



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE UNIVERSITE SAAD DAHLAB – BLIDA1  
DE TECHNOLOGIE

## MEMOIRE

Présenté au DEPARTEMENT des ENERGIESRENOUVELABLES

Par : MORSLI MEROUANE

Pour l'obtention du diplôme de :

**MASTER EN ENERGIES RENOUVELABLES**

OPTION : Conversion Photovoltaïque

THEME :

**Récupération de la vitesse du vent avec une  
éolienne verticale grâce à une carte Arduino**

Promoteur : Dr. CHENTIR AMINA

2016 – 2017

## REMERCIEMENTS

*Ce travail a été réalisé dans le cadre de la préparation d'un mémoire de master en Energies Renouvelables, option conversion photovoltaïque au Département des Energies Renouvelables de l'université Saad Dahlab de Blida 1, sous la direction du Dr. Amina CHENTIR, que je remercie vivement pour toute l'aide qu'elle m'a apportée durant toute la durée de préparation du présent mémoire.*

*Mes plus vifs remerciements vont au président et aux différents membres du Jury d'avoir accepté de juger mon travail et pour m'avoir fait l'honneur d'assister à ma soutenance.*

*Enfin, je souhaite exprimer toute ma gratitude à l'ensemble des enseignants et toutes les personnes, qui ont largement contribué à l'aboutissement de ce travail.*

## Dédicace

*Avec l'aide de dieu tout puissant, j'ai pu achever ce modeste travail que je dédie :*

*À la mémoire de mon père que dieu l'accueille dans son vaste paradis,*

*À ma mère que dieu la garde toujours près de moi, mes frères, et sœurs*

*Et à tous ceux qui me sont chers.*

## الملخص

يتمثل مشروعنا في انجاز نموذج لمولدات الهواء وقياس سرعة الرياح من حوله. يتكون هذا النظام من هيكل ميكانيكي المتمثل في جزء متحرك المدور ومحور العمودي الحامل للشفرات والتي يدورها تغلق وتفتح حسب تغير سرعة الرياح وجزء ساكن الحامل لهذا الهيكل. بحيث نستعمل لاقطين صوتيين من نوع HC-SR04 لتحديد المسافة [أ-ب]. تقوم هذه اللواقط بتسجيل توقيت انتقال هذه الموجات الصوتية بينهما. ثم ترسل نحو الجزء المتحكم (الاردينو) بحيث يقوم هذا الأخير بقراءة قيم التوقيتات المرسله من طرف اللواقط الصوتية وحسابها ثم يقوم بإعطاء الأمر بإظهار النتائج على الحاسوب.

## Abstract

Our project aims to realize a small vertical wind turbine and then to design a system to measure the wind speed. This system consists of a mechanical structure to movable part with vertical axis rotating four blades as buckets. These are automatically placed in the best position depending on the wind strength and thus transmit a certain speed to the vertical axis. To measure speed, we use two ultrasonic sensors type HC-SR04 that send sound waves over a distance AB. An Arduino Uno board is then used to operate the transmission times of these waves to calculate the speed and transmit to PC to display it.

## Résumé

Notre projet a pour but de réaliser une petite éolienne verticale puis de concevoir un système de mesure de la vitesse du vent. Ce système est constitué d'une structure mécanique à partie mobile à axe vertical faisant tourner quatre pales sous forme de godets. Ces dernières se placent automatiquement dans la meilleure position en fonction de la force du vent et transmettent ainsi une certaine vitesse à l'axe vertical. Pour mesurer cette vitesse, nous faisons appel à deux capteurs ultrasons de type HC-SR04 qui envoient des ondes acoustiques sur une certaine distance AB. Une carte Arduino Uno est alors utilisée pour exploiter le temps de transmission de ces ondes afin de calculer cette vitesse et la transmettre vers un PC afin de l'afficher.

# Table des matières

Résumés

Table des matières

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Introduction générale ..... 1

## Chapitre 1 : Généralités

1.1 Introduction .....	3
1.2 Les types des Éoliennes.....	4
1.2.1 Les éoliennes Horizontales .....	4
1.2.2 Les éoliennes Domestiques .....	5
1.2.3 Les éoliennes Verticales .....	5
1.2.4 Les éoliennes Oasis .....	7
1.2.5 Les Hydroliennes .....	7
1.3 Les différents composants d'une éolienne.....	8
1.3.1 Cas de l'éolienne Horizontale .....	8
1.3.2 Les composantes de l'éolienne Verticale.....	10
1.4 Les Capteurs Ultrasons .....	10
1.4.1 Définition .....	10
1.4.2 Caractéristiques physiques et techniques des capteurs ultrasons .....	10
1.4.3 Les différents capteurs ultrasons .....	12
1.5 La Carte Arduino.....	15
1.5.1 Définition.....	15
1.5.2 Présentation de la carte.....	15
1.5.3 Les Différents Cartes Arduino.....	16
1.5.4 Les avantages de l'Arduino.....	18
1.6 Conclusion .....	18

## Chapitre 2 : Etude théorique

2.1 Introduction .....	19
2.2 Présentation de l'objectif général du montage .....	19
2.3 Explication de principe de fonctionnement global .....	20
2.4 Etude théorique de chaque partie de montage .....	21
2.4.1 Partie mécanique .....	21
2.4.2 Partie électronique .....	24
2.5 Conclusion .....	26

## **Chapitre 3 :**

<b>3.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>27</b>
<b>3.2</b>	<b>La réalisation mécanique</b>	<b>27</b>
<b>3.3</b>	<b>La réalisation électronique</b>	<b>34</b>
<b>3.4</b>	<b>Présentation du logiciel Arduino</b>	<b>37</b>
<b>3.5</b>	<b>Mise en œuvre d'un programme dans l'environnement Arduino</b>	<b>38</b>
<b>3.6</b>	<b>L'organigramme du programme</b>	<b>39</b>
<b>3.7</b>	<b>Présentation du montage complet</b>	<b>40</b>
<b>3.8</b>	<b>Tests réalisés et Interprétations</b>	<b>41</b>
<b>3.9</b>	<b>Conclusion</b>	<b>42</b>
	<b>Conclusion générale</b>	<b>44</b>
	<b>Références Bibliographiques</b>	<b>45</b>
	<b>Les Nonciature</b>	<b>46</b>

# Liste des figures

## Chapitre 1

Figure 1.1 : Éolienne de Poul la cour.....	3
Figure 1.2 : Éolienne à axe horizontal.....	4
Figure 1.3 : Les éoliennes domestiques.....	5
Figure 1.4 : Éolienne de Darrieus .....	5
Figure 1.5 : Schéma de principe du rotor de Savonius.....	6
Figure 1.6 : Les éoliennes à axe verticaux.....	6
Figure 1.7 : Les Éoliennes de Pompage.....	7
Figure 1.8: Les Hydroliennes.....	8
Figure 1.9 : Mât d'Éolienne à axe horizontal.....	8
Figure 1.10 : Structure interne de la nacelle.....	9
Figure 1.11 : Rotor d'une Éoliennes à axe Horizontal.....	9
Figure 1.12 : Présentation de la forme typique de faisceau d'ultrasons.....	11
Figure 1.13 : Les trois cas de mesure classique.....	12
Figure 1.14 : Capteur Parallax.....	12
Figure 1.15: Capteur Vex Robotics.....	13
Figure 1.16 : Capteur de distance TeraRanger Duo : TOF + ultrason .....	13
Figure 1.17 : Capteur Télémètre Ultra Grove.....	14
Figure 1.18: Capteur Lego Mindstorms EV3.....	14
Figure 1.19: Les divers éléments de la carte Arduino.....	15
Figure 1.20: Différent types de cartes Arduino.....	17

## Chapitre 2

Figure 2.1: Le schéma synoptique de montage en général.....	19
Figure 2.2 : L'effet de vent sur les objets.....	20
Figure 2.3 : Rotation de l'éolienne.....	20
Figure 2.4 : Principe de fonctionnement de deux télémètres.....	21
Figure 2.5 : Graphe de la vitesse spécifique dépendant de l'efficacité.....	23
Figure 2.6 : Principe de fonctionnement du HC-SR04.....	24

<b>Figure 2.7 : Les caractéristiques principales de la carte Arduino Uno.....</b>	<b>26</b>
---	-----------

### **Chapitre 3**

<b>Figure 3.1: Principe de fonctionnement selon la direction du vent.....</b>	<b>27</b>
<b>Figure 3.2 : Les différents composants de l'éolienne verticale.....</b>	<b>28</b>
<b>Figure 3.3 : Les plans de construction de gabarit avec les pales.....</b>	<b>29</b>
<b>Figure 3.4 : plan du support supérieur et inférieur.....</b>	<b>29</b>
<b>Figure 3.5 : Traçage de croix de pivotement.....</b>	<b>30</b>
<b>Figure 3.6 : Les biellettes et les accessoires de l'éolienne.....</b>	<b>31</b>
<b>Figure 3.7 : le socle.....</b>	<b>31</b>
<b>Figure 3.8 : l'éolienne après le montage et la finition.....</b>	<b>32</b>
<b>Figure 3.9 : Position à l'arrêt ou vent très faible.....</b>	<b>33</b>
<b>Figure 3.10 : Position des pales par vent moyen.....</b>	<b>33</b>
<b>Figure 3.11 : Position des pales par vent fort.....</b>	<b>33</b>
<b>Figure 3.12 : Position des pales par vent très fort-tempête.....</b>	<b>34</b>
<b>Figure 3.13 : Les composants électroniques du montage.....</b>	<b>35</b>
<b>Figure 3.14 : Branchement des capteurs sur la carte Arduino.....</b>	<b>36</b>
<b>Figure 3.15 : Présentation du menu principal .....</b>	<b>37</b>
<b>Figure 3.16 : Structure de réalisation d'A programme Arduino.....</b>	<b>38</b>
<b>Figure 3.17 : Organigramme général du programme réalisé.....</b>	<b>39</b>
<b>Figure 3.18 : Présentation du montage complet.....</b>	<b>41</b>

### **Liste des tableaux**

<b>Tableau3.1 : Variation de la vitesse de propagation en fonction de temps de propagation par brise légère.....</b>	<b>41</b>
<b>Tableau3.2 : Variation de la vitesse de propagation en fonction de temps de propagation dans le cas d'un vent moyen.....</b>	<b>42</b>

# **Introduction**

## **Générale**

# Introduction Générale

---

La demande énergétique mondiale est actuellement de l'ordre de 12,5 Gtep et, selon les scénarios, elle pourrait être contenue dans une fourchette allant de 20 à 25Gtep à l'horizon 2050. En parallèle, les quantités de CO<sub>2</sub> générées annuellement s'établissent aujourd'hui à près de 6,5 Gt : elles sont à l'origine, par les mécanismes naturels mis en jeu, d'une accumulation de 3GtC (giga tonne de carbone) par an dans l'atmosphère. Cette situation conduirait à un accroissement sensible de la température moyenne à la surface de la terre entre 1,5 °C et 5,8 °C d'ici 2100. Ceci représente une augmentation sans précédent qui s'accompagnerait en particulier de la montée du niveau des mers de 20 cm à 1m.

Face à ces enjeux maintenant classiques, une contribution scientifique et technologique relative aux problèmes actuels concernant l'énergie ne peut ignorer des questions cruciales notamment à cause de leur retentissement géopolitique, telles que :

- La sûreté de l'approvisionnement (tensions, demandes des pays en voie de développement,...)
- La raréfaction des ressources fossiles disponibles à un coût raisonnable
- L'impact environnemental (CO<sub>2</sub>, Santé...), la minimisation des risques et la sécurité.

Les énergies renouvelables apparaissent comme une solution, bien entendu partielle, à cette urgence. Parmi les énergies renouvelables, l'énergie éolienne sur laquelle une hélice entraînée en rotation par la force du vent permet la production d'énergie mécanique ou électrique en tout lieu suffisamment venté, et qui a été exploitée par l'homme depuis très longtemps. Cette dernière montre une énergie propre qui est une réelle alternative au problème de gestion des déchets nucléaires et aux émissions de gaz à effet de serre.

Le travail que nous présentons ici, concerne à réaliser une petite éolienne à axe vertical puis à essayer de capter la vitesse du vent grâce à deux capteurs ultrasons afin de les afficher sur l'écran d'un PC par le biais d'une carte Arduino Uno.

Pour atteindre les objectifs fixés, nous avons divisé notre travail en trois chapitres : Le premier chapitre a été consacré à la présentation de quelques rappels et généralités sur l'énergie éolienne en dégageant leurs types, principes de fonctionnement et ses composants avec une brève présentation des captures ultrasons. Nous avons terminé alors par la présentation de la carte Arduino en général.

# Introduction Générale

---

Dans le deuxième chapitre, nous présentons le principe général du montage de notre éolienne, suivi par l'étude théorique de chaque partie de ce montage

Pour le troisième Chapitre, nous commençons par présenter en détailles différentes étapes suivies pour réaliser notre éolienne avec l'illustration de tous les matériaux utilisés. Ensuite, nous présentons la partie électronique de notre montage composée par les capteurs ultrasons et la carte Arduino, l'organigramme de fonctionnement du programme développé pour mesurer la vitesse du vent. Ceci sera suivi par la présentation des résultats des tests réalisés ainsi que de leur interprétation.

En fin, on termine ce mémoire par une conclusion Générale qui résume les résultats obtenu.

# Chapitre 1

## *GENERALITES*

## 1.1 Introduction

Le vent est une énergie naturelle capable de créer de l'électricité en transformant la force de rotation (mécanique) en énergie électrique. L'énergie éolienne est une qui force n'ayant aucun effet néfaste pour l'environnement. Ceci fait d'elle une énergie propre qui est une réelle alternative au problème de gestion des déchets nucléaires et aux émissions de gaz à effet de serre.

Les éoliennes représentent également une chance pour plus de deux milliards de personnes isolées d'accéder enfin à l'électricité (Figure 1.1). De plus, peu coûteuses à long terme, elles sont une véritable possibilité d'économie au vue de la consommation en énergie mondiale toujours en augmentation. Malheureusement leur implantation n'est pas possible dans tous les lieux, notamment dans les sites naturels protégés. Par ailleurs le bruit qu'elles génèrent et leur esthétique dérangent certains riverains. Ainsi leur potentiel énergétique d'avenir n'est pas encore exploité au maximum.

De cette façon nous pouvons nous demander si les éoliennes sont adaptables à tous les milieux, autant d'un point de vue topographique qu'humain. Nous verrons pour cela quelques généralités sur les éoliennes dans une première partie, puis les conditions topographiques nécessaires à leur implantation pour finir avec l'impact sur l'activité humaine.



*Figure 1.1 : Éolienne de Poul la cour.*

## 1.2 Les types des Éoliennes

Les éoliennes sont des systèmes utilisés pour la production d'électricité et sont une solution pour satisfaire les besoins en électricité dans un site isolé et assez bien venté. De tels systèmes présentent plusieurs avantages du fait de leur flexibilité et leurs fiabilités.

On trouve les éoliennes on shore (terme américain signifiant sur le sol c'est-à-dire sur les continents), et les éoliennes off-shore (dans la mer). Ces dernières présentent des avantages au niveau des nuisances sonores puisqu'elles sont éloignées des habitations et au niveau des vents car les vents marins sont plus nombreux et plus forts que les vents continentaux. En revanche, elles sont beaucoup plus difficiles à installer ou à maintenir et donc beaucoup plus coûteuses [2].

On distingue deux grands types d'Éoliennes :

- Les éoliennes à axe verticale.
- Les éoliennes à axe horizontale.

