

Réalisation d'une éolienne  
**Laboratoire #1**  
Aérodynamique  
**Étude en soufflerie de la Air X**

**TCH098**  
**Rapport de laboratoire**

Nom

---

---

---

---

---

Groupe

Équipe

Note

Service des enseignements généraux  
Cheminement Universitaire en technologie  
Hiver 2009



Université du Québec  
École de technologie supérieure

Laboratoire conçu par Hugues Langlois et David Marche

**Version janvier 2009**

## TABLE DES MATIÈRES

<b>1. ÉNONCÉ DE LA COMPÉTENCE</b> .....	<b>3</b>
<b>2. CRITÈRES DE PERFORMANCE</b> .....	<b>3</b>
<b>3. MATÉRIEL REQUIS</b> .....	<b>3</b>
<b>4. INTRODUCTION ET COMPLÉMENT DE THÉORIE</b> .....	<b>3</b>
4.1 COURBE DE PUISSANCE .....	5
4.2 DESCRIPTION D'UNE AILE OU D'UNE PALE D'ÉOLIENNE.....	5
4.3 PORTANCE ET TRAÎNÉE D'UN PROFIL AÉRODYNAMIQUE.....	5
4.4 LE DÉCROCHAGE AÉRODYNAMIQUE.....	6
4.5 POUSSÉE AÉRODYNAMIQUE SUR UNE SURFACE.....	7
4.6 COEFFICIENT DE POUSSÉE ET DE PUISSANCE .....	7
4.7 VENT RELATIF ET TRIANGLE DES VITESSES SUR UNE PALE D'ÉOLIENNE .....	7
4.8 GAUCHISSEMENT GÉOMÉTRIQUE OU VRILLAGE D'UNE PALE D'ÉOLIENNE. ....	8
<b>5. MANIPULATIONS</b> .....	<b>9</b>
5.1 DISPOSITIF EXPERIMENTAL .....	9
5.2 PLATINE DE BRANCHEMENT ASSURANT LE REDRESSEMENT DU COURANT.....	9
5.3 EFFORTS STRUCTURAUX DUS À LA POUSSÉE AÉRODYNAMIQUE .....	10
5.4 COURBES DE PUISSANCE D'UNE ÉOLIENNE EN SOUFFLERIE.....	13
5.4.1 <i>Rotor initial</i> .....	13
5.4.2 <i>Changement de l'angle de calage des pales</i> .....	2
5.4.3 <i>Mesure du décrochage aérodynamique</i> .....	1
5.5 QUESTIONS COMPLÉMENTAIRES.....	2
<b>6. ÉVALUATION ET ÉCHÉANCIER</b> .....	<b>2</b>
<b>7. GRILLE D'ÉVALUATION</b> .....	<b>2</b>
<b>8. SUGGESTIONS, REMARQUES, COMMENTAIRES DES ÉTUDIANTS</b> .....	<b>2</b>

## 1. Énoncé de la compétence

- ✘ Se familiariser avec l'ensemble des éléments mécaniques, structuraux et électriques d'une éolienne installée dans une soufflerie
- ✘ Déterminer les efforts transmis à la tour et dus à la poussée du vent sur l'éolienne
- ✘ Calculer les efforts aérodynamiques
- ✘ Établir la courbe de puissance d'une éolienne en soufflerie selon l'angle de calage des pales
- ✘ Déterminer les efficacités de conversion de la puissance du vent en puissance électrique
- ✘ Observer certaines limites de fonctionnement de l'éolienne comme le décrochage

## 2. Critères de performance

- ✘ Utiliser une soufflerie
- ✘ Découvrir et comprendre certains concepts d'aérodynamique appliqués aux éoliennes
- ✘ Évaluer la performance d'une éolienne
- ✘ Réaliser une courbe de puissance
- ✘ Comprendre le phénomène de décrochage aérodynamique
- ✘ Comprendre le concept le rendement d'une éolienne

## 3. Matériel requis

- ✘ Soufflerie
- ✘ Éolienne, tour
- ✘ Oscilloscope et multimètre
- ✘ Tachymètre optique et instruments de mesure du vent
- ✘ Jauges de déformation et système d'acquisition
- ✘ Régulateur électronique, pont de diode, batterie et banc de résistance ajustable

## 4. Introduction et complément de théorie

Au cours de ce laboratoire, vous réaliserez des essais caractéristiques en soufflerie. Vous observerez l'impact de l'angle de calage des pales sur la courbe de puissance et évalueriez les efforts aérodynamiques transmis à la tour par l'éolienne.

Rappel : Les éoliennes captent l'énergie cinétique du vent et la transforment en énergie électrique. La puissance d'une éolienne est donc proportionnelle à la vitesse du vent. Nous avons vu que la puissance augmentait avec le cube de la vitesse du vent. Nous mesurerons donc la puissance de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent.

Le circuit électrique de l'éolienne Air-X est composé principalement d'un redresseur à pont de diodes, d'un filtre capacitif et d'un régulateur de tension que nous pourrions étudier plus en profondeur lors de cours prochains. De manière résumée, l'objectif du circuit consiste à redresser le courant alternatif fourni par l'alternateur et à le transformer en courant continu acceptable par les batteries.

L'éolienne Air-X 400 de Southwest Windpower utilise un alternateur triphasé sans balais à aimants permanents d'une puissance de 400 W. La puissance maximale est délivrée pour un vent de 12,5 m/s. À cette vitesse de vent, l'alternateur tourne à environ 2000 tr/min. Un circuit électronique permet de redresser le courant pour obtenir du courant continu. Le circuit de contrôle (intelligent) assure le fonctionnement *au point de rendement optimum* de l'éolienne selon la vitesse du vent. Ce dispositif agit sur la charge de l'alternateur et donc sur la vitesse de rotation du rotor.

