h), généralement (horaire variable suivant les intercommunales),

=> 38 % du temps, 3285 h/an.

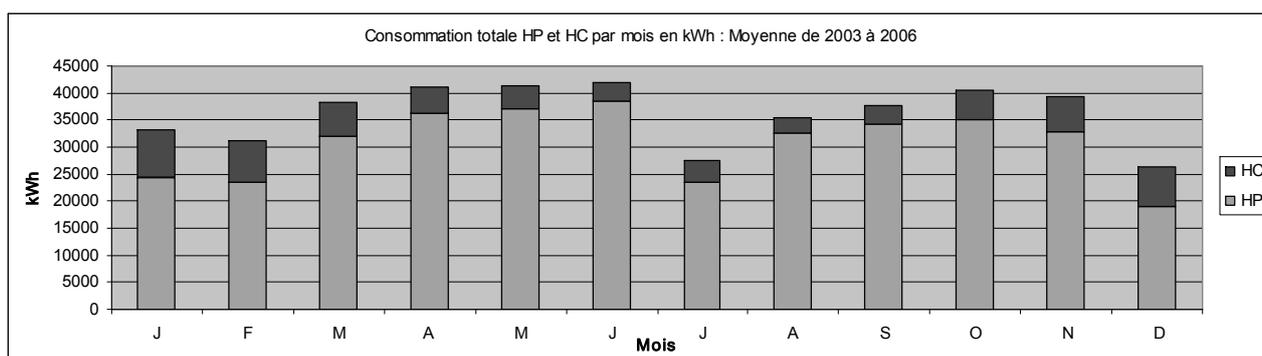
Voici les consommations HP et HC mensuelles en kWh depuis 2003 jusqu'en Octobre 2006 :

**Tableau 5 : Consommations HP et HC mensuelles en kWh depuis 2003**

HP	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Consommation totale annuelle	Moyenne mensuelle
2003	22048	19974	37956	33047	33851	29978	17502	26500	36845	35906	27424	18093	339124	28260
2004	26226	26488	37654	41489	0	0	27170	30000	32702	38521	29485	22218	311953	31195
2005	31772	23472	26232	38307	36842	44565	24332	38409	35986	23203	41237	16448	380805	31734
2006	17559	23795	25636	31546	40872	41047	25206	35529	31648	42391	36213	0	351442	31949
Moyenne	24401	23432	31870	36097	37188	38530	23553	32610	34295	35005	32715	18920	345831	30785

HC	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Consommation totale annuelle	Moyenne mensuelle
2003	10310	7736	6613	4942	4051	3596	2462	3851	4168	7884	7466	8174	71253	5938
2004	11082	8859	7360	6004	0	0	3978	2929	3405	5174	7014	8069	63874	6387
2005	8816	8071	5715	4651	4449	4259	5371	2257	2962	4227	5458	5969	62205	5184
2006	5168	6092	5795	4086	3537	2422	4132	2364	2485	4035	5681	0	45797	4163
Moyenne	8844	7689,5	6370,75	4920,75	4012,333	3425,667	3985,75	2850,25	3255	5330	6404,75	7404	60782	5418



**Figure 13 : Consommation totale HP et HC par mois en kWh**

La laveuse fonctionnant en moyenne de 7h à 16h, les appareils qui fonctionnent le reste du temps (les spots d'éclairage) sont donc entièrement à l'origine de la consommation en HC.

Notons que durant l'hiver, comme il fait sombre plus longtemps, il est tout à fait normal de remarquer une consommation en heures creuses plus importantes les mois de novembre, décembre, janvier et février, puisque les spots d'éclairage sont allumés plus longtemps.

L'on constate que la consommation en heures creuses n'est pas petite, mais ce n'est pas elle qui fait grimper la facture : elle ne constitue en moyenne que 5 à 10 % de la facture électrique, tout en constituant tout de même 9 à 20 % de la consommation totale mensuelle.

Nous pouvons dès lors dresser un profil type de la consommation électrique journalière.

## Profil journalier type de la consommation électrique de la sablière (moyennes par quarts d'heure)

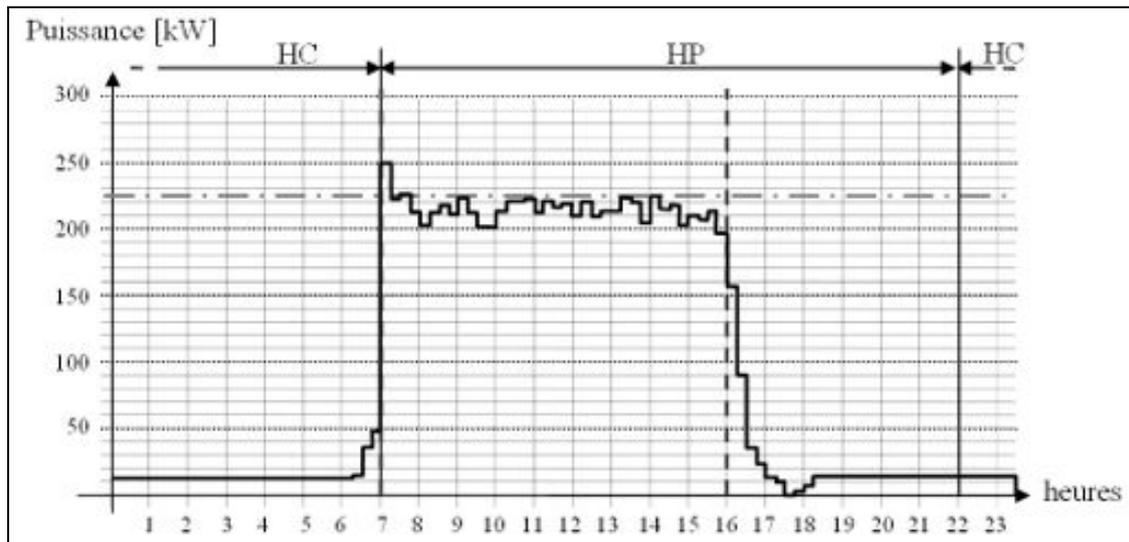


Figure 14 : Profil de consommation journalier

Ce schéma reste bien évidemment tout à fait qualitatif. Ce profil correspond cependant au profil de consommation réel de la sablière.

Nous voyons donc que la pointe de consommation la plus importante, due au démarrage de l'installation de lavage, a lieu juste au début des heures pleines ! Cette pointe est en valeur instantanée en réalité beaucoup plus élevée. Elle est de l'ordre de 500 – 600 kW (plus ou moins trois fois la puissance nominale de l'installation), mais durant approximativement 1 minute. Ce qui fait que la moyenne sur le quart d'heure est de :

$$( 1 * 600 + 14 * 225 ) / 15 = \underline{250 \text{ kW}}$$

Et c'est bien l'ordre de grandeur que l'on retrouve dans la facture électrique concernant la pointe « quart-horaire ».

### Considérations pour la suite du travail

Dans la suite du travail, nous allons considérer :

- que la consommation journalière se résume à 225 kW (tous les équipements compris) de 7h à 16h, soit durant 9 heures. Cette hypothèse engendre que la consommation totale mensuelle serait de 40,5 MWh, ce qui est comparable aux consommations mensuelles réelles de la sablière. La facture s'élèverait alors à ±6000€/mois TVAC, et donc ±5000€/mois HTVA.
- que les pointes de consommation s'élèvent à 250kW et ont toujours lieu à 7h du matin, 5 jours sur 7, le temps du démarrage de l'unité de lavage, c'est-à-dire 15 minutes. Donc, la pointe quart-horaire s'élève à 250 kW

## 2.2. Etude topographique et anémométrique du terrain

### 2.2.1. Relief

De par ses activités, la sablière présente un relief accidenté. Nous pouvons y trouver des dénivelés allant jusqu'à 30 mètres. Nous verrons par la suite quels profits nous pourrions en tirer.



Figure 15 : Relief de la sablière

### 2.2.2. Situation géographique

La sablière, comme mentionné ci-avant, continuera à exploiter le terrain mis à sa disposition. A force de 3 hectares par an, elle continuera son expansion de cette façon<sup>7</sup> :

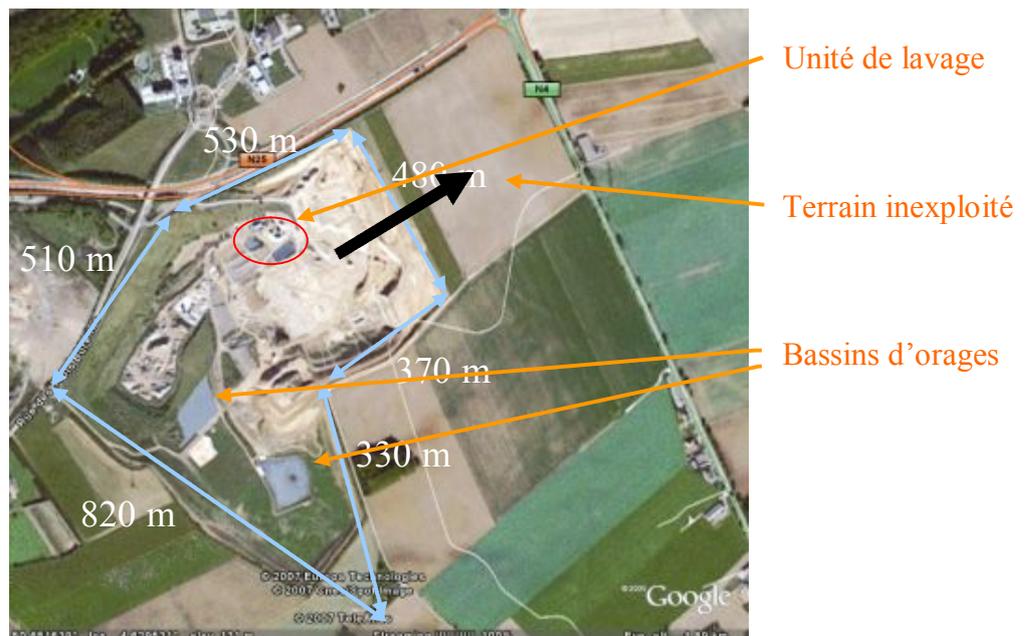


Figure 16 : Vue aérienne de la sablière 1

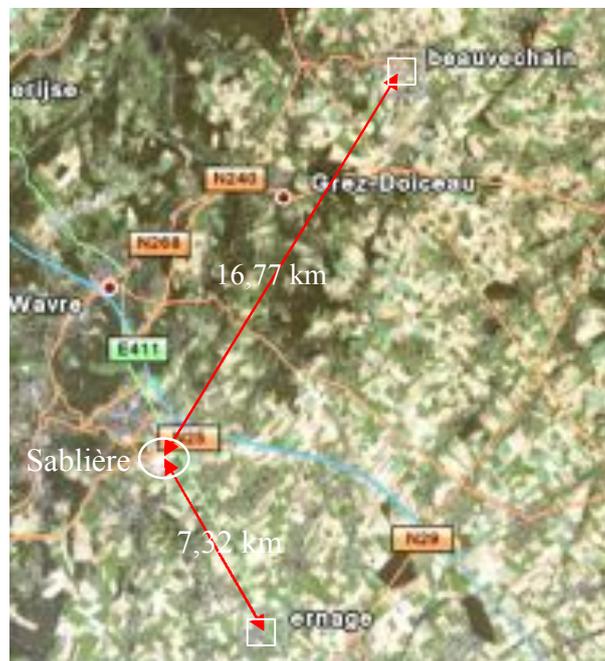
Cette particularité sera à prendre en compte dans la suite de l'étude, car il ne s'agit pas de construire l'installation sur la zone devant encore être exploitée !

<sup>7</sup> Photo aérienne prise à l'aide du programme Google Earth

### 2.2.3. Vitesses et orientations des vents

#### **Vitesses des vents**

Une étude anémométrique sera nécessaire pour déterminer la puissance récupérable par l'éolienne sur le site de la sablière. Il existe actuellement deux stations météorologiques à proximité : Ernage et Beauvechain. Analysons leurs situations géographiques<sup>8</sup> :



**Figure 17 : Carte géographique de la région**

Nous remarquons la présence de forêts entre la sablière et Beauvechain. Or, les vents dominants de Belgique proviennent du Sud-Ouest. Par conséquent, à la station météorologique de Beauvechain se situant au Nord-Est de la sablière, je vais préférer les mesures de la station d'Ernage qui de plus est plus proche.

Voici donc, à la page suivante, sur base de mesures effectuées par l'IRM à la station météorologique d'Ernage, les vitesses moyennes journalières des vents pour les années 2004 et 2005, et ce pour une altitude de 10 mètres.

Les mesures effectuées à la station de Beauvechain se situent tout de même en Annexes I p.8 chapitre I.V.

<sup>8</sup> Photo aérienne prise à l'aide du programme Google Earth

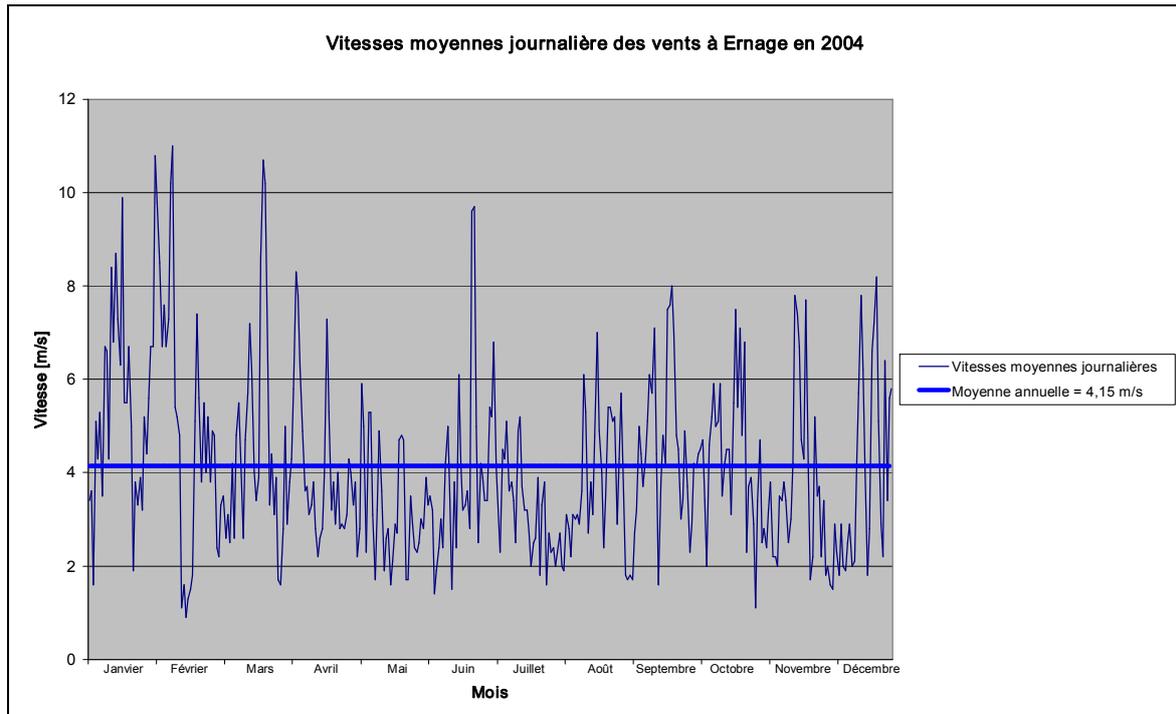


Figure 18 : Vitesses moyennes journalières des vents à Ernage en 2004

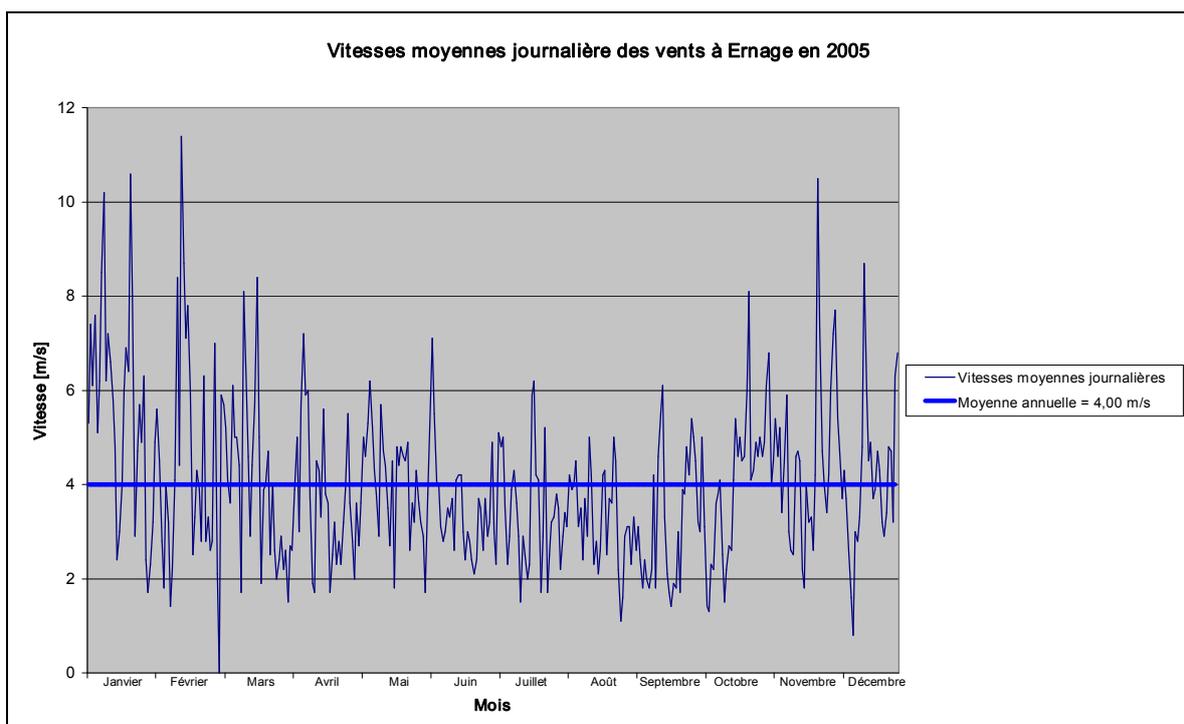


Figure 19 : Vitesses moyennes journalières des vents à Ernage en 2005

### Orientation des vents

L'orientation des vents sur le site de la sablière est un élément important pour la suite de l'étude. Le positionnement de l'installation en dépend bien évidemment. Voici la rose des vents d'Ernage sur laquelle est représentée la répartition moyenne des vents pour les années 2004 et 2005 :

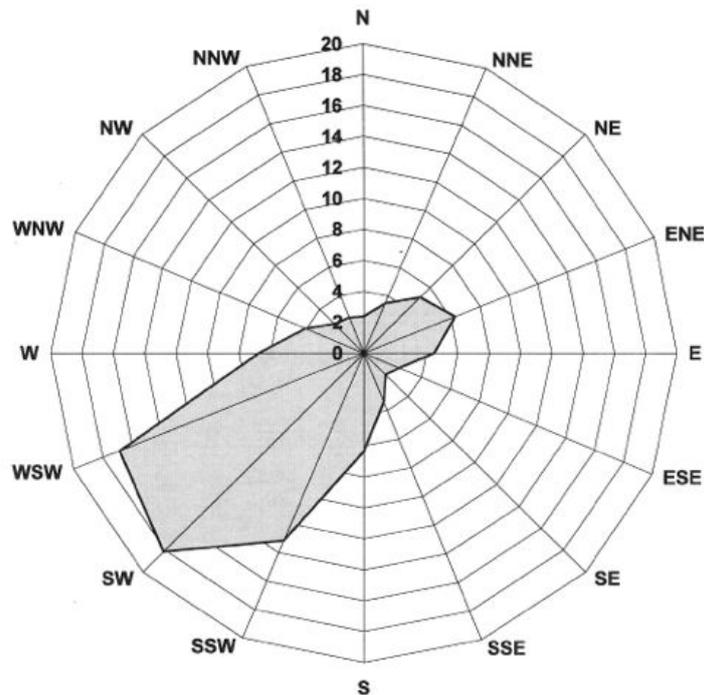


Figure 20 : Rose des vents Ernage 2004 - 2005

Les vents viennent en grande partie du Sud-Ouest, qui est en fait la direction des vents dominants en Belgique.

#### 2.2.4. Distribution de Weibull

Il faut, pour la suite de l'étude, mettre les mesures de vent sous une forme plus claire, plus générale. C'est pourquoi nous allons faire appel à la distribution de Weibull.

La distribution de Weibull est une description statistique de fréquences des vents en fonction de leur intensité. Afin de la tracer, nous devons faire une distribution de probabilité. Ainsi, si sur un an l'on a mesuré 4 fois une vitesse moyenne journalière de 2,7m/s, la probabilité que sur cette année le vent ait soufflé à 2,7m/s est de  $4/365 = 0,010959$ .

Après calculs, nous obtenons la courbe suivante pour l'année 2004 :

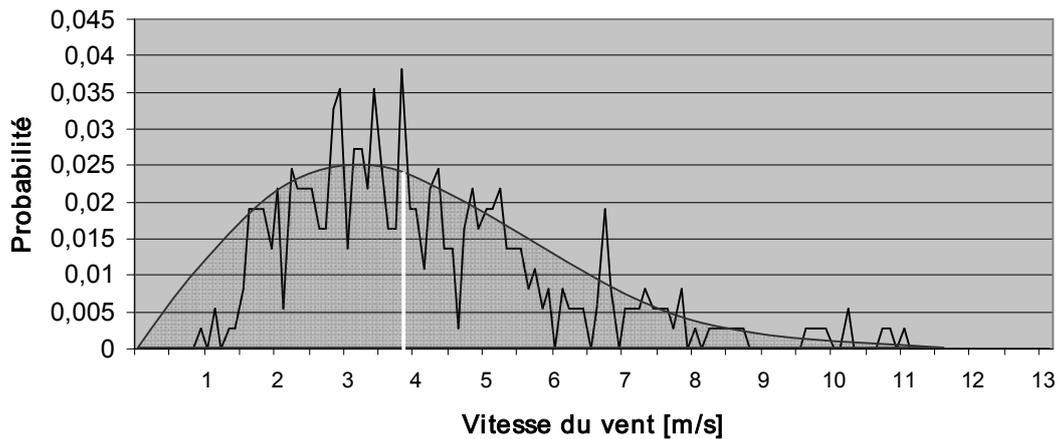


Figure 21 : Distribution de Weibull de 2004

La probabilité que le vent souffle à une vitesse quelconque (zéro inclus) étant obligatoirement égale à 100%, la zone au-dessous de la courbe sera toujours égale à exactement 1. La moitié de la zone foncée se trouve à gauche de la ligne verticale blanche située à 3,8m/s. On dit alors que 3,8m/s est la médiane de la distribution. Cela signifie que le vent souffle à moins de 3,8m/s la moitié du temps, et à plus de 3,8m/s pendant l'autre.

Comme on peut le voir sur le graphique, la distribution des vitesses du vent est oblique, donc asymétrique. Parfois il y aura des vents très forts, mais ce ne sera que très rarement. En revanche, les vitesses de vent de 3,2m/s sont les plus fréquentes. On dit alors que 3,2m/s est la valeur modale de la distribution. Si nous multiplions chaque petit intervalle de vitesse par la probabilité de l'occurrence de cette vitesse de vent particulière, et que nous totalisons ensuite tous les résultats, nous obtiendrons la vitesse moyenne du vent. En effet, nous obtenons 4,15m/s pour l'année 2004. Si on fait de même avec 2005, nous obtenons :

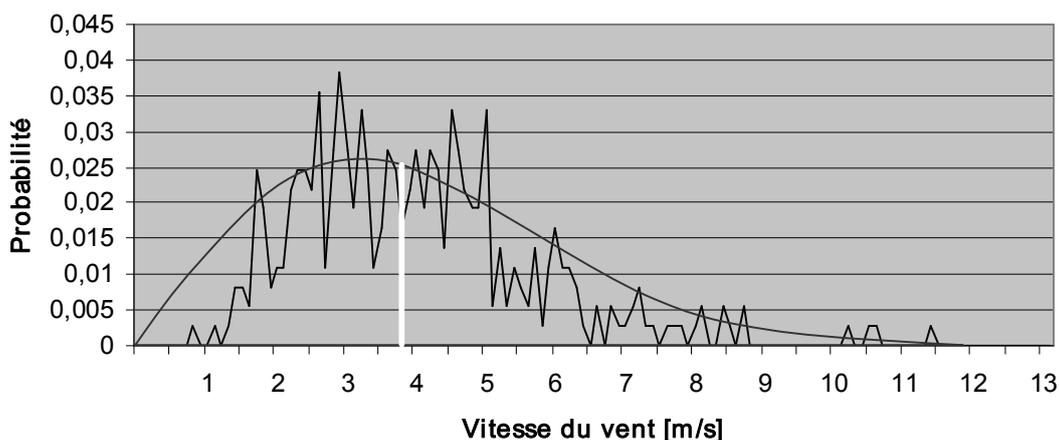


Figure 22 : Distribution de Weibull de 2005

La médiane de la distribution est aussi de 3,8m/s, et la vitesse moyenne de 4m/s. Si nous faisons une moyenne des deux distributions, afin de généraliser pour une année type, nous obtenons :

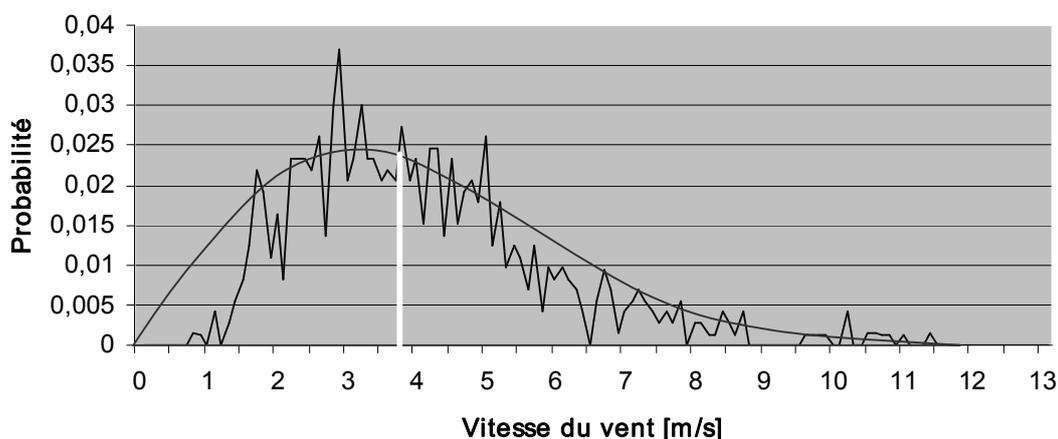


Figure 23 : Distribution de Weibull générale

Cette distribution sera importante pour la suite du travail, car elle nous permet de généraliser la répartition des vents sur une année.

### 2.2.5. Etude du potentiel météorologique du site de la sablière effectuée par l'IRM

La sablière a déjà fait l'objet d'une étude anémométrique effectuée par l'IRM en l'an 2000, dans le cadre de l'implantation éventuelle d'une éolienne électrique de 48 mètres de diamètre. Malheureusement, ne l'ayant pas reçue assez tôt, je ne l'ai pas utilisée comme base de calcul pour ce travail. Elle se trouve tout de même en Annexes II p.25.

Nous remarquons que les statistiques de fréquences des vents par classes d'intensité (pour une hauteur de 10 mètres) diffèrent légèrement de ceux obtenus ci-dessus. C'est en partie dû au fait que l'étude effectuée par l'IRM s'est basée sur les données de la station météorologique de Beauvechain, car la station d'Ernage n'est apparue qu'après, et que deuxièmement, ils ont effectué une modélisation locale tenant compte des caractéristiques du terrain aux abords du site. La présente étude se basera tout de même sur les observations effectuées à la station météorologique d'Ernage.

Maintenant que nous disposons de ces mesures, nous pourrions déterminer les moments où l'éolienne saura tourner, et donc à quels moments se fera le remplissage du bassin. Il est aussi essentiel de connaître les périodes maximales durant lesquelles l'éolienne ne sera pas en action, car le pompage de l'eau ne se fera pas, le bassin ne se remplissant pas. Pour cela, nous devons déjà connaître la vitesse de vent minimale nécessaire au démarrage de l'éolienne.

## 2.2.6. Vitesses de démarrage, nominale et maximale d'une éolienne

### Introduction

Pour commencer à produire de l'énergie, une éolienne exige une vitesse de vent minimale, dite vitesse de démarrage. Pour la plupart des éoliennes de pompage, cette vitesse de vent est comprise entre 2,5 et 3 m/s (9 et 10,8 km/h). Dans notre cas, cette vitesse est différente. Pourquoi ? Pour cela, prenons la pompe à balancier qui a fait l'objet du TFE de Rachid Essabih :

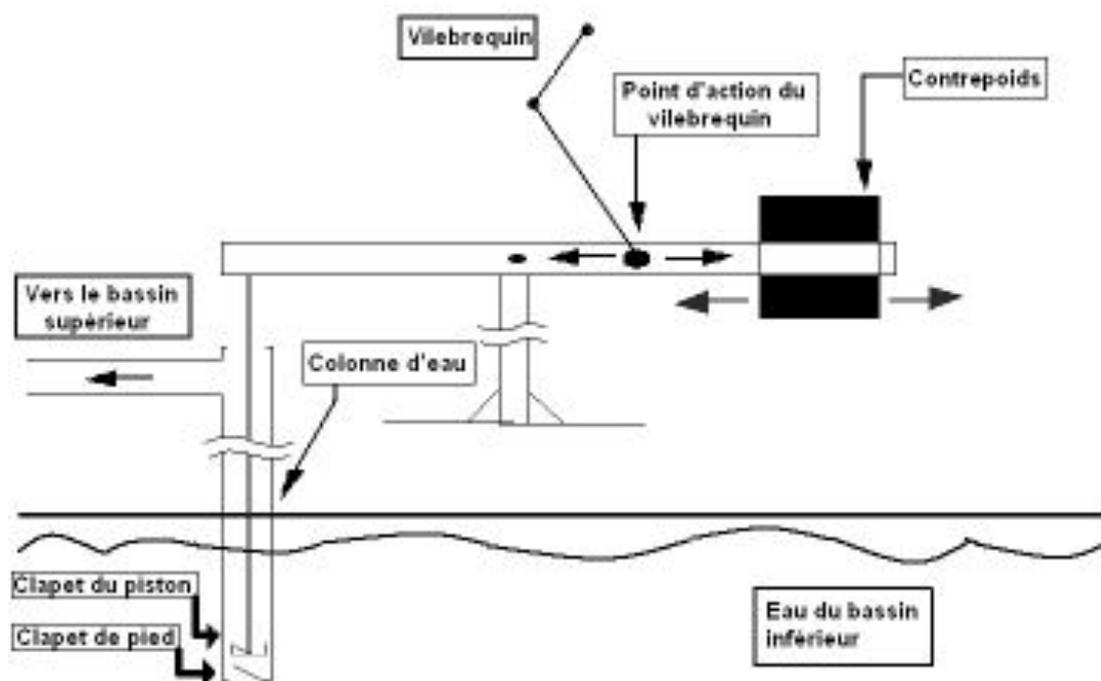


Figure 24 : La pompe à balancier de l'installation

De par la modification du point d'action de l'axe vertical, le couple récepteur peut être modifié. Ca permettrait donc à l'éolienne de démarrer à des vitesses de vent plus faibles, puisqu'au démarrage le point d'action de la tige verticale fera en sorte que le couple soit le plus petit possible. Nous espérons ainsi avoir une vitesse de vent minimal au démarrage de l'éolienne de 2 m/s.

Quand le vent augmente, la puissance récupérée augmente avec le cube de la vitesse du vent (la théorie concernant les éoliennes de pompage se trouve en Annexes I p.9 chapitre I.VI).

Pour les éoliennes électriques, il existe une certaine vitesse de vent (dite vitesse nominale et généralement égale à 12 m/s), à partir de laquelle la puissance transmise à l'éolienne est égale à la puissance maximale que sait transmettre l'éolienne. C'est également le cas de certaines éoliennes multipales. Un système de régulation est alors utilisé pour éviter que l'éolienne ne soit détruite. Dans notre cas, le système de régulation se trouve à la pompe : le déplacement du point d'action du vilebrequin ainsi que d'un contrepoids y sont prévus de

manière à faire varier le couple que l'éolienne transmet, et ainsi modifier sa vitesse de rotation<sup>9</sup>, de par la formule  $P = C * \omega$ . La vitesse nominale sera déterminée après.

La puissance récupérée par l'éolienne est donc sans cesse croissante, mais sa rotation est dépendante de la régulation du point d'action de l'axe vertical sur la pompe.

Mais attention, quand le vent est trop violent (dans le cas d'une tempête par exemple), l'éolienne doit être arrêtée : c'est la vitesse dite d'arrêt, en général de 25 m/s (90 km/h). On pourrait produire de l'énergie dans des vents plus élevés, mais au prix de renforcements de structure pour un gain somme toute faible (quelques heures par an de production). Un système d'effacement ou de décentrage est alors généralement prévu sur la plupart des éoliennes multipales<sup>10</sup>.

Voici donc les premières hypothèses concernant l'éolienne mécanique sur lesquelles nous allons nous baser pour la suite de l'étude :

Vitesse de démarrage	:	2 m/s (7,2 km/h)
Vitesse nominale	:	/
Vitesse d'arrêt, ou d'effacement	:	25 m/s (90 km/h)

### Périodes durant lesquelles l'éolienne mécanique multipale pourrait tourner

Reprenons maintenant les mesures effectuées par l'IRM à la station météorologique d'Ernage et comparons les avec la valeur de 2 m/s :

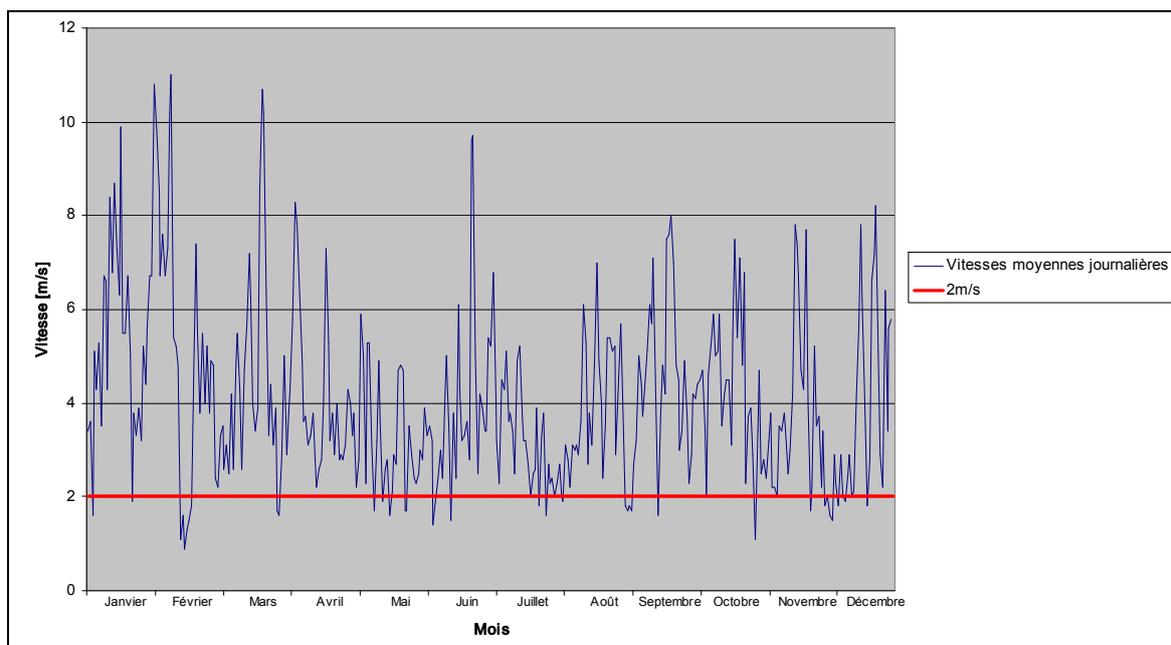


Figure 25 : Comparaison entre les vitesses des vents à Ernage en 2004 et 2m/s

<sup>9</sup> Voir le travail de fin d'études réalisé par Rachid Essabih : « Conception d'une pompe à débit variable »

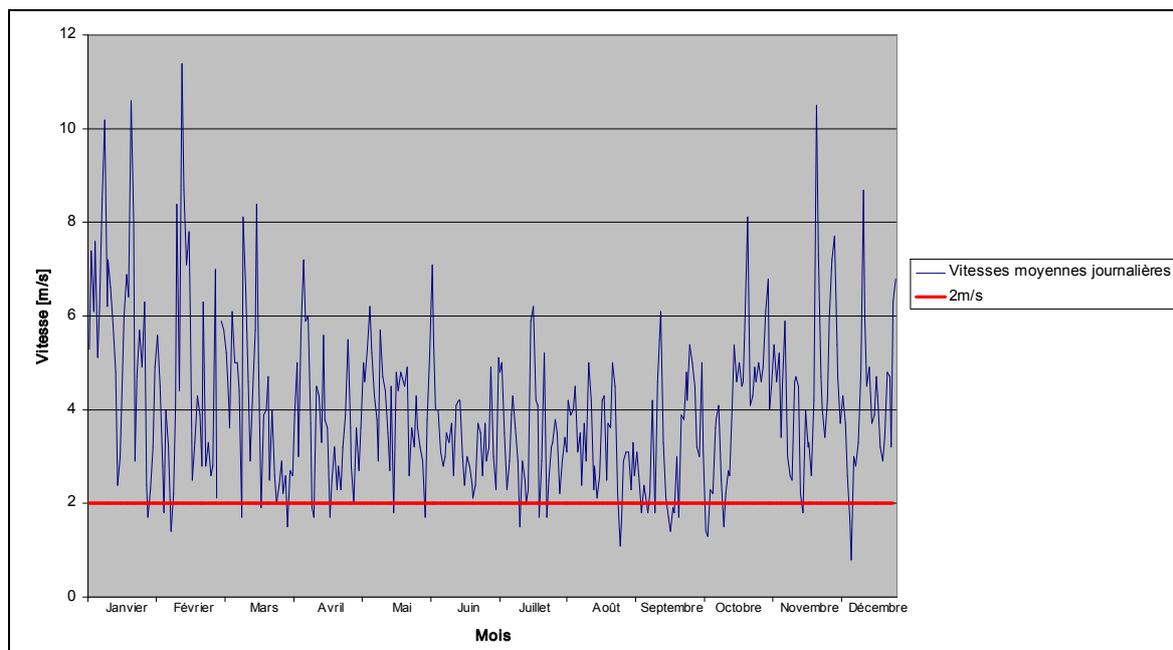
<sup>10</sup> Les différentes caractéristiques des éoliennes mécaniques se trouvent en Annexes I p.9 chapitre I.VI

Intéressons-nous plutôt aux périodes durant lesquelles la vitesse du vent est inférieure à la vitesse de démarrage de l'éolienne mécanique, pour une hauteur de 10 mètres :

**Tableau 6 : Jours de l'année 2004 où les vitesses de vent ont été inférieures à 2m/s à Ernage**

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1	3,4	9,8	3,3	3,8	3,8	2,8	5,4	2,3	1,8	2,9	4,7	1,8
2	3,6	8,5	3,5	4,3	2,2	3,9	5,2	2,7	1,7	4,2	2,5	2
3	1,6	6,7	2,6	5,8	2,8	3,3	6,8	2	1,8	4,1	2,8	1,6
4	5,1	7,6	3,1	8,3	5,9	3,5	4,1	1,9	1,7	4,4	2,4	1,5
5	4,3	6,7	2,5	7,8	5	3,2	3,2	3,1	2,7	4,5	3,2	2,9
6	5,3	7,3	4,2	6,3	2,3	1,4	2,3	2,8	3,2	4,7	3,8	2,3
7	3,5	10,2	2,6	4,9	5,3	1,9	4,5	2,2	5	3,4	2,2	1,8
8	6,7	11	4,8	3,6	5,3	2,4	4,3	3,1	4,4	2	2,2	2,9
9	6,6	5,4	5,5	3,7	3,1	3	5,1	3	3,7	4,6	2	2
10	4,3	5,2	4,3	3,1	1,7	2,4	3,6	3,1	4,3	5,2	3,5	1,9
11	8,4	4,8	2,6	3,3	3,2	4,2	3,8	2,9	5,1	5,9	3,4	2,5
12	6,8	1,1	4,7	3,8	4,9	5	3,4	3,6	6,1	5	3,8	2,9
13	8,7	1,6	5,7	2,8	3,6	3,4	2,5	6,1	5,7	5,1	3,4	2
14	7,3	0,9	7,2	2,2	1,9	1,5	4,9	5,3	7,1	5,9	2,5	2,1
15	6,3	1,3	6,2	2,6	2,6	3,8	5,2	2,7	4,4	3,5	3	4,1
16	9,9	1,5	4	2,8	2,8	2,4	3,7	3,8	1,6	4,2	4,2	5,7
17	5,5	1,8	3,4	4	1,6	6,1	3,2	3,1	3,8	4,5	7,8	7,8
18	5,5	5,1	3,9	7,3	2,1	4,2	3,2	4,8	4,8	4,5	7,4	6,2
19	6,7	7,4	8,6	5,3	2,9	3,2	2,7	7	4,2	3,1	6,7	4,1
20	5	5,6	10,7	3,2	2,7	3,3	2	4,9	7,5	5,5	4,7	1,8
21	1,9	3,8	10,2	3,8	4,7	3,6	2,5	4	7,6	7,5	4,3	2,8
22	3,8	5,5	6,4	2,9	4,8	2,8	2,6	2,4	8	5,4	7,7	6,6
23	3,3	4	3,3	4	4,7	9,6	3,9	3,5	7	7,1	4	7,2
24	3,9	5,2	4,4	2,8	1,7	9,7	1,8	5,4	4,8	4,8	1,7	8,2
25	3,2	3,8	3,1	2,9	1,7	5	3,3	5,4	4,5	6,8	2,2	5,1
26	5,2	4,9	3,9	2,8	3,5	2,5	3,8	5,1	3	2,3	5,2	2,9
27	4,4	4,8	1,7	3,1	2,9	4,2	1,6	5,2	3,4	3,7	3,5	2,2
28	5,6	2,4	1,6	4,3	2,4	3,9	2,7	2,9	4,9	3,9	3,7	6,4
29	6,7	2,2	2,8	4	2,3	3,4	2,3	4,3	3,7	2,9	2,2	3,4
30	6,7		5	3,3	2,5	3,4	2,4	5,7	2,3	1,1	3,4	5,6
31	10,8		2,9		3		2	3,5		3,4		5,8

Et concernant l'année 2005 :



**Figure 26 : Comparaison entre les vitesses des vents à Ernage en 2005 et 2m/s**

Tableau 7 : Jours de l'année 2005 où les vitesses de vent ont été inférieures à 2m/s à Ernage

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1	5,3	5,6	5,9	2,7	3,6	1,7	4,9	2,2	3,1	4,5	4,9	6
2	7,4	4,5	5,7	2,6	2,7	3,8	3	2,9	2,3	3,2	6,1	7,2
3	6,1	2,8	5,2	3,9	3,6	5,2	2,3	3,4	3,3	3	6,8	7,7
4	7,6	1,8	4,1	5	5	7,1	5,1	3,1	2,6	5	4	5,4
5	5,1	4	3,6	3	4,6	5,5	4,8	4,2	3,1	3,1	4,5	4,7
6	6,2	3,2	6,1	5,7	5,3	4	5	3,9	2,4	1,4	5,4	3,7
7	8,5	1,4	5	7,2	6,2	4	3,5	4	1,8	1,3	4,6	4,3
8	10,2	2,2	5	5,9	5,2	3,1	2,3	4,5	2,4	2,3	5,2	3,7
9	6,2	4,1	4,4	6	4,3	2,8	2,9	3,1	2	2,2	3,4	2,6
10	7,2	8,4	1,7	3,7	3,8	3	3,9	3,5	1,8	3,6	4,5	1,6
11	6,6	4,4	8,1	1,9	2,9	3,5	4,3	2,4	2,2	3,8	5,9	0,8
12	5,8	11,4	6,6	1,7	5,7	3,3	3,6	3,7	4,2	4,1	3	3
13	4,8	8,7	4,6	4,5	4,7	3,7	2,9	2,9	1,8	2,5	2,6	2,8
14	2,4	7,1	2,9	4,3	4,4	2,6	1,5	5	4,6	1,5	2,5	3,3
15	3	7,8	4,4	3,3	3,5	4,1	2,9	4,2	5,5	2,2	4,6	4,8
16	4	6	5,7	5,6	2,7	4,2	2,5	2,3	6,1	2,7	4,7	8,7
17	6	2,5	8,4	3,8	4,5	4,2	2	2,8	3,3	2,6	4,5	6
18	6,9	3,3	5	3,6	1,8	3	2,3	2,1	2,1	4,1	2,2	4,5
19	6,4	4,3	1,9	1,7	4,8	2,4	5,9	2,6	1,7	5,4	1,8	4,9
20	10,6	3,9	3,9	2,5	4,4	3	6,2	4,2	1,4	4,6	4	3,7
21	8	2,8	4	3,2	4,8	2,8	4,2	4,3	1,9	5	3,2	3,9
22	2,9	6,3	4,7	2,3	4,6	2,4	4,1	2,5	1,8	4,5	3,3	4,7
23	4,7	2,8	2,5	2,8	4,5	2,1	1,7	3,7	3	4,6	2,6	4,3
24	5,7	3,3	4	2,3	4,9	2,4	2,9	3,6	1,7	6	4,2	3,2
25	4,9	2,6	2,6	3,2	2,6	3,7	5,2	5	3,9	8,1	10,5	2,9
26	6,3	2,8	2	3,9	3,6	3,5	1,7	4,5	3,8	4,1	7,3	3,4
27	2,4	7	2,4	5,5	3,2	2,6	2,5	2,2	4,8	4,3	4,7	4,8
28	1,7	2,1	2,9	3,6	4,3	3,7	3,2	1,1	4,2	4,9	4	4,7
29	2,3		2,2	2,8	3,6	2,9	3,3	1,6	5,4	4,6	3,4	3,2
30	3,2		2,6	2	3,2	3,2	3,8	2,9	5	5	4,2	6,3
31	4,9		1,5		2,9		3,5	3,1		4,6		6,8

Nous trouvons, après analyse, des durées maximales allant de 4 (en 2005) à 5 jours (en 2004) durant lesquels le vent a soufflé à des vitesses moyennes journalières inférieures à 2m/s, et ce à une altitude de 10 mètres. Il est clair que plus on monte en altitude, plus le vent souffle fort. Cette particularité, expliquée en Annexes p.20 chapitre I.VII est très importante et va faire varier la durée maximale d'absence de vent ! Cependant, les éoliennes mécaniques ne dépassent que rarement les 10 mètres de hauteur à cause de la transmission de puissance qui se fait mécaniquement par le biais d'un axe vertical.

Notons qu'il s'agit bien de moyennes journalières, et que donc l'éolienne peut être susceptible de fonctionner, malgré tout, une partie de la journée ! C'est pourquoi, émettons l'hypothèse que les périodes d'absence de vent s'élèvent en moyenne à 5 jours.

Nous avons maintenant assez d'éléments en notre possession pour commencer l'étude.

## 3. Résultats

### 3.1. Méthodologie

Soit le schéma de base :

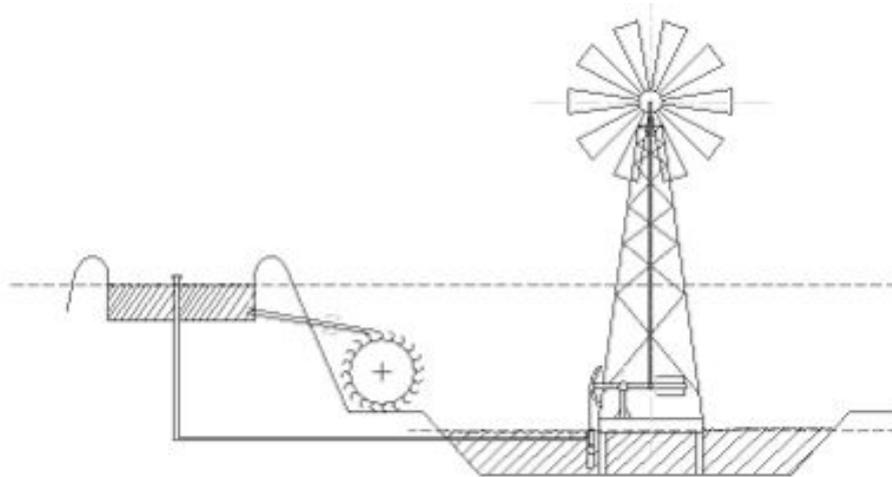


Figure 27 : Schéma général de l'installation

L'objectif de ce travail est de réduire la facture électrique de la sablière grâce à cette installation. Mais comment ? Sur quels paramètres agir ? A partir de quoi allons-nous commencer ?

Il est essentiel, afin de ne pas s'égarer, de définir directement la manière dont nous allons traiter le sujet. Pour rappel, afin d'envisager un maximum de possibilités, trois cas vont être abordés :

- l'utilisation du système pour un assouvissement complet des besoins énergétiques,
- l'utilisation du système pour un assouvissement partiel,
- l'utilisation du système pour l'écêtement des pointes de consommation de la sablière.

Dans le premier cas, nous allons partir des besoins énergétiques de la sablière. On en déduira ensuite la faisabilité du système.

Dans le deuxième cas, on fera l'étude de la faisabilité de l'installation composée d'une seule éolienne de pompage, ainsi que l'installation composée de plusieurs éoliennes de pompage avec leurs pompes associées. On essaiera alors d'agir sur la consommation en heures pleines de la sablière pour diminuer la facture électrique.

Enfin, dans le dernier cas, nous tenterons de diminuer la facture en agissant sur la pointe quart-heure mensuelle de la sablière.

Avant toute chose, positionnons l'installation.

### 3.2. Positionnement de l'installation

Le site de la sablière possède un relief qui doit être pris en compte pour l'implantation d'une éolienne. De par sa topographie, nous pouvons estimer le profil des vents qu'on rencontrerait sur base du profil général, suivant :

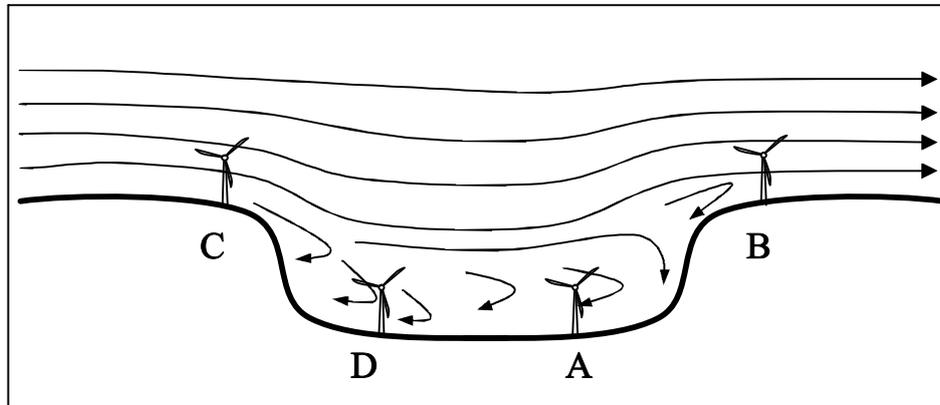


Figure 28 : Profil général de l'écoulement du vent sur une butte

Il est clair que l'on ne va sûrement pas placer l'éolienne en A ou en D, où l'écoulement du vent est turbulent, mais bien en B ou C. D'un autre côté, nous pouvons profiter du fond de la sablière pour y placer le bassin inférieur. Reprenons alors la photographie aérienne de la sablière :



Figure 29 : Positionnement de l'installation

La zone en bleu correspond au fond de la sablière : c'est le terrain déjà exploité et actuellement en exploitation. C'est donc ailleurs que dans cette zone que l'on placera l'éolienne. Mais attention, la zone rouge correspond au terrain qui sera exploité dans les prochaines années ; l'on n'y placera donc pas le système non plus. En tenant compte des vents dominants provenant du Sud-Ouest, et de la présence d'un bassin d'orage, la position la plus cohérente pour l'éolienne serait celle proposée en jaune sur le graphique.

Une étude à l'aide du programme *Fluent* aurait été nécessaire pour confirmer ce choix.

