

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE de Technologies
DEPARTEMENT : Électronique
N° Ordre : ...20 .../ INST / 2022



DOMAINE : Sciences et Technologies
FILIERE : Électronique
OPTION : Instrumentation

**Mémoire présenté pour l'obtention
du diplôme de Master Académique**

Par: OUCHENE Marouane

ADJENEG Mustapha

Intitulé

**Mise en œuvre d'un kit didactique d'un
générateur éolien et conception d'une interface
d'acquisition et de supervision.**

Soutenu publiquement le: 28 / 06 / 2022 devant le jury composé de:

Prof. LADJAL Mohamed	Université de M'sila	Président
Dr. KHENNOUF Salah	Université de M'sila	Encadreur
Dr. GUICHI Amar	Université de M'sila	Co- Encadreur
Dr. BENNACER Hamza	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2021 /2022

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions ALLAH le tout Puissant qui nous a donné la force et le courage de mettre en œuvre ce modeste travail et qui nous a permis de vivre ce bonheur.

*Nous tenons à remercier nos encadreurs Monsieur **Dr. KHENNOUF Salah** et **Dr. GUICHI Amar**, d'avoir suivi notre travail et de nous avoir encouragés, car ils ont continué à nous soutenir tout au long de ce travail.*

Ensuite nos remerciements s'adressent aux membres du jury qui nous ont faits l'honneur d'avoir accepté d'examiner et de valoriser notre travail.

*Nos remerciements les plus vifs vont également à notre cher ami **Mr. BAALI Hamza** ainsi à **Mr. B. SALAMANI** chef de hall de technologie et à **Mr. F. BENMOHAMED** responsable des laboratoires d'électronique qui ont toujours répondu présents pour nous apporter leur aide appréciable et bénéfique.*

Une place dans ces remerciements est réservée au staffe administratif ainsi que tous les enseignants du département d'électronique pour leurs collaborations et leur participation dans notre formation, sans oublier les étudiants de l'option d'instrumentation.

Enfin un grand merci pour tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicace

*Je dédie cet humble travail à l'esprit de mes chers parents, et à l'esprit de mes chers parent de ma femme et à l'esprit de cher **B. ALI**, ainsi qu'à ma femme **KHAOUKHA** spécialement, car elle m'a beaucoup aidée à suivre mon chemin, et qui n'a jamais cessé de m'encourager et de me guider, grâce à son amour, sa tendresse, sa compréhension, sa patience, ses sacrifices, et ses prières, ses yeux ne m'ont jamais quitté, je ne peux jamais vraiment traduire ce que je ressens pour elle.*

*À mes chères **ABDELRAHIM** et sa femme **NAFISSA**, ainsi qu'à **KHALISSA**, pour leurs encouragements et leur soutien moral.*

À mes cher frères et sœurs.

À mes amis et mes collègues de travail.

À tous ceux qui me sont chers.

Merci à tous

Qu'ALLAH vous bénisse

Dédicace

*Je dédie cet humble travail, comme preuve de respect, de gratitude, et de reconnaissance à : Mes chers parents **Med Taher** et **Dalila** ainsi qu'à ma femme **Rafika** : Qui n'ont jamais cessé de m'encourager et de me conseiller. Ils nous ont beaucoup aidé tout au long de notre chemin, grâce à leur amour, leur compréhension, leurs sacrifices, leur tendresse, leurs prières et leur patience et leur soutien moral et matériel.*

On ne saurait jamais traduire ce qu'on ressent vraiment envers eux.

*Mes enfants : **Abdeldjalil** ; **Maria** ; **Safia** ; **Abdelrahim***

Mes chers frères et sœurs : Pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral, pour leur indulgence en notre faveur qu'ils touchent ici l'affection la plus intime qu'on ressent à leur égard.

Mes amis et collègues : Pour leur compagnie et bons moments passés ensemble.

Et tous ceux qui nous sont chers...