Le système de régulation de tension arrête la rotation de l'éolienne en « court-circuitant les fils de sortie de l'alternateur lorsque la tension de la batterie atteint le seuil programmable de 14,1 volts ou bien lorsque celle-ci dépasse une grande vitesse de rotation. En ce sens, le contrôleur protège et la génératrice et la batterie des excès pouvant endommager le matériel.

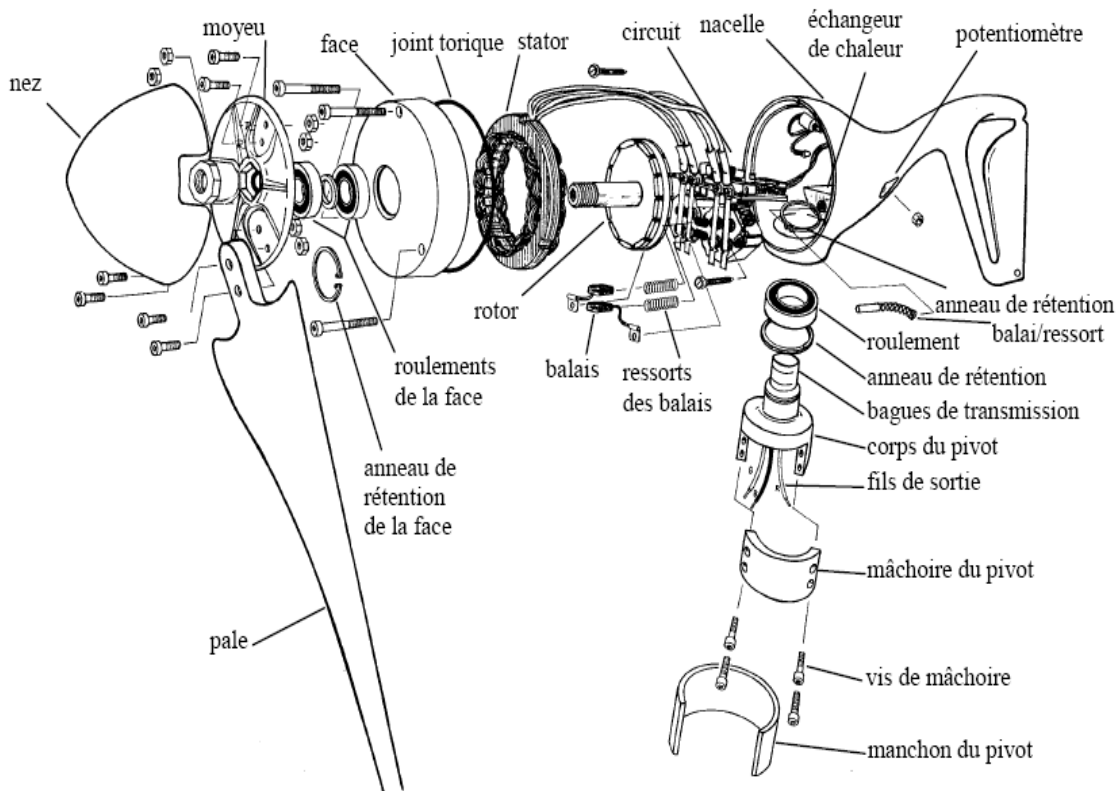
L'éolienne recommencera à tourner et la charge reprendra lorsque la tension de la batterie passera au dessous du seuil de 12,75 volts. Il n'est pas recommandé de laisser fonctionner l'éolienne en circuit ouvert, sans charge, car le système de contrôle conduit à un mode marche arrêt-oscillant.

Le tableau I présente la tension de sortie de l'alternateur de l'éolienne AIR X selon le régime de rotation. Ces données constituent simplement un ordre de grandeur et vous allez refaire les mesures au cours du laboratoire.

Tableau I  
Relation entre RPM et tension de l'alternateur de l'AIR X

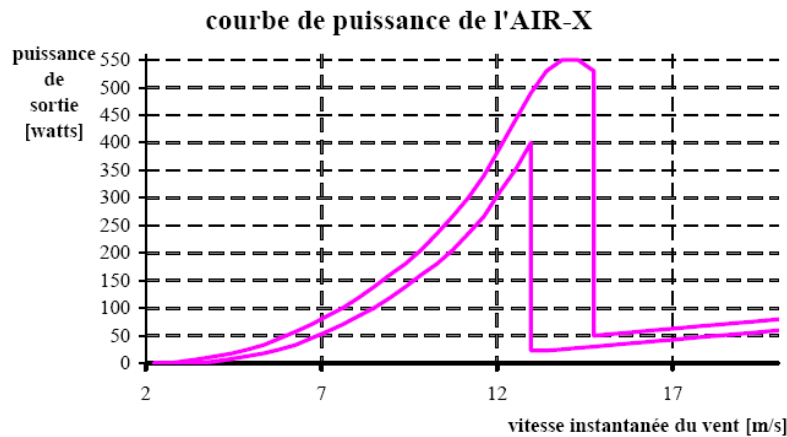
Vitesse de rotation (Tr/min)	Tension de sortie de l'alternateur 1 phase efficace (V)
1790	15
1492	12,55
1193	10
894	7,49
593	5
299	2,5

