MASTER GT2E IUP Génie des Systèmes Industriels Université Blaise Pascal

Acquisition de systèmes micro-éoliens

Rapport de projet de Master 1 GT2E

Présenté par : **Dorothée MICHEAU et Claire SINTUREL**

Responsable : **Sébastien MENECIER**

Année 2009/2010

Université Blaise Pascal

Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont permis de réaliser ce projet. Plus particulièrement, nous tenons à remercier Jean-Pierre GOUZEL pour son implication. Notre reconnaissance va aux différents professeurs du LAEPT (Laboratoire Arc Electrique et Plasmas Thermiques) et à M. DUMAS qui nous ont conseillé et aidé sur des problèmes techniques et scientifiques.

Table des matières

1.1 Classification 2

1.2 Les différents types d'éoliennes 2

1.2.1 Les éoliennes à axe horizontal 2

1.2.2 Les éoliennes à axe vertical 2

1.3 Eléments constitutifs 4

1.4 L'énergie éolienne : du vent à l'énergie électrique 6

1.4.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique 7

1.2.2 Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique 8

1.3 Les grandeurs caractéristiques des éoliennes 9

1.3.1 Le ratio de vitesse 9

1.3.2 Le coefficient de puissance 9

2.1 Organisation du projet 11

2.2 Etude de faisabilité 12

2.1.1 Réglementation 12

2.1.2 Contraintes environnementales 12

2.1.3 Contraintes budgétaires 14

2.2 Présentation des systèmes éoliens 15

2.2.1 Choix des éoliennes 15

2.2.2 Eolienne horizontale 15

2.2.3 Eolienne verticale 18

2.2.4 Aspect normatif 18

3.1 Mesure du vent et exploitation 20

3.2 Comparaison des technologies 21

3.3 Alimentation en mode autonome 23

3.3.1 Alimentation d'appareils 23

3.3.2 Amélioration de la production : couplage éolien/solaire 24

Conclusion

Bibliographie

Table des figures

Annexes

Introduction

Le « paquet énergie-climat » adopté par les pays membres de l'Union Européenne le 12 décembre 2008 a conduit à des objectifs nationaux ambitieux en terme d'énergies renouvelables. D'ici 2020, la part des énergies renouvelables devra être portée à 20% de la consommation totale des Européens. Aujourd'hui ce taux ne représente que 8,5% ce qui implique un investissement considérable dans des technologies propres.

Dans ce contexte actuel de lutte contre le réchauffement climatique, la France s'est fixée à l'échéance 2020, d'atteindre un objectif de 10% de la consommation nationale d'électricité basée sur l'éolien.

Le marché grandissant de l'énergie éolienne a ainsi donné naissance à des éoliennes de petites tailles et de faibles puissances destinées à être implantées en milieu urbain. Diverses applications s'ouvrent alors aux petites éoliennes telles que le raccordement au réseau, l'alimentation autonome ou encore le couplage à un générateur photovoltaïque afin d'assurer une plus large couverture des besoins domestiques par les énergies renouvelables.

L'objectif de ce projet a été d'acquérir deux micro-éoliennes dans un souci de proposer aux étudiants de Master et de Licence, des activités concrètes proches des préoccupations actuelles en terme d'énergie renouvelable.

La première partie du rapport présente un état de l'art des technologies de micro-éoliennes existantes suivi de leur principe de fonctionnement. Puis, la seconde partie détaille le cadre de l'étude qui a été suivi dans la mise en place des systèmes éoliens ainsi que des précisions sur la chronologie du projet. Enfin la dernière partie, réfère aux fondamentaux scientifiques et aux perspectives d'étude qui pourront être abordées lors de travaux pratiques.

1 Etat de l'art et fonctionnement

Dans un premier temps, nous effectuerons un état de l'art des différentes technologies de micro-éoliennes. Puis, nous présenterons le rôle des éléments qui entrent dans la composition de l'éolienne pour ensuite en expliciter plus précisément le principe de fonctionnement.

1.1 Classification

Le tableau suivant présente la classification des éoliennes donnée par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie).

Taille de l'éolienne	Puissance Nominale	diamètre rotor	hauteur
Micro	**< 500 W**	**0,5 - 2 m**	**5 -15 m**
	< 1 kW	2 - 3 m	10 -20 m
Petite	< 5 kW	3 - 6 m	15 - 30 m
	< 10 kW	6 - 8 m	20 - 40 m
	< 30 kW	8 - 13 m	30 - 50 m
Moyenne	30 - 250 kW	13 - 25 m	> 35 m
Grande	> 250 kW	< 25 m	> 50 m

Tableau 1 - Classification des éoliennes

Compte tenu du budget et de l'objectif de ce projet qui vise à terme l'alimentation d'appareils électriques, notre étude s'orientera vers les éoliennes de taille micro et de faible puissance (1ère ligne du tableau).

1.2 Les différents types d'éoliennes

La différence fondamentale entre les différents types d'éoliennes intervient sur le fonctionnement des pales. Ainsi, les éoliennes peuvent se classer en deux grandes catégories suivant l'orientation de leur axe de rotation, horizontal ou vertical :

1.2.1 Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal restent aujourd'hui la technologie la plus utilisée. Le principal inconvénient de ces éoliennes est qu'elles sont contraintes de s'orienter face au vent pour un meilleur rendement. Leur fonctionnement sera explicité dans la partie 1.3.

1.2.2 Les éoliennes à axe vertical

L'utilisation du potentiel éolien tend à s'étendre à l'environnement urbain. En effet, les éoliennes à axe vertical ont été conçues pour s'adapter aux contraintes engendrées par les turbulences de ce milieu. Grâce à leurs designs, elles peuvent fonctionner avec des vents très faibles provenant de toutes les directions et sont moins soumises à ces

perturbations que les éoliennes à axe horizontal. De plus, elles sont relativement silencieuses.

Les modèles les plus courants sont de type Savonius et Darrieus :
- éolienne verticale de type Savonius : elles sont constituées de deux demi cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre.

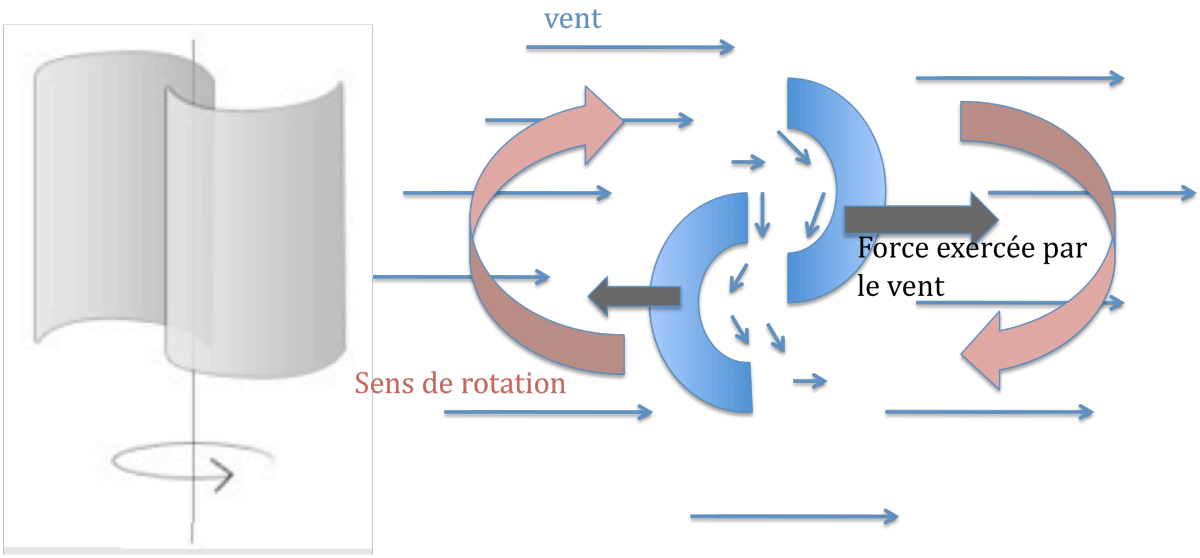


Figure 1 - Schéma de principe du rotor de Savonius

- éolienne verticale de type Darrieus : elles se présentent sous différentes déclinaisons comme l'illustre la figure suivante. En effet, le rotor peut être de forme cylindrique, hélicoïdal ou H.

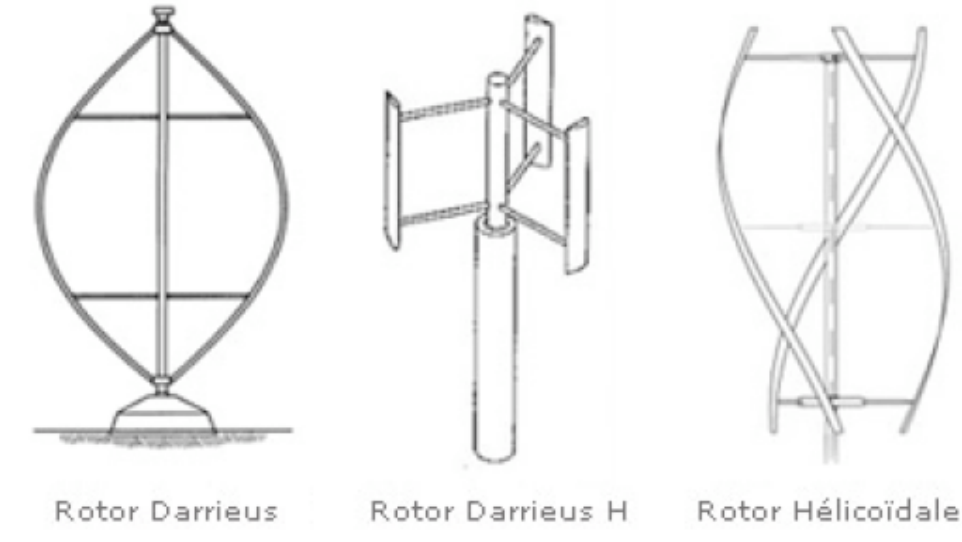


Figure 2 - Les différents types d'éolienne Darrieus

La figure suivante décrit la rotation des pales dans le cas d'une éolienne de type Darrieus.