Quant à l'installation entière, proposons-nous de la placer comme suit, de manière à profiter un maximum du relief préexistant :

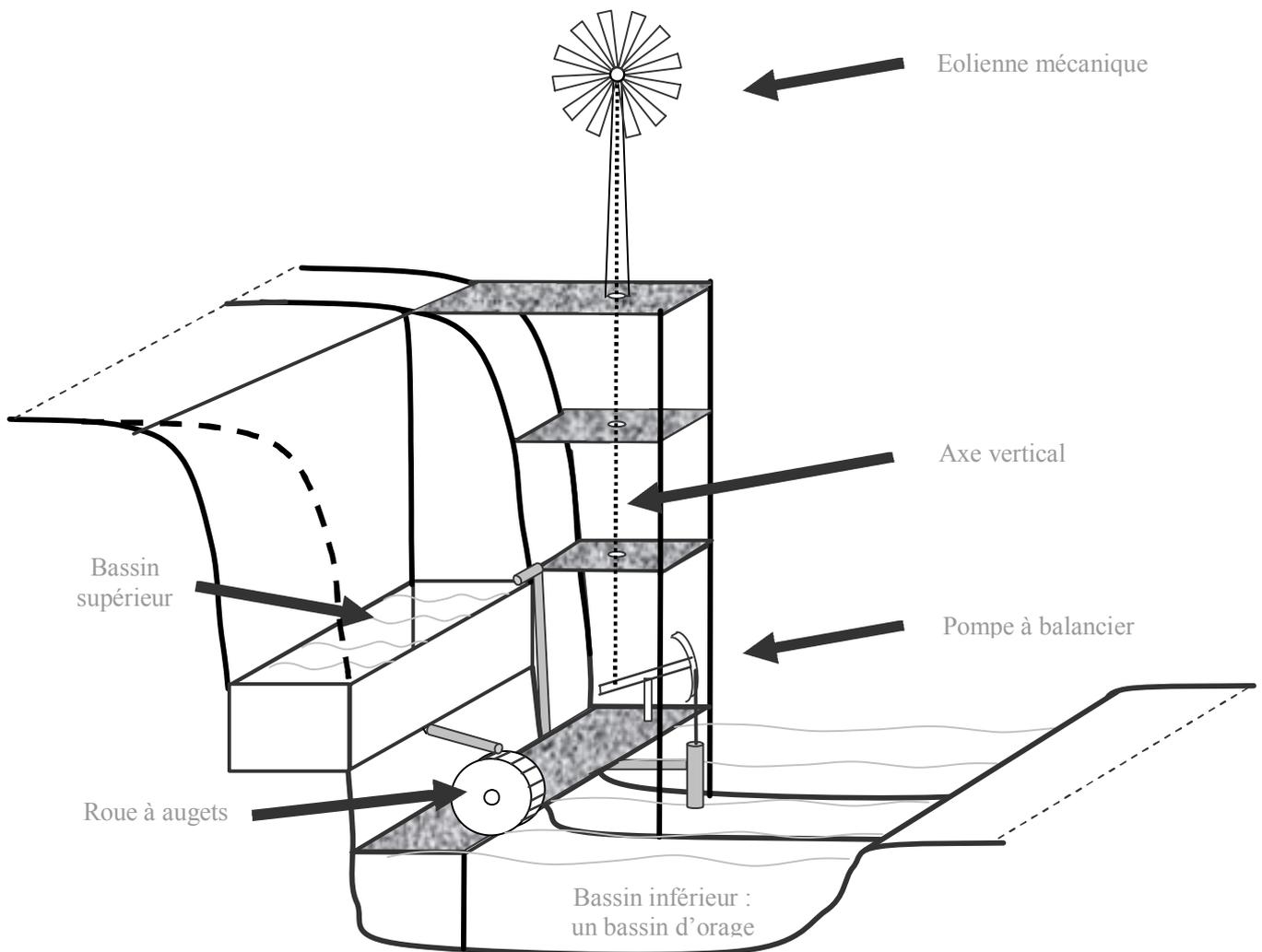


Figure 30 : Proposition de positionnement et structure de l'installation

La hauteur du bassin peut ainsi aller jusqu'à 30 mètres tout en profitant du relief. Ce dessin ne constitue qu'une proposition de positionnement, de manière à ce que l'on visualise bien l'ensemble de l'installation.

Passons maintenant à l'étude de faisabilité du cas d'un assouvissement complet de besoins énergétiques.

### 3.3. Cas d'un assouvissement complet des besoins électriques

#### 3.3.1. Relations entre les différentes grandeurs et calculs

Soit la partie descendante de notre installation :

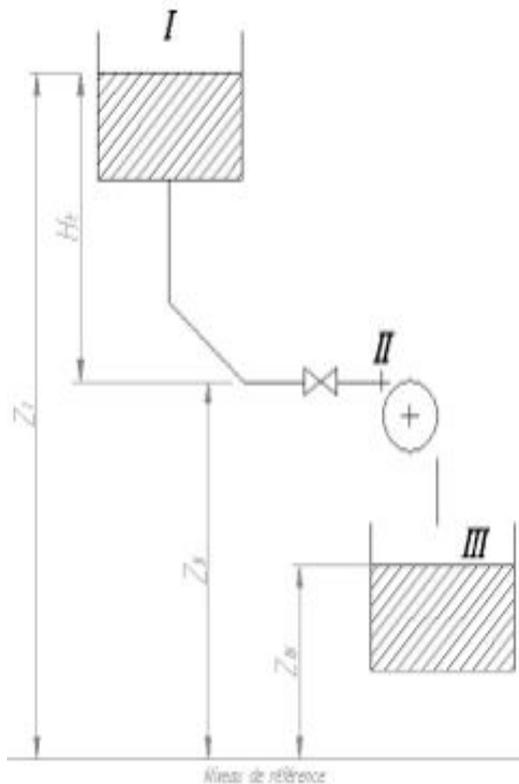


Figure 31 : Schéma hydraulique de la partie descendante

La puissance électrique nécessaire provient de la roue à augets dont l'entrée est représentée par le point II. L'eau devra donc posséder et puis transmettre une certaine puissance à la roue. Tout ce qui se trouve après la roue n'intervient donc pas dans le calcul du débit et du bassin supérieur.

Le dimensionnement de la roue à augets ainsi que l'électronique de puissance s'y rapportant faisant l'objet du travail de fin d'étude d'*Amin Gourad*, nous allons émettre l'hypothèse que la puissance utile nécessaire à la roue à augets inclus un certain rendement  $\eta_{roue}=0,65$ , tenant compte des différentes pertes (électriques et mécaniques).

Ainsi, pour assouvir entièrement les besoins énergétiques de la sablière, on a besoin d'une puissance électrique de 225 kW, et donc, 385 kW ( $250/0,65$ ) hydrauliques sont nécessaires.

#### 3.2.1.1. Hauteur de chute totale et puissance d'une chute d'eau

Soit  $Z_I$  et  $Z_{II}$  les cotes des points I et II rapportées à un plan horizontal de référence arbitraire (si ce plan est au niveau moyen de la mer, ces cotes sont les altitudes des points). La hauteur de chute totale est la différence :

$$H_t = Z_I - Z_{II}$$

A cette hauteur de chute correspond, pour chaque valeur du débit volumique  $Q_v$ , une puissance  $P_t$ , ou encore puissance naturelle. C'est la puissance dépensée par le débit  $Q_v$  lorsqu'il s'écoule de I à II. C'est cette puissance qui est partiellement transformée en énergie mécanique sur l'arbre de la roue. Calculons-la.

On sait, de par le théorème de Bernoulli, que l'énergie d'1kg d'eau situé à l'altitude z, animé de la vitesse v et soumis à la pression p a pour expression :

$$H = v^2/2g + p/\rho g + z \quad [\text{m de colonne de fluide}]$$

Désignons par  $p_I$ ,  $p_{II}$  et  $v_I$ ,  $v_{II}$  les valeurs de la pression atmosphérique et des vitesses moyennes de l'eau dans les sections I et II. L'énergie d'un kg d'eau dans chacune de ces sections est  $H_I$  et  $H_{II}$ . La puissance naturelle a pour valeur :

$$P_{\text{hydrau}} = P_t = \rho * g * Q_v * (H_I - H_{II})$$

$$P_t = [ (v_I^2 - v_{II}^2) / 2g + (p_I - p_{II}) / \rho g + (Z_I - Z_{II}) ] * \rho g * Q_{v \text{ roue}} \quad [\text{W}]$$

Les deux premiers termes de la parenthèse sont négligeables par rapport au dernier. En effet, supposons par exemple que :

$$Z_I - Z_{II} = 500 \text{ m} \quad ; \quad v_I = 2 \text{ m/s} \quad ; \quad v_{II} = 1 \text{ m/s}$$

Nous avons donc :

$$(v_I^2 - v_{II}^2) / 2g = 0,15 \text{ m} \quad \text{et} \quad (p_I - p_{II}) / \rho g = -0,65 \text{ m} \quad \text{et} \quad \ll 500\text{m} \quad ^{11}$$

La puissance totale théorique valable pour toute installation hydraulique est alors donnée par la formule :

$$P_{\text{hydrau}} = P_t = \rho * g * Q_v * H_t \quad [\text{W}]$$

- $Q_v$  : débit de la chute en  $\text{m}^3/\text{s}$
- $g$  : accélération gravitationnelle égale à  $9,81 \text{ m/s}^2$
- $H_t$  : hauteur de la chute en mètres
- $\rho$  : masse volumique de l'eau égale à  $1000 \text{ kg/m}^3$

<sup>11</sup> La loi de variation de la pression atmosphérique en fonction de la hauteur de chute totale est, en effet, approximativement la suivante :

$$\log (p_I/p_{II}) = H_t / 18500$$

A titre d'exemple :

Considérons une chute d'eau de 10 mètres, avec un débit de 0,1 m<sup>3</sup>/s. La puissance que possède l'eau au bas de la chute peut être aisément calculée à partir de la formule vue plus haut :

$$P_{\text{hydrau}} = 9,81 * 1000 * 0,1 * 10 = 9810 \text{ W} = 9,81 \text{ kJ/s}$$

La formule de la puissance totale se traduit souvent en tenant compte d'un certain rendement global qui tient compte de toutes les pertes de puissance :

$$P_{\text{roue}} = P_{\text{hydrau}} * \eta_{\text{gl roue}} \quad [\text{W}]$$

Dans notre cas, ces pertes sont les suivantes :

$$\left. \begin{array}{l} 1) \text{ pertes de charge dans les ouvrages d'amenée : } 5 \text{ à } 8 \% \\ 2) \text{ pertes dans la roue à augets : } 30 \text{ à } 35 \% \\ 3) \text{ pertes dans l'alternateur : } 1 \text{ à } 3 \% \end{array} \right\} \eta_{\text{roue}} \approx 0,65 \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} 1) \\ 2) \\ 3) \end{array}} \right\} \eta_{\text{gl roue}} \approx 0,6$$

Comme dit plus haut, nous allons estimer que le rendement de la roue et de l'alternateur est de 65 %. Les diverses pertes de charges, longitudinales et singulières (la vanne et les différents coudes) seront dans un premier temps évaluées par un rendement de 92 %.

Il ne va pas sans dire que le rendement global est médiocre. Dans les installations de plus grandes puissances, où il ne s'agit pas d'une roue à augets mais de turbines, le rendement global est généralement compris entre 76 et 88 %, pour une chute allant jusque 500m de hauteur.

Mais comment déterminer, dans notre cas, les valeurs optimales du débit et de la hauteur de chute ?

### 3.2.1.2. Dimensionnement du bassin supérieur

La consommation de la sablière étant de plus ou moins  $225\text{kW}_{\text{électrique}}$  pendant ses heures de fonctionnement, nous pouvons tracer la courbe liant le débit et la hauteur pour la puissance hydraulique constante de  $375\text{kW}$ :

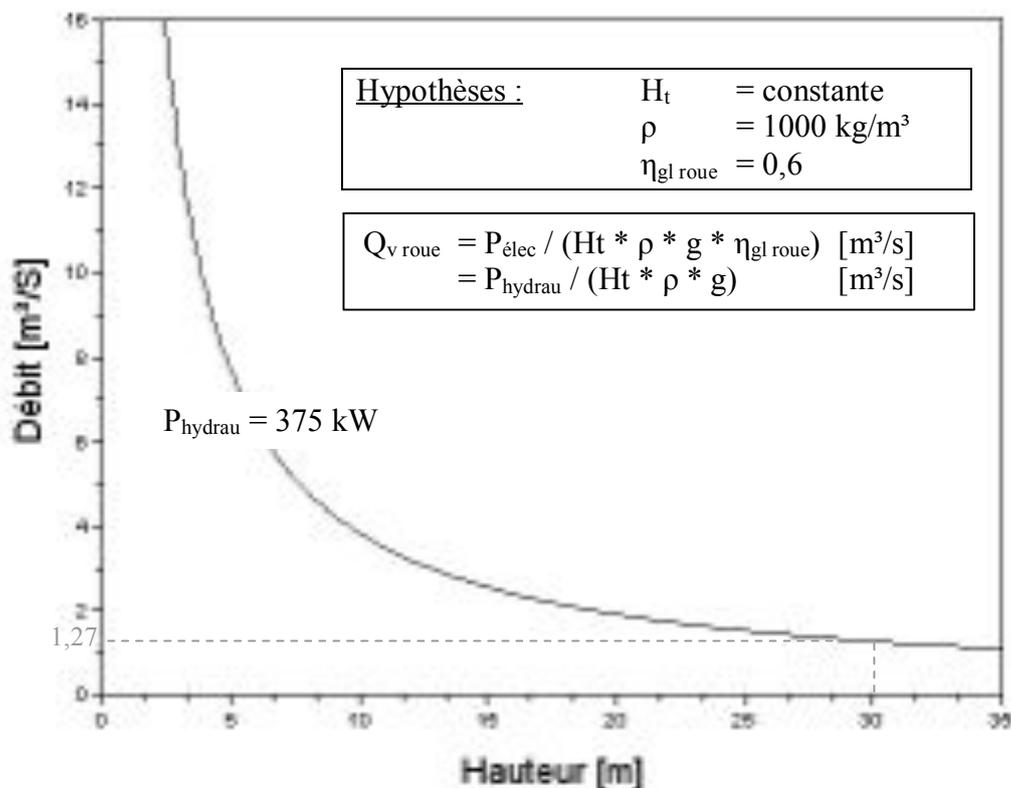


Figure 32 : Débit fonction de la hauteur de chute pour une puissance de  $375\text{kW}$  hydraulique

Remarquons que nous pouvons profiter du relief et avoir une grande hauteur de chute. Tant mieux car le débit d'eau nécessaire n'en sera que plus réduit, de même que le volume du bassin supérieur.

De par le relief de la sablière, la hauteur de chute que nous pouvons utiliser peut aller jusqu'à 30 mètres. Nous obtenons, en remplaçant cette valeur dans l'équation ci-dessus, pour une puissance de  $225\text{kW}_{\text{électrique}}$ , et donc  $375\text{kW}_{\text{hydraulique}}$ , un débit volume  $Q_{v \text{ pompe}}$  égal à  $1,27\text{m}^3/\text{s}$ . Cela veut donc dire que, si nous voulons assouvir entièrement les besoins électriques de la sablière, la surface de l'eau du bassin supérieur se situant à 30 mètres au dessus du niveau d'entrée de la roue à augets, un débit de  $1,27 \text{ m}^3$  d'eau par seconde serait nécessaire. Ce qui implique que si l'installation doit marcher durant les 5 jours d'absence de vent, le bassin devrait avoir un volume de :

$$V = 1,27 \text{ m}^3/\text{s} * 3600\text{s} * 9 \text{ (heures)} * 5 \text{ (jours)} = 205\,740 \text{ m}^3$$

Soit un bassin de 5 mètres de profondeur, pour une surface de 41 148 m<sup>2</sup>. Si nous reprenons notre plan de la sablière, nous pourrions le placer tel que représenté en orange :



Figure 33 : Placement du bassin supérieur

Comme nous pouvons le remarquer, un tel bassin paraît énorme. Sa surface devrait se trouver 30 mètres au dessus de la roue à augets, et donc au pied de l'éolienne de pompage.

Mais attention, nous avons plus haut émis l'hypothèse que la hauteur de chute totale  $H_t$  était constante ! Mais en fait, plus le bassin se vide, plus  $H_t$  diminue pour atteindre  $30-5=25$  mètres, ce qui implique un plus grand débit pour une même puissance<sup>12</sup>. Ainsi, le volume du bassin doit en fait être de 230 000 m<sup>3</sup>, pour 5 jours d'absence de vent. Ce cas paraît déjà fort peu faisable, mais assurons-nous en tout de même.

### 3.3.2. Faisabilité

Le premier point à vérifier est bien évidemment de savoir si oui ou non, la partie « montante » est capable de remonter autant d'eau en peu de temps.

L'énergie que l'éolienne mécanique devrait déployer pour remonter une telle quantité d'eau est tout simplement faramineuse ! De plus, son rendement et celui de la pompe doivent intervenir ! Si nous considérons une éolienne mécanique placée à 10 mètres d'altitude, avec un rotor de 5 mètres de diamètre, la puissance qu'elle saurait récupérer serait en moyenne de 400W (Voir le cas d'un assouvissement partiel des besoins électriques). Il faudrait en fait un système composé de pas moins de 550 éoliennes de pompage pour assurer un débit pompé suffisant, ou, à titre de comparaison, 5 éoliennes de 50 mètres de diamètre. De plus, le volume d'eau du bassin varie suivant le débit remonté, fonction du vent. Il ne suffit donc pas de

<sup>12</sup> Voir Annexes III p.62 chapitre III.II

déterminer la période maximale d'absence de vent, il faut utiliser la méthode des débits cumulés<sup>13</sup>. Après calcul, c'est en fait un bassin supérieur de 3 300 000 de m<sup>3</sup> qui serait requis !

### 3.3.3. Conclusion concernant le cas envisagé

Comme nous venons de le démontrer, l'assouvissement complet des besoins électriques de la sablière n'est pas faisable à l'aide du système de production composé d'éoliennes mécaniques. On pouvait s'en douter dès le début, vu la puissance que nécessite la sablière. De plus, autant directement installer une, voire deux éoliennes électriques de 250 kW ; la présence de la pompe, des bassins et de la roue à augets n'étant plus nécessaire !

Mais l'on peut tout de même envisager un système qui permettrait une production d'électricité plus importante, mais composé d'une éolienne et d'une pompe/turbine électriques. En effet, malgré que ça ne fasse pas l'objet de ce travail, proposons une modification du système de production, dont voici le schéma :

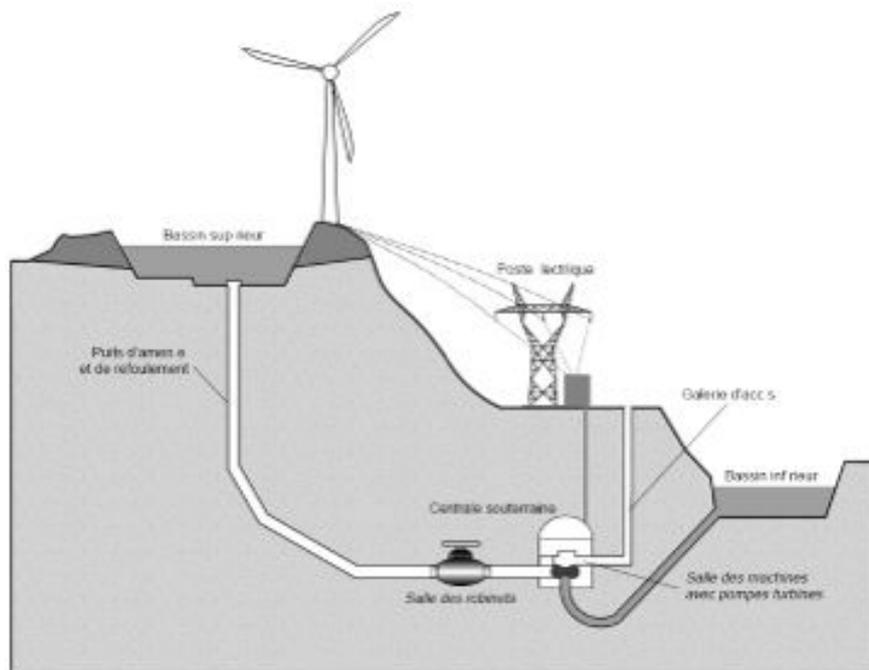


Figure 34: Schéma de principe de l'extension du système de production

Le principe serait le suivant : si l'éolienne tourne, la puissance serait directement injectée au réseau en heures pleines, et en heures creuses, elle servirait à pomper l'eau vers le bassin supérieur. L'étude d'un tel système n'étant pas l'objet de ce TFE, je ne peux que la suggérer. Ayant acquis certaines bases de calculs, continuons alors notre étude dans un but d'assouvissement partiel des besoins énergétiques.

<sup>13</sup> Voir Annexes III p.70 chapitre III.VII

### 3.4. Cas d'un assouvissement partiel des besoins électriques

#### 3.4.1. Introduction

Ne pas considérer l'éventualité d'un système de production assouvissant entièrement les besoins énergétiques aurait été une négligence. Mais dès lors, comment s'y prendre pour dimensionner l'installation ? Sur quelles puissances faut-il se baser ?

Comme tous les éléments du projet, c'est-à-dire la roue à augets, le bassin, la pompe et l'éolienne sont dépendants les uns des autres, nous sommes bien obligés de fixer un paramètre à l'un de ces éléments pour pouvoir (re)commencer. Nous allons alors considérer dans un premier temps que le dimensionnement du bassin n'est plus primordial, et nous intéresser plutôt à la puissance récupérable par le système de base constitué d'une seule éolienne mécanique. Nous recommencerons cette fois notre étude par la partie « montante ». Après avoir déterminé cette puissance pour une seule éolienne, nous allons envisager le même système avec plusieurs éoliennes et plusieurs pompes de manière à produire un maximum de puissance pour un minimum d'investissement.

#### 3.4.2. Système avec une seule éolienne de pompage mécanique

Soit le schéma :

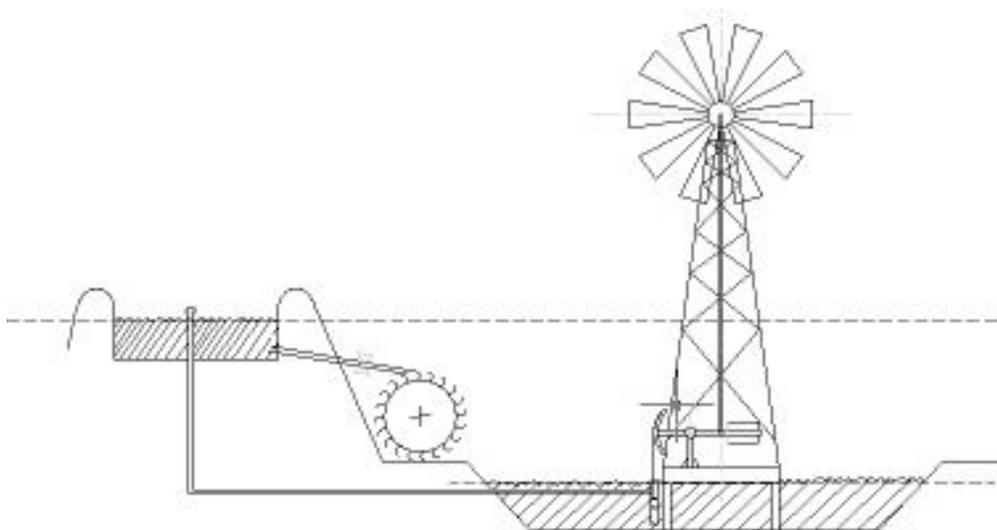
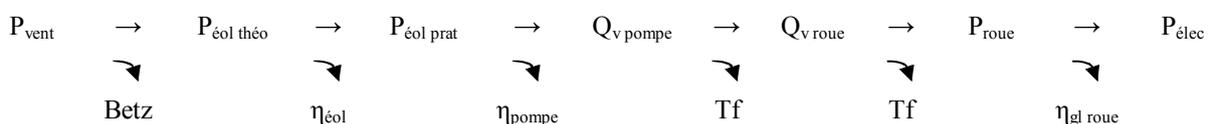


Figure 35 : Schéma de l'installation à une éolienne de pompage

Voici la manière dont nous allons procéder :



### 3.4.2.1 Puissance récupérable par une éolienne de pompage

La puissance maximale récupérable par une éolienne quelconque est donnée par la formule<sup>14</sup> :

$$P_{\text{éol théo}} = \underbrace{16/27 * 1/2 * \rho * S * V^3}_{0,37} \text{ [W]} \quad \text{: limite de Betz}^{15}$$

- P : Puissance récupérable en [W]
- S : Surface balayée par les pales de l'éolienne [m<sup>2</sup>]
- V : Vitesse instantanée du vent [m/s]
- ρ : Masse volumique de l'air égale à 1,25 kg/m<sup>3</sup>

La puissance récupérable est donc proportionnelle au cube de la vitesse du vent et au carré du diamètre de l'éolienne.

Après une recherche chez des fabricants d'éoliennes, j'ai trouvé quelques caractéristiques d'éoliennes multipales qui sont sur le marché. Prenons par exemple les éolienne de modèle 802 que propose l'entreprise espagnole « *Juan y David Borney, S.L.* »<sup>16</sup> :

**Tableau 8 : Caractéristiques d'éoliennes de pompage mécanique de l'entreprise JBornay**

Model 802*	Mill Size Wheel Dia. (Ft.)	Stroke inches		No. Of Sails	Mill Ship'g Weight (Pounds)	Back Geared	Max. Strokes Per Minute	At Wind Velocity	Max. Wheel RPM	Weight Of Crated Motor
		Long	Short							
X	6	5"	3 1/2"	18	210	3.91-1	32	15-18 mph	125	100
A	8	7 1/8"	5 1/4"	18	355	3.29-1	32	15-18 mph	105	175
B	10	9 1/4"	7 1/4"	18	655	3.29-1	26	15-18 mph	85	330
D	12	11 1/4"	8 1/4"	18	1130	3.50-1	21	18-20 mph	73	540
E	14	13 1/2"	9 1/4"	18	1870	3.43-1	18	18-20 mph	62	805
F	16	14 7/8"	11 3/8"	18	2585	3.29-1	16	18-20 mph	53	1180

\* Model 802 Windmills were introduced in 1981 and parts are interchangeable with Model 702 Windmills introduced in 1933.

Remarques : 1 inch = 2,54 cm, 1 foot = 30,48 cm, 1 mile = 8/5 km

Nous remarquons que ces éoliennes de pompage peuvent aller jusqu'à 5 mètres de diamètre (pour le modèle 802F de *Jbornay*). Il est clair que nous avons tout intérêt à prendre une éolienne ayant un diamètre le plus grand possible.

<sup>14</sup> Cette formule est démontrée en Annexes I p.9 chapitre I.VI

<sup>15</sup> Les détails de la démonstration sont fournis en Annexe III p.59 chapitre III.I

<sup>16</sup> La brochure se trouve en Annexes IV p. 75 chapitre IV.II

En effet, la figure suivante représente les puissances récupérables en fonction de la vitesse du vent pour différents diamètres :

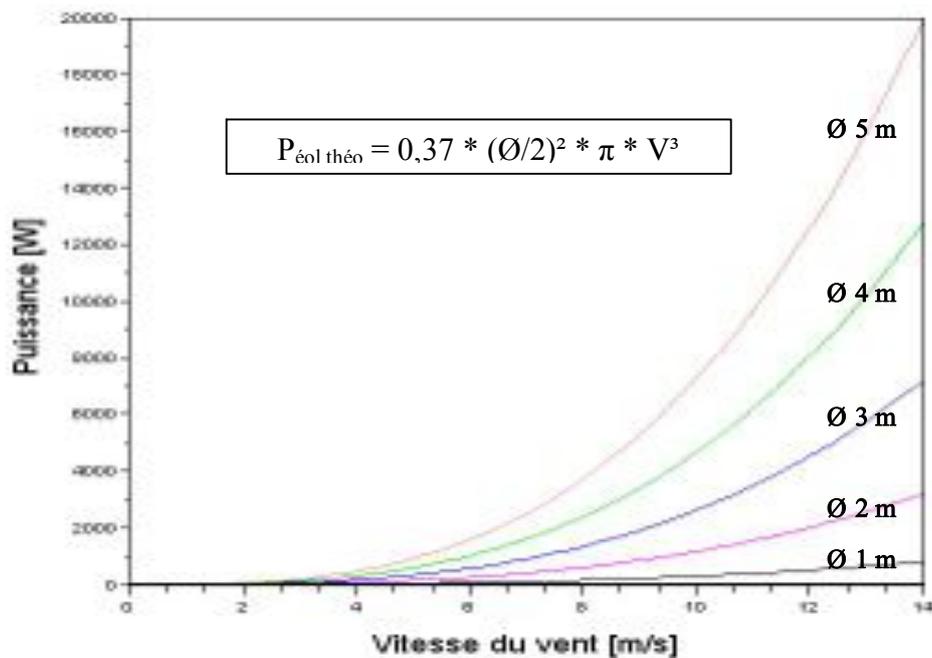


Figure 36 : Puissance récupérée en fonction du diamètre de l'éolienne et de la vitesse du vent

Comme nous avons besoin d'un maximum de puissance, choisissons l'éolienne 802F de Jborney, ayant 5 mètres de diamètre. Voici dès lors les premières caractéristiques de l'éolienne choisie :

Tableau 9 : Premières caractéristiques de l'éoliennes choisie

Diamètre	5 m
Vitesse de démarrage	2 m/s
Vitesse d'arrêt	25 m/s
Hauteur	10 m
Nombre de pales	18
Coût de l'éolienne et de la pompe associée	10 000€

Du point de vue des coûts, prenons le tableau situé en Annexes IV p.73 chapitre IV.I. Ce constructeur propose des ensembles composés de l'éolienne de pompage de 4 mètres de diamètre et de la pompe associée, le tout pour 7000 à 8700 € TVA incluse, hors frais d'envoi. Le coût de l'éolienne choisie et de sa pompe associée ne devrait donc pas a priori dépasser les 10 000€.

### 3.4.2.2 Puissance transmissible par l'éolienne multipale

Il faut encore multiplier la puissance récupérable par un rendement, qui pour les éoliennes mécaniques est généralement de l'ordre de 0,5. On obtient dès lors la puissance transmissible par cette éolienne :

$$P_{\text{éol prat}} = P_{\text{éol th}} * \eta_{\text{éol}} = 0,185 * S * V^3 \quad [\text{W}]$$

Les courbes dessinées plus haut ne tenaient pas compte du rendement propre à l'éolienne. Car dans le cas où l'éolienne a un rendement  $\eta_{\text{éol}}$  de 0,5, la puissance serait divisée par deux :

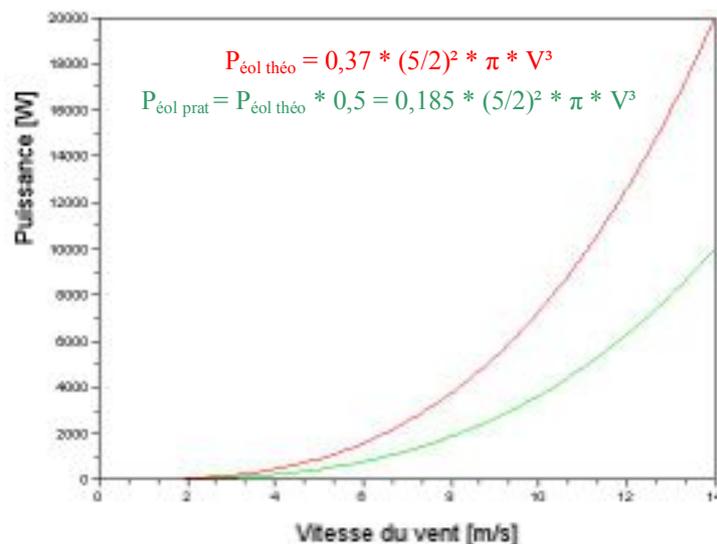


Figure 37 : Puissance transmissible par une éolienne de 5 mètres de diamètre en fonction de la vitesse du vent

Les évolutions des puissances qu'auraient pu transmettre l'éolienne en 2004 et 2005 se trouvent en Annexes III p.65 chapitre III.III. Nous obtenons alors qu'en moyenne, l'éolienne mécanique sait transmettre :

$$P_{\text{éol moy}} = 400 \text{ W} \quad \text{soit sur une année :} \quad 3,5 \text{ MWh}$$

Mais quel sera la vitesse nominale de l'éolienne ? Son dimensionnement en dépend ! Faut-il prendre la vitesse moyenne de 4m/s ? Non, car les vents qui fournissent le plus d'énergie sur l'année ne sont pas forcément ceux que l'on croit.

En effet, voici la densité de puissance déterminée à partir de la distribution de Weibull générale :

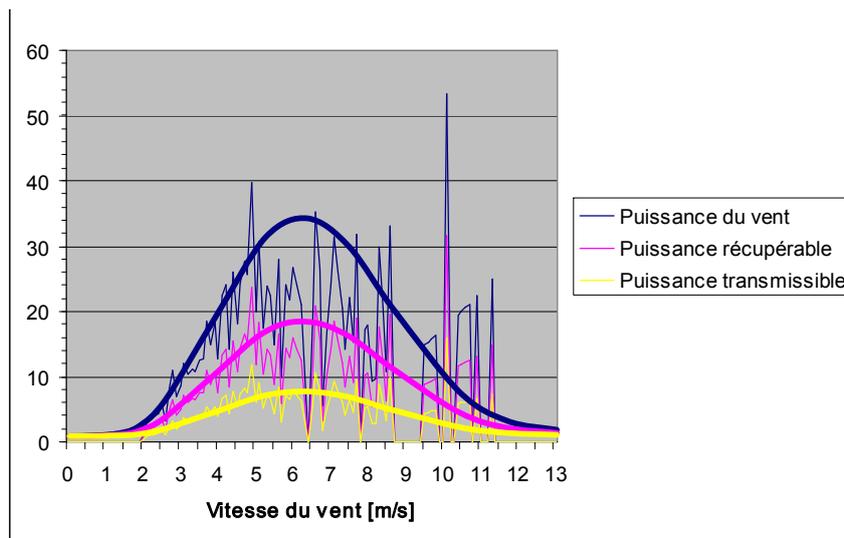


Figure 38 : Densité de puissance

Cette densité de puissance est en fait une distribution de l'énergie éolienne à des vitesses de vent différentes.

La zone au-dessous de la courbe bleue (jusqu'à l'axe horizontal en bas) nous indique la quantité de puissance éolienne par mètre carré de flux d'air que nous pouvons espérer obtenir sur le site de la sablière. La zone au-dessous de la courbe mauve indique la puissance théoriquement convertible en puissance mécanique (c.-à-d.  $16/27$  de la puissance totale du vent, selon la loi de Betz). L'entière zone au-dessous de la courbe jaune nous indique la puissance que produira une éolienne sur le site en question, c'est-à-dire la puissance transmissible. La surface de cette dernière étant égale à la puissance moyenne transmissible, c'est-à-dire  $\pm 400$  W.

Nous remarquons alors que ce sont les vents soufflant entre 6 et 7 m/s qui fournissent le plus d'énergie sur une année. L'éolienne et la pompe devront donc être dimensionnées de manière à avoir des rendements maximaux pour ces vitesses-là.

Tableau 10 : Caractéristiques générales de l'éolienne choisie

Diamètre	5 m
Vitesse de démarrage	2 m/s
Vitesse nominale	7 m/s
Vitesse d'arrêt	25 m/s
Rendement	0,5
Hauteur du mât	10 m
Nombre de pales	18
Coût de l'éolienne et de la pompe associée	10 000€

### 3.4.2.3 Puissances transmissibles par la pompe

L'éolienne va transmettre cette énergie vers une pompe à balancier. Cette pompe ayant fait l'objet du travail de fin d'étude de *Rachid Essabih*, je vais seulement faire une approximation de ses performances par un rendement, tenant compte les pertes mécaniques :

$$P_{\text{pompe}} = \eta_{\text{pompe}} * P_{\text{éol prat}}$$

Le rendement d'une pompe peut très fortement varier suivant son type. En effet, les rendements généralement admis sont :

- Pompe à piston = 0,6 à 0,7
- Pompe centrifuges = 0,4 à 0,8

Comme la pompe que nous allons utiliser est une pompe à balancier, et que la transmission de puissance se fait mécaniquement par le biais d'un vilebrequin et d'un axe vertical, acceptons comme valeur de rendement :

$$\eta_{\text{pompe}} = 0,5$$

En reprenant la puissance moyenne de l'éolienne, la pompe transmet en moyenne :

$$P_{\text{pompe moy}} = P_{\text{éol moy}} * \eta_{\text{pompe}} = 400 * 0,5 = 200 \text{ W}$$

Les graphiques des évolutions de la puissance pour les années 2004 et 2005 sont situés en Annexes III p.66 chapitre III.IV.

Maintenant que nous avons déterminé la puissance que sait transmettre la pompe, nous devrions être capable d'en déduire le débit d'eau remonté.

### 3.4.2.4 Calcul du débit remonté par la pompe

Comme nous avons calculé précédemment, la pompe reçoit une certaine puissance de l'éolienne, puissance qu'elle va transmettre à l'eau sous forme d'un relèvement de charge afin de lui permettre de gravir, à travers une conduite, la dénivellation qui la sépare du bassin supérieur. Mais quelle sera cette dénivellation ?

Soit la partie « montante » de notre installation :

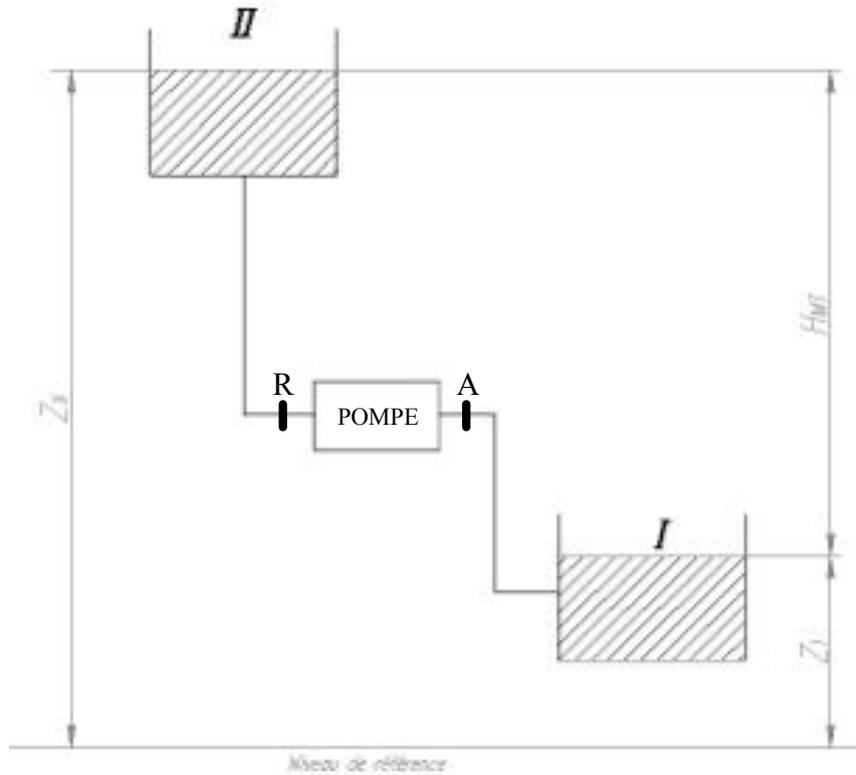


Figure 39 : Schéma hydraulique de la partie montante

On désigne par A et R les sections d'aspiration et de refoulement de la pompe.  $Z_I$  et  $Z_{II}$  sont les altitudes des niveaux dans les bassins inférieurs et supérieurs. Le fluide est supposé incompressible. Nous pouvons dès lors appliquer l'équation de Bernoulli généralisée :

$$\boxed{\mathcal{H}_I = \mathcal{H}_A + \mathcal{T}f_{IA}} \quad [\text{J/kg}] \quad \text{et} \quad \boxed{\mathcal{H}_R = \mathcal{H}_{II} + \mathcal{T}f_{RII}} \quad [\text{J/kg}]$$

La pompe devant réaliser le relèvement de charge  $\Delta_A^R \mathcal{H}$  :

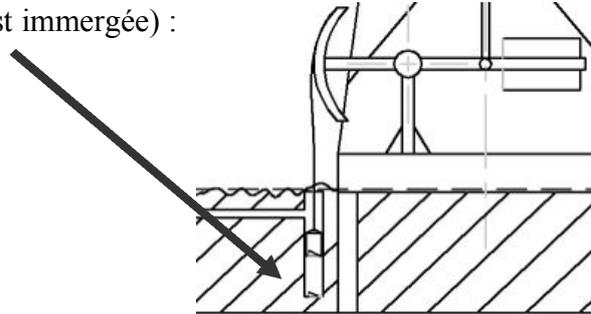
$$\Delta_A^R \mathcal{H} = \mathcal{H}_R - \mathcal{H}_A = \mathcal{H}_{II} - \mathcal{H}_I + \mathcal{T}f_{IA} + \mathcal{T}f_{RII}$$

ou encore :

$$\boxed{\Delta_A^R \mathcal{H} = p_{II}/\rho - p_I/\rho + g * (Z_{II} - Z_I) + v_{II}^2/2 - v_I^2/2 + \mathcal{T}f_{IA} + \mathcal{T}f_{RII}} \quad [\text{J/kg}]$$

Cette équation se simplifie très fortement dans notre cas car :

- $p_I \approx p_{II} = p_{\text{atmosphérique}}$  (les bassins ne sont pas sous pression),
- $v_I$  et  $v_{II}$  peuvent être considérées comme faibles (l'eau est supposée stagnante).
- Les pertes de charge  $\mathcal{T}f_{IA}$  peuvent aussi être négligées, puisqu'il n'y a pas de canalisation à l'aspiration (l'aspiration est immergée) :



Notre équation se résume donc à :

$$\Delta_A^R \mathcal{H} = g * (Z_{II} - Z_I) + \mathcal{T}f_{RII} = g * H_{MT} + \mathcal{T}f_{RII}$$

avec

$$\Delta_A^R \mathcal{H} = P_{\text{pompe}} / Q_m = P_{\text{pompe}} / (\rho * Q_v)$$

donc

$$Q_{v \text{ pompe}} = P_{\text{pompe}} / (\rho * g * H_{MT} + \rho * \mathcal{T}f_{RII}) \quad [m^3/s]$$

Mais que vaut  $\mathcal{T}f_{RII}$  ?

Les pertes de charge sont réparties en deux catégories :

- Les pertes de charge longitudinales  $\mathcal{T}f_{RII,L}$
  - Les pertes de charge singulières  $\mathcal{T}f_{RII,S}$
- $$\left. \begin{array}{l} \text{ } \\ \text{ } \end{array} \right\} \mathcal{T}f_{RII} = \mathcal{T}f_{RII,L} + \mathcal{T}f_{RII,S}$$

Mais tout d'abord, permettons-nous de les négliger.

**Débit remonté sans prise en compte des pertes de charge**

Le débit s'exprime alors :

$$Q_{v \text{ pompe}} = P_{\text{pompe}} / (\rho * g * H_{MT}) \quad [m^3/s]$$

Mais nous n'avons pas encore déterminé  $Q_v$  et  $H_{MT}$  ! Il faut donc fixer un des deux paramètres. Pour cela, reprenons la puissance moyenne de la pompe :

$$P_{\text{pompe moy}} = \eta_{\text{pompe}} * P_{\text{éol pr moy}} = 200 \text{ W}$$

Donc, si nous prenons une puissance de 200 W, nous obtenons un débit de :

$$Q_{v \text{ pompe moy}} = 0,0204 / H_{MT}$$

Soit sous forme graphique :

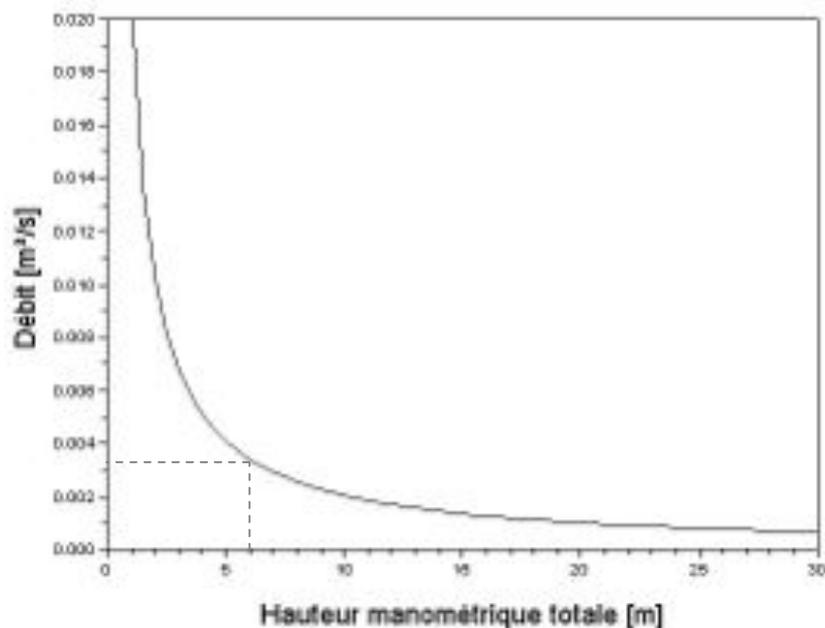


Figure 40 : Débit pompé en fonction de la hauteur manométrique totale pour une puissance de 200W

Nous obtenons une courbe de même allure que précédemment concernant la partie descendante, ce qui est tout à fait normal. Nous voyons que dans le but de limiter les pertes de charge, autant pour le pompage que pour le « turbinage », nous avons tout intérêt à limiter la hauteur du bassin supérieur, et donc de pompage. Mais attention, cela entraîne qu'un plus grand débit sera nécessaire à la production d'électricité à travers la roue à augets, ce qui a pour conséquence d'augmenter la taille du bassin.

Mais nous avons des restrictions. En effet, comme le diamètre d'une roue à augets est généralement de 4 mètres, nous devons remonter l'eau à plus de 4 mètres. Posons comme hypothèse que la hauteur manométrique totale est de 6 mètres.

Le débit serait alors de :

$$Q_v \text{ pompe moy} = 3,4 \text{ l/s}$$

Mais attention, car plus on remplit le bassin, plus la hauteur d'eau augmente, et donc, plus le débit diminue ! Mais parallèlement, plus la hauteur d'eau augmente, plus on saura créer de puissance à la roue à augets. Les deux effets s'annulent donc, exprimant ainsi une conservation d'énergie, si les pertes de charge sont négligées.

En fonction de la vitesse du vent, nous obtenons :

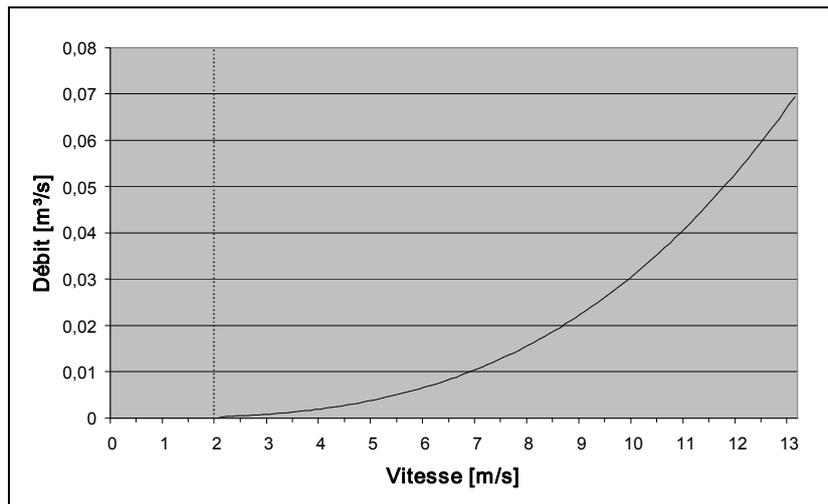


Figure 41 : Débit pompé en fonction de la vitesse du vent

Donc, pour les années 2004 et 2005

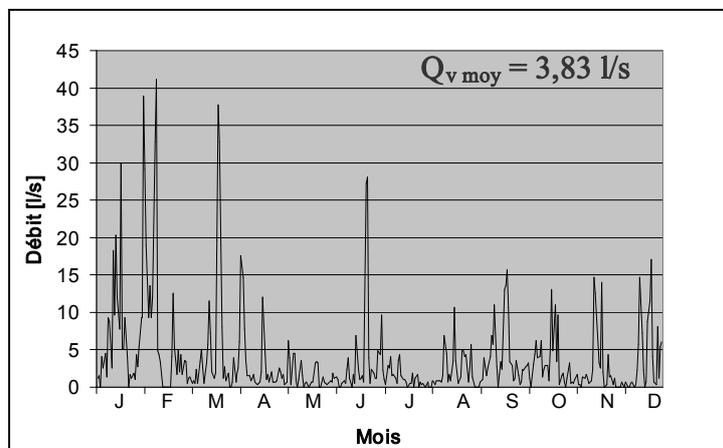


Figure 42 : Débit remonté pour l'année 2004

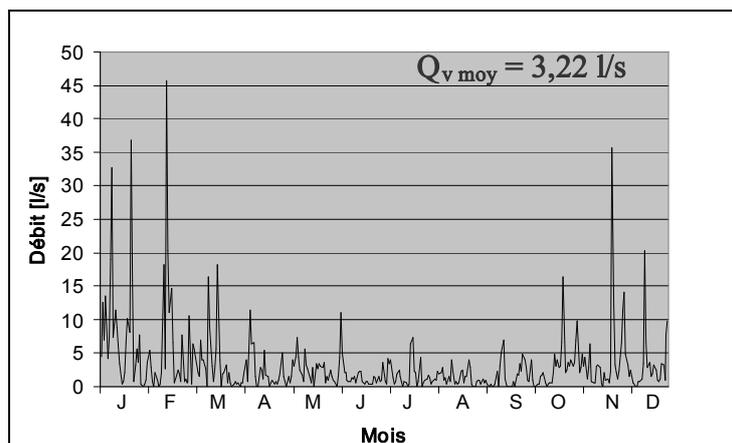


Figure 43 : Débit remonté pour l'année 2005

**Débit remonté avec prise en compte des pertes de charge****- Pertes de charge longitudinales**

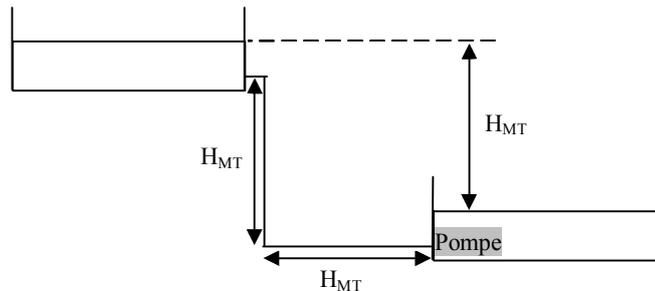
Les pertes longitudinales s'expriment sous la forme :

$$\mathcal{T}_{RII,L} = \lambda * L/D_h * v^2/2 \quad \text{en J/kg}$$

- $\lambda$  : coefficient fonction de  $\varepsilon/D_h$  et du nombre de Reynolds  $Re$  [/]  
 $\varepsilon$  : la rugosité relative de la paroi du conduit [m]  
 $Re = v * D_h/\nu$  : le nombre de Reynolds [/]  
 $\nu$  : la viscosité cinématique du fluide [m<sup>2</sup>/s]  
 $L$  : longueur de tuyauterie [m]  
 $D_h = 4Q/P$  : diamètre hydraulique [m] de la canalisation avec  $P$  : son périmètre et  $S$  : sa surface  
 $v$  : vitesse du fluide dans la canalisation [m/s]

Considérons que :

- $L = 2 * H_{MT} = 12 \text{ m}$



**Figure 44 : Longueur de la canalisation montante**

- $\varepsilon = 1 * 10^{-3} \text{ m}$  (ce qui correspond à un tuyau en acier avec rouille et incrustations)
- $D_h = 0,2 \text{ m} \Rightarrow S = 0,0314 \text{ m}^2$  (hypothèse)
- $Re > 3000$  (écoulement turbulent)
- $100\lambda = 3$  (voir page suivante : diagramme de Moody, qui représente le coefficient de perte de charge  $\lambda$  en fonction du nombre de Reynolds  $Re$  et de la rugosité relative  $\varepsilon$  et du diamètre hydraulique  $d$ )

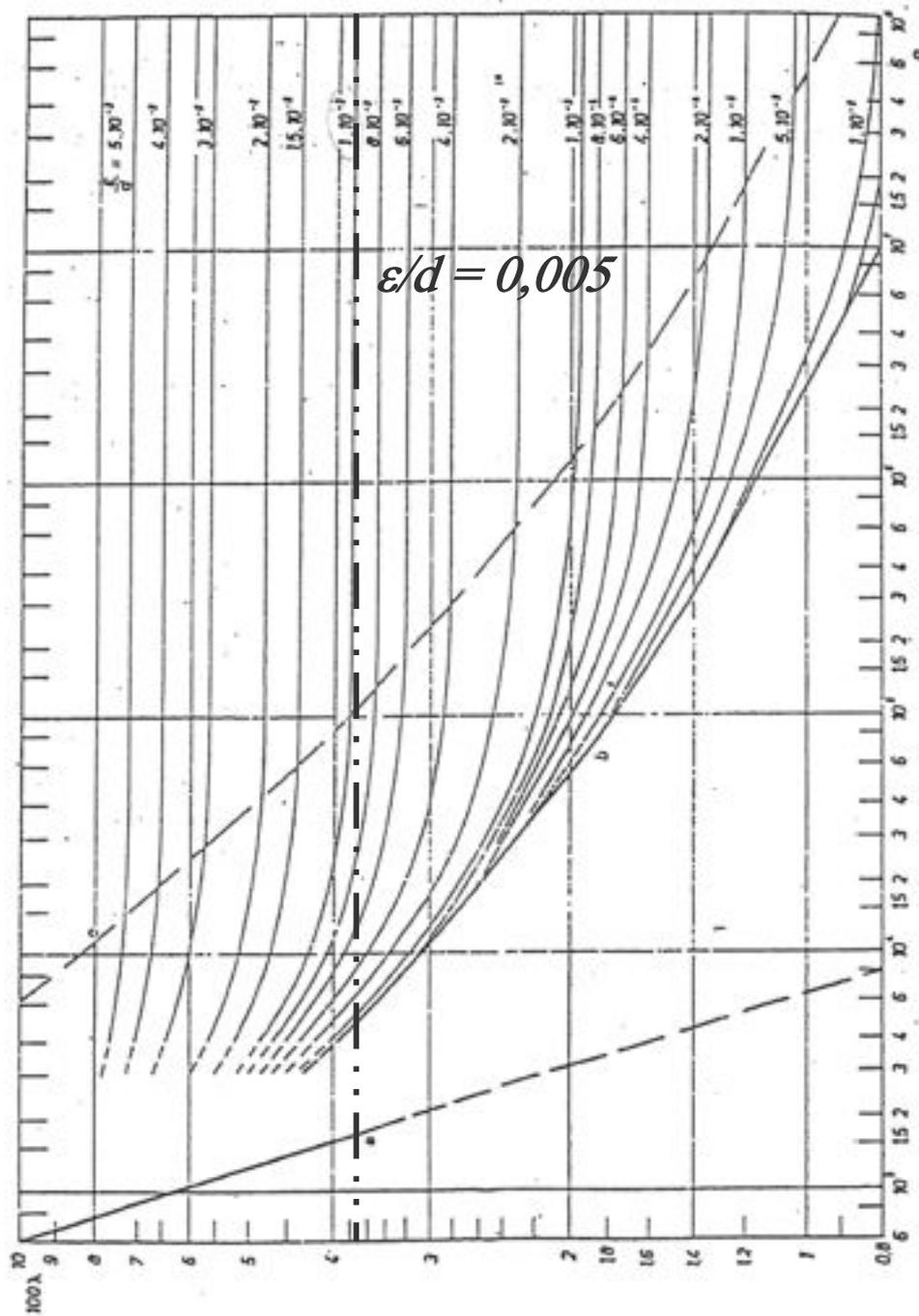


Figure 45 : Diagramme de Moody

- $v = 1,236 \text{ mm}^2/\text{s} = 1,236 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  (eau propre à 12°C)
- $v = Q_v \text{ pompe moy}/S = 32 * Q_v \text{ pompe moy}$

Nous obtenons alors :

$$\mathcal{T}f_{RII,L} = 0,03 * 12 / 0,2 * (32 * Q_v \text{ pompe})^2 / 2$$

⇔

$\mathcal{T}f_{RII,L} = 921,6 * Q_v \text{ pompe}^2 \quad [\text{J/kg}]$
--

- Pertes de charge singulières

Les pertes de charge singulières s'écrivent sous la forme :

$$\mathcal{T}f_{RII,S} = \xi * v^2/2 \quad \text{en J/kg}$$

$\xi$  : coefficient d'origine empirique

**Tableau 11 : Valeurs approximatives de coefficient  $\xi$  pour quelques accessoires courants**

Accessoire	$\xi$
Coude 45°	0,3
Coude 90° normal	0,5
Coude 90° à grand rayon	0,3
Coude 180°	0,75
Vanne à siège droit (ouverte)	3

Dans notre cas, considérons que nous avons deux coudes 90° à grand rayon. Nous obtenons alors :

$$\mathcal{T}f_{RII,S} = (0,3 + 0,3) * (32 * Q_{v \text{ pompe}})^2/2$$

$$\Leftrightarrow \boxed{\mathcal{T}f_{RII,S} = 307,2 * Q_{v \text{ pompe}}^2} \quad [\text{J/kg}]$$

**Caractéristique du circuit**

Reprenons l'équation de départ :

$$\Delta_A^R \mathcal{H} = g * H_{MT} + \mathcal{T}f_{RII}$$

avec :

$$H_{MT} = 6 \text{ [m]}$$

$$\mathcal{T}f_{RII} = \mathcal{T}f_{RII,L} + \mathcal{T}f_{RII,S} = (921,6 + 307,2) * Q_{v \text{ pompe}}^2 = 1228,8 * Q_{v \text{ pompe}}^2 \quad [\text{J/kg}]$$

Nous obtenons alors :

$$\Rightarrow \Delta_A^R \mathcal{H} = 58,86 + 1228,8 * Q_{v \text{ pompe}}^2 \quad [\text{J/kg}]$$

terme statique ←
→ terme dynamique

Equation qui représente la caractéristique du circuit, et qui est constituée de deux termes distincts :

- le terme statique, indépendant du débit,
- le terme dynamique, tenant compte des pertes de charges et fonction du débit.