**Donc Il existe plusieurs sortes d'éoliennes, on peut citer parmi elles:**

### 1.2.1 Les éoliennes Horizontales

Sont des éoliennes modernes classiques tripales (Figure 1.2). Leur conception s'est imposée sur le marché mondial pour des raisons de stabilité de structure. Il existe également des éoliennes bipales et des mono pales, mais sont moins fiables. Pour une grande stabilité le nombre de pales doit être impair.

La hauteur totale de ces éoliennes varie entre 25 et 180 m pour une puissance de 100 Kw à 5 MW [2].



*Figure 1.2 : Éolienne à axe horizontal [6].*

## 1.2.2 Les éoliennes Domestiques

Leur taille n'excède pas les 12 m et elles ont une puissance comprise entre 100 W et 20 Kw (Figure 1.3). Les éoliennes horizontales ou domestiques peuvent être de type « aval » ou « amont ». Dans la majorité des cas, ce sont des éoliennes « amont », c'est-à-dire que le vent souffle directement sur les pales de l'éolienne. Cela implique l'utilisation des pales très rigides car elles sont très exposées au vent.

La configuration « aval » est utilisée plus particulièrement pour les petites éoliennes qui sont munies de pales plus fragiles [2].



*Figure 1.3 : Les éoliennes domestiques [6].*

## 1.2.3 Les éoliennes Verticales

Les éoliennes à axe vertical sont plus onéreuses que les éoliennes à axe horizontal et de conception plus complexes mais s'adaptent plus facilement à des zones de vent irrégulier. Une éolienne à axe vertical est surtout utile dans les endroits où il n'y a pas beaucoup de place : en ville, sur le toit d'un immeuble par exemple [2].

Il existe deux modèles d'éoliennes à axe vertical :

### a. L'Éolienne de Darrieus

Elle est peu encombrante, ne nécessite pas de systèmes d'orientations et est simple à installer (Figure 1.4). Par contre, elle a un faible rendement et ne démarre pas toute seule [1].



*Figure 1.4 : Éolienne de Darrieus*

## b. L'Éolienne de Savonius

Cette éolienne a également un faible rendement par rapport à une éolienne classique mais a l'avantage de fonctionner avec toutes les directions du vent. L'éolienne est compacte et le fait d'être sur un axe vertical diminue les vibrations (Figures 1.5 et 1.6) ce qui peut être très contraignant sur bâtiment [1].

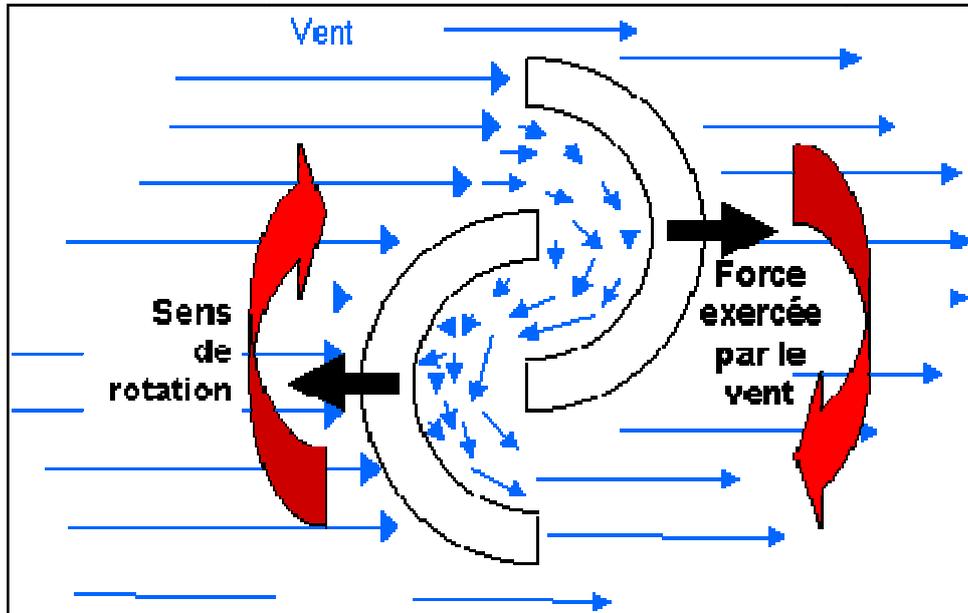


Figure 1.5 : Schéma de principe du rotor de Savonius [4].

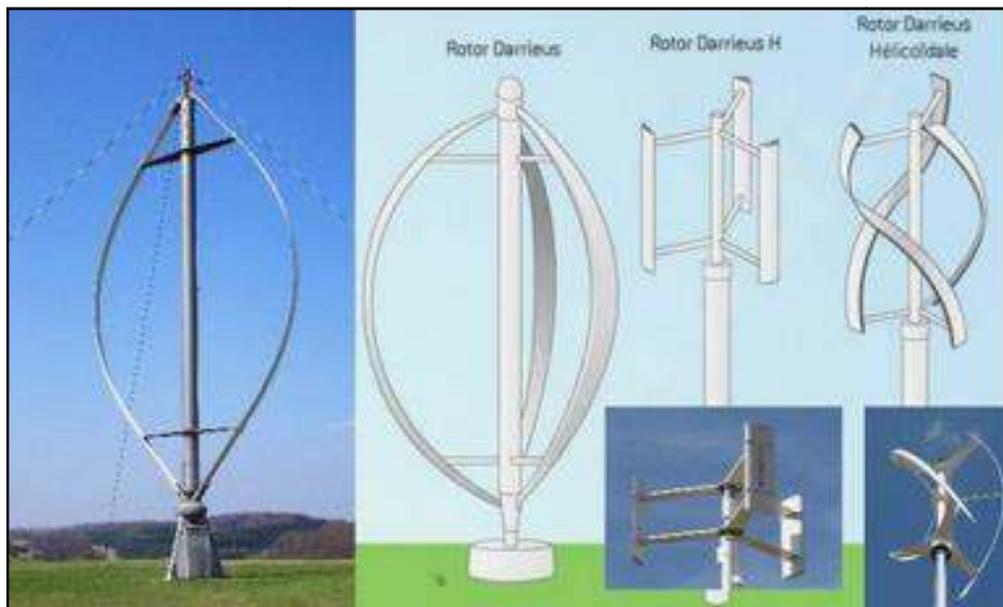


Figure 1.6 : Les éoliennes à axe verticaux (Darrieus et Savonius) [6].

## 1.2.4 Les éoliennes Oasis

Créées dans les années 1930, les éoliennes « Oasis » ont pour fonction d'utiliser la force motrice du vent pour actionner une pompe à eau (Figure 1.7). Acquisées par les agriculteurs, elles sont employées pour de nombreux usages : l'alimentation du bétail, l'irrigation des cultures maraîchères, la lutte contre les incendies (alimentation de réserves en eau), le drainage et l'assèchement de zones humides, l'oxygénation des étangs, la pisciculture, la sylviculture, le pompage d'eau de mer pour les marais salants, la création de points d'eau pour le gibier, etc. [2]



*Figure 1.7 : Les Éoliennes de Pompage [2].*

## 1.2.5 Les Hydroliennes

Les hydroliennes sont des éoliennes spécifiques qui fonctionnent sous l'eau en utilisant l'énergie des courants marins. Ce sont des éoliennes sous-marines ou aérogénérateurs marins (Figure 1.8 ). Le développement des hydroliennes est très récent et est déjà très prometteur. Si la fabrication des éoliennes terrestres est beaucoup moins complexe que celle des hydroliennes, ces dernières peuvent déployer une puissance beaucoup plus grande pour une taille beaucoup plus petite. Cela est dû au fait que l'énergie des courants marins est 800 fois supérieure à celle du vent. Les variations au sein des courants marins sont également beaucoup plus faibles que les variations du vent.

L'inconvénient majeur des hydroliennes est son impact sur l'environnement marin : si les hélices tournent assez lentement et créent moins de perturbations que les hélices d'un bateau, les hydroliennes créent cependant des zones de turbulence plus grandes empêchant le développement de la faune et de la flore marine sur de grands périmètres. Les hydroliennes étant sous l'eau, l'érosion est très forte et pour l'instant la durée de vie des hydroliennes est assez limitée. L'installation d'hydroliennes notamment au niveau des courants de marée reste une voie très intéressante pour la production d'énergie nouvelle [2].



*Figure 1.8: Les Hydroliennes [2].*

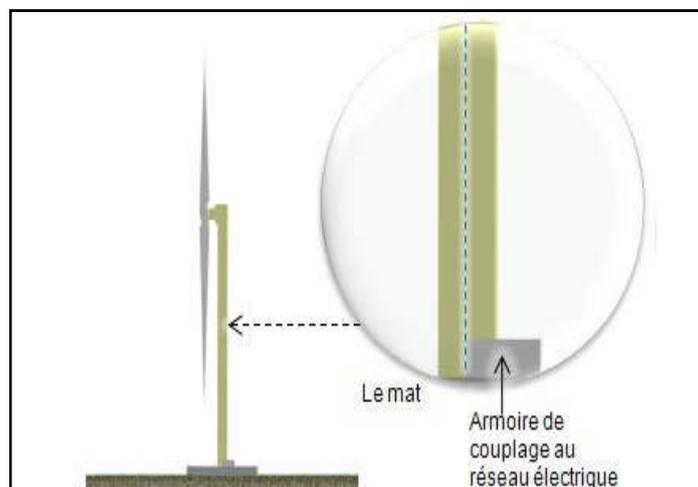
## 1.3 Les différents composants d'une éolienne

Nous allons présenter maintenant les différents composants présents dans le cas d'éoliennes horizontale et verticale.

### 1.3.1 Cas de l'éolienne Horizontale

#### a- Le Mât

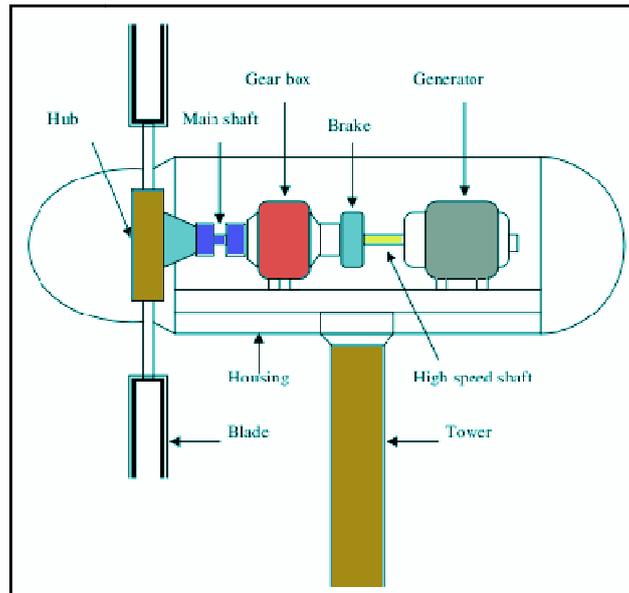
Il permet de placer le rotor à une hauteur suffisante pour permettre son mouvement (nécessaire pour les éoliennes à axe horizontal) ou à une hauteur où le vent souffle de façon plus forte et plus régulière qu'au niveau du sol (Figure 1.9). Le mât abrite généralement une partie des composants électriques et électroniques (modulateur, commande, multiplicateur, générateur, etc.) [4].



*Figure 1.9 : Mât d'Éolienne à axe horizontal [6].*

## b- La Nacelle

Un boîtier qui contient tous les composants essentiels pour faire fonctionner efficacement la turbine s'appelle une nacelle. Il est monté au sommet d'une tour et comprend la boîte de vitesses, les arbres à faible et à grande vitesse, le générateur, le contrôleur et les freins (Figure 1.10). Un anémomètre de vitesse du vent et une girouette sont montés sur la nacelle [4].



*Figure 1.10 : Structure interne de la nacelle [6].*

## c- Le Rotor

Composé du nez de l'éolienne recevant les pales (en général trois), fixé sur un arbre tournant dans des paliers installés dans la nacelle, le rotor (Figure 1.11), solidaire des pales, est entraîné par l'énergie du vent, il est branché directement ou indirectement (via un multiplicateur de vitesse à engrenages) au système mécanique qui utilisera l'énergie recueillie (pompe, générateur électrique, etc.) [4].



*Figure 1.11 : Rotor d'une Éoliennes à axe Horizontal [6].*

## 1.3.2 Les composantes de l'éolienne Verticale

### a- Rotor (pales et éléments de connexion)

Sa fonction est de produire une efficacité aérodynamique. Il est constitué de matériaux légers mais résistants, et il est doté d'une couche de protection [3].

### b- Le Système de freinage

Sa fonction est d'arrêter le mouvement du rotor dans des conditions météorologiques défavorables. Il est constitué de freins à disque similaires à ceux des voitures et des freins à friction qui fonctionnent en cas de défaillance du réseau électrique [3].

### c- Le Système de contrôle

Il règle la fonction de l'aérogénérateur selon les différentes conditions de travail. Il optimise la fonction de l'aérogénérateur, il assure la sécurité et contrôle tous les autres dispositifs (anémomètre) [3].

### d- Le tour

Il doit résister à l'action du vent et du poids des lames. Il est généralement tubulaire ou en treillis et la base peut être superficielle ou profonde [3].

## 1.4 Les Capteurs Ultrasons

Un capteur est un appareil qui détecte un phénomène (lumière, chaleur, contact, mouvement, etc.). Il peut y avoir détection par contact : le capteur doit entrer en contact physique avec un phénomène pour détecter celui-ci. Il peut aussi y avoir détection sans contact : le capteur détecte un phénomène en étant à proximité de celui-ci : c'est le cas du capteur ultrason.

### 1.4.1 Définition

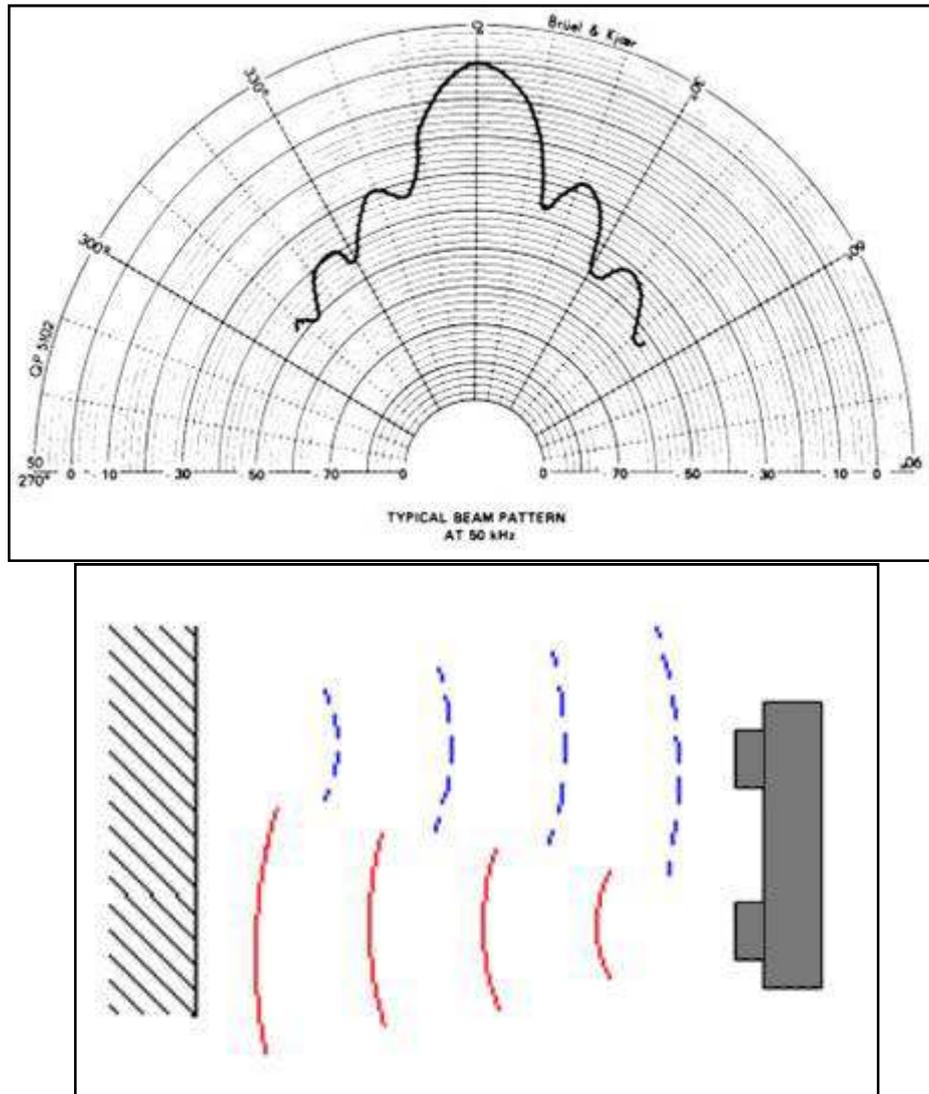
Un capteur à ultrasons émet à intervalles réguliers de courtes impulsions sonores à haute fréquence. Ces impulsions se propagent dans l'air à la vitesse du son. Lorsqu'elles rencontrent un objet, elles se réfléchissent et reviennent sous forme d'écho au capteur. Celui-ci calcule alors la distance le séparant de la cible sur la base du temps écoulé entre l'émission du signal et la réception de l'écho.