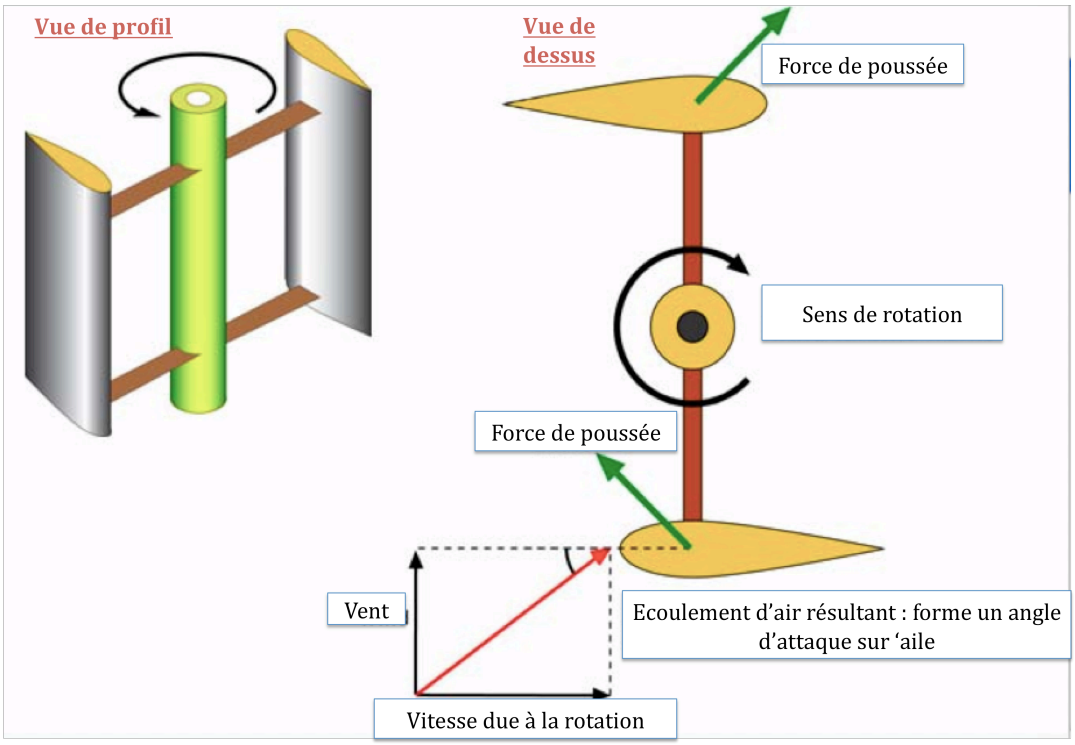


Figure 3 – Schéma de principe d'une éolienne Darrieus

1.3 Eléments constitutifs

L'éolienne prise à titre d'exemple pour décrire le principe de fonctionnement est de type horizontal. En effet, que l'éolienne soit à axe vertical ou horizontal, le principe de base consiste à générer un couple moteur pour entrainer une génératrice, nous pouvons donc considérer le fonctionnement d'un seul type d'éolienne.

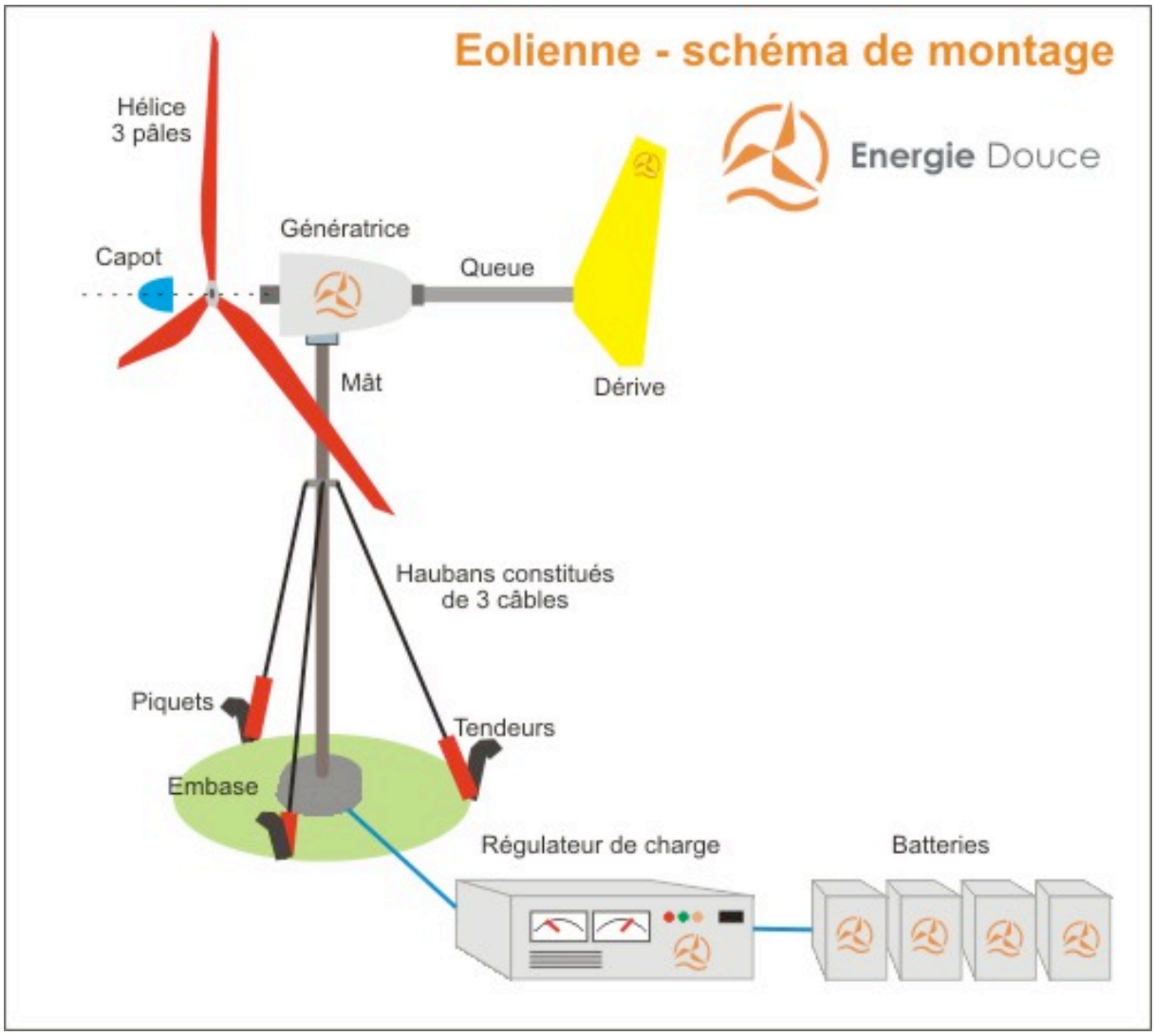


Figure 4 – Composants d'une l'éolienne

Les composants illustrés sur la figure précédente sont décrits plus précisément ci-après en partant des éléments de capture du vent jusqu'aux dispositifs de transformation et de stockage de l'énergie :

Les pales :
Ce sont les éléments les plus représentatifs de l'éolienne. Elles ont pour fonction de capter le vent. Les pâles constituent le point d'entrée de l'énergie apportée par ce dernier.

Le rotor :
On appelle rotor l'ensemble des pales et le capot de l'éolienne. Il est entraîné par l'énergie du vent et est en général couplé à un générateur électrique. Le rotor est relié à la nacelle par le moyeu.

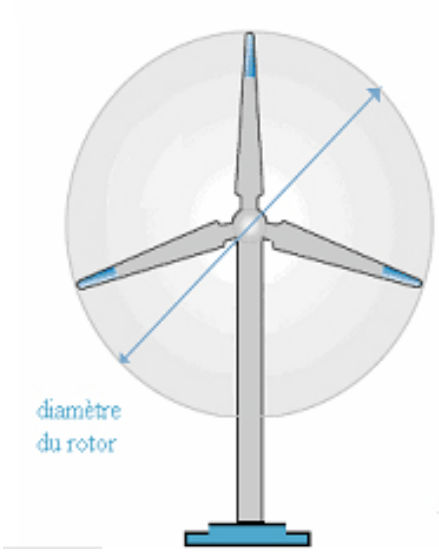


Figure 5 - illustration d'un rotor

La génératrice :
Montée au sommet du mât, elle permet la transformation de l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique.

Le multiplicateur :
La vitesse de rotation engendrée par le vent est souvent bien trop faible pour pouvoir entraîner directement la génératrice. On utilise donc un multiplicateur afin d'augmenter cette vitesse (passant d'environ 30 tours/minute à 1000 tours/minutes par exemple).

Le système de régulation électrique :
Il ralentit la vitesse du rotor du générateur en cas de vents trop violents afin d'éviter la détérioration de l'aérogénérateur.

Le mât :
Il permet de placer l'éolienne à une hauteur optimale et capter ainsi les vents dominants.

La queue et sa dérive :
Dans le cas des éoliennes domestiques, la queue et sa dérive permettent de diriger l'éolienne face au vent à l'image d'une girouette.

Le régulateur de charge :
Il permet d'éviter les surtensions aux bornes des batteries qui endommageraient ces dernières. Comme son nom l'indique, il régule la tension de charge en se basant sur une valeur de réglage de la régulation.

Les batteries :
Ce sont des accumulateurs électriques.

1.4 L'énergie éolienne : du vent à l'énergie électrique

La production de l'énergie éolienne commence par la capture du vent grâce aux pâles puis passe par le système fonctionnel de l'éolienne, c'est-à-dire l'ensemble des éléments qui entrent en jeu dans la transformation de l'énergie du vent en énergie électrique.

1.4.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

Afin de comprendre le rôle clef de la pale, nous allons présenter dans un premier temps, l'action du vent sur une pale. Puis, ces notions seront complétées par l'étude du rotor.

a) Comment le vent pousse-t-il les pales ?

Le fonctionnement d'une pale se base sur les mêmes principes que ceux de l'aéronautique. Le rotor fonctionne comme les ailes d'un avion : c'est la force aérodynamique du vent qui fait tourner la pale comme illustré sur la figure suivante.

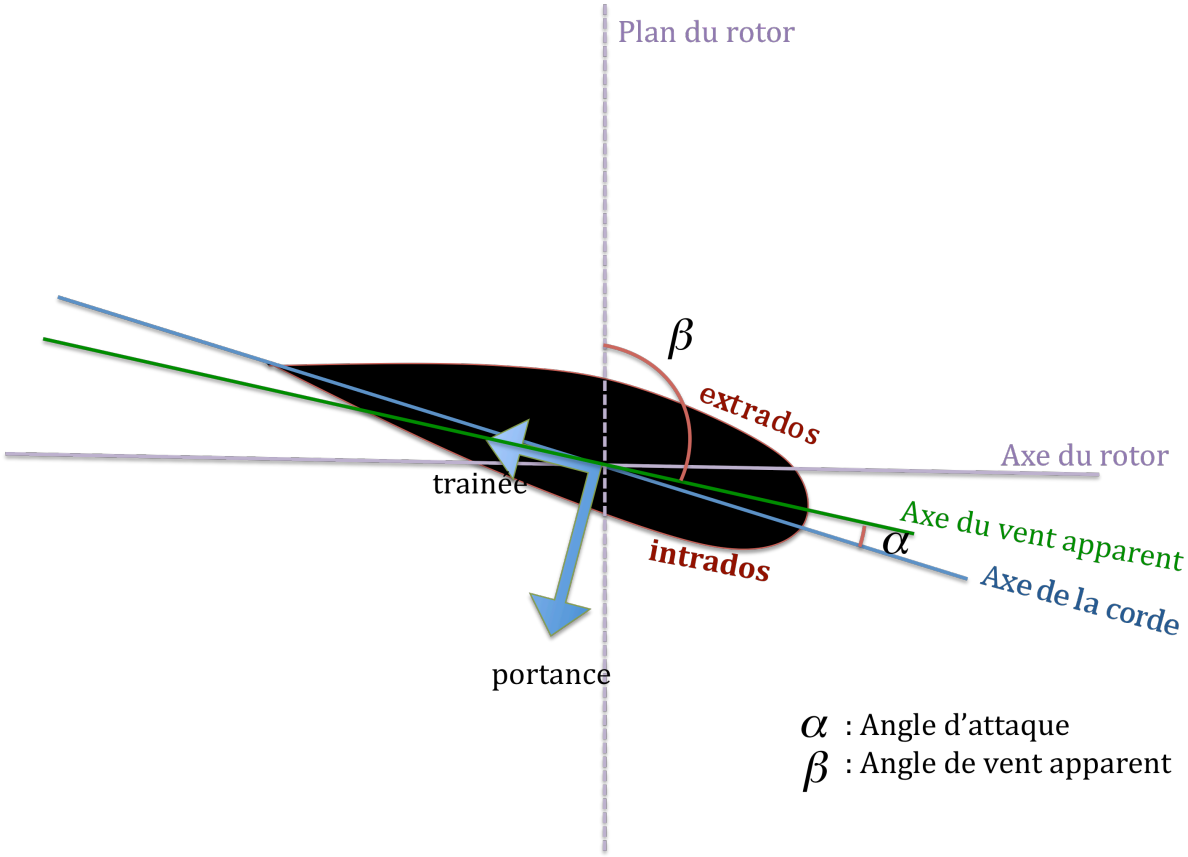


Figure 6 - Action du vent sur une pale

La force aérodynamique du vent se décompose en portance (perpendiculaire à l'axe du vent) et trainée (parallèle à l'axe du vent).

b) Le rotor :

La transformation de l'énergie cinétique débute par le rotor. En effet, l'énergie du vent captée par une éolienne est directement proportionnelle à la surface balayée par ses pales. Ainsi, le principe du rotor est de transformer la poussée irrégulière du vent sur les pales en une rotation la plus régulière possible.

