

## **Eolienne à dépression**

### **Bilan des essais menés chez KrugSARL en juin 2011**

---

**Nicolas Andreau**



Objet du document : Synthétiser les résultats obtenus lors des quelques jours de test, et dresser une perspective technique de l'éolienne à dépression.



# Sommaire

<b>Introduction .....</b>	<b>4</b>
<b>1. Objectifs des essais .....</b>	<b>6</b>
<b>2. Description de l'installation et de la mesure.....</b>	<b>7</b>
Le site .....	7
Le mat haubané .....	7
L'interface éolienne/mât .....	8
L'étanchéité de l'ensemble.....	8
La mise en drapeau manuelle depuis le sol .....	9
Le système de mesure et les paramètres déduits .....	9
<b>3. Résultats obtenus .....</b>	<b>13</b>
L'hélice tripale .....	13
La pompe éolienne .....	16
La puissance en air disponible à la turbine .....	18
Le groupe turbine/génératrice .....	19
Courbe de puissance et rendement global .....	23
Mesure de turbulence du vent .....	25
Essais fumigène .....	27
<b>Conclusion et perspectives.....</b>	<b>30</b>

## Introduction

Le projet de construction du prototype d'éolienne à dépression a débuté en septembre 2009 avec un PIR2A Supaero, ayant pour but de concevoir et construire le rotor creux d'1m50 de diamètre, puis de le passer en soufflerie. Cette première phase s'est achevée avec succès en juin 2010, et a motivé la suite du projet.

L'éolienne a par la suite été entreposée chez Paul-Claude Dufour à Villate, à partir de juillet 2010, avec deux objectifs. Le premier était d'effectuer des mesures de pompe au point fixe pour expliquer l'écart théorie/pratique observé en soufflerie. Le second était de terminer l'éolienne, de l'instrumenter et de préparer sa mise sur site chez KrugSARL pour en mesurer les performances en plein air.

La première étape s'est achevée rapidement. Elle a permis de montrer que les problèmes de fuite étaient mineurs, et que l'écart théorie/résultat observé en soufflerie venait d'une erreur de théorie. La dépression idéale générée par la pompe centrifuge que constitue l'éolienne était surestimée. Cette surestimation obligeait à considérer des pertes de charges internes brutales et inexpliquées au niveau du moyeu, et surtout ne permettait pas de comprendre l'écart théorie/expérience dans le cas « vanne fermée ». Le problème est aujourd'hui bien compris, et la nouvelle approche analytique est détaillée dans le document : *Bilan de pompage du prototype d'éolienne à dépression, Théorie et Essais* (Nicolas Andreau, août 2010).

La seconde étape en atelier, plus longue, a consisté en la construction des multiples organes manquant à l'éolienne (la dérive et son système de furling, la turbine à air la structure de maintien du mât), ainsi qu'en la conception et réalisation d'une chaîne de mesure qui sera détaillée dans ce document. Elle a duré jusqu'au mois de mars 2011, date du premier essai « à hauteur d'homme » près de l'atelier pour valider la chaîne, régler la dérive pour la mise face au vent, et trouver le calage optimal de l'hélice.

Ce premier essai s'est avéré catastrophique : l'éolienne, mal arrimée au sol, a basculé sous l'effet d'une rafale, et les pales ont touché le sol à 10 tours/seconde. Les 3 bouts de pale ont été détruits, les tourillons métallique de fixation sectionnés ou voilés, et la pièce d'ogive frontale pulvérisée.

Grâce à la gentillesse et la disponibilité de Guy Mirabel et Patrick Morel, et à la commande d'une nouvelle ogive chez Crésilas, nous avons pu récupérer ces pièces au bout d'un mois. L'éolienne a pu être remontée courant avril. Le montage des 3 pales s'est avéré bien plus délicat qu'auparavant, du fait des erreurs résiduelles sur les tourillons, aussi nous avons laissé tomber les tests préliminaires de calage, préférant assurer la mise sur site chez Krug.

Le calage final a été fixé à 6.5deg en bout de pale. Le design de Jean Andreau préconisait 7.4deg, mais nous avons retiré 1deg car nos pales étaient légèrement plus épaisses relativement à la corde. Pour quantifier cette modification nous nous sommes aidé du Naca Report n°976 qui présente les polaires de la série Naca 16, et de l'outil Xfoil pour les effets du Reynolds sur la portance.

Nous sommes arrivé chez Krug avec tout le matériel le mardi 24 mai 2011. Le mât a été érigé à blanc le jour-même, et l'éolienne a été montée le lendemain. Quelques mesures ont été faites par vent d'Ouest / Nord-ouest, mais un problème lié à la mise en drapeau (bricolée en dernière minute) nous a obligé à descendre la machine samedi 28 mai. Elle a été remontée le vendredi 3 juin, et des mesures ont pu être menées avec succès pendant 5 jours, uniquement par vent d'Est / Sud-est. Un essai fumigène a été fait le dernier jour. Pourquoi l'éolienne a-t-elle été laissée si peu de temps sur site ?

- La batterie servant à l'alimentation des mesures se déchargeait très rapidement , et ne donnait pas plus de deux-trois jours d'autonomie (le seul élément non maîtrisé, le boitier anémométrique, devait consommer beaucoup car les autres éléments donnaient 8 mois d'autonomie)
- La turbine telle qu'elle était montée sifflait énormément en prenant de la vitesse, et nous ne voulions pas gêner les gens qui travaillaient sur place.
- Enfin l'hélice vibrait sérieusement aux vents forts (mauvais équilibrage dynamique dû à l'accident), et le furling, censé la protéger, démarrait plus tard que prévu.

Ce document détaille les essais qui ont été menés et présente les résultats obtenus, qualitativement excellents, et quantitativement très encourageants. Espérons que le projet ait un jour une suite.



# 1. OBJECTIFS DES ESSAIS

Tester l'éolienne en vent réel, en haut d'un mât tubulaire haubané, avait plusieurs objectifs :



- Faire fonctionner l'hélice tripale dans un vent propre en dehors de toute contrainte autre que la turbulence du vent. la soufflerie, trop petite, n'avait pas permis de bien évaluer ce fonctionnement. Les mesures devront permettre de déterminer son  $C_p$  (rendement) ainsi que son  $C_h$  (poussée, grâce à la détermination du vent de début de furling). Ces grandeurs seront à tempérer du taux de turbulence du vent, qu'il faudra estimer.
- Motiver à la conception/construction de la turbine à air, absente en soufflerie, et observer par là le fonctionnement global du système en appréciant la mise à disposition de l'énergie mécanique au pied du mât.
- Démontrer l'intérêt du duo hélice creuse / turbine, avec l'indépendance de régime entre l'hélice en haut du mât (TSR constant) et la turbine pour la récupération de puissance.
- Montrer que la turbine constitue un multiplicateur naturel de l'hélice, et se montre souple en terme de régime avec un couple maximum au démarrage
- Etre capable, par l'analyse des essais, de donner une vitesse turbine et un  $C_p$  mécanique à la turbine pour des éoliennes à dépression plus grandes reposant sur ce design.
- Se familiariser avec la problématique de la mesure en plein air (capteurs divers, datalogger)
- Se familiariser avec les problématiques d'interface éolienne à dépression/mât tubulaire
- Enfin donner une fin logique au projet, en observant fonctionner ce système fascinant !

La campagne d'essais, même si elle s'est déroulée dans un vent très turbulent peu favorable à une éolienne de cette taille, a permis de répondre à ces objectifs.

Les paragraphes suivants détaillent les différents points, en commençant par la description de l'installation (2), puis en présentant les résultats obtenus (3) et les perspectives associées (4).

## 2. DESCRIPTION DE L'INSTALLATION ET DE LA MESURE

### ***Le site***

Le mât prêté par Olivier Krug se trouve sur son site d'essai à Avignonet-Lauragais, à 30km au sud de Toulouse. Ce site possède trois installations, toutes sur mât haubané basculant : un mât de 24m de haut, et deux mâts de 12m. Sur le mât de 24m tournait une WestWind. Le second mât de 12m était prévu pour une éolienne Piggott de la licence STER, qui n'était pas montée.



Ce site de test jouxte un champ éolien de 12 grandes machines, qui totalisent 20MW de puissance installée. Récemment un champ photovoltaïque de 4MWc a été construit entre les éoliennes. Ces infrastructures sont gérées par la société Boralex, qui possède une antenne dans les locaux attenant ceux de KrugSARL. Les vibrations étaient bonnes !

### ***Le mat haubané***

Le mât que nous avons utilisé est un mât tubulaire haubané, classique, auquel nous nous sommes adaptés. Il est constitué de deux tubes de 6m40 de long, 105mm de diamètre intérieur. Les tubes sont reliés par des coquilles qui assurent la jonction par serrage.



Ce mât comporte deux nappes de 4 haubans (une à 6m, une à 10). Il y a 4 plots d'ancrage en béton, ainsi que le plot central sur lequel se trouve le pied de mât qui permet le pivotement de l'ensemble.

## ***L'interface éolienne/mât***



**Au pied du mât**, notre installation doit permettre la fixation de la turbine et le passage de l'air. Nous avons donc construit une structure en tube métallique qui se prend sur le pivot de l'ancrage et maintient le mât à 70cm du sol par serrage. Cette structure permettra également de soutenir le coffret contenant les électroniques, et le support de l'alternateur accouplée à la turbine.

Sa solidité est impérative puisqu'elle reprend tous les efforts de compression du mât ainsi que les efforts tranchants qui surviennent au début de la levée. Elle a été réalisée par soudure de tubes carrés de 4cm de côté.

**En tête de mât** il faut assurer l'arrimage de l'éolienne, permettre son orientation et laisser passer l'air du mât vers le rotor avec le minimum de pertes de charge. Notre solution est rudimentaire mais efficace : le tube de notre éolienne vient coiffer un tube fixe et garni de graisse qui sera solidaire du mât.



Deux rondelles de téflon viennent faciliter le contact en rotation. Ce pivot est suffisamment étanche à l'air, et n'oppose aucune résistance à l'écoulement interne. L'attache sur le mât est réalisée par deux « U » en métal, reliés par du tube soudé, que l'on vient serrer en tête de mât.

## ***L'étanchéité de l'ensemble***

L'air ne doit pouvoir pénétrer dans l'éolienne que par le pied de mât, de manière à céder son énergie à la turbine. D'une manière générale, l'étanchéité finale est faite partout en appliquant du joint silicone aux endroits susceptibles de laisser entrer l'air, à savoir :

- La jonction entre les deux tubes qui constituent le mât
- La jonction entre l'éolienne et le mât
- La jonction entre la turbine et le mât

Au niveau de l'orientation de l'éolienne l'étanchéité est faite par contact, et par l'ajout d'une bonne quantité de graisse. Au niveau du rotor de l'éolienne, c'est un simple joint labyrinthe sans frottement, qui laisse passer très peu d'air (vérifié lors des essais de pompe en atelier).

## ***La mise en drapeau manuelle depuis le sol***



A noter cet ajout de dernière minute qui s'est montré primordial pour résoudre les problèmes sereinement au niveau de la turbine quand le vent soufflait fort en haut: un système corde-poulies, que l'on actionne depuis le sol, et qui permet de replier la dérive pour mettre l'hélice de l'éolienne dans le lit du vent. Cette mise en drapeau manuelle s'est avérée très efficace car elle coupait instantanément la puissance à la turbine, même à 10m/s de vent. Elle a été abondamment utilisée !

La contrepartie, c'est que le système n'est pas vraiment intégré à l'éolienne, et que la corde descend le long du mât : il faut lui faire passer les haubans à la main quand l'éolienne s'oriente, sinon elle risque de l'empêcher de se mettre face au vent.

## ***Le système de mesure et les paramètres déduits***

### La génératrice

Dans notre cas il faut considérer la génératrice comme un instrument de mesure de la puissance disponible à la turbine. Nous avons eu beaucoup de mal à trouver une génératrice de faible puissance (200W) pouvant monter à 10.000 RPM... C'est le handicap d'avoir un petit prototype d'1m50. Avec une éolienne à dépression de 4m50 de diamètre on aurait été dans la gamme du kW pour 2000 tours/min, on n'aurait eu que l'embarras du choix !