### 1.4.2 Caractéristiques physiques et techniques des capteurs ultrasons

Les capteurs ultrasons fournis ont souvent la forme d'une paire d'yeux car il y a deux parties essentielles :

- L'émetteur
- Le récepteur

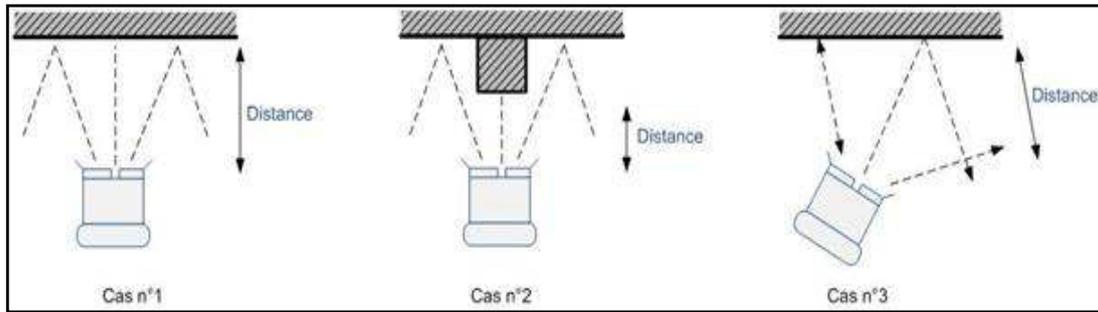
L'émetteur émet un son à une fréquence définie (généralement autour de 40 kHz) et le récepteur collecte le son répercuté par les obstacles. La distance aux objets est calculée par le temps mis par le son pour revenir au récepteur. La forme du faisceau est caractéristique du capteur utilisé (Figure 1.12).



**Figure 1.12** : Présentation de la forme typique de faisceau d'ultrasons [7].

On remarque que l'angle effectif de fonctionnement est d'environ  $30^\circ$  (ce qui est important comparé aux autres types de capteurs) avec des lobes secondaires moins importants de part et d'autre. La mesure sera ainsi plus précise dans le cône central de  $30^\circ$  et sera moins précise sur les parties latérales. Ceci explique que généralement les capteurs ultrasons sont montés sur les parties rotatives afin que différentes mesures puissent être effectuées en utilisant la partie centrale du cône de visualisation.

La largeur du cône ( $30^\circ$ ) constitue à la fois un avantage et un inconvénient. C'est un inconvénient car un obstacle détecté n'est pas localisé précisément au sein du cône de détection : la mesure de position est donc relativement imprécise. C'est au contraire un avantage car cela permet de mieux balayer l'environnement et des éléments fins comme le pied d'une chaise seront détectés à coup sûr.



*Figure 1.13 : Les trois cas de mesure classique [7].*

La Figure 1.13 représente les trois cas de mesure classique qu'on peut rencontrer :

- Le premier cas générera une mesure précise car le capteur est bien en face et perpendiculaire à l'obstacle.
- Le cas n°2 générera également une mesure précise mais donnera une « vue » de l'obstacle situé directement en face du capteur.
- Le cas n°3 en revanche va générer une mesure imprécise étant donné que c'est la partie latérale gauche du capteur qui procède à la mesure.

Il faut également tenir compte du fait qu'à très courte distance, les capteurs ultrasons sont aveugles. Ceci est dû à la temporisation entre l'émission de l'onde sonore et de début de la détection de l'onde réfléchi qui est nécessaire pour ne pas perturber cette mesure [7].

### 1.3.3 Les différents capteurs ultrasons

#### a. Parallax

Il est capable de mesurer des distances comprises entre 2cm et 3m, ce capteur ultrasons (Figure 1.14) consomme peu de puissance et propose un cône de détection relativement étroit [7].

Les caractéristiques techniques de ce produit sont :

- Mesure de distance : entre 2 centimètres et 3,3 mètres.
- Erreur moyenne inférieure à 0,5 centimètres.
- Fréquence d'émission : 40 KHz.



*Figure 1.14 : Capteur Parallax [7].*

## b. Vex Robotics

Ce capteur à ultrason est capable de détecter des obstacles et mesurer des distances entre 3cm et 3m (Figure 1.15). Ses caractéristiques sont :

- Fréquence d'émission : 40 kHz.
- Mesure de distance : entre 3 centimètres et 3 mètres.
- Durée des impulsions : 250 microsecondes.



*Figure 1.15: Capteur Vex Robotics [7].*

## c. Capteur de distance TeraRanger Duo : TOF + ultrason

Le capteur TeraRanger est un capteur temps de vol .un capteur de distance ToF émet un éclair de lumière avec une photodiode et calcule le temps nécessaire à ce flash pour atteindre l'objet visé et revenir au capteur : la distance capteur-cible est automatiquement déduite du « temps de vol » (Figure 1.16).

Ce capteur est un réel compromis entre la précision d'un capteur laser et les avantages des capteurs à ultrasons sans pour autant avoir les inconvénients de perturbations lorsque l'on utilise plusieurs capteurs [7].



*Figure 1.16 : Capteur de distance TeraRanger Duo : TOF + ultrason [7].*

## d. Télémètre Ultra Grove

Ce capteur très populaire se raccorde à l'arduino par le biais d'une platine Grove pour un prototypage facilité (Figure 1.17). Ce capteur est capable de garantir une performance d'un niveau industriel : une portée de 3 cm à 4 m, avec une résolution de 1 cm.

- Fréquence : 40 kHz.
- Portée de détection : 3cm – 4m.
- Résolution : 1cm.
- Dimensions : 43x25x15mm.



*Figure 1.17 : Capteur Télémètre Ultra Grove [7].*

## e. Lego Mindstorms EV3

Les caractéristiques officielles de ce produit (Figure 1.18) sont les suivantes [7] :

- Gamme de détection : de 1 à 250 cm avec un écart de +/- 1 cm.
- Dimensions : 55 mm x 47 mm x 31 mm.

Les améliorations qui ont pu être relevées sur le capteur par rapport à sa version NXT sont :

- Possibilité d'effectuer des mesures entre 1 et 3cm
- Le capteur ultrason peut maintenant être utilisé comme sonar
- Test du capteur Lego Mindstorms
- Les mesures inférieures à 3 cm ne peuvent être effectuées. Cela correspond au problème du temps de retour nécessaire de l'onde.
- Les mesures jusqu'à 20 cm sont relativement assez précises dans un angle compris entre -8° et +30°. En effet, le récepteur est à gauche et l'émetteur est à droite, ce qui explique que les mesures effectuées à gauche sont moins précises que les mesures effectuées à droite.
- Entre 20 et 80cm les mesures restent faisables mais avec une erreur inférieure à 8%, ce qui n'est pas si mal pour un capteur de ce type



*Figure 1.18: Capteur Lego Mindstorms EV3 [7]*

## 1.5 La Carte Arduino

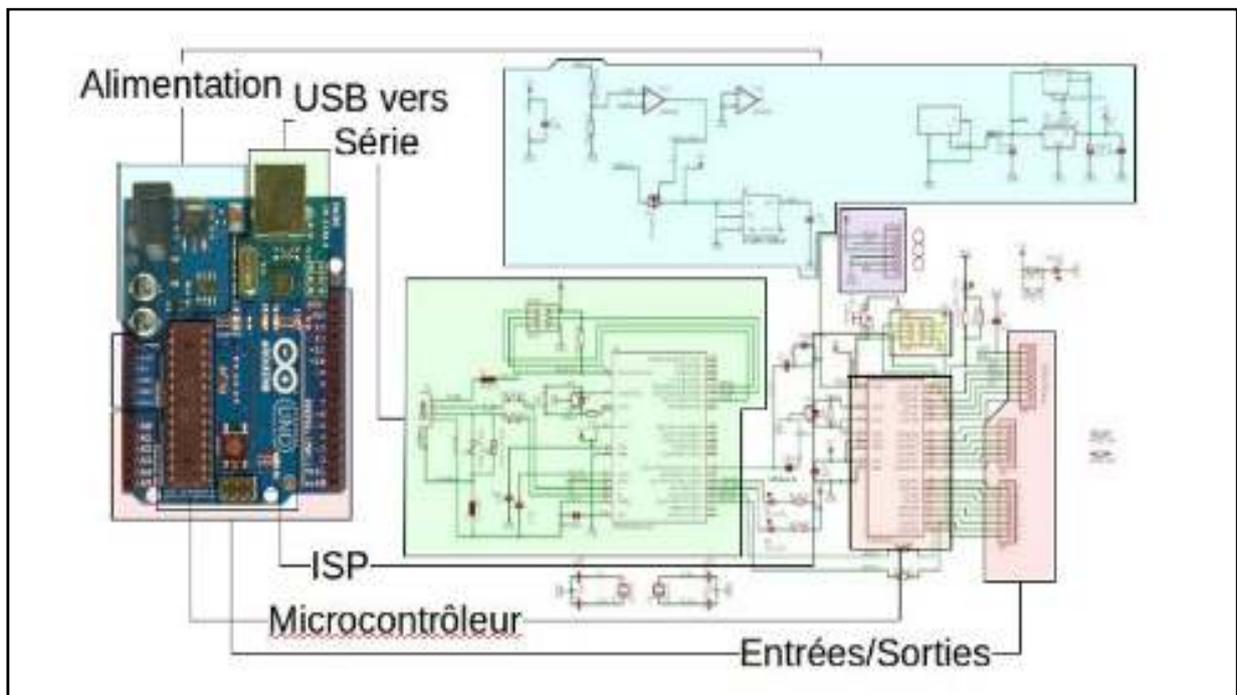
### 1.5.1 Définition

Arduino est une plate-forme de prototypage d'objets interactifs à usage créatif constituée d'une carte électronique et d'un environnement de programmation. La carte électronique permet de réaliser toutes sortes d'expériences en y branchant des composants et des câbles.

### 1.5.2 Présentation de la carte

Les cartes Arduino possèdent un microcontrôleur facilement programmable ainsi que de nombreuses entrées-sorties. Plusieurs cartes Arduino existent et qui se différencient par la puissance du microcontrôleur ou par la taille et la consommation de la carte. Le choix du type de carte Arduino s'effectue en fonction des besoins du projet. La carte Arduino UNO est la carte la plus couramment utilisée qui constitue un bon choix pour les débutants. [5]

Le rôle de la carte Arduino est de stocker un programme et de le faire fonctionner basée sur un micro-contrôleur ATMEL (figure 1.19) équipé de divers éléments qui facilitent sa mise en œuvre.

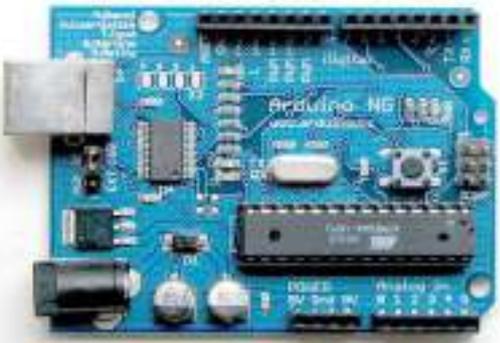
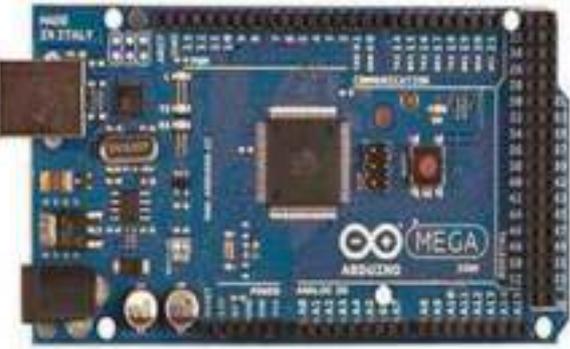
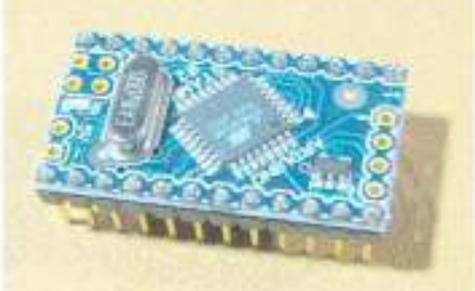


*Figure 1.19: Les divers éléments de la carte Arduino.*

## 1.5.3 Les Différents Cartes Arduino

Actuellement, il existe plus de 20 versions de module Arduino, nous citons quelques un afin d'éclaircir l'évaluation de ce produit scientifique et académique (Figure 1.20) :

- Le NG d'Arduino, avec une interface d'USB pour programmer et usage d'un ATmega8.
- L'Arduino Mini, une version miniature de l'Arduino en utilisant un microcontrôleur ATmega168.
- L'Arduino Nano, une petite carte programmée à l'aide du port USB, cette version utilise un microcontrôleur ATmega168 (ATmega328 pour une plus nouvelle version).
- Le NG d'Arduino plus, avec une interface d'USB pour programmer et usage d'un ATmega168.
- L'Arduino Bluetooth, avec une interface de Bluetooth pour programmer en utilisant un microcontrôleur ATmega168.
- L'Arduino Diecimila, avec une interface d'USB et utilise un microcontrôleur ATmega168.
- L'Arduino Duemilanove ("2009"), en utilisant un microcontrôleur l'ATmega168 (ATmega328 pour une plus nouvelle version).
- L'Arduino Méga, en utilisant un microcontrôleur ATmega1280.
- L'Arduino UNO, utilisant un microcontrôleur ATmega328.
- L'Arduino Mega2560, utilisant un microcontrôleur ATmega2560, elle incorpore également le nouvel ATmega8U2 (ATmega16U2 dans le jeu de puces d'USB de révision 3).
- L'Arduino Leonardo, avec un microcontrôleur ATmega32U4.