La figure suivante présente une vue éclatée de l'éolienne Air X



#### 4.1 Courbe de puissance

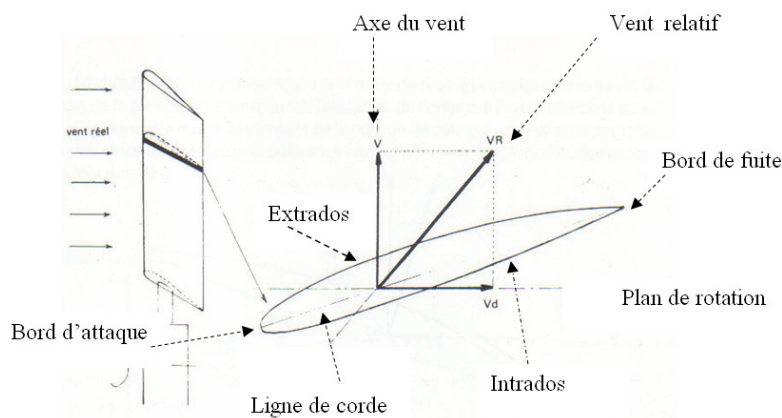
Une éolienne est caractérisée par sa courbe de puissance, tracée en fonction de la vitesse du vent. La figure suivante nous présente la courbe de puissance de l'éolienne AIR-X 400 du laboratoire. La forme de la courbe de puissance, nous indique qu'un système de régulation de puissance est entré en fonction au environ de 13 m/s. L'éolienne Air-X 400 est dite à régulation passive de puissance par décrochage aérodynamique. Nous voyons donc qu'au delà d'une certaine vitesse de vent (13 m/s) la puissance diminue brutalement car le rotor ne parvient plus à capter l'énergie du vent. C'est le décrochage aérodynamique. Ce phénomène est influencé par l'angle de calage des pales, c'est-à-dire leur position par rapport à l'écoulement du vent.



Courbe de puissance de l'éolienne AIR-X 400

#### 4.2 Description d'une aile ou d'une pale d'éolienne

La figure suivante décrit une pale d'éolienne et identifie les différentes zones avec la terminologie appropriée.



Terminologie descriptive d'une pale d'éolienne

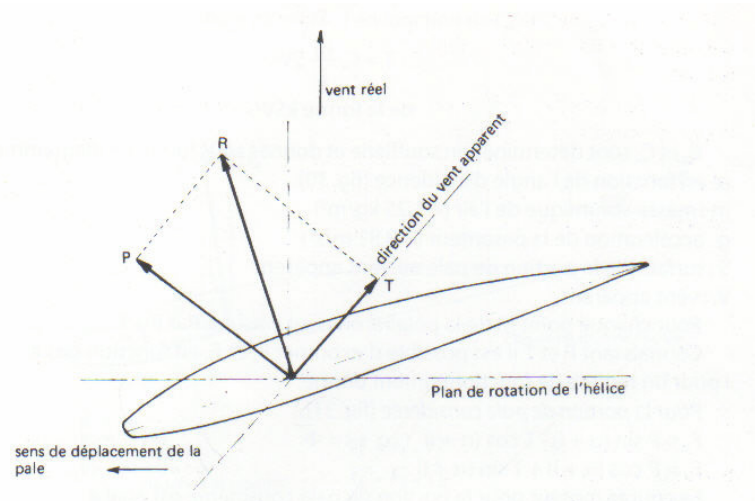
#### 4.3 Portance et traînée d'un profil aérodynamique

La portance représente la force exercée sur l'extrados (dessus) de la pale. Cette force tend à tirer la pale ou à soulever l'aile de l'avion perpendiculairement à la direction du vent relatif. L'écoulement du vent sur le profil de la pale génère la portance.

La traînée aérodynamique est une force qui s'oppose au mouvement d'un corps se déplaçant dans l'air; c'est la résistance à l'avancement. Elle s'accroît si la surface exposée au vent ou la vitesse de déplacement augmente.

La figure suivante nous présente :

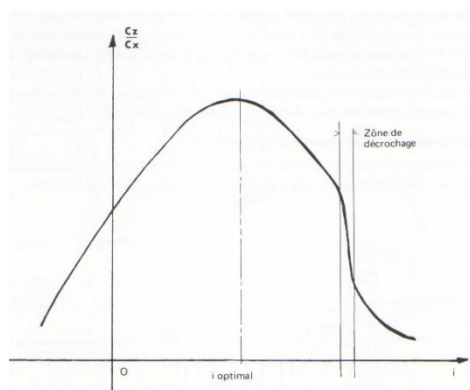
- ✘ la portance  $P$ , perpendiculaire à la direction du vent relatif,
- ✘ la traînée  $T$  dans la même direction que le vent relatif et,
- ✘ la résultante  $R$  positionnées entre les deux.



Forces aérodynamiques appliquées sur la pale de l'éolienne

#### 4.4 Le décrochage aérodynamique

Lorsqu'à vitesse constante du fluide, on accroît la valeur de l'angle d'attaque<sup>1</sup>, la portance générée par le profil croît, passe par un maximum et décroît brutalement au delà d'un certain angle. Ce phénomène de diminution brutale de la portance est appelé le décrochage aérodynamique. Il est parfois intéressant d'utiliser ce phénomène de décrochage pour réguler la puissance que le rotor capte dans le vent et limiter ainsi la puissance électrique produite. La figure suivante présente la courbe « portance / traînée » ou «  $C_z / C_x$  » en fonction de l'angle d'attaque, «  $i$  ». Nous voyons que, passé un certain angle, la portance diminue puis s'écroule. Le ratio portance / traînée devient faible. On observe alors le décrochage.