Soit sous forme graphique :

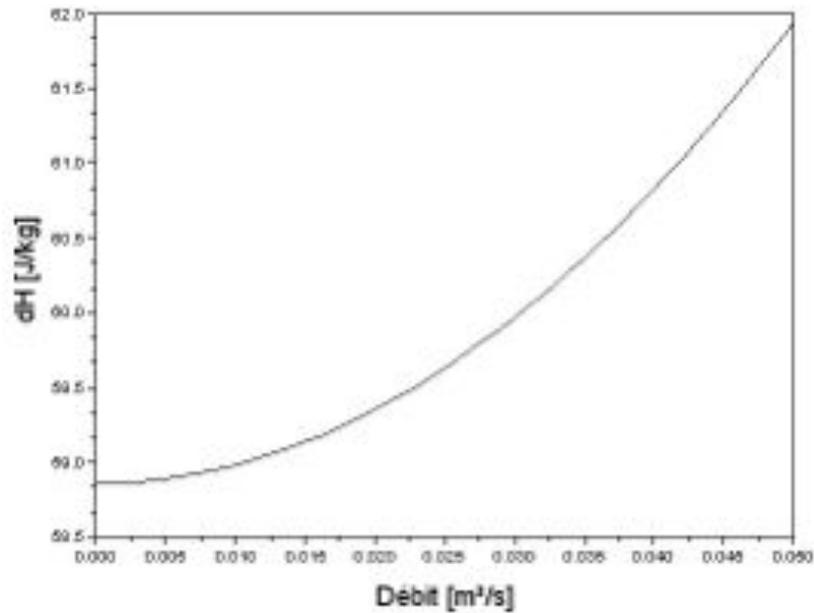


Figure 46 : Caractéristique du circuit

Or, en moyenne, la pompe effectue un relèvement de charge :

$$\Delta_A^R \mathcal{H} = P_{\text{pompe moy}} / (\rho * Q_v \text{ pompe})$$

Si nous mettons les deux courbes sur un même graphique, nous obtenons :

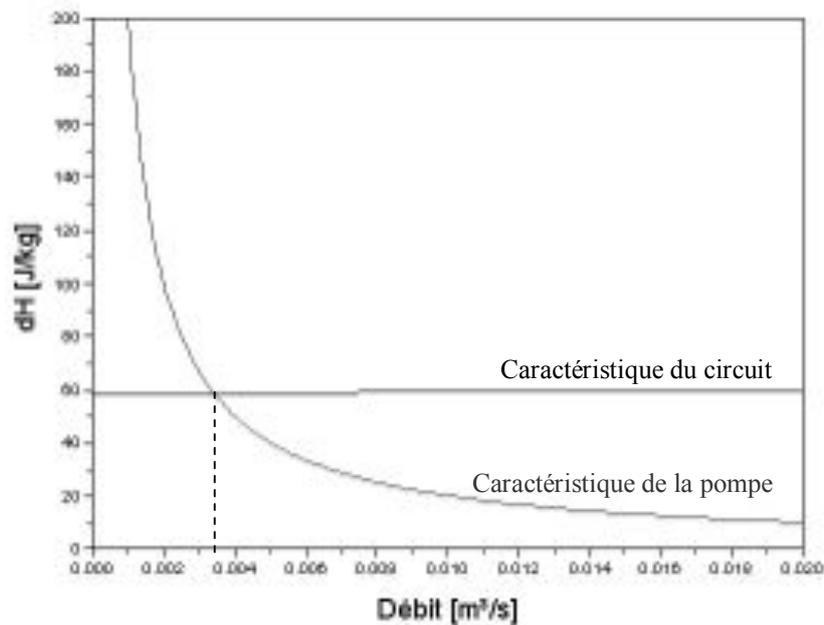


Figure 47 : Point de fonctionnement de la pompe

A l'intersection des deux courbes se trouve donc le point de fonctionnement du circuit. Nous obtenons alors un débit :

$$Q_{v \text{ pompe moy}} = 0,0034 \text{ m}^3/\text{s} = 3,4 \text{ l/s}$$

Soit exactement le même débit trouvé plus haut, qui lui ne tenait pourtant pas compte des pertes de charges. Pourquoi ? C'est normal, car :

- premièrement, la longueur de tuyauterie est faible
- deuxièmement, il n'y a que 2 coudes à l'origine des pertes singulières,
- et troisièmement, les débits sont tellement faibles que les pertes de charge le sont aussi. En effet, Comme nous montre ce graphique, c'est à partir des  $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$  que les pertes de charges deviennent importantes :

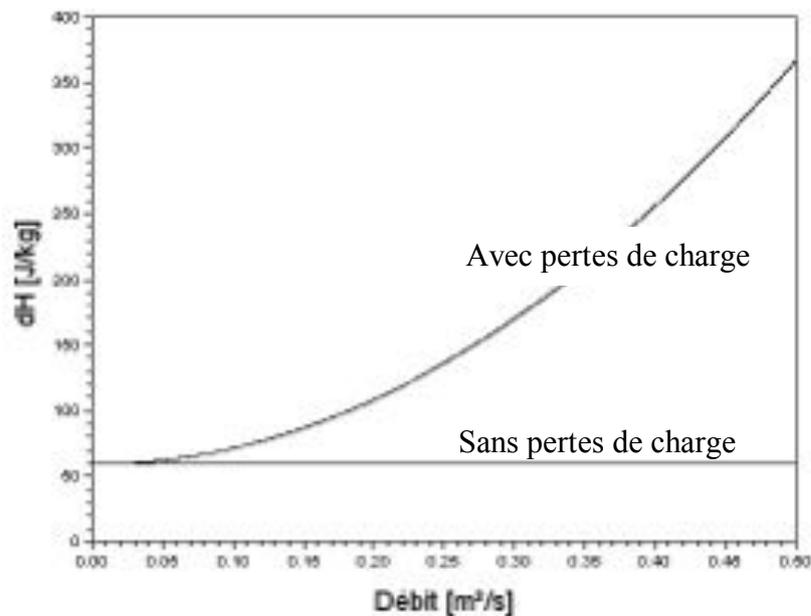


Figure 48 : Caractéristique du circuit avec et sans pertes de charge

## Conclusion

Comme nous venons de le démontrer, les pertes de charges peuvent être négligées. Le débit d'eau remontée est alors en moyenne de 3,4 l/s. Maintenant que nous savons à quel débit et à quelle hauteur est remontée l'eau, nous devons déterminer quel débit sera passé dans la roue à augets et pendant combien de temps, afin de déterminer la puissance électrique finalement productible.

### 3.4.2.5 Détermination de la puissance électrique productible

Récapitulons :

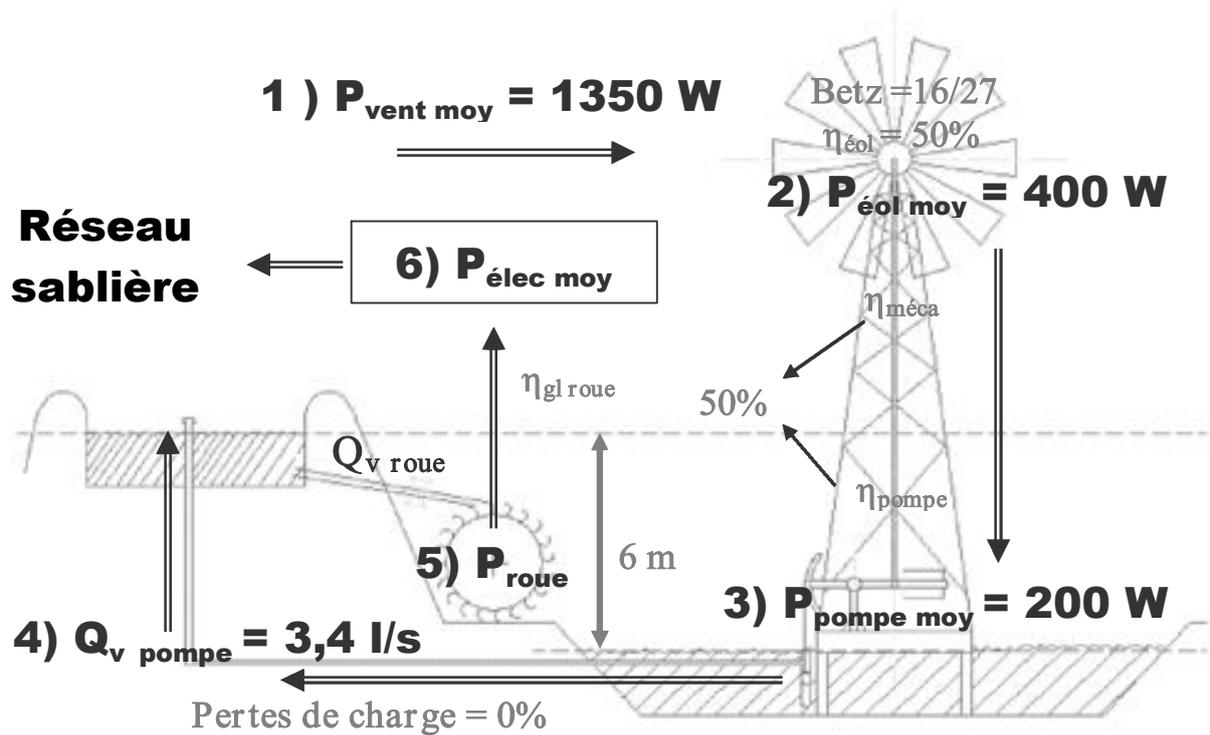


Figure 49 : Schéma récapitulatif

En moyenne, la pompe envoie un débit de 3,4 l/s dans le bassin supérieur. En un mois, un volume de  $3,4 \times 3600 \times 24 \times 31 = 9\,106\,560$  litres serait alors remonté. Or, comme la sablière consomme de 7 à 16h, 5 jours sur 7, soit 200 heures sur 744 par mois, nous pouvons aisément trouver le débit moyen descendant qui sera délivré durant les heures de fonctionnement :

$$Q_{v\text{ roue}} = (3,4 * 3600 * 24 * 31) / (9 * 31 * 5/7 * 3600) = 12,65 \text{ l/s}$$

Avant de continuer, posons de nouvelles hypothèses :

- Les pertes de charges dans la canalisation descendante seront négligées,
- Le rendement global de la roue à augets est de 65% :

1) pertes de charge dans les ouvrages d'aménée : 0 %	}	$\eta_{roue} \approx 0,65$	}	$\eta_{gl\ roue} \approx 0,65$
2) pertes dans la roue à augets : 30 à 35 %				
3) pertes dans l'alternateur : 1 à 3 %				

La roue à augets récupère alors la puissance de la chute de par la formule vue plus haut :

$$P_{\text{roue}} = P_{\text{hydrau}} * \eta_{\text{gl roue}} = \rho * g * Q_{\text{v roue}} * H_t * \eta_{\text{gl roue}} \quad [\text{W}]$$

$\rho$  : masse volumique de l'eau égale à 1000 kg/m<sup>3</sup>

$g$  : accélération gravitationnelle égale à 9,81 m/s<sup>2</sup>

$Q_{\text{v roue}}$  : débit de descendant en m<sup>3</sup>/s

$H_t$  : hauteur de la chute en mètres

$\eta_{\text{gl roue}}$  : rendement global de la roue

$$\Rightarrow P_{\text{élec moy}} = P_{\text{roue moy}} = 1000 * 9,81 * 0,01265 * 6 * 0,65 = 484 \text{ W}$$

$\Rightarrow \underline{P_{\text{élec moy}} = 484 \text{ W}}$

Une puissance électrique de 484 W serait donc produite de 7h à 16h, 5 jours par semaine. L'énergie mensuelle produite serait alors de :

$$\underline{E_{\text{élec mens}} = 484 * 9 * 31 * 5 / 7 = 96,5 \text{ kWh}} \quad (= 200 * 0,65 * 24 * 31)$$

### 3.4.2.6 Rendement global de l'installation

$$P_{\text{élec moy}} = \eta_{\text{gl}} * P_{\text{vent}} = \eta_{\text{gl}} * \frac{1}{2} * \rho * S * V^3$$

$$\text{Avec} \quad \eta_{\text{gl}} = \underbrace{\text{Betz}}_{16/27} * \underbrace{\eta_{\text{éol}}}_{0,5} * \underbrace{\eta_{\text{pompe}}}_{0,5} * \underbrace{\eta_{\text{gl roue}}}_{0,65} = 9,6 \%$$

Le rendement global de l'installation est très médiocre. Pour les stations de transfert d'énergie par pompage, il est généralement de l'ordre de 82%, mais dans ce cas-là, le rendement est le rapport entre l'électricité produite et l'électricité consommée. Le rendement calculé ici contient en plus la limite de Betz et le rendement propre à l'éolienne.



Analysons approximativement les différents coûts :

**Tableau 13 : Coûts de l'installation avec une éolienne de pompage**

Eolienne de pompage de 5 mètres de diamètre et pompe associée	10 000 €
Roue à augets de 1kW et génératrice associée	1 000 €
Bassin et autres (installation, entretien, etc.)	4 000 €
<b>Total</b>	<b>15 000 €</b>

Remarquons que la Wallonie octroie un certificat vert (CV) pour chaque 1000kWh produits par une installation de production d'énergie renouvelable<sup>18</sup>, durant les dix premières années de fonctionnement d'une installation de production d'énergie renouvelable. Chacun de ces certificats peut alors être revendu sur le marché à une valeur de 91 euros (en moyenne). De plus, si l'installation produit moins de 10kW, 400€ supplémentaires peuvent être économisés, car il n'y a plus besoin de faire appel à un organisme de contrôle agréée pour l'obtention du certificat de garantie d'origine. Dans notre cas, comme une éolienne produirait  $96,5 \times 12 = 1158$  kWh par an, nous aurions droit à 1,16 CV par an les dix premières années. La durée d'amortissement de l'installation serait alors de :

$$10 + (15000 - 10 \times (1,16 \times 91 + 175)) / 175 = \underline{80 \text{ années.}}$$

Ce n'est malheureusement pas rentable. En effet, la sablière espère continuer ses activités durant 22 ans !

### 3.4.2.8 Conclusion

L'étude de ce cas fut relativement succincte. Rentrer dans les détails aurait pris beaucoup plus de temps, pour un résultat ne dérivant sûrement pas énormément de celui trouvé. En effet, j'ai refais l'étude pour des valeurs plus optimistes de rendements tels que :

$$\left. \begin{array}{l} - \eta_{\text{éol}} = 0,6 \\ - \eta_{\text{pompe}} = 0,6 \\ - \eta_{\text{gl roue}} = 0,8 \end{array} \right\} \eta_{\text{gl}} = 16/27 * 0,294 = 17,4 \%$$

<sup>18</sup> Voir « Arrêté royal relatif à l'établissement de mécanismes visant la promotion de l'électricité produite à partir des sources d'énergie renouvelables », mis à jour au 14-10-2005, et situé en Annexes I p.22 chapitre I.VIII.

J'obtiens alors :

$$P_{\text{vent moy}} = 1350 \text{ W}$$

$$P_{\text{pompe moy}} = 288 \text{ W}$$

$$Q_{\text{v roue}} = 18,2 \text{ l/s}$$

$$P_{\text{éol moy}} = 480 \text{ W}$$

$$Q_{\text{v pompe moy}} = 4,9 \text{ l/s}$$

$$P_{\text{élec moy}} = 857 \text{ W}$$

L'économie d'énergie électrique moyenne mensuelle serait de 170,8kWh au lieu de 96,5kWh. L'on économiserait 26€ par mois, plus l'équivalent de 2,1 CV par an. La sablière ne mettrait alors plus que 44 années pour amortir l'installation. La conclusion reste que l'installation n'est pas rentable à court terme. Sa production électrique reste une goutte d'eau par rapport aux besoins électriques de la sablière.

Notons que j'ai tout de même effectué le dimensionnement du bassin supérieur en Annexes III p.67 chapitre III.V. Celui-ci devrait être de 30 000m<sup>3</sup>. Et si maintenant il n'y a non plus une, mais plusieurs éoliennes et plusieurs pompes ?

### 3.4.3. Système avec plusieurs éoliennes de pompage mécaniques

#### 3.4.3.1. Introduction

Le schéma de l'installation avec  $n$  éoliennes de pompage serait le suivant :

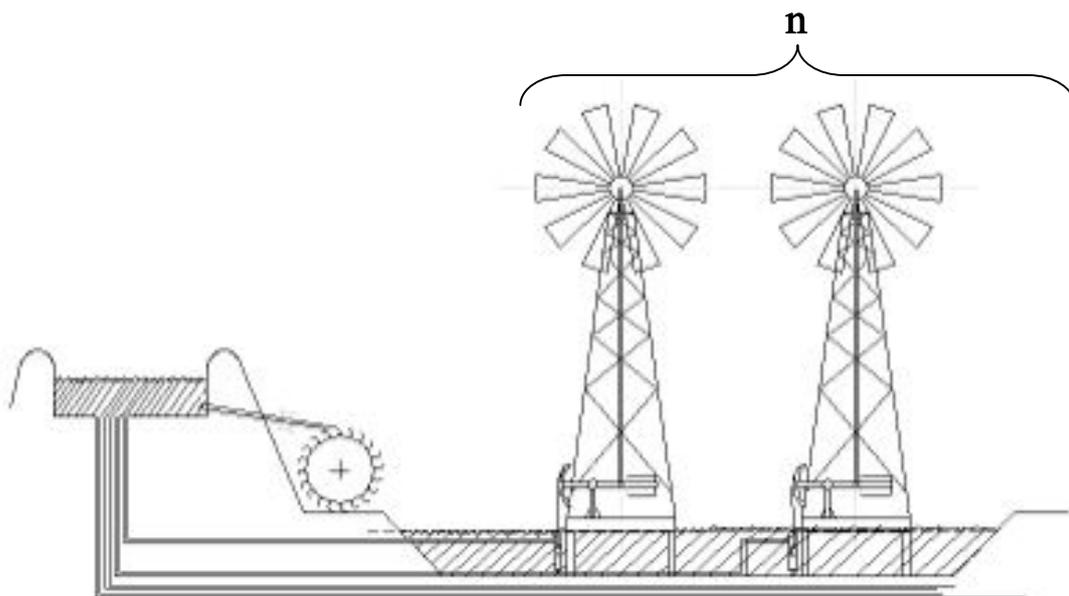


Figure 50 : Schéma général de l'installation composé de plusieurs éoliennes de pompage

Nous allons nous baser sur les résultats trouvés précédemment pour une seule éolienne. Il suffit en effet de les extrapoler.

### 3.4.3.2. Puissance électrique récupérable

Le débit moyen remonté peut être directement trouvé en multipliant simplement le débit moyen de 3,4 l/s trouvé précédemment par le nombre d'éoliennes :

$$Q_{v \text{ pompe moy}} = n * 3,4 \text{ l/s}$$

En un mois, un volume de  $n * 9\,106\,560$  litres serait alors remonté. La ou les plusieurs roues à augets devrai(en)t donc être dimensionnée(s) pour un débit de :

$$Q_{v \text{ roue}} = n * 9\,106\,560 \text{ m}^3 / (200 * 3600) = n * 12,65 \text{ l/s}$$

La puissance électrique récupérable serait de :

$$\Rightarrow P_{\text{élec moy}} = P_{\text{roue moy}} = n * 1000 * 9,81 * 0,01265 * 6 * 0,65 = n * 484 \text{ W}$$

$$\Rightarrow \underline{P_{\text{élec moy}} = n * 484 \text{ W}}$$

La puissance électrique alors fournie serait donc directement proportionnelle au nombre d'éoliennes. Quant à l'énergie mensuelle produite, elle vaudrait également  $n * 96,5$  kWh.

### 3.4.3.3. Réduction de la facture électrique en fonction du nombre d'éoliennes

La consommation électrique sera donc diminuée de  $n * 96,5$  kWh par mois. Nous obtenons alors que la sablière économiserait sur sa facture électrique :

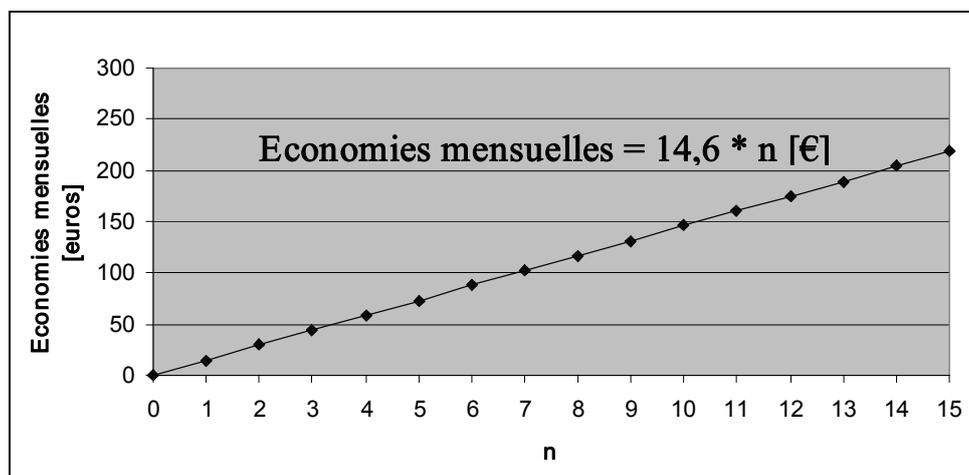


Figure 51 : Economies mensuelles sur la facture électrique en fonction de n

### 3.4.3.4. Coûts de l'installation composée de n éoliennes

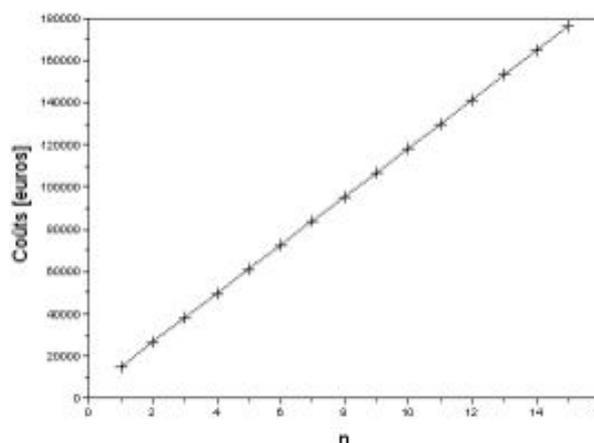
Plus il y a d'éoliennes, plus importante sera la puissance électrique que l'on saura produire. Mais l'installation sera aussi plus coûteuse. De combien ? Nous savons que :

- n éoliennes de pompage de 5 mètres de diamètre et leur n pompes associées coûtent approximativement  $n * 10\ 000\text{€}$ .
- une roue à augets de 15 kW avec ses éléments associés (génératrice, multiplicateur, etc.) coûte approximativement 15 000 €. Comme il faudrait près de 30 éoliennes de pompage ( $15/0,484$ ) pour produire 15kW, estimons le coûts de la génératrice et de la roue par l'équation :  $(\frac{1}{2} + n/2) * 1000\text{€}$ .

**Tableau 14 : Estimation des coûts de l'installation avec n éoliennes de pompage**

Eolienne de pompage de 5 mètres de diamètre et pompe associée	$n * 10\ 000\ \text{€}$
Roue à augets et génératrice associée	$(\frac{1}{2} + n/2) * 1\ 000\ \text{€}$
Bassins et autres	$(\frac{3}{4} + n/4) * 4\ 000\ \text{€}$
<b>Total</b>	$11500 * n + 3500\ \text{€}$

Si  $n = 1$ , nous retrouvons bien les coût trouvés précédemment pour le système avec une seule éolienne. Nous obtenons alors la courbe ci-contre.



**Figure 52 : Coûts de l'installation en fonction du nombre d'éoliennes**

Bien évidemment, en pratique, nous n'obtenons sûrement pas une évolution des coûts aussi droite. En effet :

- le coût de n éoliennes n'est pas n fois le coût d'une éolienne ! En effet, nous pourrions tout de même espérer avoir une réduction !
- les coûts relatifs aux bassins et à l'installation du système proprement dit n'évoluent pas non plus suivant une ligne droite.

La courbe diminuerait alors sûrement sa croissance avec le nombre d'éoliennes. Mais comme on ne sait pas déterminer ces facteurs, on ne peut pas les prendre en compte.

### 3.4.3.5. Point mort en fonction du nombre d'éoliennes

Le point mort est le moment à partir duquel la sablière aura rentabilisé l'installation et commencera à faire des bénéfices. Comme une éolienne produirait  $96,5 * 12 = 1158$  kWh par année, nous aurions droit à  $n*1,16$  certificat vert par an les 10 premières années, et 400€ d'épargné au lancement du projet (tant que l'on a moins de 20 éoliennes, car on dépasserait les 10kW de production). Formules utilisées :

- de 1 à 20 éoliennes :

$$\text{Point mort} = 10 + (11500 * n + 3500 - 10 * (14.6 * 12 * n + 1.16 * 91 * n)) / (14.6 * 12 * n)$$

- à partir de 20 éoliennes :

$$\text{Point mort} = 10 + (11500 * n + 3500 + 400 - 10 * (14.6 * 12 * n + 1.16 * 91 * n)) / (14.6 * 12 * n)$$

Nous obtenons alors la courbe noire suivante :

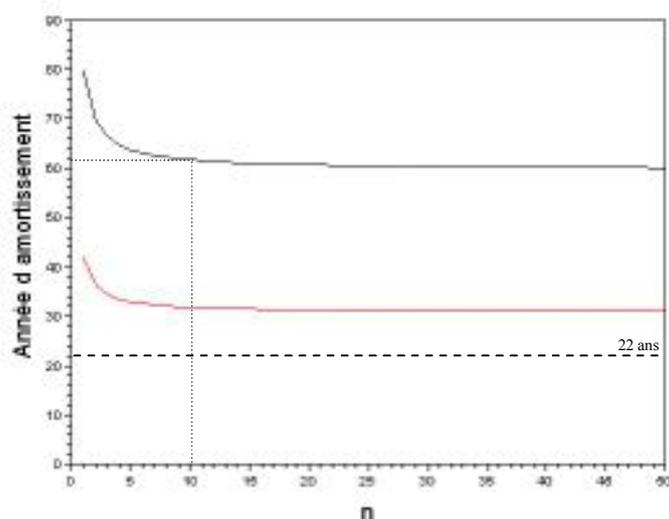


Figure 53 : Evolution du point mort en fonction de n

C'est une belle hyperbole, qui ne descendra malheureusement jamais en dessous de 22 années d'amortissement.

Remarquons que j'ai effectué cette même étude en reprenant les valeurs plus optimistes de rendement ( $\eta_{\text{éol}} = 0,6$  ;  $\eta_{\text{pompe}} = 0,6$  ;  $\eta_{\text{gél roue}} = 0,8$ ). Après résolution, je trouve la courbe rouge du graphique ci-dessus, qui elle ne descend malheureusement pas non plus en dessous de 22 années d'amortissement.

Notons aussi qu'à partir de 10 éoliennes de pompage, la diminution du point mort devient insignifiante. 62 années d'amortissement seraient alors nécessaires.

### 3.4.4. Conclusion concernant le cas envisagé

Envisager le système de production pour un assouvissement partiel des besoins électrique ne paraît pas rentable, qu'il y ait une éolienne et une pompe ou qu'il y en ait plusieurs. Mais notons que dans ce dernier cas, d'autres paramètres interviennent. Par exemple :

- l'optimisation du rendement des différents éléments du système permettrait, comme nous l'avons vu, de diminuer considérablement la durée d'amortissement.
- l'évolution des coûts globaux liés au système pourrait être différent. En effet, nous pourrions espérer avoir une réduction à l'achat de plusieurs éoliennes de pompage.
- le coût de l'électricité risquant fort d'augmenter dans les prochaines années, l'économie mensuelle sur la facture électrique pourrait augmenter au fil des années.
- le placement de l'installation à un endroit judicieusement étudié pourrait faire augmenter la puissance moyenne récupérable par l'éolienne. Pour ce faire, une étude de l'évolution du profil du vent sur les lieux de la sablière sous le programme *Fluent* serait nécessaire.
- durant les périodes de pluies, le bassin supérieur se remplirait de lui-même, augmentant sa réserve d'énergie.

Si tous ces éléments parlent en notre faveur, le temps d'amortissement de l'installation pourrait être moins long. Mais d'un autre côté, d'autres éléments risquent d'augmenter encore plus la durée d'amortissement de l'installation. Ainsi :

- l'étude d'Amin Gourad a déterminé que le rendement de la roue à augets seule serait de 0,65. Avec des pertes de 5% dans la génératrice asynchrone, le rendement serait alors  $\eta_{gl\ roue} = 0,65 * 0,95 = 0,62$ . Ce qui est moins que le rendement  $\eta_{gl\ roue}$  de 0,65 pris comme hypothèse de départ. Concernant les autres rendements, leurs valeurs prises à l'origine ( $\eta_{éol} = 0,5$  ;  $\eta_{pompe} = 0,5$ ) sont ceux généralement rencontrés en pratique.
- certains éléments annexes à l'installation augmenteront encore les coûts de celle-ci.
- l'étude effectuée par l'IRM montre des distributions de fréquences des vents par classes d'intensité sur le site de la sablière moins favorables à la production d'énergie éolienne que celle déterminée dans cette étude.
- l'évaporation de l'eau en périodes d'ensoleillement n'est pas à négliger non plus, et viendrait contrer les effets des précipitations.

Tous ces éléments ont donc l'air de s'équilibrer, ne faisant pas pencher la balance en faveur de la rentabilité du système.

Il reste alors encore une solution : l'utilisation de ce système pour un écrêtage des pointes de consommation de la sablière.

### 3.5. Cas d'un écrêtage des pointes de consommation

#### 3.5.1. Introduction

Avant de commencer l'étude de ce cas, il est nécessaire de définir ce qu'est une pointe de consommation et quelles sont ses influences. C'est alors que nous continuerons et que nous terminerons notre étude du système.

#### 3.5.2. La pointe quart-horaire

##### **Définition**

Pour rappel, nous avons dans le chapitre « Données et méthodes » analysé la facture électrique de la sablière. Dans celle-ci, nous avons remarqué la pointe mensuelle, ou pointe quart-horaire, qui s'élevait à 242 kW pour le mois d'octobre 2006, et qui à elle seule représentait 7% de la facture électrique, hors TVA. Le fournisseur électrique SPE fait en effet payer la pointe quart-horaire 1,50 € par kW. Mais approfondissons un peu plus.

Le distributeur relève la puissance mensuelle maximale du mois comme suit : il enregistre la consommation de chaque quart d'heure du mois et en retient la valeur maximale. En divisant l'énergie consommée par le temps écoulé (15 minutes), il détermine la puissance « quart-horaire » maximale du mois ou « pointe quart-horaire ». Par exemple :

- Une résistance chauffante de 2kW fonctionne en continu : l'impact sur la pointe ¼ horaire mensuelle est de 2kW.
- Un ascenseur de 20 kW est appelé 3 fois dans le quart d'heure, pour une utilisation de 1 minute : son impact sur la pointe est de  $20 * 3 * 1/15 = 4\text{kW}$  (c'est sa puissance moyenne dans le ¼ d'heure).

La pointe quart-horaire est une puissance intégrée, et non instantanée. La valeur maximale de tous les quarts d'heure relevés au cours du mois est la puissance prise en compte sur la facture. Ainsi, le démarrage d'un moteur d'ascenseur constitue une pointe de durée très courte qui aura peu d'impact sur la pointe ¼ horaire.

Dans notre cas, c'est le démarrage de l'installation de lavage qui crée la pointe de consommation la plus importante. Elle a lieu juste au début des heures pleines et est de l'ordre de 500 – 600 kW (plus ou moins trois fois la puissance nominale de l'installation). Mais comme elle ne dure approximativement qu'une minute, la moyenne sur le quart d'heure est de l'ordre de :

$$(1 * 600 + 14 * 225) / 15 = \underline{250 \text{ kW}}$$

Ce qui correspond bien avec la valeur pratique de 242 kW.

## Conséquences

Ainsi, par exemple, dans un hôpital de Namur, la société de maintenance effectuait les essais des machines frigorifiques une fois par mois, lors de la pointe du matin, au moment où la cuisine "tire" un maximum. Le profil journalier de consommation était alors le suivant :

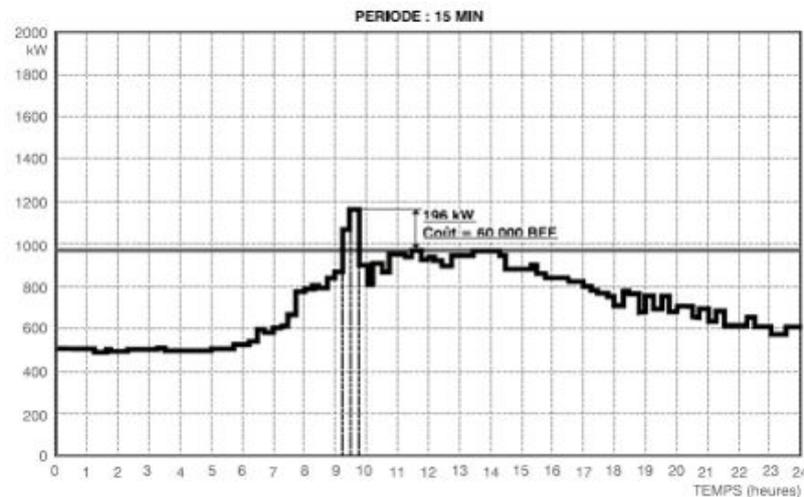


Figure 54 : Exemple de diagramme de charges

Il a suffi de décider de faire les essais l'après-midi pour diminuer sensiblement la facture !

### Durée et moment de la pointe quart-horaire

La pointe se fait au démarrage de l'installation de lavage, à 7h du matin. Mais il se peut qu'on la redémarre une seconde fois en journée. C'est pourquoi nous allons considérer qu'il y a deux pointes de consommation de 250 kW par jour d'activité de la sablière.

### 3.5.3. Détermination de la réduction de la pointe de puissance et rentabilité

#### 3.5.3.1. Introduction

Par rapport au cas précédent, l'installation reste la même. Seules vont changer les moments et la durée de ces moments de production d'électricité. Le bassin va donc se remplir au fur et à mesure, et lors du démarrage de l'installation de lavage, l'on faire tourner la roue à augets durant 15 minutes. La puissance ainsi produite serait donc retranchée à la puissance consommée, et l'on réduirait alors la pointe de consommation.

Dans un premier temps, comme le débit moyen remonté par la pompe reste de 3,4 l/s à une hauteur moyenne de 6 mètres, calculons le débit qui pourra traverser la roue à augets durant les deux quarts d'heure, pour le cas d'une éolienne et une pompe mécaniques.

### 3.5.3.2. Cas de l'installation composée d'une éolienne et d'une pompe

#### Puissance électrique productible par l'installation

Reprenons les résultats trouvés précédemment :

- Le débit d'eau remonté s'élève en moyenne à 3,4 l/s
- Le débit d'eau qui traversera la roue à augets sera alors en moyenne de :

$$Q_{v \text{ roue}} = \underbrace{3,4 * 3600 * 24 * 31}_{\text{Volume d'eau remonté en 1 mois}} / \underbrace{(15 * 60 * 2 * 31 * 5/7)}_{\text{Temps total d'utilisation de l'installation en 1 mois}} = 228,5 \text{ l/s}$$

La puissance électrique moyenne produite par la roue à augets est donc de :

$$\Rightarrow P_{\text{elec moy}} = P_{\text{roue moy}} = 1000 * 9,81 * 0,2285 * 6 * 0,65 = 8742 \text{ W}$$

Et ce, durant le quart d'heure de pointe. Ces 8,7 kW seraient donc directement retranchés aux 250 kW de pointe mensuelle. En plus de cela, la consommation en heures pleines sera aussi diminuée de 96,5 kWh. Mais est-ce suffisant ?

#### Rentabilité

La pointe mensuelle est facturée 1,5 €/kW. L'on ferait alors un gain de :

$$1,5 * 8,742 + \underbrace{14,56}_{\text{diminution de la consommation en heures pleines}} = 27,7 \text{ €/mois}$$

< diminution de la consommation en heures pleines

Est-ce rentable ? Les coûts de l'installation ne changent pas, hormis le coût de la roue à augets et de la génératrice :

**Tableau 15 : Coûts de l'installation composée d'une éolienne et d'une roue à augets de 10kW**

Eolienne de pompage de 5 mètres de diamètre et pompe associée	10 000 €
Roue à augets de 10 kW et génératrice associée	10 000 €
Bassin et autres (installation, entretien, couplage, etc.)	4 000 €
<b>Total</b>	<b>24 000 €</b>

La sablière mettrait alors, pour amortir l'installation :

$$10 + (24000 - 10 * (1,16 * 91 + 27,7 * 12)) / (27,7 * 12) = \underline{69 \text{ années.}}$$

Ce cas n'est donc pas rentable. Et avec plusieurs éoliennes et plusieurs pompes ?

### 3.5.3.3. Cas de l'installation composée de plusieurs éoliennes mécaniques et de plusieurs pompes

#### Puissance électrique productible par l'installation

La puissance électrique moyenne ainsi créée serait dans ce cas de :

$$P_{\text{élec}} = n * 8742 \text{ W}$$

Et l'on pourrait alors espérer avoir une réduction de la facture de :

$$n * 1,5 * 8,742 + n * 14,6 = n * 27,6 \text{ €/mois}$$

Mais attention, la pointe de consommation mensuelle est bien la puissance maximale consommée en moyenne sur un quart d'heure. Donc, ça ne sert à rien de fournir trop de puissance pour diminuer la pointe, puisque de toute façon, la consommation nominale est de 225kW. C'est pourquoi il est inutile de mettre plus de trois éoliennes et leurs pompes pour la diminution de la pointe. Ainsi :

$$P_{\text{élec}} = 3 * 8742 \text{ W} = 26,2 \text{ kW}$$

#### Rentabilité

La pointe de puissance ne s'élèverait plus alors qu'à 225 kW. La facture serait alors réduite de  $(1,5\text{€/kW} * 25\text{kW} + 3 * 14,56\text{€}) = 81,2 \text{ €/mois}$ . Les coûts étant les suivants :

**Tableau 16 : Coûts de l'installation composée de 3 éoliennes et de deux roues à augets de 15kW**

3 éoliennes de pompage de 5 mètres de diamètre et pompes associées	3 * 10 000 €
2 roues à augets de 15 kW et génératrices associées	2 * 15 000 €
Bassins et autres	5 000 €
<b>Total</b>	65 000 €

La sablière mettrait alors :

$$10 + (65000 - 10 * (1,16 * 91 * 3 + 81,2 * 12)) / (81,2 * 12) = \underline{63 \text{ années.}}$$

63 années pour amortir l'installation composée de 3 éoliennes de pompage. Ce n'est toujours pas rentable bien évidemment. L'augmentation du nombre d'éoliennes n'engendrerait qu'une diminution légère de la consommation en heures pleines.

Et pour une plus grand nombre d'éoliennes :

$$\text{Point mort} = 10 + \frac{(n \cdot 11500 + 2 \cdot 15000 - 10 \cdot (1.16 \cdot n \cdot 91 + 12 \cdot 1.5 \cdot 25 + 12 \cdot 14.56 \cdot n))}{(12 \cdot 14.56 \cdot n + 12 \cdot 1.5 \cdot 25)}$$

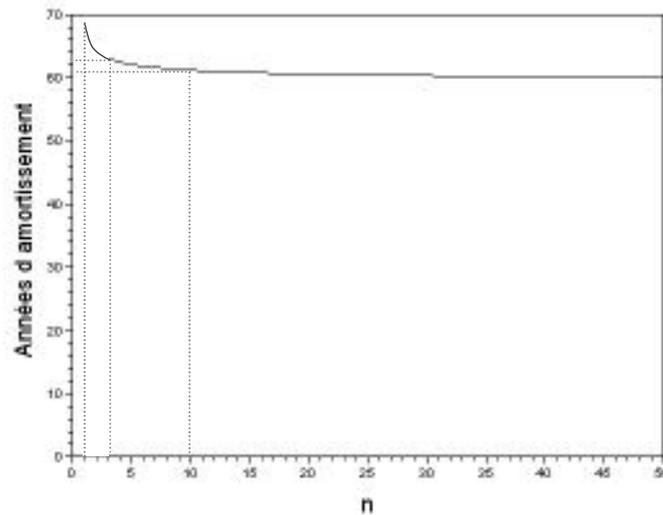


Figure 55 : Années d'amortissement en fonction de n

Il est donc inutile d'installer plus de 10 éoliennes de pompages. Le temps d'amortissement serait alors de 61 années.

### 3.5.4. Conclusion concernant le cas envisagé

Ainsi conçu, l'installation diminuerait la consommation en heures pleines et la pointe de consommation de la sablière. Mais comme nous venons de le démontrer, utiliser le système pour un écrêtage n'est toujours pas rentable. De plus, l'on aurait pu directement penser au manque de fiabilité de l'installation concernant l'écrêtage. En effet, le débit remonté est *en moyenne* de 3,4 l/s pour l'installation composée d'une seule éolienne, mais en réalité, il est bien fonction de la vitesse du vent. Le bassin supérieur pourrait alors être dimensionné de manière à accumuler assez d'eau et ainsi arriver malgré tout à écrêter les pointes, mais il ne suffit que d'une période un peu trop prolongée d'absence de vent, pour que le système ne sache pas fournir l'énergie nécessaire à l'écrêtage de la pointe. Cela implique donc qu'au final, malgré l'écrêtage des autres pointes journalières, la pointe de consommation mensuelle resterait de 250 kW ! Même dans le cas où il aurait été rentable, le système ainsi conçu n'aurait peut-être pas su diminuer chaque mois la pointe quart-horaire, n'engendrant qu'une diminution de la consommation mensuelle en heures pleines.

## 4. Conclusion générale

A l'origine, il m'a seulement été demandé de dimensionner le bassin supérieur et l'éolienne mécanique qui constituent l'installation de base. Mais il est clair qu'on ne peut se lancer tête baissée dans un projet sans connaître ou avoir déterminé ses fondations, et ainsi risquer de ne construire qu'une tour de Pise. C'est pourquoi je me suis proposé d'aller plus loin en étudiant la faisabilité et la rentabilité du système, sans pour autant négliger les dimensionnements qu'il m'a été demandé d'effectuer.

Après calculs, et malgré les grosses hypothèses émises, nous avons abouti dans le premier cas à la conclusion que le système envisagé n'est pas faisable, la production électrique de celui-ci ne représentant qu'une goutte d'eau par rapport à l'océan que constituent les besoins électriques de la sablière. Par contre, dans les deux derniers cas, c'est la rentabilité qui fait défaut, le temps d'amortissement de l'installation étant trop long par rapport à la durée de vie de la sablière (22 années) :

Tableau 17 : Récapitulatif des différents temps d'amortissement

Nombre d'éoliennes	1	3	10
Assouvissement partiel	80	66	62
Ecrêtage	69	63	61

Mettons sur un même graphique les évolutions du nombre d'années d'amortissement en fonction de n pour les deux cas :

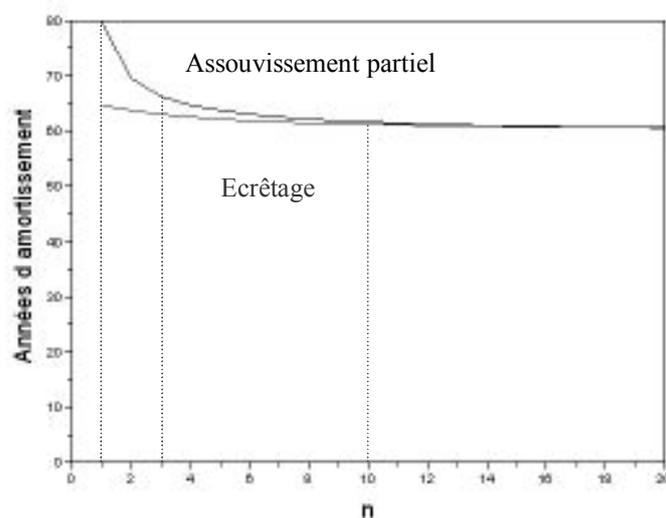


Figure 56 : Années d'amortissement en fonction de n pour les deux cas

Nous remarquons qu'à partir de dix éoliennes, les deux courbes sont pratiquement confondues. C'est normal car pour un nombre d'éoliennes plus élevé, l'économie sur la facture électrique provenant de l'écrêtage des pointes de consommation devient insignifiant par rapport à celle que constitue la production en heures pleine.

Etant donné que je n'étais pas le seul sur ce projet, ce sont les résultats qui ont été calculés dans le cas d'un assouvissement partiel sans écrêtage avec 10 éoliennes qui servent de bases au dimensionnement de la roue à augets, sujet du travail de fin d'études d'Amin Gourad. De surcroît, j'ai effectué pour ce cas-là le dimensionnement du bassin supérieur dont les calculs se trouvent en Annexes III p.67 chapitre III.V.

Voici dès lors quelles seraient les caractéristiques principales de l'installation composée de 10 éoliennes de pompage pour un assouvissement partiel sans écrêtage :

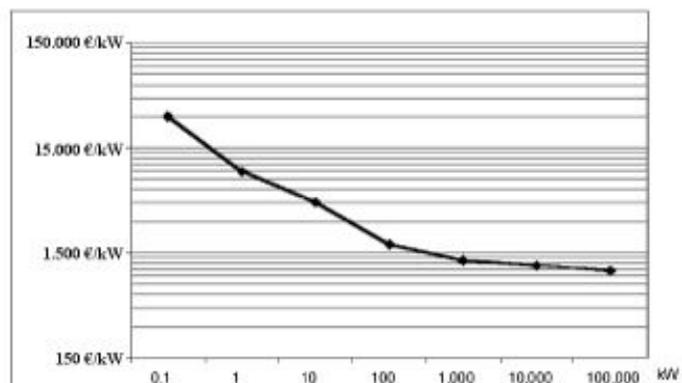
Tableau 18 : Caractéristiques générales de l'installation

Coût global de l'installation	120 000 €
Puissance électrique nominale productible	5 kW
Temps de fonctionnement	2 400 heures/an
Coûts par kW installé	24 000 €/kW
Production électrique	11,6 MWh/an
Certificats verts (d'une valeur de 91€) délivrés par la région wallonne durant les dix premières années de fonctionnement de l'installation	11,6 CV/an
Economie mensuelle sur la facture électrique	234 € les dix premières années, 146 € par la suite

Le coût de l'installation est clairement trop élevé par rapport à sa production électrique. En effet, comparons le coût par kW installé avec les autres installations d'énergie renouvelable :

- hydraulique : 1000 à 3500 €/kW
- géothermie : 800 à 3000 €/kW
- biomasse : 900 à 3000 €/kW
- photovoltaïque : 5000 à 10 000 €/kW
- éolien :

Figure 57 : Courbe liant le prix d'une installation éolienne avec sa puissance



**Mais pourquoi le coût par kW de notre installation est-il si élevé ?**

1) Le coût d'une éolienne de pompage de 5 mètres de diamètre et de sa pompe associée paraît très élevé ( $\pm 10\ 000\text{€}$ ), par rapport à la puissance qu'elle récupère du vent. Mais parallèlement, on aurait pour le même prix une éolienne électrique de 5,5kW de 5 mètre de diamètre qui récupérerait la même puissance !

Par contre, lorsque l'on installe un plus grand nombre d'éoliennes de pompage, l'on constate que pour une même énergie annuelle récupérée, une éolienne électrique coûte bien moins cher. Par exemple : l'installation de 10 éoliennes de pompage de 5 mètres de diamètre avec leurs pompes associées coûterait  $\pm 100\ 000\text{€}$  pour une *récupération* totale annuelle de 35MWh, alors que pour le même prix, nous pouvons avoir une éolienne électrique de 15 m de diamètre (pour 50 kW de production nominale) *récupérant* 60MWh par an ! Mais pourquoi cette différence ? La raison est simple : une éolienne mécanique ne dépasse que rarement les 10 mètres de hauteur en raison de la transmission mécanique, alors que les éoliennes électriques peuvent s'élever bien plus haut, récupérant un vent soufflant plus fort, et ayant la liberté d'augmenter le diamètre de son rotor.