Arduino NG	Arduino Méga 2560
 A blue Arduino NG board with a USB Type-B connector on the left side and a large ATmega168 microcontroller chip in the center.	 A large blue Arduino Mega 2560 board with a USB Type-B connector on the left and a large ATmega2560 microcontroller chip in the center.
Arduino Duemilanove	Arduino Uno
 A blue Arduino Duemilanove board with a USB Type-B connector on the left and an ATmega168 microcontroller chip.	 A blue Arduino Uno board with a USB Type-B connector on the left and an ATmega328P microcontroller chip.
Arduino Mini	Arduino Nano
 A small blue Arduino Mini board with a USB Type-B connector on the left and an ATmega168 microcontroller chip.	 A small blue Arduino Nano board with a USB Type-B connector on the left and an ATmega328P microcontroller chip.

*Figure 1.20: Différent types de cartes Arduino [11].*

## 1.5.4 Les avantages de l'Arduino

Il y a de nombreuses cartes électroniques qui possèdent des plateformes basées sur des microcontrôleurs disponibles pour l'électronique programmée. Tous ces outils prennent en charge les détails compliqués de la programmation et les intègrent dans une présentation facile à utiliser. De la même façon, le système Arduino simplifie la façon de travailler avec les microcontrôleurs tout en offrant à personnes intéressées plusieurs avantages cités comme suit [11] :

- **Le prix (réduits)** : les cartes Arduino sont relativement peu coûteuses comparativement aux autres plates-formes.
- **Multi plateforme** : le logiciel Arduino tourne sous les systèmes Windows, Macintosh et Linux. La plupart des systèmes à microcontrôleurs sont limités à Windows.
- **Un environnement de programmation clair et simple** : l'environnement de programmation Arduino (le logiciel Arduino IDE) est facile à utiliser pour les débutants, tout en étant assez flexible pour que les utilisateurs avancés puissent en tirer profit également.
- **Logiciel Open Source et extensible** : le logiciel Arduino est publié sous licence open-source, disponible pour être complété par des programmeurs expérimentés.
- **Matériel Open source et extensible** : les cartes Arduino sont basées sur les Microcontrôleurs Atmel ATMEGA8, ATMEGA168, ATMEGA 328, les schémas des modules sont publiés sous une licence créative Commons, et les concepteurs des circuits expérimentés peuvent réaliser leur propre version des cartes Arduino, en les complétant et en les améliorant. Même les utilisateurs relativement inexpérimentés peuvent fabriquer la version sur plaque d'essai de la carte Arduino, dont le but est de comprendre comment elle fonctionne pour économiser le coût

## 1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté de façon générale l'éolienne (les différents types, son fonctionnement et ses composantes), les capteurs ultrasons (les différents capteurs ultrasons et leurs caractéristiques, leurs gammes d'utilisation), et enfin la carte Arduino (définition, différentes type et fonctionnement). Toutes ces notions peuvent nous aider dans les chapitres suivants.

# **Chapitre 2**

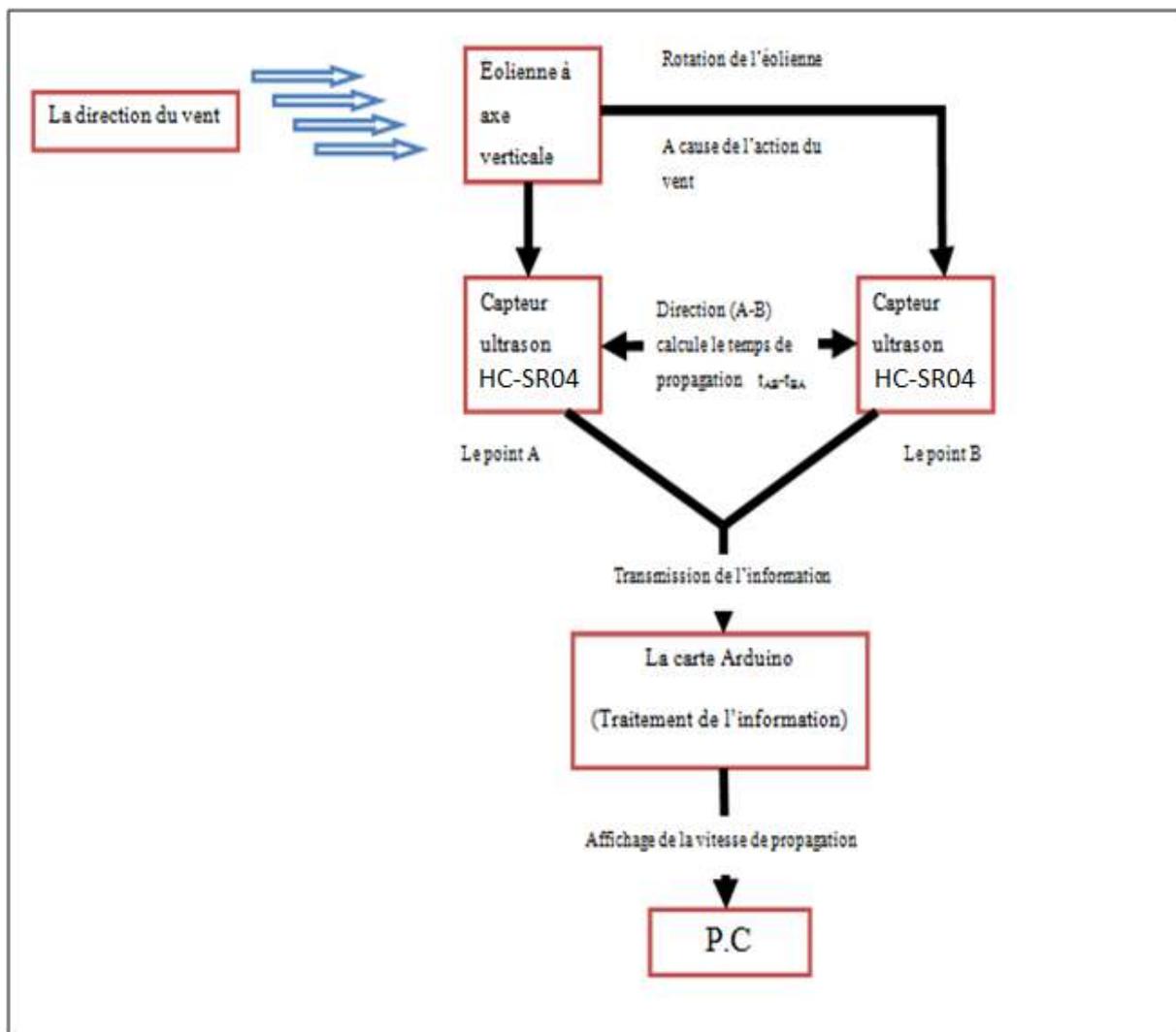
***ETUDE THEORIQUE***

## 2.1 Introduction

Après avoir présenté dans le chapitre 1, une généralité sur l'énergie éolienne, la carte Arduino et les capteurs ultrasoniques. Nous allons aborder dans ce chapitre la présentation du montage de façons générales et l'objectif de ce dernier, Une explication générale du principe de fonctionnement, on donnant le schéma synoptique et l'étude théorique des éléments du montage.

## 2.2 Présentation de l'objectif général du montage

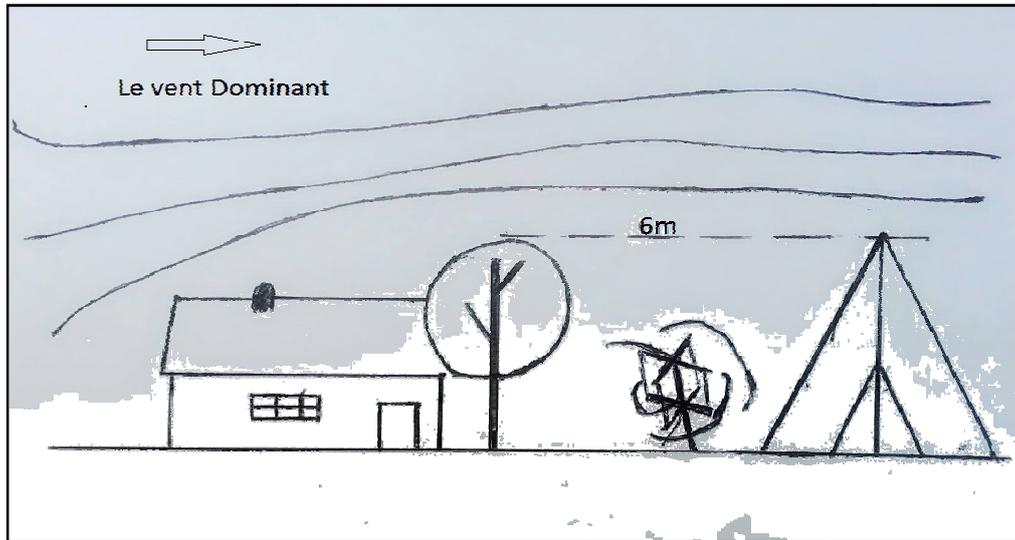
Le but du projet est la réalisation d'une éolienne à axe vertical et la mesure de la vitesse du vent à l'aide des capteurs ultrasons. L'objectif sera de récupérer la vitesse du vent sur les différentes broches de la carte Arduino puis de les transmettre au PC pour afficher (figure2.1) :



**Figure 2.1:** Le schéma synoptique de montage en général.

### 2.3 Explication du principe de fonctionnement global

L'énergie de vent est le facteur qui va influencer sur notre montage (Figure 2.2) : Le vent c'est l'air en mouvement, une énergie cinétique peut lui être associée. Cette dernière est fonction de la masse et de la vitesse du volume d'air.



*Figure 2.2 : L'effet de vent sur les objets.*

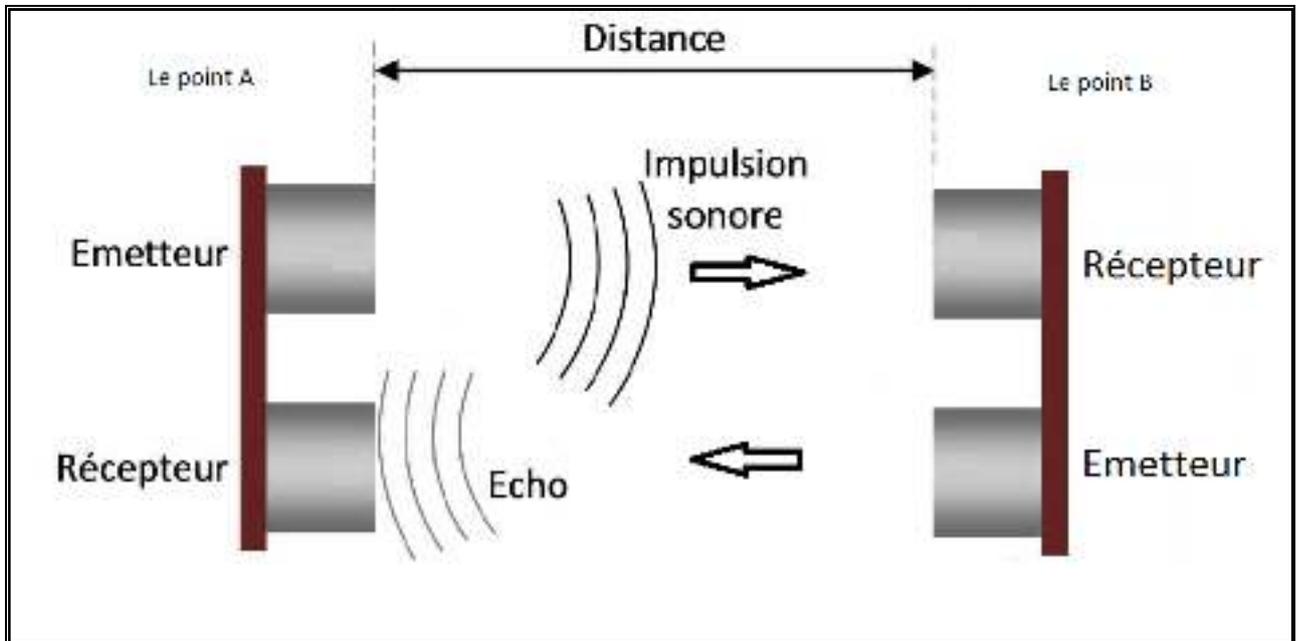
Cette énergie cinétique appliquée à l'éolienne va permettre à cette dernière de tourner autour son axe vertical (Figure 2.3) et crée une force mécanique qui fait tourner les différentes pales sous formes de godets qui se bloquent automatiquement en cas de forte tempête.

Donc ces pales se placent automatiquement dans la meilleure position en fonction de la force du vent et transmettent ainsi une certaine vitesse à l'axe vertical. Par brise légère, les pales s'ouvrent au maximum. Lorsque le vent souffle fort, elles tendent à se refermer. A noter que le couple maximum appliqué sur l'axe se produit lorsqu'elles sont aux trois quarts fermées. Si le vent devient encore plus violent, les pales se ferment complètement et se rouvrent sous l'effet de ressorts dès qu'il faiblit.



*Figure 2.3 : Rotation de l'éolienne.*

Afin de mesurer la vitesse du vent capté par l'éolienne réalisée, on va placer deux capteurs ultrasons à une certaine distance AB de cette dernière (Figure 2.4). Cette position offre une excellente plage de détection sans contact, avec des mesures de haute précision et stables. Son fonctionnement n'est pas influencé par la lumière du soleil ou des matériaux sombres.



**Figure 2.4 :** Principe de fonctionnement de deux télémètres.

Ces télémètres ultrasons vont envoyer l'information qui représente le temps de propagation de l'onde sonore entre émetteur et récepteur qui va être transmise vers la carte Arduino. Cette dernière va alors procéder au traitement des données reçues en les convertissant et en l'exploitant pour calculer la vitesse du vent correspondant. Une fois fait, la carte Arduino va acheminer la vitesse calculée vers le P.C pour affichage.

### 2.4 Etude théorique de chaque partie de montage

#### 2.4.1 Partie mécanique

Si on considère que la masse volumique de l'air (masse de l'air par unité de volume) est constante, on peut dire que l'énergie cinétique fournie par le vent est fonction de sa vitesse[2]:

$$E_c = \frac{1}{2} . m . v^2 \quad (2.1)$$

$m$  : Masse du volume d'air (en kg)

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

$E_c$  : Énergie cinétique (en joules).

À une pression atmosphérique normale et à une température de 15 degrés Celsius, l'air possède une masse volumique d'environ 1,225 kg par mètre cube. Cependant, la masse volumique diminue un peu lorsque l'humidité de l'air augmente. De même, l'air froid est plus

## Chapitre 2

---

dense que l'air chaud, tout comme la masse volumique de l'air est plus faible à des altitudes élevées (dans les montagnes) à cause de la pression atmosphérique plus basse qui y règne. Cette masse est calculée avec la formule suivante:

$$m = \rho \cdot V \quad (2.2)$$

$m$  : masse du volume d'air (en kg)

$V$  : volume d'air occupé (en m<sup>3</sup>)

$\rho$  : masse volumique (en kg/m<sup>3</sup>)

Dans le cas de l'éolienne, le volume d'air occupé dépend de la surface balayée par le rotor de cette dernière. La puissance du vent traversant le rotor correspond à la quantité d'énergie cinétique traversant le rotor à chaque seconde.

En considérant un dispositif de récupération de cette énergie de surface  $S$  et en faisant l'hypothèse que vitesse du vent est identique en chaque point de cette surface, le volume d'air qui traverse cette surface en 1 seconde est égal à  $V_s$ , l'énergie théoriquement récupérable est donnée par :

$$P = \frac{Ec}{s} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v \cdot S \cdot v s^2 \quad (2.3)$$

$P$  : Puissance récupérable (Watt)

$m$  : débit massique du volume d'air traversant la surface  $S$  en 1 seconde (kg/s)

$\rho$  : masse volumique de l'air (kg/m<sup>3</sup>)

$v$  : vitesse de l'air traversant le dispositif (m/s)

$S$  : surface du dispositif de récupération (m<sup>2</sup>)

$\frac{m}{s}$  : débit volumique d'air (m<sup>3</sup>/s) .