Portance en fonction de l'angle d'attaque. Décrochage aérodynamique

<sup>1</sup> Angle d'attaque ou angle d'incidence : Angle formé par la corde du profil de la pale et le vent relatif

#### 4.5 Poussée aérodynamique sur une surface

L'équation suivante permet de calculer la force de poussée,  $F_{\text{POUSSÉE THÉORIQUE}}$ , sur une surface balayée par les pales de l'éolienne lors de la rotation.

$$F_{\text{POUSSÉE THÉORIQUE}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$$

Où :

A : Surface balayée

$\rho$  : Masse volumique de l'air

$v$  : Vitesse du vent (m/s)

#### 4.6 Coefficient de poussée et de puissance

On nomme coefficient de poussée,  $C_t$ , le rapport entre la force réelle mesurée de poussée et la force théorique calculée de poussée (voir section précédente)

$$C_t = \frac{F_{\text{mesurée}}}{F} = \frac{F_{\text{mesurée}}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2}$$

$$C_t = \frac{F_{\text{POUSSÉE MESURÉE}}}{F_{\text{POUSSÉE THÉORIQUE}}} = \frac{F_{\text{POUSSÉE MESURÉE}}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2}$$

Le coefficient de puissance présente le rapport entre la puissance fournie par le rotor (donc par l'alternateur, en tenant compte de son rendement,  $\eta$ ) et la puissance disponible dans le vent. Nous rappelons que :

$$\text{Puissance dans le vent} = F \cdot v = \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2}_F \cdot v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

$$C_p = \frac{\text{Puissance}_{\text{ROTOR}}}{\text{Puissance}_{\text{VENT}}} = \frac{\left( \text{Puissance}_{\text{ELECTRIQUE}} / \eta \right)}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3}$$

Supposons que le rendement de l'alternateur,  $\eta$ , soit constant à 95 %.

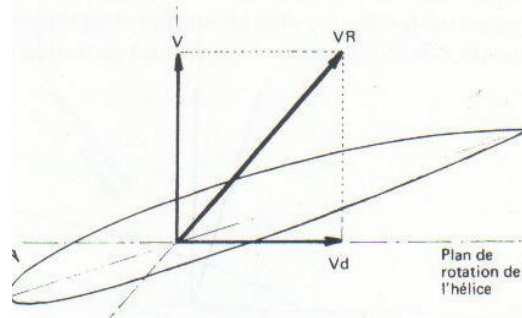
Nous avons vu que le coefficient de puissance maximal pour une éolienne non carénée (c'est-à-dire sans aucun système forçant le vent à passer dans le rotor) ne dépassait pas la limite de Betz soit environ 60%. La paroi de la soufflerie se situe très proche du bout des pales. Le vent est donc forcé de passer à travers le rotor et ne peut pas le contourner. La soufflerie agit comme un carénage et augmente le coefficient de puissance.

#### 4.7 Vent relatif et triangle des vitesses sur une pale d'éolienne

Supposons qu'il n'y ait pas de vent et que la pale tourne malgré tout. Lors de sa rotation la pale « voit » du vent arriver parallèlement à son plan de rotation. C'est le même phénomène que si vous rouliez à vélo lorsqu'il n'y a pas de vent. Vous sentez le vent « créé » par votre déplacement.

Supposons maintenant que la pale ne tourne pas et que le vent souffle, la pale « voit » le vent arriver selon la direction du vent. Pour reprendre l'image de notre cycliste, vous ne roulez pas et le vent souffle sur votre côté. Vous ressentez donc le vent selon sa direction.

Supposons enfin que le vent continue de souffler dans la même direction et que la pale tourne dans son plan de rotation. La pale « voit » maintenant un vent qui est une combinaison des deux vents qui précèdent, à savoir le vent réel et le vent dû à la rotation. Dans le cas de notre cycliste, ceci revient à rouler vite avec un vent de côté. Vous ressentez une combinaison du vent de face et de celui de côté. Ce vent de combinaison est le vent relatif. La figure suivante illustre le concept du vent relatif « vu » par la pale.



Triangle des vitesses et vent relatif

Où :  $V$  : vent qui souffle réellement;  $V_d$  : vent dû à la rotation;  $VR$  : vent de combinaison ou vent relatif.  $VR$  est la résultante de  $V$  et  $V_d$ . La construction de résultantes forme un triangle, d'où le nom de triangle des vitesses. On notera que le vent relatif est différent tout au long de la pale car la vitesse tangentielle évolue avec le rayon de la pale.

#### **4.8 Gauchissement géométrique ou vrillage d'une pale d'éolienne.**

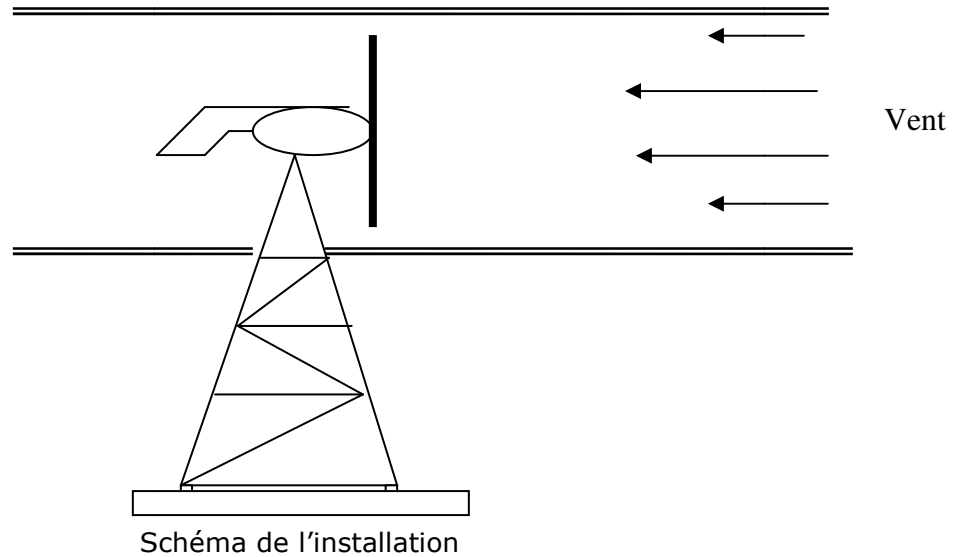
Nous avons vu que la portance évolue, pour une même vitesse de vent, selon l'angle d'attaque du profil. Chaque section de la pale « voyant » un vent relatif différent, il faut que l'angle d'attaque soit lui aussi différent si l'on souhaite avoir la portance maximale dans chaque section. Afin de remplir cette condition, la pale est vrillée ou possède un gauchissement géométrique sur sa longueur.