2) Les coûts relatifs à la roue à augets et aux bassins viennent augmenter considérablement le coût global de l'installation. Et encore, certains ouvrages annexes tels que l'automate programmable chargé de l'automatisation du système, l'armoire de couplage au réseau basse tension de la sablière, les canalisations d'amenée et de sortie, et autres peuvent avoir été sous-estimés. De plus, Amin Essabih est arrivé à la conclusion que l'ensemble constitué de la roue à augets, la génératrice, les transmissions, la vanne de réglage et la sonde de niveau ne coûterait non pas 10 000 €, mais bien 20 000€, pour une puissance électrique de sortie de 5kW (cas de dix éoliennes de pompage pour un assouvissement partiel). Ce qui vient confirmer la sous-estimation éventuelle des coûts.

3) Entièrement gratuit, le vent est la source d'énergie de notre système. Il n'empêche que le rendement global de notre installation est très médiocre. En plus de la limite de Betz, les rendements de la pompe, de la roue à augets et de l'alternateur viennent diminuer la puissance électrique finalement productible par rapport à celle récupérée.

Le bassin, qui a pour but le stockage de l'énergie récupérée par les éoliennes mécaniques afin d'assurer une continuité de production électrique en heures pleines, est en fait le talon d'Achille du système : il est un passage obligé entre la récupération de l'énergie par l'éolienne mécanique et sa livraison sur le réseau électrique, faisant intervenir en plus les rendement de la pompe et de la roue à augets.

Ainsi, afin de résoudre ce problème tout en gardant le bassin supérieur, il suffirait en fait de modifier légèrement l'installation en remplaçant les éoliennes mécaniques par une ou plusieurs électriques couplées directement au réseau de même qu'à des pompes électriques. De cette manière, si l'éolienne tourne en heures pleines, elle injecterait directement la puissance qu'elle récupère au réseau électrique de la sablière, et si elle tourne en heures creuses, la puissance récupérée servirait à faire monter l'eau du bassin inférieur au supérieur par le biais de la pompe électrique. Le rendement serait ainsi clairement amélioré. Ce système constituerait selon moi une solution séduisante, dont la rentabilité est à étudier.

Me concernant, ce travail de fin d'étude m'a permis d'apprendre énormément sur les énergies renouvelables. Les éoliennes et les ouvrages hydrauliques constituent les bases des énergies du futur, et acquérir des notions dans ces domaines ne peut être que bénéfique pour ma vie professionnelle. Aussi, j'ai effectué quelques études supplémentaires dans le chapitre suivant nommé « Perspectives » qui se pencheront sur ces deux questions :

- Ne serait-il pas plus rentable d'installer directement une éolienne électrique ?
- Est-il rentable d'installer le système de base composé d'une éolienne mécanique dans le jardin de tout un chacun ?

## 5. Perspectives

### 5.1. Introduction

S'arrêter à la conclusion à laquelle nous avons abouti n'est pas satisfaisante. C'est pourquoi nous allons, dans ce chapitre, envisager d'autres possibilités de réduction de la facture électrique ainsi qu'une extension du système de base envisagé.

- Dans un premier temps, dans le contexte de diminution de la facture électrique, nous allons étudier brièvement la rentabilité de l'installation d'une ou plusieurs éoliennes électriques sur les lieux de la sablière.
- Ensuite, nous ferons une étude succincte de l'extension du système de production envisagé dans ce travail au domestique, de manière à assouvir les besoins électriques d'une maison familiale.

### 5.2. Installation d'une ou plusieurs éoliennes électriques

Comme la sablière consomme en moyenne 40,5MWh par mois, soit en moyenne 55kW (jours et nuits) durant le mois, imaginons dans un premier temps d'installer une éolienne de 60 kW et calculons l'énergie mensuelle créée ainsi que la rentabilité d'un tel projet. Envisageons ensuite un petit parc éolien constitué de 2 éoliennes de 30 kW chacune et comparons les résultats obtenus.

### 5.2.1. Cas de l'installation d'une éolienne de 60 kW

#### Choix de l'éolienne

Prenons l'éolienne *AOC 15/50 50Hz* du fabricant *Atlantic Orient Corp.*<sup>19</sup>, dont l'ensemble des caractéristiques est repris en Annexe IV p.84 et dont les caractéristiques principales sont :

Tableau 19: Caractéristiques principales de l'éolienne AOC 15/50 50Hz

Type de rotor	Axe horizontal
Nombre de pales	3
Vitesse de rotation	65 tr/min
Vent de démarrage	4,6 m/s
Vent d'arrêt	N.C.
Vent extrême	59,5 m/s
Longueur des pales	7,2 m
Diamètre du rotor	15 m
Puissance nominale	60 kW
Hauteur du mât	40 m
Prix catalogue (turbine et tour) de l'éolienne avec prix de l'installation	250 000 dollars $\approx$ 185 000 euros

Le prix affiché tenant compte de l'installation, mais non de la maintenance, et autres. Calculons alors l'énergie annuelle que produirait cette éolienne.

#### Puissance moyenne produite

Les éoliennes doivent être placées le plus haut possible pour pouvoir capter les vents soufflants les plus forts. C'est pourquoi l'éolienne a un mât de 40m de haut. De cette manière, la vitesse du vent soufflant à cette hauteur est en moyenne égale à 1,3 fois la vitesse du vent soufflant à 10 mètres de haut, si nous considérons que la rugosité est de classe 2 (rugosité=0,1m), ce qui correspond bien à un terrain agricole avec quelques constructions et des haies vives de 8m de haut situées à environ 500m les unes des autres.

La moyenne annuelle n'étant alors plus de 4m/s en 2005, mais de 5,2m/s.

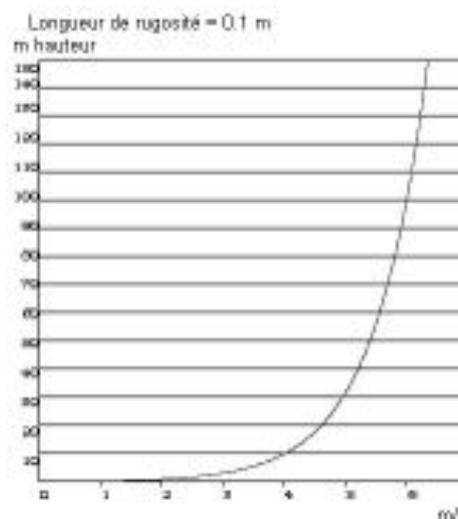


Figure 58 : Evolution de la vitesse des vents en fonction de la hauteur

<sup>19</sup> [www.aocwind.net](http://www.aocwind.net)

De cette manière, nous aurions obtenu une puissance moyenne annuelle développée de  $\pm 9\text{kW}$ . L'énergie annuelle qui aurait été produite étant alors de :

$$9\text{kW} * 24 * 365 \approx \underline{78,8\text{MWh}}$$

Mais quand produisent-elles ? Nous ne pouvons pas savoir quand les éoliennes fournissent de l'énergie, c'est pourquoi proposons-nous de les coupler au réseau électrique de Belgique de manière à ce qu'elles deviennent des entités indépendantes à l'installation de lavage, et surtout, que l'électricité produite soit directement revendue au réseau.

### Rentabilité

En Belgique, le prix moyen de rachat de l'énergie éolienne est de 87,5 €/MWh. On peut dès lors espérer gagner :

$$78,8 * 87,5 \approx \underline{6895 \text{ €/an}}$$

Certificats verts

A ce rythme, la sablière mettrait tout de même **13 années** ( $185000 / (6895 + 78,8 * 91)$ ) pour amortir l'installation. L'installation paraîtrait donc rentable à court terme.

### 5.2.2. Cas de l'installation de deux éoliennes de 30 kW

#### Choix des éoliennes

Prenons comme modèle l'éolienne FL30 de FUHRLÄNDER, dont voici les caractéristiques principales (voir Annexes IV p.83):

Tableau 20 : Caractéristiques principales de l'éolienne FL30 de FUHRLÄNDER

Type de rotor	Axe horizontal	Longueur des pales	6,5 m
Nombre de pales	3	Diamètre du rotor	13 m
Vitesse de rotation	47/71 tr/min	Puissance nominale	30 kW
Vent de démarrage	2,5 m/s	Tension nominale	400 V (50/60 Hz)
Vent d'arrêt	N.C.	Hauteur du mât	40 m
Vent extrême	55 m/s	Prix catalogue (turbine et tour)	76 000 dollars $\approx$ 60 000 euros

L'investissement s'élèverait donc à plus ou moins 150 000€, avec l'installation et autres.

#### Puissance moyenne produite et rentabilité

Nous trouvons une espérance de production de  $\pm 61,3\text{MWh/an}$  pour les deux éoliennes de 30kW. Nous trouvons alors que la sablière mettrait alors **14 années** pour rentabiliser l'installation. Par la suite, elle peut espérer récupérer 456€/mois.

### 5.2.3. Cas de l'installation de trois éoliennes de 20 kW

#### Choix des éoliennes

Prenons par exemple la Jacobs 29-20 de Wind Turbine Industries (voir Annexes IV p.80) :

Tableau 21 : Caractéristiques de l'éolienne Jacobs 29-20 de Wind Turbine Industries

Type de rotor	Axe horizontal	Longueur des pales	4,5 m
Nombre de pales	3	Diamètre du rotor	9 m
Vitesse de rotation	N.C.	Puissance nominale	20 kW
Vent de démarrage	3,5 m/s	Tension nominale	40 – 180 VAC
Vent d'arrêt	N.C.	Hauteur du mât	26 – 32 – 39 m
Vent extrême	53 m/s	Prix (turbine et tour)	48 000 \$US ≈ 36 000 €
kWh/mois @16 km/h (F.U.)	1 644 kWh (11 %)	kWh/mois @20 km/h (F.U.)	2 691 kWh (18 %)

Le prix affiché ne tenant pas compte de l'installation de l'éolienne, ni de la maintenance, et autres, nous pouvons approximer le coût total de l'installation à 150 000€.

#### Puissance électrique moyenne produite et rentabilité

Nous trouvons qu'en moyenne, les trois éoliennes de ce type produiraient ±70,1MWh/an.

Le coût de l'installation étant approximé à 150 000€, la sablière mettrait donc **12 années** pour la rentabiliser.



Figure 59 : Photo de l'éolienne Jacobs 29-20

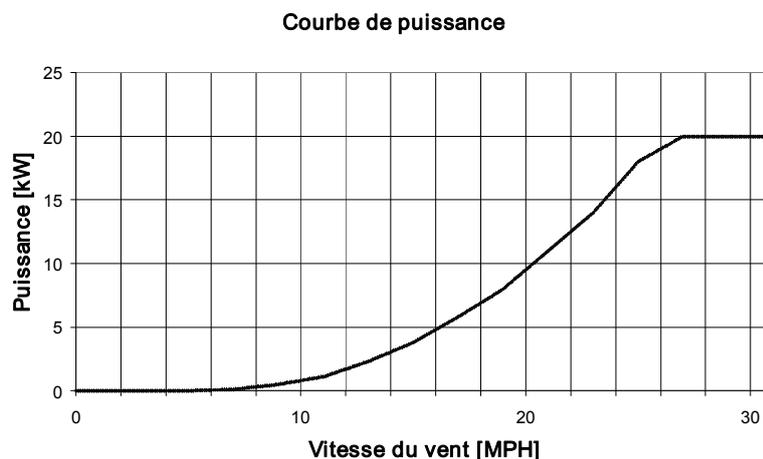


Figure 60 : Courbe de puissance de l'éolienne Jacobs

### 5.2.4. Cas de l'installation de 6 éoliennes de 10 kW

#### Choix des éoliennes

Prenons comme modèle l'éolienne l'Alizee 10000 que propose l'entreprise néerlandaise Fortis, dont voici les caractéristiques principales (voir Annexes IV p.77) :

Tableau 22 : Caractéristiques principales de l'éolienne AEP 10000 d'Auroville

Type de rotor	Axe horizontal	Longueur des pales	3,3 m
Nombre de pales	3	Diamètre du rotor	7 m
Vitesse de rotation	N.C.	Puissance nominale	10 kW
Vent de démarrage	3 m/s	Tension nominale	3 x 230 V
Vent d'arrêt	N.C.	Hauteur du mât	18 - 36 m
Vent extrême	60 m/s	Prix (turbine et tour)	25 700 dollars ≈ 19 500 euros

Le prix affiché ne tenant pas compte de l'installation, de la maintenance, et autres.

#### Puissance moyenne produite et rentabilité

Si nous calculons l'énergie annuelle que produirait cette éolienne située à 36m de hauteur, nous obtenons qu'une de ces éoliennes aurait produit en moyenne  $\pm 1,4 \text{ kW}$  sur l'année 2005. A elles six, elles pourraient donc produire  $\pm 74 \text{ MWh}$ , l'installation complète coûtant alors approximativement 150 000 € (en comptabilisant les frais dus au couplage et autres).

Donc, nous obtenons qu'à ce rythme, la sablière mettrait **11 années** pour rentabiliser l'installation. A partir de ces 11 années, la sablière réduira donc sa facture de plus ou moins 545€ par mois, c'est-à-dire 10 % de sa facture actuelle.

### 5.2.5. Conclusion

Tableau 23 : Récapitulatif de la rentabilité des différents cas envisagés

	Puissance d'une éolienne [kW]	Nombre	Puissance totale installée [kW]	Energie annuelle produite [MWh]	Années d'amortissement	Bénéfice mensuel espéré
1	60	1	60	78,8	13	1172 €/mois
2	30	2	60	61,3	14	912 €/mois
3	20	3	60	70,1	13	1043 €/mois
4	10	6	60	74	11	1101 €/mois

Malgré certaines grosses approximations (inévitables ; il faudrait en effet soumettre cette idée à un bureau d'études spécialisé qui analyserait la situation en détails), nous voyons que c'est

le cas 4, c'est-à-dire l'installation composée de 6 éoliennes de 10kW, qui paraît être le plus rentable pour la sablière.

Voyons maintenant si l'installation d'une éolienne de plus grande puissance serait plus rentable.

### 5.2.6. Etude l'IRM

L'étude que l'IRM a effectuée sur le potentiel météorologique de la sablière (voir Annexes II p.25) comprend aussi une estimation du potentiel de production électrique d'un l'éolienne « Turbowinds T600-48 » sur différentes zones du site de la sablière. C'est ce type d'éolienne qui a été implanté à Perwez, ville située à 12km de la sablière. Voici ses caractéristiques principales :

**Tableau 24 : Caractéristiques principales de la Turbowinds T600-48**

Turbine type:	600 kW
Rotor diameter:	48 m
Hub height:	50 / 55 / 60 m
Rated windspeed:	12.5 m/s
Cut in:	3 m/s
Cut out:	25 m/s
Survival:	60 m/s

J'ai refait l'étude moi-même sur base des mesures de vent effectuées à Ernage, et j'ai obtenu des potentiels énergétiques différents de ceux calculés par l'IRM :

**Tableau 25 : Comparaison des potentiels énergétiques avec l'étude de l'IRM**

	10 m	60 m
IRM	155 MWh/an	480 MWh/an
mes bases de calculs	277 MWh/an	720 MWh/an

Cette différence s'explique par les valeurs différentes de vitesses de vent utilisées comme base de calcul.

Suivant mes calculs, la sablière mettrait pour la rentabiliser (en estimant le coût de l'éolienne et de son installation à 800.000+200.000=1.000.000 euros) :

$$1.000.000/(720*87,5+720*91)=\underline{7,8 \text{ années.}}$$

Alors qu'en prenant les valeurs de l'IRM, ±12 années seraient nécessaires.



### 5.3.2. Consommation électrique d'une maison familiale en Belgique

En janvier 2000, Test-Achats a dressé un tableau de la consommation électrique normale d'un ménage belge composé de 4 personnes :

**Tableau 26 : Répartition de la consommation électrique annuelle d'un ménage belge**

		consommation annuelle moyenne [kWh]
Chauffe-eau	bain + cuisine	3 100
Cuisinière	taque + four	560
Surgélateur		400
Lave-vaisselle		344
Eclairage		300
Frigo		226
Télévision		146
Sèche-linge		145
Ordinateur		137
Micro-ondes		122
Machine à laver		110
Autres électroménagers		400
<b>TOTAL</b>		<b>5990</b>

Soit donc approximativement 6 MWh/an. Notons que cette valeur correspond à un ménage constitué de 4 personnes. En effet, selon d'autres sources, la consommation moyenne d'une habitation belge est de 4MWh/an. Acceptons tout de même la valeur de 6 MWh/an.

### 5.3.3. Vitesses et orientations des vents en Belgique

Une étude anémométrique sera nécessaire pour pouvoir déterminer la puissance moyenne récupérable par une éolienne en Belgique. Nous allons nous baser sur les statistiques de vents effectués par l'IRM à la station météorologique d'Uccle (Bruxelles) et de Saint-Hubert (province du Luxembourg).

L'orientation des vents n'est pas un facteur dominant dans le dimensionnement de l'éolienne. Il l'est surtout pour le positionnement. Supposons simplement qu'il vienne en permanence du Sud-Ouest.

Voici donc, sur base de mesures effectuées chaque heure par l'IRM à la station météorologique de Saint-Hubert (pour une altitude de 10 mètres), les vitesses des vents sur une année type (en bleu), ainsi que leur moyenne journalière (en rouge) :

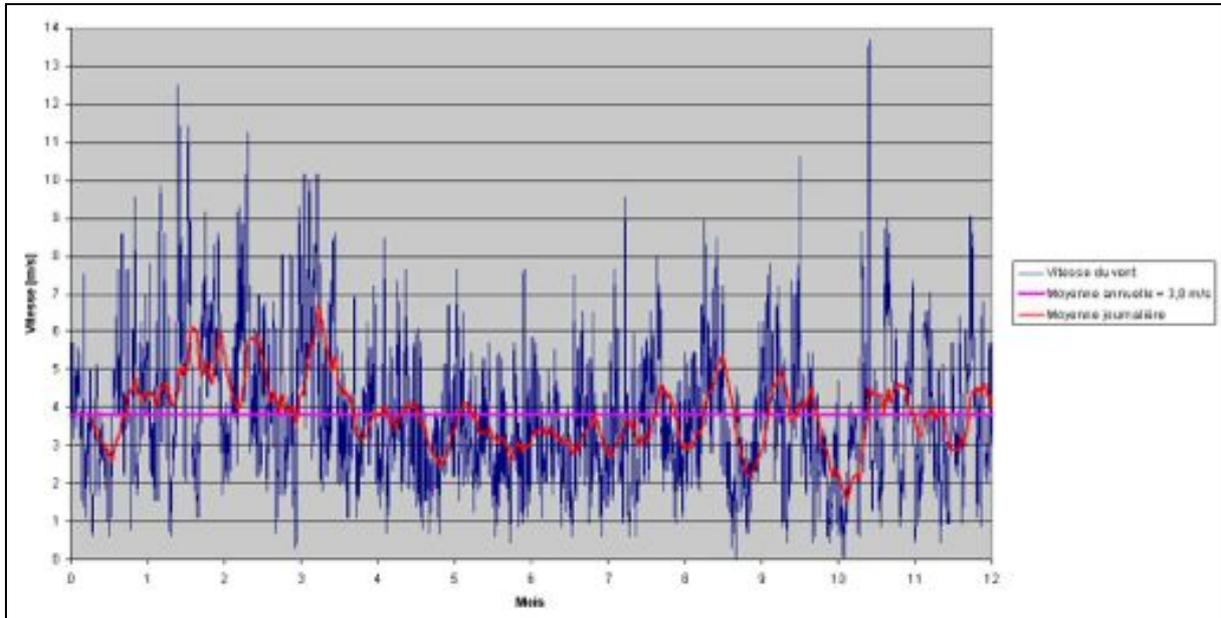


Figure 63 : Vitesses des vents sur une année type à Uccle

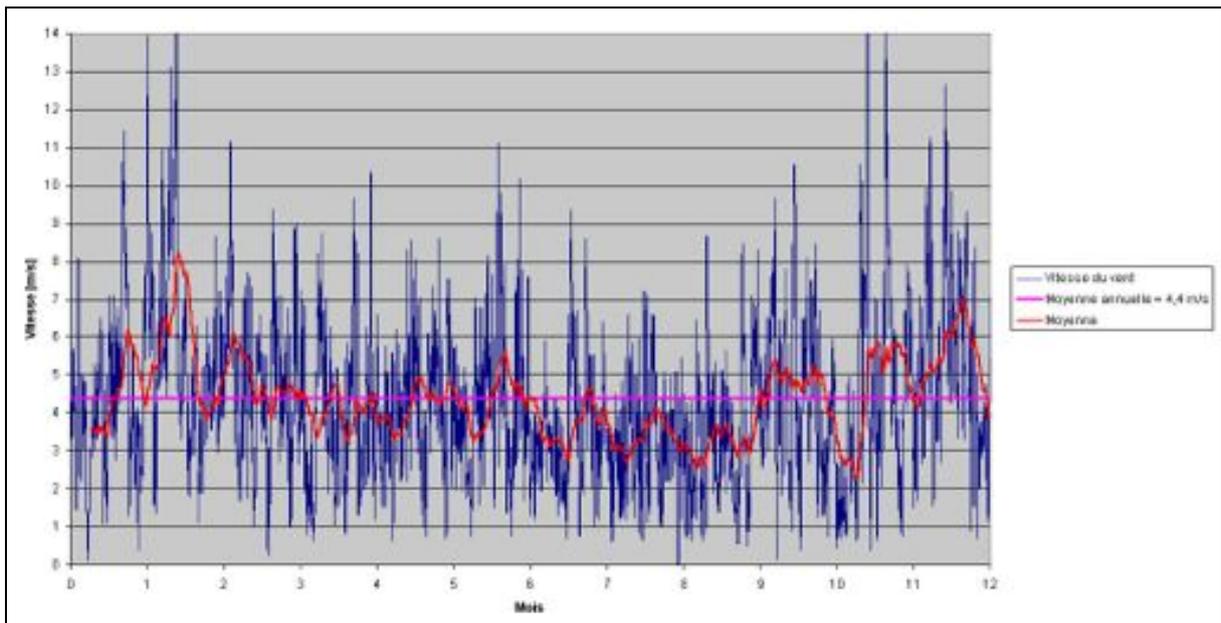


Figure 64 : Vitesses des vents sur une année type à Saint-Hubert

La vitesse moyenne du vent étant de 3,8 m/s à Uccle (milieu urbain) et 4,4 m/s à Saint-Hubert (milieu plus agricole), sur base de mesures effectuées à 10 mètres de hauteur.

### 5.3.4. Puissance récupérable

En approximant les différents rendements ( $\eta_{\text{éolienne}}=0,6$  ;  $\eta_{\text{pompe}}=0,6$  ;  $\eta_{\text{gl roue}}=0,7 \Rightarrow \eta_{\text{global}}=0,15$ ), et pour des diamètres de l'éolienne de 2 et 4 mètres, l'on obtiendrait :

**Tableau 27 : Puissances électriques récupérables par l'installation domestique**

	Désignation	Ø = 2 m		Ø = 4 m	
		Uccle	St-Hubert	Uccle	St-Hubert
Surface balayée par les pales	S	3,14 m <sup>2</sup>		12,57 m <sup>2</sup>	
Puissance moyenne annuelle récupérable par l'éolienne	P <sub>éol moy</sub>	117 W	180 W	470 W	691 W
Puissance électrique moyenne annuelle productible	P <sub>élec moy</sub>	29 W	45 W	118 W	174 W
Energie annuelle productible	E <sub>élec</sub>	254 kWh	394 kWh	1 034 kWh	1 524 kWh

Formules utilisées :  $P_{\text{éol}} = 16/27 * 0.5 * 1.25 * S * V^3$

$$P_{\text{élec moy}} = P_{\text{éol moy}} * 0,7 * 0,6 * 0,6 \quad ; \quad E_{\text{élec}} = P_{\text{élec moy}} * 24 * 365$$

### 5.3.5. Rentabilité

En acceptant 6 MWh/an comme consommation électrique, voici quelle serait la facture électrique du ménage<sup>20</sup>, en posons que celui-ci possède un compteur bihoraire:

**Tableau 28 : Détermination de la facture électrique d'un ménage belge consommant 6MWh/an**

<b>Tarif social - Electricité</b>			
Consommation annuelle totale	de jour :	4 000	kWh
	de nuit :	2 000	kWh
Type de compteur		bihoraire	
Coût HTVA		735,49 €	
Coût TVAC		885,93 €	
cEur par kWh		14,77	
Calcul établi sur base des paramètres suivants :		Nc : 1,6253	Ne : 1,4647

Posons que le système ne produira de l'électricité qu'en heures pleines, de manière à réduire un maximum la facture électrique.

<sup>20</sup> Sur base du tableur Excel fourni sur le site internet : <http://www.cwape.be/xml/themes.xml?IDC=1380>

Par année, le ménage économiserait, suivant les cas<sup>21</sup> :

**Tableau 29 : Economies annuelles sur la facture électrique suivant les cas envisagés**

	Ø = 2 m		Ø = 4 m	
	Uccle	St-Hubert	Uccle	St-Hubert
Economies annuelles sur la facture électrique	47 €	73 €	190 €	280 €
Montant en certificats verts annuels (10 premières années)	23 €	36 €	94 €	139 €
<b>TOTAL</b>	70 €	109 €	284 €	419 €

Mais quel serait le coût de l'installation ?

**Tableau 30 : Estimation des coûts liés au système domestique**

	Ø = 2 m		Ø = 4 m	
	Uccle	St-Hubert	Uccle	St-Hubert
Eolienne de pompage + pompe associée	1900 €	1900 €	7500 €	7500 €
Roue + génératrice	400 €	500 €	1000 €	1250 €
Autres (installation, entretien, etc.)	1000 €	1000 €	3000 €	4000 €
<b>TOTAL</b>	3300 €	3400 €	11500 €	12750 €

Et voici donc, pour chacun des cas, le nombre d'années que mettrait le foyer pour amortir l'installation :

**Tableau 31 : Années d'amortissement du système**

	Ø = 2 m		Ø = 4 m	
	Uccle	St-Hubert	Uccle	St-Hubert
Nombre d'années d'amortissement	55	32	46	31

Nous remarquons que le cas le plus rentable serait qu'un foyer habitant Saint-Hubert installe le système composé d'une éolienne de 4 mètres de diamètre. De cette façon, il mettrait 31 années pour amortir l'installation, mais seulement *si l'on accepte les valeurs des différents rendements et coûts liés au système choisis*. Il est clair qu'en réalité, la puissance récupérable par une éolienne quelconque varie suivant le lieu, le relief, etc. Une étude devrait alors être effectuée au cas par cas. Sans quoi, l'on peut très fort s'écarter des résultats réellement mesurés. C'est pourquoi cette étude ne doit être abordée qu'à titre indicatif.

<sup>21</sup> Données calculées sur base des paramètres Nc et Ne.

<b>Bibliographie</b>
----------------------

➤ Ouvrages

- **Energies éoliennes et hydrauliques**

- |                        |      |  |
|------------------------|------|--|
| ALEXANDRE, Jacques     | 1994 | <i>Guide des énergies renouvelables</i> , Ministère de la région wallonne, Jambes  |
| BERGERON, Paul         | 1959 | <i>Hydraulique appliquée II-III</i> , Les procédés Dorel, Paris  |
| COUNTY, Guy            | 2001 | <i>Eoliennes et aérogénérateurs : guide de l'énergie éolienne</i> , Edisud, Aix-en-Provence                                  |
| ENCKEL, Marianne       | 1997 | <i>L'énergie au futur</i> , Editions d'En Bas, Association pour le Développement des Energies Renouvelables (ADER), Lausanne |
| GINOCCHIO, Roger       | 1978 | <i>L'énergie hydraulique</i> , Direction des études et recherches d'électricité de France, Editions Eyrolles, Paris          |
| HOVIN, P.              | 2005 | <i>Machines opératrices : Tome I</i> , ECAM, Bruxelles   |
| LE CHAPPELLIER, Pierre | 1981 | <i>Le vent, les éoliennes et l'habitat</i> , Editions Eyrolles, Paris  |
| LE GOURIERES, Désiré   | 1980 | <i>Energie éolienne : Théorie, conception et calcul pratique des installations</i> , Editions Eyrolles, Paris                |
| ROY, Marie-Annick      | 1993 | <i>Guide de la technique 3 : l'énergie</i> , Presses polytechniques et universitaires romandes, Montreux                     |

➤ Documents internet

• **Energie hydraulique**

- DEL PEDRO, Michel            2003    *Les roues hydrauliques par dessus*, MHYLAB
- MADET, D.                        2001    *Hydraulique et géothermie : principes physiques et modalités d'utilisation*, Ecole d'été de physique
- PEPIN TCHOUATE, Héteu      2003    *La filière hydroélectrique : Aspects technologiques et environnementaux*, UCL, Belgique
- JOSEPH, Martin
- TARDIEU, Bernard            2005    *L'énergie hydroélectrique et l'énergie éolienne*, Académie des technologies

• **Energie éolienne**

- BRUGGEMAN, Géraldine      2005    *Transfert de la fabrication d'une turbine hydraulique JLA de type Cross Flow au Sri Lanka*, ULB, Bruxelles
- CWAPE                            2007    *Avis concernant la compensation entre les achats et les fournitures du client final disposant d'une installation d'autoproduction de petite puissance*, Commission wallonne pour l'énergie, Jambes
- DGTRE                            /        *Catalogue of European Urban Wind Turbine Manufacturers*, European commission
- KRUG SARL                        2006    *Les moissonneurs du vent : projet de valorisation des ressources éoliennes sur les exploitations agricoles*, Krug Sarl, Limoux
- LECOMTE, Philippe            /        *Eoliennes*, Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique
- RAPIN, Marc
- SZECHENYI, Edmond
- GRIGNOUX, T.                 2006    *Eoliennes en milieu urbain – Etat de l'art*, Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies, Ile-de-France
- GIBERT, R.
- NEAU, P.
- BUTHION, C.

- TYRLIK, Adrien                      2003    *Les éoliennes*, Villeveyrac
- /    2003    *Les systèmes éoliens autonomes : guide de l'acheteur*,  
Ressources naturelles Canada, Ottawa
- **Energie électrique**
- DGTRE                                      2004    *Rapport d'activités 2004*, Ministère de la région  
wallonne, Jambes
- GHIGNY, Francis                      2006    *Actualité des marchés gaz, électricité et CV*, Commission  
wallonne pour l'énergie, Namur
- MELIN, André                            2005    *Libéralisation des marchés de l'énergie : premier bilan  
et perspectives*, Commission wallonne pour l'énergie,  
Liège
- MULTON, Bernard                      2007    *Stockage de l'énergie électrique : état de l'art*, ECRIN  
RUER, Jacques
- TUSSET, Sylvain                        1997    *Gestion de la pointe quart horaire*, Ministère de la  
région wallonne, Jambes

## ➤ Liens internet

- **Eoliennes**

- <http://www.windpower.org/fr/tour/>                      « Danish Wind Industry Association »
- <http://www.awea.org/>                                      « American Wind Energy Association »
- <http://users.swing.be/compagnons-eole/>                      A.S.B.L. belge
- <http://assoc.orange.fr/eolehna1/index.htm>                      Association Ardeshe
- <http://www.aureka.com/windpumps/>                      Constructeur d'éoliennes de pompage
- <http://www.ecolabenergies.fr/index.html>                      Constructeur d'éoliennes de pompage
- <http://perso.orange.fr/energies-nouvelles-entreprises/>  
Constructeur d'éoliennes de pompage, de  
pompes, énergie solaire, etc.
- <http://www.eolienne-direct.com/>                      Constructeur d'éoliennes électriques
- <http://www.c-power.be/>                                      Constructeur belge d'éoliennes électriques

- <http://www.bornay.com/> Constructeur d'éoliennes électriques espagnol
- <http://www.aerojoule.com/#> Constructeur d'éoliennes
- <http://www.fuhrlaender.com/> Constructeur allemand d'éoliennes électriques
- <http://www.vergnet.fr/> Constructeur français d'éoliennes
- <http://www.bergey.com/> Constructeur d'éoliennes électriques
- <http://www.krugwind.com/> Constructeur d'éoliennes
- <http://www.uqar.quebec.ca/chaumel/guideeolienACEE.htm> Catalogue de petites éoliennes
- <http://perso.orange.fr/andrews/> Construire son éolienne
- <http://perso.orange.fr/ebonys/> Construire son éolienne
- [http://www.canren.gc.ca/default\\_fr.asp](http://www.canren.gc.ca/default_fr.asp) Réseau canadien des énergies renouvelables
- <http://users.swing.be/ecotopie/> Réalisations écologiques exemplaires
- <http://www.mini-eoles.com/menu.htm> Site d'informations
- <http://www.alizes-eole.com/> Projet d'installation d'éoliennes au Sénégal
- <http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89olienne> Article Wikipedia sur les éoliennes

- **Hydraulique**

- <http://clients.newel.net/particulier/amader/> Calculs sur les roues hydrauliques
- [http://www.a3i.fr/roue\\_Classification1.htm](http://www.a3i.fr/roue_Classification1.htm) Calculs sur les roues hydrauliques
- <http://enseeiht.fr/hmf/travaux/CD0102/travaux/2h/tpld/moulins/acceuil.htm> Etude théorique et expérimentale de l'utilisation de l'énergie hydraulique par les moulins
- <http://www.bega-wasserkraft.de/> Constructeur allemand de roues à augets
- <http://perso.orange.fr/energies-nouvelles-entreprises/> Constructeur d'éoliennes de pompage, de pompes, énergie solaire, etc.
- [http://www.canren.gc.ca/default\\_fr.asp](http://www.canren.gc.ca/default_fr.asp) Réseau canadien des énergies renouvelables
- <http://assoc.orange.fr/eolehna1/index.htm> Association Ardeshe
- <http://users.swing.be/ecotopie/> Réalisations écologiques exemplaires
- <http://www.seo.lu/vianden/donnees.htm> La centrale de pompage de Vianden

- **Climatologie**

- <http://www.meteo.be/index.html> Institut royal météorologique de Belgique

- **Autres**

- <http://www.shanks.be/> Site de Shanks division Belgique

- **Facture électrique**

- <http://www.cwape.be/> Commission wallonne pour l'énergie
- <http://www.spe.be/> Fournisseur électrique
- <http://mrw.wallonie.be/energieplus/cogeneration/CDRom/analysefacture/evaluer/frames/cbfaecomprendtermesfactu.htm> Comprendre les termes de la facture électrique
- <http://mrw.wallonie.be/energieplus/entree.htm> Conception et rénovation technique des bâtiments tertiaires



Étude de la faisabilité d'un système de production  
d'électricité pour une sablière à l'aide d'éoliennes  
mécaniques

**ANNEXES**

Promoteur : PIESENS Paul

Travail de fin d'études présenté par

Tuteur : TILMAN Philippe

**DHEN Mikaël**

en vue de l'obtention du diplôme

**d'Ingénieur Industriel Finalité électro-mécanique**

Années académique 2006–2007

Haute Ecole LEONARD de VINCI



Institut Supérieur Industriel

**Tuteur : M. Philippe Tilman**

Bureau for Investigation and  
Prospection

# BIP

Boulevard Neuf, 3  
1495 Villers-La-Ville

**Tuteur : M. Paul Piessens**

Étude de la faisabilité d'un système de production  
d'électricité pour une sablière à l'aide d'éoliennes  
mécaniques

Promoteur : PIESSENS Paul

Travail de fin d'études présenté par

Tuteur : TILMAN Philippe

**DHEN Mikaël**

en vue de l'obtention du diplôme

**d'Ingénieur Industriel Finalité électro-mécanique**

Années académique 2006–2007

# TABLE DES MATIÈRES

---

<b>ANNEXES I :</b>	<b>DONNEES ET THEORIES</b>	<b>1</b>
I.I.	Facture électrique de la sablière	1
I.II.	Les STEP (Stations de transfert d'énergie par pompage)	3
I.III.	Eléments électriques de la laveuse	4
I.IV.	La météorologie des vents	5
I.V.	Mesures effectuées à la station météorologique de Beauvechain	8
I.VI.	Les éoliennes de pompage	9
I.VII.	Rugosité et cisaillement du vent	20
I.VIII.	Articles 7 et 14 extraits de l'Arrêté royal relatif à l'établissement de mécanismes visant la promotion de l'électricité produite à partir des sources d'énergie renouvelables	22
<b>ANNEXES II :</b>	<b>ANALYSE DU POTENTIEL METEOROLOGIQUE EFFECTUEE PAR L'IRM</b>	<b>24</b>
<b>ANNEXES III :</b>	<b>CALCULS ANNEXES</b>	<b>58</b>
III.I.	Limite de Betz	59
III.II.	Calcul de la diminution du volume du bassin supérieur dans le cas d'un assouvissement complet des besoins électriques	62
III.III.	Evolution de la puissance transmissible par l'éolienne pour les années 2004 et 2005	65
III.IV.	Evolution de la puissance transmissible par la pompe pour les années 2004 et 2005	66
III.V.	Calcul du volume du bassin supérieur dans le cas d'un assouvissement partiel des besoins électriques (1 éolienne)	67
III.VI.	Calcul du volume du bassin supérieur dans le cas d'un assouvissement partiel des besoins électriques (10 éoliennes)	69
III.VI.	Calcul du volume du bassin supérieur dans le cas d'un assouvissement complet des besoins électriques	70
<b>ANNEXES IV :</b>	<b>CATALOGUES D'EOLIENNES</b>	<b>72</b>
IV.I.	Tableau de prix d'éoliennes de pompage avec leur pompe associée et autres éléments	73
IV.II.	Eoliennes multipales Jbornay	75
IV.III.	Eoliennes de 10 kW	77
IV.IV.	Eoliennes de 20kW	80
IV.V.	Eolienne de 30 kW	83
IV.VI.	Eoliennes de 60 kW	85
<b>ANNEXES V :</b>	<b>ILLUSTRATIONS</b>	<b>86</b>
V.I.	Photos de la sablière	87
V.II.	Eoliennes de pompage	89
V.III.	Roues à augets	91
V.IV.	Divers	90

# ANNEXES I

## Données et théories

## I.I. Facture électrique de la sablière

Mois de livraison : **Octobre 2006**

Energie Active (+réactive)		MWh	EUR/MWh	Montant HTVA	
Consommation totale		46,42550			[1]
Au tarif Heures pleines		42,39080	67,9000	2,865,82	[2]
Au tarif Heures creuses		4,03470	39,9000	160,98	[2]
Réactif (inductif Heures pleines)		0,000			
Réactif (inductif Heures creuses)		0,000			
Réactif (capacitif Heures pleines)		32,147 MVARh			
Réactif (capacitif Heures creuses)		4,812 MVARh			
cos phi		0,782			
Pointe mensuelle					
Pointe mensuelle		242,800 kW	1,50 €/kW	364,20	[5]
Divers		MWh	EUR/MWh		
Tarif énergie réactive		36,553	14,48866 MVARh	18,0000	217,34 [8]
Estimation Transport		46,42550	10,5300	488,86	[9]
Contribution Energie Renouvelable (compris)					
Estimation Distribution Heures pleines		42,39080	27,3448	1,159,17	[12]
Estimation Distribution Heures creuses		4,03470	27,3448	110,33	[13]
Total energie $+(1)+(2)+(3)+(5)+(8)+(9)+(12)+(13)$				6,365,50	[14]
Cotisation fédérale		(1,8967 (1 = 81,29%))	46,42550	1,5435	71,55 [17]
Redevance de voie GRTL		46,42550	0,2535	11,77	[20]
Pensions non capitalisées		46,42550	2,4260	112,53	[21]
Redevance de Voie GRD		46,42550	2,3130	107,38	[22]
Base imposable [14]+[17]+[20]+[21]+[22]				6,669,94	[29]
TVA			21%	1,190,69	[30]
Redevance de Raccordement		46,4255	0,60000	27,86	[32]
Total à payer				8,888,49	EUR

Annexe à la facture concernant la livraison de l'énergie électrique pour :  
**SHANKS BRABANT Rue des Trois Burettes 65**

mat: 5414901100000041

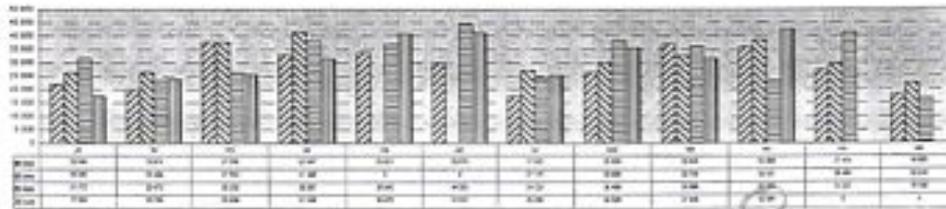
Ces informations vous sont envoyées dans le cadre de l'arrêté du Gouvernement Wallon relatif aux obligations de service public du 29 mars 2002.

**I. Consommation totale par mois en kWh**



2003 2004 2005 2006

**I. Consommation totale Hp par mois en kWh**



2003 2004 2005 2006

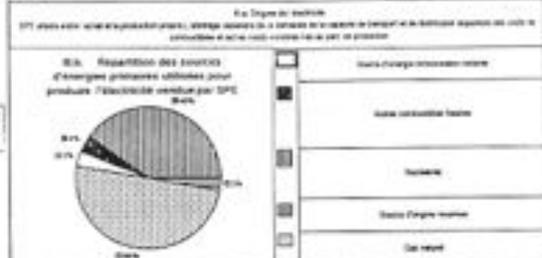
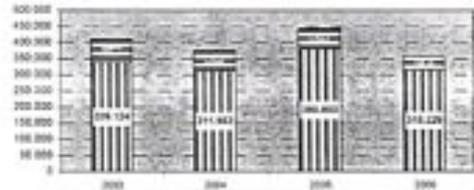
**I. Consommation totale Hc par mois en kWh**



2003 2004 2005 2006

\*Les données manquantes de deux ont été communiquées par votre gestionnaire de réseau

**II. Consommation totale par an en kWh**



---

## **I.II. Les STEP (Stations de transfert d'énergie par pompage)**

L'électricité ne peut pas être stockée. On cherche donc les moyens de stocker de l'énergie sous diverses formes. Une des plus efficaces est de la stocker sous forme d'énergie potentielle de l'eau. En heures creuses, alors que l'on dispose d'une production d'électricité excédentaire, on pompe de l'eau entre un bassin bas et un bassin haut ; en période de pointe, cette eau est turbinée pour fournir de l'électricité. Les hauteurs de chute sont en général très élevées (800 à 1000 m), les capacités des réservoirs (généralement artificiels) étant adaptées aux objectifs poursuivis.

En France, la STEP de Revin est capable de fournir une puissance de pointe de 1 000 MW environ et celle de Grand'Maison, dans l'Isère, 1 800 MW. En Belgique, dans les Ardennes, la puissance installée de la STEP de Coe-Trois Ponts est égale à 1 060 MW pour une différence de cote qui varie entre 231 mètres et 275 mètres en fonction des niveaux atteints dans les réservoirs entre les réservoirs supérieurs et le réservoir inférieur. Cette dernière, profitant de sa position centrale sur le réseau ouest-européen est un outil efficace pour ajuster l'offre et la demande sur les différents réseaux qui échangent de l'électricité en permanence. Les STEP sont également utilisées pour compenser l'énergie réactive, la pompe étant utilisée comme un moteur une fois la bêche spirale dénoyée.

Les STEP associées à des parcs d'éoliennes permettent de compenser l'irrégularité et la faible prédictibilité du vent ou du moins de lisser les variations de production.

Notre système de production hydro-électrique diffère donc que très peu du principe des STEP. La seule différence se situant dans la source d'énergie de pompage, qui dans le cas des STEP est l'énergie électrique de nuit meilleure marché, tandis que dans notre projet, c'est l'énergie mécanique transférée depuis une éolienne agricole. Cette alternative n'est en fait possible qu'à une échelle réduite, car premièrement, l'énergie mécanique fournie par une éolienne agricole est loin d'être suffisante pour remonter ne fût qu'une petite partie de l'eau du bassin inférieur, et deuxièmement, tout simplement parce que la hauteur maximale à laquelle une éolienne de pompage peut remonter l'eau est de 7 mètres.

### I.III. Eléments électriques de la laveuse

$1 \text{ cv} = 0.735 \text{ kW}$ $1 \text{ kW} = 1.361 \text{ cv}$
--

<u>Elément</u>	<u>Quantité</u>	<u>Fréquence</u> <u>d'utilisation</u>	<u>Puissance</u> <u>[CV]</u>	<u>Puissance</u> <u>[kW]</u>	<u>Puissance</u> <u>totale [kW]</u>
Moteur (pompe Limatex) : l'une puis l'autre	2	0,5	75	55,125	55,125
Egoutteur	1	1	10	7,35	7,35
Navette	1	1	5	3,675	3,675
Sauterelle	2	1	5	3,675	7,35
Sauterelle	1	1	1	0,735	0,735
Transporteuse	1	1	10	7,35	7,35
Cribleuse	1	1	10	7,35	7,35
Vibreux	1	1	0,8	0,588	0,588
Pompe (Flygt)	3	1	25	18,375	55,125
Alimentation	2	1	1,4	1,029	2,058
Egoutteur	2	1	10	7,35	14,7
Refoulement	1	1	25	18,375	18,375
Pompe alimentation	2	1	10	7,35	14,7
<b><u>Total</u></b>					<b>194,481</b>

---

## I.IV. La météorologie des vents

### 1. Origine du vent

L'atmosphère – essentiellement de l'oxygène, de l'azote et de l'eau – est caractérisée par sa pression, sa température et son humidité, ces paramètres variant avec l'altitude.

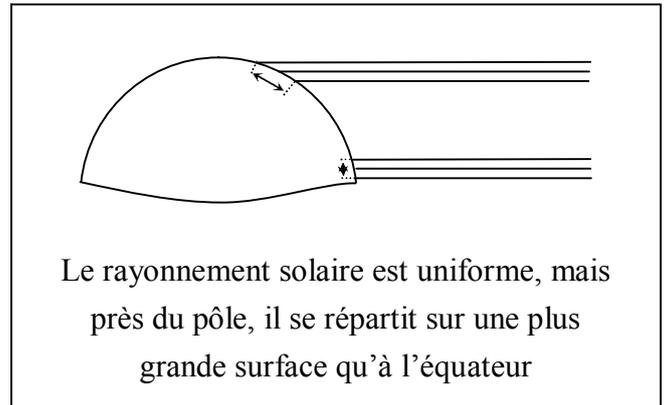
Le rayonnement solaire est absorbé de façon très différente aux pôles et à l'équateur du fait de la rotondité de la terre. L'énergie absorbée à l'équateur est donc très supérieure à celle absorbée aux pôles. Ces variations de température provoquent des différences de densité des masses d'air entraînant leur déplacement d'une latitude à une autre, des zones où la densité de l'air est élevée vers celles où elle est faible.

Il s'établit ainsi un certain équilibre par transfert d'énergie vers les zones à température extrêmes, qui sans cela ne serait pas vivables. Ces déplacements sont considérablement influencés par la force de Coriolis, qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement vers la droite dans l'hémisphère nord, et vers la gauche dans l'hémisphère sud.

Ces lois définissent les mouvements généraux de déplacement des masses d'air, donc du vent. On peut prévoir la direction des vents dominants dans la plupart des parties du globe avec une certaine assurance. Cependant, ces directions uniques sont souvent perturbées par :

- les orages qui troublent la direction dominante bien que celle-ci soit bien apparente dans les relevés continus ;
- les obstacles qui modifient le rapport des forces de telle sorte qu'au sol, l'air est moins dévié vers la droite qu'en altitude et que les obstacles élevés modifient de façon notable la circulation générale des masses d'air ;
- les dépressions cycloniques qui peuvent se déplacer dans n'importe quelle direction mais qui, en fait, ont tendance à aller dans certaines directions établies se superposant au système général de la pression atmosphérique.

Le vent est donc caractérisé par les deux grandeurs variables que sont la vitesse et la direction.



---

## 2. Les variations de la vitesse du vent dans le temps

### - Les phénomènes instantanés

Elles sont assez difficiles à caractériser ; si les régimes du vent sont répétitifs, avec une bonne approximation sur l'année, il faut des enregistrements météorologiques sur 20 ans pour éventuellement avoir une idée des variations instantanées... Et pourtant, il est important de tenir compte des rafales car la puissance récupérable par un moteur éolien (mécanique ou électrique) est proportionnelle au cube de la vitesse du vent (voir ci-après). Un vent à rafales imposera donc des contraintes qu'il sera nécessaire de prendre en compte dans l'utilisation du moteur éolien et dans le calcul de son support, la plupart des systèmes de régulation ayant une inertie souvent très supérieure à la durée de la rafale.

### - Les phénomènes journaliers

Ils sont dus aux phénomènes thermiques liés au rayonnement solaire. Les variations de la température avec l'altitude créent des courants ascendants. La vitesse moyenne du vent est plus faible pendant la nuit, où elle varie peu. Elle augmente à partir du lever du soleil et atteint son maximum entre 12h et 16h. Par exemple, les variations de température entre la mer et la terre créent des « brises de mer » et des « brises de terre ».

### - Les phénomènes saisonniers

#### *Mensuels*

Les variations mensuelles dépendent essentiellement du lieu géographique et seuls les relevés météorologique peuvent renseigner sur ces variations.

#### *Annuels*

Les variations annuelles sont répétitives avec une bonne précision, si bien que des renseignements sur une année permettent une bonne évaluation de l'énergie récupérable sur un site.

### - Les variations de vitesse du vent avec l'altitude

Elle dépend essentiellement de la nature du terrain au-dessus duquel se propagent les masses d'air. Ces variations peuvent être représentées par une loi simple de la forme :

$$\frac{V_1}{V_2} = \left( \frac{h_1}{h_2} \right)^\alpha$$

Où  $V_1$  et  $V_2$  représentent les vitesses de vent horizontales aux hauteurs respectives  $h_1$  et  $h_2$  ;  $\alpha$  caractérise le terrain.

Ceci montre bien que les sites les plus intéressants pour la récupération d'énergie éolienne sont les sites peu ou pas accidentés pour lesquels l'exposant  $\alpha$  est faible. En effet, dans ce cas, on bénéficie de vitesses élevées près du sol et la variation de vitesse du vent avec l'altitude est faible ; la vitesse du vent vue par les différentes parties hautes et basses de la machine a sensiblement la même valeur. Ceci a pour conséquence directe de diminuer les contraintes cycliques sur les pales du moteur éolien lorsqu'il tourne. Cette considération est d'autant plus importante que le diamètre de l'hélice est grand.

### 3. Les variations de l'orientation du vent dans le temps

- Les variations instantanées de direction : les turbulences

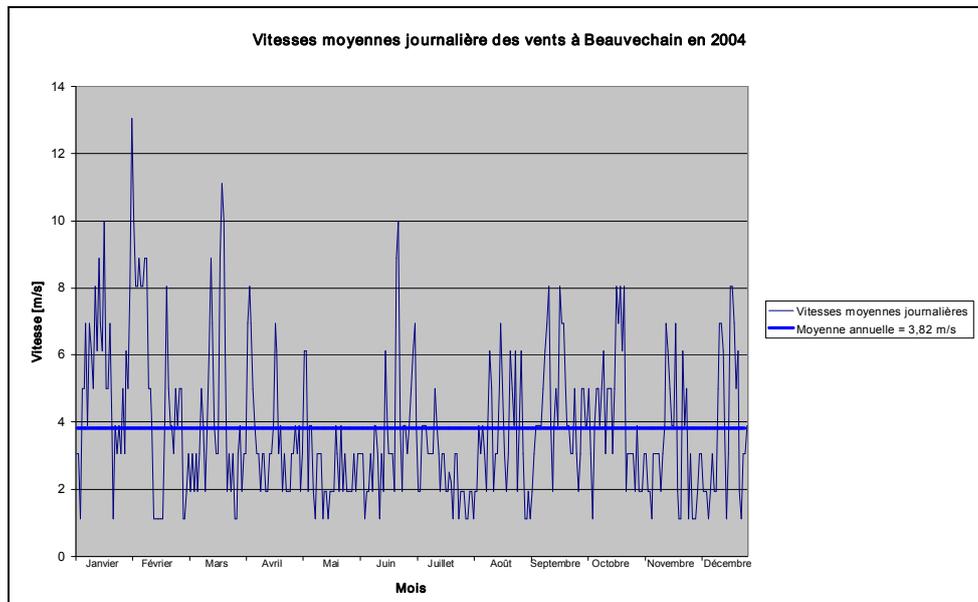
Elles sont caractéristiques de sites perturbés par des obstacles qui modifient l'écoulement régulier des masses d'air. Ces variations instantanées de direction doivent être prises en considération car elles imposent des contraintes sévères à toutes les machines à axe horizontal.

- Les variations saisonnières : à chaque saison correspond une direction générale du vent.