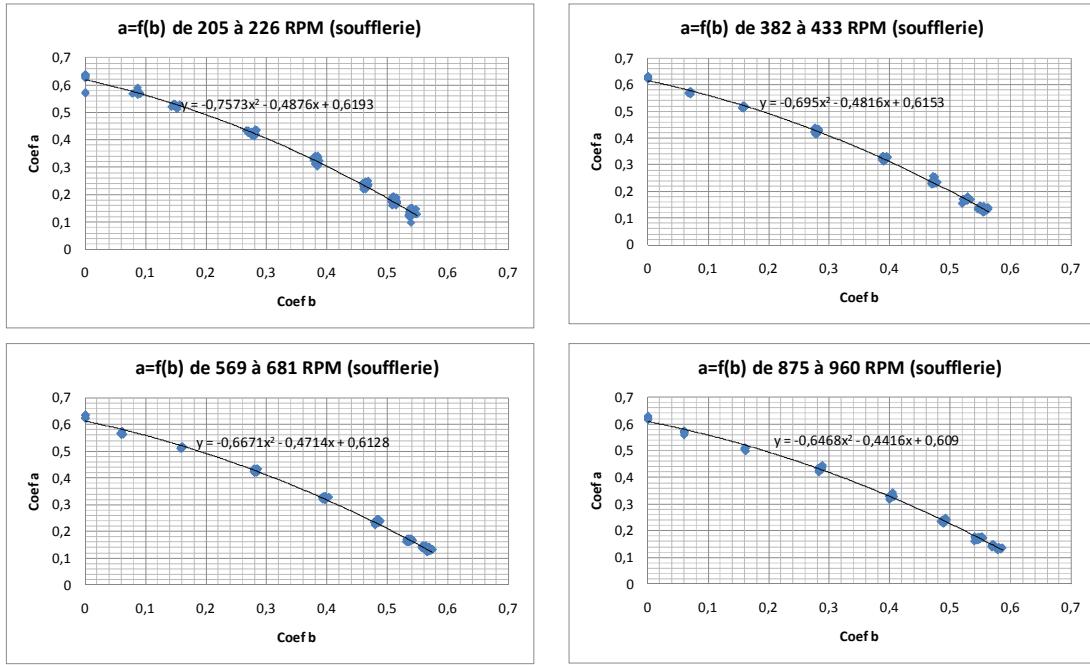
Le cas dimensionnant est fixé à 10m/s de vent en anticipant un rendement mécanique à la turbine de 0.2 par rapport au vent arrivant sur l'éolienne, ce qui donne 200W. A cette vitesse de vent nous

avons environ 10m/s de vitesse d'écoulement dans le mât, ce qui fixe le régime nominal turbine à 9000 RPM environ... Après de longues tergiversations, notre choix s'est porté sur un moteur CC Maxon fabriqué en suisse, donnant 250W à 5400 RPM, et pouvant supporter 9000 RPM (fiche technique et technologie données sur le site internet).

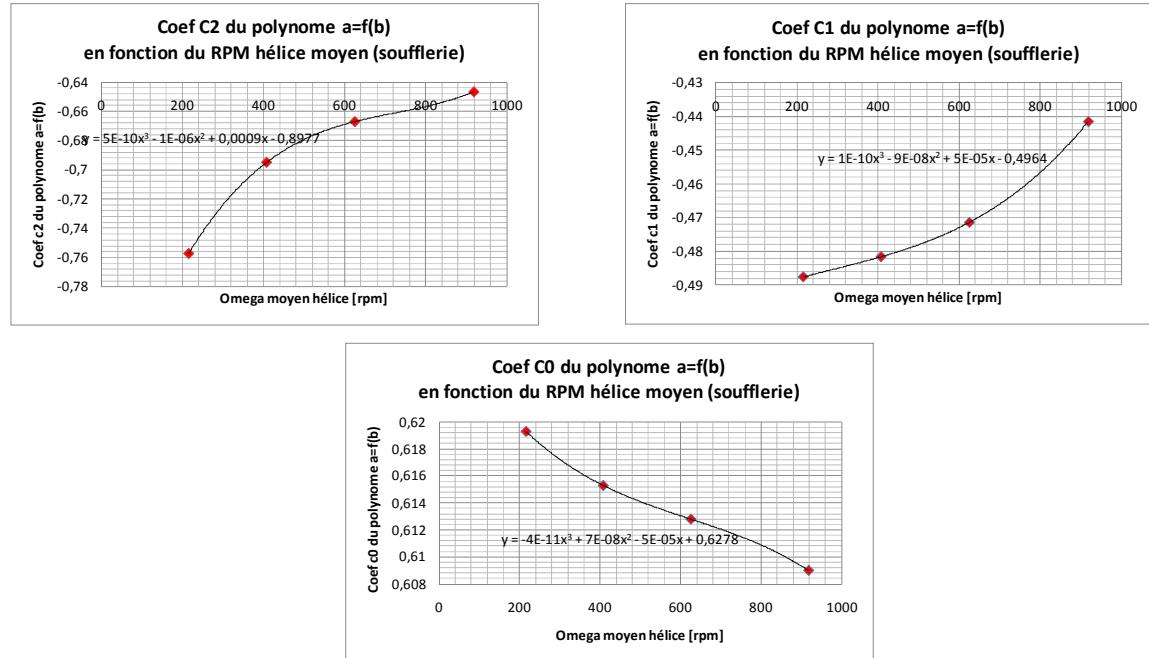
### La mesure du débit d'air

Mesurer précisément le débit d'air dans l'éolienne sur site, sans perturber l'écoulement interne, était trop complexe. Aussi les résultats de la campagne soufflerie de juin 2010 se sont avérés essentiels pour remonter au débit à partir de la mesure de pression et de vitesse hélice.

En effet au cours de cette campagne soufflerie on a pu cartographier, grâce à des journées de mesures et des capteurs bien étalonnés (pressions, débitmètre, tachymètre laser), le fonctionnement précis de la « pompe » éolienne dépression/débit pour différentes vitesses de rotation de l'hélice. Pour quatre vitesses de vent : 3m/s, 5m/s, 7m/s et 10m/s on balayait, grâce à une vanne, la caractéristique dépression/débit du système. On a pu ainsi établir les lois  $a=f(b)$  ( $a$  et  $b$  sont des paramètres adimensionnés, indiquant respectivement la dépression interne et le débit d'air), par interpolation avec un polynôme d'ordre 2 :



Une fois ces 4 polynômes  $a=f(b)$  connus, il ne reste plus qu'à tracer l'évolution de leurs coefficients en fonction du vent, pour les interpoler eux-mêmes et avoir une loi continue liant la dépression, le débit et la vitesse hélice :



En résumé, la soufflerie nous a permis d'établir le modèle suivant (si  $a$  est le coefficient de dépression,  $b$  le coefficient de débit et  $\Omega$  la vitesse de rotation hélice):

$$a = C_2(\Omega) \times b^2 + C_1(\Omega) \times b + C_0(\Omega)$$

Avec  $C_0, C_1, C_2$  3 polynômes connus, d'ordre 2 en  $\Omega$ .

On sait donc, en ne mesurant que la dépression interne à l'éolienne et la vitesse hélice, remonter au débit d'air en toute circonstance.

Le schéma suivant présente les différentes mesures qui ont été mises en place, ainsi que les variables qui en sont déduites.

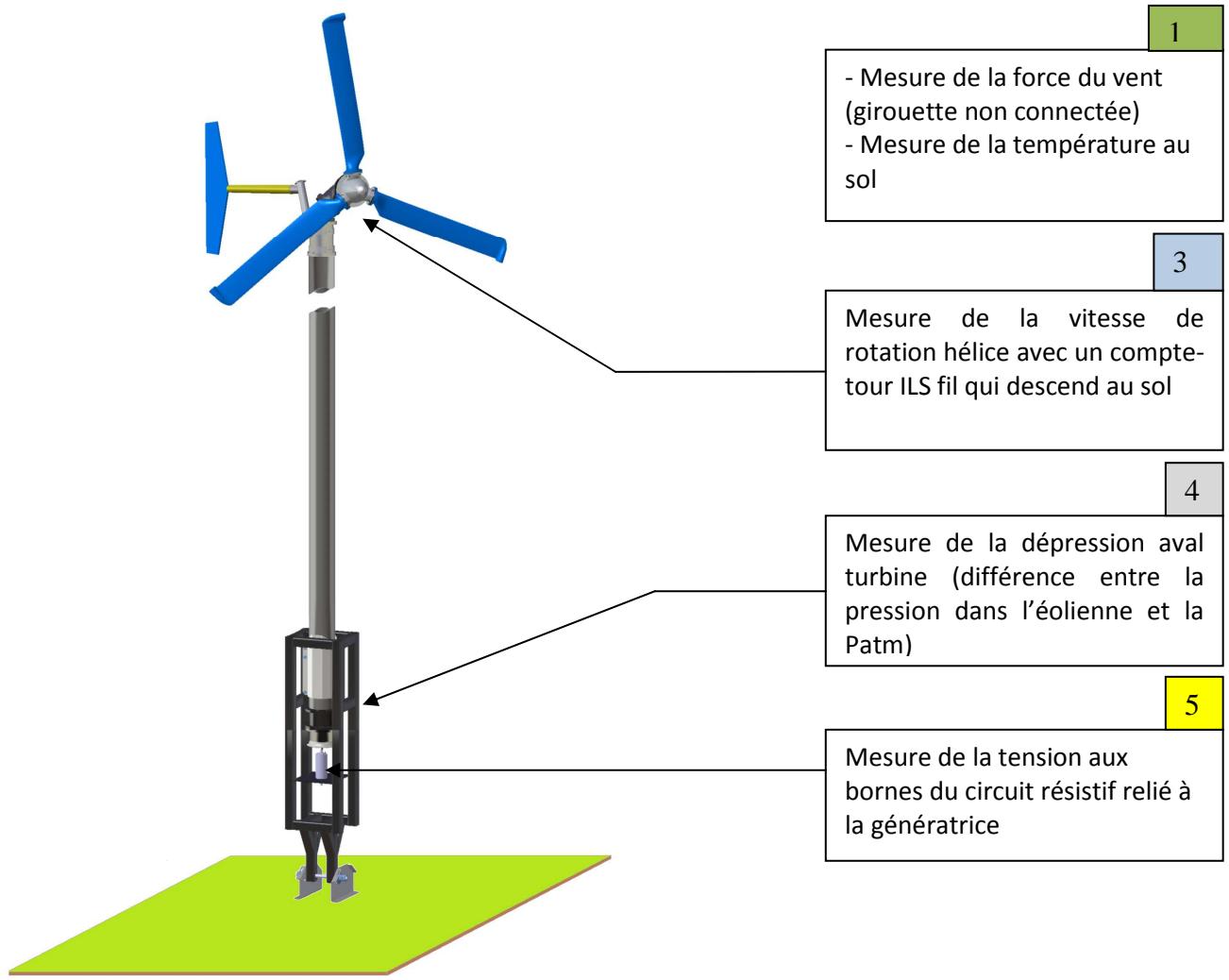
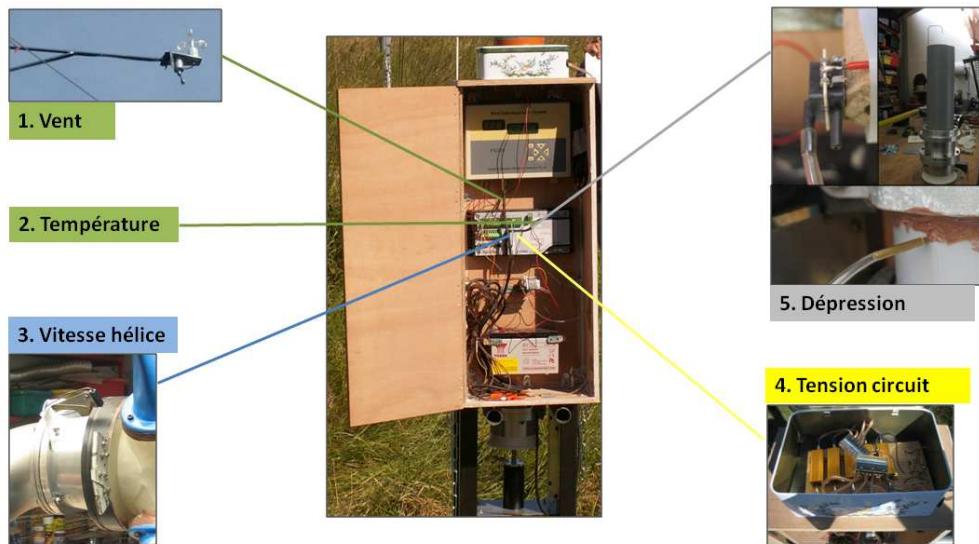


Figure 1 : Liste des mesures effectuées sur le prototype en plein air

Paramètre mesuré	Capteur	But de la mesure
1. Force du vent	Anémomètre « chinois » Avec son boîtier afficheur Wind Data Acquisition System. Etalonné en soufflerie à Supaero.	La force du vent permet d'établir le rendement du système par rapport à la puissance incidente, et d'évaluer le coefficient de poussée hélice par détection du début du furling
2. Température	Prise automatique dans le datalogger CR800	La température, alliée à la pression de référence, donne la masse volumique de l'air
3. Vitesse de rotation hélice	Capteur ILS avec 4 aimants pour mesurer à plus de 1000 RPM	La vitesse hélice est utilisée pour le rendement hélice, mais aussi pour adimensionner la dépression et remonter au débit
4. Dépression interne	Prise Pitot interne et comparaison à Patm avec un capteur HDOM050	Associée à la vitesse hélice, elle permet de remonter au débit et donc au fonctionnement de la pompe
5. Tension circuit	Pont diviseur sur le circuit et envoi direct au datalogger	Cette tension donne à la fois la puissance électrique et la vitesse turbine/générateur

Toutes les mesures sont séquencées par un datalogger CR800 qui prend les valeurs toutes les 6 secondes et enregistre les points toutes les minutes en faisant la moyenne des 10 derniers échantillons.