La Puissance récupérable est la Puissance du vent contenue dans un cylindre de section  $S$  est donné par :

$$P_{cinétique} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (2.4)$$

$\rho$  : Masse volumique de l'air (air atmosphérique sec, environ : 1,23 kg/m<sup>3</sup> à 15 °C et à pression atmosphérique 1,0132 bar)

$S$  : surface projetée du capteur éolien (en m<sup>2</sup>)

$v$  : vitesse du vent (en m/s)

Cette puissance (en Watt) est une puissance théorique, il est bien sûr impossible qu'elle soit récupérée tel quelle par une éolienne (cela reviendrait à arrêter le vent).

La puissance récupérable est inférieure, puisque l'air doit conserver une énergie cinétique résiduelle pour qu'il subsiste un écoulement. L'allemand Albert Betz a démontré en 1919 que la puissance maximale récupérable est :

$$P_{max} = \frac{16}{27} \cdot P_{cinétique} = \frac{8}{27} \cdot \rho S \cdot v^3 \quad \text{Lorsque } v_{total} = \frac{1}{3} \cdot v_{vent} \quad (2.5)$$

$\rho$  : Masse volumique du fluide (air atmosphérique sec, environ : 1,23 kg/m<sup>3</sup> à 15 °C et à pression atmosphérique 1,0132 bar)

## Chapitre 2

$S$  : surface du capteur éolien (en  $m^2$ )

$v$  : vitesse incidente (amont) du fluide (en m/s)

La vitesse angulaire  $\omega$ , du rotor, aussi appelée fréquence angulaire ou pulsation, est une mesure de la vitesse de rotation. C'est-à-dire un angle par seconde, est donnée par :

$$\omega = 2\pi \cdot f \quad (2.6)$$

$\omega$  : vitesse angulaire (en rad/s)

$f$  : fréquence de rotation du rotor (en  $s^{-1}$  ou Hz)

La vitesse spécifique noté  $\lambda$  (Lambda) en anglais *Tip Speed Ratio* (TSR) est le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales et la vitesse du vent. Les machines peuvent être classées en fonction de ce paramètre :

- Si  $\lambda$  est inférieur à 3, l'éolienne est dite lente
- Si  $\lambda$  est supérieur à 3, l'éolienne est dite rapide

Par exemple, une éolienne bipale peut avoir un paramètre  $\lambda$  égal à 20.

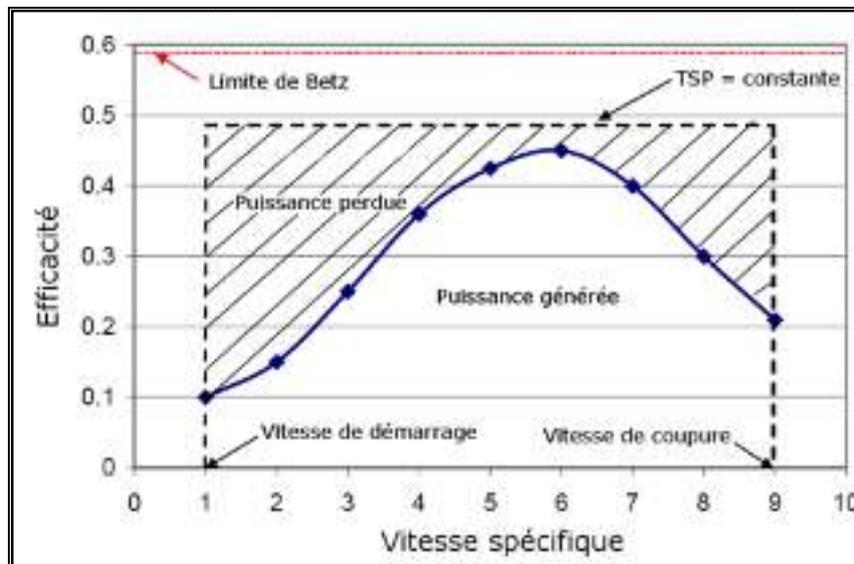
$$\lambda = \frac{U}{v} = \frac{\omega \cdot R}{v} \quad (2.7)$$

$\lambda$  : Vitesse spécifique (sans unité)

$U$  : vitesse de l'extrémité des pales (en m/s)

$v$  : vitesse du vent (en m/s)

$R$  : longueur des pales ou rayon de la turbine (en m)



**Figure 2.5** : Graphe de la Puissance en fonction de la vitesse spécifique [2].

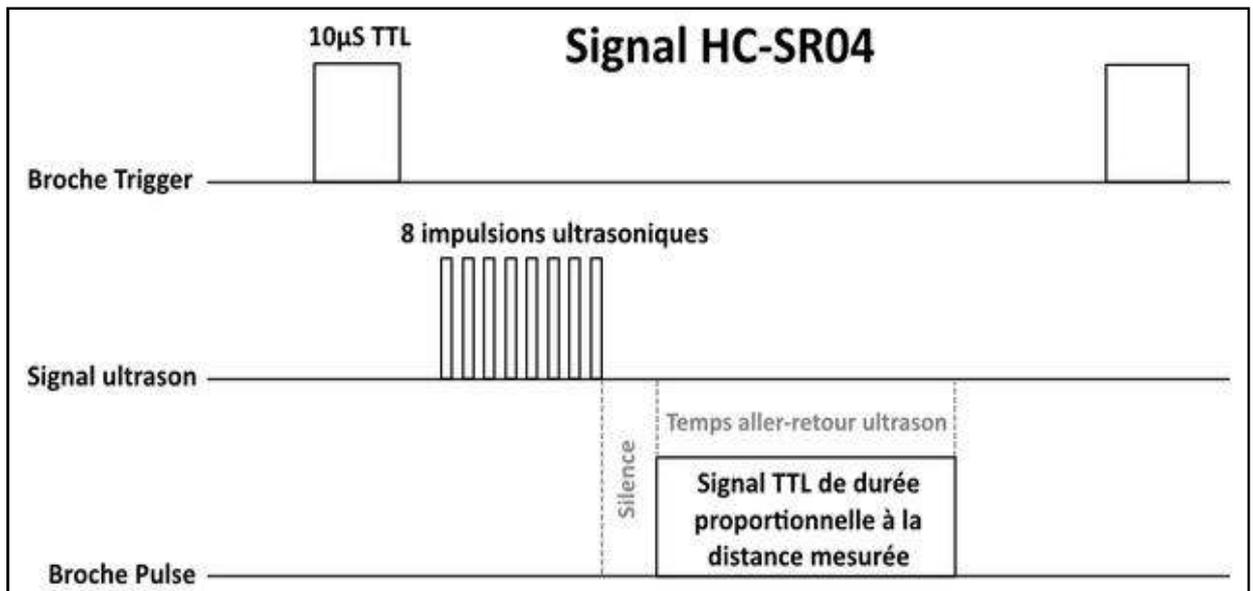
### 2.4.2 Partie électronique

Dans la partie électronique, on a deux composants qui jouent un rôle important dans notre montage : la carte Arduino Uno et le capteur ultrason HC-SR04.

#### a. Le Principe de fonctionnement du module HC-SR04

Le HC-SR04 est un module ultrason permettant l'évaluation d'une distance de 2cm à 500cm. La mesure est réalisée "sans contact" et dispose d'une précision de 3mm dans les conditions optimales. Le module inclus un émetteur et un récepteur ultrason ainsi qu'une électronique de contrôle. Le fonctionnement de ce module s'apparente à celui d'un sonar de sous marin et sa mise en œuvre est relativement simple (Figure 2-.6) :

1. Le module émet une onde sonar composée d'une série de 8 impulsions à 40 kHz.  
Un son à 40 KHz est inaudible pour l'oreille humaine capable de percevoir des sons entre 16Hz et 16KHz.
2. En utilisant la broche Trig, vous envoyez un signal pour activer le déclenchement de l'impulsion sonar.
3. Si le signal revient... la sortie passe au niveau haut durant toute la période où l'onde voyage vers l'objet et revient après avoir été réfléchi par se dernier.



*Figure 2.6 : Principe de fonctionnement du HC-SR04.*

### **b. Le Principe de fonctionnement du la carte Arduino Uno**

Pour notre projet, nous avons choisis le modèle Uno (figure.2-7) qui fait partie de la grande famille des cartes Arduino.

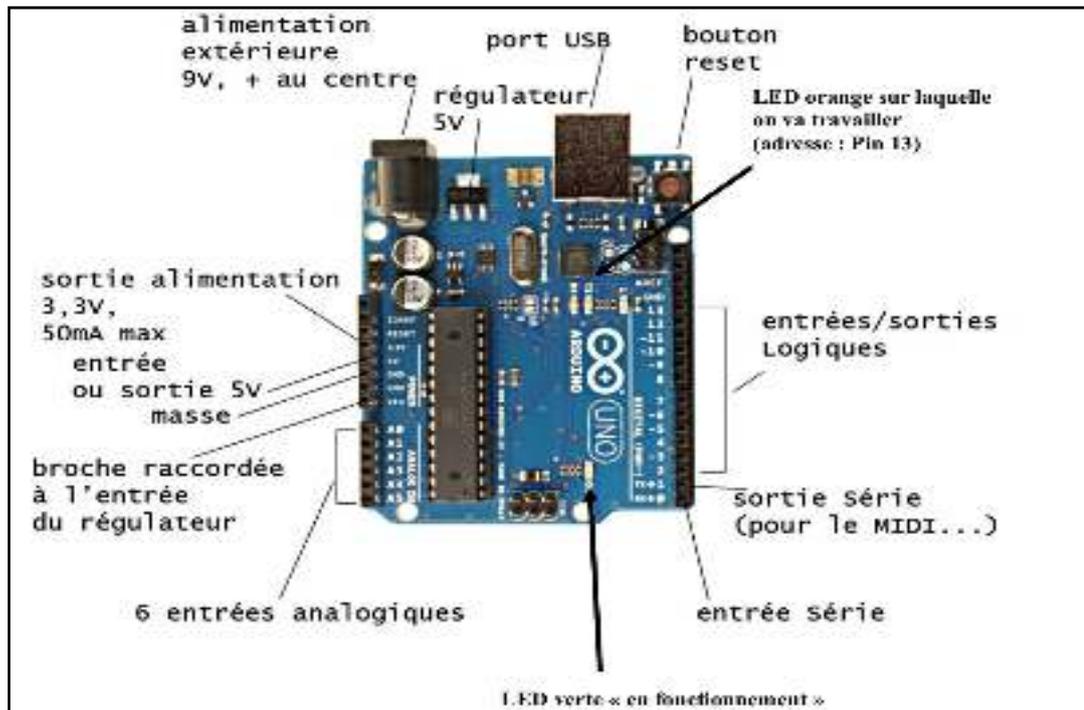
La carte Arduino Uno est basée sur un ATmega328 cadencé à 16 MHz. C'est la plus récente et la plus économique carte à microcontrôleur d'Arduino. Des connecteurs situés sur les bords extérieurs du circuit imprimé permettent d'enficher une série de modules complémentaires.

Elle peut se programmer avec le logiciel Arduino. Le contrôleur ATmega328 contient un bootloader qui permet de modifier le programme sans passer par un programmeur. Le logiciel est téléchargeable gratuitement.

Elle est dotée principalement (Figure 2.7) de :

- 14 entrées/sorties (dont 6 fournissent la sortie PWM : Pulse Width Modulation)
- 6 entrées analogiques
- un cristal à 16 MHz
- une connexion USB
- une prise jack d'alimentation
- un en-tête ICSP
- une fonction reset.

Elle possède 32ko de mémoire flash destinée à recevoir le programme, 2ko de SRAM (mémoire vive) et 1 ko d'EEPROM (mémoire morte destinée aux données). Cette carte Arduino peut aussi s'alimenter et communiquer avec un ordinateur grâce à son port USB. On peut aussi l'alimenter avec une alimentation comprise en 7V et 12V grâce à son connecteur Power Jack.



*Figure 2.7: Les caractéristiques principales de la carte Arduino Uno.*

### 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donc expliqué le principe de fonctionnement général de notre montage. Nous allons donc réaliser une éolienne à axe vertical et un montage simple basé sur deux capteurs ultrasoniques et une carte Arduino Uno va nous permettre de mesurer puis afficher la vitesse du vent qui fait tourner cette dernière. La réalisation pratique et les tests réalisés feront l'objet du prochain chapitre.

# Chapitre 3

## *REALISATION ET TESTS PRATIQUES*

### 3.1 Introduction

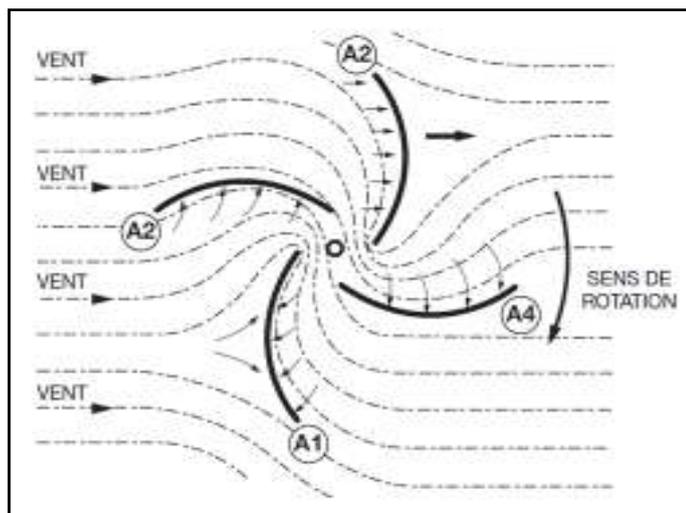
Dans ce chapitre, nous allons aborder deux parties : la première partie est consacrée à la réalisation pratique de notre éolienne alors que la deuxième partie sera consacrée à la partie électronique qui va nous permettre de mesurer la vitesse du vent.

### 3.2 La réalisation mécanique

On va présenter ici les plans que nous avons suivis pour fabriquer une petite éolienne. Le but était d'arriver à la faire avec un matériel de récupération.

#### ➤ Principe de fonctionnement :

Quatre pales sous forme de godets tournent sous l'action du vent (Figure 3.1). Elles se placent automatiquement dans la meilleure position en fonction de sa force et transmettent ainsi une certaine vitesse à l'axe vertical. Par brise légère, les pales s'ouvrent au maximum. Lorsque le vent souffle fort, elles tendent à se refermer. A noter que le couple maximum appliqué sur l'axe se produit lorsqu'elles sont aux trois quarts fermées. Si le vent devient encore plus violent, les pales se ferment complètement et se rouvrent sous l'effet de ressorts dès qu'il faiblit (Figures 3.9 à 3.12).



*Figure 3.1: Principe de fonctionnement selon la direction du vent.*

#### ➤ Liste des matériaux :

Les différents composants utilisés pour la fabrication (Figure 3.2) sont :

- 1 feuilles de plexiglas de 4 mm d'épaisseur de 500 x 500 mm.
- 1 feuilles d'aluminium de 2 mm d'épaisseur 500x 500 mm.
- 30 cm de fer plat de 80 x 5 mm.
- 1 tôle de 320 x 320 de 5 mm d'épaisseur.
- 1 barre de fer plein 20x20 mm, de 1m de longueur.
- 16 cm de fer plat de 20 x 4 mm.
- 15 cm de fer carré de 50 mm.
- 1 tige de fin filetage de diamètre 13 × 900 mm.