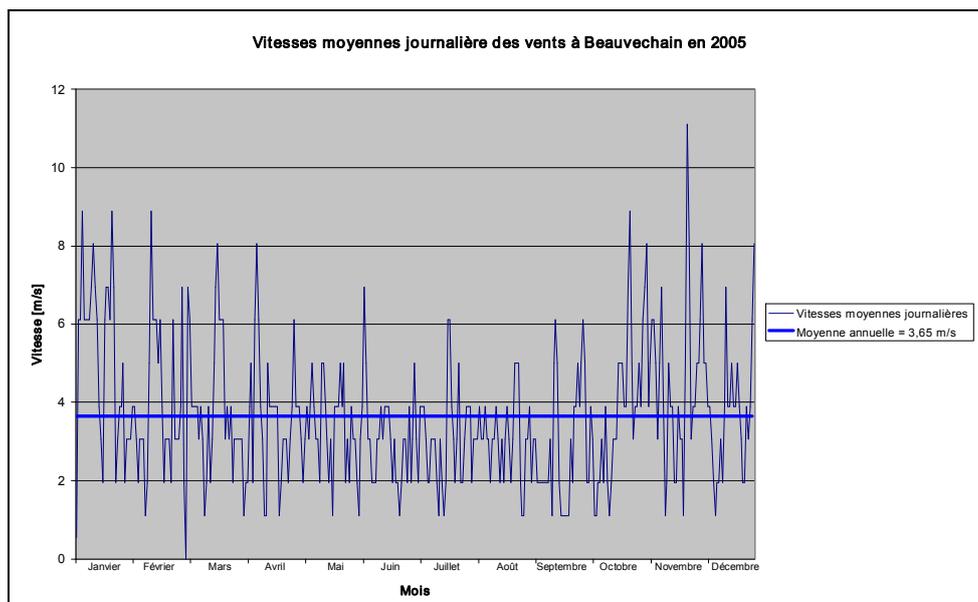
### 4. Mesure des vitesses de vent

Degrés	Vitesse du vent			Description générale	Pression sur surface plane en N/m <sup>2</sup>
	Beaufort	Nœuds	m/s		
0	1	0 / 0,4	< 1	Calme	
1	1 / 3	0,5 / 1,5	1 / 5	Très légère brise	1,3 (1 m/s)
2	4 / 6	1,6 / 3,4	6 / 11	Légère brise	8 (2,5 m/s)
3	7 / 10	3,5 / 5,5	12 / 19	Petite brise	32 (5 m/s)
4	11 / 16	5,5 / 8	20 / 28	Jolie brise	64 (7 m/s)
5	17 / 21	8,1 / 10,9	29 / 38	Bonne brise	130 (10 m/s)
6	11 / 27	11,4 / 13,9	39 / 49	Vent frais	220 (13 m/s)
7	28 / 33	14,1 / 16,9	50 / 61	Grand frais	330 (16 m/s)
8	34 / 40	17,4 / 20,4	62 / 74	Coup de vent	520 (20 m/s)
9	41 / 47	20,5 / 23,9	75 / 88	Fort coup de vent	690 (23 m/s)
10	48 / 55	24,4 / 28	89 / 102	Tempête	950 (27 m/s)
11	56 / 63	28,4 / 32,5	103 / 117	Violente tempête	1.170 (30 m/s)
12	64 / 71	32,6 / 35,9	118 / 133	Ouragan	1.600 (35 m/s)

## I.V. Mesures effectuées à la station météorologique de Beauvechain



Vitesses moyennes journalières des vents à Beauvechain en 2004



Vitesses moyennes journalières des vents à Beauvechain en 2005

---

## I.VI. Les éoliennes de pompage

### 1. Eolienne multipales : contexte

Aujourd'hui, la production d'énergie mécanique par le vent est essentiellement destinée au pompage de l'eau. Cette application, bien que très ancienne, continue à être utilisée dans certains contextes, mais a tendance à régresser. Elle est satisfaite par l'utilisation d'éoliennes agricoles multipales, dites « de pompage », ancêtres des éoliennes de production d'électricité comme nous les connaissons actuellement. Ce sont en fait les peuples du Proche-Orient et de l'Egypte qui, depuis l'antiquité, ont mis au point les premiers systèmes éoliens alors utilisés pour remonter l'eau ou encore broyer des céréales.

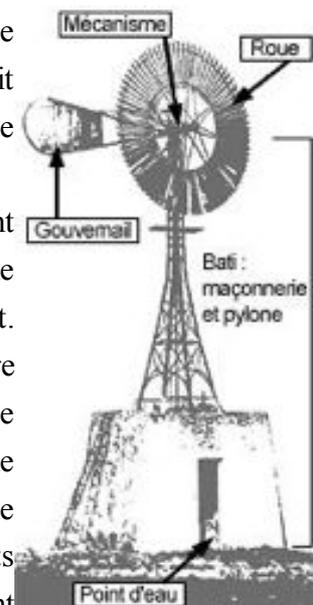
### 2. Principe

Le capteur est une hélice multipale qui assure un couple de démarrage élevé. Le calage des pales est fixe et la régulation se fait presque toujours par l'intermédiaire d'une palette disposée dans le même plan que l'hélice, donc normale à la direction du vent.

Pour éviter que la machine ne soit détruite lorsque le vent atteint des vitesses trop importantes, cette palette place l'éolienne dans le lit du vent, provoquant ainsi son arrêt, c'est l'effacement. Les machines qui ne sont pas munies de cette palette doivent être bloquées à l'aide d'un frein. On remarque donc que ce système de production d'énergie mécanique présente l'inconvénient de ne fonctionner ni pour les vents faibles, ni pour les vents élevés. On ne pourra donc l'exploiter valablement que dans les zones à vents moyens réguliers, où les durées de fonctionnement seront significatives. De plus, ces machines nécessitent un entretien régulier et même dans certains cas des interventions manuelles (freinage ou débrayage).

L'éolienne multipale est généralement associée à une pompe à piston placée dans le puit ou le forage, et entraînée par un train de tiges mû par un système bielle-manivelle solidaire à la roue éolienne. Avec ce type de pompage, la hauteur manométrique ne dépasse pas 100 mètres. Pour ces profondeurs, on doit d'ailleurs avoir recours à des roues de grands diamètres (supérieur à 3,5 m) si on veut obtenir des débits significatifs.

La hauteur manométrique maximum la plus répandue chez les constructeurs d'éoliennes multipales est de 40 m, mais en fait la plupart des éoliennes que l'on rencontre dans la nature fonctionnent avec des hauteurs manométriques totales comprises entre 7 et 10 mètres. Pour cette tranche de valeurs, le coût des différentes parties de l'installation est homogène et compétitif avec d'autres solutions.



---

Le dispositif d'entraînement mécanique, bielle-manivelle-tige de commande de la pompe, ne supporte pas les survitesses ; il sera donc très important, primo que l'hélice soit bien dimensionnée, et secundo que le système d'arrêt de la machine par vent fort soit efficace.

Il faudra notamment veiller à protéger ce dispositif contre le gel, soit au niveau de la commande, soit au niveau des vidanges de tuyauterie, pour éviter qu'il ne soit détruit en cas de gel, si la machine n'a pas été arrêtée.

Enfin, c'est lorsque ces machines sont placées directement au-dessus du puit ou du forage que leur rendement est le meilleur, ce qui est logique car cela solliciterait l'usage de mécanismes supplémentaires de transmission de puissance, impliquant des pertes mécaniques en plus. L'éolienne et la pompe peuvent cependant être excentrées suivant les situations, comme dans le cas de pompage de l'eau d'une rivière.

### 3. L'orientation

Le haut d'une éolienne multipale pivote car la roue doit être exposée au vent pour tourner. Quand le vent change de direction, la roue doit s'orienter d'elle-même, comme une girouette. Ce principe de l'orientation automatique distingue l'éolienne multipale de la plupart des moulins traditionnels. Il existe différents systèmes qui permettent cette orientation automatique et deux grandes catégories : avec ou sans gouvernail.

Certaines éoliennes anciennes sont particulières car il n'y a pas de gouvernail : la roue se trouve en aval du vent par rapport au pylône. En quelque sorte, l'éolienne recevait le vent par derrière et on dit alors qu'il s'agit d'une éolienne "aval". Dans ce cas, il y a souvent un contrepoids du côté opposé à la roue, afin d'équilibrer l'ensemble, et toujours un frein pour pouvoir arrêter l'éolienne à la main.

Il existe aussi des éoliennes équipées d'un moulinet d'orientation, comme par exemple l'éolienne de marque Bollée, mais ce système est très peu employé.



### 4. Le gouvernail

Les éoliennes multipales sont en général équipées d'un gouvernail. La roue est placée en amont du vent par rapport au pylône et l'éolienne reçoit le vent de face. On dit qu'il s'agit d'une éolienne "classique" ou "amont".

Le gouvernail est constitué d'une armature et d'un panneau. Les matériaux, la construction et la forme dépendent du constructeur ou de l'installateur qui employaient des planches de bois assemblées ou de la tôle.

---

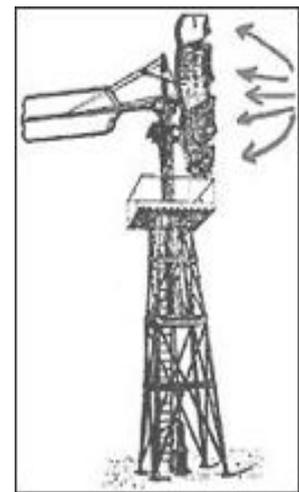
## 5. La régulation

La vitesse de rotation d'une éolienne multipale dépend de la vitesse du vent et doit être régulée. L'intérêt d'une éolienne multipale est qu'en principe la régulation est automatique. La machine fonctionne toute seule, en général en modifiant d'elle-même la surface exposée au vent. Cette modification permet à l'éolienne de tourner régulièrement.

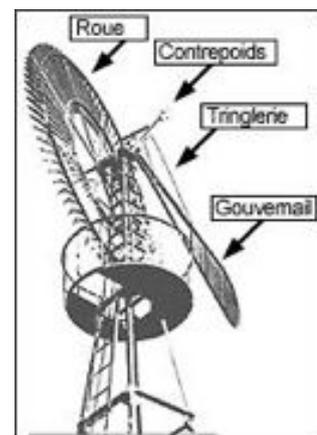
Les inventeurs ont proposé différents systèmes :

- Chez certaines éoliennes, chaque pale est mobile par rapport à la structure de la roue. Les pales pivotent suivant la force du vent: elles s'effacent quand le vent forçit et reviennent quand il faiblit. Ce système ancien est toujours utilisé pour les aérogénérateurs actuels.

- Chez d'autres éoliennes, la roue est faite de groupes de pales que l'on appelle "sections" ou "volets". Ces sections sont mobiles par rapport à la structure de la roue. Elles pivotent et s'effacent vers l'arrière suivant la vitesse du vent et la force centrifuge, comme on peut le voir sur la figure ci-contre. Les sections sont attachées par des tringles à une bague couissant sur l'axe de la roue et l'éolienne ressemble un peu à un parapluie ou à une ombrelle.



- Dans le système de régulation le plus répandu, les pales sont fixes par rapport à la structure de la roue de l'éolienne. La roue dans son entier pivote suivant la force du vent: elle s'efface de côté quand le vent forçit et revient face au vent quand il faiblit.

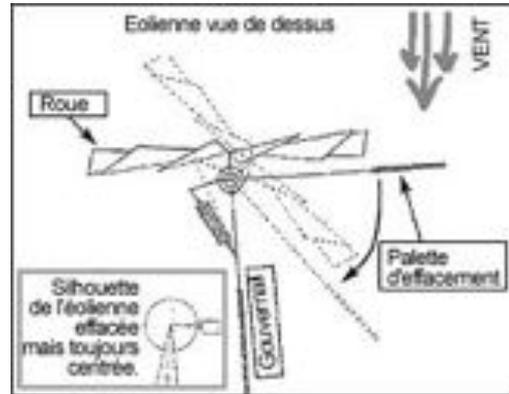


Quel que soit le système employé, il faut observer comment est prévu le mécanisme du retour. Que ce soit les pales, les sections de pales, ou la roue toute entière qui s'effacent, des contrepoids ou des ressorts doivent leur permettre de revenir automatiquement face au vent.

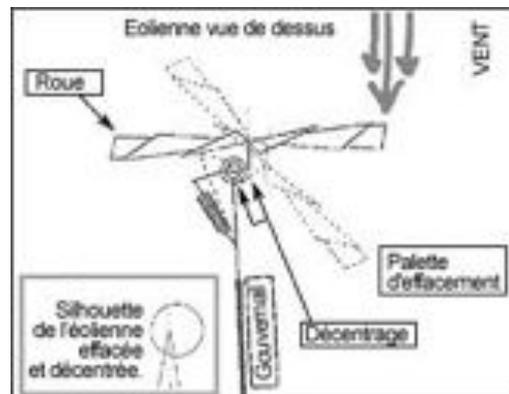
## 6. L'effacement

Pour que la roue s'efface de côté, il faut que le vent la déséquilibre. Il existe pour cela deux systèmes, soit une palette d'effacement soit le décentrage de la roue.

- Une palette d'effacement est une sorte de petit gouvernail qui est fixé sur le côté de la roue de l'éolienne. Quand le vent forçit, la roue s'efface du côté de la palette puisque la surface exposée au vent est plus importante de ce côté. Ce système est employé dans la plupart des éoliennes multipales fabriquées actuellement en France.



- Dans le système de décentrage de la roue, l'axe horizontal de la roue est décentré par rapport à l'axe vertical d'orientation. Quand le vent forçit, la roue est déséquilibrée et s'efface du côté du décentrage.

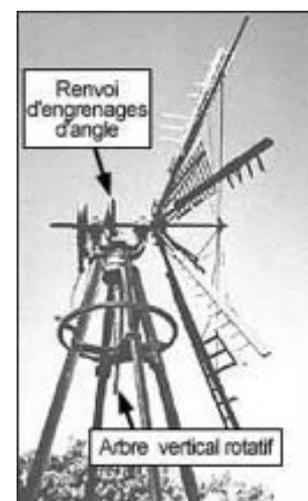


## 7. La transmission

Pour être utilisable, la rotation de la roue d'une éolienne multipale entraînée par le vent doit être transmise au sol. Il existe deux principes bien distincts de mécanismes de transmission suivant qu'il y a ou non transformation du mouvement rotatif.

### - Le mécanisme rotatif

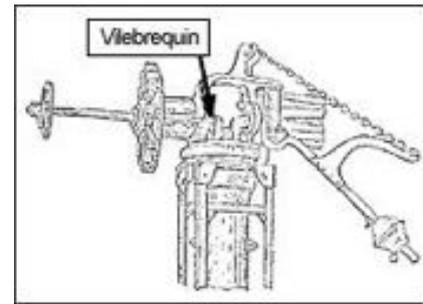
On dit d'une éolienne qu'elle a un "*mécanisme rotatif*" quand l'arbre horizontal de la roue fait tourner un arbre vertical grâce à un renvoi d'engrenages d'angle. La rotation de cet arbre peut être utilisée au pour toutes sortes d'usages. Il peut entraîner des pompes spéciales, des machines de ferme, d'atelier, une dynamo, etc. On appelle ce genre d'installation une "éolienne de force".



---

- Le mécanisme alternatif

La plupart des éoliennes multipales ont cependant un “*mouvement alternatif*” : la rotation de la roue entraînée par le vent est transformée avec une bielle en mouvement alternatif vertical. Ces éoliennes sont prévues pour actionner une pompe à piston. On peut observer deux grandes catégories suivant qu'il y a ou non transformation de la vitesse :



- Dans le premier cas, l'éolienne est dite en “prise directe”, c'est-à-dire que la rotation de l'arbre de la roue est transmise directement à la bielle et à la tige de pompe. Un aller-retour de la pompe correspond à un tour de la roue.

- Dans le deuxième cas, il y a transformation de la vitesse : la rotation de l'arbre de la roue est diminuée ou augmentée par des engrenages. Le plus souvent, l'éolienne tournerait trop vite pour la pompe et on a besoin d'un engrenage pour réduire la vitesse. Un aller-retour de la pompe correspond à plusieurs tours de roue.

## 8. L'entretien

Une éolienne multipale est en principe une machine solide et fiable que l'on peut utiliser très longtemps. Elle doit cependant être entretenue pour pouvoir durer. Une éolienne ancienne peut couramment avoir fonctionné par le passé vingt ans et plus.

En dehors de la pompe, l'essentiel du travail d'entretien concerne le contrôle de l'usure et de la lubrification des mécanismes de l'éolienne. Il existe différents systèmes plus ou moins astreignants:

- Sur les éoliennes archaïques, il fallait enduire de graisse les parties mobiles environ une fois par semaine.

- Beaucoup de machines moins anciennes ont des dispositifs permettant de faciliter cette opération, avec des petits récipients placés sur les parties sensibles, par exemple des godets graisseurs devant être contrôlés et remplis régulièrement.

- Il existe aussi, depuis 90 ans, le système du carter à bain d'huile : le mécanisme de l'éolienne baigne dans un récipient. Le tout est souvent recouvert d'un capot qui rend l'allure de l'éolienne particulière. Beaucoup de machines actuelles ont cependant des réserves de graisse ou d'huile incorporées et moins visibles.

Les éoliennes multipales actuelles n'ont besoin que d'une vidange et d'une révision une fois par an. La plupart des pièces sont prévues pour durer de très nombreuses années.



---

## 9. Etude théorique

### *L'énergie fournie par le vent*

L'énergie fournie par le vent est une énergie cinétique, elle est fonction de la masse et de la vitesse du volume d'air. Si l'on considère que la masse volumique de l'air est constante, on peut dire que l'énergie fournie par le vent est simplement fonction de sa vitesse.

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2$$

m : masse du volume d'air [kg]

V : vitesse instantanée du vent [m/s]

E<sub>c</sub> : énergie cinétique [J]

Ainsi, une masse de 1 kg lancée à 1 m/s possède une énergie égale à 0,5 J (rmq. : il faut 4186 J pour augmenter de 1°C un kg d'eau).

Considérons un dispositif de récupération de cette énergie quel qu'il soit dont la surface est S. En faisant l'hypothèse que la vitesse du vent est constante en chaque point de cette surface, le volume d'air qui traverse la surface S en 1 seconde est égal à VS. L'énergie théorique récupérable en 1 seconde est donc égale à :

$$P = E_c/s = \frac{1}{2} \rho S V^3$$

ρ : masse volumique de l'air [kg/m<sup>3</sup>]

P : puissance récupérable [W]

Supposons qu'à un endroit donné, le ρ de l'air soit de 1,25 kg/m<sup>3</sup>. Il en résulte donc qu'une surface de 1 m<sup>2</sup> traversée par un vent de 10 m/s, est traversée par 10 m<sup>3</sup> soit par 1,25x10 kg. Son énergie est (1,25 x 10) x 10 x 10 / 2 = 625 J et par seconde, 625 W.

Malheureusement, toute cette énergie ne peut être captée car la vitesse en aval du dispositif de récupération n'est jamais nulle et le théorème de Betz montre que le maximum d'énergie pratiquement récupérable est égal à 16/27 (~ 60%) de l'énergie totale.

En prenant pour ρ une valeur moyenne de 1,25 kg/m<sup>3</sup>, la puissance maximum pratiquement récupérable par un dispositif de surface S est égale à :

$$P = \frac{16}{27} \times \frac{1}{2} \times 1,25 \times S \times V^3$$

C'est la limite de Betz<sup>22</sup> :  $P = 0,37 S V^3$

---

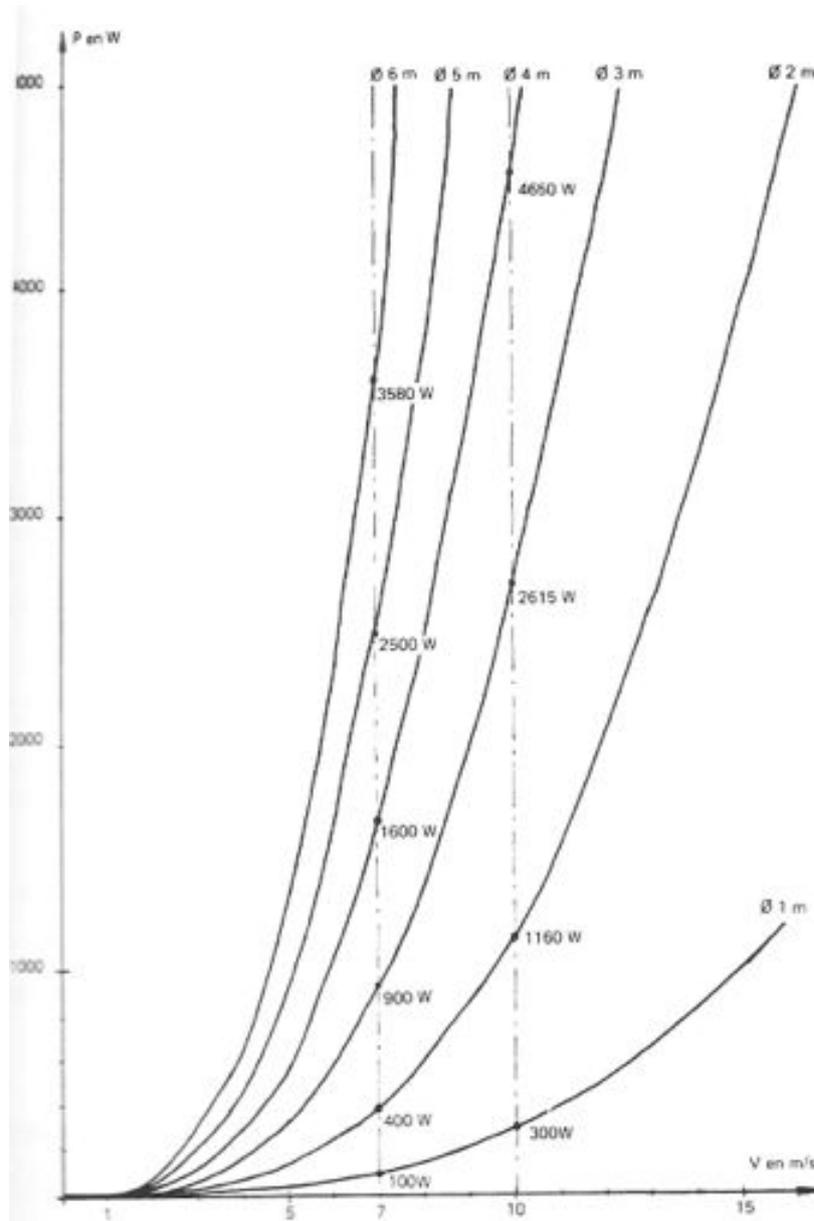
<sup>22</sup> Albert Betz, physicien allemand ; formulée en 1919

Dans le cas d'une hélice, sa surface étant égale à  $\pi R^2$  ou encore  $\pi/4 D^2$ , la limite de Betz est égale à :

$$P = 0,37 \pi/4 D^2 V^3 \quad [\text{W}]$$

$$\leftrightarrow P = 0,29 D^2 V^3 \quad [\text{W}]$$

### Limite de Betz pour différents diamètres d'hélices



En résumé, la puissance fournie par un aéromoteur est proportionnelle au carré des dimensions du rotor, et au cube de la vitesse du vent. Mais attention, l'énergie fournie par l'aéromoteur est toujours de l'énergie mécanique (pompage). Il faut donc affecter la limite de Betz de tous les rendements propres aux différentes transformations (mécaniques et/ou électriques). Ces rendements varient avec le régime de fonctionnement lié à la vitesse de rotation de l'hélice.

---

Pour les aéromoteurs classiques actuellement commercialisés, le rendement en énergie électrique varie entre 30 et 50 % de la limite de Betz (à vitesse nominale).

#### *La longueur des pales*

Le diamètre de l'hélice est fonction de la puissance désirée. La détermination de ce diamètre fixe aussi la fréquence de rotation maximum que l'hélice ne devra pas dépasser pour limiter les contraintes en bout de pales dues à la force centrifuge. Il est essentiel de prendre en compte le travail en fatigue des pales et les risques de vibrations pour de très longues pales.

Diamètre [m]	1	2	5	10	20	50
Nmax [tr/min]	2000	1000	400	200	100	40

#### *Le profil des pales*

Il est choisi en fonction du couple désiré car chaque profil fourni pour l'angle d'incidence optimal un couple fonction de  $C_z$  et de  $C_x$ .

#### *La largeur des pales*

La largeur des pales n'intervient pas dans la puissance de l'éolienne, mais par contre, intervient dans le couple de démarrage, qui sera d'autant meilleurs que la pale est large. Pour des vitesses de rotation élevée, on préfère des pales fines et légères.

#### *Le nombre de pales*

Pour les éoliennes à couple de démarrage élevé, le couple de démarrage est proportionnel au nombre de pales et au diamètre. Le rendement par rapport à la limite de Betz est faible car leur vitesse en bout de pale est limitée. Le diamètre maximum est 8m.

### **10. L'éolienne de pompage**

#### *L'aéromoteur*

Il est toujours constitué par une hélice multipale ou « américaine » équipée de 6 à 16 pales selon les types et selon les diamètres. Les diamètres vont de 1,6 à 6, et même 8 mètres. Les plus répandues ont des caractéristiques suivantes :

- diamètre : 2 à 2,5 mètres
- nombre de pales : 12 à 15

L'hélice multipale, utilisée pour son couple de démarrage élevé et sa faible vitesse de rotation, est particulièrement bien adaptée aux caractéristiques des pompes à piston voisines des

siennes. Le principe de fonctionnement est identique à celui développé dans la troisième partie. La puissance maximum récupérable est égale à :

$$P = 0,37 S V^3 \quad : \text{ limite de Betz (voir plus haut)}$$

Pour ces hélices multipales, le rendement maximum par rapport à la limite de Betz est de l'ordre de 50 %.

La relation entre  $\mu = U/V$  (avec  $U$  : vitesse en bout de pale [m/s]), la vitesse de rotation ( $N$  [tr/min]), la vitesse du vent ( $V$  [m/s]) et le diamètre de l'hélice ( $2 r$  [m]) est la suivante :

$$\begin{aligned} \mu &= U/V \\ U &= r \omega \\ \omega &= 2 \pi N \end{aligned} \quad \text{et donc : } \boxed{N = \frac{\mu V}{2 \pi r}} \quad [\text{tr/min}]$$

Pour  $U/V = 0,75$  , le rendement est optimal et la relation entre la vitesse de rotation, la vitesse du vent et le rayon devient :

$$N = \frac{0,75}{2 \pi} \times 60 \times \frac{V}{r}$$

On ne peut s'écarter du rapport  $\mu$  optimal sans voir le rendement de l'hélice tomber brutalement.

### *La pompe*

La pompe est presque toujours une pompe à piston car elle permet une hauteur de refoulement importante. Elle nécessite un couple élevé et constant, ainsi qu'une vitesse de déplacement faible, ce qui est bien adapté aux caractéristiques des éoliennes multipales. Elle est caractérisée par son diamètre et sa course. Ces deux paramètres déterminent le volume maximum éjecté à chaque coup de piston.

La tuyauterie d'aspiration et de refoulement se monte directement aux extrémités de la boîte à pistons.

Le rendement mécanique de la pompe à piston est voisin de 0,65. Le rendement volumétrique de la pompe à piston est compris entre 0,87 et 0,95.

### *Systèmes d'entraînement de la pompe*

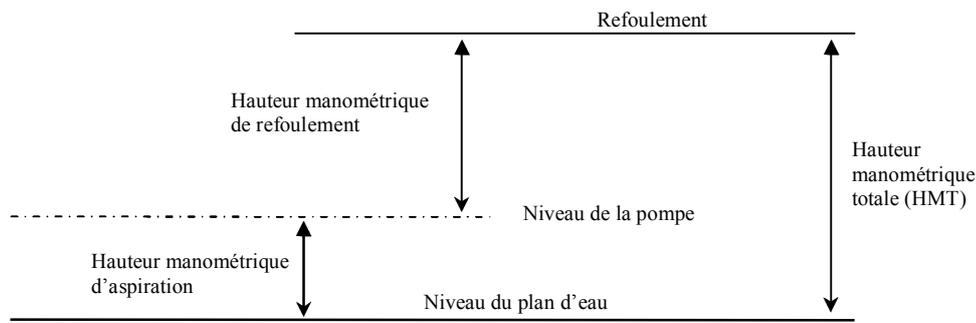
L'hélice entraîne directement un système bielle-manivelle qui permet d'actionner le piston de la pompe selon un mouvement de va-et-vient. La dimension de la manivelle définit la course, donc le débit, mais aussi le couple à vaincre par la roue pour assurer le mouvement du piston.

La tige de commande qui descend dans le tube de refoulement est adaptée aux efforts de traction de la pompe à simple effet, mais il y a évidemment des irrégularités du couple

entre les deux courses. Pour régulariser le couple, certains constructeurs emploient des contrepoids ou des ressorts.

### *Systèmes d'entraînement de la pompe*

La hauteur manométrique d'aspiration est théoriquement de 10,33 mètres au maximum dans les conditions normales de température et de pression. Mais en réalité, elle ne dépasse pas 7 mètres à cause des différentes pertes. Il est dangereux pour les machines de dépasser cette hauteur car le piston se sépare de l'eau, ce qui n'est pas convenable dans un fonctionnement continu.



### *Les différents paramètres d'une station de pompage par éolienne*

- le débit
- la hauteur manométrique totale
- la pompe (section-course)
- la vitesse moyenne du vent

Le débit étant lié à :

- la pompe (section - course)
- la fréquence de rotation

S'il n'y a pas de multiplicateur et que chaque tour de roue correspond à un cycle de déplacement du piston, le débit vaut :

$$Q = 2 s r_b N/60 \gamma_v \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

$s$  : surface du piston [ $\text{m}^2$ ]

$2 r_b$  : course du piston [ $\text{m}$ ]

$r_b$  : longueur de la manivelle [ $\text{m}$ ]

$N$  : vitesse de rotation [ $\text{tr}/\text{min}$ ]

$\gamma_v$  : rendement volumétrique ( $\approx 0,9$ )

La puissance nécessaire en fonction de la hauteur manométrique et du débit vaut donc :

$$P1 = Q * \rho * g * HMT * 1/\gamma_m \quad [W]$$

HMT : hauteur manométrique totale [m]

$g : 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$

$\gamma_m$  : rendement mécanique ( $\approx 0,65$ )

D'autre part, la puissance maximum fournie par une roue éolienne de diamètre D étant égale à :

$$P2 = (0,37 SV^3) \times 0,5 \quad [W]$$

→ Rendement mécanique

Et donc,

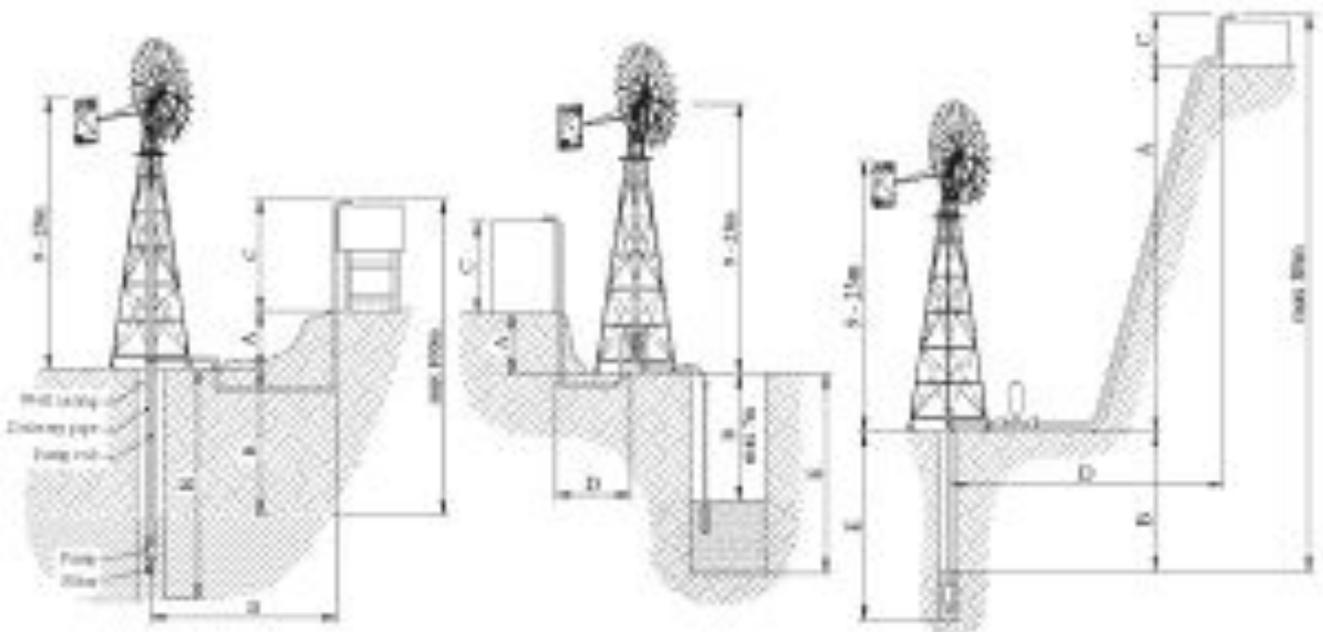
$$P = C \omega$$

ou bien,

$$P = C 2 \pi N/60$$

où C est le couple défini par la longueur de la bielle  $r_b$  et la hauteur manométrique totale.

### *Caractéristiques des éoliennes multipales de l'entreprise Aureka*



---

## I.VII. Rugosité et cisaillement du vent<sup>23</sup>

A des altitudes élevées, à environ un km au-dessus du sol, l'influence de la surface de la terre sur l'écoulement du vent est pratiquement nulle. Par contre, dans les couches d'air plus basses, la friction contre la surface du terrain influe beaucoup sur la vitesse du vent. Dans l'industrie éolienne, on distingue entre la rugosité du terrain et l'influence exercée par les obstacles avoisinants et les contours du paysage (on parle aussi de l'orographie d'un paysage).

### **La rugosité**

En règle générale, une rugosité forte freine considérablement la vitesse du vent. Ainsi, les forêts et les grandes villes freinent évidemment beaucoup le vent, tandis qu'une piste d'atterrissage en béton n'influe que peu sur la vitesse du vent. La surface de la mer a une rugosité encore plus faible que les pistes d'atterrissage ce qui fait qu'elle influe encore moins sur l'écoulement de l'air, alors que l'herbe longue, les buissons et les arbrisseaux freinent considérablement le vent.

### **Classes et longueurs de rugosité**



Les moutons sont les meilleurs amis des éoliennes. Sur cette photo, vous voyez un paysage à Akaroa Spit en Nouvelle-Zélande où les moutons assurent que la rugosité du terrain reste faible. (Photo Soren Krohn © 1998 DWIA)

Dans l'industrie éolienne, on se réfère en général à deux notions lorsqu'on évalue le potentiel éolien d'un endroit donné : la classe de rugosité et la longueur de rugosité. Ainsi, les paysages à rugosité forte - avec beaucoup d'arbres ou d'immeubles - sont rattachés à la classe de rugosité 3 ou 4 tandis que la surface de la mer est classée 0.

Les pistes d'atterrissage en béton appartiennent à la classe de rugosité 0,5. Il en est de même du paysage que vous voyez sur la photo, où l'herbe a été broutée par les moutons. Le terme longueur de rugosité désigne la hauteur au-dessus du sol à laquelle la vitesse moyenne du vent en théorie serait égale à zéro.

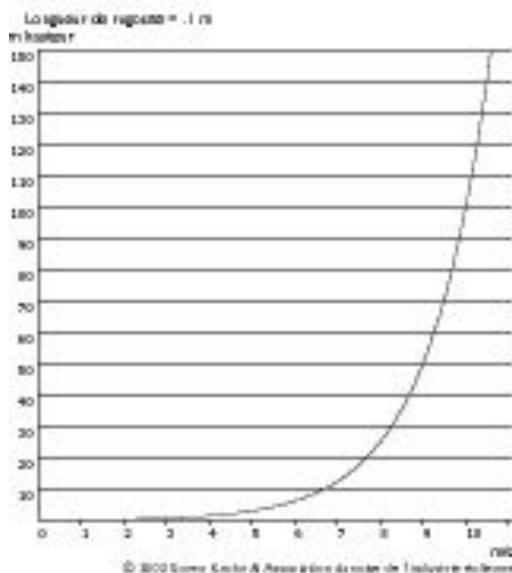
---

<sup>23</sup> Théorie tirée du site « Danish Wind Industry Association » : <http://www.windpower.org/fr/tour/wres/shear.htm>

## Table des classes et longueurs de rugosité

Classe de rugosité	Longueur de rugosité m	Indice d'énergie (en pour cent)	Type de paysage	Classe de rugosité	Longueur de rugosité m	Indice d'énergie (en pour cent)	Type de paysage
0	0,0002	100	Surface d'eau	2	0,1	39	Terrain agricole avec quelques constructions et des haies vives de 8 m de haut situées à environ 500 m les unes des autres.
0,5	0,0024	73	Terrain complètement dégagé avec une surface lisse, p.ex. une piste d'atterrissage en béton ou de l'herbe fraîchement coupée.	2,5	0,2	31	Terrain agricole avec beaucoup de constructions, arbrisseaux et plantes, ou des haies vives de 8 m de haut situées à environ 250 m les unes des autres.
1	0,03	52	Terrain agricole dégagé, sans clôtures ou haies vives, et avec très peu de constructions. Seulement des collines doucement arrondies.	3	0,4	24	Villages, petites villes, terrain agricole avec de nombreuses ou de hautes haies vives, des forêts et un terrain très accidenté.
1,5	0,055	45	Terrain agricole avec quelques constructions et des haies vives de 8 m de haut situées à environ 1.250 m les unes des autres.	3,5	0,8	18	Grandes villes avec de hauts immeubles.
				4	1,6	13	Très grandes villes avec de hauts immeubles et des grattes ciel.

## Le cisaillement du vent



Le graphe ci-contre a été effectué en utilisant le programme de calcul de la vitesse du vent, que l'on peut trouver à l'adresse internet : <http://www.windpower.org/fr/tour/wres/calculat.htm>.

Il montre les variations de la vitesse du vent dans un paysage appartenant à la classe de rugosité 2 (terre agricole cultivée, avec de rares maisons et clôtures, distantes les unes des autres de quelque 500 m), si nous supposons que la vitesse du vent est égale à 10 m/s à une hauteur de 100 mètres au-dessus du sol.

On parle normalement du cisaillement du vent pour désigner la variation de la vitesse du vent en fonction de la distance à la surface de la terre. Le cisaillement du vent est également pris en considération lors de la construction d'une éolienne. S'il est question d'une éolienne dont la hauteur de moyeu est de 40 m et le diamètre de rotor est de 40 m, la vitesse du vent sera égale à 9,7 m/s au point le plus haut de la surface balayée par le rotor, contre 7,7 m/s au point le plus bas. Cela signifie que les forces travaillant sur les pales sont bien plus fortes lorsque celles-ci se trouvent dans leur position la plus haute que lorsqu'elles se trouvent dans leur position la plus basse.

---

I.VIII. **Articles 7 et 14 extraits de l'Arrêté royal relatif à l'établissement de mécanismes visant la promotion de l'électricité produite à partir des sources d'énergie renouvelables**

16 JUILLET 2002. - Arrêté royal relatif à l'établissement de mécanismes visant la promotion de l'électricité produite à partir des sources d'énergie renouvelables. (NOTE : Consultation des versions antérieures à partir du 23-08-2004 et mise à jour au 14-10-2005)

Source : AFFAIRES ECONOMIQUES  
Publication : 23-08-2002  
Entrée en vigueur : 01-07-2003  
Dossier numéro : 2002-07-16/39

- *CHAPITRE II. - Dispositions particulières relatives à l'octroi de certificats verts pour l'électricité produite à partir des installations visées à l'article 6 de la loi.*

**Section III : Conditions d'octroi des certificats verts pour l'électricité verte produite à partir des installations visées à l'article 6 de la loi.**

Art. 7.

§ 1<sup>er</sup>. Des certificats verts sont attribués par la commission aux producteurs qui sont titulaires d'une concession visée à l'article 6 de la loi et d'une garantie d'origine visée à l'article 4 du présent arrêté.

§ 2. Les certificats verts sont octroyés sur base tant de la production nette d'électricité verte consommée par le producteur que de la production nette d'électricité verte fournie au réseau de transport ou de distribution, ou transmise au moyen de lignes directes, mesurée avant transformation éventuelle. L'électricité nette est l'électricité produite, diminuée de l'électricité requise par les équipements fonctionnels de l'installation de production. Le gestionnaire du réseau enregistre la production d'électricité verte sur base des données mesurables mises à sa disposition mensuellement par le producteur. Le producteur d'électricité verte doit mesurer cette production au moyen d'un compteur d'électricité séparé du reste de l'installation. Le gestionnaire du réseau transmet mensuellement ces données métrées par site de production à la commission.

§ 3. Un certificat vert est délivré pour une quantité d'électricité verte produite correspondant à un MWh.

§ 4. En cas de tranche résiduelle inférieure à un MWh, les kWh restants peuvent être reportés au trimestre suivant, déterminés conformément à l'article 11 du présent arrêté.

- 
- *CHAPITRE III. - Mesures visant à assurer l'écoulement sur le marché, à un prix minimal, d'un volume minimal d'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables.*

## Section I : Prix minima

### Art. 14.

§ 1<sup>er</sup>. (En vue d'assurer l'écoulement sur le marché d'un volume minimal d'électricité verte à un prix minimum, un système de prix minima d'achat est établi selon les conditions qui suivent.

Le gestionnaire du réseau, dans le cadre de sa mission de service public, a l'obligation d'acheter au producteur d'électricité verte qui en fait la demande, les certificats verts octroyés en vertu du présent arrêté ainsi que des décrets et ordonnance électricité, à un prix minimal fixé, selon la technologie de production utilisée, à :

- 1<sup>o</sup> énergie éolienne off-shore :
  - a) 107 euros/MWh pour l'électricité produite à partir des installations faisant l'objet d'une concession domaniale et pour la production découlant des 216 premiers MW de capacité installée;
  - b) 90 euros/MWh pour l'électricité produite à partir des installations faisant partie de la même concession domaniale et pour la production découlant d'une capacité installée excédant les 216 premiers MW;
- 2<sup>o</sup> énergie éolienne on-shore : 50 euros/MWh;
- 3<sup>o</sup> énergie hydraulique : 50 euros/MWh;
- 4<sup>o</sup> énergie solaire : 150 euros/MWh;
- 5<sup>o</sup> autres sources d'énergie renouvelables (dont biomasse) : 20 euros/MWh.

Cette obligation d'achat de certificats verts prend cours à la mise en service de l'installation de production, pour une période de dix ans. En dérogation à ce qui précède, une période de vingt ans s'applique lors de la mise en service d'une installation de production d'énergie éolienne off-shore.

L'obligation d'achat de certificats verts d'électricité produite à partir d'énergie éolienne telles que décrites au 1<sup>o</sup>, fait l'objet, sur proposition du gestionnaire du réseau, d'un contrat entre le titulaire de la concession domaniale et le gestionnaire du réseau, proposition qui est soumise à l'approbation de la commission.) <AR 2005-10-05/31, art. 1, 002 ; En vigueur : 24-10-2005>

§ 2. Le gestionnaire du réseau doit offrir ces certificats au marché à intervalles réguliers afin de récupérer les coûts de prise en charge de cette obligation. La commission veille à la transparence et à la régularité des ventes de ces certificats par le gestionnaire du réseau.

Le solde net, qui résulte de la différence entre le prix d'achat du certificat vert par le gestionnaire du réseau et le prix de vente de ce certificat vert sur le marché, est financé au moyen d'une surcharge sur les tarifs visés à l'article 12 de la loi. La surcharge précitée est exprimée en euro cent par kWh, injectée sur le réseau, hormis le transit d'électricité. Le montant de cette surcharge est arrêté par le Roi, après avis de la commission, et revu chaque année. Le gestionnaire du réseau communique une fois par mois à la commission la liste des certificats verts achetés et vendus. La commission contrôle les obligations du gestionnaire du réseau qui découlent du présent arrêté.

## **ANNEXES II**

**Analyse du potentiel météorologique effectuée par l'IRM**



08/05/2000	Analyse du potentiel météorologique du site de la sablière de MSG en termes de fréquence et d'intensité du vent	p. 2 / 10
------------	--	-----------

## Analyse du potentiel météorologique du site de la sablière de Mont-saint-Guibert en termes de fréquences et d'intensité du vent

### Introduction

En vue de l'installation d'une éolienne sur le site de la sablière de Mont-Saint-Guibert, une analyse du potentiel météorologique du site est réalisée ici. La méthodologie appliquée consiste à établir des statistiques de fréquences des vents en fonction de leur intensité, en moyenne annuelle.

Pour estimer ce potentiel, deux sources de données peuvent être exploitées :

- Données météorologiques de la station synoptique de Beauvechain pour une période de 10 ans,
- Résultats de la modélisation effectuée à l'aide du logiciel MAESTRO pour l'année 1998

L'intérêt d'exploiter ces deux jeux de données provient du fait que le premier jeu de données correspond à des observations de terrain effectuées à 10 m du sol, sur une longue période, à la station météorologique la plus proche possible du site (+/- 15 km au Nord-Est), tandis que le second donne les résultats d'une modélisation locale tenant compte des caractéristiques du terrain aux abords du site sur une période d'un an. En outre, le modèle, qui résout les équations de la mécanique des fluides jusqu'à quelques kilomètres d'altitude, permet de quantifier les fréquences des vents en fonction de leur intensité à différentes hauteurs par rapport au sol, notamment à des hauteurs proches des dimensions caractéristiques d'une éolienne.

Ces deux jeux de données fournissent donc des informations tout à fait complémentaires qui permettront de donner une image aussi objective que possible du potentiel météorologique du site.

Les paragraphes suivant décrivent la localisation du site et la méthodologie. Ensuite, les données de bases sont décrites et les résultats d'analyse commentés brièvement. Les tableaux et graphiques correspondant sont donnés en annexes.

La conclusion synthétise dans un dernier paragraphe les caractéristiques du site en termes de potentiel météorologique. Elle donne également une estimation "grossière" du potentiel de production énergétique du site en fonction du type de données.

### Localisation du site

Les coordonnées Lambert du site de la sablière de Mont-Saint-Guibert sont : 168750 m Nord et 149250 m Est.

Une carte des environs du site est reproduite en annexe I. Le domaine présenté correspond à celui utilisé pour la modélisation des champs météorologiques (vent, turbulence, etc ...) effectuée à l'aide du logiciel MAESTRO dans le cadre de l'étude de dispersion réalisée pour le CET voisin. Le domaine couvre une zone de 11 km x 11 km. La grille horizontale du modèle est représentée.

ATMOSPHERIC TRANSPORT MODELLING FOR PROFESSIONAL APPLICATIONS S.P.R.L.  
Environmental Consulting & Software Development

Rue Jules Aedel, 5  
B-1300 Nivelles  
Belgium

B.C. Nivelles 79.964  
T.V.A. - BE0275.875.035  
Bank : B.B.I. 360-156259-25

TR - 72 - 0967 - 84 - 23 - 88  
Fax : 33 - 0967 - 25 - 26 - 28  
Email : [atm@atmmod.com](mailto:atm@atmmod.com)

WEB Site : <http://www.ikvsci.be/www.ATM-PRO.com/index.html>

La zone de la sablière est encadrée "en gras" et met en évidence 9 points du domaine (de A à I) pour lesquels les résultats de la modélisation seront exploités.

Les coordonnées Lambert ("X" en m, "Y" en m) de ces 9 points sont données dans le tableau ci-après :

<b>G</b> : [168250, 149750]	<b>H</b> : [168750, 149750]	<b>I</b> : [168750, 149750]
<b>D</b> : [168250, 149250]	<b>E</b> : [168750, 149250]	<b>F</b> : [169250, 149250]
<b>A</b> : [168250, 148750]	<b>B</b> : [168750, 148750]	<b>C</b> : [169250, 148750]

### *Méthodologie*

Les données météorologiques ou résultats de la modélisation sont traités de manière à fournir des fréquences d'occurrence des vents en fonction de leur intensité. Les informations de base sont des données horaires.

Différentes classes de vitesses de vent (V, exprimé en m/s) sont définies :

[ V = 00]	[06 < V < 07]	[13 < V < 14]
[00 < V < 01]	[07 < V < 08]	[14 < V < 15]
[01 < V < 02]	[08 < V < 09]	[15 < V < 16]
[02 < V < 03]	[09 < V < 10]	[16 < V < 17]
[03 < V < 04]	[10 < V < 11]	[17 < V < 18]
[04 < V < 05]	[11 < V < 12]	[18 < V < 19]
[05 < V < 06]	[12 < V < 13]	[19 < V < 20]

Les séries de données horaires sont classées de manière à en retirer les fréquences de vent en fonction de leur intensité.

L'ensemble des tableaux de résultats est donné en annexe 2.

### *Beauvechain 10 ans*

La station synoptique de Beauvechain est la station la plus proche du site de la sablière. Elle est située à 178020 m Nord et 159436 m Est, en coordonnées Lambert. Ceci correspond à un éloignement du site d'environ 15 km dans la direction du Nord-Est.

Les données synoptiques relatives au vent, intensité et direction, ont été acquises auprès de l'Institut Royal Météorologique. Il s'agit des données horaires pour la période 1990 - 1999, soit 10 ans.

ATMOSPHERIC TRANSPORT MODELLING FOR PROFESSIONAL APPLICATIONS S.P.R.L.  
Environmental Consulting & Software Development

Esc. Jean-Jacques, 5  
B - 1480 Nivelles  
Belgique

B.C. Nivelles 28468  
T.V.A. : BE01875151  
Bank : B.S.L. 348-3162075-23

Tel : 32 - 0667 - 81 31 09  
Fax : 32 - 0667 - 11 36 34  
Email : atms.developpement.be

WEB Site : <http://users.skynet.be/www.ATM-PRO.com/index.html>

08/05/2000	Analyse du potentiel météorologique du site de la sablière de MSG en termes de fréquence et d'intensité du vent	p. 4 / 10
------------	--	-----------

Il est à noter que ces données correspondent à des observations effectuées à 10 m du sol. Il s'agit de moyennes sur les 10 dernières minutes avant l'heure d'observation. En outre, il est important de rappeler que les stations synoptiques sont généralement placées dans des zones de plaine bien dégagée.

Deux séries de résultats sont produits :

- ◆ Statistiques annuelles pour l'année 1998 : BVC (1998)
- ◆ Statistiques annuelles pour l'ensemble de la période de 10 ans : BVC (1990-1999)

On constate que les fréquences des vents dont l'intensité est comprise entre 5 et 9 m/s sont de 20.6 % si l'on considère l'année 1998, et de 23.2 % si l'on considère la période de 10 ans. Les fréquences obtenues pour les différentes classes d'intensité considérées sont du même ordre de grandeurs dans les deux cas. L'année 1998 ne semble donc pas présenter de caractéristiques (ou anomalies) particulières.

### ***Résultat de la modélisation réalisée à l'aide du logiciel MAESTRO***

Le logiciel MAESTRO a été utilisé dans le cadre de la modélisation de la dispersion atmosphérique aux environs du CET voisin sur base des données météorologiques de l'année 1998. Ce logiciel comprend un modèle météorologique couplé à un modèle de dispersion.

Dans le cadre de la présente étude, nous examinerons les résultats obtenus par le modèle météorologique pour l'année 1998. La résolution horizontale utilisée pour cette modélisation est de 500 m x 500 m (voir grille représentée sur le graphique donné en annexe 1). La résolution verticale est variable. Les niveaux de calculs sont proches près de la surface et leur interdistance est croissante en fonction de l'altitude. Grâce à cette représentation 3D de l'atmosphère, nous pouvons donc extraire des séries de données d'intensité du vent en différents points en horizontal (notés de A à I sur le graphique de l'annexe 1) et différents niveaux selon la verticale.

Les niveaux retenus dans ce travail sont ceux qui se situent à des hauteurs au dessus du sol (z) comparables aux dimensions caractéristiques d'une éolienne : 10 m, 30 m, 60 m et 90 m.

Le traitement des 36 séries (9 points x 4 niveaux) a été effectué. Les résultats obtenus pour chaque point sont donnés en annexe 2. Les résultats obtenus à partir des observations synoptiques sont donnés à titre de comparaison.

Ces résultats sont présentés soit sous forme de tableaux reprenant les fréquences de vent pour les différentes classes d'intensité pour un point donné et pour tous les niveaux correspondant, soit sous forme graphique avec en abscisse les classes d'intensité du vent et en ordonnée la fréquence.

De ces résultats, il apparaît que les fréquences de vent en fonction de l'intensité varient avec l'altitude de manière telle que les fréquences de vents d'intensité plus importante croissent avec l'altitude. Par exemple, pour le point A, la somme des fréquences des vents d'intensité comprise entre 5 et 9 m/s, pour z = 10, 30, 60 et 90 m, sont respectivement de 8.4, 24.3, 30.1 et 35.0 %.