L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur dl, de section S, de masse volumique ρ s'écrit : $dE = \frac{1}{2}\rho S dl v^2$. En posant, $dl = v \times dt$, on en déduit l'expression de la puissance fournie par le vent : $P_0 = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2}\rho S v^3$.

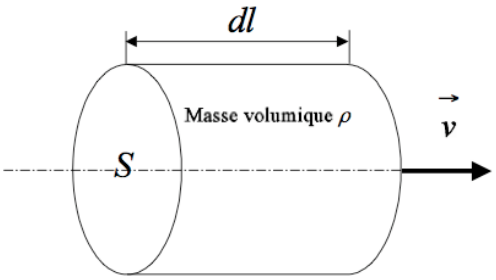


Figure 7 - Colonne d'air

Dans le cas d'un solide en rotation autour d'un axe central, la puissance transmise à l'axe se définit par : $P_{mécanique} = T \times \Omega$ où T est la résultante des forces du rotor sur l'axe central, (encore appelé couple mécanique), et Ω la vitesse de rotation. Cette puissance est par la suite transmise à une machine tournante à l'origine de la production d'électricité.

1.2.2 Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique

Nous allons nous pencher sur le cas des alternateurs à aimants permanent car c'est ce système qui est en général mis en œuvre dans les micro-éoliennes. Il convient cependant de savoir que pour les éoliennes dépassant les quelques kW, la machine tournante est souvent asynchrone ou synchrone, triphasée (comme le réseau électrique).

La figure suivante présente de façon simplifiée une machine à aimants permanents.

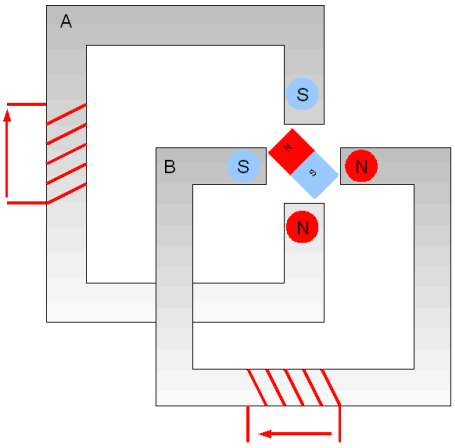


Figure 8 - Machine à aimants permanents

Ce type d'alternateur est composé de deux ensembles :

- une partie mobile : le rotor, constitué d'aimants permanents. C'est l'inducteur.
- une partie fixe : le stator, comprenant plusieurs électroaimants (les enroulements). C'est l'induit.

Dans le cas de nos éoliennes, la rotation engendrée par le vent permet de mettre en mouvement le rotor de la machine tournante. Du mouvement relatif de l'inducteur par rapport à l'induit, il résulte un champ électromagnétique variable qui vient exciter les enroulements triphasés. Ces derniers vont alors être le siège de courants électriques induits par la variation du flux du champ magnétique.

Le courant créé étant alternatif, un redresseur est utilisé afin d'obtenir du courant continu, exploitable par le régulateur de charge.

1.3 Les grandeurs caractéristiques des éoliennes

1.3.1 Le ratio de vitesse

On définit le ratio de vitesse λ comme étant le rapport entre la vitesse tangentielle en bout de pale $\Omega_t R_t$ sur la vitesse instantanée du vent v. Soit : $\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{v}$ où Ω_t est la vitesse de rotation de la turbine en rad/s et R_t est le rayon du rotor.

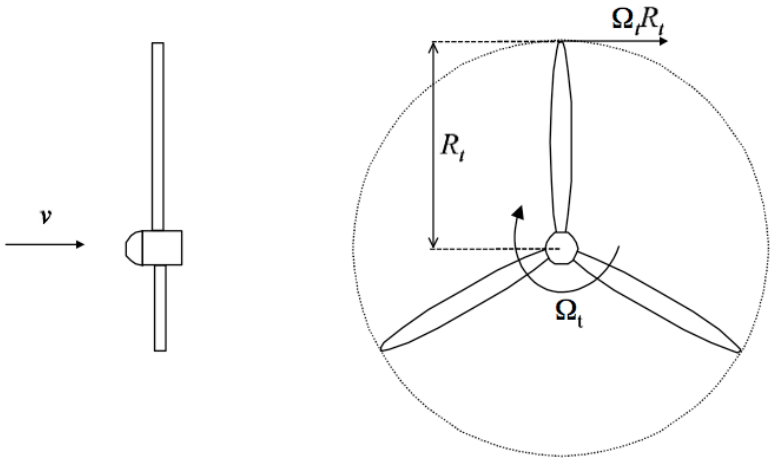


Figure 9 - Vitesse du vent et vitesse tangentielle en bout de pale

1.3.2 Le coefficient de puissance

Le coefficient de puissance est défini comme suit : $C_p = \frac{P_t}{\frac{1}{2}\rho S_t v^3} = \frac{P_t}{P_0}$

Avec :
- P_t, puissance de la turbine éolienne
- P_0, puissance fournie par le vent
- $S_t = \pi R_t$, surface balayée par le rotor
- ρ, masse volumique de l'air

Le coefficient C_p est variable, il est fonction de la vitesse du vent v et de la vitesse de rotation de la turbine. Il est souvent représenté en fonction du ratio de vitesse.

La valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelée limite de Betz est de $\frac{16}{27} = 0{,}59$.

Cela signifie qu'il est physiquement impossible de récupérer plus de 59% de l'énergie cinétique du vent avec une simple éolienne. En outre, il est important de noter que la limite de Betz ne tient pas compte des pertes d'énergie occasionnées lors de la conversion de l'énergie mécanique du vent en énergie électrique.

En réalité, cette limite n'est pas atteinte. Ainsi le rendement, d'une éolienne a pour expression : $\eta = \frac{C_p(éolienne)}{C_{p\,max}}$, C_p(éolienne) étant la valeur du coefficient de puissance caractérisant l'éolienne considérée. En pratique, la valeur du coefficient de puissance approche la valeur de 0,48 avec une turbine tripale. Ce qui donne un rendement de 81% pour les turbines actuelles. De la loi de Betz, il est facile de comprendre qu'une mesure du vent semble indispensable afin d'optimiser les performances d'une éolienne.

2 Le contexte du projet

2.1 Organisation du projet

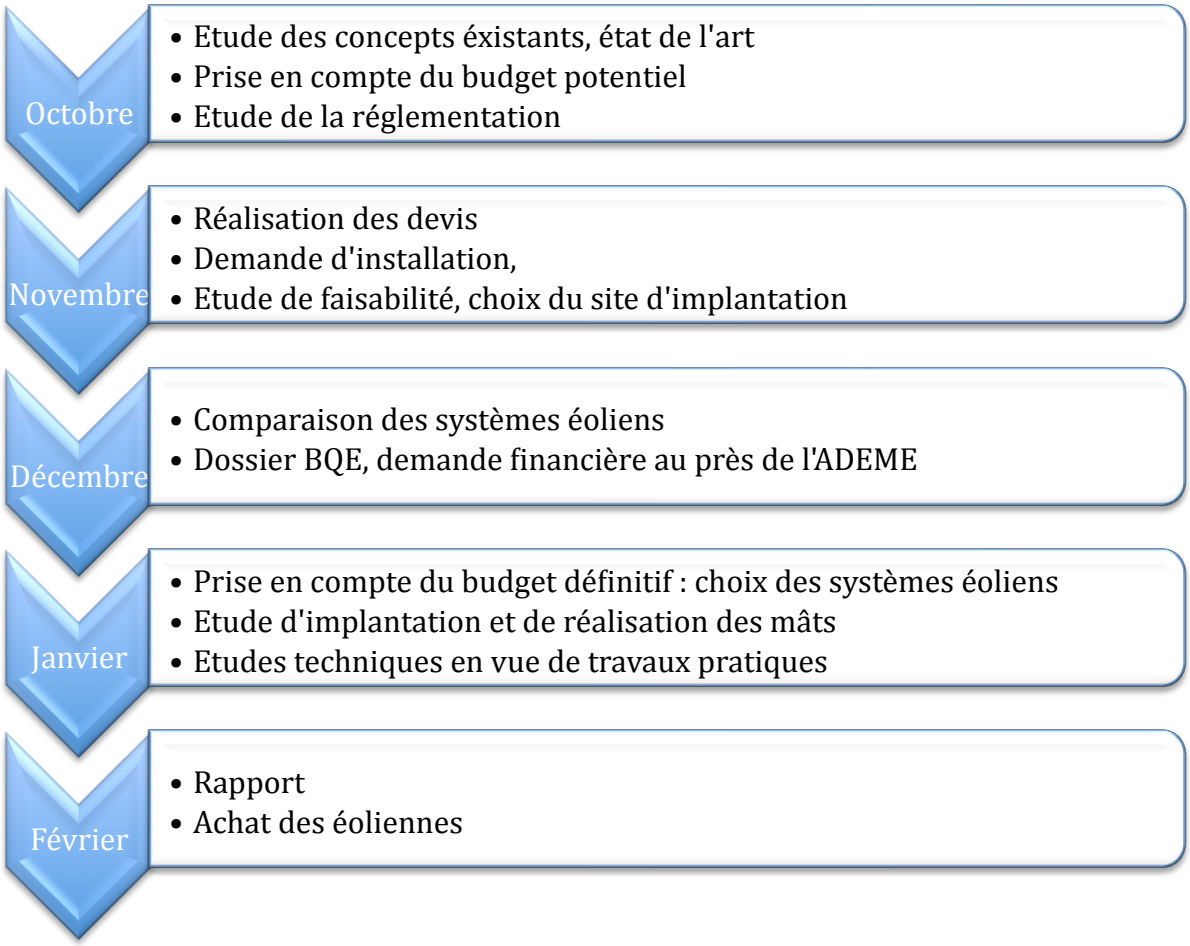


Figure 10 - Organisation du projet

Dans un premier temps, nous avons effectué une étude des articles et ouvrages traitant des micro-éoliennes. L'objectif était dans un premier temps de comprendre le principe de fonctionnement d'une éolienne et de connaître les paramètres caractéristiques permettant une comparaison des éoliennes entre-elles.