**Figure 2 : Le boîtier contenant le datalogger (au milieu), sa batterie d'alimentation ainsi que le boîtier anémométrique. Le circuit résistif branché sur le génératrice est situé dans la petite boîte blanche.**

Remarques :

- Il n'a pas été jugé utile de connecter la girouette, elle n'était montée que pour analyse visuelle. L'ensemble anémomètre-girouette était fixé à environ 10m au dessus du sol.
- L'absence de mesure de  $P_{atm}$  n'est pas vraiment gênante pour la mesure de la masse volumique de l'air, la température étant la principale cause de variation. En prenant une pression de référence de 1013.25 hPa l'erreur est en général inférieure à 1%.
- Pour l'ILS compte-tour nous avons été obligé de mettre 4 aimants sur le rotor pour élargir le signal. En effet le datalogger possède un filtre anti-rebond (passe-bas) réglé à 3ms, qui annulait le signal de l'ILS dès que l'hélice atteignait une certaine vitesse.
- Pour la dépression, la prise Pitot (au milieu de la section, dirigé vers le bas) a été mise en aval de la turbine pour pouvoir calculer le rendement en air prenant en compte les pertes de charge du système. Ces dernières ont été évaluées grâce à la connaissance du débit et aux résultats soufflerie.
- Enfin le circuit était constitué de 5 résistances 56 Ohms 50W montées en parallèles. Le nombre de résistances connectées était un degré de liberté du système. Un pont diviseur garantissait une tension envoyée au datalogger inférieure à 5V.
- La prise de tension sur le circuit permet de remonter à la puissance par la formule  $P=U^2/Req$ , et à la vitesse de rotation moteur par la connaissance de son  $Kv$  (RPM/Volt), donné par le constructeur et re-mesuré sur banc.

### 3. RESULTATS OBTENUS

Comme il est expliqué dans l'introduction de ce document, les résultats ont été obtenus en deux temps. Un premier ensemble de mesures a été pris pendant les deux jours qui ont suivi le montage, par vent Ouest/Nord-ouest. Suite à un problème rencontré sur la mise en drapeau, qui empêchait la dérive de revenir à sa position neutre, l'éolienne a été démontée une semaine puis remontée pour 5 jours de mesures par vent Est/Sud-est.

Il va de soi que quelques jours de mesure sont insuffisants pour caractériser le comportement d'un système éolien. Les résultats suivants ne donnent que des tendances. Ils ne permettent pas, notamment, d'avoir du recul sur la turbulence du vent en fonction de sa direction dominante. Il est apparu aux essais fumigène que le vent Est/Sud-est qui nous a donné toutes nos mesures était particulièrement turbulent. Aussi des mesures plus fines du vent sont indispensables pour mieux apprécier les points de fonctionnement obtenus, et les ramener à un niveau de turbulence standard.

**Rappel :** rendement mécanique = rendement hélice x rendement pompe x rendement turbine

#### *L' hélice tripale*

Rappelons que la puissance développée par l'hélice est calculée à partir de sa vitesse de rotation (mesurée) et du débit d'air qu'elle parvient à éjecter (évalué à partir de la mesure de la dépression, de la vitesse hélice et des résultats soufflerie, voir plus haut). Le  $C_p$  hélice que nous avons obtenu est à peu près celui des éoliennes de la même taille sur le marché.

Toutefois il constitue la principale déception car il se situe à 30% voire 40% en dessous de sa valeur théorique de conception, censée atteindre quasiment 0.5 à 7m/s. Cette valeur peut sembler élevée pour une éolienne si petite, mais elle prend en compte un phénomène négligé jusqu'alors : le frottement du vent sur le sillage aval de l'éolienne (théorie développée par Jean Andreau).

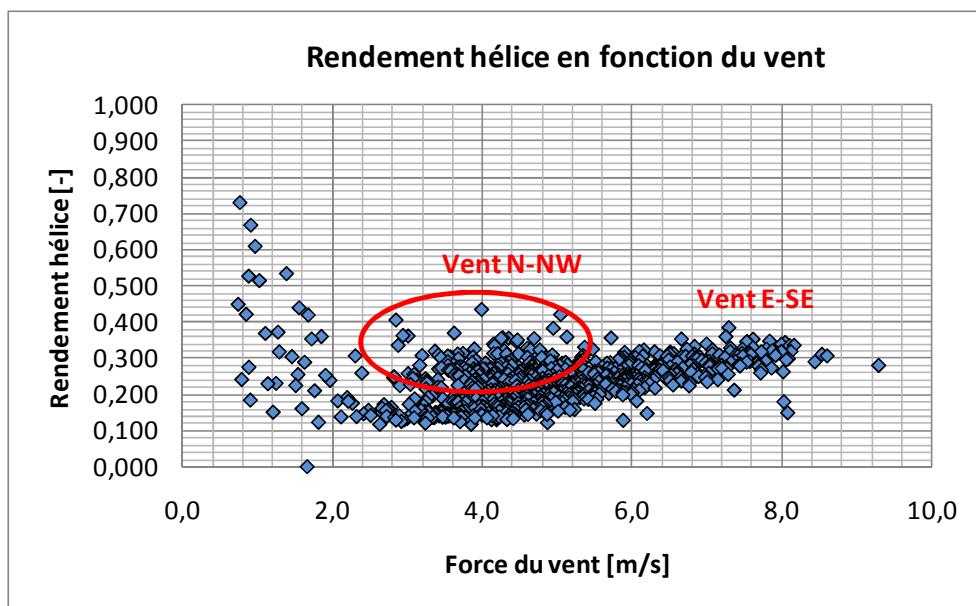


Figure 3 :  $C_p$  hélice obtenu sur site, toutes mesures confondues

On note cependant une différence entre les points réalisés par vent d'ouest, et les points réalisés par vent d'Est. Un effet de la turbulence ?

Voici selon nous les points qui peuvent expliquer cet écart du  $C_p$  hélice relativement au calcul:

- Des pales plus épaisses que ce qui a été fixé à la conception (15% en bout de pale au lieu de 12%)
- Une impossibilité de tester plusieurs calages sur site pour identifier le calage optimum
- Enfin une turbulence vraisemblablement élevé, d'autant plus néfaste que l'éolienne est petite (influence sur le  $C_x$  inversement proportionnelle à la corde de la machine, d'après une étude de Jean Andreau) -> à démontrer avec une analyse plus fine du vent.

Concernant le régime de rotation, les essais ont confirmé l'excellente régularité de la machine avec un TSR de l'hélice quasiment constant quoi qu'il se passe en bas. Ce point est favorable à l'usure mécanique des pales. Voici les graphes obtenus :

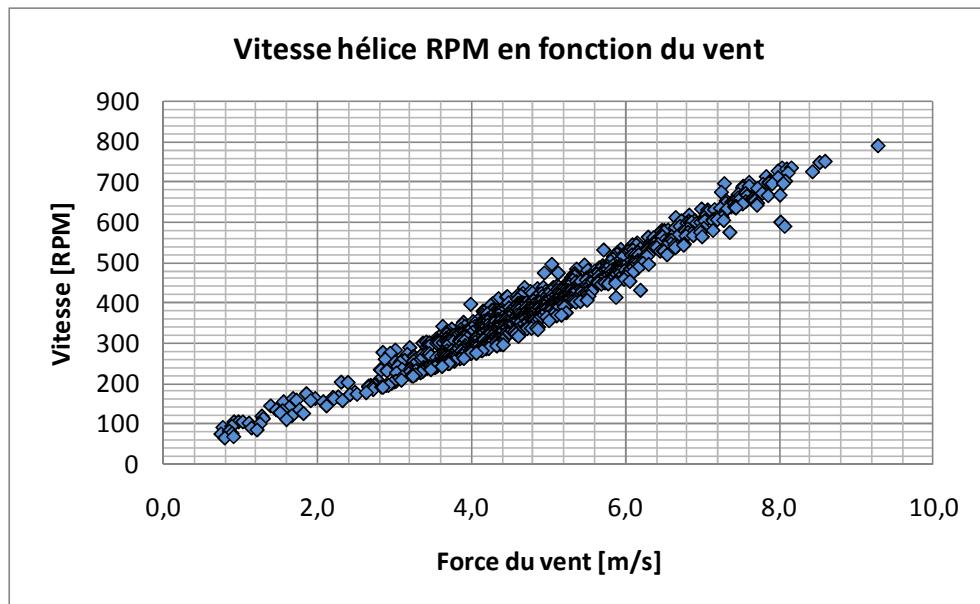


Figure 4 : Vitesse de rotation de l'hélice de l'éolienne en fonction du vent

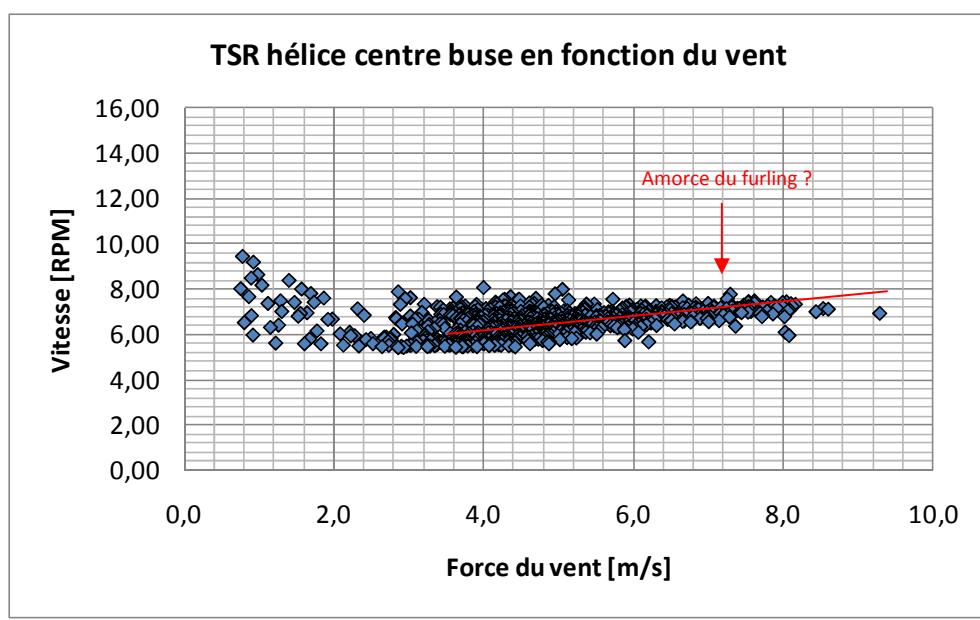


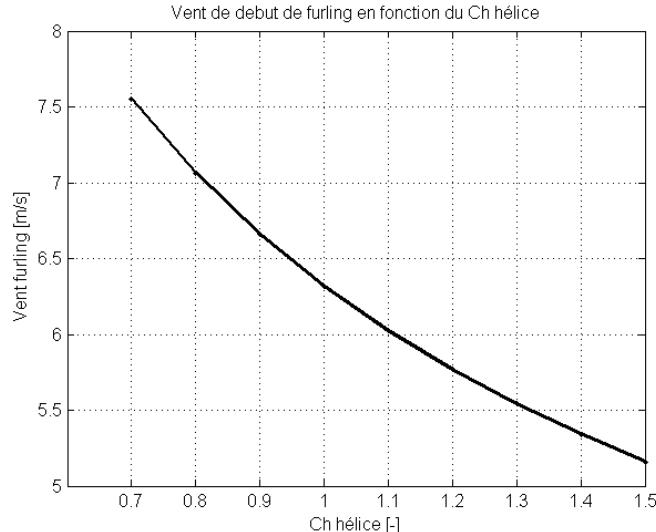
Figure 5 : TSR (Tip Speed Ratio, ou vitesse spécifique) de l'hélice en fonction du vent

L'augmentation légère du TSR avec la vitesse du vent avait été observée en soufflerie. Elle ne vient donc pas a priori d'une diminution de l'intensité de turbulence du vent. Elle est causé selon nous par une diminution du  $C_x$  des profils qui vient elle-même de l'augmentation du nombre de Reynolds (l'hélice tourne plus vite). Rappelons que dans le cas de l'éolienne à dépression le  $C_p$  de pale est proportionnel au cube du TSR.