ATMOSPHERIC TRANSPORT MODELLING FOR PROFESSIONAL APPLICATIONS S.P.R.L.  
Environmental Consulting & Software Development

Rue Taine/André, 5  
B - 1400 Nivelles  
Belgique

R.C. Nivelles 79.664  
T.V.A. : BE045.879.153  
Bank : B.B.L. 360-0162678-23

Tel. : 32 - 0967 - 84 23 94  
Fax. : 32 - 0967 - 23 36 28  
Email : atpro@skynet.be

WEB Site : <http://users.skynet.be/www.ATM-PRO.com/index.html>

08/05/2000	Analyse du potentiel météorologique du site de la sablière de MSG en termes de fréquence et d'intensité du vent	p. 5 / 10
------------	--	-----------

On notera qu'à 10 m du sol, aux abords du site de la sablière les vents simulés par le modèle sont nettement plus faibles que ceux observés à la station de Beauvechain. Ceci est probablement dû aux caractéristiques locales du terrain, topographie et occupation des sols, notamment à la présence en amont des vents dominant des vallées de Mont-Saint-Guibert / Court-Saint-Étienne.

On constate par contre une croissance des fréquences de vents d'intensité plus élevée avec l'altitude.

Après avoir estimé les fréquences des vents en fonction de leur intensité et du niveau au dessus du sol pour les 9 points du domaine couvrant le site de la sablière, il nous a paru intéressant de s'attacher à cette même information de manière légèrement différente afin d'étudier la variation de ces fréquences en fonction de l'emplacement géographique. En annexe 3, nous donnons donc une série de graphiques présentant pour chaque niveau, l'ensemble des fréquences de vents obtenus pour les 9 points.

On constate qu'à partir de 30 m au-dessus du sol, les fréquences obtenues à partir des résultats du modèles sont plus importantes que celles obtenues à partir des données de Beauvechain (à 10 m) pour des vents d'intensité supérieure à 3 m/s.

On remarquera aussi que pour les niveaux situés à 60 et 90 m au-dessus du sol, la variation des résultats selon la position géographique est faible. Par contre, à 10 et 30 m de plus grandes variations spatiales sont obtenues, ce qui est cohérent avec une influence locale du terrain.

### Conclusion

Les fréquences des vents en fonction de classes d'intensité ont été obtenues à partir des données d'observation de la station synoptique de Beauvechain pour l'année 1998 (BVC 1998) et pour la période de 10 ans allant de 1990 à 1999 (BVC 1990-1999).

Elles ont également été calculées de manière plus locale à partir des résultats de la modélisation effectuée à l'aide du logiciel MAESTRO sur un domaine de 11 km x 11 km englobant le site de la sablière. Neuf points de la grille horizontale du modèle ont été sélectionnés, ainsi que 4 niveaux de calculs. Des séries temporelles d'intensité du vent ont été extraites des résultats de la modélisation pour ces 9 points (A à I) x 4 niveaux (z = 10, 30, 60 et 90 m).

L'effet du relief et des caractéristiques locales du terrain se marque dans les résultats du modèle qui montre des vitesses, au niveau z = 10 m, plus faibles sur le site de la sablière que celles observées à Beauvechain. A partir de 30 m, les fréquences de vents d'intensité supérieure à 3 m/s sont systématiquement plus élevées que celles obtenues à partir des observations de Beauvechain (à 10 m).

En ce qui concerne la variation géographique de ces fréquences par classes d'intensité du vent, on notera l'influence du terrain à proximité de la surface (10 et 30 m), tandis que celle-ci semble disparaître aux niveaux plus élevés (60 et 90 m). Toutefois, afin d'estimer le potentiel météorologique du site de la sablière et en particulier affiner cette information en termes de localisation sur le site proprement dit, nous avons estimé "grossièrement" le potentiel de production énergétique (PROD) sur base des informations données dans la brochure "TURBOWINDS T600-48" qui nous a été transmise.

ATMOSPHERIC TRANSPORT MODELLING FOR PROFESSIONAL APPLICATIONS S.P.R.L.  
Environmental Consulting & Software Development

Rue Saint-Amand, 5  
B - 1400 Nivelles  
Belgium

R.C. Nivelles 79.464  
T.V.A. : BE0451.875.117  
Bank : B.B.L. 340-0102679-25

Tel : 32 - (0)67 - 84.33.44  
Fax : 32 - (0)67 - 23.36.28  
Email : atmo.distrib@skynet.be

WEB Site : <http://users.skynet.be/www.ATM-PRO.com/index.html>

Pour cette estimation tenant compte uniquement des fréquences de vent d'intensité comprise entre 5 et 9 m/s ( $F_{(v_{min} < v < v_{max})}$ ), la formule suivante est appliquée :

$$PROD = F_{(5,0-5,9)} * \left(\frac{182+118}{2}\right) + F_{(6,0-6,9)} * \left(\frac{124+162}{2}\right) + F_{(7,0-7,9)} * \left(\frac{188+200}{2}\right) + F_{(8,0-8,9)} * \left(\frac{218+222}{2}\right)$$

Cette relation a été appliquée à l'ensemble des séries utilisées dans ce travail, soient 2 jeux de données d'observations synoptiques et 9 x 4 séries de résultats extraits de la modélisation. Les résultats obtenus sont présentés sous forme graphique à l'annexe 4.

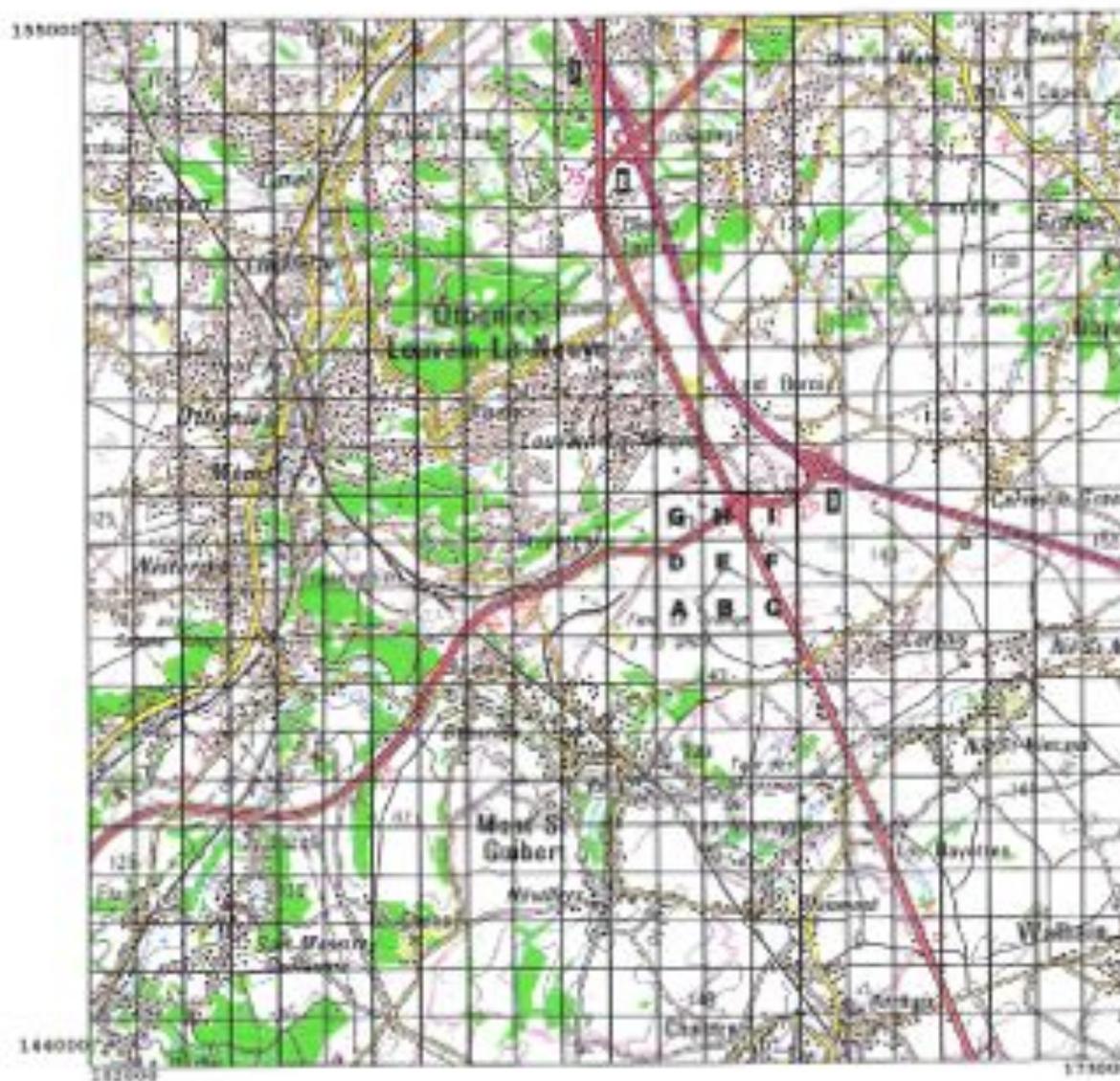
En considérant chaque point dans son ensemble, i.e. effectuant une simple somme du potentiel de production énergétique obtenu aux différents niveaux (indice défini arbitrairement), il ressort le classement suivant en termes de potentiel météorologique :

POINT	Z = 10 m	Z = 30 m	Z = 60 m	Z = 90 m	SOMME	CLASSEMENT
A	104	352	464	549	1469	9
B	116	357	467	547	1487	8
C	172	372	483	551	1578	4
D	123	359	477	558	1517	7
E	166	367	475	555	1563	5
F	200	383	489	558	1630	1
G	135	363	483	559	1540	6
H	182	375	484	558	1599	3
I	195	379	490	559	1623	2

A titre de comparaison, le potentiel de production énergétique obtenu sur base des observations de Beauvechain (à 10 m) serait de 301 et 345 KWh, respectivement pour les séries "BVC (1998)" et "BVC (1990-1999)".

Il est évident que le classement donné ci-dessus devrait être revu sur base de calculs plus approfondis d'estimation du potentiel de production énergétique considérant l'ensemble des classes d'intensité du vent.

## Annexes

Annexe 1 : Carte du site

ATMOSPHERIC TRANSPORT MODELLING FOR PROFESSIONAL APPLICATIONS S.P.L.  
Environmental Consulting & Software Development

Rue Saint-Ambroise, 5  
D - 1000 Bruxelles  
Belgique

R.C. No. 0268 29 662  
T.V.A. - 04 055 473 115  
Banq. B.F.I. 505 130208 21

Tel. : 32-(0)27- 88 33 04  
Fax. : 32-(0)27- 23 36 38  
Email : [atm@atm-pro.com](mailto:atm@atm-pro.com)

WEB Site : <http://users.skynet.be/www.ATM-PRO.com/index.html>

08/05/2000	Analyse du potentiel météorologique du site de la sablière de MSG en termes de fréquence et d'intensité du vent	p. 8 / 10
------------	--	-----------

Annexe 2: Tableaux et Graphiques de "Fréquences des Vents par Classes d'Intensité" par Point.

---

ATMOSPHERIC TRANSPORT MODELLING FOR PROFESSIONAL APPLICATIONS S.P.R.L.		
Environmental Consulting & Software Development		

---

Rue Saint-André, 5	R.C. Nivelles 79004	Tél: 32-(0)67-84 33 04
B - 1400 Nivelles	T.V.A. - BE453.875.155	Fax: 32-(0)67-73 36 28
Belgium	Bank: B.B.I. 760.1142699.22	Email: <a href="mailto:atmos_dev@skynet.be">atmos_dev@skynet.be</a>

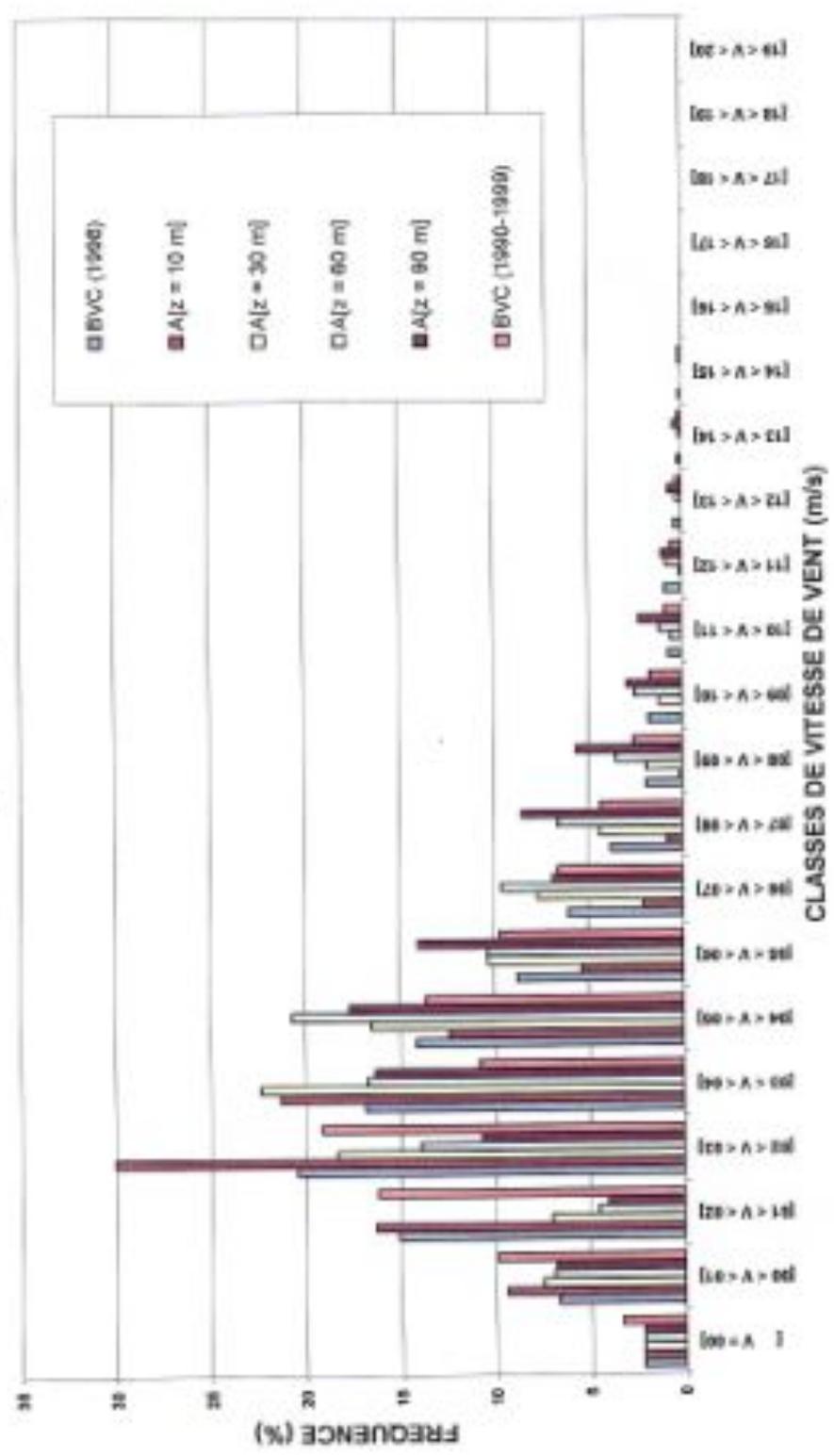
---

WEB Site: <http://users.skynet.be/www.ATM-PRO.com/index.html>

---

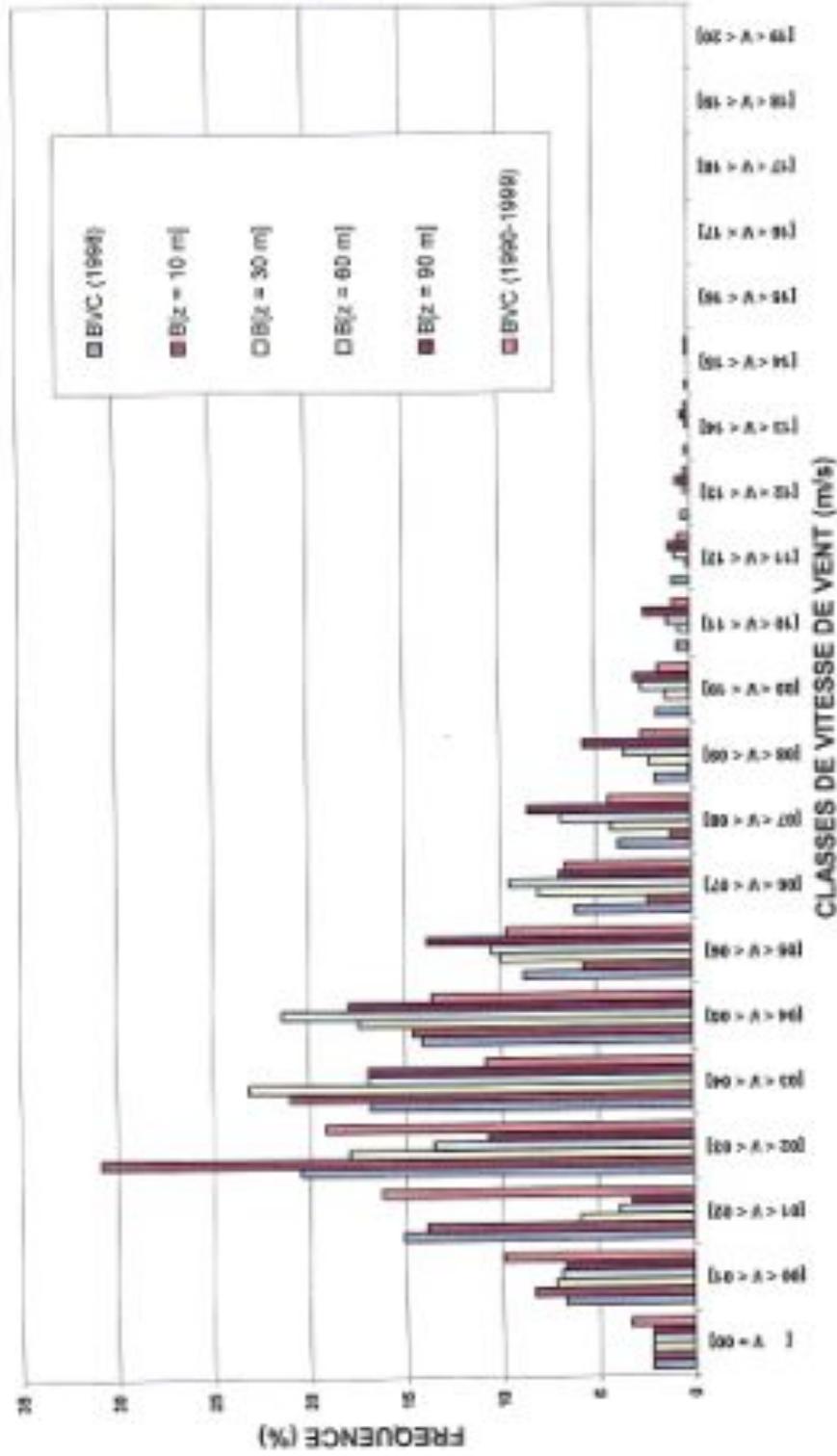
CLASSES DE VENT (m/s)	BVC (1998)	BVC (1990-1999)	A(z = 10 m)	A(z = 30 m)	A(z = 60 m)	A(z = 90 m)
I V = 0]	2.2	3.3	2.2	2.2	2.2	2.2
[00 < V < 01]	6.7	9.9	9.6	9.5	6.9	6.8
[01 < V < 02]	15.1	16.2	16.3	7.3	4.5	4.0
[02 < V < 03]	20.4	19.1	20.0	18.3	13.9	10.7
[03 < V < 04]	16.8	10.8	21.3	22.3	16.7	16.3
[04 < V < 05]	14.1	13.6	12.4	16.5	20.7	17.6
[05 < V < 06]	8.8	9.7	5.4	10.3	10.4	14.0
[06 < V < 07]	6.1	6.6	2.1	7.7	9.6	6.9
[07 < V < 08]	3.8	4.3	0.8	4.4	6.5	8.5
[08 < V < 09]	1.9	2.6	0.1	1.9	3.5	5.6
[09 < V < 10]	1.8	1.7	0.0	1.2	2.5	2.9
[10 < V < 11]	0.7	0.9	0.0	0.6	1.2	2.3
[11 < V < 12]	0.9	0.6	0.0	0.1	0.8	1.3
[12 < V < 13]	0.4	0.3	0.0	0.0	0.3	0.7
[13 < V < 14]	0.2	0.2	0.0	0.0	0.1	0.4
[14 < V < 15]	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
[15 < V < 16]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[16 < V < 17]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[17 < V < 18]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[18 < V < 19]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[19 < V < 20]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TOT	100	100	100	100	100	100

POINT A [168250 m, 148750 m]



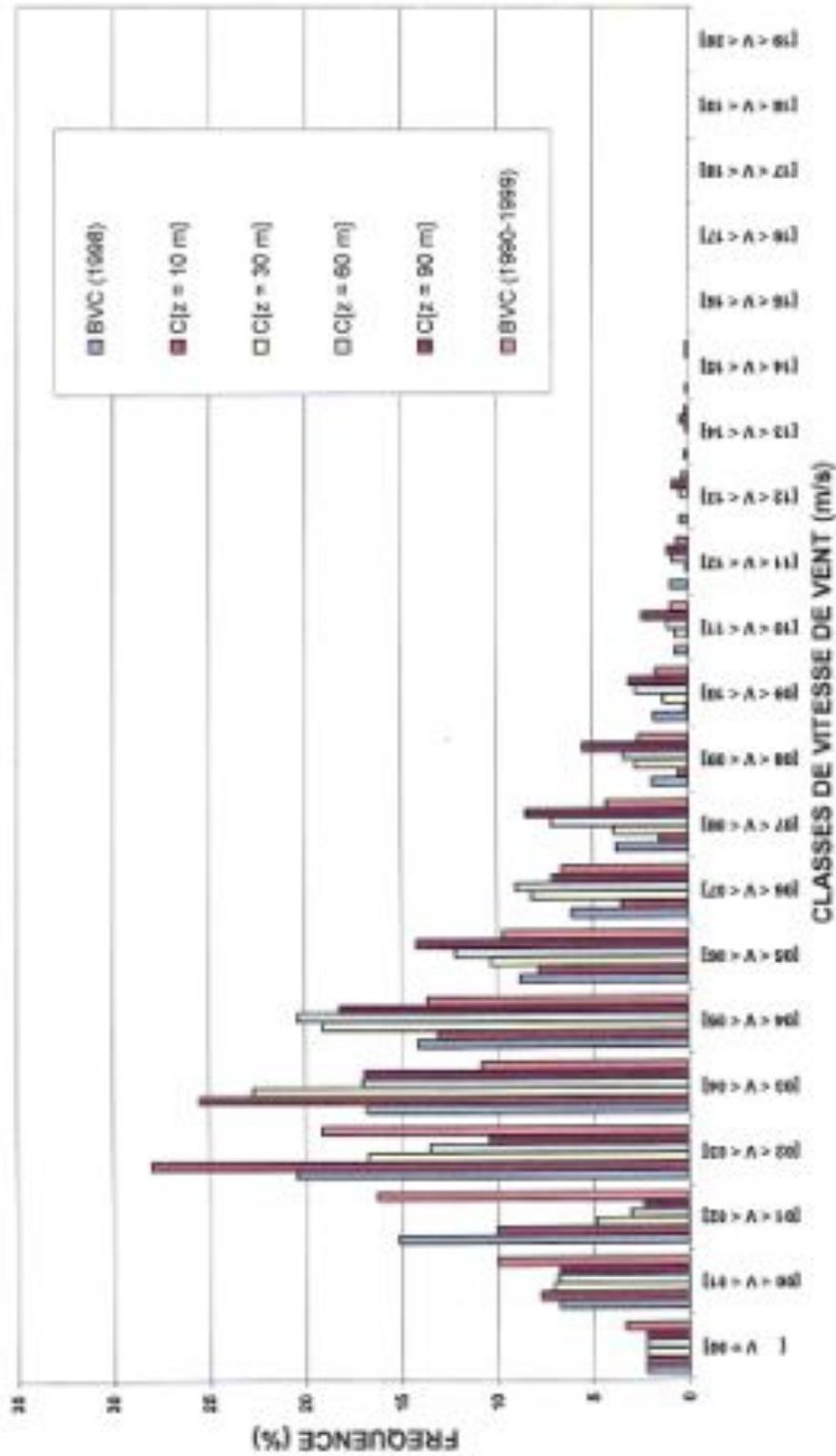
CLASSES DE VENT (m/s)	SVC (1998)	SVC (1990-1999)	B [z = 10 m]	B [z = 30 m]	B [z = 60 m]	B [z = 90 m]
[	2.2	3.3	2.2	2.2	2.2	2.2
[00 < V < 01]	6.7	9.9	8.3	7.2	6.9	6.7
[01 < V < 02]	15.1	16.2	13.9	5.9	3.9	3.2
[02 < V < 03]	20.4	19.1	30.8	17.9	13.5	10.7
[03 < V < 04]	16.8	10.8	21.0	23.1	16.9	16.9
[04 < V < 05]	14.1	13.6	14.6	17.4	21.4	17.9
[05 < V < 06]	8.8	9.7	3.7	10.0	10.0	13.8
[06 < V < 07]	6.1	6.6	2.3	8.0	9.5	6.9
[07 < V < 08]	3.8	4.3	1.1	4.2	6.8	8.5
[08 < V < 09]	1.9	2.6	0.1	2.2	3.5	5.6
[09 < V < 10]	1.8	1.7	0.0	1.3	2.6	2.9
[10 < V < 11]	0.7	0.9	0.0	0.6	1.2	2.4
[11 < V < 12]	0.9	0.6	0.0	0.1	0.8	1.1
[12 < V < 13]	0.4	0.3	0.0	0.0	0.3	0.7
[13 < V < 14]	0.2	0.2	0.0	0.0	0.1	0.4
[14 < V < 15]	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
[15 < V < 16]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[16 < V < 17]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[17 < V < 18]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[18 < V < 19]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[19 < V < 20]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TEST	100	100	100	100	100	100

**POINT B [168750 m, 148750 m]**



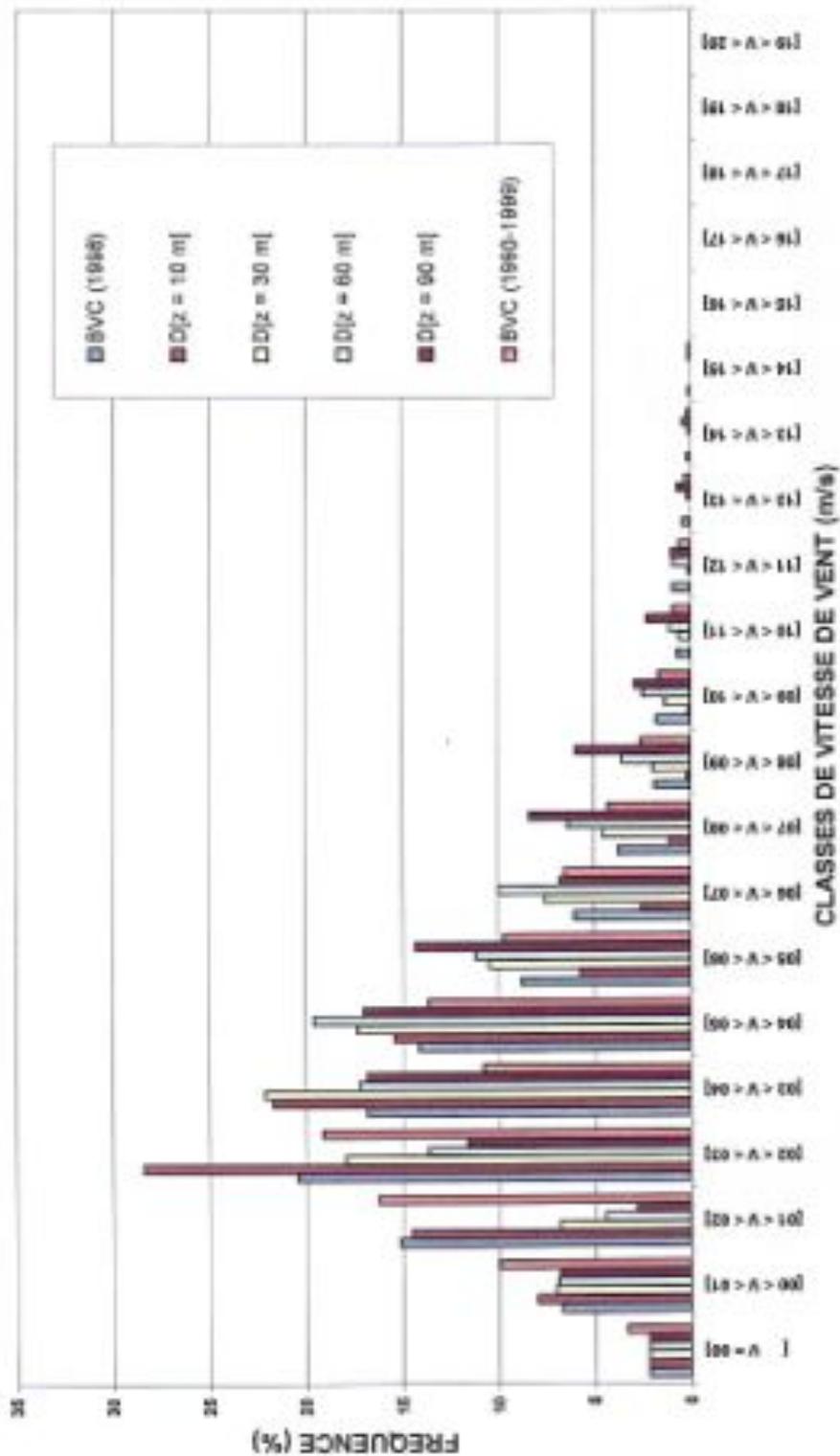
CLASSES DE VENT (m/s)	BVC (1998)	BVC (1990-1999)	C[s = 10 m]	C[s = 30 m]	C[s = 60 m]	C[s = 90 m]
[ V = 0]	2.2	3.3	2.2	2.2	2.2	2.2
[00 < V < 01]	6.7	9.9	7.1	7.0	6.8	6.7
[01 < V < 02]	15.1	16.2	16.0	4.8	3.0	2.3
[02 < V < 03]	20.6	19.1	28.0	16.7	13.5	10.4
[03 < V < 04]	18.0	10.0	23.5	22.7	17.0	16.9
[04 < V < 05]	14.1	13.6	13.1	19.1	20.4	18.2
[05 < V < 06]	8.6	9.7	7.8	10.3	12.2	14.2
[06 < V < 07]	6.1	6.6	3.5	8.2	9.0	7.1
[07 < V < 08]	3.8	4.3	1.9	3.9	7.2	8.9
[08 < V < 09]	1.9	2.6	0.5	2.8	3.4	5.5
[09 < V < 10]	1.0	1.7	0.1	1.3	2.8	3.1
[10 < V < 11]	0.7	0.9	0.0	0.7	1.1	2.4
[11 < V < 12]	0.9	0.6	0.0	0.3	0.8	1.1
[12 < V < 13]	0.4	0.3	0.0	0.0	0.4	0.8
[13 < V < 14]	0.2	0.2	0.0	0.0	0.1	0.4
[14 < V < 15]	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
[15 < V < 16]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[16 < V < 17]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[17 < V < 18]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[18 < V < 19]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[19 < V < 20]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TOT	100	100	100	100	100	100

**POINT C [169250 m, 148750 m]**



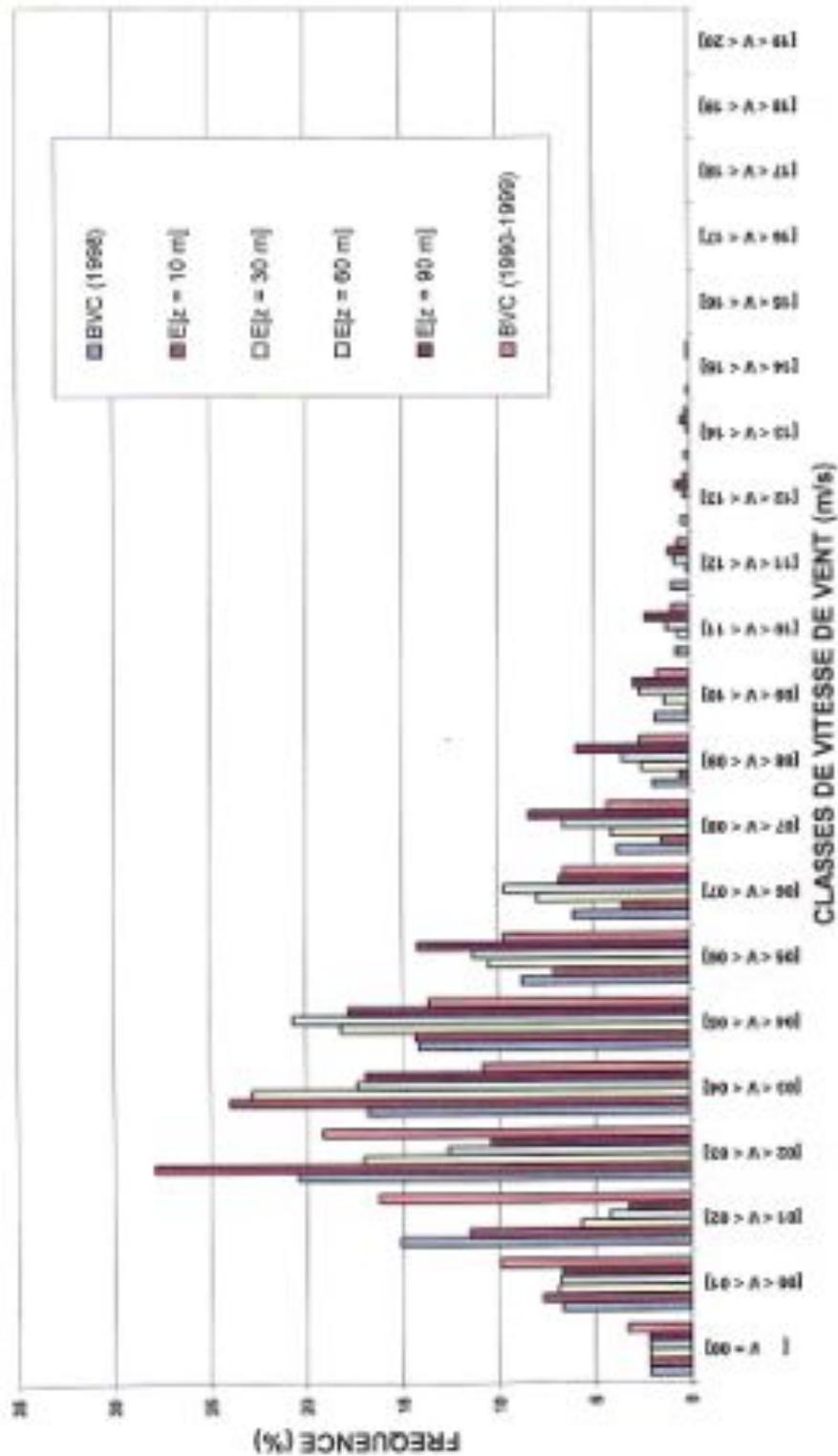
CLASSES DE VENT [m/s]	BVC (1998)	BVC (1990-1999)	D(z = 10 m)	D(z = 30 m)	D(z = 60 m)	D(z = 90 m)
[ V = 00]	2.2	3.3	2.2	2.2	2.2	2.2
[00 < V < 01]	6.7	9.9	0.0	7.0	6.9	6.8
[01 < V < 02]	15.1	16.2	14.5	6.8	4.4	2.8
[02 < V < 03]	20.4	19.1	28.4	17.9	13.6	11.6
[03 < V < 04]	16.8	10.8	21.7	22.1	17.2	16.8
[04 < V < 05]	34.1	13.5	15.4	17.3	19.6	17.0
[05 < V < 06]	8.8	9.7	8.7	10.5	11.2	14.3
[06 < V < 07]	6.1	6.6	2.6	1.6	10.0	4.8
[07 < V < 08]	3.8	4.3	1.1	4.6	6.4	3.4
[08 < V < 09]	1.9	2.6	0.2	2.0	3.6	6.0
[09 < V < 10]	1.8	1.7	0.1	1.3	2.5	2.9
[10 < V < 11]	0.7	0.8	0.0	0.6	1.1	2.3
[11 < V < 12]	0.9	0.6	0.0	0.1	0.9	1.0
[12 < V < 13]	0.4	0.3	0.0	0.0	0.2	0.7
[13 < V < 14]	0.2	0.2	0.0	0.0	0.1	0.4
[14 < V < 15]	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
[15 < V < 16]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[16 < V < 17]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[17 < V < 18]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[18 < V < 19]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[19 < V < 20]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TEST	100	100	100	100	100	100

POINT D [166250 m, 149250 m]



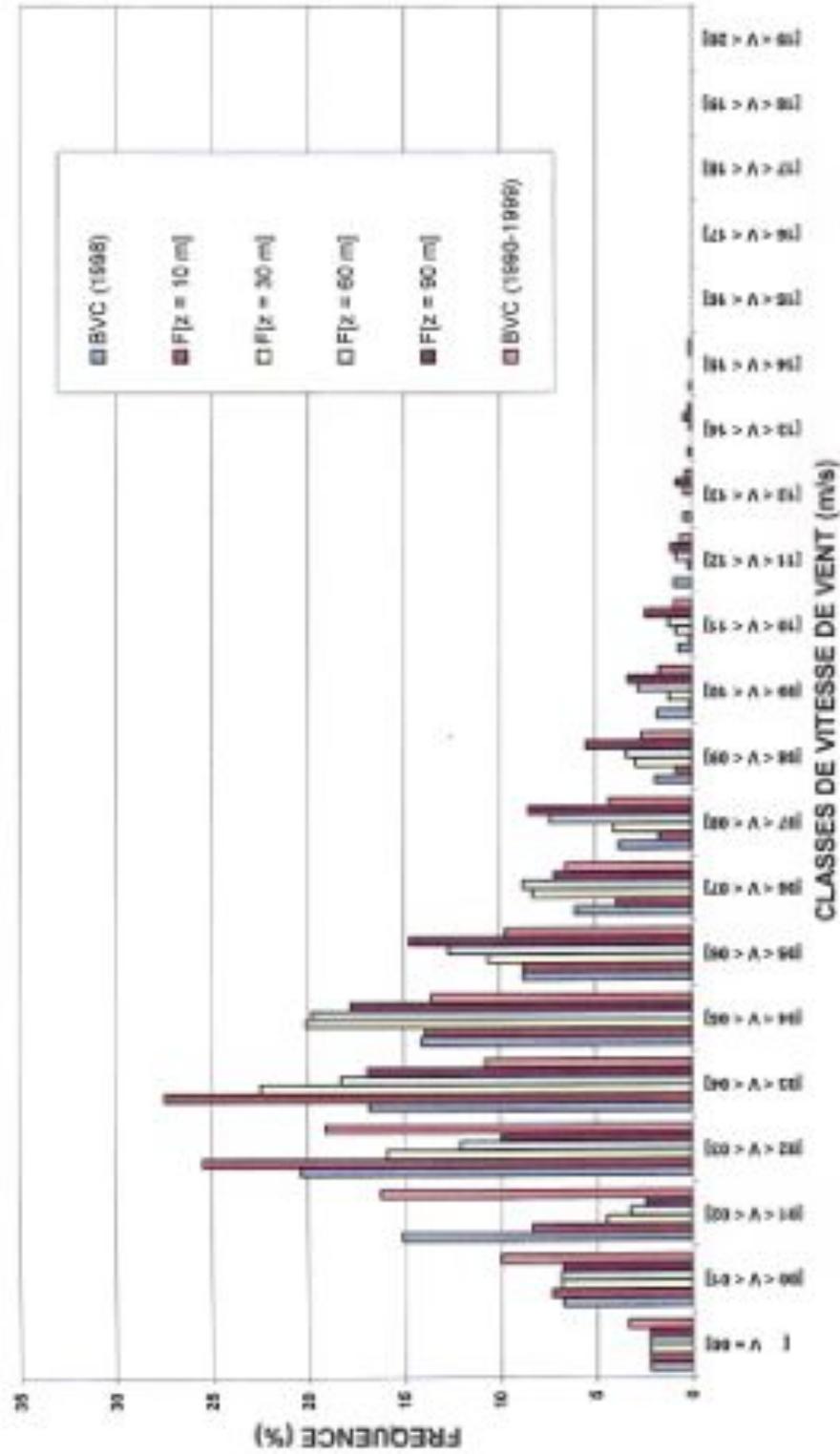
CLASSES DE VENT (m/s)	BVC (1998)	BVC (1990-1999)	E(x = 10 m)	E(x = 30 m)	E(x = 60 m)	E(x = 90 m)
[ V = 00]	2.2	3.3	2.2	2.2	2.2	2.2
[00 < V < 01]	6.7	9.9	7.7	6.9	6.8	6.7
[01 < V < 02]	15.1	16.2	11.5	5.7	4.2	3.2
[02 < V < 03]	20.4	19.1	27.8	17.0	12.6	10.4
[03 < V < 04]	16.8	10.8	23.9	22.8	17.3	16.9
[04 < V < 05]	14.1	13.6	14.3	18.2	20.7	17.8
[05 < V < 06]	8.8	9.7	7.1	10.5	11.3	14.2
[06 < V < 07]	6.1	6.6	3.5	8.0	9.7	6.8
[07 < V < 08]	3.8	4.3	1.5	4.1	6.6	8.4
[08 < V < 09]	1.9	2.6	0.5	2.5	3.5	5.9
[09 < V < 10]	1.8	1.7	0.1	1.3	2.6	2.9
[10 < V < 11]	0.7	0.9	0.0	0.6	1.2	2.3
[11 < V < 12]	0.9	0.6	0.0	0.1	0.8	1.1
[12 < V < 13]	0.4	0.3	0.0	0.0	0.3	0.7
[13 < V < 14]	0.2	0.2	0.0	0.0	0.1	0.4
[14 < V < 15]	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
[15 < V < 16]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[16 < V < 17]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[17 < V < 18]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[18 < V < 19]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[19 < V < 20]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TOT	100	100	100	100	100	100

**POINT E [168750 m, 149250 m]**



CLASSES DE VENT (m/s)	BVC (1998)	BVC (1990-1999)	F(z = 10 m)	F(z = 30 m)	F(z = 60 m)	F(z = 90 m)
[ 1 < V < 00]	2.2	3.3	2.2	2.2	2.2	2.2
[00 < V < 01]	6.7	9.9	7.3	6.8	6.8	6.7
[01 < V < 02]	15.1	16.2	8.3	4.4	3.2	3.4
[02 < V < 03]	20.4	19.1	25.5	15.9	12.1	8.9
[03 < V < 04]	16.8	10.8	27.5	22.3	18.3	16.9
[04 < V < 05]	14.1	13.6	13.9	20.1	19.8	17.9
[05 < V < 06]	8.8	9.7	8.8	10.6	12.7	14.7
[06 < V < 07]	6.1	6.6	3.9	8.3	8.8	7.2
[07 < V < 08]	3.8	4.3	1.7	4.1	7.4	8.5
[08 < V < 09]	1.9	2.6	0.8	2.9	3.4	3.9
[09 < V < 10]	1.8	1.7	0.1	1.2	2.8	3.3
[10 < V < 11]	0.7	0.9	0.1	0.8	1.2	2.4
[11 < V < 12]	0.9	0.6	0.0	0.2	0.6	1.1
[12 < V < 13]	0.4	0.3	0.0	0.0	0.4	0.8
[13 < V < 14]	0.2	0.2	0.0	0.0	0.1	0.4
[14 < V < 15]	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
[15 < V < 16]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[16 < V < 17]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[17 < V < 18]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[18 < V < 19]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[19 < V < 20]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TEST	100	100	100	100	100	100

**POINT F [169250 m, 149250 m]**



## FREQUENCES DES VENTS PAR CLASSES D'INTENSITE

ANNEE : 1999

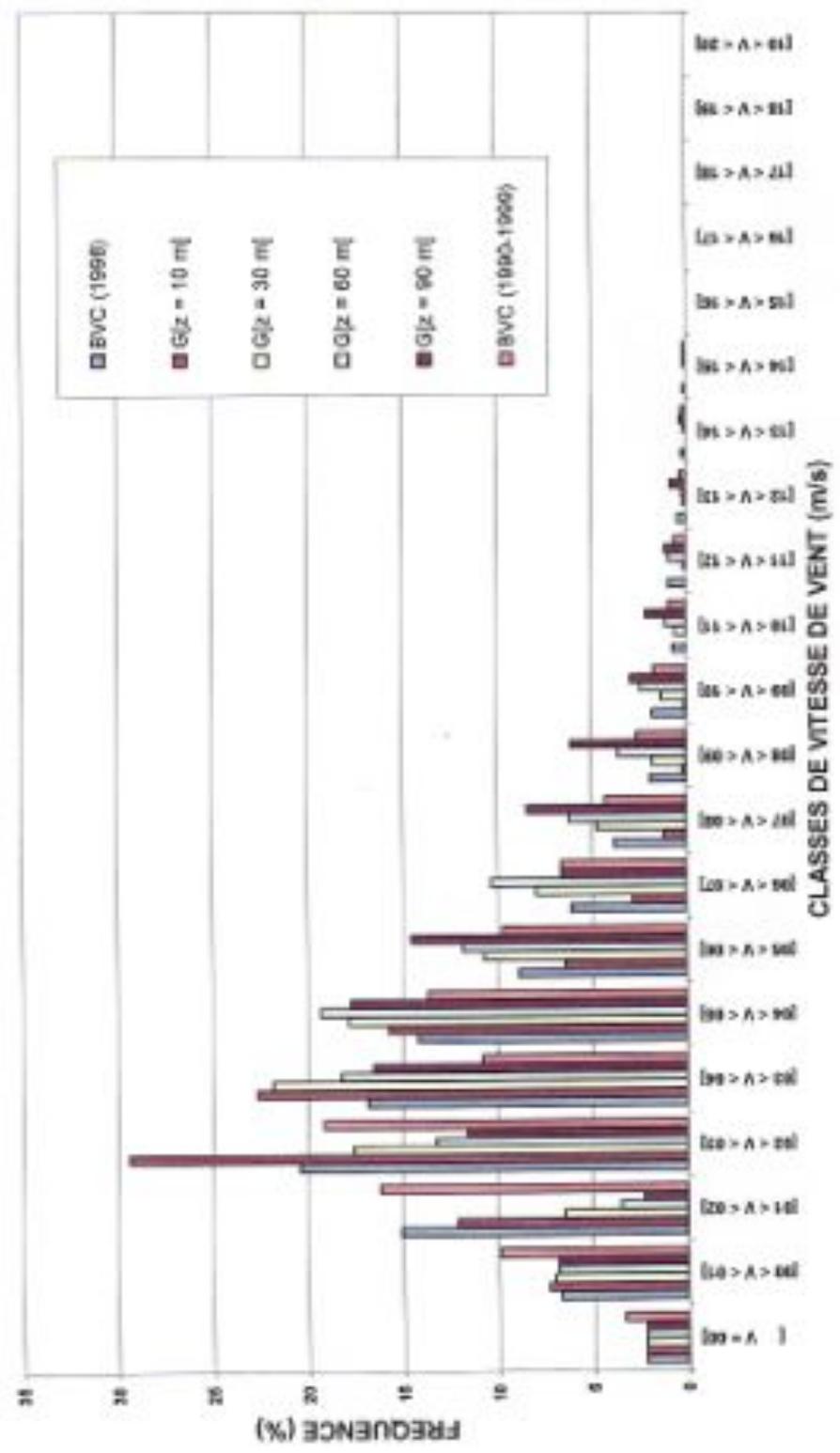
CLASSES DE VENT (m/s)	BVC (1998)	BVC (1990-1999)	G (x = 10 m)	G (x = 30 m)	G (x = 60 m)	G (x = 90 m)
[	2.2	3.3	2.2	2.2	2.2	2.2
[00 < V < 01]	6.7	9.9	7.3	7.0	6.8	6.8
[01 < V < 02]	15.1	16.2	12.1	6.5	3.5	2.3
[02 < V < 03]	20.4	19.1	25.4	17.6	13.2	11.6
[03 < V < 04]	16.8	10.8	22.6	21.8	18.2	16.5
[04 < V < 05]	24.1	13.6	15.7	17.8	19.3	17.7
[05 < V < 06]	8.8	9.7	6.4	10.7	11.8	14.5
[06 < V < 07]	6.1	6.6	2.8	7.9	10.3	6.6
[07 < V < 08]	3.8	4.3	1.2	4.7	6.2	8.4
[08 < V < 09]	1.9	2.6	0.2	1.8	3.6	6.1
[09 < V < 10]	1.8	1.7	0.1	1.3	2.4	2.9
[10 < V < 11]	0.7	0.9	0.0	0.6	1.1	2.1
[11 < V < 12]	0.9	0.6	0.0	0.1	0.9	1.1
[12 < V < 13]	0.4	0.3	0.0	0.1	0.2	0.8
[13 < V < 14]	0.2	0.2	0.0	0.0	0.1	0.3
[14 < V < 15]	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1
[15 < V < 16]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[16 < V < 17]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[17 < V < 18]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[18 < V < 19]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[19 < V < 20]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TOT	100	100	100	100	100	100

SABLIERES DE MONT-SAINT-GUIBERT

G : [168250 m, 149750 m]

SABL1998.xls / G\_D

POINT G [168250 m, 149750 m]



ANNEE : 1998

FREQUENCES DES VENTS PAR CLASSES D'INTENSITE

8/06/00

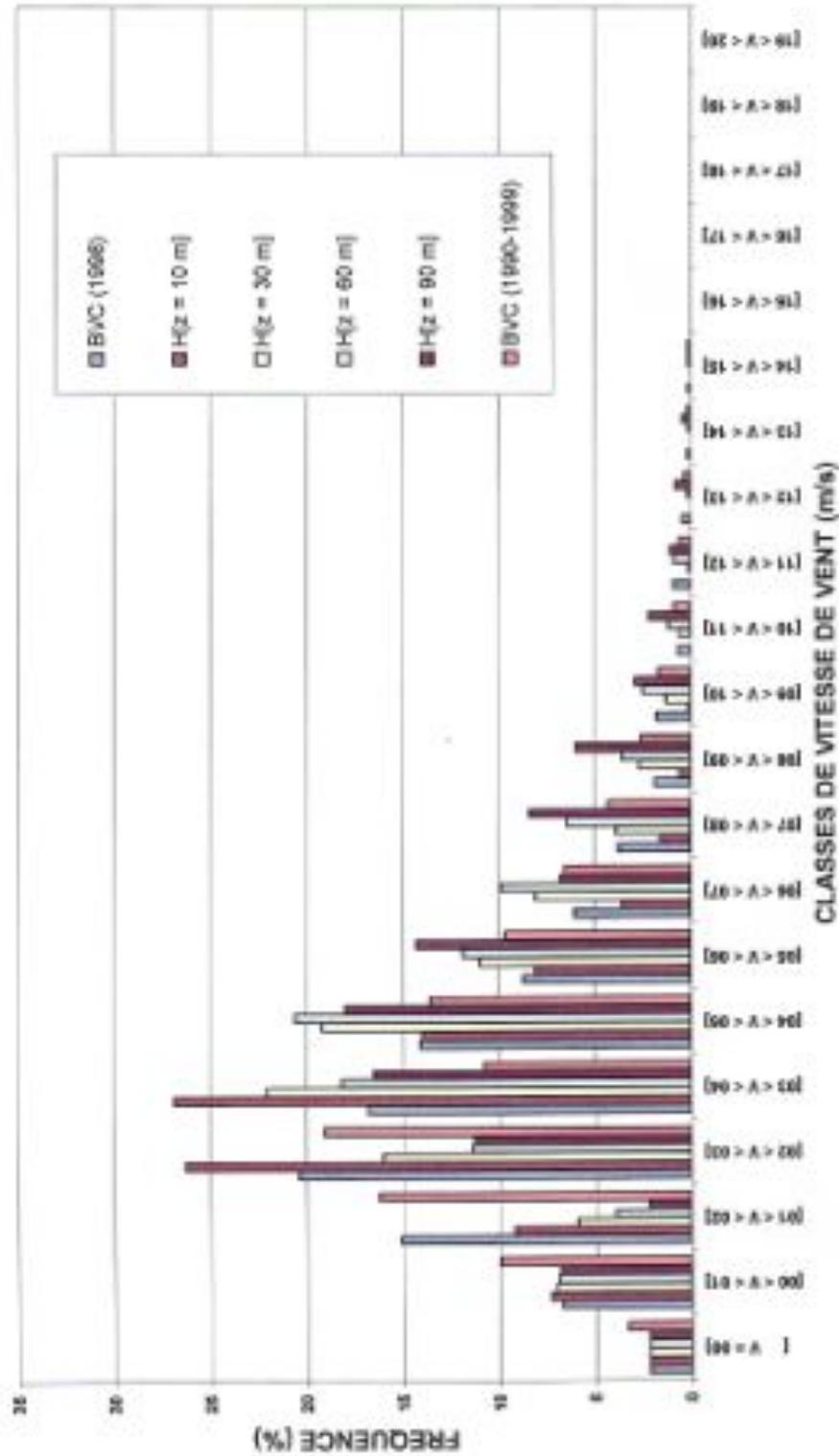
CLASSES DE VENT (m/s)	BVC (1998)	BVC (1990-1999)	H(z = 10 m)	H(z = 30 m)	H(z = 60 m)	H(z = 90 m)
[ V = 00]	2.2	3.3	2.2	2.2	2.2	2.2
[00 < V < 01]	6.7	9.9	7.3	7.0	6.9	6.8
[01 < V < 02]	15.1	16.2	9.2	5.9	3.9	2.2
[02 < V < 03]	23.4	19.1	26.3	16.0	11.4	11.3
[03 < V < 04]	15.8	18.8	26.9	22.1	18.2	16.5
[04 < V < 05]	14.1	13.6	14.0	19.2	20.6	18.0
[05 < V < 06]	8.8	9.7	8.1	11.0	11.9	14.3
[06 < V < 07]	6.1	6.6	3.6	8.1	9.9	6.8
[07 < V < 08]	3.8	4.3	1.6	3.9	6.5	8.4
[08 < V < 09]	1.8	2.6	0.6	2.7	3.6	6.0
[09 < V < 10]	1.8	1.7	0.1	1.3	2.8	2.8
[10 < V < 11]	0.7	0.9	0.0	0.6	1.2	2.2
[11 < V < 12]	0.9	0.6	0.0	0.1	0.9	1.1
[12 < V < 13]	0.4	0.3	0.0	0.0	0.2	0.8
[13 < V < 14]	0.2	0.2	0.0	0.0	0.1	0.4
[14 < V < 15]	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1
[15 < V < 16]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[16 < V < 17]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[17 < V < 18]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[18 < V < 19]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[19 < V < 20]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TEST	100	100	100	100	100	100