## 5. Manipulations

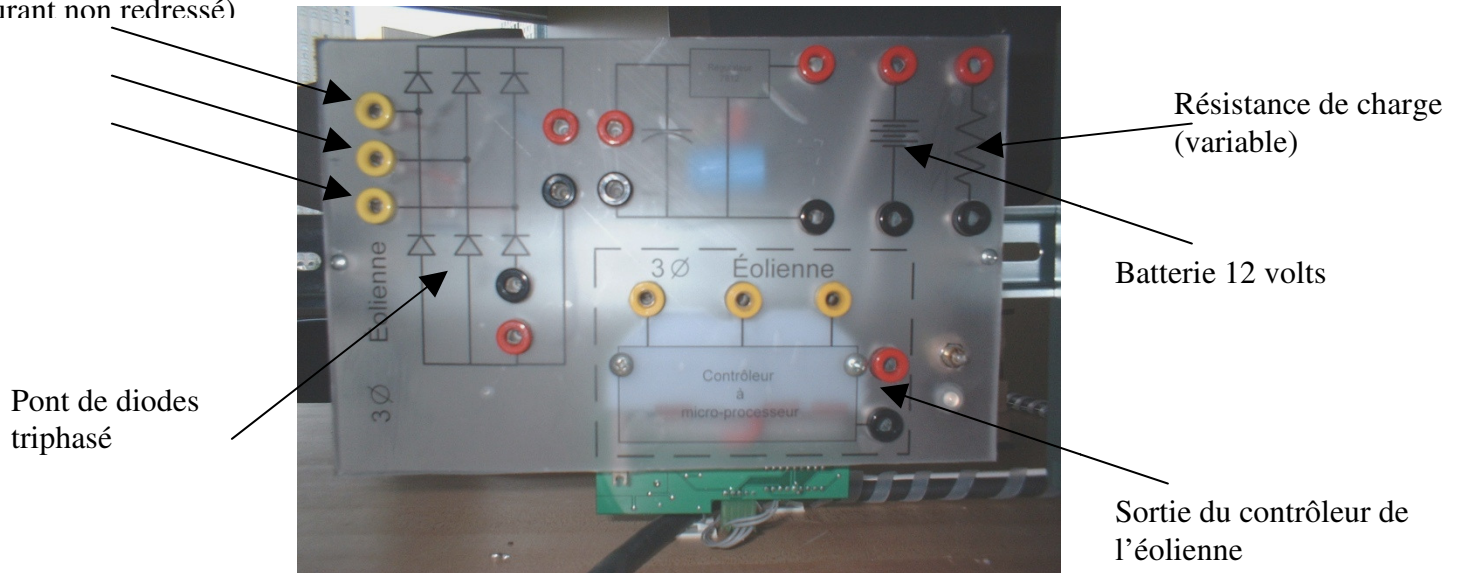
### 5.1 Dispositif experimental

La figure suivante présente un schéma de l'installation. La tour en treillis est installée sur la semelle en béton. L'éolienne est fixée sur le sommet. Une jauge de déformation est collée sur la base d'une des 4 membrures afin de relever les déformations.

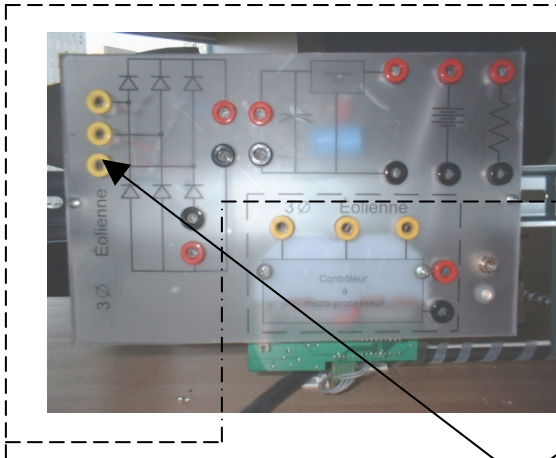


### 5.2 Platine de branchement assurant le redressement du courant

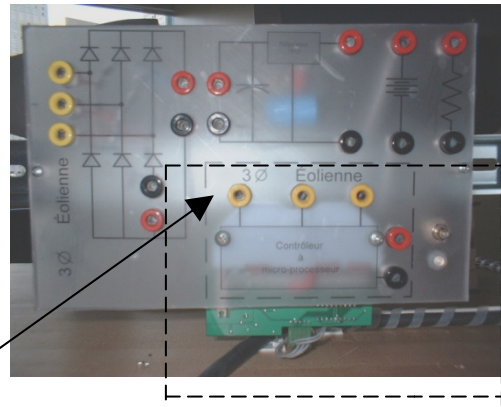
Sortie triphasée de l'alternateur  
3 fils arrivant de l'éolienne  
(courant non redressé)



**La zone A** du montage décompose chaque étage du contrôleur de l'éolienne



**La zone B** du montage représente le contrôleur réel de l'éolienne



Sortie triphasée de l'alternateur : les 3 fils arrivant de l'éolienne seront branchés alternativement dans **la zone A ou B** selon que l'on souhaite étudier le circuit recomposé ou le circuit réel de l'éolienne.

**Note 1** : Si la tension batterie est supérieure à 14,1 volts, le contrôleur de l'éolienne « freine » électriquement l'éolienne. Ceci se traduit par une augmentation du couple nécessaire pour entrainer l'éolienne.