Il semble que le furling n'ait pas fonctionné comme prévu. Il avait été dimensionné pour commencer à agir vers 6m/s de vent, afin de protéger le prototype lors des premières sorties. Or l'éolienne a subi l'avant-dernier jour des rafales à plus de 9m/s sans que l'on ne voit grand-chose au niveau furling... Il est possible qu'un phénomène de « grippage » soit à l'origine du problème, le tube pivot étant d'un diamètre conséquent (par rapport à une conception Piggott par exemple) pour laisser passer l'air.

Ainsi on n'a pas pu mesurer le fameux coefficient de poussée  $C_h$  de l'hélice en plein air... Pour rappel la théorie de Betz le limite à 1 (et le situe à 0.9 au rendement optimal), nous avions mesuré 1.5 en soufflerie, et le  $C_h$  de conception de cette hélice est 1.15 (en lien avec la théorie de Jean Andreau sur la complémentation du théorème de Betz par le frottement sur le sillage).

Connaissant parfaitement le bras de levier de notre hélice et le couple à vaincre pour soulever la dérive autour de son pivot, nous avions préparé ce graphe pour évaluer la poussée :



**Figure 6 : Vent où devait débuter le furling du proto en fonction du coefficient de poussée  $C_h$  de l'hélice**

La courbe donnant le TSR hélice mesuré en fonction du vent (fig5) ne permet pas d'identifier clairement un vent de début de furling, et donc un  $C_h$  hélice. On voit un décrochage autour de 7-8m/s, mais ça signifierait un  $C_h$  d'environ 0.7, qui paraît un peu bas ! Problème de grippage ? Mauvais calage de pale ? Il aurait fallu creuser !

Remarque : la conception de notre furling, au niveau des angles, est en tout point identique à la conception Piggott. Dans cette conception le couple de rappel sur la dérive augmente pendant 40deg de débattement, puis diminue.

**En conclusion :**

Une hélice qualitativement excellente, avec le TSR constant prévu par la théorie, mais un peu décevante au niveau du  $C_p$ , sans que l'on sache si c'est imputable à son épaisseur plus grande que prévue, à la turbulence exagérée du vent, ou à un calage de pale non optimum.

## La pompe éolienne

La puissance fournie par l'hélice est utilisée pour pomper l'air dans l'éolienne. On récupère ainsi une dépression et un débit, dont le produit représente une certaine puissance en air, nécessairement inférieure à la puissance donnée par l'hélice (pertes cinétiques par éjection d'air + pertes de charge internes). On définit donc le rendement de pompe du système, qui est la puissance en air obtenue au pied du mât divisée par la puissance donnée à l'écoulement par l'hélice.

Définition : Si on note  $Dep$  la dépression créée dans l'éolienne,  $Q$  le débit d'air volumique,  $U$  la vitesse périphérique du bout des pales,  $\rho$  la masse volumique de l'air et  $\Sigma$  la somme des sections de sortie des buses en bout de pale, on peut définir  $a$  et  $b$  les coefficients sans dimension de dépression et de débit, de la manière suivante :  $Dep = a \cdot \rho \cdot U^2$  et  $Q = b \cdot \Sigma \cdot U$ .

Remarque : Deux éolienne à dépression homothétiques fonctionneront avec la même vitesse linéaire en bout de pale  $U$ , et les mêmes coefficients dépression/débit  $a$  et  $b$ . Ainsi les dépressions obtenues en Pa seront les mêmes, par contre le débit d'air augmentera proportionnellement au carré du diamètre, via le paramètre  $\Sigma$ .

Voici maintenant les résultats obtenus sur site avec notre prototype. Rappelons que la dépression est effectivement mesurée, mais que le débit est déduit par le calcul grâce aux résultats soufflerie.

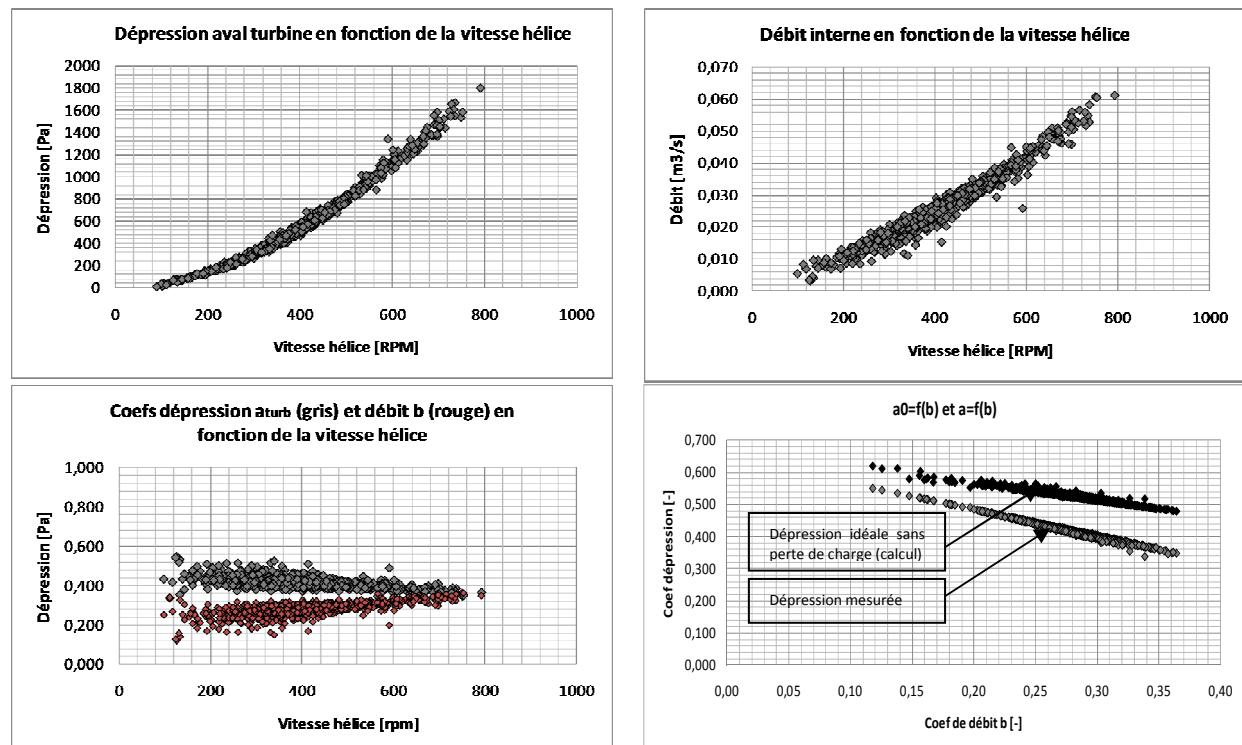


Figure 7 : Dépression mesurée en fonction de la vitesse hélice (en haut, à gauche) / Débit – déduit soufflerie- en fonction de la vitesse hélice (en haut, à droite) / Coefficients de dépression et de débit en fonction de la vitesse hélice (en bas, à gauche) / Coefficients de dépression idéal – sans perte de charge - et mesuré en fonction du coefficient de débit (en bas, à droite)

On vérifie bien, conformément à la théorie des pompes centrifuges, et à ce qui avait été observé en soufflerie, que la dépression évolue avec le carré de la vitesse de rotation hélice, alors que le débit lui est sensiblement proportionnel (aux effets Reynolds près).

A 600 RPM hélice, (environ 6m/s de vent) on a à peu près 1100 Pa de dépression pour 0.04 m<sup>3</sup>/s de débit d'air.

A noter, sur la dernière courbe, la différence entre la dépression idéale calculée sans perte de charge, et la dépression mesurée. L'écart se creuse à mesure que le débit augmente, puisque les pertes de charge sont de plus en plus importantes.

Enfin, voici ci-dessous la courbe à retenir : celle du rendement de pompe de l'éolienne en fonction du débit d'air qui la traverse. Comme les courbes précédentes montrent que le paramètre de débit  $b$  se stabilise vers 0.35 quand l'hélice tourne bien, on a bien une maximisation du rendement de pompe : un débit plus faible donne un rendement de pompe inférieur, et un débit plus fort (invisible sur ce graphe) fait chuter ce dernier à cause des pertes de charge qui augmentent avec le carré de la vitesse de l'écoulement. Cette stabilisation du débit à  $b=0.35$  indique que la turbine a été bien conçue car elle place la pompe éolienne sur le bon point de fonctionnement débit/dépression.

Le rendement de pompe se stabilise donc autour de 0.46 pour notre machine. Si nous n'avions aucune perte de charge interne nous aurions 0.62. Pourquoi pas 1 ? Parce que de l'air est éjecté en bout de pale, et que c'est une perte cinétique pure. Une optimisation serait à mener au niveau de la pompe éolienne pour éléver ce point 0.62, et travailler à des débits inférieurs tout en gardant un bon rendement théorique.

Quoi qu'il en soit, notre éolienne à dépression dissipe 54% de l'énergie donnée par les pales pour créer l'écoulement d'air qui sera récupéré par la turbine. C'est le poste principal d'amélioration.

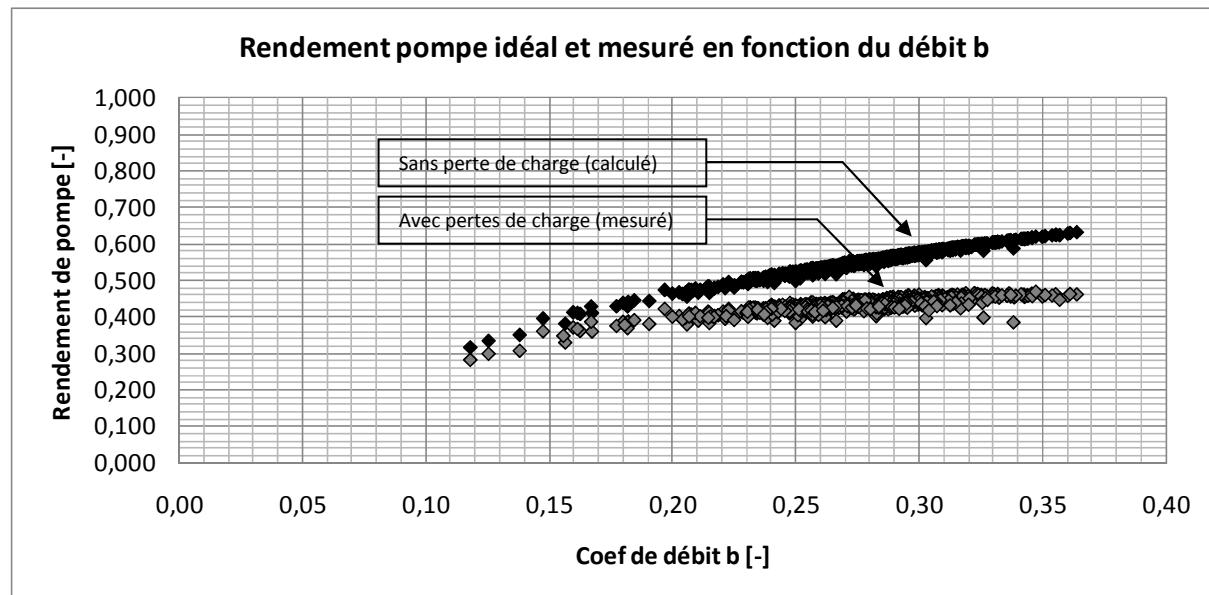
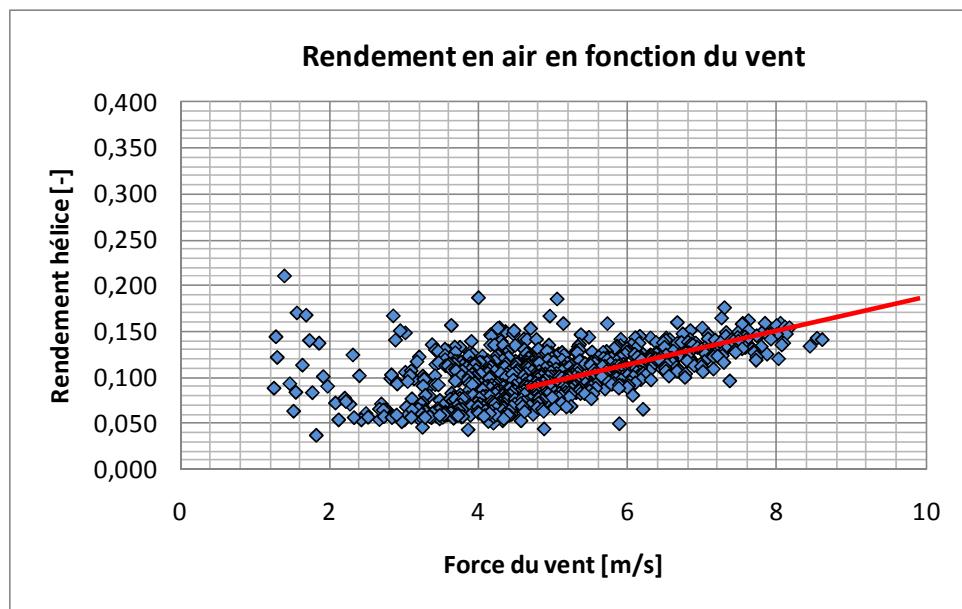
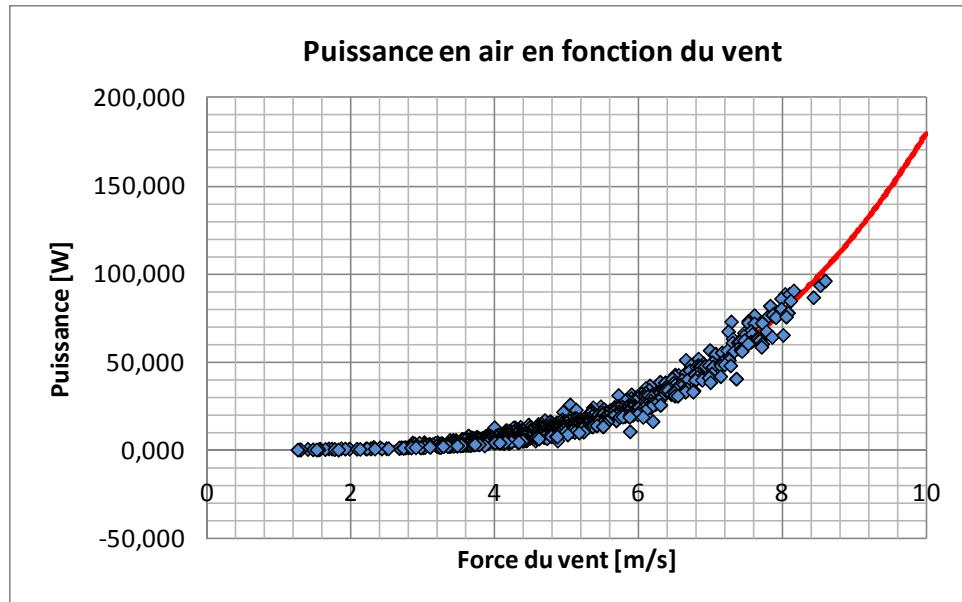