SABLIERES DE MONT-SAINT-GUBERT

H : [168750 m, 149750 m]

SABL1998.xls / H\_D

**POINT H [168750 m, 149750 m]**



CLASSES DE VENT (m/s)	BVC (1998)	BVC (1990-1999)	$\bar{z}$ (z = 10 m)	$\bar{z}$ (z = 30 m)	$\bar{z}$ (z = 60 m)	$\bar{z}$ (z = 90 m)
[ V = 00]	2.2	3.3	2.2	2.2	2.2	2.2
[00 < V < 01]	6.7	9.9	7.3	6.9	6.8	6.7
[01 < V < 02]	19.1	16.2	8.3	4.8	3.2	2.2
[02 < V < 03]	20.4	19.1	23.7	15.4	11.0	10.1
[03 < V < 04]	16.8	10.8	30.0	22.0	19.1	17.0
[04 < V < 05]	14.1	13.6	13.7	20.6	20.0	19.1
[05 < V < 06]	8.8	9.7	8.1	10.9	12.8	14.6
[06 < V < 07]	6.1	6.6	3.8	8.2	9.0	7.0
[07 < V < 08]	3.4	4.3	1.9	3.7	7.4	8.5
[08 < V < 09]	1.9	2.6	0.8	3.0	3.3	5.7
[09 < V < 10]	1.1	1.7	0.1	1.3	2.8	3.1
[10 < V < 11]	0.7	0.9	0.1	0.9	1.2	2.3
[11 < V < 12]	0.9	0.6	0.0	0.2	0.8	1.1
[12 < V < 13]	0.4	0.3	0.0	0.0	0.4	0.8
[13 < V < 14]	0.2	0.2	0.0	0.0	0.1	0.4
[14 < V < 15]	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
[15 < V < 16]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[16 < V < 17]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[17 < V < 18]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[18 < V < 19]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[19 < V < 20]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TOT	100	100	100	100	100	100



08/05/2000	Analyse du potentiel météorologique du site de la sablière de MSC en termes de fréquence et d'intensité du vent	p. 9 / 10
------------	--	-----------

**Annexe 3 :** Tableaux et Graphiques de "Fréquences des Vents par Classes d'Intensité" par Niveau

---

ATMOSPHERIC TRANSMIT MODELLING FOR PROFESSIONAL APPLICATIONS S.P.R.L.		
Environmental Consulting & Software Development		

---

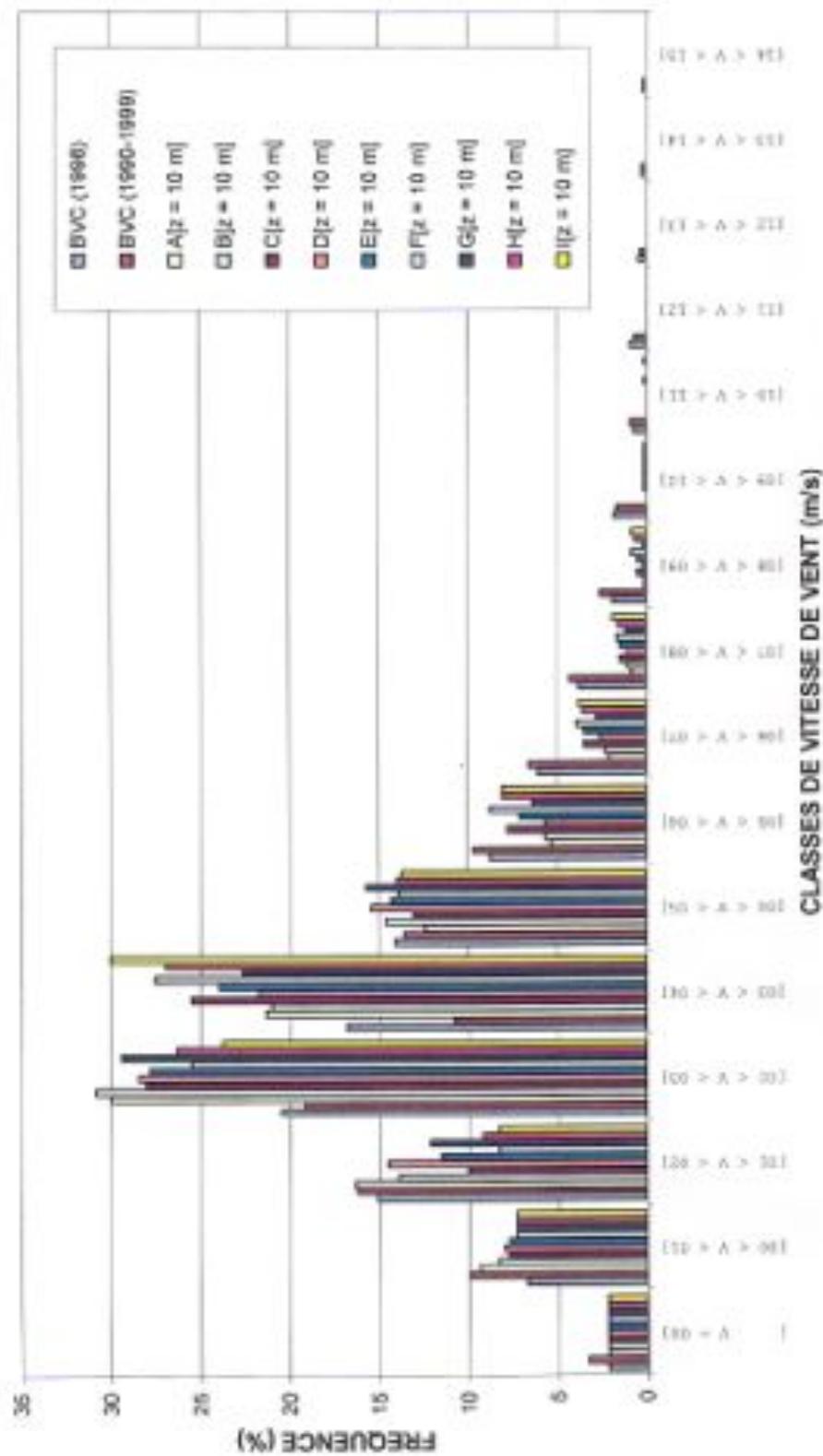
Etsi Sarel-Ambel, 5	R.C. Nivelles 26.864	Tél : 31-1967-41 31-00
D - 1480 Nivelles	T.V.A. : BE055879185	Fax : 31-0967-21 36-38
Belgium	Bank : B.E.L. 340-3162078-25	Email : <a href="mailto:aj@atm-pro.com">aj@atm-pro.com</a>

---

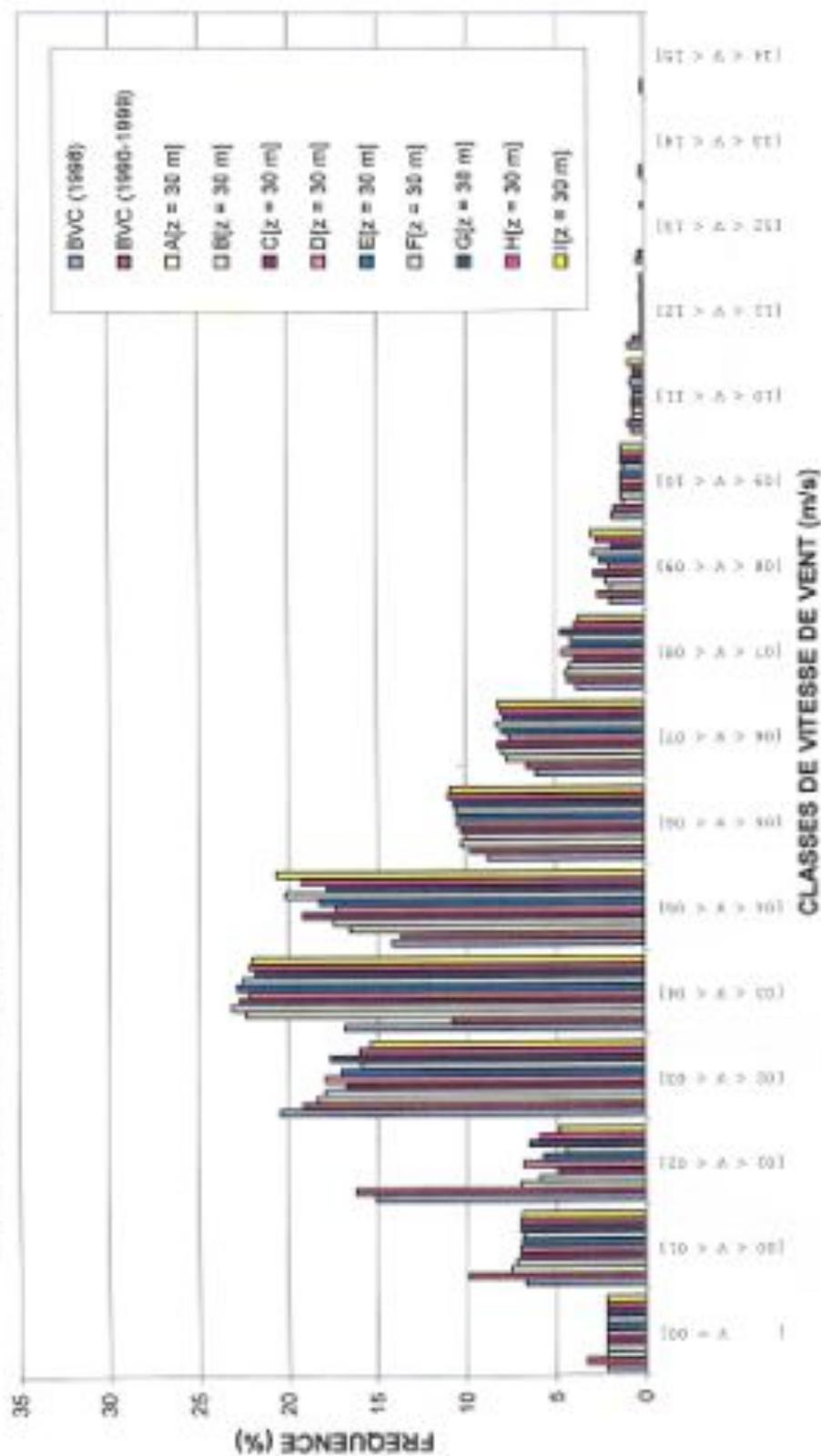
Web Site : <http://www.ekynet.be/www.ATM-PRO.com/index.html>

---

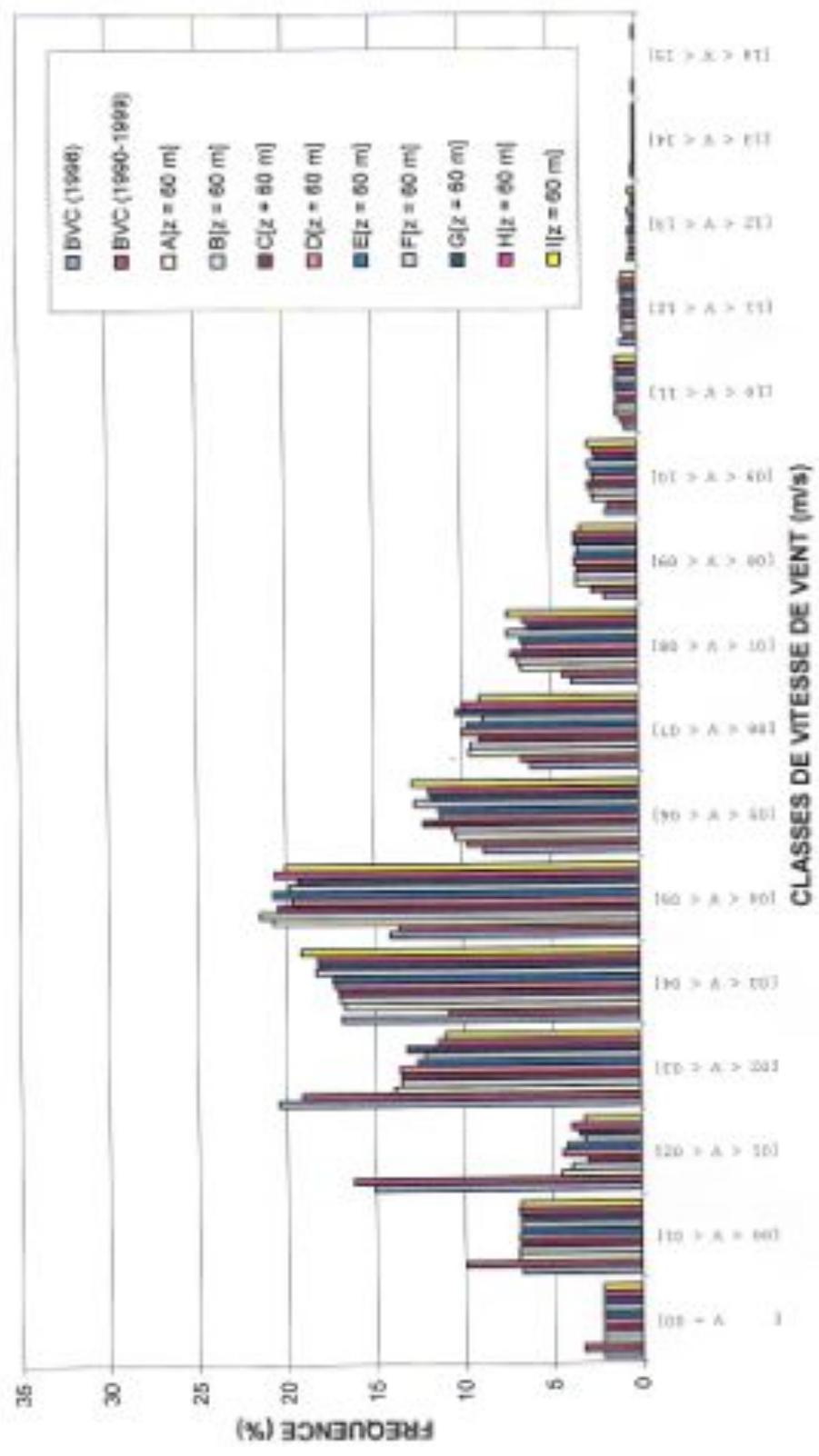
**FREQUENCES DES VENTS PAR CLASSES D'INTENSITE : NIVEAU 1 (z = 10 m)**



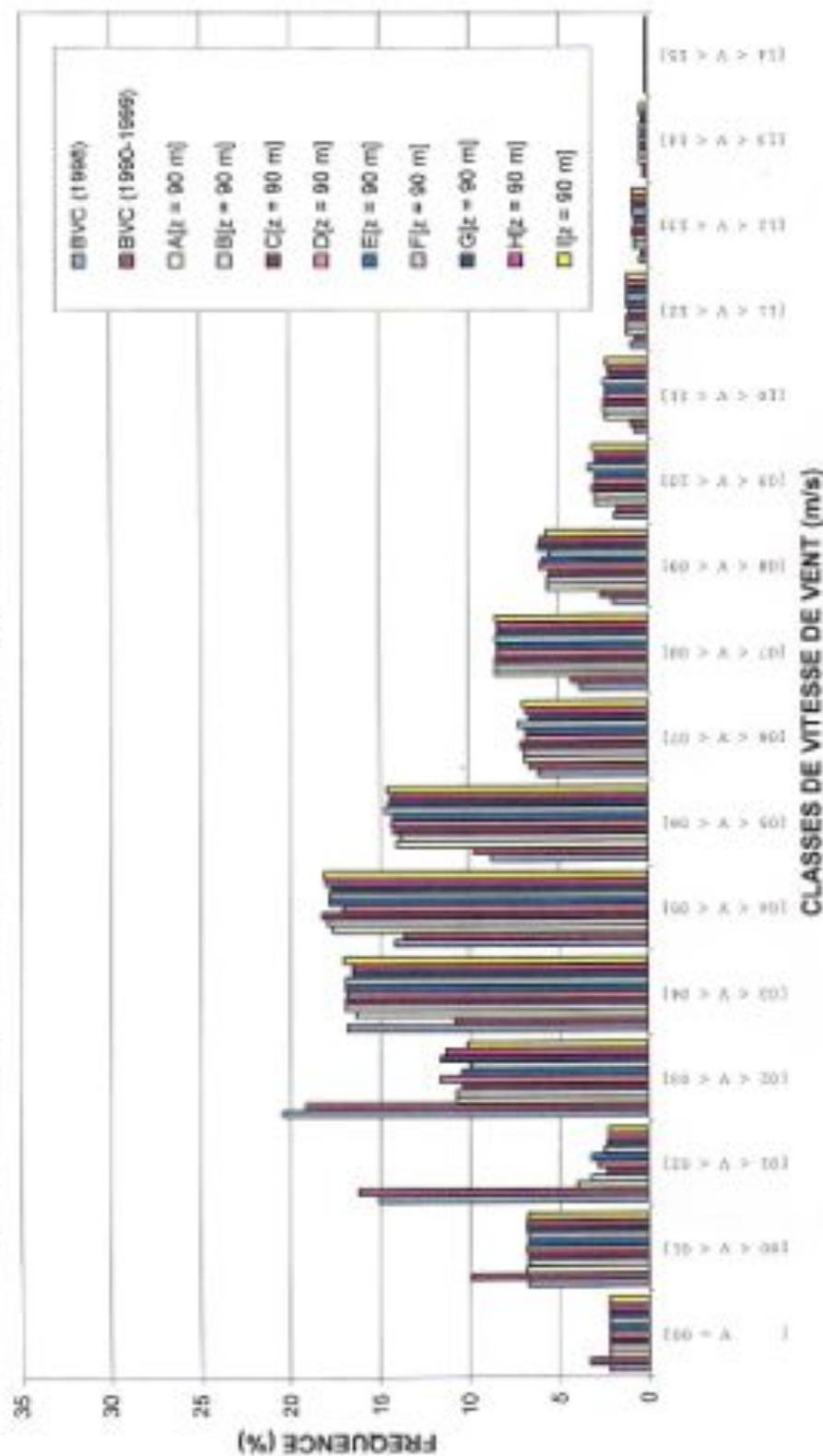
**FREQUENCES DES VENTS PAR CLASSES D'INTENSITE : NIVEAU 1 (z = 30 m)**



FREQUENCES DES VENTS PAR CLASSES D'INTENSITE : NIVEAU 1 (z = 60 m)



**FREQUENCES DES VENTS PAR CLASSES D'INTENSITE : NIVEAU 4 (z = 90 m)**



08/05/2000	Analyse du potentiel météorologique du site de la sablière de MSG en termes de fréquence et d'intensité du vent	p. 10 / 10
------------	--	------------

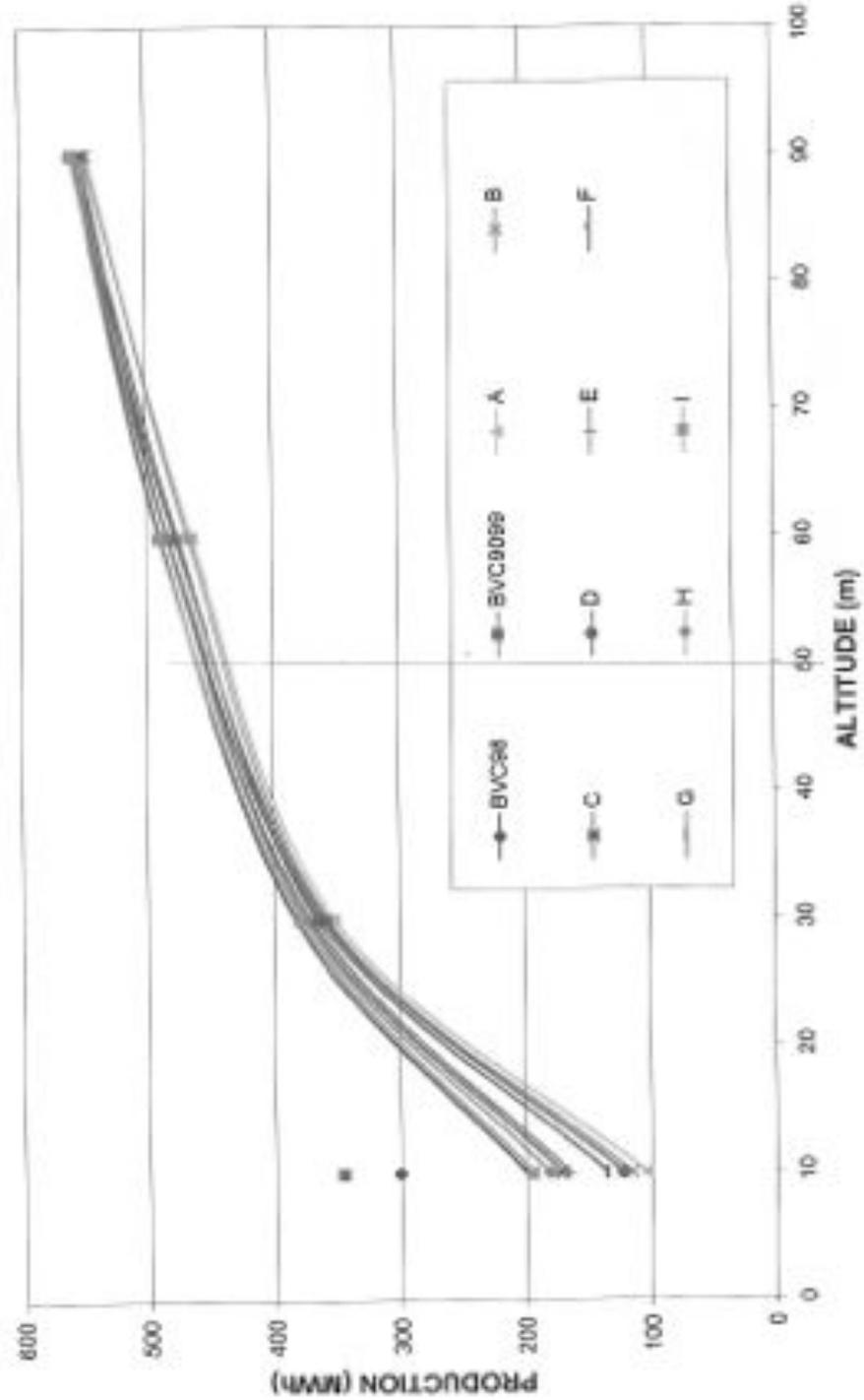
Annexe 4 : Estimation du potentiel de production énergétique ( $5 \text{ m/s} < V < 9 \text{ m/s}$ )

---

ATMOSPHERIC TRANSPORT MODELLING FOR PROFESSIONAL APPLICATIONS S.P.R.L.		
Environmental Consulting & Software Development		
Eue Sates Andel, 7 B - 1400 Nivelles Belgium	R.C. Nivelles 79.669 T.V.A. : 08.495.875.155 Bank : B.B.E. 340.1162898.23	Tel : 32 - (0)67 - 44. 33. 04 Fax : 32 - (0)67 - 21. 34. 24 Email : alexis.durieux@atm-pro.be
WEB Site : <a href="http://users.skynet.be/www.ATM-PRO.com/index.html">http://users.skynet.be/www.ATM-PRO.com/index.html</a>		

---

### ESTIMATION DU POTENTIEL DE PRODUCTION ENERGETIQUE [5 m/s < V < 9 m/s]



## **ANNEXES III**

### **Calculs annexes**

---

### III.I. Limite de Betz

#### 1. Les éoliennes détournent le vent



Une éolienne dévie le vent même avant que celui-ci atteigne la surface balayée par le rotor. Il en résulte qu'une éolienne ne pourra jamais récupérer l'énergie totale transportée par le vent. Sur l'image ci-dessus, le vent souffle de droite, et nous utilisons un dispositif quelconque afin de capter l'énergie cinétique contenue dans le vent (dans ce cas, nous avons employé un rotor tripale, mais nous aurions aussi bien pu utiliser un autre dispositif mécanique).

#### 2. Le tube de courant

Une éolienne freine obligatoirement le vent lorsqu'elle capte son énergie cinétique et la convertit en énergie rotative. Pour cette raison, la vitesse du vent à l'avant du rotor (à droite) est toujours supérieure à celle à l'arrière (à gauche).

Comme la masse d'air traversant la surface balayée par le rotor (par seconde) est égale à celle sortant à gauche, la veine d'air s'élargit forcément à l'arrière du rotor, ce que nous avons essayé d'illustrer sur l'image ci-dessus en dessinant autour du rotor un tube imaginaire, appelé aussi un tube de courant.

Le vent ne sera pas freiné à sa vitesse finale juste après avoir traversé l'hélice - le freinage aura lieu progressivement jusqu'à ce que la vitesse de l'air à l'arrière du rotor devienne à peu près constante.

#### 3. Le freinage idéal du vent

Plus la partie de l'énergie cinétique du vent captée par l'éolienne est grande, plus remarquable



sera le ralentissement du vent sortant par le côté gauche de l'éolienne sur l'image. Si nous tentions d'extraire toute l'énergie contenue dans le vent, l'air continuerait son chemin à une vitesse nulle, ce qui en réalité signifierait qu'il n'arriverait pas à abandonner le rotor. Le résultat serait dans ce cas tout le contraire de ce que nous aurions cherché à obtenir : aucune

---

énergie ne serait extraite du vent, l'entrée de l'air dans le rotor étant évidemment également empêchée.

L'autre cas extrême serait que le vent passerait à travers le tube ci-dessus sans aucune perturbation, mais avec le même résultat : l'énergie extraite serait absolument nulle.

Nous pouvons donc assumer qu'il doit y avoir une manière de freiner le vent qui se trouve entre ces deux extrémités et qui permette de façon bien plus efficace de transformer l'énergie du vent en énergie mécanique. Il y a en fait une réponse très simple à cette question : une éolienne idéale freinerait le vent à  $1/3$  de sa vitesse originale. Afin de bien comprendre pourquoi, nous devons utiliser la loi physique fondamentale de l'aérodynamique des éoliennes : la limite de Betz

La loi de Betz détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de  $16/27$  (ou  $59\%$ ) de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Ce fut l'Allemand Albert Betz qui, en 1919, formula la loi de Betz pour la première fois. Son livre "Wind-Energie" (Energie éolienne) publié en 1926 donne une bonne idée de l'état des connaissances en énergie éolienne et des aérogénérateurs de l'époque. Il est en fait très surprenant qu'il soit possible de formuler une telle théorie générale qui s'applique à toute éolienne ayant un rotor en forme de disque. Pour prouver le théorème, il faut avoir une certaine connaissance des mathématiques et de la physique, mais, comme Betz l'a écrit dans son livre, vous ne devez pas vous laisser décourager par ce fait.

#### 4. Démonstration du théorème de Betz



Partons de la supposition raisonnable que la vitesse moyenne du vent traversant la surface balayée par le rotor est égale à la moyenne de la vitesse moyenne du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne ( $v_1$ ), et de sa vitesse après le passage à travers le plan de rotor  $v_2$ , soit  $(v_1 + v_2)/2$ . (Betz fait une preuve de cette supposition dans son livre.)

La masse de l'air traversant la surface balayée par le rotor en une seconde est égale à :

$$m = \rho F (v_1 + v_2)/2$$

où  $m$  est la masse par seconde,  $\rho$  la densité de l'air,  $F$  la surface balayée par le rotor, et  $[(v_1 + v_2)/2]$  la vitesse moyenne du vent traversant le rotor. La puissance extraite du vent par le rotor est égale à la masse multipliée par le carré de la diminution de la vitesse du vent (selon la seconde loi de Newton) :

$$P = (1/2) m (v_1^2 - v_2^2)$$

En substituant  $m$  (de la première équation) dans cette expression, nous obtenons l'expression suivante de la puissance extraite du vent :

$$P = (\rho/4) (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) F$$

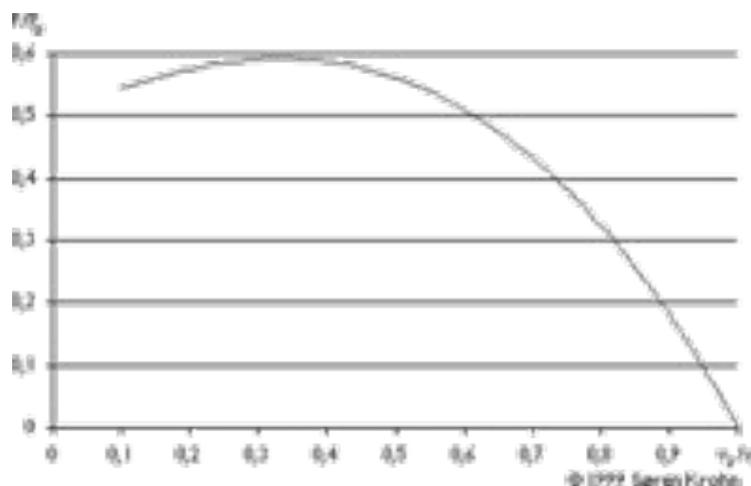
Comparons maintenant notre résultat avec la puissance totale d'un flux d'air non perturbé traversant une surface similaire  $F$  sans la présence d'un rotor qui ralentit le vent. Nous appelons cette puissance  $P_0$  :

$$P_0 = (\rho/2) v_1^3 F$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et celle du vent non perturbé sera alors :

$$(P/P_0) = (1/2) (1 - (v_2 / v_1)^2) (1 + (v_2 / v_1))$$

Nous pouvons tracer  $P/P_0$  en fonction de  $v_2 / v_1$  :



Comme vous pouvez le voir, la fonction atteint son maximum pour  $v_2 / v_1 = 1/3$ , la valeur maximale pour la puissance extractible du vent étant de 0,59 ou  $16/27$  de la puissance totale contenue dans le vent.

### III.II. Calcul de la diminution de volume du bassin supérieur dans le cas d'un assouvissement complet des besoins électriques

Nous avons émis l'hypothèse que la hauteur de chute totale Ht était constante ! Mais en fait, plus le bassin se vide, plus Ht diminue pour atteindre 30-5=25 mètres, ce qui implique un plus grand débit pour une même puissance. Calculons le volume d'eau réel qu'il faudra prévoir :

Nous avons déjà établi la surface du bassin, soit :  $S = 41.209 \text{ m}^2$

La différence de hauteur entre la surface de l'eau du bassin et la roue s'exprime alors :

$$H_t = 30 - \int Q_v / S \, dt$$

Or,

$$Q_v = P / (H_t * \rho * g)$$

donc

$$H_t = 30 - \int P / (H_t * \rho * g * S) \, dt$$

$$\Leftrightarrow H_t + P / (\rho * g * S) * \int 1/H_t \, dt = 30$$

Si l'on dérive :

$$dH_t/dt + P/(\rho * g * S) * 1/H_t = 0$$

$$H_t * H_t' = - P/(\rho * g * S)$$

Qui peut se mettre sous la forme :

$$y(x) * y'(x) = K$$

Qui est une équation différentielle dont la solution est:

$$y = \sqrt{2 K x + C} \quad \Leftrightarrow \quad H_t = \sqrt{(- 2 P/(\rho * g * S) t) + C}$$

Conditions limites :

- en  $t = 0$ ,  $H_t = 30 \text{ m}$ ,

$$\Rightarrow C = 900$$

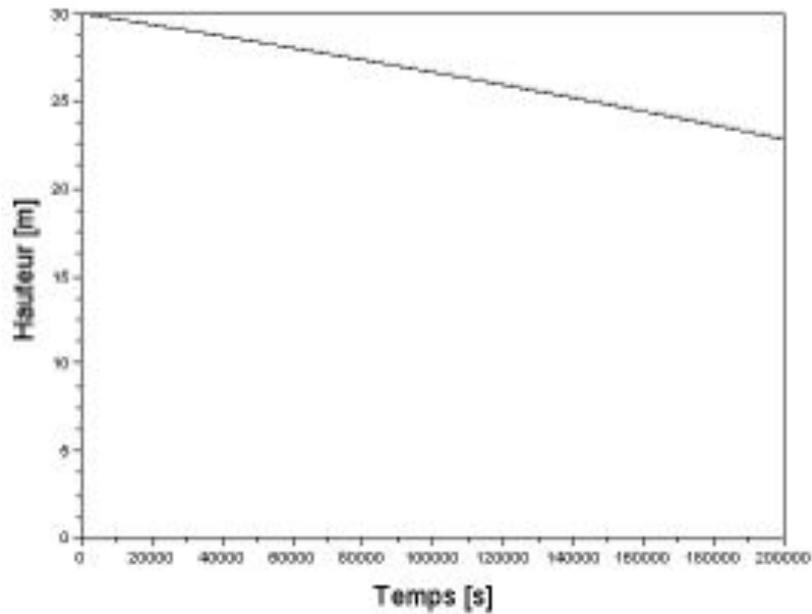
Avec

$$\begin{aligned} K &= P/(\rho * g * S) \\ &= 375000/(1000 * 9,81 * 41209) \\ &\approx 0,000927 \end{aligned}$$

La hauteur s'exprime alors :

$$H_t = \sqrt{900 - 0,001854 t} \quad [\text{m}]$$

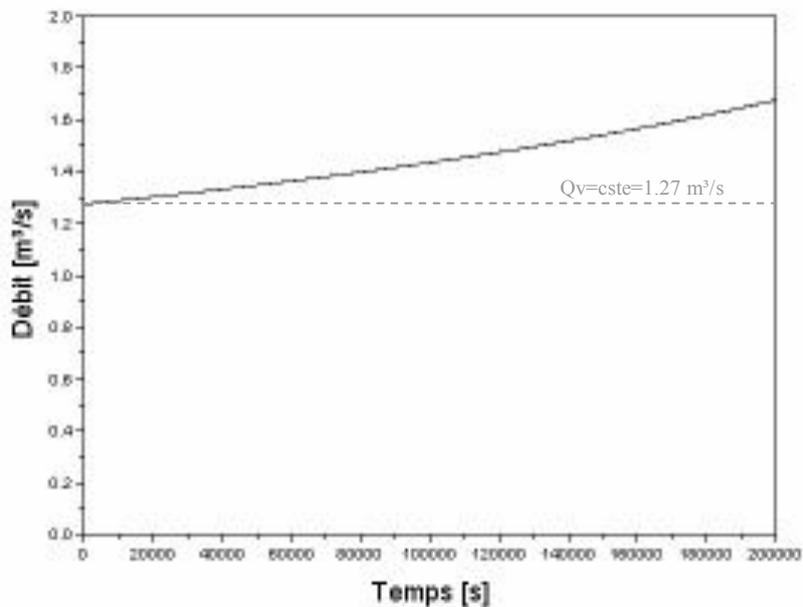
Représentons graphiquement le résultat obtenu :



### Variation de hauteur au cours du temps

La hauteur diminuant, le débit doit être plus important pour qu'une puissance de 250kW électrique puisse être créée, engendrant une augmentation dans le volume d'eau à prévoir. Ce débit est :

$$Q_v = P / (H_t * \rho * g) = P / ((\sqrt{900 - 0,001854 t}) * \rho * g)$$



### Variation du débit au cours du temps

Pour connaître le volume d'eau réel à prévoir, il suffit donc d'intégrer le débit sur cinq fois 9 heures :

$$V = \left( \int_0^{45 \text{ heures}} Q_v * dt \right)$$

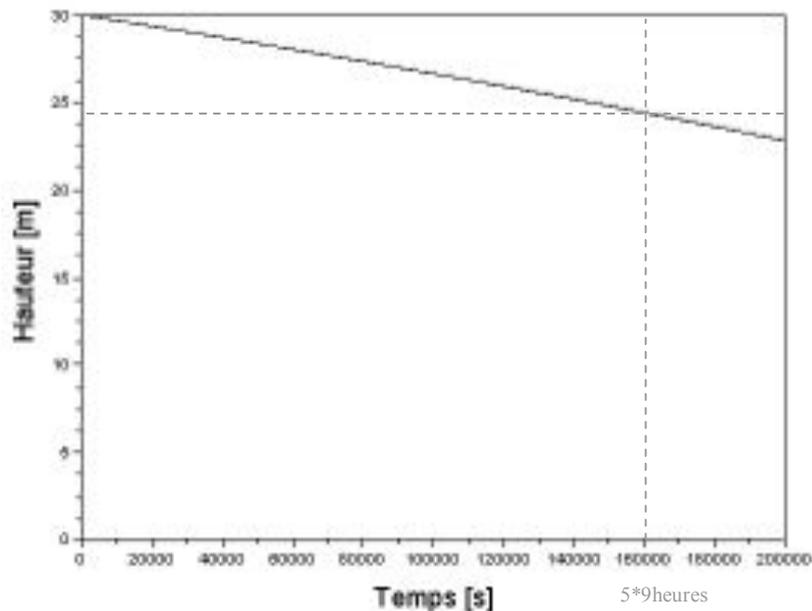
$$\Leftrightarrow V = \int_0^{45 \text{ heures}} P / \left( \left( \sqrt{900 - 0,001854 t} \right) * \rho * g \right) * dt$$

$$\Leftrightarrow V = 375000 / (9.81 * 1000) * \int_0^{45 \text{ heures}} 1 / \left( \sqrt{900 - 0,001854 t} \right) * dt$$

$$\Leftrightarrow \boxed{V = 227\,878,84 \quad \text{m}^3}$$

Si l'on compare avec les 205 740 m<sup>3</sup> que l'on avait trouvés plus haut, nous pouvons dire que cette influence n'était pas à négliger. Mais qu'en advient-il des dimensions ?

Après 5 jours de fonctionnement de la génératrice, la hauteur du bassin est à 24,5 mètres, ce qui veut dire que la profondeur ne doit plus être de 5 mètres, mais bien de 5,5 au minimum. La superficie du bassin étant de 203\*203=41209m<sup>2</sup> (fixé plus haut).



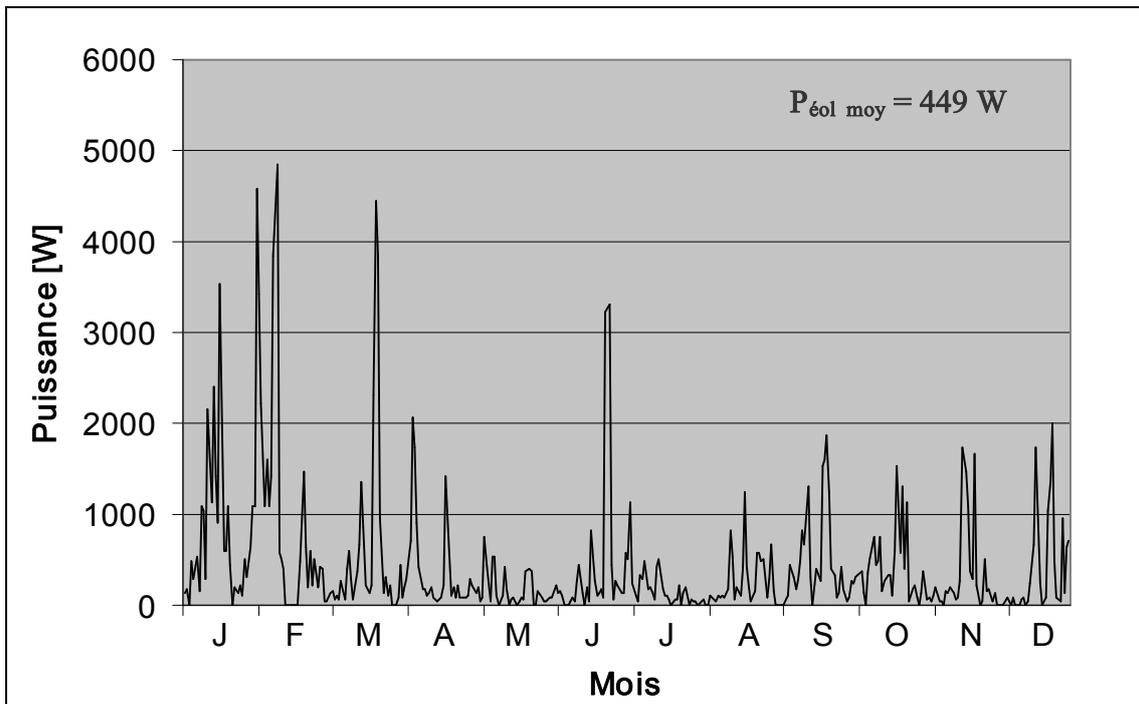
**Variation de hauteur au cours du temps**

Nous connaissons dès lors toutes les dimensions du bassin :

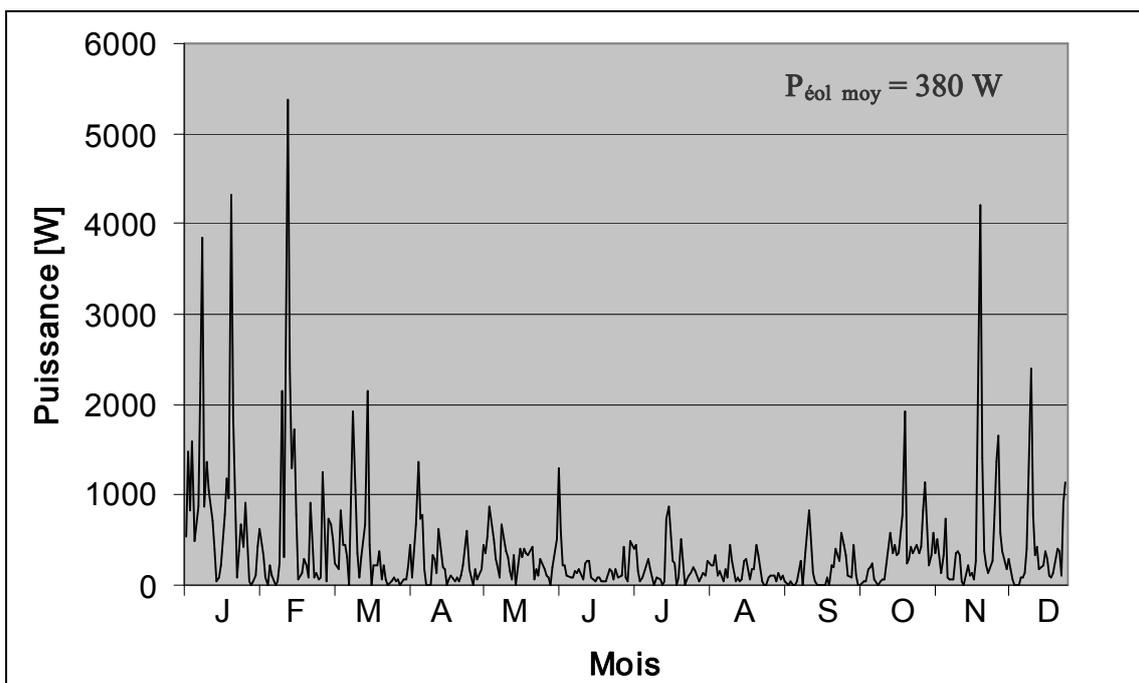
- profondeur = 5.5 m
- superficie = 41209 m<sup>2</sup>
- hauteur de fond du bassin = 24.5 m

Et ce, pour un assouvissement complet des besoins énergétiques.

III.III. Evolution de la puissance transmissible par l'éolienne pour les années 2004 et 2005

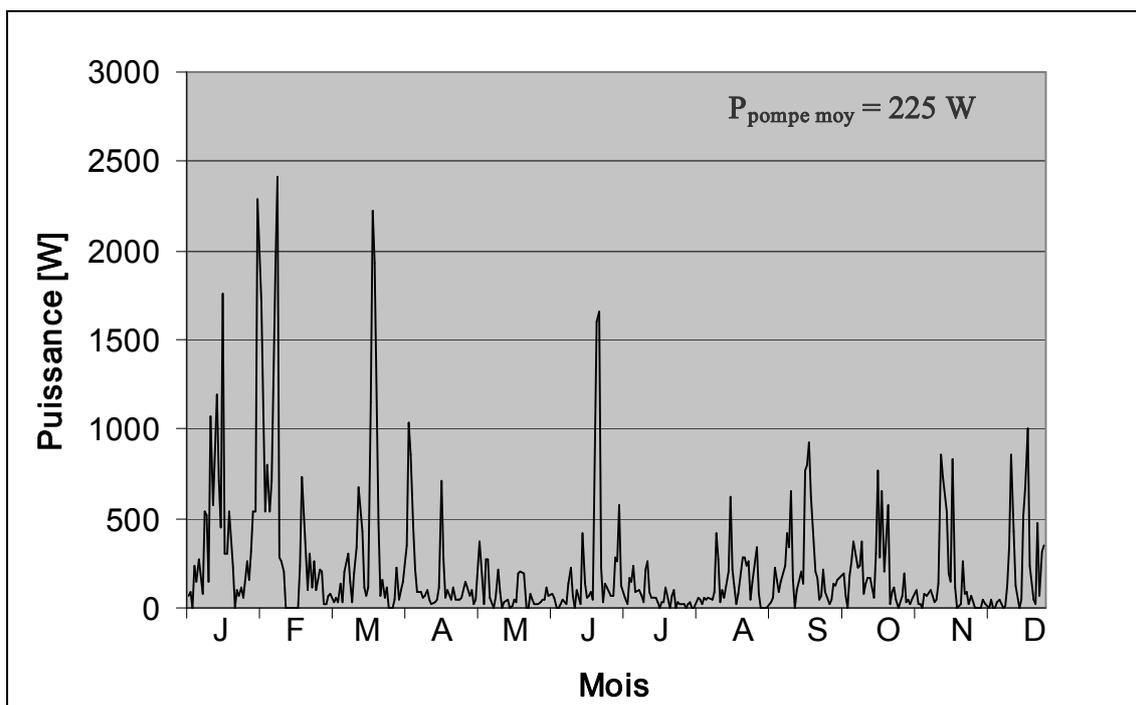


Puissances transmissibles par une éolienne de pompage au cours de l'année 2004 à Ernage

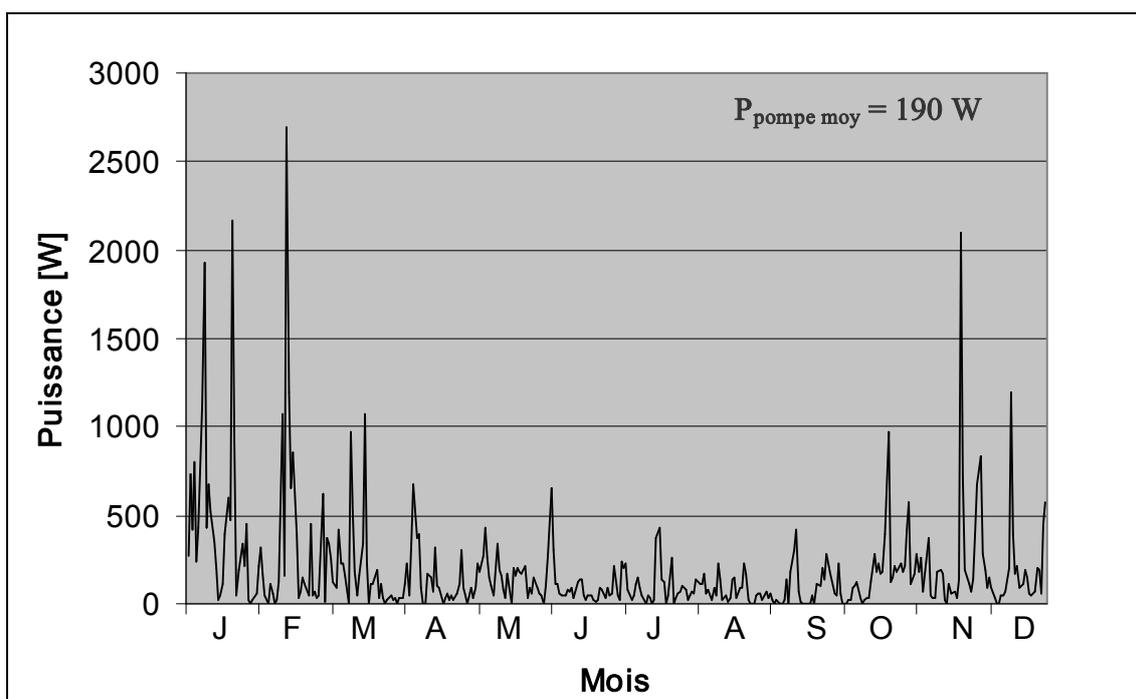


Puissances transmissibles par une éolienne de pompage au cours de l'année 2005 à Ernage

III.IV. Evolution de la puissance transmissible par la pompe pour les années 2004 et 2005



Puissances transmissibles par la pompe au cours de l'année 2004 à Ernage

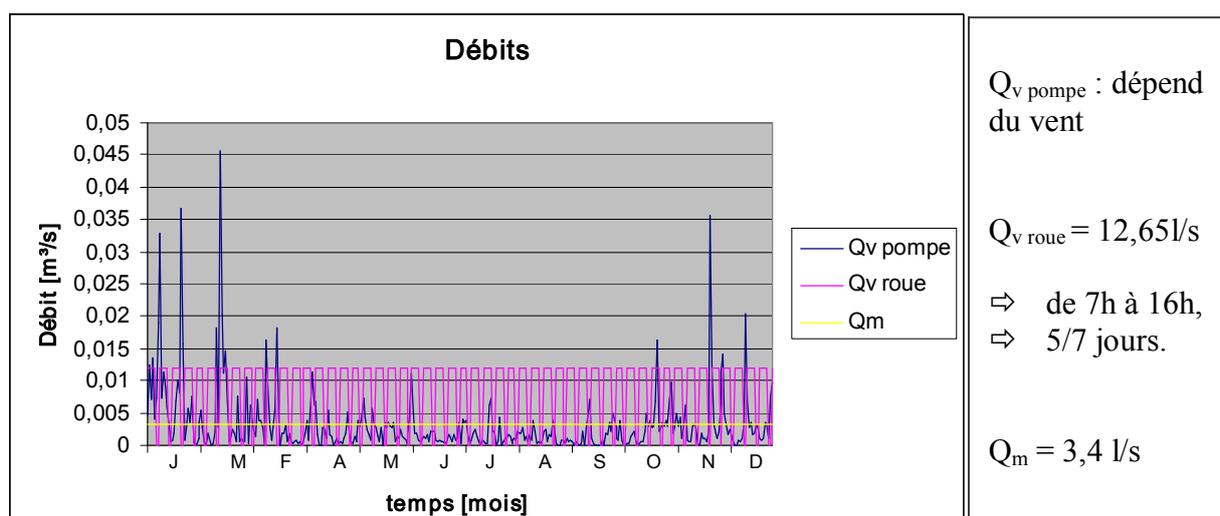


Puissances transmissibles par la pompe au cours de l'année 2005 à Ernage

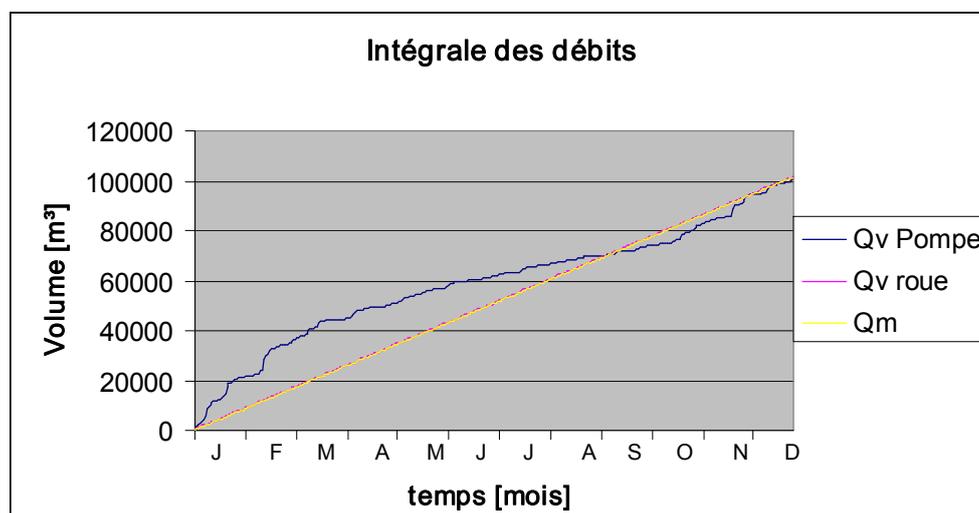
### III.V. Calcul du volume du bassin supérieur dans le cas d'un assouvissement partiel des besoins électriques (1 éolienne)

La problématique du dimensionnement du bassin supérieur réside dans le fait que sa capacité doit être telle qu'il ne soit jamais ni complètement vide, ni complètement plein. Une des méthodes pour calculer la capacité est celle dite des débits cumulés :

Soit, en fonction du temps, sur la figure ci-après, la courbe des débits qui entrent  $Q_{v\text{ pompe}}$  et celle des débits qui sortent  $Q_{v\text{ roue}}$ . Si le bassin a bien joué son rôle, toute l'eau arrivée sera sortie au bout du temps fixé pour la régularisation (dans notre cas : 1 année). C'est dire que le débit moyen  $Q_m$  pendant ce temps  $T$  est le même pour les deux courbes, mais on ne peut rien tirer directement de la connaissance des surfaces au-dessus et au-dessous de l'horizontale de ce débit moyen.