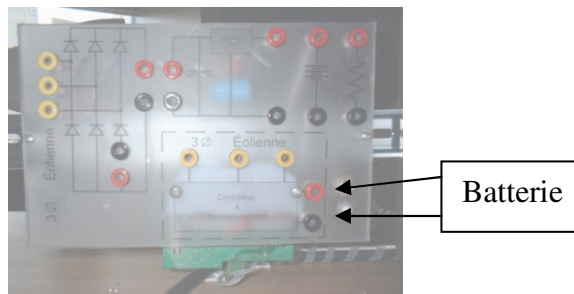
**Note 2** : Une LED indique l'état du système de charge : En charge la LED est allumée, en régulation (batterie chargée) la LED clignote...

### **5.3 Efforts structuraux dus à la poussée aérodynamique**

Attention : ne pas s'approcher du rotor en rotation et porter des lunettes de sécurité lorsque vous manipulez les rotors.

Dans la soufflerie, pour différentes valeurs de vents mesurées avec l'anémomètre à fil chaud et tel que présentées au tableau I :

1. Installez le rotor ayant le calage initial.
2. Assurez-vous que la tour est bien fixée.
3. Connectez les 3 fils de l'éolienne aux 3 bornes jaunes de **la zone B** afin d'utiliser le circuit de contrôle d'origine.
4. **BIEN RESPECTER LA NUMÉROTATION DES FILS. FAIRE VÉRIFIER VOTRE BRANCHEMENT.**
5. Branchez la batterie aux bornes de sortie de l'éolienne comme indiqué sur la figure suivante.



6. Mesurez la tension de la batterie et consignez votre valeur dans le tableau II
7. Déterminer les efforts que l'éolienne exerce sur la tour en raison de la poussée du vent. Pour cela vous devez utiliser la courbe « force - déformation » (figure Ib) préalablement caractérisé pour vous à l'aide de ce montage (figure Ia).

Figure Ia

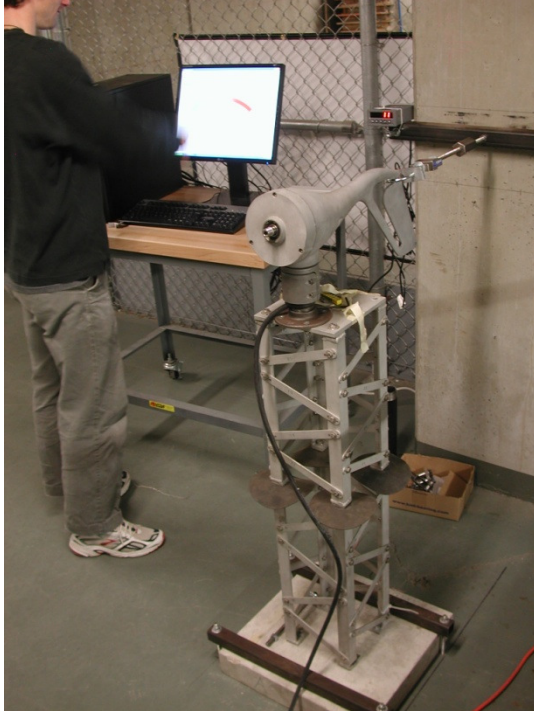
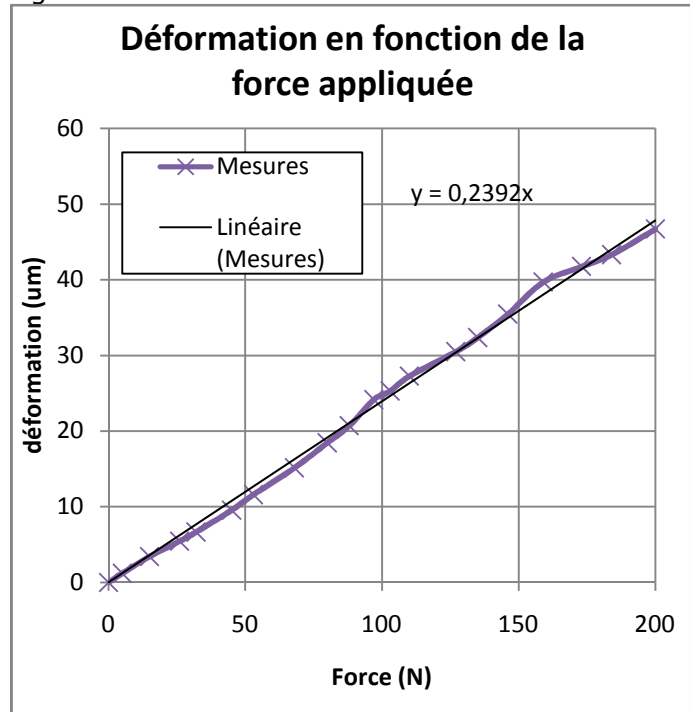