## Chapitre 3

- 1 rondelle de nylon diamètre 17, épaisseur 2 mm environ..
- 16 vis diamètre 4 x 16 mm, avec écrous de 4 et rondelles
- vis diamètre 8 x 10 mm.
- 2 ressorts de traction diamètre de fil 3 mm, diamètre extérieur 3.5 mm, longueur 15mm.
- 9 m de cornière perforée de 50 x 50 mm.



*Figure 3.2: Les différents composants de l'éolienne verticale.*

### ➤ Construction des pales :

On a utilisé un tuyau de PVC de 2mm d'épaisseur et de 110mm de diamètre, son poids conséquent donne à l'ensemble rotatif une forte inertie qui améliore la régularité de la rotation. Au nombre de quatre, les pales sont chacune découpées dans une plaque de 7.5 x 20cm. Les PVC A sont cintrées suivant un rayon de 110mm afin que les pièces réunies bout à bout forment un cylindre de 110 mm de diamètre et de 20 cm de hauteur (Figure3.3).

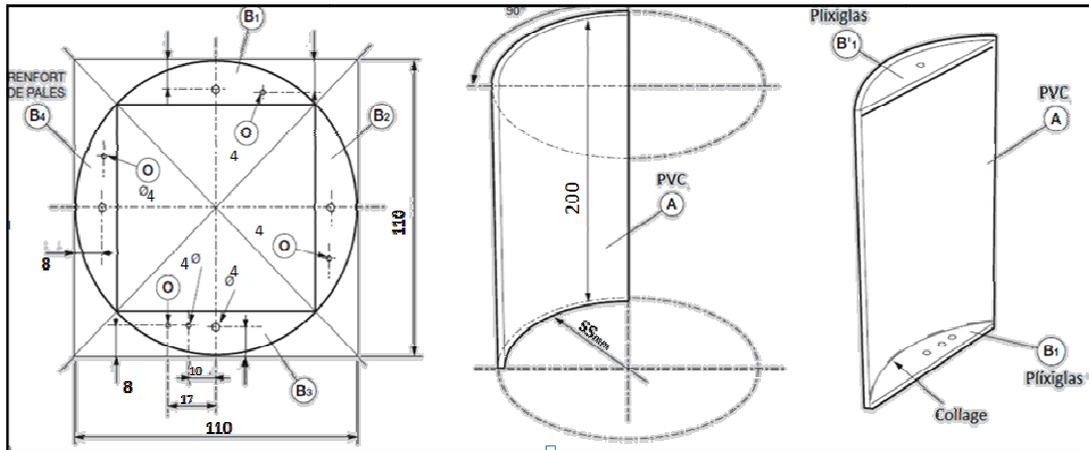
Chaque pale reçoit ensuite deux renforts B et B' en plexiglas de 3 mm, découpés dans huit morceaux de 75 x 20 mm.

- Pour tracer ces pièces en "demi-lune", un gabarit est confectionné dans une feuille de plastique de 12 x 12 cm (Figure 3.3). Pour ce faire, on trace au feutre un premier carré de 110 mm de côté et ses deux diagonales. À partir de leur intersection, sont tracés un cercle de 110 mm (rayon 55 mm) et deux axes perpendiculaires. On dessine ensuite un carré plus petit, ayant pour sommet les points d'intersection du cercle avec les diagonales du grand carré.

- A l'aide des gabarits soigneusement découpés, les huit renforts (B1, B2, B3, B4 et B'1, B'2, B'3, B'4) sont tracés sur les feuilles de tôle et découpés à leur tour. Ils sont ensuite percés d'un trou de  $\varnothing 4$  mm, centré à 10 mm d'un côté du grand carré. Ces perforations permettent le pivotement des pales, qui tournent de manière identique grâce à des biellettes les reliant à une croix H (Figure3.5). Ces biellettes s'articulent autour d'une vis placée dans des trous de  $\varnothing 4$  mm, repérés par la lettre "O" sur la (Figure 3.3) Les renforts B1, B'1 et B3, B'3 sont percés

## Chapitre 3

de deux autres trous  $\varnothing 4$  mm, qui recevront les vis de maintien des ressorts de traction. Tous les renforts sont ensuite collés sur les PVC (A) cintrés.

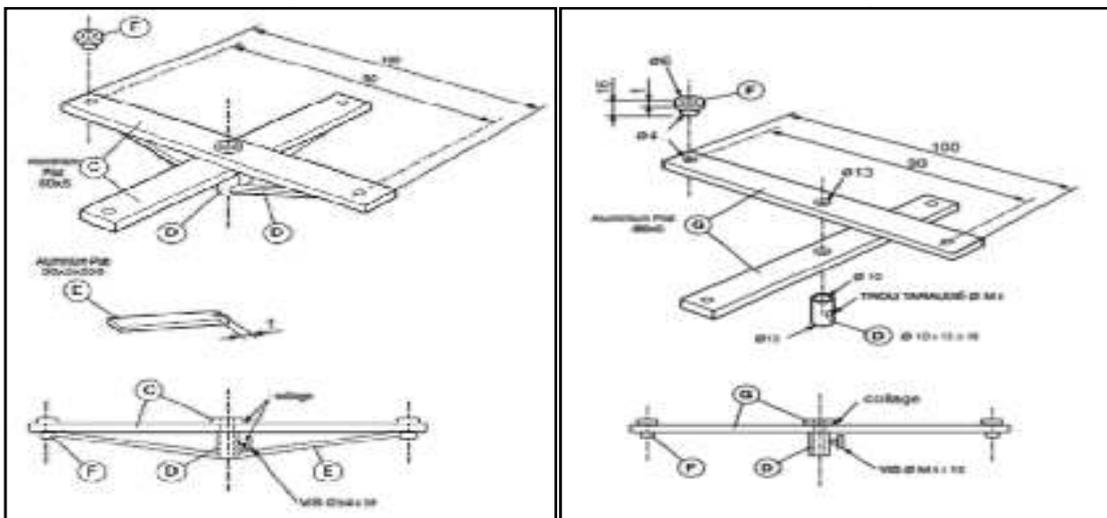


*Figure 3.3: Les plans de construction de gabarit avec les pales.*

### ➤ Les supports de pales

Positionnés au sommet et à la base des pales, ces croisillons sont constitués de deux fers plats G, de 10 x 2mm de section, long de 100 mm (Figure 3.4). Ils sont percés d'un trou central  $\varnothing 2$ mm, ou s'emmanche une bague D, et de deux autres trous  $\varnothing 13$  mm destinés à des paliers en nylon. Ces trous sont distants de 75mm pour le croisillon supérieur et de 80mm pour celui du bas. Petite différence permettra d'incliner légèrement les axes des pales qui de ce fait ne risqueront pas de se heurter lorsqu'elles se ferment complètement.

- Le support inférieur se distingue également par la présence de quatre renforts E, qui leur permettent de supporter sans fléchir le poids des pales. Usinés dans du fer plat de 5 x 2 mm, longs de 50mm ils sont échancrés en bout pour venir épouser la bague à laquelle ils s'assemblent (Figure 3.4).



*Figure 3.4: plan du support supérieure et inférieure.*

### ➤ La croix de pivotement

Identifiée par la lettre H, cette pièce a pour fonction de coordonner l'inclinaison des pales, par l'intermédiaire des biellettes. En aluminium de 2mm offrant une bonne rigidité, elle s'inscrit dans une plaque de  $\varnothing 13\text{mm}$ .

- Après traçage (Figure 3.5), les branches sont découpées à la scie de métaux. Un coup pointeau marque le centre de la croix et permet de tracer deux cercles concentriques, de 30 et 25 mm de diamètre. À l'intersection du grand cercle et des deux axes, sont percés quatre trous de 4 mm où viendront s'articuler les biellettes sur les boulons de 4 x 15 mm.
- Destinés à l'accrochage des ressorts, deux trous supplémentaires ( $\varnothing 2\text{mm}$ ) sont percés sur les cercles de  $\varnothing 25\text{mm}$ , à 15 mm de part et d'autre d'un axe médian tracé sur l'une des branches. Un dernier trou, est réalisé au centre de la croix. Cette dernière pivotera sur l'axe vertical de l'éolienne. Pour améliorer sa stabilité, elle se complète d'un moyeu I (pièce centrale sur laquelle sont assemblées les pièces qui doivent tourner autour d'un axe). Tiré d'une tige de 13 mm de diamètre extérieur, il est alésé au tour un diamètre de 14 mm.
- Inséré dans le trou central de la croix, le moyeu doit y être soudé en contrôlant bien sa verticalité. Pour s'en assurer, il suffit de faire pivoter la croix sur le rond de 30 mm qui servira d'axe N (l'axe verticale).

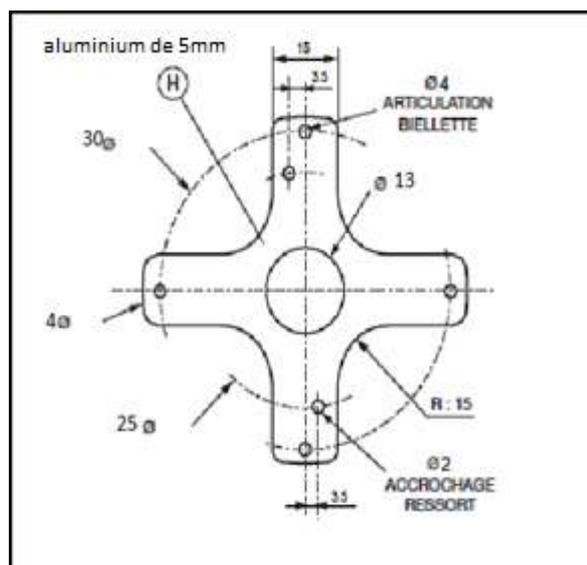
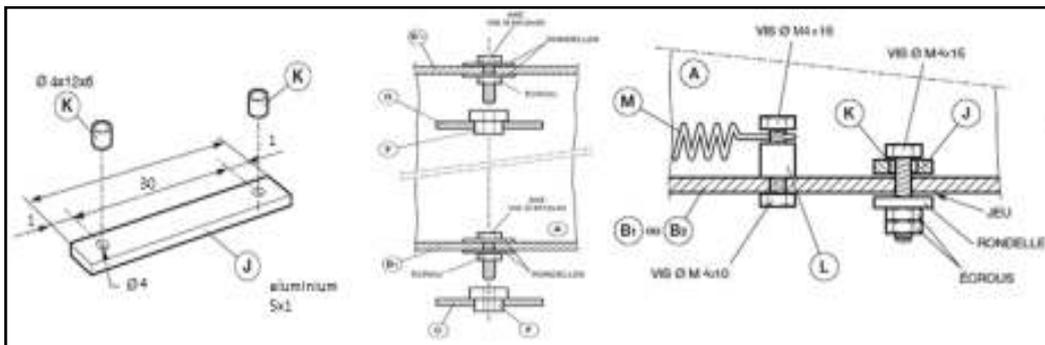


Figure 3.5: Traçage de croix de pivotement.

### ➤ Bielles et accessoires

Mesurant 36 mm de longueur, les quatre bielles J (Figure 3.6) sont en aluminium plat de 6 x 1 mm. Elles comportent chacune deux trous de  $\varnothing 4$  mm, distants de 30 mm, dans lesquels s'ajustent les bagues K en Nylon.

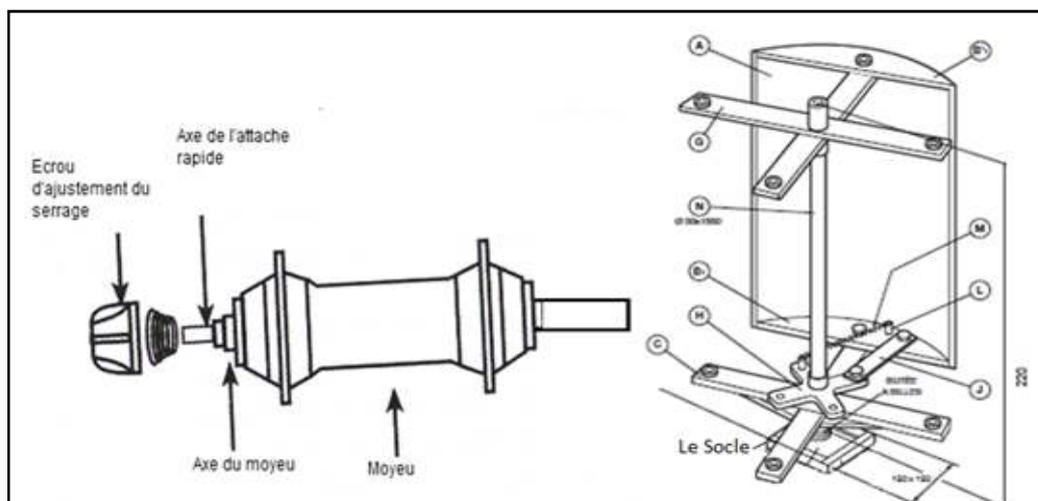
- Deux ressorts de rappel M relient les renforts inférieurs B1, B3 à la croix H. Pour leur éviter de heurter les têtes de vis servant d'axe, ils sont rehaussés par quatre tronçons de fer rond L de  $\varnothing 6$  x L. 3 mm, percés de bout en bout au  $\varnothing 2$  mm et taraudés à 3 mm. Ces rehausses sont ensuite fixées, par quatre vis de 4 x 15 mm, aux renforts B1, B3 et à la croix. Pour attacher les ressorts, deux autres vis de 8 x 15 mm sont enfoncées au sommet des rehausses.



*Figure 3.6: Les bielles et les accessoires de l'éolienne.*

### ➤ Le socle

Il se compose d'une plateforme construite à partir d'une barre de fer plein 20x20 mm, de 1m de longueur, coupé en quatre morceaux, deux de 150 mm et l'autre de 110 mm soudé avec une plaque carrée de 150x150x2 mm relié avec une roue moyeu de vélo boulonnée d'une forme verticale et qui est percée en son milieu pour recevoir le passage de l'axe N (Figure 3.7).



*Figure 3.7: le socle.*

### ➤ Montage et finition

L'axe principal N, de  $\varnothing$  13 mm et de 550 mm de longueur de l'éolienne tourne dans le socle, à l'intérieur de roue moyeu du vélo d'un roulement (tous les deux à billes) montés sur la plate-forme du socle fixée par 6 vis de 4 x 15 mm ainsi que leurs écrous (Figure 3.8).

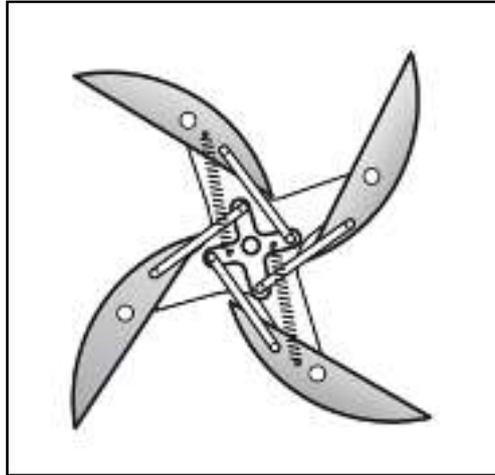
- La croix en place, avec son moyeu dirigé vers le haut, le support supérieur G est installé. La vis pointeau déblocage est serrée modérément, car il faudra encoléré positionné très précisément en hauteur et en rotation.
- Mais avant cela, deux vis de 4 x 15 mm ainsi que deux écrous (fixés à la colle époxy) et quatre rondelles sont montés sur chaque pale. Ces vis serviront d'axe d'articulation au bout des supports.
- Deux pales, diamétralement opposées, sont installées sur les supports haut et bas. La hauteur et l'alignement de ces derniers sont réglés de façon que le poids de la pale se reporte sur celui du bas. Il faut donc laisser un petit espace entre la face interne des renforts B' et le dessus des paliers F. Les vis de blocage de leurs bagues peuvent ensuite être serrées fortement.
- Les deux autres pales sont montées à leur tour, suivies des quatre biellettes. Celles-ci sont boulonnées sur le renfort inférieur et sur la croix, tout en permettant leur pivotement. Un écrou et un contre-écrou sont prévus sur chacune des vis de 4 x 15 mm.
- Les deux ressorts de traction, permettant l'ouverture des pales. Leur longueur se détermine par tâtonnements.
- Indispensable, la boulonnerie doit être zinguée d'origine pour ne pas rouiller et les éléments métalliques dûment protégés contre l'oxydation.