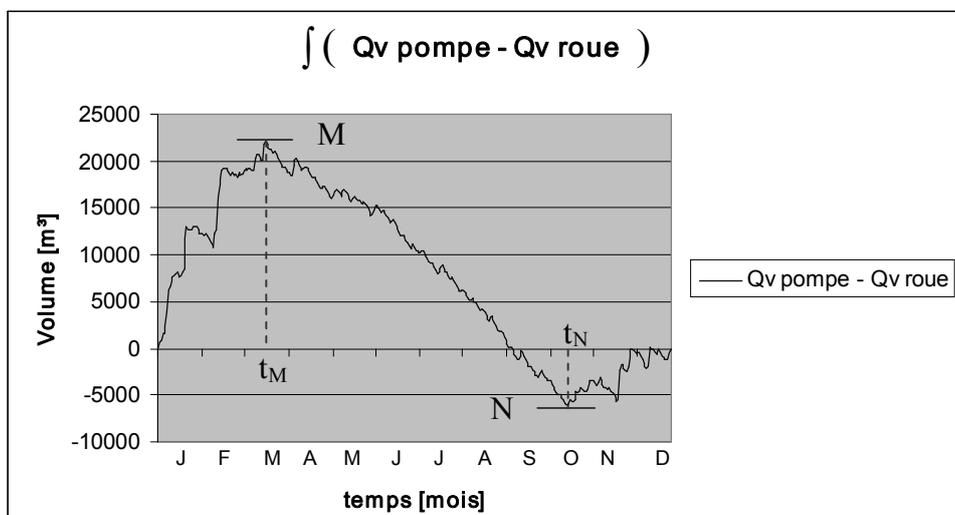
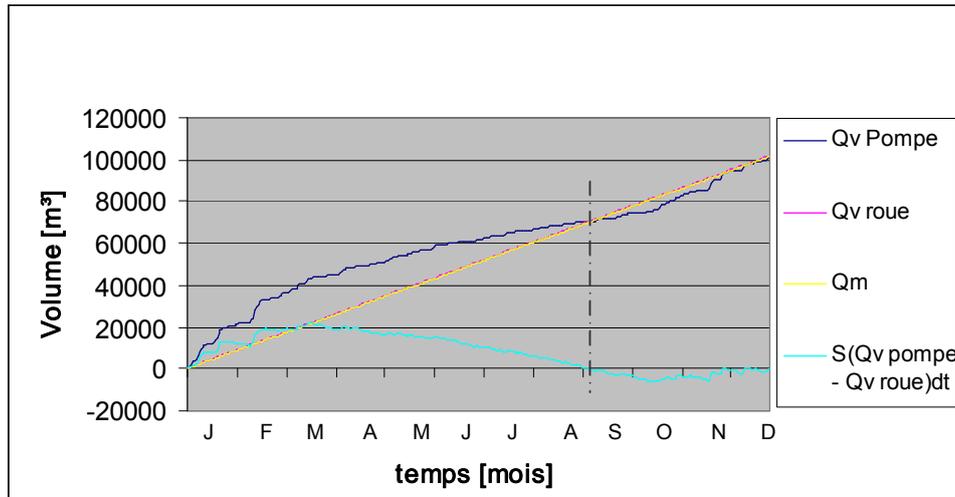


Mais, traçons, à la figure d'après, les courbes intégrales des débits  $Q_{v\text{ pompe}}$ ,  $Q_{v\text{ roue}}$  et  $Q_m$ . Cette dernière est une droite, et suivant l'hypothèse faite de la même valeur de  $Q_m$  pour les courbes  $Q_{v\text{ pompe}}$  et  $Q_{v\text{ roue}}$  ; si les 3 courbes intégrales commencent à l'origine, elles ont la même ordonnée finale au temps  $T$  (après un an).



Construisons la courbe pour ces différences d'ordonnées des deux intégrales de  $Q_v$  pompe et  $Q_v$  roue .

$$\int Q_v \text{ pompe} - \int Q_v \text{ roue} = \int (Q_v \text{ pompe} - Q_v \text{ roue}) dt$$



Les coordonnées de la courbe obtenue donnent le volume fourni au réservoir quand elles sont positives, ou pris quand elles sont négatives. Menons les tangentes horizontale extrêmes à cette courbe, tangentes aux points M et N ; on voit que du temps  $t_M$  au temps  $t_N$ , le réservoir qui était rempli de  $V_M$  se vide d'abord de cette grandeur puis encore de  $V_N$  ; il faut donc que sa capacité totale  $V$  soit :

$$V_{\text{tot}} = |V_M| + |V_N|$$

Or :  $M = 21137,2 \text{ m}^3$                        $t_M = 77 \text{ jours}$   
 $N = -6114,9 \text{ m}^3$                           $t_N = 291 \text{ jours}$

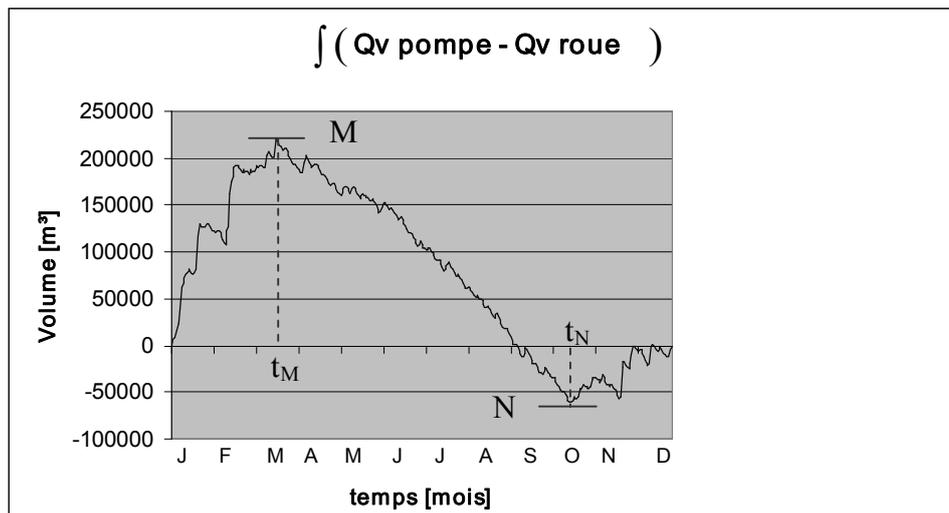
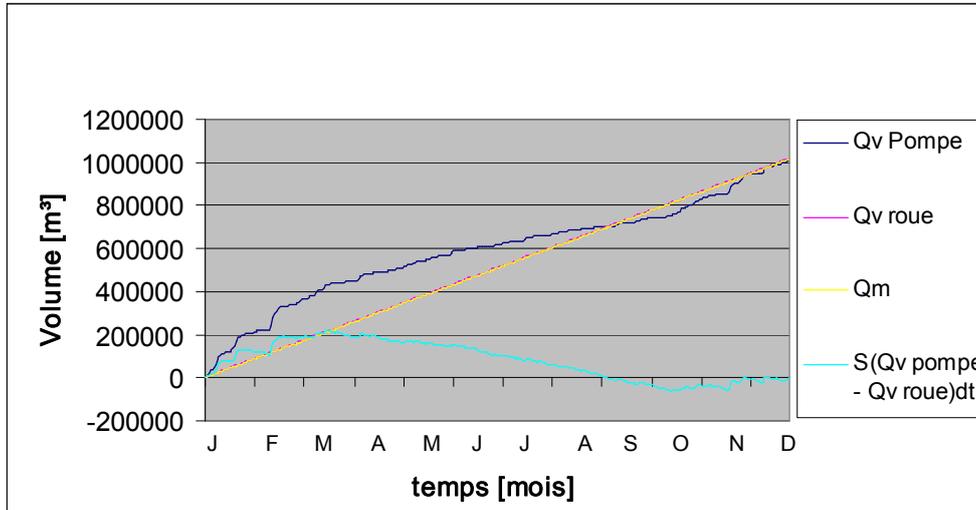
$V_{\text{tot}} = 27\,252,1 \text{ m}^3$

↙ Profondeur = 5 m

↘ Surface = 5450 m<sup>2</sup>

### III.VI. Calcul du volume du bassin supérieur dans le cas d'un assouvissement partiel des besoins électriques (10 éoliennes)

Dans ce cas, le débit qui entre  $Q_{v\text{ pompe}}$  de même que le débit qui sort  $Q_{v\text{ roue}}$  seraient tous deux multipliés par 10. Avec la même logique que précédemment, nous obtenons les graphiques suivants :



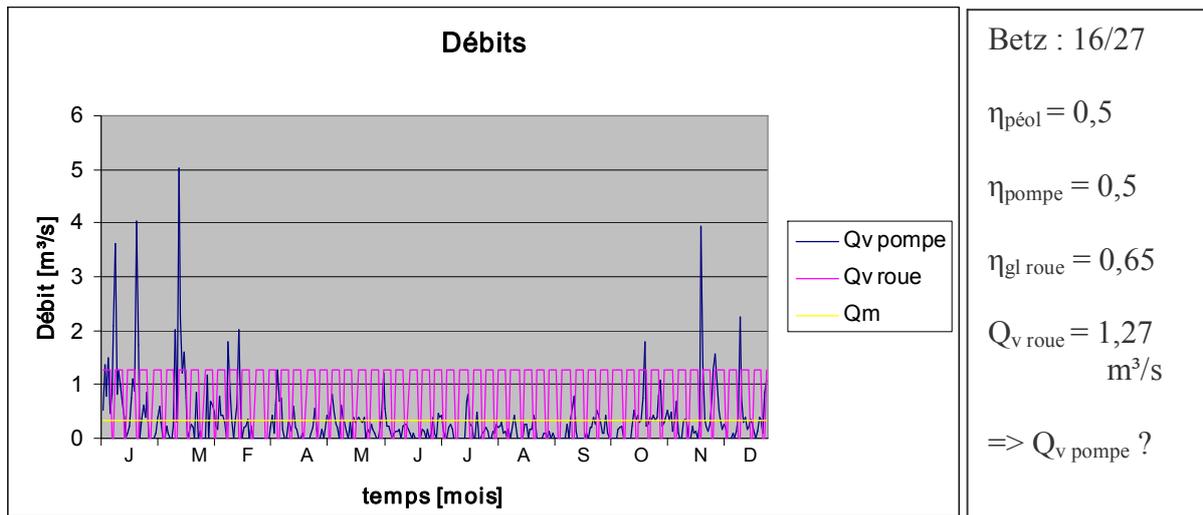
Et :  $M = 211\,372\text{ m}^3$        $t_M = 77\text{ jours}$   
 $N = -61\,149\text{ m}^3$        $t_N = 291\text{ jours}$

$$\boxed{V_{\text{tot}} = 272\,521\text{ m}^3} \begin{cases} \rightarrow \text{Profondeur} = 5\text{ m} \\ \rightarrow \text{Surface} = 54\,504\text{ m}^2 \end{cases}$$

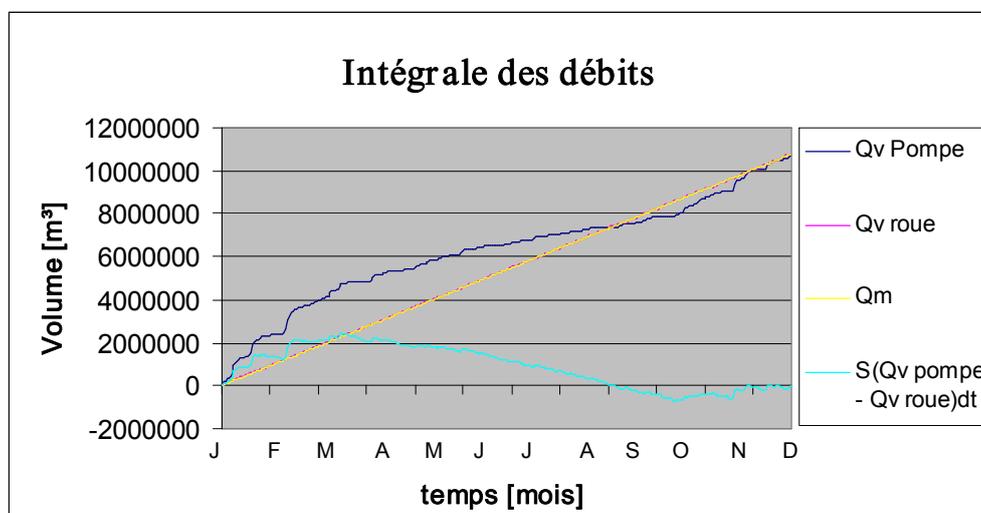
Soit le même volume que trouvé précédemment, mais multiplié par 10. Une manière de le réduire serait de modifier le débit passant dans la roue à augets suivant les mois de l'année.

### III.VII. Calcul du volume du bassin supérieur dans le cas d'un assouvissement complet des besoins électriques

En reprenant les valeurs de rendements et les equations vus dans le chapitre « Assouvissement partiel des besoins électriques », j'obtiens après calculs le diagramme suivant, représentant en mauve le débit nécessaire à la roue à augets (ou plutôt la micro-turbine), c'est-à-dire  $1,7 \text{ m}^3/\text{s}$  et ce 9 heures par jour et 5/7 jours, et en bleu le débit devant être remonté en fonction des vitesses de vents, pour pouvoir produire le débit descendant nécessaire :



Effectué sur base des mesures de vent d'Ernage pour l'année 2005, il a pour base l'intégrale des débits :

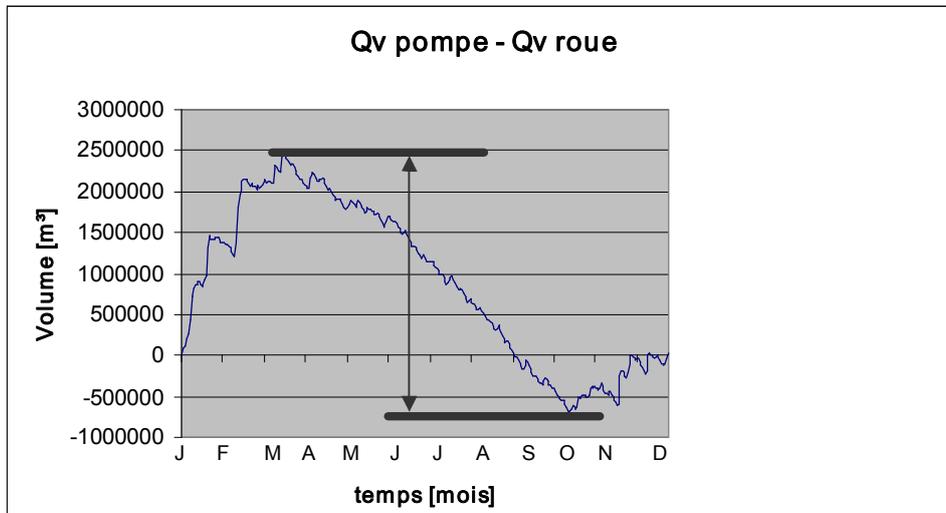


Il a en effet fallu que les extrémités des droites  $Q_{\text{v roue}}$  et  $Q_{\text{v pompe}}$  se confondent. De cette manière, un débit moyen de  $0,341183 \text{ m}^3/\text{s}$  doit être remonté par les éoliennes de pompage à

---

30 mètres de hauteur. Comme une éolienne avec sa pompe sait remonter en moyenne 0,62 l/s sur l'année 2005, il faudrait 550 éoliennes de pompage.

Pour ce qui est du volume, nous le déterminons à partir du graphique suivant :



Le bassin se remplirait progressivement pour atteindre 2461609 m<sup>3</sup> et se viderait ensuite pour atteindre -694493 avant de se remplir à nouveau et atteindre un volume de 0 m<sup>3</sup> à la fin de l'année. Le bassin doit donc avoir un volume de 2461609 + 694493 = 3156102 m<sup>3</sup>. Généralisons pour toutes les autres années : 3 300 000 m<sup>3</sup>.

**ANNEXES IV**

**Catalogues d'éoliennes**

#### IV.I. Tableau de prix d'éoliennes de pompage avec leur pompe associée et autres éléments

	LES EOLIENNES	€	TTC €
PARACEX3/4M	Raccord express mâle 3/4 pouce	3,11	3,72
PATE3/4	Té galvanisé 3/4 pce	2,64	3,16
PAVANSPH1/0	Vanne sphérique 1 pouce	11,69	13,98
PAVANSPH1/2	Vanne sphérique 1/2 pouce	5,92	7,09
PAVANSPH3/4	Vanne sphérique 3/4 pouce	9,11	10,90
PEN021	Contrôleur de niveau électronique 24 Volts	119,82	143,30
POAM1A	Eolienne de pompage Ø=1.75m, h=6m, pompe 46mm.	1480,98	1771,25
POAM1B	Eolienne de pompage Ø=1.75m, h=6m, pompe 51mm.	1509,79	1805,71
POAM2A	Eolienne de pompage Ø=2.0m, h=6m, pompe 46mm.	1587,78	1898,99
POAM2B	Eolienne de pompage Ø=2.0m, h=6m, pompe 51mm.	1669,61	1996,85
POAM3A	Eolienne de pompage Ø=2.25m, h=6m, pompe 46mm.	1679,60	2008,80
POAM3B	Eolienne de pompage Ø=2.25m, h=6m, pompe 51mm.	1769,11	2115,86
POAM3C	Eolienne de pompage Ø=2.25m, h=6m, pompe 70mm.	2118,71	2533,97
POAM4A	Eolienne de pompage Ø=2.25m, h=7.5m, pompe 46mm.	1754,32	2098,17
POAM4B	Eolienne de pompage Ø=2.25m, h=7.5m, pompe 51mm.	1844,98	2206,60
POAM4C	Eolienne de pompage Ø=2.25m, h=7.5m, pompe 70mm.	2155,25	2577,68
POAM5A	Eolienne de pompage Ø=2.5m, h=7.5m, pompe 46mm.	1901,07	2273,68
POAM5B	Eolienne de pompage Ø=2.5m, h=7.5m, pompe 51mm.	1991,16	2381,43
POAM5C	Eolienne de pompage Ø=2.5m, h=7.5m, pompe 70mm.	2355,93	2817,69
POAM6A	Eolienne de pompage Ø=2.5m, h=10m, pompe 46mm.	2030,54	2428,52
POAM6B	Eolienne de pompage Ø=2.5m, h=10m, pompe 51mm.	2120,82	2536,50
POAM6C	Eolienne de pompage Ø=2.5m, h=10m, pompe 70mm.	2485,21	2972,31
POAM7A	Eolienne de pompage Ø=3m, h=10m, pompe 90mm.	2838,07	3394,33
POAM7B	Eolienne de pompage Ø=3m, h=10m, pompe 51mm.	2678,64	3203,65
POAM7C	Eolienne de pompage Ø=3m, h=10m, pompe 70mm.	2738,18	3274,87
POAM8A	Eolienne de pompage Ø=4m, h=7.5m, pompe 100mm.	5917,39	7077,20
POAM8B	Eolienne de pompage Ø=4m, h=7.5m, pompe 120mm.	6276,98	7507,27
POAM8C	Eolienne de pompage Ø=4m, h=7.5m, pompe 140mm.	6616,97	7913,90
POAM9A	Eolienne de pompage Ø=4m h=10m pompe 100mm	6471,95	7740,45
POAM9B	Eolienne de pompage Ø=4m h=10m pompe 120mm	6831,72	8170,74
POAM9C	Eolienne de pompage Ø=4m h=10m pompe 140mm	7171,71	8577,37
POAP03	Echelons pour pylône le mètre:	13,45	16,08
POAP04	Contrepoids d'équilibrage	10,56	12,64
POAP05	Galvanisation pour pylône seul le mètre:	49,56	59,27
POAP06	Galvanisation pour pylône avec échelons le mètre:	52,63	62,95
POAP07	Galvanisation échelons le mètre:	4,15	4,96
POAP20	Tubes et tringlerie 1" préparés le mètre:	21,90	26,19

POAP201	Tube et tringlerie préparée 1" 6.40 m	140,46	167,99
POAP202	Tube et tringlerie préparée 1" 3.20 m	70,83	84,72
POAP203	Tube et tringlerie aérienne préparée 1" pour machine 6m	85,24	101,95
POAP204	Tube et tringlerie aérienne préparée 1" pour machine 7.5m	92,44	110,56
POAP205	Tube et tringlerie aérienne préparée 1" pour machine 10m	102,05	122,05
POAP21	Adaptation partie aérienne et souterraine	23,05	27,57
POAP22	Tube aspiration 3/4"	13,21	15,80
POAP23	Tubes et tringlerie 1" INOX préparés le mètre:	52,82	63,18
POAP30	Dispositif d'arrêt depuis le sol (A la commande uniquement)	509,03	608,80
POAP31	Dispositif d'arrêt depuis le sol (Simplifié)	70,56	84,39
POAP35	Presse-étoupe de refoulement diamètre 12mm	240,11	287,17
POAP36	Presse-étoupe de refoulement diamètre 20mm (Pression >1 bar)	302,73	362,06
POPI26330	Piston complet Ø=51mm	46,82	56,00





### IV.III. Eoliennes de 10 kW

- Caractéristiques de l'éolienne Alizee 10 000 de Fortis

#### FORTIS - ALIZE 10000

**Commentaire :** Fortis est une société néerlandaise créée en 1997. Un des leaders européens dans la fourniture d'éoliennes de petite puissance.

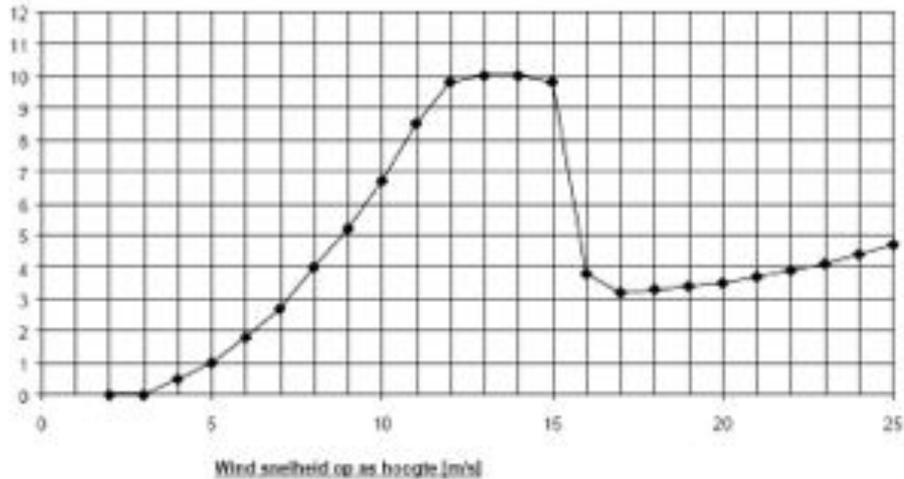
<b>Rotor</b>		<b>Fabricant</b>	Fortis – Pays-Bas www.fortiswindenergy.com
Type de rotor	Axe horizontal	<b>Fournisseur</b>	N.C.
Nombre de pales	3	<b>Caractéristiques de puissance</b>	
Vitesse de rotation	N.C.	<b>Vitesse vent</b>	<b>Puissance*</b>
Surface balayée	38,5 m <sup>2</sup>	[m/s]	[W]
Hauteur/Largeur	-	3	0
Vent de démarrage	3 m/s	4	500
Vent d'arrêt	N.C.	5	1000
Vent extrême	N.C.	6	1800
Type de régulation	N.C.	7	2700
Poids	N.C.	8	4000
<b>Pales</b>		9	5200
Longueur	3,3 m	10	6700
Matériau	Fibre de verre et Epoxy	11	8500
Poids	N.C.	12	9800
<b>Génératrice</b>		13	10000
Puissance nominale	10000 W	14	10000
Tension nominale	N.C.	15	9800
Type	Permanent magnet Sycom	16	3850
Vitesse de rotation	25 – 300 tr/min	17	3200
Poids	N.C.	18	3500
<b>Système d'orientation</b>		19	3400
Type	Passif par gouvernail arrière	20	3500
<b>Freinage</b>		21	3700
Conception	N.C.	22	3850
<b>Tour / Support</b>		23	4050
Hauteur	18 - 36 m	24	4100
Encombrement au sol	N.C.	25	4650
Poids (de la tête de la tour)	500 kg	* puissance non garantie	
Prix catalogue (de la tête de la	22200	<b>Photographie</b>	
<b>Autres</b>			
Nombre d'exemplaires installés	N.C.		
Prix catalogue	25700		
Durée de garantie	N.C.		
Certification	N.C.		

Mise à jour : 17/03/2004

# Fortis

**'FORTIS' ALIZE (10000)** (waarden kunnen wijzigen zonder kennisgeving) 12-2-2005

Generator vermogen (kW)



Type	Fortis Alize
Fabrikant	Fortis
Max. vermogen	10.000 Watt
Vermogen bij (10m/s)	6600 Watt
Start wind snelheid	3 m/sec
Max. toelaatbare wind snelheid	50 m/sec

Rotor	
Rotor type	Voor de mast draaiend met vaste blad instelling
Draai richting	Met de klok mee
Aantal bladen	3
Lengte van de bladen	3,3 m
Rotor Diameter	7,0 m
Rotor oppervlak	38,5 m <sup>2</sup>
Profiel	NACA 4418
Fabrikant	PFT
Blad materiaal	Glasvezel versterkt Epoxy
Toerental	variabel, 25 - 300 omw./min
Max toerental	300 omw./min
Rotor as hoek	10°
Wielhouder	vaste blad hoek instelling

Generator	
Overbrenging	Geen, direct aangedreven
Generator	Permanent Magnet Synchroon Machine
Nut aansluiting	3 x 230V dmv onvomer
Veiligheidssysteem	Eolpietsch beveiligingssysteem dmv hangende staart 90°verdraaien van de staart Kort sluiten van de generator Pansel dmv staart
Op de wind richten	
Mast	Diverse mast types mogelijk zoals getuide masten en buis masten 18 - 36 m
Gewicht wind turbine	280 kg

- Caractéristiques de l'éolienne AEP 10 000 de Auroville

### AURVILLE - AEP 10000

Commentaire : éolienne à axe horizontal. Uniquement installée en Inde. Voir site : [www.aurovillewindsystems.com](http://www.aurovillewindsystems.com).

Rotor		Fabricant	Auroville Energy Product, Inde
Type de rotor	Axe horizontal	Fournisseur	-
Nombre de pales	3	Caractéristiques de puissance	
Vitesse de rotation	N.C.	Vitesse vent [m/s]	Passance [W]
Surface balayée	38,48 m <sup>2</sup>	3	0
Hauteur/Largeur	-	4	360
Vent de démarrage	3,3 m/s	5	1000
Vent d'arrêt	-	6	2000
Vent extrême	55 m/s	7	2800
Type de régulation	Régulation passive	8	3600
Poids	480 kg	9	5180
Pales		10	6540
Longueur	3,5 m	11	8000
Matériau	N.C.	12	9640
Poids	N.C.	13	11450
Généralités		14	11820
Puissance nominale	10 kW	15	11450
Tension nominale	24/48 V	16	6000
Type	Permanent Magnet Alternator	17	4450
Vitesse de rotation	N.C.	18	2720
Poids	N.C.	19	2910
Système d'orientation		20	3090
Type	Passif	21	-
		22	-
		23	-
		24	-
		25	-
		* puissance non garantie.	
Freinage		Photographie	
Conception	Pas de freinage		
Tour / Support			
Hauteur	18 m, 21 m et 23 m		
Encombrement au sol	-	(Turbine, Tour, Batterie, Inverter)	
Poids	N.C.		
Autres			
Nombre d'exemplaires installés	Au moins 3		
Prix catalogue	28500		
Durée de garantie	2 ans		
Certification	N.C.		

Mise à jour : 17/03/2004

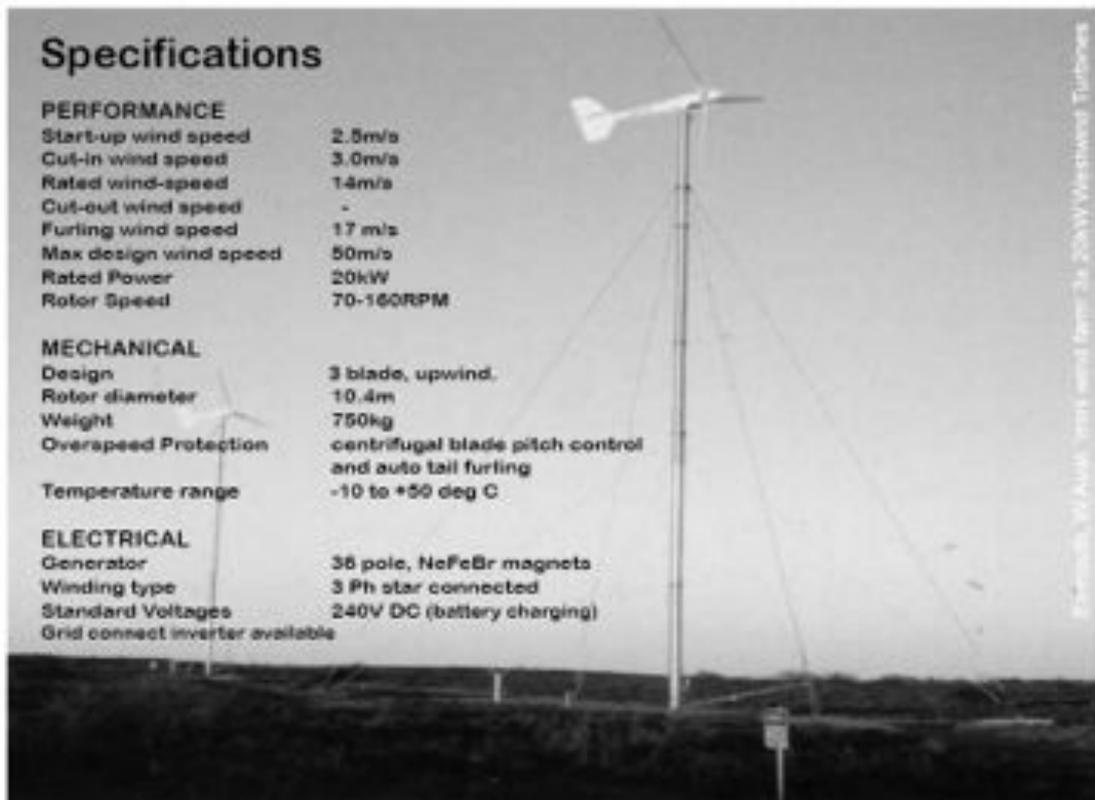
#### IV.IV. Eoliennes de 20kW

- Caractéristiques de l'éolienne WestWind 20 kW de Westwind Turbines

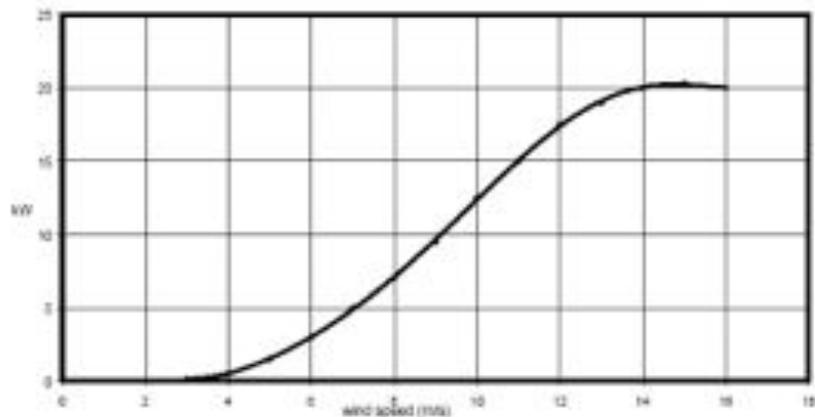
## Westwind 20kW

**Specifications**

<b>PERFORMANCE</b>	
Start-up wind speed	2.5m/s
Cut-in wind speed	3.0m/s
Rated wind-speed	14m/s
Cut-out wind speed	-
Furling wind speed	17 m/s
Max design wind speed	50m/s
Rated Power	20kW
Rotor Speed	70-160RPM
<b>MECHANICAL</b>	
Design	3 blade, upwind.
Rotor diameter	10.4m
Weight	750kg
Overspeed Protection	centrifugal blade pitch control and auto tail furling
Temperature range	-10 to +50 deg C
<b>ELECTRICAL</b>	
Generator	36 pole, NeFeBr magnets
Winding type	3 Ph star connected
Standard Voltages	240V DC (battery charging)
Grid connect inverter available	



Westwind 20kW  
(Eolienne de 20kW - Nov 2000 - Feb 2001)



Manufactured by :

**Westwind Turbines**  
29 Queen Rd, Kalbarcott  
Western Australia 6111  
ph +61 8 9099 5265, fax +61 8 9487 1325  
email: [vw@westwind.com.au](mailto:vw@westwind.com.au)  
[www.westwind.com.au](http://www.westwind.com.au)

- Caractéristiques de l'éolienne Jacobs 29-20 de Wind Turbine Industries Corp.

### WIND TURBINE IND.29-20 KW

Commentaire : éolienne reprenant la marque Jacobs.

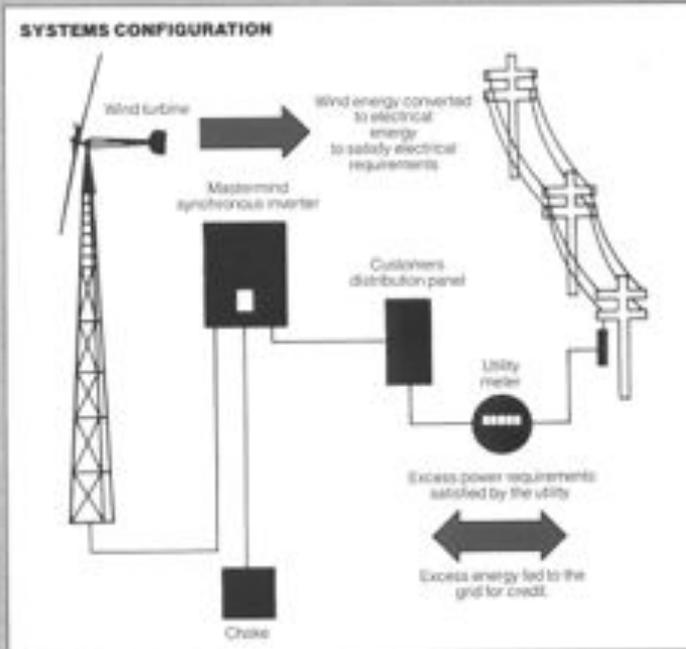
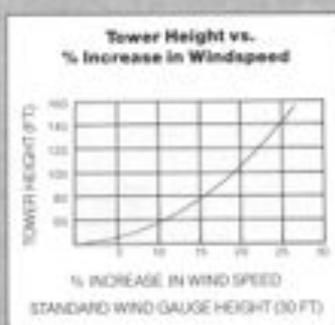
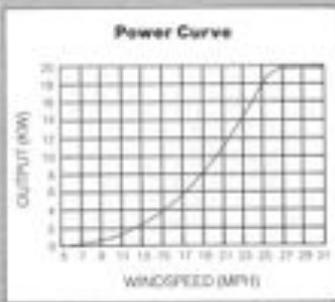
Rotor		Fabricant	Wind Turbines Industries,USA www.windturbine.net	
Type de rotor	Axe horizontal	<b>Fournisseur</b>		
Nombre de pales	3	<b>Caractéristiques de puissance</b>		
Vitesse de rotation	175 tr/min	Vitesse vent	Puissance*	
Surface balayée	67,64 m <sup>2</sup>	[m/s]	[W]	
Hauteur/Largeur	-	3	0	
Vent de démarrage	3,5 m/s	4	530	
Vent d'arrêt	N.C.	5	1120	
Vent extrême	53 m/s	6	2400	
Type de régulation	N.C.	7	4130	
Poids	2500 lbs	8	6530	
<b>Pales</b>		9	9200	
Longueur	4,64 m	10	12800	
Matériau	Fibre de verre	11	17200	
Poids	N.C.	12	19730	
<b>Génératrice</b>		13	19730	
Puissance nominale	20 kW	14	19730	
Tension nominale	40-180 VAC	15	-	
Type	Synchrone 3 Phases	16	-	
Vitesse de rotation	N.C.	17	-	
Poids	N.C.	18	-	
<b>Système d'orientation</b>		19	-	
Type	Passif par gouvernail arrière	20	-	
<b>Freinage</b>		21	-	
Conception	Disque manuel	22	-	
<b>Tour / Support</b>		23	-	
Hauteur	26, 32, 39 m	24	-	
Encombrement au sol	N.C.	25	-	
Poids	4300, 6200, 8200	* puissance non garantie		
Prix catalogue (génératrice + tour)	23502, 25002, 26839	<b>Photographie</b>		
<b>Autres</b>				
Nombre d'exemplaires installés	N.C.			
Prix catalogue	N.C.			
Durée de garantie	1 an			
Certification	N.C.	Mise à jour : 17/03/2004		

# JACOBS® Model 29-20 Wind Turbine

## PERFORMANCE SPECIFICATIONS

Output	Grid Inter tie 240 Volt A.C. 60 Hz
	1 phase power
Rating	20 KW
Type	Nominally horizontal upwind design
Cut in wind speed	8 mph
Peak output	25.5 mph
Rotor type	3 blade variable pitch
Rotor RPM at rated output power	175
Rotor diameter	29 feet
Transmission	Other hypoid gear drive
Ratio - Rotor to alternator	1:8
Alternator type	Brushless, 3 phase with outboard exciter
Rating	30 KVA, 3 phase, 0-180 volts
Protection	
Yaw control	Dual fail safe
Overspeed	Blade actuated governor
High wind storm	Other rotor axis
Tower	
Type	Free standing, 3 leg design
Construction	Angle iron tubular leg construction
Height available	Nominal 80-120 ft
Brake type	Multi-disc type

Wind Turbine Industries Corp. continually improves its products and therefore reserves the right to change the design, materials and/or specifications without notice.



**WIND TURBINE INDUSTRIES CORP.**  
 16801 Industrial Circle S.E. • 612/447-6649  
 Prior Lake, Minnesota 55372

Form 29-20-1124  
 Printed in U.S.A.

#### IV.V. Eolienne de 30 kW

- Caractéristiques de l'éolienne FL30 de Fuhrlander

##### FUHLÄNDER - FL30

Commentaire : éolienne fiable commercialisée depuis 15 ans.

Rotor		Fabricant	Fuhrlander - Allemagne
Type de rotor	Axe horizontal	Fournisseur	www.fuhrlander.de
Nombre de pales	3		aucun
Vitesse de rotation	47/71 tr/min	Caractéristiques de puissance	
Surface balayée	133 m <sup>2</sup>	Vitesse vent	Puissance*
Hauteur/Largeur	-	[m/s]	[W]
Vent de démarrage	2,5 m/s	3	420
Vent d'arrêt	N.C.	4	1630
Vent extrême	55 m/s	5	3590
Type de régulation	stall	6	6990
Poids	640 kg	7	11920
Pales		8	16940
Longueur	6,5 m	9	21950
Matériau	N.C.	10	26140
Poids	N.C.	11	28000
Génératrice		12	30000
Puissance nominale	30 kW	13	30000
Tension nominale	400 V (50/60 Hz)	14	31150
Type	asynchrone à commutation de	15	31150
Vitesse de rotation	1.000 / 1.500	16	33040
Poids (nacelle)	1200 kg	17	35100
Système d'orientation		18	37200
Type	moto-réducteur	19	39230
		20	35830
		21	35090
		22	34460
		23	35090
		24	35090
		25	35510
		* puissance non garantie	
Freinage		Photographie	
Conception	Frein à disque		
Tour / Support			
Hauteur	18/27 m (mât en		
Encombrement au sol	N.C.		
Poids	2100/3000 kg		
Prix catalogue	-		
Autres			
Nombre d'exemplaires installés	8		
Prix catalogue	76 000 (turbine+mât)		
Durée de garantie	N.C.		
Certification	N.C.		

Mise à jour : 17/03/2004

## IV.VI. Eoliennes de 60 kW

- Caractéristiques de l'éolienne AOC 15/50 de Atlantic Orient Corp.

Pour réseau 50 Hz

<b>Rotor</b>		<b>Fabricant</b>	Atlantic Orient Corp. www.aocwind.net
Type de rotor	Axe horizontal	<b>Fournisseur</b>	-
Nombre de pales	3	<b>Caractéristiques de puissance</b>	
Vitesse de rotation	65 tr/min	<b>Vitesse vent</b>	<b>Puissance*</b>
Surface balayée	177 m <sup>2</sup>	[m/s]	[W]
Hauteur/Largeur	-	3	0
Vent de démarrage	4,6 m/s	4	0
Vent d'arrêt	N.C.	5	1300
Vent extrême	59,5 m/s	6	10450
Type de régulation	Stall	7	18630
Poids	-	8	27270
		9	35910
		10	40910
		11	45380
		12	49230
		13	51920
		14	53490
		15	55000
		16	54230
		17	53080
		18	52310
		19	51540
		20	50770
		21	50150
		22	49800
		23	-
		24	-
		25	-
		* puissance non garantie	
<b>Pales</b>		<b>Photographie</b>	
Longueur	7,2 m		
Matériau	Epoxy /Fibre de Verre		
Poids	150 kg		
<b>Génératrice</b>			
Puissance nominale	60 kw		
Tension nominale	400V		
Type	3 phases, 4 pôles asynchrone		
Vitesse de rotation	1800 tr/min à 60Hz		
Poids (rotor + génératrice)	2420 kg		
<b>Système d'orientation</b>			
Type	passif		
<b>Freinage</b>			
Conception	Frein aérodynamique		
<b>Tour / Support</b>			
Hauteur	24 m		
Encombrement au sol	-		
Poids	3210 kg		
Prix catalogue	-		
<b>Autres</b>			
Nombre d'exemplaires installés	Plus de 8		
Prix catalogue	70110 dollars (turbine et tour)		
Durée de garantie	N.C.		
Certification	IEC 61400		
Maintenance : Semi annuelle			

Mise à jour : 17/03/2004

## Pour réseau 60 Hz

### SYSTEM

Type	Grid Connected
Configuration	Horizontal Axis
Rotor Diameter	15 m (49.2 ft)
Centerline Hub Height	25 m (82 ft)

### PERFORMANCE PARAMETERS

Rated Electrical Power	50 kW @ 11.3 m/s (25.3 mph)
Wind Speed	@hub height 25 m (82 ft)
cutin	4.6 m/s (10.2 mph)
shutdown (high wind)	22.4 m/s (50 mph)
peak (survival)	59.5 m/s (133 mph)
Calculated Annual Output	
@ 100 % availability	5.4 m/s (12 mph) 87,000 kWh 6.7 m/s (15 mph) 153,000 kWh 8.0 m/s (18 mph) 215,000 kWh

### ROTOR

Type of Hub	Fixed Pitch
Rotor Diameter	15 m (49.2 ft)
Swept Area	177 m <sup>2</sup> (1902 ft <sup>2</sup> )
Number of Blades	3
Rotor Solidity	0.077
Rotor Speed @ rated wind speed	65 rpm
Location Relative to Tower	Downwind
Cone Angle	6°
Tilt Angle	0°
Rotor Tip Speed	51 m/s (114 mph) @ 60 Hz
Design Tip Speed	6.1

### BLADE

Length	7.2 m (23.7 ft)
Material	Epoxy glass fibre
Airfoil (type)	NREL, Thick Series, modified
Twist	7° outer blade
Root Chord	457 mm (18") @ 4% 279 mm (11in)
Max Chord	749 mm (29.5 in) @ 39% 2925 mm (115 in)
Tip Chord	405 mm (16 in) @ 100 % 7500 mm (295 in)
Chord Taper Ratio	± 2:1
Overspeed Device	Electromagnetic tip brake
Hub Attachment	Embedded female bolt receptors
Blade Weight	150 kg (338 lbs) approximate

### GENERATOR

Type	3 phase/4 pole asynchronous
Rated Temperature	-25°C
Frequency (Hz)	60 Hz
Voltage (V)	480, 3 phase @ 60 Hz
kW @ Rated Wind Speed	50 kW
kW @ Peak/Continuous	66 kW
Speed RPM (nominal)	1800 @ 60 Hz
Winding Configuration	Ungrounded WYE
Insulation	Class F
Enclosure	Totally Enclosed Air Over (TEAO)
Frame Size	365 TC
Mounting	Direct mount to transmission
Options	Arctic low temp. shafting (-40°C)

### TRANSMISSION

Type	Planetary
Housing	Ductile iron-integrated casing
Ratio (rotor to gen. speed)	1 to 38.25 (60 Hz)
Rating, output horse power	86
Lubrication	Synthetic gear oil/non toxic
Heater (option)	Arctic version, electric

### YAW SYSTEM

Normal	Free, rotates 360 degrees
Optional	Yaw damping required when known conditions frequently exceed 50° yaw rate per second.

### DRIVE TRAIN TOWER INTERFACE

Structural	Yaw bearing mounted on tower top casting
Electrical	Twist Cable

### TOWER

Type	Galvanized 3 legged, bolted lattice, self supporting
Tower Height	24.4 m (80 ft)
Options	30.5 m (100 ft), Tilt down 24.4 m (80 ft)

### FOUNDATION

Type	Concrete or special
Anchor Bolts	Certified ASTM-A-193-Grade B7

### CONTROL SYSTEM

Type	PLC based
Control Inputs	Wind speed, generator shaft speed
Control Outputs	Line interconnection, brake deployment
Communications	Serial link to central computer for energy monitor and maintenance dispatch (optional)
Enclosures	NEMA 1, NEMA 4 (optional)
Soft Start	Optional

### ROTOR SPEED CONTROL

Production	Blade stall increases with increased wind velocity
Normal Startup	Aerodynamic, electrical boost if necessary
Shutdown	Control system simultaneously applies dynamic brake and deploys tip brakes. Parking brake brings rotor to standstill.
Back-up Overspeed Control	Centrifugally activated tip brakes deploy

### BRAKE SYSTEM CONTROL

Fail-safe brakes automatically deploy when grid failure occurs.

### APPROXIMATE SYSTEM DESIGN WEIGHTS

Tower	3,210 kgs (7,060 lbs)
Rotor & Drivetrain	2,420 kgs (5,340 lbs)
Weight on Foundation	5,630 kgs (12,420 lbs)

**DESIGN LIFE:** 30 Years

**DESIGN STANDARDS:** Applicable Standards, AWEA, EIA and IEC

### DOCUMENTATION:

Installation Guide and Operation & Maintenance Manual

**SCHEDULED MAINTENANCE:** Semi-annual or after severe events.

**NOTE 1:** Atlantic Orient Canada Inc. is constantly working to improve their products, therefore, product specifications are subject to change without notice.

**NOTE 2:** Power curves show typical power available at the controller based on a combination of measured and calculated data. Annual energy is calculated using power curves and a Rayleigh wind speed distribution. Energy production may be greater or lesser dependent upon actual wind resources and site conditions, and will vary with wind turbine maintenance, altitude, temperature, topography and the proximity to other structures including wind turbines.

**NOTE 3:** For design options to accommodate severe climates or unusual circumstances please contact Atlantic Orient Canada

**NOTE 4:** For integration into high penetration wind -diesel systems and village electrification schemes contact Atlantic Orient Canada Inc. for technical support.

**ANNEXES V**

**Illustrations**

---

V.I. Photos de la sablière

*La laveuse 1*



*La laveuse 2*



---

*Butte de sable*



*Vue générale de la sablière*



---

V.II. Eoliennes de pompage

*Eolienne multipale 1*



*Eolienne multipale 2 et réservoir*



*Eolienne multipale 3*



*Eolienne multipale 4*



---

### V.III. Roues à augets

Roue à augets 1 : diam 2,2 larg 1,5 budget 15000€ (hors annexes, vannes et chenal)



Roue à augets 2 : roue par dessus Hastière diam 4,5m larg 1,8 budget 22000€



Roue à augets 3 : roue par dessus de 15kW à Aadorf(Suisse), diam 4,1m larg 1,5m



---

*Roue à augets 4 : 2 roues par dessus de 9kW à Steinhaus(Pologne), diam 3,5m larg 1,5m*



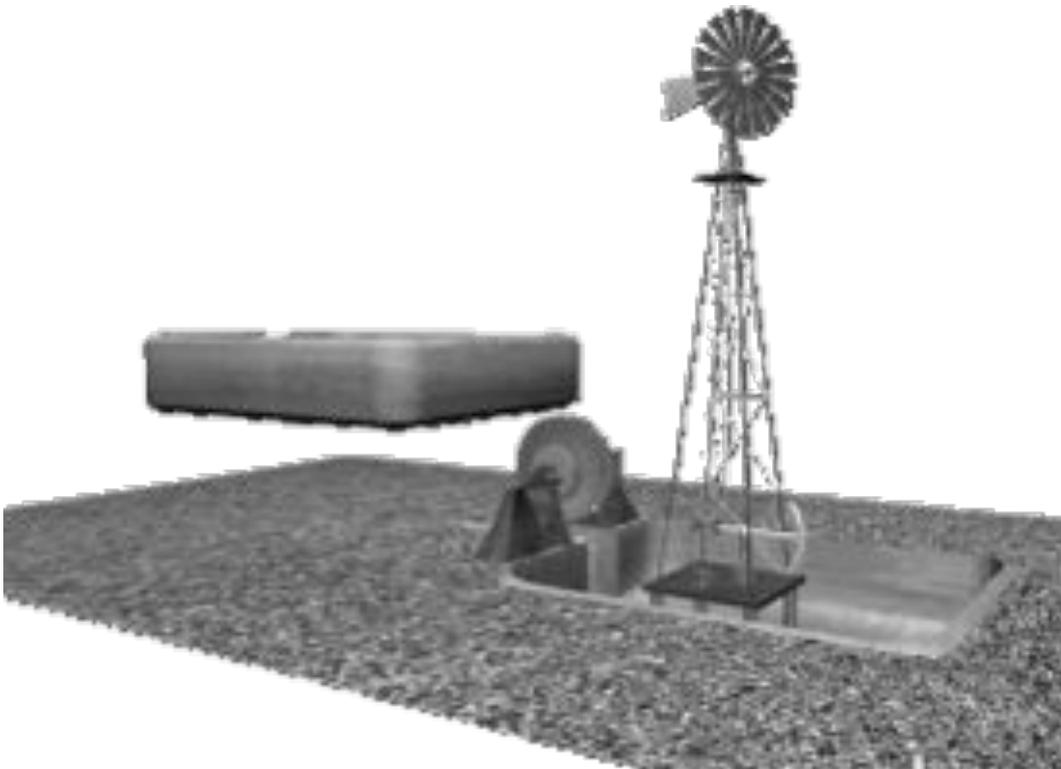
*Roue à augets 5 : roue par dessus de 18kW à Schladt (Allemagne), diam 6m larg 1,5m*



---

V.IV.      Divers

*Vue 3D de l'installation (non terminé) effectuée avec 3ds Max*



*Parc éolien de Middelgrunden au large de Copenhague (Danemark) Photo © Yann Arthus-Bertrand*