Ensuite, nous avons réalisé des devis afin d'évaluer un premier budget global de l'installation. La plupart des devis étant excessifs par rapport au budget alloué, cela nous a contraint de choisir des petites éoliennes de faibles puissances. D'autre part, afin de réduire les coûts liés à la fabrication du mât et la pose d'une dalle en béton, nous avons fait appel aux services techniques de l'université. Nous avons choisi des bloc de béton d'environ 70kg chacun, ce qui nous permet d'éviter d'avoir à couler une dalle et ainsi réduire les coûts.

Enfin la dernière partie du projet s'est orientée sur des aspects plus techniques à savoir des réflexions en vue d'études comparatives des systèmes éoliens. L'objectif visé étant à terme de proposer aux futurs étudiants des travaux pratiques.

Nous allons à présent décrire en détail les différentes étapes que nous avons suivies pour la réalisation de notre projet éolien.

2.2 Etude de faisabilité

2.1.1 Réglementation

- **Le bruit :**

Lors de son fonctionnement, l'éolienne génère des nuisances sonores. Ce type de bruit est soumis à la réglementation sur les bruits de voisinage. Enfin, pour palier ce type de problème il est indispensable d'informer préalablement le voisinage avant toute installation.

- **Urbanisme :**

Un permis de construire est obligatoire lorsque le mat de l'éolienne est supérieur à 12 mètres. Dans le cas contraire, une déclaration de travaux est nécessaire. La hauteur d'installation comprend le mât et la nacelle de l'éolienne, sans tenir compte de l'encombrement des pâles.

Dans le cadre de notre projet, aucun permis de construire n'a été nécessaire. Toutefois, il a été indispensable de rencontrer Mr BECERRO, responsable des bâtiments sur le campus des Cézeaux, afin d'obtenir l'autorisation de l'installation des éoliennes.

2.1.2 Contraintes environnementales

Sous le terme de contraintes environnementales, on regroupe les aspects concernant l'étude du vent ainsi que le site d'implantation des éoliennes.

a) *Lieu d'implantation*

Les deux éoliennes seront installées sur le toit situé au dessus de la salle de travaux pratiques. Pour des raisons de sécurité, il est préférable que les éoliennes ne soient pas directement installées au sol. D'autre part, en raison de la présence de bâtiments autour du site, il est plus judicieux de placer les systèmes éoliens en hauteur afin de capter des vents de meilleure qualité.

b) *La ressource éolienne*

Une étude de vent est préalablement indispensable dans le cadre d'un projet éolien. Pour être totalement rigoureux, il aurait fallu implanter un mat de mesures (voir partie 3.1 Mesure du vent et exploitation) à l'endroit exact du site d'installation. Mais, une telle opération nécessite un temps d'acquisition de plusieurs mois. Nous avons donc utilisé les résultats de mesure de la station météorologique des Cézeaux situé sur l'autre côté du bâtiment de Physique.

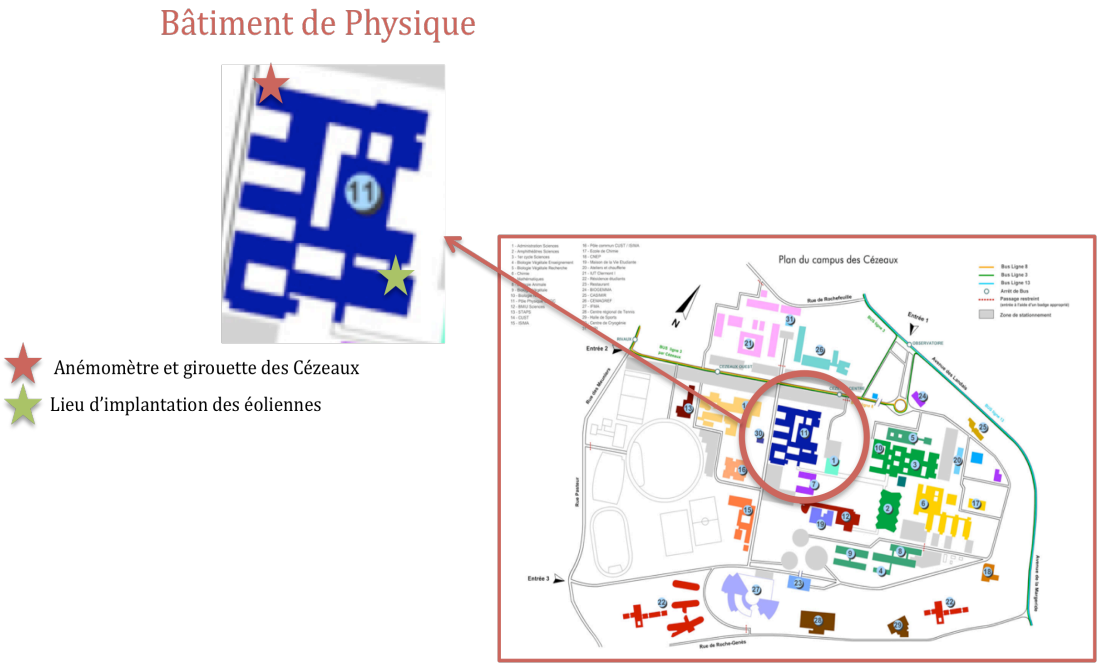


Figure 11 - Site d'implantation au campus des Cézeaux

En vue d'une évaluation des zones optimales d'implantation la représentation énergétique peut être réalisée par une rose des vents. La rose des vents consiste en une représentation graphique de la corrélation entre la vitesse du vent et sa direction. Il s'agit de diviser les directions du vent en secteurs dans lesquels la distribution des vents est répercutée selon leur vitesse.

Les relevés des mesures réalisés par la station des Cézeaux nous ont permis de réaliser une carte des vents dominants présents sur le campus (relevés présents sur le site internet de la station des Cezeaux). Le résultat présenté sur la figure suivante n'est pas une rose des vents comme nous l'avons défini, car pour cela il nous aurait fallu des données corrélées de la vitesse du vent avec la direction (c'est à dire avoir les mesures de vitesse et de direction au même instant). Or, les mesures sont des moyennes journalières non exploitables en l'état, nous n'avons donc pas pu représenté la vitesse.

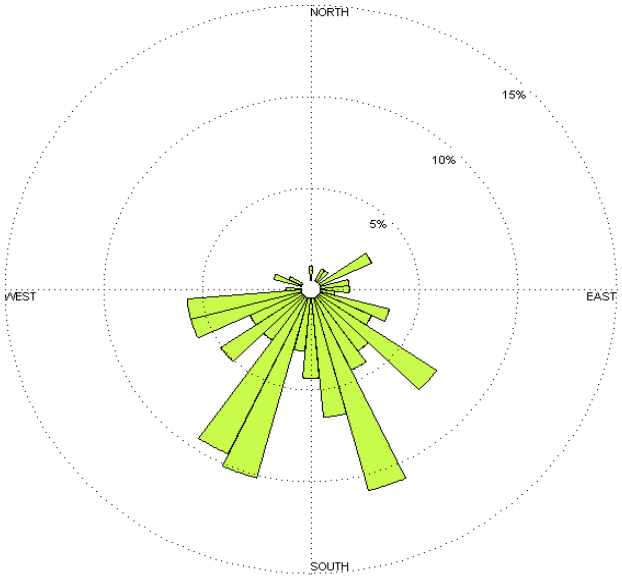


Figure 12 - Représentation de la direction du vent

Cette rose des vents a été réalisée à l'aide du logiciel Matlab. A la vue de cette représentation, on relève une prédominance d'un vent en provenance du sud/sud-ouest et parfois du nord/est. Afin de confirmer nos résultats nous avons rencontré M. POINTIN, chargé de recherche au LAMP (Laboratoire de Météorologie Physique). Les histogrammes, disponibles en annexe, montrent, un vent venant préférentiellement du nord/nord-est, du sud/sud-ouest, et parfois de l'ouest. Le vent vient plus rarement de l'est.

La figure ci-dessous présente la variation annuelle de la vitesse au cours de l'année 2009.

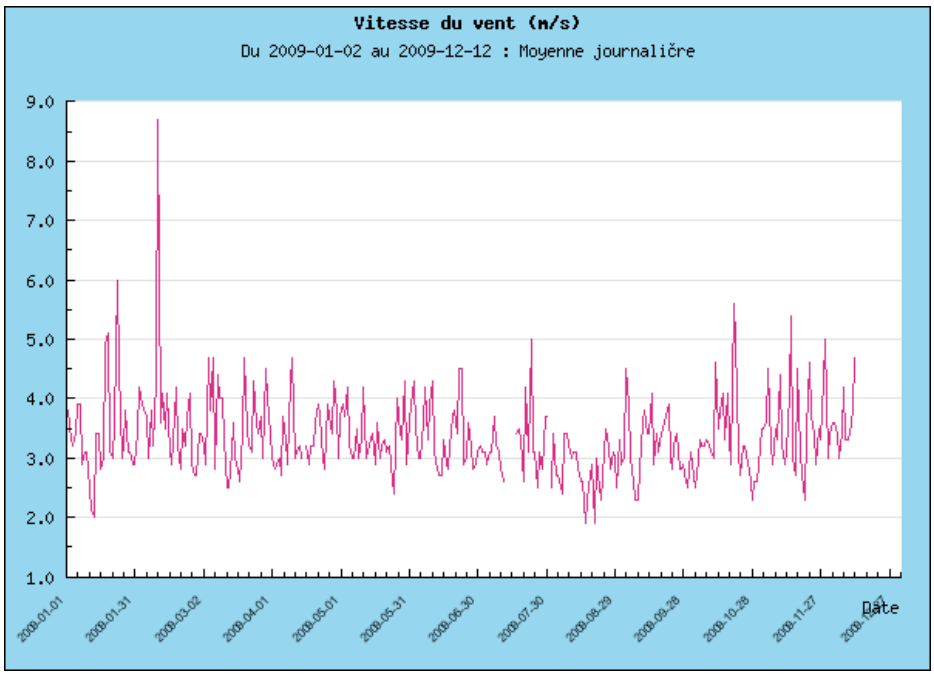


Figure 13 - Relevé de vitesse du vent (année 2009)

On constate que pendant 90% du temps de mesure, la vitesse se situe entre 3 et 4m/s. Les mesures de vitesse relevées sur l'année 2009 sont présentées en annexe.

Ce résultat a imposé une contrainte supplémentaire dans nos recherches de systèmes éoliens : les éoliennes doivent avoir une vitesse de démarrage inférieure à 3 m/s. Le problème ne s'est pas posé pour les éoliennes verticales qui démarrent à partir de vents très faibles comme nous l'avons dit précédemment (en moyenne la vitesse était inférieure à 2 m/s). En revanche, il a fallu être vigilantes pour les éoliennes horizontales qui ne respectaient pas toutes ce critère.

2.1.3 Contraintes budgétaires

Afin d'évaluer, le prix des éoliennes et des prestations annexes nous avons effectué plusieurs demandes de devis. Au départ, le budget alloué pour notre projet était d'environ 3000€.

Compte tenu des performances des éoliennes verticales en milieu urbain, nous nous sommes dans un premier temps orientées vers cette technologie d'éolienne à laquelle nous envisagions de raccorder des néons situés dans la salle de travaux pratique. Mais il s'est avéré par la suite que le budget pouvait atteindre 4500€ grâce à une aide financière BQE (Bonus Qualité Enseignement). Notre choix s'est donc finalement orienté vers deux éoliennes l'une à axe horizontal et une à axe vertical. En effet, l'acquisition de deux

micro-éoliennes permettrait une étude approfondie de deux systèmes issus de technologies très diverses tant dans leur conception que dans leur utilisation.