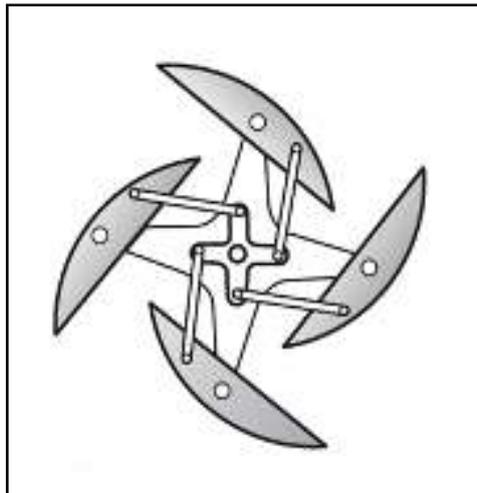
*Figure 3.8: l'éolienne après le montage et la finition.*

### ➤ Position des pales en fonction du vent

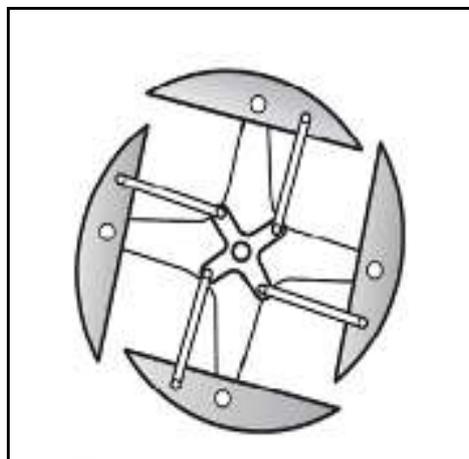
L'ouverture et la fermeture de pales dépend de la vitesse du vent (Figures 3.9 à 3.12).



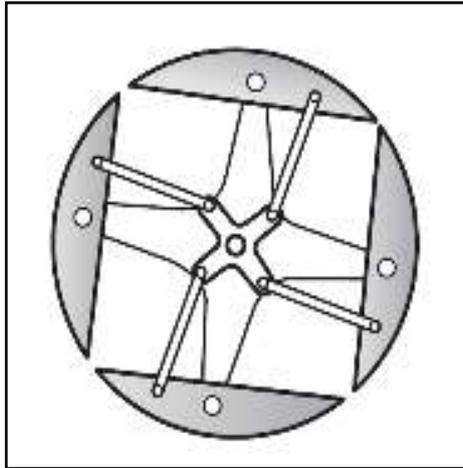
*Figure 3.9: Position a l'arrêt ou vent très faible.*



*Figure 3.10: Position des pales par vent moyen*



*Figure 3.11: Position des pales par vent fort*



*Figure 3.12: Position des pales par vent très fort-tempête.*

### 3.3 La réalisation électronique

Dans cette partie, on va expliquer le montage électronique réalisé autour de la carte Arduino et des capteurs ultrasons.

#### ➤ Principe de fonctionnement

Notre objectif étant au départ, de réaliser une éolienne puis arriver à mesurer la vitesse du vent. L'éolienne, étant entraînée en rotation par la force du vent. Il faut accoupler alors les pales de l'éolienne à un générateur électrique qui, en rotation lui aussi, délivrera un courant électrique qui pourra alors être exploité pour mesurer la vitesse du vent. Le générateur peut être une "dynamo" à courant continu, comme autrefois ; de nos jours ce serait plutôt un alternateur délivrant du courant alternatif (comme sur les véhicules automobiles).

Confrontés au non disponibilité d'alternateur, nous avons procédé alors à une autre façon pour mesurer la vitesse du vent qui fait tourner l'éolienne réalisée.

L'idée est de mesurer la vitesse de propagation d'un (ultra) son entre deux points, dans un sens puis dans l'autre. Le son étant porté par l'air, s'il va plus vite de A vers B que de B vers A, alors l'air est en mouvement de A vers B.

Le montage réalisé va donc calculer le temps de propagation (direction) du vent entre deux point A et B. Pour cela, nous utilisons deux télémètres ultrason HC-SR placés le première au point A et le deuxième au point B puis on mesure le temps de propagation  $t(A-B)$  puis  $t(B-A)$ .

Le son étant porté par l'air, s'il va plus vite de A vers B que de B vers A, alors l'air est en mouvement de A vers B.

Soient :

C: la vitesse du son dans l'air (immobile).

V: la vitesse de l'air (positif dans le sens A vers B).

$D_{AB}$ : la distance entre A et B.

## Chapitre 3

Alors on peut calculer le temps de propagation de A vers B ( $t_{A \rightarrow B}$ ) et de B vers A ( $t_{B \rightarrow A}$ ) :

$$t_{A \rightarrow B} = \frac{D_{AB}}{C+V} \quad (3.1)$$

$$t_{B \rightarrow A} = \frac{D_{BA}}{C-V} \quad (3.2)$$

Il est facile de combiner ces équations pour avoir alors :

$$C = \frac{D_{AB}}{2} \times \left( \frac{1}{t_{A \rightarrow B}} - \frac{1}{t_{B \rightarrow A}} \right) \quad (3.3)$$

$$V = \frac{D_{AB}}{2} \times \left( \frac{1}{t_{A \rightarrow B}} + \frac{1}{t_{B \rightarrow A}} \right) \quad (3.4)$$

- Donc, il suffit de mettre deux capteurs ultrason l'un en face de l'autre, mesurer ( $t_{A \rightarrow B}$ ) et ( $t_{B \rightarrow A}$ ) puis exploiter l'équation (3.4) pour mesurer vitesse du vent.

- **Matériel nécessaire**

Les différents composants de notre montage électronique (Figure 3.13) sont :

- 1 Carte Arduino et son câble.
- 1 Breadboard.
- 8 Cavaliers / Câbles.
- 2 Capteurs ultrason HC-SR04.

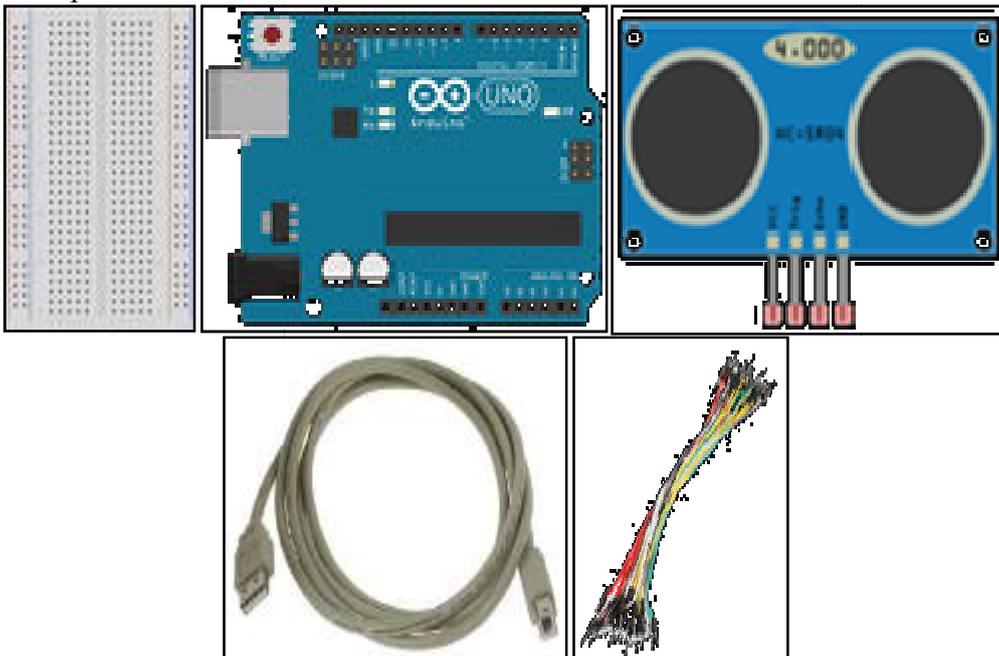


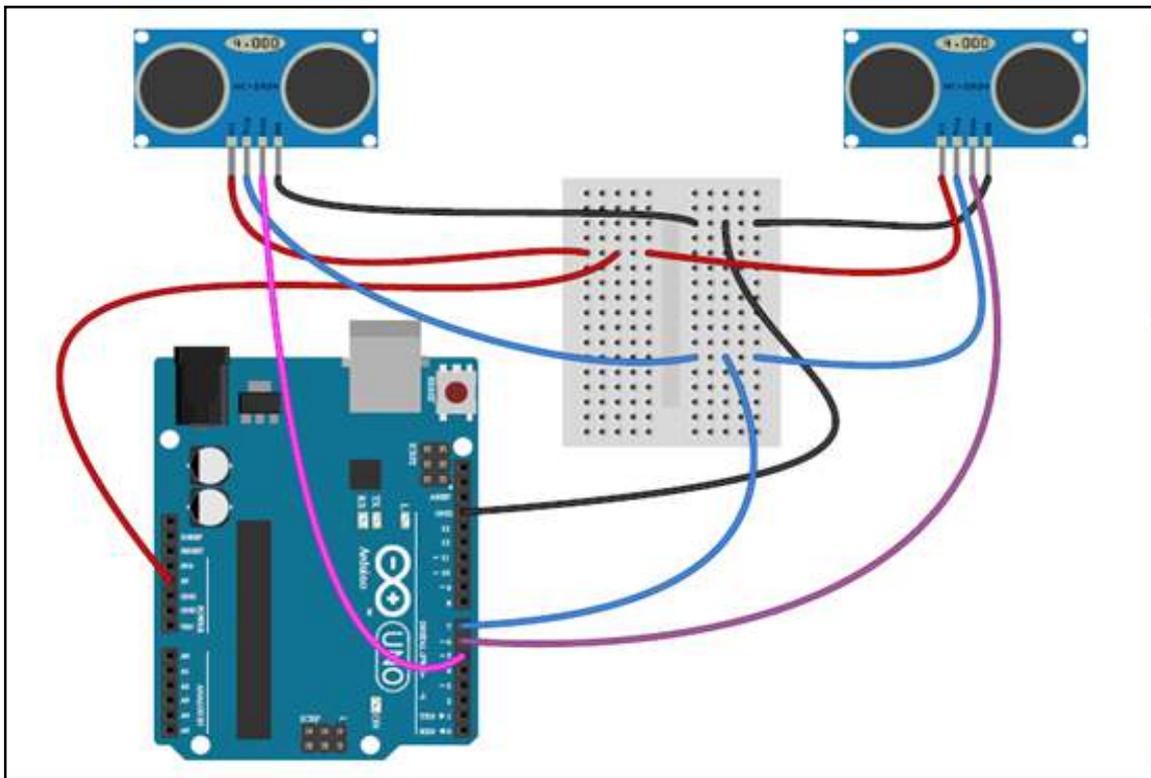
Figure 3.13: Les composants électroniques du montage.

### ➤ Branchement

La Figure 3.14 présente la vue générale du montage électronique réalisé.

Le branchement des deux capteurs à la carte Arduino est fait directement grâce aux 4 broches de chacun d'eux. Soient :

- La broche VCC de chaque capteur est reliée directement à la sortie alimentation de +5 V de la carte Arduino. Il en est de même pour la broche GND qui est reliée à la masse de la carte.
- Au centre, les 2 broches représentant la broche Trigger pour l'émetteur et la broche Echo pour le récepteur de chaque capteur utilisé, sont alors branchés à des entrées/sorties sur la carte Arduino.
- Pour notre réalisation, le branchement du capteur A se fait par le biais des PIN 7 et 5 alors que celui du capteur B est réalisé sur les PIN 7 et 5.

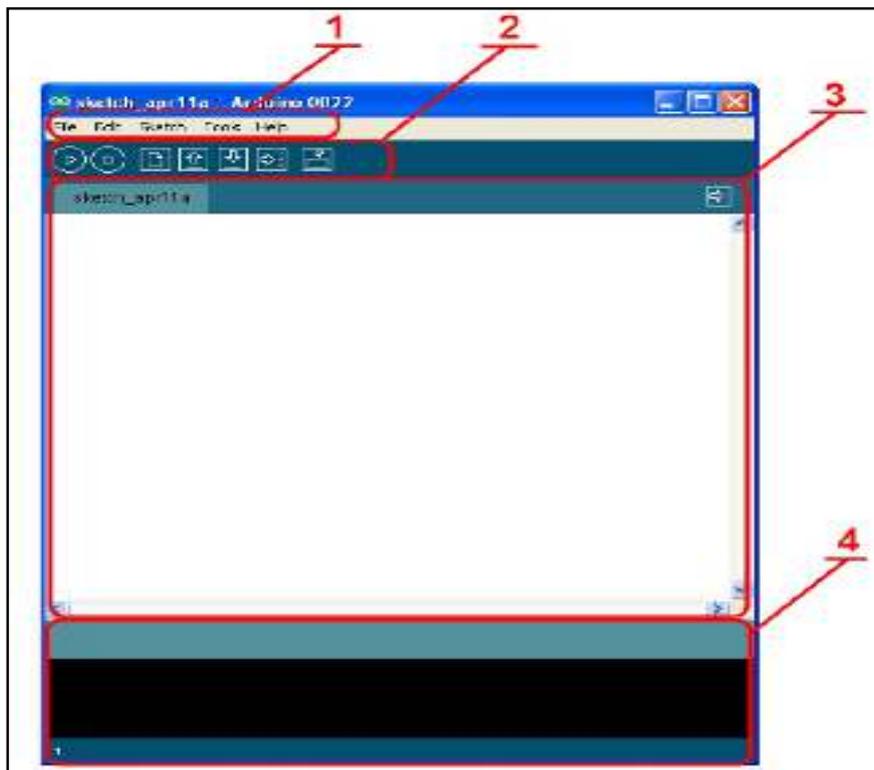


*Figure 3.14: Branchement des capteurs sur la carte Arduino.*

### 3.4 Présentation du logiciel Arduino

L'environnement de programmation Arduino (IDE en anglais) est une application écrite en Java inspirée du langage Processing 2. L'IDE permet d'écrire, de modifier un programme et de le convertir en une série d'instructions compréhensibles pour la carte.

C'est un logiciel de programmation par code, code qui contient une cinquantaine de commandes différentes. A l'ouverture, l'interface visuelle du logiciel ressemble à ceci (Figure 3.15) : des boutons de commande en haut, une page blanche vierge, une bande noire en bas



*Figure 3.15 : Présentation du menu principal*

Où :

- Le cadre numéro 1 : représente les options de configuration du logiciel.
- Le cadre numéro 2 : contient les boutons de raccourci qui vont nous servir lorsqu'on va programmer la carte.
- Le cadre numéro 3 : va contenir le programme que nous allons écrire.
- Le cadre numéro 4 : est le plus important, car il va nous aider à corriger les fautes dans notre programme. C'est le débogueur.