Figure 8 : Rendement de pompage du système (idéal, sans perte de charge en noir), et mesuré/calculé en gris. Ce Rendement est à multiplier par le  $C_p$  hélice pour avoir le rendement en air disponible à la turbine.

## La puissance en air disponible à la turbine

Puisqu'on connaît le  $C_p$  hélice et le rendement de pompe, il ne reste qu'à les multiplier entre eux pour avoir la puissance en air disponible à la turbine (si l'on mesurait le débit volumique d'air, cette puissance serait directement connue en multipliant ce débit par la dépression aval turbine) :



Cette courbe de puissance en air suit bien la cubique du vent, avec un  $C_p$  hélice qui varie peu (hors des effets Reynolds) et un rendement de pompe quasi-constant autour de 0.45. L'influence du  $C_p$  hélice se fait sentir sur le rendement en air, puisque celui-ci augmente avec le vent, avec une projection à 0.18 pour 10m/s de vent ( $0C_p$  hélice \* rdt pompe =  $0.4 \cdot 0.45 = 0.18$ ).

Voyons maintenant le dernier élément de la chaîne : la turbine.

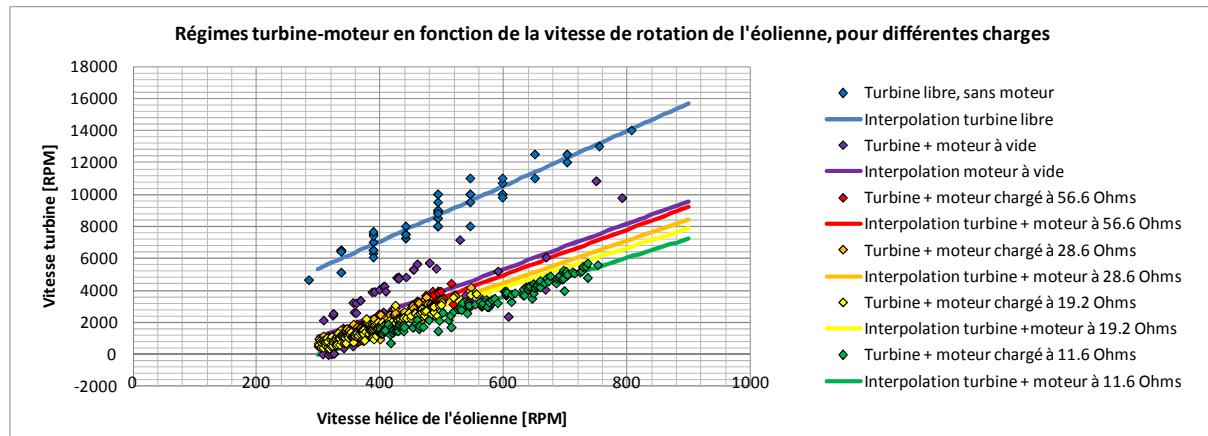
## Le groupe turbine/générateur

La mesure de la puissance disponible sur l'arbre turbine était faite au moyen d'une génératrice électrique à courant continu, fournissant, selon le constructeur, 200W électrique à 5400 tours/min avec 75% de rendement.

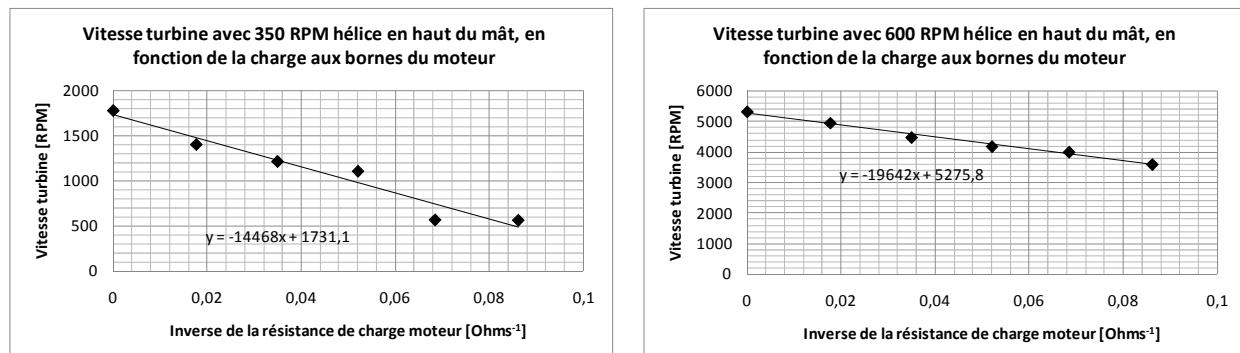
Comme évoqué plus haut, cette génératrice s'est avérée un mauvais moyen de mesurer la puissance turbine. C'était à prévoir, étant donné le régime nominal plus élevé de la turbine à ces puissances, mais nous n'avions pas de meilleur choix étant donné le budget restant. Il aurait sans doute fallu se tourner vers un moteur brushless de plus faible puissance et tournant plus vite.

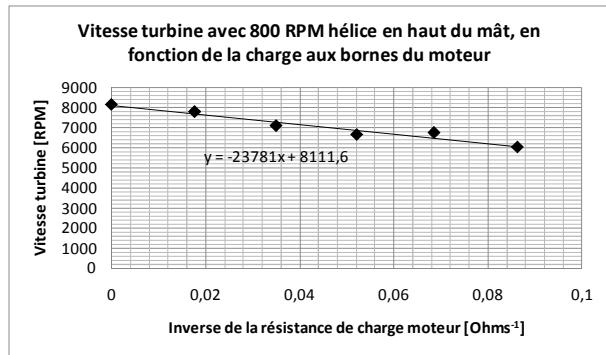
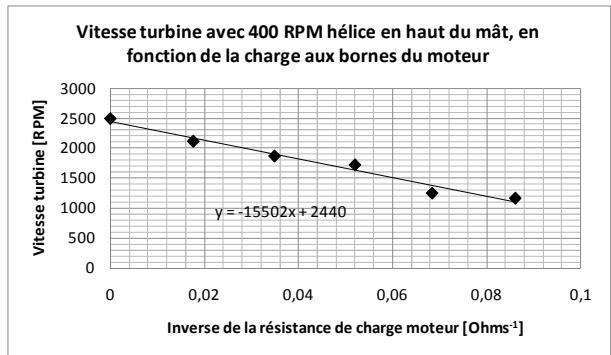
Toutefois, grâce aux nombreuses mesures faites avec différentes charges aux bornes de la génératrice, et à une mesure « turbine libre », nous avons pu remonter à la perte moteur en frottement+pertes joules. Plus précisément, nous avons pris un coefficient  $\alpha$  défini par  $P_{perte}[\text{Watt}] = \alpha \cdot \Omega^2$  avec  $\Omega$  la vitesse de rotation du moteur. Le but était alors de trouver la valeur de ce coefficient, pour quantifier les pertes et remonter à la puissance turbine.

Pour cela nous avons tracé les régimes de vitesse obtenus à la turbine en fonction du régime de l'éolienne, pour différentes charges moteur (y compris moteur à vide) et même sans moteur (turbine totalement libre). Le graphe suivant présente les résultats obtenus :



Ce qui nous a mis la puce à l'oreille est la différence flagrante de vitesse entre le cas « turbine libre » et le cas « turbine+moteur non chargé » :quasiment un facteur 2, ce qui signifie que sans même produire un seul W de courant, la génératrice par son frottement amène la turbine à régime nominal. Nous avons vérifié l'aspect physique de ces courbes en nous plaçant à certaines vitesses de l'éolienne : 350 RPM, 400 RPM, 600 RPM et 800 RPM et en traçant les valeurs de vitesse lues sur les droites interpolées en fonction de la charge moteur. Les courbes sont parfaitement régulières :





La raisonnement est ensuite le suivant : pour entraîner le moteur à une vitesse  $\Omega$ , la turbine doit fournir la puissance électrique mesurée + les pertes moteur (mécaniques et joule) :

$$P_{turb} = \frac{U_{circuit}^2}{R_{circuit}} + \alpha \cdot \Omega^2 = U_{circuit}^2 \cdot \left( \frac{1}{R_{circuit}} + \alpha \cdot K_v^2 \right)$$

avec  $K_v$  la constante de vitesse moteur ( $K_v = 244$  RPM/Volt à vide et  $K_v = 263$  RPM/Volt chargé avec 11.6 Ohms, résultats de tests sur banc. Evolution supposée linéaire entre ces deux valeurs).

Lorsqu'on se donne une valeur de  $\alpha$ , on est donc capable de tracer la puissance turbine en fonction de sa vitesse, pour chaque vitesse de rotation de l'éolienne. Ce qui va nous permettre de conclure est l'ajout de 2 points particuliers :

- Le point ( $\Omega=0, P_{turb}=0$ ) qui est évident : si la turbine ne tourne pas elle ne génère aucune puissance
- Le point ( $\Omega=\Omega_{libre}, P_{turb}=0$ ) : lorsque la turbine n'est pas accouplée au moteur, elle accélère jusqu'à atteindre sa « vitesse libre », vitesse à laquelle, par définition, elle n'offre plus aucune puissance sur son arbre

L'idée est alors de trouver le coefficient de perte  $\alpha$  qui donne les courbes de puissance turbine les plus régulières possibles. Voici 2 contre-exemple avec un  $\alpha$  trop faible, et un  $\alpha$  trop fort

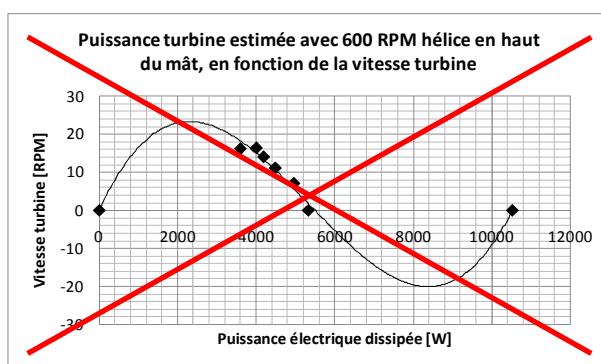


Figure 9 :  $\alpha=0$ , valeur trop faible, le point « turbine libre » (le plus à droite) n'est dans la continuité des autres points.