Deux demandes d'aide financière ont été réalisées au cours de notre projet. L'une au près de l'ADEME, dont aucune réponse n'a été encore donnée à ce jour, et la seconde pour un BQE.

2.2 Présentation des systèmes éoliens

2.2.1 Choix des éoliennes

Les devis effectués au près des fournisseurs dépassant de loin la contrainte budgétaire imposée pour les deux éoliennes, en particulier pour les éoliennes à axe verticale qui restent aujourd'hui très chères (prix minimum constaté : 4000€), nous avons opté pour deux éoliennes de la société SOLUNERGIE située dans le Cantal. La proximité de cette société par rapport au site d'installation des éoliennes est un avantage non négligeable pour différentes raisons. En effet, une rencontre préalable avec M. Gouzel responsable de la société a permis la confirmation de notre étude de préfaisabilité. De plus, en cas de panne ou de nécessité d'intégrer au système éolien des appareils complémentaires, des personnes de la société pourront être présentes rapidement. Pour une telle installation, nous avons préféré ne pas négliger la présence d'un service après-vente en cas de problème.

Certains devis réalisés sont présents en annexe.

2.2.2 Eolienne horizontale

L'éolienne horizontale choisie est une éolienne Air Breeze présentée sur la figure suivante.

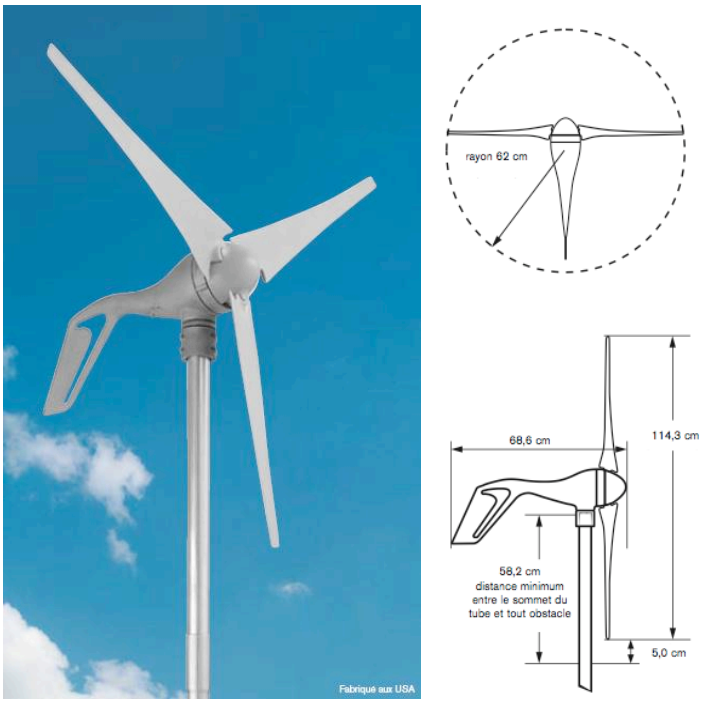


Figure 14 - Eolienne horizontale Air Breeze et dimensions des principaux éléments

Le tableau suivant présente les caractéristiques techniques importantes de l'éolienne Air Breeze.

puissance nominale	200 W
tension	12 V
nombre de pales	3
vitesse de démarrage	2,7 m/s
vitesse de vent maximum	49 m/s
puissance maximale	300 W
garantie constructeur	3 ans

Tableau 2 - Spécifications techniques de l'éolienne Air Breeze

Le choix de l'emplacement du site influe sur la production de courant qui en résulte. Il est donc important de placer l'éolienne dans un écoulement d'air aussi régulier que possible afin d'éviter les turbulences. Ce qui pourrait réduire considérablement l'efficacité de l'éolienne d'une part mais également accélérer l'usure des pièces tournantes. La figure suivante présente l'emplacement optimal nécessaire pour l'éolienne Air Breeze afin d'éviter les vents tourbillonnants.

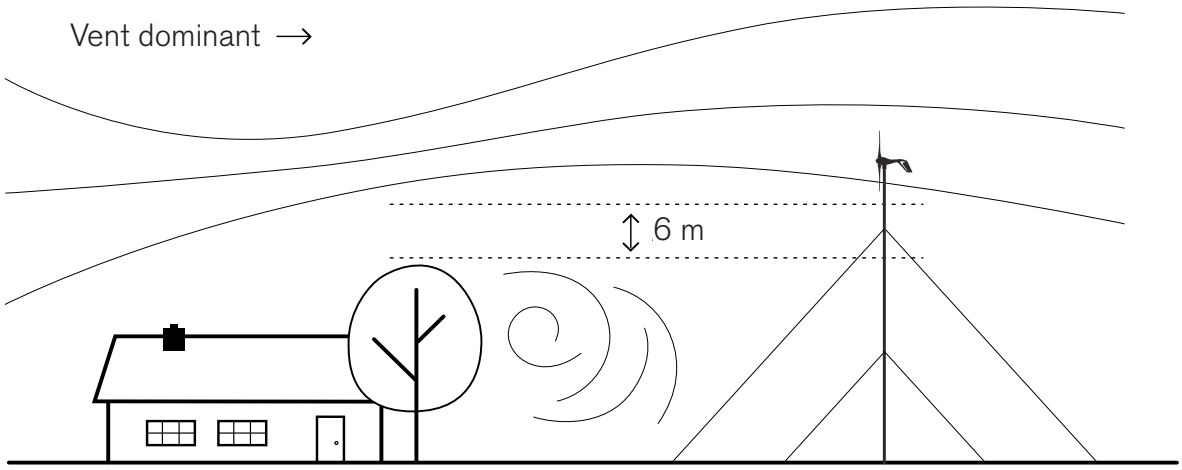


Figure 15 - Emplacement optimal de l'éolienne Air Breeze

Comme nous l'avons vu dans la partie précédente l'éolienne fonctionne en capturant l'énergie cinétique du vent. Ce dernier est alors convertit en mouvement rotatif qui engendre la rotation d'un alternateur à l'origine d'un courant électrique. L'éolienne étant directement reliée à un système de batteries, il est indispensable de réguler le courant injecté dans la batterie. Ainsi l'éolienne Air Breeze peut fonctionner selon différents modes décrits ci-après :

- **Chargement de la batterie :** Ce mode correspond au cas où la tension de la batterie est inférieure à la valeur de tension fixée par le régulateur. Dans ce cas, l'éolienne Air Breeze charge la batterie et les pales tournent en fonction de la vitesse du vent. Si le vent souffle les pales continueront de tourner jusqu'à ce que la tension de la batterie atteigne la valeur de réglage de la régulation : durant cette période l'éolienne produit du courant. Notons que la valeur de réglage de la tension de

régulation peut être réglée à l'aide d'un potentiomètre présent sur le flanc de l'éolienne.

- **Régulation :** Une fois la valeur fixée atteinte, l'éolienne Air Breeze entre alors en régulation. Elle cesse de produire de l'électricité et la vitesse de rotation des pales diminue considérablement. L'éolienne Air Breeze reste en régulation jusqu'à ce que la tension des batteries redescende légèrement en dessous de la valeur de réglage de la régulation –appelée tension de démarrage. Quand la tension de démarrage est atteinte les pales tournent à nouveau en fonction du vent.

- **Décrochage :** Ce mode est caractérisé par un ralentissement considérable de l'éolienne jusqu'à environ 500–700 tr/min. Pour une vitesse du vent de 16 m/s, l'éolienne Air Breeze entre en mode décrochage, et cela jusqu'à ce que la vitesse descende à 14,5 m/s. Si une vitesse de 22,5 m/s est détectée, l'éolienne s'arrête complètement pendant 5 minutes.

- **Freinage :** Il est recommandé d'utiliser un dispositif d'arrêt manuel de l'éolienne en complément des systèmes de sécurité déjà en place. Ainsi, l'éolienne Air Breeze peut être mise en mode freinage en connectant un interrupteur d'arrêt. Ce dernier déconnecte d'abord l'éolienne des batteries puis court-circuite les fils de sortie de l'éolienne provoquant l'arrêt de la rotation de l'éolienne.

- **Circuit ouvert/rotation libre :** L'éolienne Air Breeze est en rotation libre (circuit ouvert) si elle est déconnectée des batteries et si ses fils positif et négatif ne sont pas court-circuités. Dans ce cas, l'éolienne tourne en fonction du vent disponible ce qui peut engendrer des hautes tensions. Ainsi, le contrôleur interne essaye de protéger le circuit en ralentissant l'éolienne. Ceci élimine la haute tension, et l'éolienne redémarrera si la vitesse du vent le permet. Ce mode n'est pas recommandé car il consiste en un cycle de rotation à grande vitesse suivi par un freinage, qui cause une usure excessive.

Ces modes sont distinguables par une LED verte présente sur l'éolienne qui clignote plus ou moins vite selon le mode de fonctionnement.

2.2.3 Eolienne verticale

L'éolienne verticale pour laquelle nous avons opté est un modèle Darrieus hélicoïdal. Elle utilise la trainée du vent et est constituée de parties cylindriques en opposition.

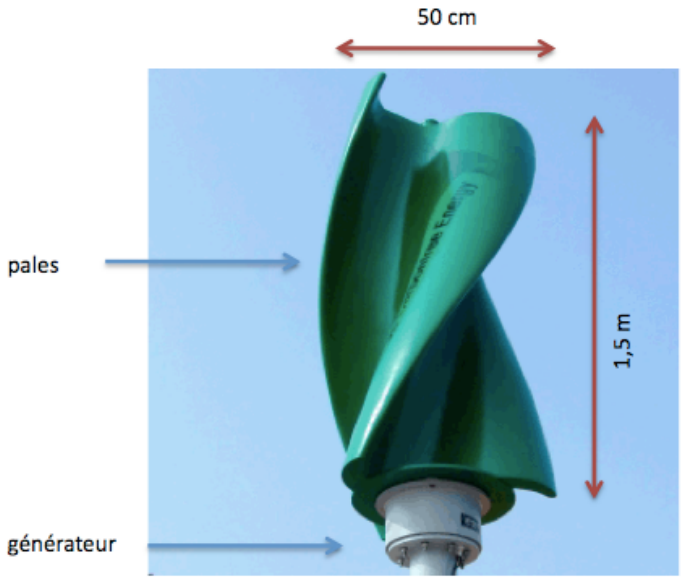


Figure 16 - Eolienne verticale Axeco

Le tableau suivant présente les caractéristiques techniques de l'éolienne verticale Axeco.

puissance nominale	200 W
tension	12 V
nombre de pales hélicoïdales	3
vitesse de démarrage	1,5 m/s
vitesse limite de sécurité	35 m/s
vitesse de vent maximum	45 m/s

Tableau 3 - Spécifications techniques de l'éolienne Axeco

Afin d'optimiser son fonctionnement, le constructeur conseille de placer l'éolienne à une hauteur minimale de 2 mètres au-dessus des obstacles. Le principe de fonctionnement de l'éolienne Axeco est identique à celui décrit pour l'éolienne horizontale. Une fois connectée l'éolienne alimente une charge par l'intermédiaire d'un régulateur.