### 3.5 Mise en œuvre d'un programme dans l'environnement Arduino

Pour mettre en œuvre une réalisation avec carte Arduino, on doit donc suivre toujours les étapes suivantes :

- On conçoit d'abord un programme avec le logiciel Arduino
- On vérifie ce programme avec le logiciel (compilation)
- Des messages d'erreur apparaissent éventuellement...on corrige puis vérifie à nouveau...
- On enlève le précédent programme sur la carte Arduino (Bouton réinitialisation)
- On envoie ce programme sur la carte Arduino dans les 5 secondes qui suivent l'initialisation
- L'exécution du programme sur la carte est automatique quelques secondes plus tard ou à ses prochains branchements sur une alimentation électrique ( Alim 9/12V ou port USB).

Sachant qu'un programme utilisateur Arduino est une suite d'instructions élémentaires sous forme textuelle, ligne par ligne. La carte lit puis effectue les instructions les unes après les autres, dans l'ordre défini par les lignes de code. La Figure 3.16 présente un exemple de structure de réalisation d'un programme sous l'environnement Arduino :

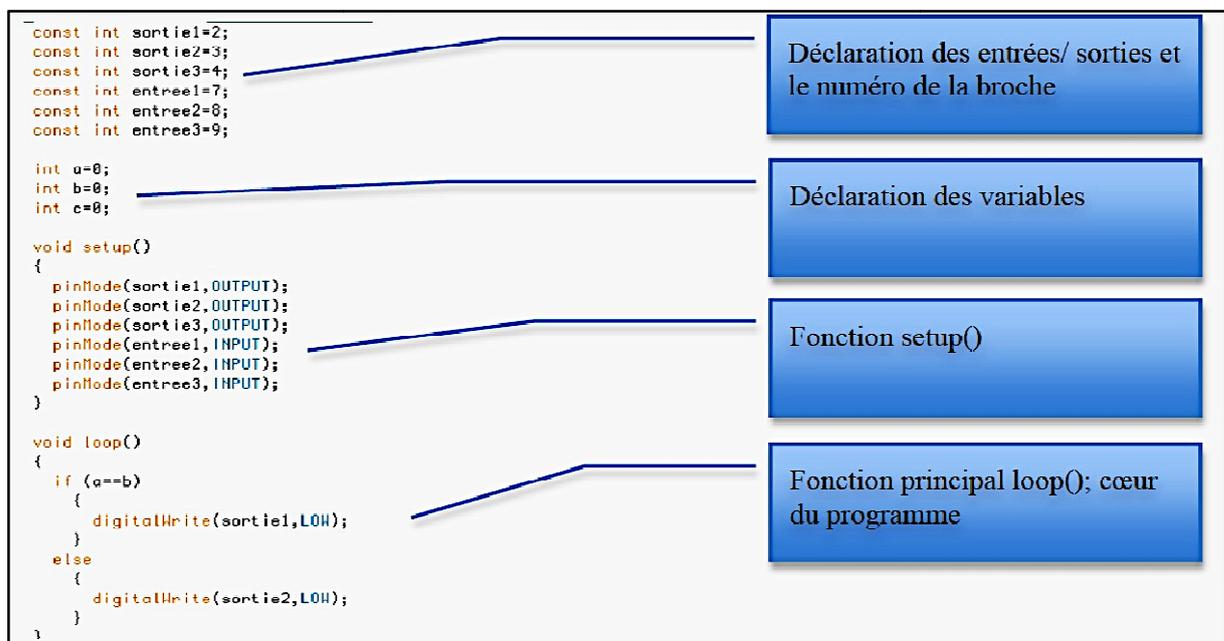


Figure 3.16 : Structure de Réalisation d'un programme Arduino.

## 3.6 L'organigramme du programme

Avant tout écriture de programme, nous sommes amenés à établir l'organigramme correspondant aux grandes lignes que va exécuter notre programme (Figure 3.17)

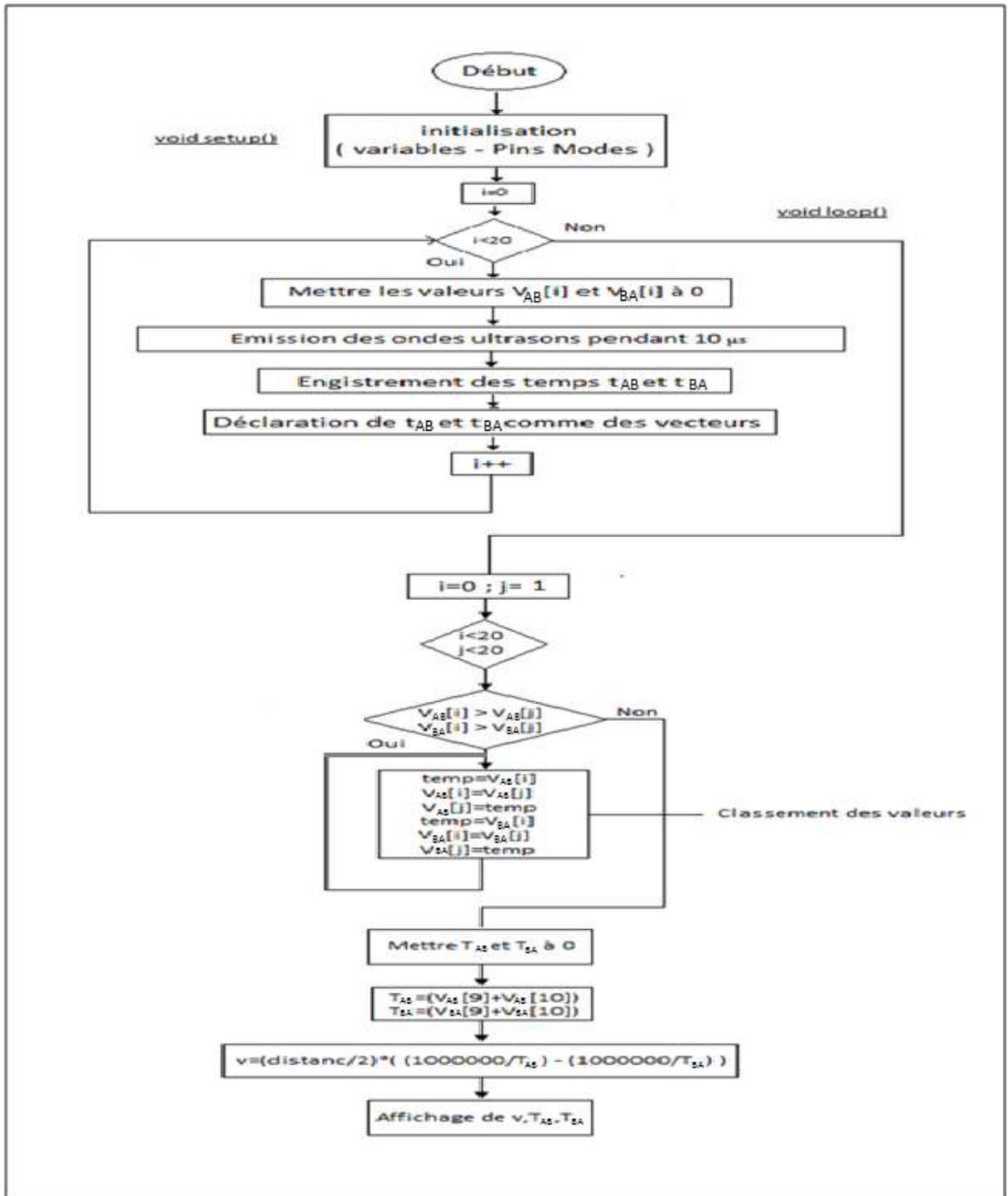


Figure 3.17 : Organigramme général du programme réalisé.

### 3.7 Présentation du montage complet

Rappelons que le but de notre travail est de réaliser une petite éolienne puis récupérer la vitesse de vent qui la fait tourner (Figure 3.18).

Notre dispositif est donc composé des éléments suivants :

- La source du vent : on a choisi un séchoir pour produire le vent dirigé vers l'éolienne.
- L'éolienne : qui va donc tourner autour de son axe sous de l'action du vent produit par le séchoir.
- Deux capteurs ultrasons : placés l'un en face de l'autre à une distance que nous avons choisie égale à 0,37 m. Cette position offre une excellente plage de détection pour déterminer les temps de propagation des ondes acoustiques.
- La carte Arduino : va recevoir l'information envoyée par les deux télémètres. Elle va donc commencer par ordonner par ordre croissant les données correspondantes aux temps de propagation des ondes acoustiques, calculer alors la valeur médiane correspondante puis procéder au calcul de la vitesse du vent correspondant. Une fois fait, elle va envoyer cette dernière valeur calculée avec les temps médians correspondants vers le PC pour les afficher.



*Figure 3.18 : Présentation du montage complet.*

### 3.8 Tests réalisés et interprétation

On a procédé à deux tests différents. Le premier sans activation du séchoir, donc sans vent. Et le deuxième, en activant le séchoir afin de créer une source de vent qui va faire tourner notre éolienne.

➤ **Les mesures sans vent**

Nous avons donc téléchargé notre programme dans la carte Arduino et nous avons visualisé sur le moniteur série du logiciel les résultats détectés.

Le Tableau 3.1 donne donc les résultats obtenus à partir de notre programme de mesure où  $t_{AB}$  et  $t_{BA}$  représentent les temps médians (en  $\mu s$ ) obtenus après 20 mesures des temps de propagations des ondes acoustiques du capteur A vers le capteur B (et vice versa) et  $V$  la vitesse du vent calculée en m/s :

$t_{AB}$	1963	1962	1962	1914	1955	1961	1962	1961	1961	1962
$t_{BA}$	1975	1975	1975	1929	1975	1975	1969	1969	1975	1975
$V$	0.52	0.52	0.52	0.70	0.88	0.52	0.35	0.35	0.52	: 0.52
$t_{AB}$	1958	1957	1963	1982	1981	1961	1961	1963	1962	1962
$t_{BA}$	1975	1969	1969	1993	1992	1975	1969	1969	1975	1975
$V$	0.70	0.52	0.35	0.52	0.35	0.52	0.35	0.52	0.52	: 0.35

**Tableau 3.1:** Variation de la vitesse de propagation en fonction de temps de propagation par Brise légère.

D'après ce tableau, on remarque que la vitesse mesurée augmente si la différence entre les temps de propagation des ondes ultrasons  $t_{AB}$  et  $t_{BA}$  augmente. Par contre, cette vitesse diminue et tend vers zéro lorsque cette différence devient très petite, ce qui vérifie bien la relation de la vitesse mesurée donnée par l'équation 3.4.

Sans vent, normalement on doit obtenir une vitesse nulle. Par contre, on a obtenu une vitesse variant de 0.35m/s jusqu'à 0.88m/s, ceci est dû à la présence d'un très faible courant d'air provenant de la fenêtre présente dans notre lieu de mesure.

### ➤ Les mesures avec source de vent

Dans le deuxième test, nous avons donc mis en marche le séchoir, l'éolienne a commencé à tourner en créant donc un vent qui va circuler entre les deux capteurs.

Le tableau suivant traduit la variation de la vitesse de vent mesurée par notre programme (tableau 3.2) :

$t_{AB}$	2053	2053	2053	2077	2053	2053	2053	2053	2053	2086
$t_{BA}$	2169	v	2169	2169	2169	2169	2168	2162	2145	2169
V	4.55	4.55	4.55	3.50	4.55	4.55	4.55	4.38	3.68	3.15
$t_{AB}$	2053	2053	2053	2077	2053	2053	2053	2053	2053	2086
$t_{BA}$	2169	v	2169	2169	2169	2169	2168	2162	2145	2169
V	4.55	4.55	4.55	3.50	4.55	4.55	4.55	4.38	3.68	3.15

**Tableau 3.2 :** Variation de la vitesse de propagation en fonction de temps de propagation dans le cas d'un vent moyen.

D'après ce tableau, on remarque bien que la vitesse mesurée a augmenté en présence du vent et varie entre 3.15 m/s et 4.55 m/s.

### 3.9 Conclusion

Nous avons procédé dans cette partie à la réalisation pratique de notre éolienne puis à la mise en œuvre du système électronique pour mesurer la vitesse du vent autour de deux capteurs ultrasons.

Une fois, la réalisation terminée et le programme fonctionnel, nous avons procédé à des tests en conditions réelles de l'éolienne verticale.

# **Conclusion**

## **Générale**

## Conclusion Générale

---

L'objectif principal de notre travail consistait à mesurer la vitesse du vent engendré par la rotation des différentes pales de l'éolienne que nous avons réalisé aussi avec des matériaux simples. Grâce à un montage basé sur la mesure des temps de propagation des ondes acoustiques entre deux capteurs ultrasons disposés face à face.

Pour atteindre cet objectif, nous avons commencé par une brève étude bibliographique sur le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne.

Nous sommes passés alors à la présentation du principe de fonctionnement général du montage à réaliser en présentant les différents composants nécessaires. Puis, à la réalisation pratique du montage désiré. Nous avons donc réalisé tout d'abord une petite éolienne à axe vertical, puis nous avons procédé à l'assemblage du montage électronique autour de la carte Arduino Uno.

Et enfin, nous avons procédé à des tests en conditions réelles. Les résultats obtenus sont très satisfaisants et viennent affirmer le principe de calcul proposé pour mesurer la vitesse du vent engendré par l'éolienne.

Comme perspectives, nous proposons pour la suite de ce travail, de réaliser un alternateur qui nous permettra de générer un vrai courant électrique à partir de l'éolienne et d'ajouter un afficheur LCD au montage autour de la carte Arduino afin de ne plus avoir besoin du PC pour afficher la vitesse du vent. On peut aussi ajouter à notre montage une autre fonction à mesurer, soit la direction du vent aussi.

# Références Bibliographiques

1. Diaz, D. A.; Pinto, F. A. N., 2011. "Vertical Wind Turbine With Variable Blade Angular Position". Proceedings of the 21st International Congress of Mechanical Engineering. Natal, RN.
2. Sinisa Stankovic, Neil Campbell, Alan harries, Urban Wind Energy -livre- 2009.
3. Aquilero, Vertical Wind Turbines – 2014.
4. Wind Energy Explained: theory, design and application" (Manwell, McGowan, Rogers).
5. Le grand livre d'Arduino Erik Bartman en 2015.
6. [www.dolcera.eolien.com](http://www.dolcera.eolien.com) .
7. [www.generationrobots.com](http://www.generationrobots.com) .
8. [www.arduino.com](http://www.arduino.com) .
9. Centre de formation professionnelle « mécatronique » JSC Gabrovo Str. "Rayko Daskalov".
10. <https://www.arduino.cc/en/Reference/EsploraLibrary>.
11. ASTUPS CampusFab et LECHALUPÉ Julien : 'Cours d'initiation à Arduino', Université Paul Sabatier, 2014.
12. KRAMA Abdelbasset et GOUGUI Abdelmoumen : 'Mémoire MASTER ACADEMIQUE : 'Etude et réalisation d'une carte de contrôle par Arduino via le système Androïde ', Université Kasdi Merbah Ouargla, 2015.

## Nomenclature

$t_{A-B}$  : Le temps de propagation de A vers B [ $\mu\text{s}$ ].

$t_{B-A}$  : Le temps de propagation de B vers A [ $\mu\text{s}$ ].

$C$  : La vitesse de son dans l'air [340 m/s].

$V$  : La vitesse du vent entre les points A et B [m/s].

$\emptyset$  : Diamètre ' phi '.