Figure Ib



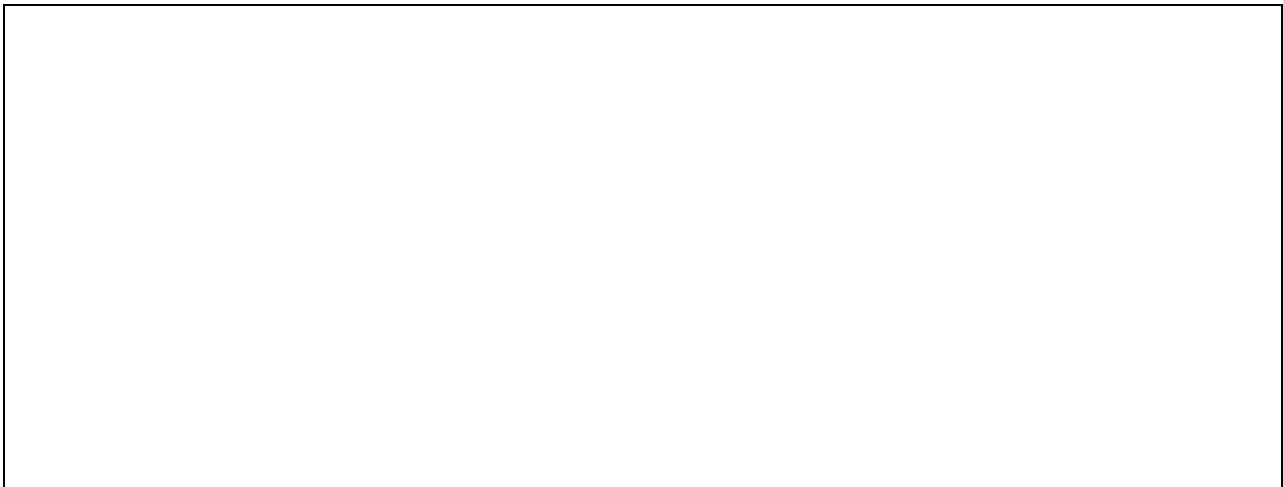
8. Mesurer le diamètre du rotor.
9. Calculer les efforts aérodynamiques exercés par le vent sur une surface équivalente à celle balayée par le rotor de l'éolienne. Vous connaissez la relation permettant de calculer la poussée aérodynamique en fonction de la vitesse du vent.
10. Comparer les résultats entre les efforts calculés par les relations de l'aérodynamique et ceux issus des jauges de déformation.

	Valeur	Unités	Commentaire
Rayon des pales		m	
Surface des pales		m <sup>2</sup>	
Tension de batterie		V	Valeur initiale <b>Ne jamais dépasser 14.1V</b>

Tableau I  
Calculs des efforts dus à la poussée du vent

Vitesse du vent (m/s)	Déformation mesurée	Force de poussée de vent selon la courbe force-déformation	Force de poussée du vent selon les calculs aérodynamiques	Comparaison des résultats : Écarts
3				
4.5				
6				
7.5				
9				

Calculer les efforts de traction dans les ancrages du treillis insérés dans la semelle en béton (ceux en avant de la tour). C'est un problème de statique, faites un DCL du problème et posez les équations de la statique).



## **5.4 Courbes de puissance d'une éolienne en soufflerie**

### **5.4.1 Rotor initial**

Attention : ne pas s'approcher du rotor en rotation et porter des lunettes de sécurité lorsque vous manipulez les rotors.

1. Assurez-vous que tous les appareils de mesures soient installés. (Voltmètre, Ampèremètre)
2. Pour les valeurs de vitesse de vents indiquées au tableau II, relevez la vitesse de rotation des pales (RPM), la puissance délivrée (V,I) et la mesure de la force de poussée (um) du vent sur l'éolienne par la jauge de déformation installée à la base de la tour. Consignez vos résultats dans le tableau II.
3. Tracez (avec le logiciel de votre choix) la courbe de puissance en fonction de la vitesse du vent.
4. Tracez (avec le logiciel de votre choix) la courbe de puissance en fonction de la vitesse de rotation de l'éolienne.
5. Déduisez la puissance électrique délivrée à la batterie.
6. Calculez la puissance aérodynamique pour une surface A équivalente à celle balayée par les pales, et ce pour chaque valeurs de vent. Détaillez un exemple de calcul dans la zone de calcul et consignez vos résultats dans le tableau II.
7. Calculez les coefficients de puissance ( $C_p$ ). Détaillez un exemple de calcul dans la zone de calcul et consignez vos résultats dans le tableau II.
8. Tracez (avec le logiciel de votre choix) la courbe du coefficient de puissance en fonction de la vitesse du vent. On suppose que le rendement global de l'alternateur et du contrôleur est fixe à la valeur de 95 %.
9. Tracez (avec le logiciel de votre choix) la courbe du coefficient de puissance en fonction du TSR (tip speed ratio). On suppose le même rendement pour l'alternateur.

Tableau II  
Relevé de paramètres en soufflerie pour le calage initial des pales

	Mes.	Mes.	Calc.	Calc.	Mes.	Mes.	Calc.	Calc.	Calc.	Calc.	Mes.	table	Calc.	Calc.
Vitesse du vent demandée	Vitesse du vent mesuré	Vitesse de rotation des pales		TSR tip-speed-ratio	Tension	Courant	Puissance électrique	Puissance aérodynamique dans le vent	Couple développé par les pales	Coefficient de puissance $C_p$	Déformation mesurée	Force de poussée de vent selon la courbe force-déformation	Force de poussée de vent théorique	Coefficient de poussée $C_t$
m/s	m/s	tr/min	rad/s		Volts	Amps	Watts	Watts	N.m		um	N	N	
3														
4.5														
6														
7.5														
9														
max														

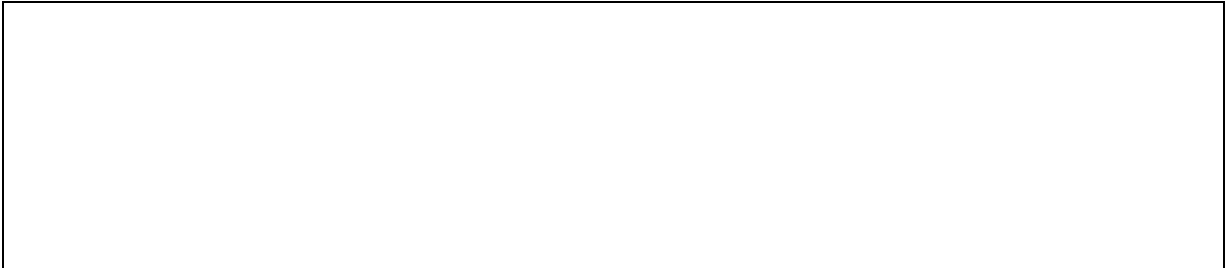
Zone de calcul pour le détail et les exemples de calcul nécessaires pour compléter le tableau II