2.2.4 Aspect normatif

D'après les documentations techniques, les éoliennes sont conformes aux normes de la CEI (**C**ommission **E**lectrotechnique **I**nternationale) chargée de la normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électrotechnique. Plus particulièrement, la norme CEI 61400-1 vise à établir les exigences en matière de conception, d'installation et de sécurité concernant les équipements mécaniques et électriques des éoliennes.

Nous nous sommes intéressées à l'aspect traitant des conditions environnementales afin de connaître précisément les paramètres environnementaux imposés par cette norme.

Ainsi, la norme précise que les éoliennes doivent être conçues pour fonctionner entre -20°C et +50°C. Elle stipule, d'autre part, que la conception doit prendre en considération l'influence du givre ou de la neige, sans préciser toutefois de valeur de seuil.

3 Les perspectives d'étude

Cette dernière partie est dédiée à la mise en œuvre pratique des techniques dont il a été question en première partie. Cette démarche a ainsi pour but de proposer des pistes d'étude éventuelles en vue de travaux pratiques destinés aux élèves.

Dans un premier temps, nous nous intéresserons plus particulièrement à l'énergie captée autrement dit aux mesures offrant la meilleure implantation et orientation de l'éolienne. Dans un second temps, nous verrons de quelle façon il possible d'optimiser les éléments constitutifs de l'éolienne afin d'en tirer le meilleur rendement.

3.1 Mesure du vent et exploitation

Dans un projet éolien, la mesure du vent est une donnée importante car elle est à la base de l'électricité produite. Ainsi, nous allons présenter la méthode physique usuelle permettant une étude de la ressource éolienne.

Cette méthode consiste à mesurer les variables qui nous intéressent durant un temps représentatif de leur évolution. Les données peuvent ensuite être enregistrées, triées et enfin analysées pour en faire ressortir les caractéristiques recherchées. Par la suite, une modélisation statistique et des corrélations avec des sources extérieures pourront être envisagées en vue de prévision à long terme. La mesure consiste à installer un mât équipé des appareils qui mesureront les paramètres que l'on souhaite analyser. La position de ce mat doit refléter au mieux les conditions dans lesquelles se trouve l'éolienne. L'instrumentation qui peut être mise en place sur un tel mât est la suivant :

- **une girouette :** elle permet de relever la direction du vent.
- **un anémomètre :** c'est l'appareil le plus communément utilisé pour la mesure de vitesse du vent. Le type d'anémomètre le plus utilisé est l'anémomètre à coupelle tel qu'on peut le voir sur la figure suivante.

Figure 17 - anémomètre à coupelle

Cet anémomètre est constitué d'un rotor et de 3 demi-coquilles disposées sur des bras horizontaux tournant autour d'un axe vertical. L'appareil est équipé d'un dispositif de comptage de tours. La vitesse de l'anémomètre est proportionnelle à la vitesse du vent par la formule : $V = r \times 2\pi N$

Avec : V : vitesse du vent (m/s)
r : rayon moyen des bras (m)
N : nombre de tours par seconde (tr/s)

Dans la pratique, l'idéal serait de placer l'anémomètre sur un mat dont la hauteur correspond à la hauteur de l'éolienne. De cette façon, les incertitudes liées à la hauteur de mesure sont écartées. En effet, comme nous l'avons souligné précédemment, le vent capté peut être tourbillonnant selon la présence d'obstacle.

- **un boitier enregistreur :** L'enregistreur est un boitier électronique situé à la base du mat qui enregistre les données de vitesse du vent et de directions du vent. L'enregistreur peut être directement relié à un ordinateur pour réaliser l'acquisition des données.
- **un capteur de température**

Ainsi, un mat de mesure équipé permet, par exemple, de relever les paramètres suivants : la date, l'heure, la vitesse moyenne de l'anémomètre, la direction moyenne du vent, la température moyenne… Toutefois, les mats de mesure équipés posent des contraintes au niveau de la mise en œuvre. Il existe d'autres techniques de mesure par radars plus facile à installer mais nettement plus chères.

Il est important de rappeler que la puissance captée est de la forme : $P_t = \frac{1}{2} C_p \times A \times \rho \times V^3$

Avec : P_t : puissance instantanée captée par l'éolienne.
A : surface du rotor
Rho la densité de l'air instantanée à l'endroit où sera l'éolienne
C_p un coefficient d'efficacité de transfert aérodynamique qui varie avec la vitesse d'entrée V.

Ainsi, la vitesse du vent joue un rôle considérable dans la puissance récoltée par l 'éolienne.

3.2 Comparaison des technologies

Une étude comparative permettrait dans un premier temps d'illustrer l'importance du choix des technologies. Différentes mesures pourraient être effectuées en travaux pratiques dans le cadre d'une étude comparative :

Documentation constructeur :
Une étude des données constructeur pourrait permettre aux élèves de mettre en avant les grandeurs importantes caractérisant les éoliennes. Plus particulièrement, il serait intéressant qu'ils observent que par sa forme l'éolienne verticale supporte des vents plus forts et possède une vitesse de démarrage plus faible et d'étudier par la suite le rendement de chacune afin d'en extraire les avantages et inconvénients.

Coefficients caractéristiques :
L'étude des coefficients caractéristiques définis dans la partie 1.3 permet une comparaison entre différentes éoliennes. En effet, celles-ci se différencient par leur coefficient de puissance C_p et leur coefficient spécifique λ. Ainsi la courbe ci-après illustre la « réponse » spécifique de différentes technologies d'éolienne face au vent.

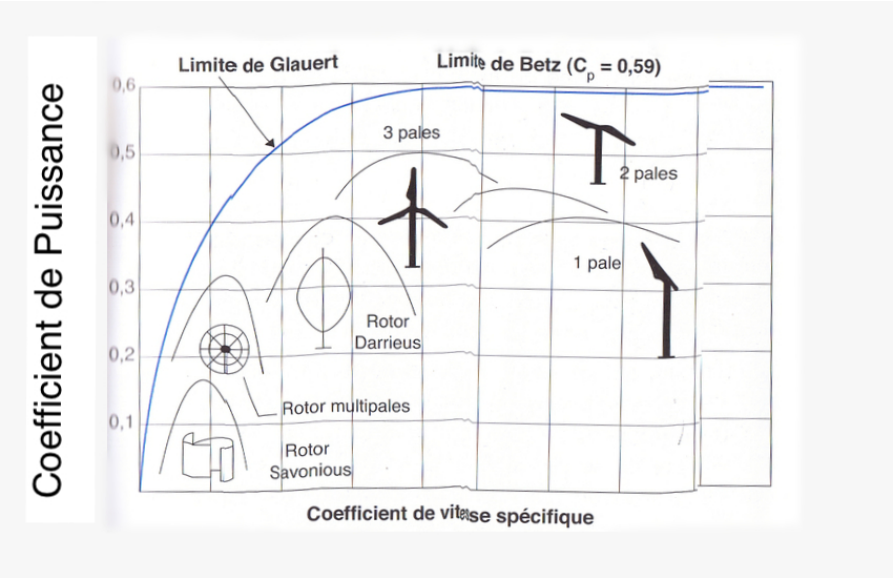


Figure 18 - Courbe des coefficient de puissance en fonction du coefficient spécifique (DUBOIS, 2009)

Puissance débitée :

La vitesse de rotation de l'éolienne joue un rôle clé dans la puissance débitée. Il serait donc intéressant d'étudier la vitesse des deux éoliennes et d'en mesurer la puissance en sortie. Une étude de la caractéristique des éoliennes $P = f(\Omega)$ avec P la puissance de l'éolienne et Ω la vitesse de rotation du rotor de la génératrice. Dans la littérature, il a été démontré une allure de courbes de puissance en fonction de la vitesse de rotation du rotor pour une petite éolienne.

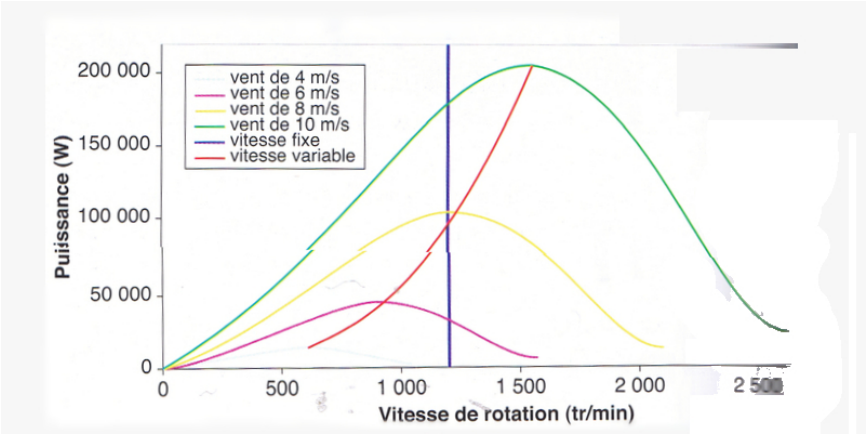


Figure 19 - Puissance dégagée en fonction de la vitesse de rotation du rotor (DUBOIS, 2009)

Nous avons vu dans la partie précédente que la puissance varie en fonction de la vitesse du vent, c'est pourquoi on observe sur ce graphique une courbe différente par vitesse de vent. Une étude similaire pour les éoliennes verticales et horizontales serait intéressante afin de retrouver l'allure de ces courbes.

Logiciel d'acquisition en temps réel :

D'autre part, il serait intéressant de relier les éoliennes à un ordinateur équipé d'un logiciel d'acquisition. L'objectif visé serait de comparer en temps réel la production des systèmes éoliens.

3.3 Alimentation en mode autonome

Les éoliennes non raccordées au réseau fonctionnent en mode autonome. Nous ne nous intéresseront qu'à cette situation car l'objectif à terme sera d'alimenter des charges isolées.

3.3.1 Alimentation d'appareils

Pour cette configuration, le recours à un système de stockage est nécessaire. Il est alors possible d'utiliser l'éolienne pour alimenter des appareils tels que l'illustre la figure ci-dessous.