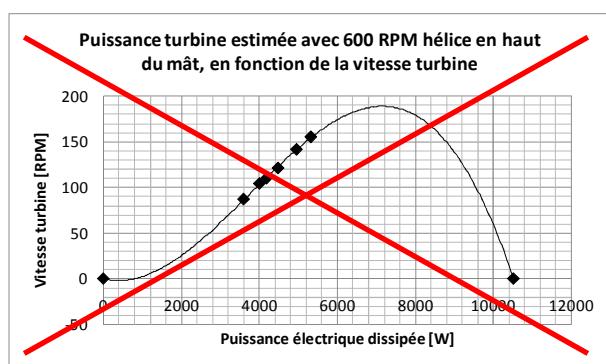
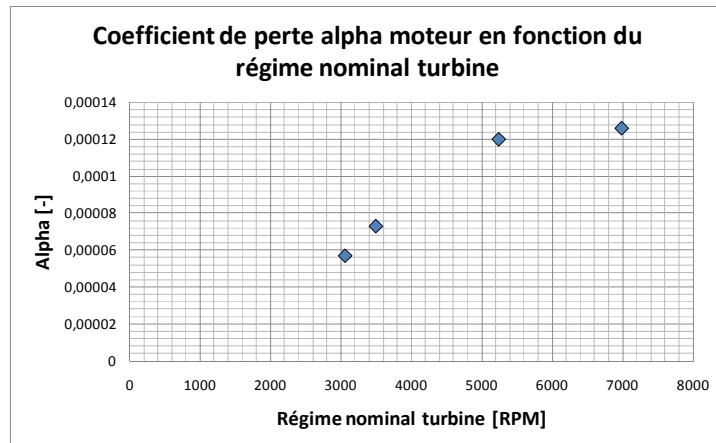


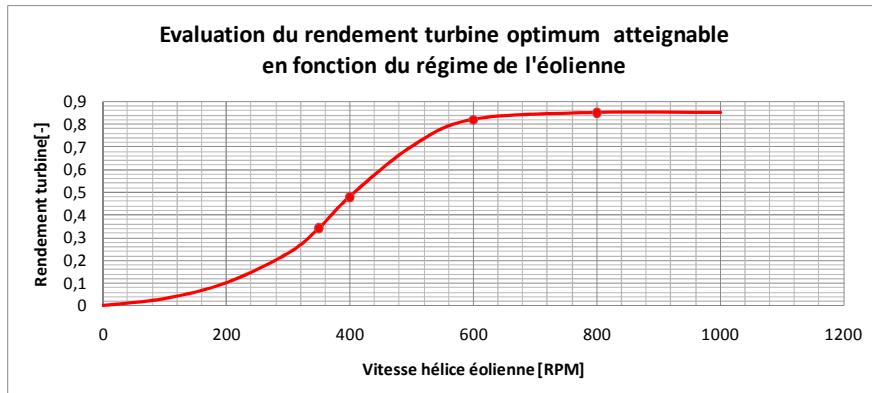
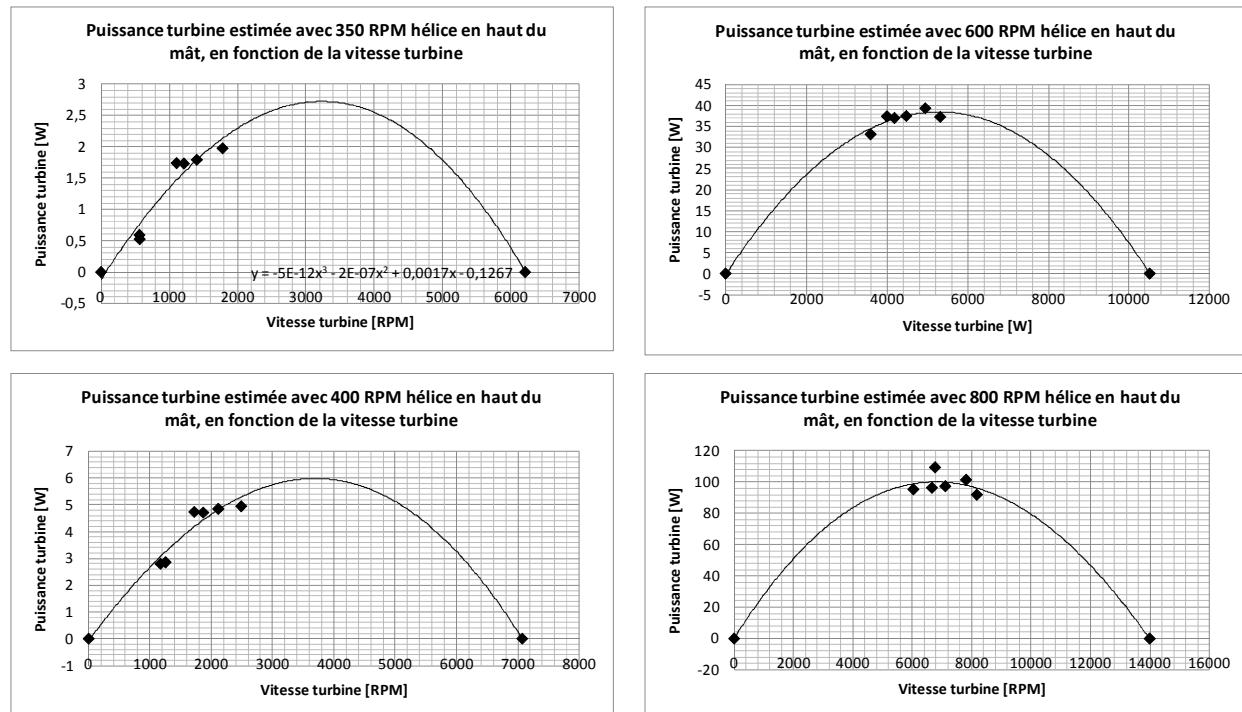
Figure 10 :  $\alpha=0.0005$ , valeur trop forte, le point de puissance nulle (le plus à gauche) n'est pas dans la continuité des autres points.

Pour trouver la valeur référence de  $\alpha$ , nous nous sommes aussi reposé sur la donnée constructeur : 75% de rendement en génératrice à régime nominal, c'est-à-dire  $0.25 \cdot 200 = 50$ W de pertes à 6000 RPM moteur. Cela donne  $\alpha = 50 / (6000 \times 2\pi / 60)^2 \approx 0.00012$  W/[rad/s]<sup>2</sup>. A partir de cette valeur et de la

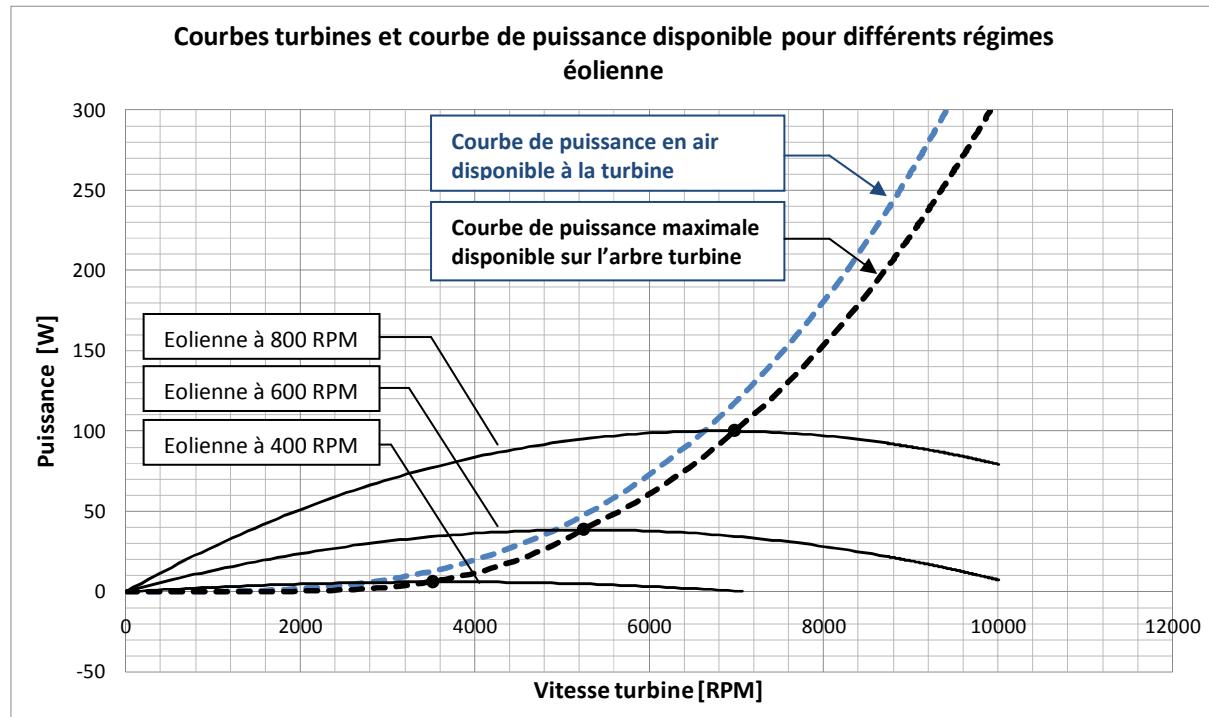
courbe de rendement en air on a pu extrapolier une courbe de rendement turbine, et donc les valeurs de  $\alpha$  aux différents régimes. Voici ce qu'on a obtenu :



Cette valeur donne des courbes de puissance turbine obtenues ont une allure physique, avec une vitesse libre sensiblement égale au double de la vitesse nominale:



Certes le modèle de perte est sans doute trop simple, et ne rend peut-être pas exactement compte de la réalité. Mais il permet à l'ordre 1 de rendre cohérentes toutes les mesures, à la fois en terme de courbe de puissance turbine, et de perte annoncée par le constructeur.

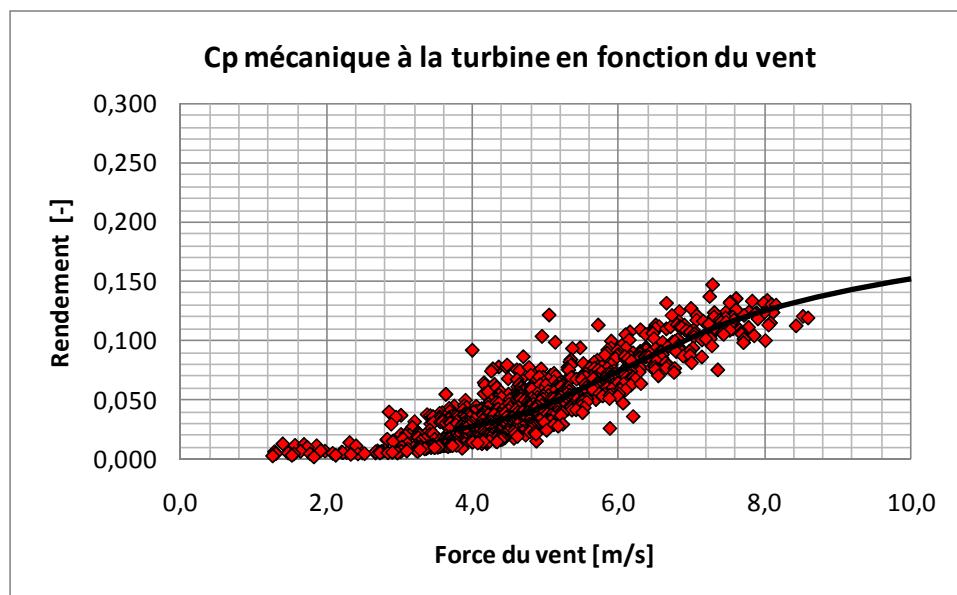
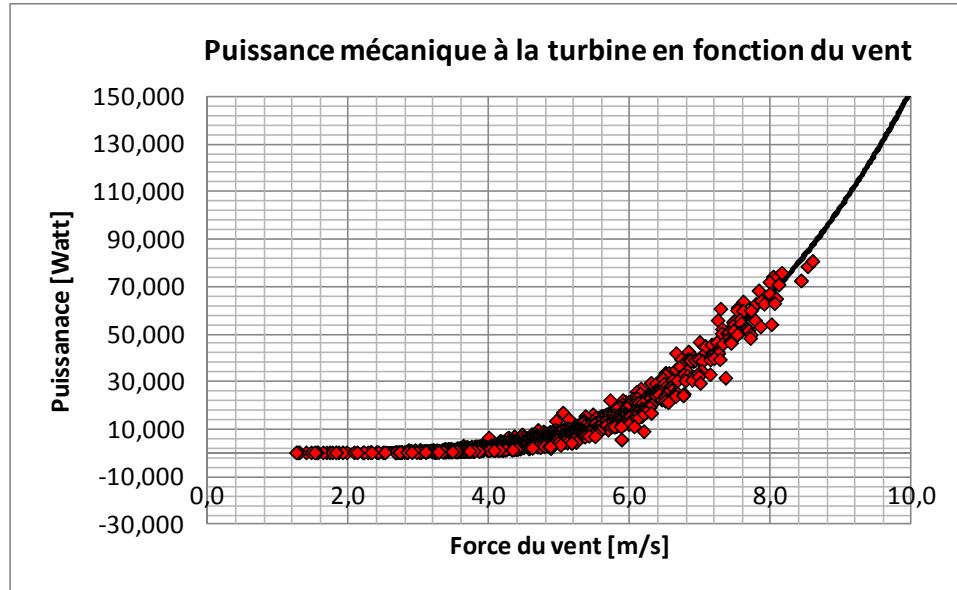