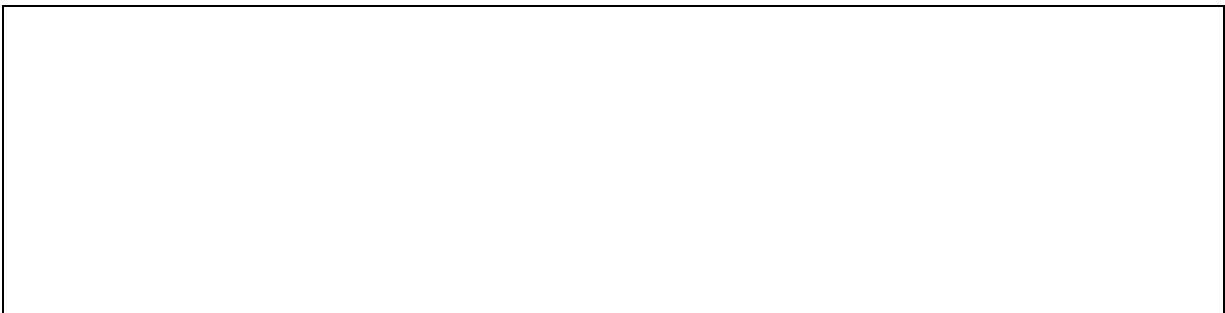
Quel est la vitesse de rotation à laquelle le contrôleur **provoque** le décrochage aérodynamique de l'éolienne?



Comment le contrôleur s'y prend-t-il pour **forcer** un décrochage aérodynamique?



Que concluez-vous au sujet des coefficients de puissance obtenus? Référez-vous à la limite de BETZ...



### 5.4.2 Changement de l'angle de calage des pales

1. Changez le rotor. Installez un rotor dont l'**angle de calage** des pales est modifié de **2 degrés en décrochage** par rapport au calage initial.
2. Pour les valeurs de vitesse de vents indiquées au tableau III, relevez la puissance délivrée ( $V,I$ ). Consignez vos résultats dans le tableau III.
3. Tracez la courbe de puissance en fonction de la vitesse du vent.
4. Calculez la puissance aérodynamique pour une surface  $A$  équivalente à celle balayée par les pales, et ce pour chaque valeurs de vent.
5. Calculez les coefficients de puissance et consignez vos résultats dans le tableau III.
6. Tracez la courbe du coefficient de puissance en fonction de la vitesse du vent. On suppose que le rendement global de l'alternateur et du contrôleur est fixe à la valeur de 95%.

Décrivez les phénomènes observés après avoir changé l'angle de calage des pales



Tableau III  
Relevé de paramètres en soufflerie pour le **calage à 2 degrés en décrochage**

		mesure	calcul	calcul	mesure	mesure	calcul	calcul	calcul	calcul
Vitesse du vent demandée	Vitesse du vent mesurée	Vitesse de rotation des pales		TSR tip-speed-ratio	Tension	Courant	Puissance électrique	Puissance aérodynamique dans le vent	Torque développé par les pales	Coefficient de puissance $C_p$
(m/s)	(m/s)	(tr/min)	(rad/s)		(Volts)	(Amps)	(Watts)	(Watts)	(N.m)	
3										
4.5										
6										
7.5										
9										
max										

### 5.4.3 Mesure du décrochage aérodynamique

1. Remettre le rotor ayant le calage initial.
2. Connectez les 3 fils de l'éolienne aux 3 bornes jaunes de **la zone A** afin d'utiliser le pont de diode
3. L'ordre de connexion des phases **n'a pas d'importance** ici.
4. Branchez la sortie du pont de diode sur les résistances ajustables.
5. Pour les valeurs de vitesse de vents et de vitesse de rotation indiquées au tableau IV, relevez la puissance délivrée (V,I). Consignez vos résultats dans le tableau IV.
6. Tracez la courbe de puissance en fonction de la vitesse du vent.
7. Tracez la courbe de TSR en fonction de la vitesse du vent.

Tableau IV

Relevé de paramètres en soufflerie pour le décrochage aérodynamique

	mesure		mesure	mesure	mesure	calcul	Calcul
Vitesse de rotation demandée (tr/min)	Vitesse de rotation obtenue (tr/min)	Vitesse du vent demandé (m/s)	Vitesse de vent obtenu (m/s)	Tension (Volts)	Courant (Amps)	Puissance électrique (Watts)	TSR
800		4.5					
800		6					
800		7					
800		8					
800		9					
800		10					

Expliquez le phénomène de décrochage aérodynamique observé.

Énoncez une autre manipulation (par exemple, à vent constant) qui aurait démontré le même phénomène de décrochage aérodynamique?

### 5.5 Questions complémentaires

Qu'elle méthode de régulation de puissance est utilisée sur l'éolienne Air-X 400 étudiée ?

Pourquoi doit-on réguler la puissance et ne pas capter toute l'énergie disponible dans le vent ?

Comment peut-on augmenter le coefficient de puissance d'une éolienne ?

D'une manière générale, au bout de la pale de l'éolienne, quelle composante influence de façon plus significative le vecteur du vent relatif dans le triangle des vitesses ? Est-ce la composante du vent réel ou celle du vent de rotation ?

### 6. Évaluation et échéancier

Ce laboratoire d'une **durée de 2h00 heures** est évalué **en équipe** selon la grille suivante

#### 7. Grille d'évaluation

1	Manipulations et réponses aux questions	____ /95
2	Autonomie, Comportement, impression recto-verso	____ /5
	Total	____/100

### 8. Suggestions, remarques, commentaires des étudiants

--