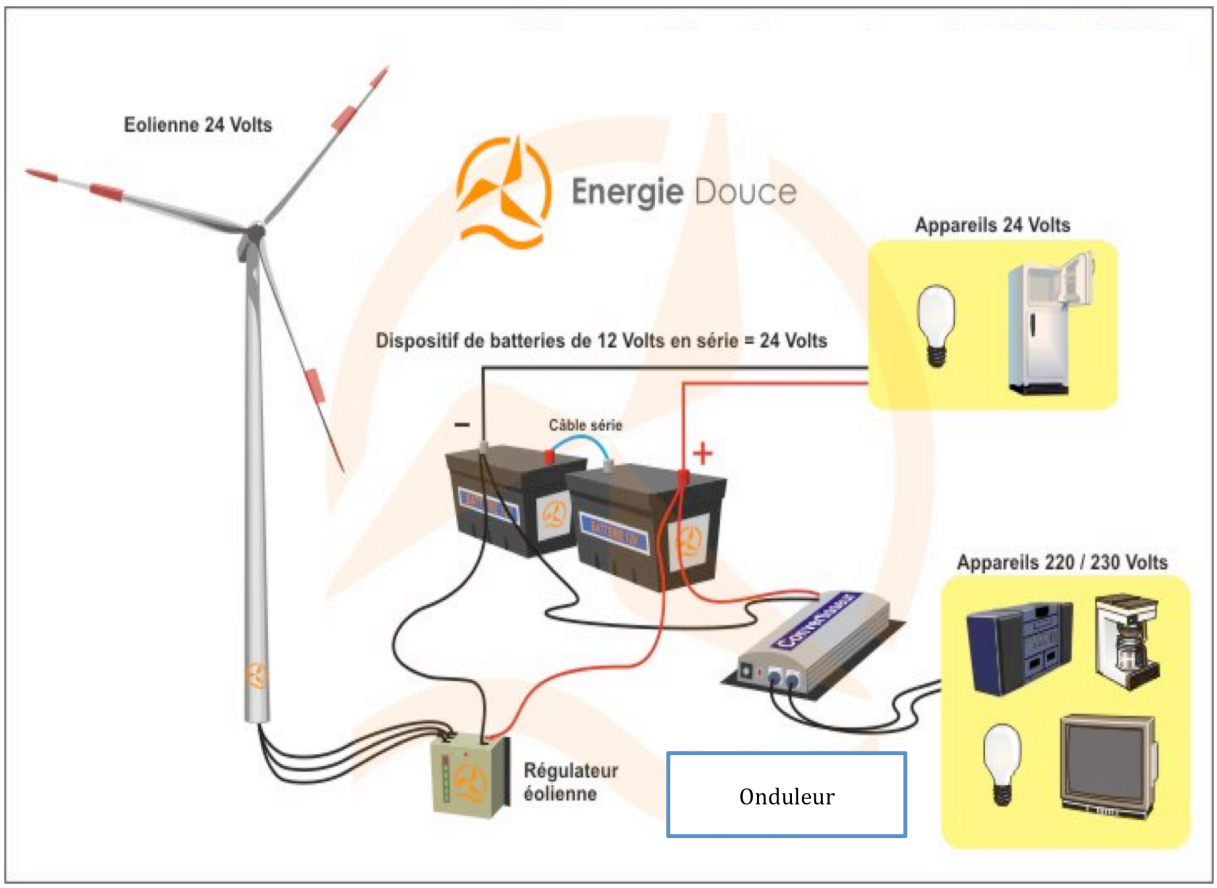


Figure 20 - Schéma de raccordement d'une éolienne 24V en mode autonome

Concernant les appareils fonctionnant en 24 Volts, une liaison directe est possible à partir des batteries pour faire fonctionner par exemple des ampoules ou un réfrigérateur. En effet, l'énergie fournie par l'éolienne est emmagasinée dans la batterie afin d'alimenter une charge de façon constante sans interruption pendant une période déterminée.

Il est également envisageable de coupler en parallèle plusieurs batteries afin d'augmenter la capacité du dispositif de stockage. L'ampérage total du dispositif sera alors égal à la somme de l'ampérage du dispositif de chaque batterie. Ainsi le choix de la batterie repose directement sur la consommation des éléments à alimenter.

Exemple pratique : alimentation de néons

Considérons le cas où l'on souhaite alimenter les néons d'une salle de travaux pratiques. La salle comporte 30 néons de 15W et on souhaite faire fonctionner ces néons 5h/jour.

La consommation journalière vaut alors : $15W \times 30 \times 5h = 2250Wh/jour$. Pour une batterie de 12V, la consommation sur une journée revient à : $2250W/12V = 187{,}50A/h$. Ainsi, il serait dans ce cas judicieux de choisir une batterie de 200Ah-24V (ou 2 batteries de 100Ah-12V).

Si l'on souhaite alimenter des appareils fonctionnant en 220/230 Volts tels qu'une télévision, une chaine hi-fi ou une cafetière, il est nécessaire de passer par un onduleur. Celui-ci prélève l'énergie fournie par les batteries afin de fournir un courant alternatif 220/230 Volts domestique.

3.3.2 Amélioration de la production : couplage éolien/solaire

Dans un cas où les vents seraient trop faibles pour faire tourner les éoliennes et ce sur une durée importante, on peut envisager que les batteries ne seraient plus rechargées et entièrement vidées. Aussi, une solution envisageable pour garantir l'autonomie du système serait de coupler des panneaux solaires comme sur la figure suivante.

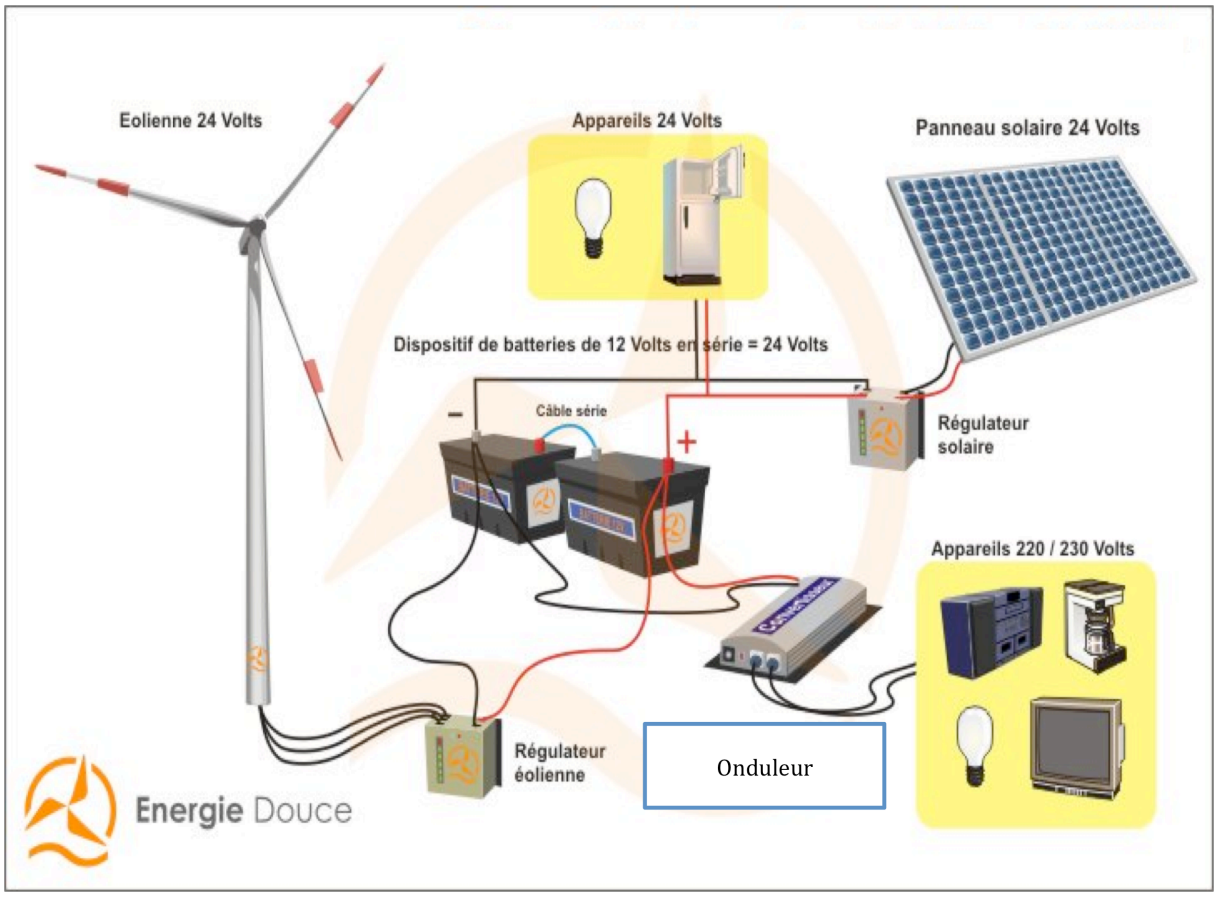


Figure 21 - Couplage éolien_solaire

Il suffit de brancher ces derniers en parallèle sur les batteries, après un régulateur (pour des raisons similaires aux régulateurs de charge des éoliennes). Il convient bien sur d'avoir une tension continue correspondant aux batteries. Un seul et même onduleur pourra être utilisé pour l'énergie éolienne et l'énergie solaire.

Conclusion

Le travail effectué durant ce projet avait pour objectif l'acquisition de deux micro-éoliennes afin de proposer aux étudiants de Licence IEE et de Master GT2E des applications pratiques. Tout au long de ce projet, nous avons été confrontées à plusieurs difficultés particulièrement en raison des contraintes engendrées par le budget alloué. En effet, le coût relativement élevé des éoliennes verticales a réduit considérablement le choix parmi celles-ci. De plus, la vitesse de démarrage de l'éolienne horizontale fut une contrainte importante. Notre choix s'est porté sur l'éolienne horizontale Air Breeze et l'éolienne verticale Axeco. Par la suite notre projet s'est orienté sur l'étude du site d'implantation afin de pouvoir relier les éoliennes à des appareils situés en dessous dans une salle de travaux pratiques. Les éoliennes seront normalement installées dans les semaines à venir.

Durant ce projet, nous avons exploité plusieurs compétences. Il a fallu étudier le fonctionnement des éoliennes et en extraire les caractéristiques importantes, réaliser des devis au près des fournisseurs, choisir l'offre la plus avantageuse en répondant au cahier des charges et imaginer des cas d'utilisation.

Bibliographie

Axeco. *Documentation constructeur éolienne Axeco.*

Breeze, A. *Documentation constructeur éolienne Air Breeze.*

D'où vient l'énergie éolienne. (s.d.). Récupéré sur Windpower: http://guidedtour.windpower.org/fr/tour/wres/index.htm

DUBOIS, C. (2009). *L'éolien, techniques et pratiques.* Eyrolles.

LECLERCQ, L. *Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes.*

L'éolien au sol - Ecosources Energies renouvelables. (s.d.). Récupéré sur Ecosources: http://www.ecosources.info/energies_renouvelables/Eolien_energie_du_vent_au_sol

Product info Air Breeze. (s.d.). Récupéré sur Site constructeur Air Breeze: http://airbreeze.com/index.php?q=land/product-info

Production d'énergie régulation. (s.d.). Récupéré sur Seatronic: http://www.seatronic.fr/conseil/regulation-charge-batterie.php

RIOLET, E. (2009). *Le mini-éolien.* Eyrolles.

Station des Cézeaux. (s.d.). Récupéré sur Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand: http://wwwobs.univ-bpclermont.fr/SO/mesures/cez.php

Tout savoir sur le fonctionnement d'une éolienne. (s.d.). Récupéré sur Energie douce: http://www.energiedouce.com/eolienne.html

Wiki Eolienne - projet collaboratif sur le thème de l'éolien. (s.d.). Récupéré sur Wiki Eolienne: http://eolienne.f4jr.org/start

WOOFENDEN, I. (2009). *Wind Power for dummies.*

Table des figures

Figure 1 - Schéma de principe du rotor de Savonius....3
Figure 2 - Les différents types d'éolienne Darrieus....3
Figure 3 – Schéma de principe d'une éolienne Darrieus....4
Figure 4 – Composants d'une l'éolienne....5
Figure 5 - illustration d'un rotor....6
Figure 6 - Action du vent sur une pale....7
Figure 7 - Colonne d'air....8
Figure 8 - Machine à aimants permanents....8
Figure 9 - Vitesse du vent et vitesse tangentielle en bout de pale....9
Figure 10 - Organisation du projet....11
Figure 11 - Site d'implantation au campus des Cézeaux....13
Figure 12 - Représentation de la direction du vent....13
Figure 13 - Relevé de vitesse du vent (année 2009)....14
Figure 14 - Eolienne horizontale Air Breeze et dimensions des principaux éléments....15
Figure 15 - Emplacement optimal de l'éolienne Air Breeze....16
Figure 16 - Eolienne verticale Axeco....18
Figure 17 - anémomètre à coupelle....20
Figure 18 - Courbe des coefficient de puissance en fonction du coefficient spécifique (DUBOIS, 2009)....22
Figure 19 - Puissance dégagée en fonction de la vitesse de rotation du rotor (DUBOIS, 2009)....22
Figure 20 - Schéma de raccordement d'une éolienne 24V en mode autonome....23
Figure 21 - Couplage éolien_solaire....24

Annexes

- Devis pour éoliennes horizontales et verticales :

Watteo
énergie nomade

Afin de protéger l'environnement, Watteo imprime tous ses documents sur du papier 100% recyclé.