#### Conclusion sur le fonctionnement turbine:

- Les courbes de puissances de la turbine sont bien plus plates qu'une courbe de puissance d'hélice tripale. Ainsi, en plus de constituer un multiplicateur pneumatique, la turbine élargit la zone de fonctionnement du système : sur la courbe de puissance turbine à 800 RPM éolienne (ci-dessus), on voit qu'à la moitié de la vitesse nominale 7000 RPM turbine, soit 3500 RPM, on a encore 70% de la puissance sur l'arbre.
- Le rendement atteint de 85% au point nominal, est excellent et reflète le soin qui a été porté aux aubes, en terme de conception globale mais aussi de vrillage et d'habillage Naca.

## Courbe de puissance et rendement global

A partir de la courbe de puissance en air au pied du mât, et de l'estimée de la courbe de rendement turbine, on peut enfin tracer la courbe de puissance mécanique de notre éolienne, disponible sur l'arbre turbine. On en déduit le Cp global associé :



On obtient, en extrapolant, 150 Watts mécaniques à 10m/s de vent, sur l'arbre turbine (à condition que le furling se déclenche à un vent supérieur). Puisque la puissance interceptée par l'éolienne est à l'infini amont  $0.5 \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 = 0.5 \times 1.18 \times \pi \cdot 1.5^2 / 4 \times 10^3 \approx 1000W$ , cela nous donne un Cp mécanique global de 0.15.

La courbe de puissance correspond globalement à celle d'une éolienne classique d'1m à 1m20, selon le modèle, si tant est que l'on puisse comparer un Cp mécanique à un Cp électrique. C'est un résultat encourageant sachant que notre prototype d'1m50, très léger, est équivalent, d'un point de vue masse en haut du mât, à une éolienne de cette taille (une dizaine de kilos). Autrement dit nous

obtenons le même ratio Puissance/Masse qu'une éolienne classique, tout en ayant l'énergie disponible sous forme mécanique au pied du mât.

Bien entendu la poussée de notre machine est équivalente à celle d'une éolienne d'1m50, et nous savons que cette grandeur est le paramètre principal dimensionnant le mât, donc un contributeur non négligeable dans le prix de l'installation. Mais la simplicité mécanique de notre éolienne, la fiabilité de son fonctionnement pneumatique, la possibilité de l'installer sur un mât très élevé, en fait à notre avis une candidate sérieuse au pompage d'eau mécanique.

Comme il est difficile d'avoir des informations sur les rendements mécaniques des éoliennes multiples de pompage, effectuons la comparaison du  $C_p$  obtenu avec les  $C_p$  électriques de quelques petites éoliennes :

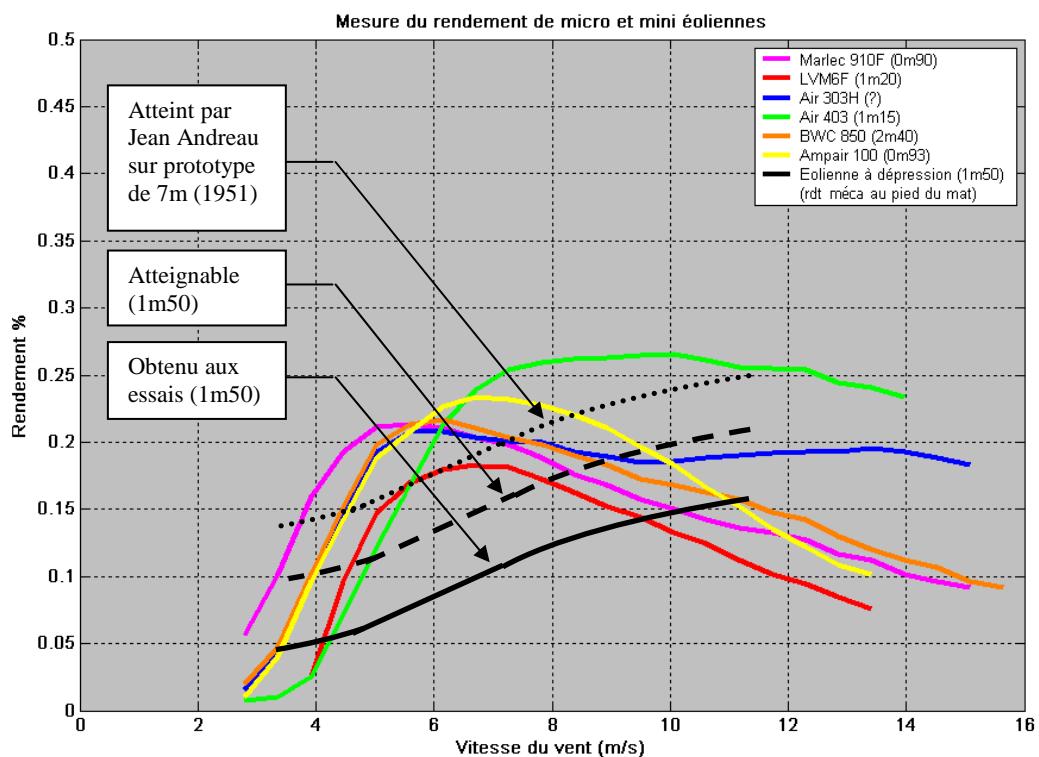


Figure 11 :  $C_p$  mécanique de l'éolienne à dépression comparé au  $C_p$  électrique de quelques petites éoliennes  
(source des  $C_p$  électriques : Le Grand Livre de l'Eolien, Paul Gipe)

Nous savons que notre éolienne n'est pas optimale car notre hélice n'est sans doute pas au meilleur calage, qu'elle est un peu épaisse au regard de la théorie (30% de trop en bout de pale), et que le vent à l'origine de ce résultat était hautement turbulent. Il semble raisonnable, en corrigeant ces points, qu'on atteigne des valeurs 30 à 35% plus élevées, c'est-à-dire qu'on obtienne une courbe de puissance équivalente à une éolienne de 1m30.

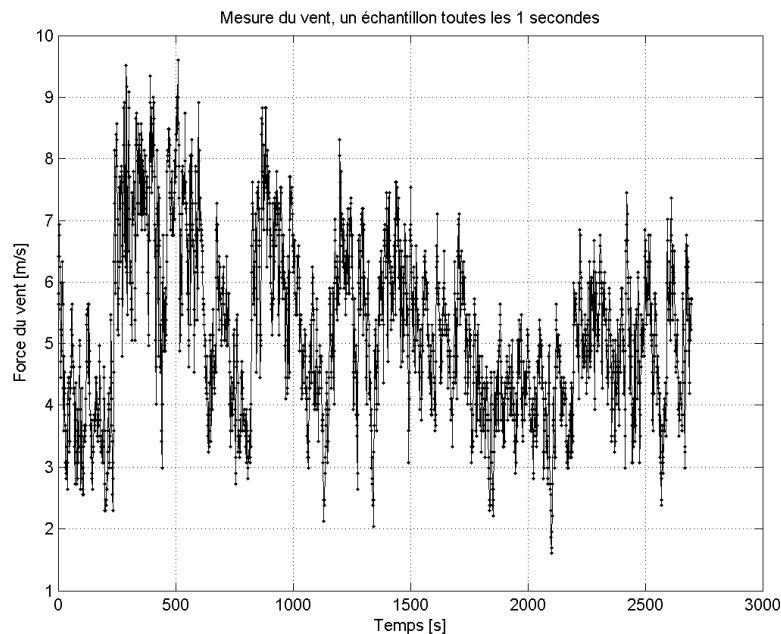
Rappelons ici que le compte rendu de test de Jean Andreau, après ses premiers essais à St Cyr en 1951 sur une machine de 7m de diamètre, atteste un rendement en air de plus de 0.28 à 10m/s de vent, soit un rendement mécanique à la turbine de 0.24. Il ajoute à ceci que les relevés de forme effectués sur les pales indiquent des gondolements et des profils non respectés le long de l'envergure, et affirme pouvoir atteindre 0.3 avec des profils respectés.

## **Mesure de turbulence du vent**

Comme évoqué plus haut, il a été remarqué par l'observation des rafales et de l'orientation de la girouette que le vent à la hauteur de l'éolienne était hautement turbulent.

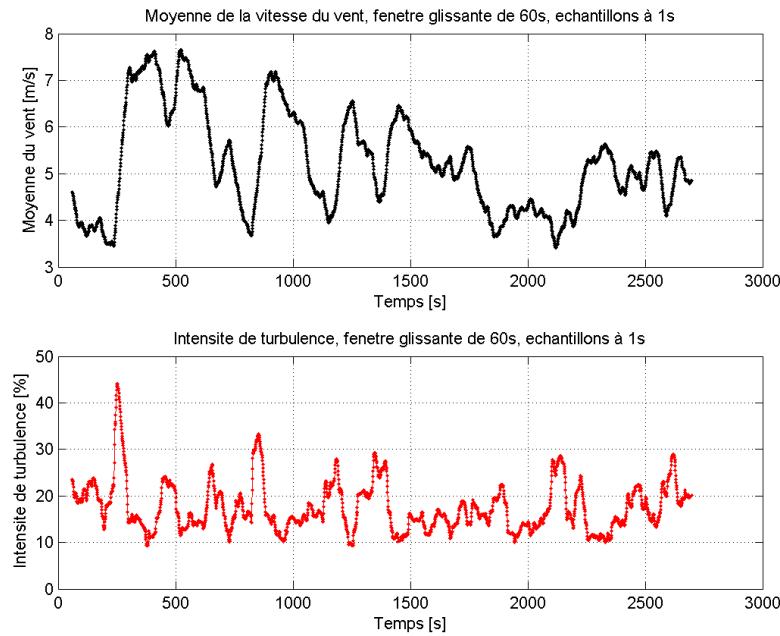
Les courbes de rendement hélice semblent montrer que le vent d'autan, E-SE, est plus turbulent sur ce site que le vent W-NW. Pourtant la mesure affinée du vent, utilisée pour calculer l'intensité de turbulence ci-dessous, a été faite par vent d'ouest, faute de mieux ! Ces mesures datent du 20 juillet 2011.

Voici comment nous avons procédé : le datalogger a retenu une mesure de vent toutes les secondes, pendant environ 45 minutes. Voici ces mesures :



**Figure 12 : Mesures de vent sur notre mât à 10m de haut, chez KrugSARL, le 20 juillet 2011**

Un post-traitement Matlab a ensuite été réalisé sur ces points pour calculer l'intensité de turbulence correspondante. On fait glisser une fenêtre temporelle de 60 secondes sur les mesures, et sur chaque fenêtre on calcule la moyenne du vent et l'écart type des 60 points autour de cette moyenne. Le rapport de ces deux grandeurs donne une valeur, qui est l'intensité de turbulence sur cette fenêtre. On décale ensuite la fenêtre d'un échantillon vers la droite (1 seconde), puis on recommence. On obtient ainsi une courbe temporelle donnant l'intensité de turbulence. Voici la courbe obtenue (en rouge) :



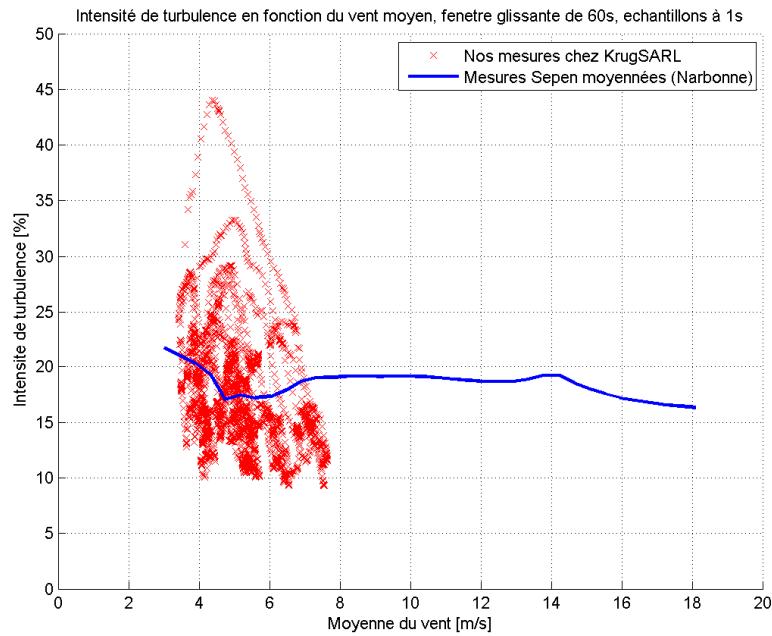
**Figure 13 : Calcul de la moyenne glissante du vent sur 60s et de l'intensité de turbulence associée**

Remarque : Pour évaluer la sensibilité à l'échantillonnage, nous avons tracé ces courbes en sous-échantillonnant la mesure à 2s et 6s. Les résultats obtenus sont quasiment identiques.

Cette courbe confirme l'importance de la turbulence sur notre site, puisqu'elle se situe autour de 20% pour un vent moyen de 5m/s, avec des pics à 30%. Un site est considéré turbulent au dessus de 15%.

On peut tracer, pour information, le nuage de point de l'intensité de turbulence en fonction du vent moyen afin de le comparer à la courbe faite au SEPEN sur leurs relevés de vent. Le Sepen est un site expérimental indépendant qui teste les petites éoliennes en France à Narbonne ([www.sepennarbo.fr](http://www.sepennarbo.fr)), et c'est un site réputé pour être particulièrement turbulent.

On constatera que le taux de turbulence moyen subi par notre éolienne est comparable à celui mesuré au Sepen, leur courbe passant à peu près au milieu de notre nuage de point (Figure 14).



**Figure 14 : Comparaison de nos points de turbulence avec la courbe moyenne caractérisant le site turbulent du Sepen à Narbonne**

On rappelle qu'il est vraisemblable que l'essentiel de nos mesures, faites avec un vent E-SE, ait eu lieu avec un vent encore plus turbulent. On rappelle aussi que la turbulence est très néfaste au  $C_p$  aérodynamique des hélices d'éolienne, d'autant plus que leur taille est faible. C'est une des raisons qui pourraient expliquer la faiblesse de notre  $C_p$  par rapport à ce que prévoyait la théorie.

## ***Essais fumigène***

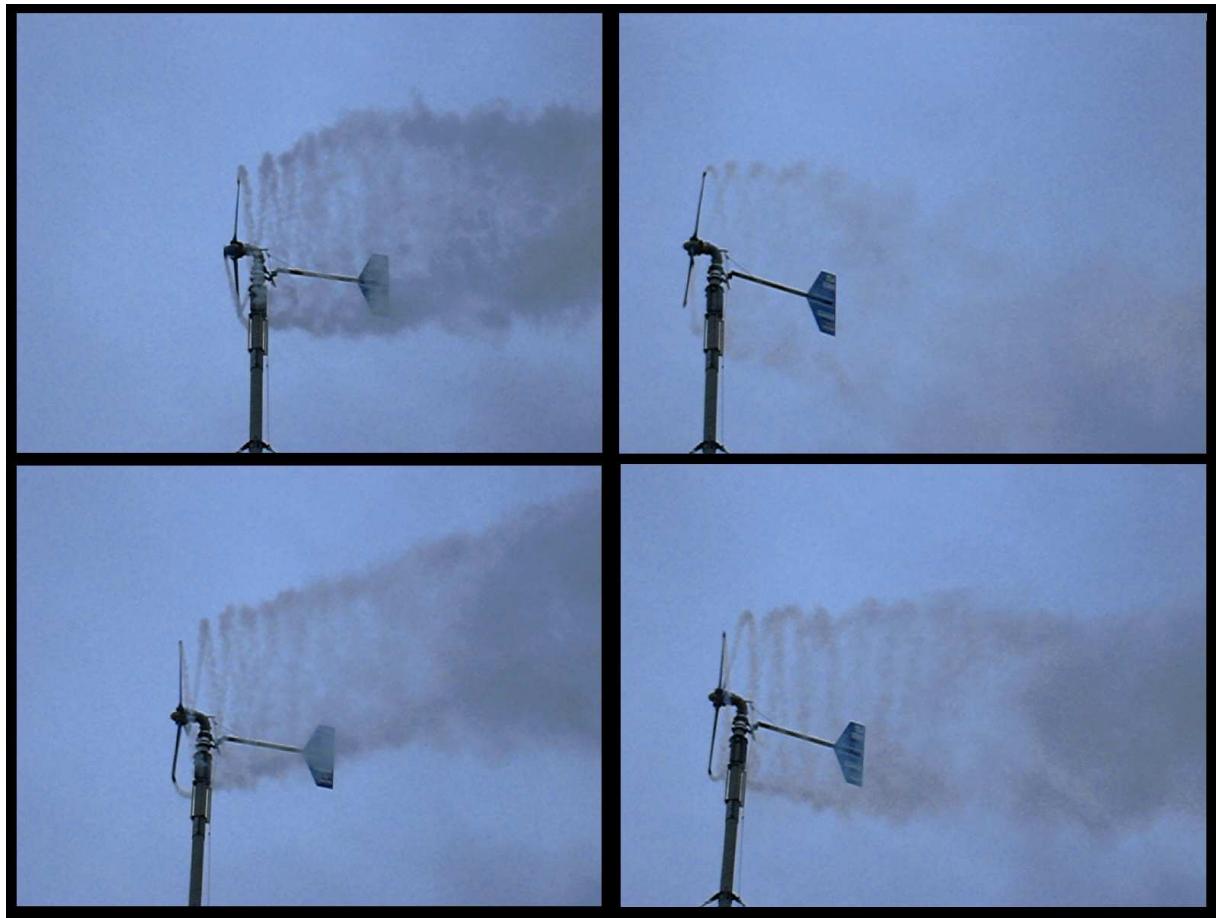
Pour appuyer ceci, et essayer d'observer la conicité du sillage remarquée par Jean Andreau, nous avons procédé à des essais fumigène en injectant de la fumée au pied du mât. Cette fumée est aspirée vers le haut et recrachée en bout de pale, montrant assez bien ce qui se passe en aval de l'hélice. Il peut être intéressant de voir à ce sujet les vidéos du site internet ([http://www.eolienne-a-depression.fr/index.php?option=com\\_content&view=article&id=83&Itemid=99](http://www.eolienne-a-depression.fr/index.php?option=com_content&view=article&id=83&Itemid=99), bas de la page). Nous nous contenterons ici de montrer quelques photos.

Les fumigènes employés n'étaient pas assez puissants, et la turbulence du vent, en plus de déformer terriblement le sillage, dissipait rapidement la fumée. On voit néanmoins quelques amorces coniques, montrant qu'il peut être intéressant d'étudier plus à fond la compléction du théorème de Betz avec la théorie du frottement sur le sillage, développée par Jean Andreau.



**Figure 15 : Prises de vue du sillage grâce aux essais fumigène, avec des phases de vent à peu près stabilisées (essais du 20 juillet 2011, vent d'ouest). On remarque sur certaines photo une légère conicité avant que la turbulence ne reprenne le dessus.**

On observait aussi surtout la turbulence importante du vent, qui projetait régulièrement le sillage vers le bas ou vers le haut, comme en témoigne cette séquence réalisée le 7 juin 2011 avec un fumigène « maison » :



**Figure 16 : Séquence fumigène montrant la turbulence du vent (essai du 7 juin, vent E-SE)**

Il aurait sans doute fallu insister un peu plus sur ces essais fumigène, avec des fumigène marins plus denses, et différentes orientations de vent. Il aurait même fallu refaire ces essais à 25m de haut pour avoir un vent plus laminaire, qui aurait permis de mieux observer le sillage.

Toutes les photos fumigène sont aussi en fin de galerie sur le site internet : [http://www.eolienne-a-depression.fr/index.php?option=com\\_phocagallery&view=category&id=11&Itemid=95](http://www.eolienne-a-depression.fr/index.php?option=com_phocagallery&view=category&id=11&Itemid=95).

Quoi qu'il en soit on a déjà quelques éléments avec les photos et vidéos réalisées, et on remarque déjà qu'on est assez loin du beau sillage de Betz que l'on voit souvent dans la littérature éolienne !

## Conclusion et perspectives

Résumons maintenant les résultats qualitatifs et quantitatifs obtenus concrètement lors des essais de notre prototype chez Krug :

- Une hélice libre en haut du mât, qui travaille à TSR constant (à l'augmentation près du Reynolds) quelle que soit la puissance prise à la turbine.
- Une turbine en pied de mât qui tourne environ 10 fois plus vite que l'hélice, constituant un multiplicateur naturel.
- Une turbine qui offre un couple maximum au démarrage et décroissant ensuite (vérifié à la main !), contrairement à l'hélice tripale qui a un couple au démarrage quasi nul au regard de son couple à vitesse nominale. Ce point est essentiel si l'on souhaite utiliser l'énergie mécanique en prise directe, et exploiter les faibles vents.
- Une turbine qui a une courbe de puissance bien plus plate que l'hélice tripale, offrant encore 70% de puissance si on la freine à la moitié de sa vitesse nominale.
- Un bruit turbine significatif (siflement) qui aurait pu être réglé par un éloignement roue mobile/distributeur.
- Un bilan de puissance vent->turbine un peu en deçà des attentes, notamment à cause du rendement hélice plus bas que prévu. Ce point peut s'expliquer par une épaisseur de pale trop importante (d'environ 30%), un calage de pale sans doute non optimal, et un vent très turbulent sur site. Quoi qu'il en soit notre éolienne d'1m50 fournit une puissance équivalente à une éolienne classique d'1m à 1m20, avec une masse similaire (environ 10kg).
- Nous pensons que notre éolienne peut concurrencer les traditionnelles éoliennes de pompage mécanique, car elle peut aller chercher le vent plus haut et offre une extrême souplesse de fonctionnement et d'utilisation de l'énergie, à régime constant.

Ces résultats incitent à la fois à tester la machine dans des vents plus réguliers et à optimiser le calage hélice en vent réel.

Les difficultés rencontrées pour trouver une génératrice électrique qui s'adapte au fonctionnement turbine en puissance/vitesse, vient de la petite taille de notre prototype. Une éolienne à dépression homothétique de 4m50 de diamètre fournirait une puissance typique d'1kW pour 2000 RPM turbine, ce qui offrirait de nombreuses solution pour la génération électrique ou l'utilisation mécanique en prise directe (compression d'air, pompage d'eau, etc.).

Il est à noter que l'augmentation de la taille de la machine augmentera nécessairement le rendement global, dans une proportion plus grande qu'une éolienne classique. En effet à l'augmentation classique du rendement hélice (augmentation du Reynolds donc diminution du  $C_x$  des profils, et sensibilité moindre aux turbulences), se rajoute dans notre cas l'augmentation du rendement de transmission (rendement de pompe + rendement turbine) par accroissement du Reynolds et augmentation des sections de passage.

Concernant les voies d'amélioration, il est clair que la voie principale est celle du rendement de pompe. Même sans perte de charge ce dernier est limité à 0.6 sur notre prototype, au débit où l'on travaille. Il conviendrait d'étudier un moyen d'augmenter cette limite théorique, en étudiant notamment mieux sur les sorties d'air en bout de pale.

Quoi qu'il en soit Le projet s'est avéré passionnant et nous sommes vraiment heureux de l'avoir mené à son terme, sans problème matériel majeur. La conception de cette éolienne est très intéressante car elle résulte d'un compromis subtil entre aérodynamique externe et interne. La récupération de l'énergie par la turbine doit aussi être optimisée pour faire travailler la pompe éolienne là où elle est efficace. Nous n'aurions pas obtenu tous ces résultats sans les nombreuses études et réalisations préalables de Jean Andreau.

Nous pensons aujourd'hui avoir « déterré » cette belle invention, et espérons qu'elle reprenne vie. A minima, ce système est d'un grand intérêt technique et pédagogique. Avec quelques efforts d'optimisation à mener, il pourrait même offrir, de manière industrielle, une solution élégante et robuste pour l'utilisation de l'énergie du vent sous forme mécanique.

---