49 / 51 rue Samatan

13007 MARSEILLE
FRANCE
Tél : 04 91 52 00 65
Fax : 04 91 46 49 15
SIRET : 50882385300017
NAF : 4791B
N° TVA : FR31508823853

Madame SINTUREL Claire

Devis en Euros

Devis valable 1 mois

FRANCE MÉTROPOLITAINE

Commercial :

Devis N° DV 911 010 ***Date : mercredi 18 novembre 2009***

Référence	Désignation	Quantité	P.U. HT	Montant HT	TVA
2553	Eolienne verticale ATMB 1000 50W-12V	6,00	793,48	4 760,88	1
DIV	Batterie gel Genois 200Ah-12V	2,00	511,71	1 023,42	1
	Livraison UPS Standard (48-72h). Assurance France incluse				

Poids total :

Nombre de colis : 8,00

Montant HT	TVA	Montant TVA
5 784,30	19,60 5,50	1 133,72

Total brut HT :	5 784,30
Remise :	
Net HT :	**5 784,30**
Frais de port :	87,42
Escompte :	
Total taxes :	1 150,85
Divers TTC :	
Acompte :	
Règlement reçu :	
NET A PAYER	**7 022,57**

Soit en Francs français 46 065,04

AUVERWIND
BY ESCOM

L'énergie du vent à votre service

Devis N° : V30017DF9

Mademoiselle MICHEAU

Université Pascal BLAISE

Mobile : 0622662345
Email : do.micheau@aliceadsl.fr

Lempdes sur Allagnon, le 17 décembre 2009

Désignation	Prix H.T.
Un système éolien AUVERWIND V300 comprenant : - 1 éolienne 300W à axe vertical + Contrôleur 12V - Protection foudre - 1 batterie 44Ah Gel - 1 mât de 3 mètres - 1 onduleur DC/AC 150W - Câbles et connectiques (distance 10 mètres du mât)	
Total fournitures	6 400,00 €
Installation Mise en place et test Total main d'œuvre	1 000,00 €
Total H.T.	7 400.00 €
TVA 19,6%	1 450.40 €
Montant TTC	8 850.40 €

AUVERWIND
BY ESCOM

L'énergie du vent à votre service

Devis N° : H30017DF9

Mademoiselle MICHEAU

Université Pascal BLAISE

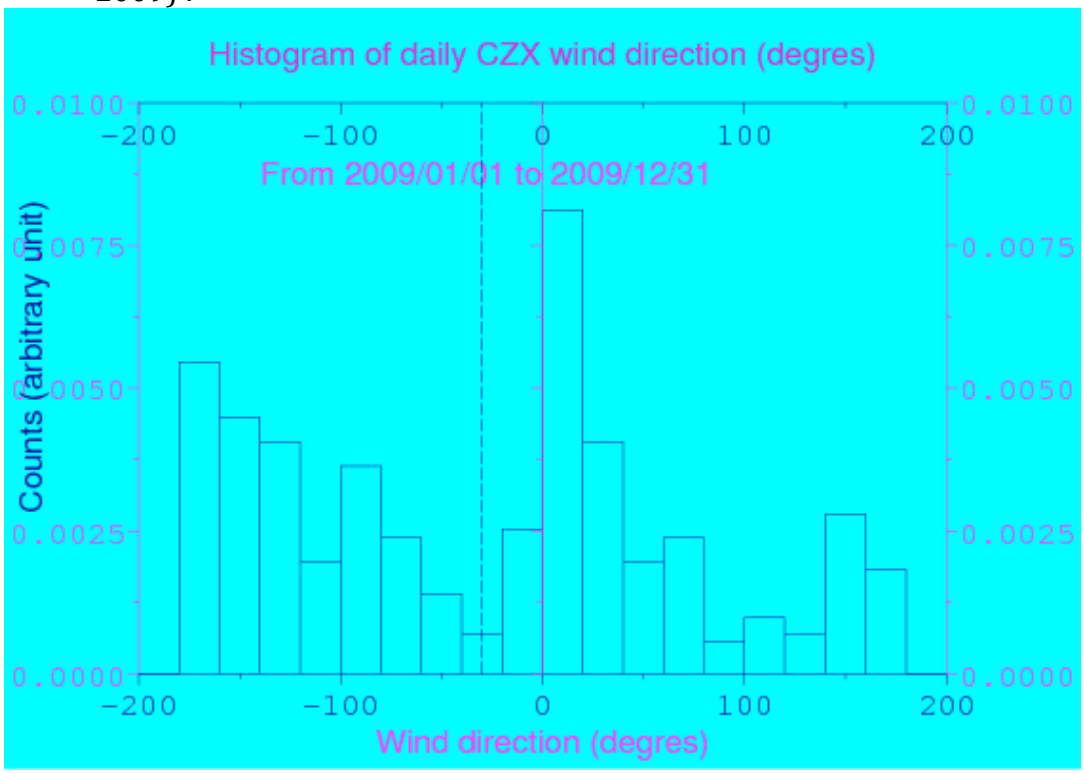
Mobile : 0622662345
Email : do.micheau@aliceadsl.fr

Lempdes sur Allagnon, le 17 décembre 2009

Désignation	Prix H.T.
Un système éolien AUVERWIND H300 comprenant : - 1 éolienne 300W à axe horizontal 12V/24V/48V - 1 batterie 44Ah Gel - 1 mât de 3 mètres - 1 onduleur DC/AC 150W - Câbles et connectiques (distance 10 mètres du mât)	
Total fournitures	1 975,00 €
Installation Mise en place et test Total main d'œuvre	1 000,00 €
Total H.T.	2 975.00 €
TVA 19,6%	583.10€
Montant TTC	3 558.10 €

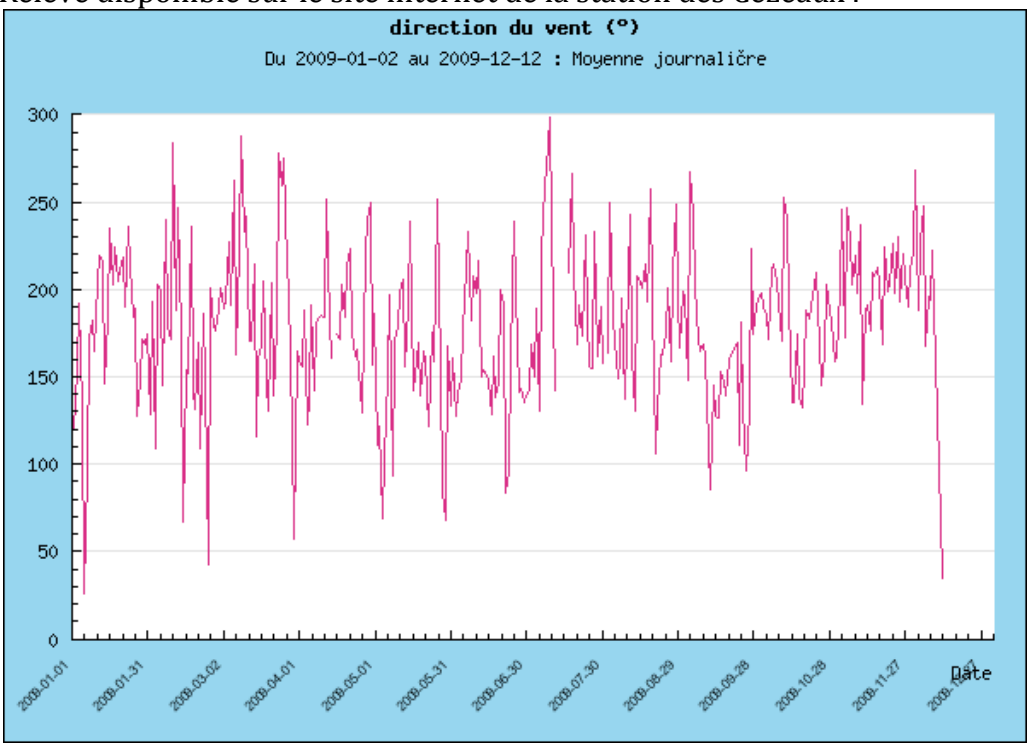
Dorothée MICHEAU – Claire SINTUREL

- Relevés météorologiques de la station des Cézeaux (direction du vent année 2009) :



Directions : 0 = vent du nord -90 = vent d'ouest -180 = vent du sud
L'anémomètre et la girouette se trouvent à quelques mètres de la tête de réception de la station GPS qui se trouvent très exactement à 3° 6' 39.85765" E et 45° 45' 39.45616"N à une altitude de 423,45m. C'est-à-dire sur la terrasse au bout du bâtiment de physique 5, côté ascenseur.

- Relevé disponible sur le site internet de la station des Cézeaux :



Ce relevé nous a permis de tracer sur Matlab une représentation de la direction du vent.

Résumé

L'énergie éolienne est un moyen de production performant efficace et durable. A ce titre, les micro-éoliennes gagnent du terrain dans les zones urbaines qui étaient jusqu'à présent difficiles d'accès.

Dans un souci de proposer aux étudiants de Master GT2E et de Licence I2E des activités proches des technologies actuelles, il a été envisagé d'acquérir au département de Physique des systèmes micro-éoliens. Ainsi, notre travail a consisté en la réalisation des étapes nécessaires à la construction d'un projet éolien. L'étude des contraintes d'implantation, le choix des technologies, chaque étape est primordiale pour optimiser le rendement.

D'autre part, des réflexions sur des activités concrètes, en complément de l'apport théorique fourni, ont été effectuées. L'éolien a, en effet, la particularité de faire appel à toutes sortes de sciences et de techniques telles que la météorologie, la mécanique des fluides, la thermodynamique ou encore l'électrotechnique…

Les concepts appréhendés au cours de notre étude ont été réalisés dans l'unique objectif de comprendre les aspects qui entrent en jeu dans l'efficacité des systèmes éoliens. Cela permettra au final d'en extraire les caractéristiques utiles dans la comparaison des éoliennes.

Mots-clés : micro-éolienne, énergie électrique, optimisation, coefficients caractéristiques

Abstract

Wind power is an efficient and durable way to produce electricity. Deservedly, micro wind machine gain ground in urban area.

To perform practical activities closer to current technology for its student, the department of Physics has chosen to purchase two wind machine systems. Our work was to follow the essential steps for the realisation of a wind project. Starting with the establishment through the choice of the kind of technology, each step is necessary to improve efficiency.

On the other hand, we were thinking about some practical activities, further to the theoretical lessons. Indeed, wind power call for many skills like meteorology, physic of fluid, thermodynamic or electrical engineering.

The concept get onto our study was made in the only aim to understand the fundamental aspect that comes into the efficiency of wind generator. At the end, the study of the characteristics will enable to compare different wind turbine system.

Keywords: Micro wind turbine, efficiency, electrical energy, horizontal-axis, vertical-axis