Merci à tous

Qu'ALLAH vous bénisse

ADJENEG MUSTAPHA

Liste des abréviations et nomenclatures

- DC:** Direct Current, (Courant Continu **CC**).
- AC:** Alternating Current (Courant Alternatif **CA**).
- FPGA:** Field Programmable Gate Arrays.
- VHDL:** Its full name is (VHSIC Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language).
- LabVIEW:** Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench.
- Mod.WG/EV:** Model. Wind Generator/ Elettronica Veneta.
- DPN:** Direction de Portance Nulle.
- MPPT:** Maximum Power Point Tracking, (point de puissance maximale)
- USB:** Universal Serial Bus, (Bus série universel).
- CSV:** Conversion intelligente pour la Seconde Vie des batteries
- GEL:** Matière interne sous forme de Gel.
- CEI 11-20:** Impianti di produzione di energia elettrica e gruppi di continuità collegati a reti di I e II categoria.
- LINUX:** Module (Paquet) pour interfacier Arduino et LabVIEW (Nom provient de l'animal Lynx).
- VIPM:** Virtual Instrument Package Manager.
- PWM:** Pulse-width modulation.
- MLI:** Modulation de largeur d'impulsion.
- ATMEL AVR :** Est une famille de microcontrôleurs de la société ATMEL.
- FEM:** La force électromotrice
- Ah:** Ampere hour (Ampère heure) énergie d'une batterie.
- COV :** Composés Organiques Volatils.
- SRAM:** Static Random Access Memory (mémoire vive statique).
- EEPROM:** Erasable Programmable Read-Only Memory (Mémoire morte programmable effaçable).
- SPI:** Serial Peripheral Interface (Interface périphérique série).

Liste des figures

Figure 1.1: Anciens moulins à vent	6
Figure 1.2: Régime des vents autour du globe	9
Figure 1.3: Carte météorologique montrant les hautes et les basses pressions	10
Figure 1.4: Action fluidodynamique d'un courant sur un profil a l'aire	12
Figure 1.5: Représentation schématique d'une pale d'aérogénérateur	12
Figure 1.6: Représentation schématique de la distribution de la portance dans une pale d'aérogénérateur non voilée	13
Figure 1.7: Tube de flux de la théorie de Betz	15
Figure 1.8: Profils de pression et vitesse d'un courant du vent qui passe à travers une turbine éolienne à axe horizontal	15
Figure 1.9: Coefficient de puissance pour certains aérogénérateurs en fonction du rapport de vitesse périphérique/vitesse du vent	18
Figure 1.10: Caractéristique typique puissance rendue - vitesse du vent	19
Figure 1.11: Géométrie de l'aérogénérateur	21
Figure 1.12: Générateur à axe horizontal	22
Figure 1.13: Turbines éoliennes à axe horizontal	22
Figure 1.14: Typologies de tours	23
Figure 1.15: Positionnement correcte de l'aérogénérateur sur le mât de 1.5 m fourni avec l'équipement	24
Figure 1.16: Assemblage de l'aérogénérateur	25
Figure 2.1: Bornier de connexion câbles de l'aérogénérateur	29
Figure 2.2: Connexion des câbles au bornier	29
Figure 2.3: Connexion des câbles provenant de l'anémomètre	29
Figure 2.4: Connexion des câbles provenant de la batterie	30
Figure 2.5: Schéma fonctionnel du système	33
Figure 2.6: Éclaté de la turbine utilisée sur le Mod. WG/EV	35
Figure 2.7: Schématisation fonctionnelle d'une machine synchrone	36
Figure 2.8: Structure de construction et schéma de connexion d'une machine électrique de type sans balais	37
Figure 2.9: Schéma de principe d'un convertisseur monophasé à pont interne	39
Figure 2.10: Système intégré	41
Figure 2.11: Machines éoliennes "Stand-Alone" ou "Off-Grid"	41

Figure 2.12: Systèmes éoliens compatibles avec le réseau	42
Figure 3.1: Présentation de la carte Arduino Mega2560	47
Figure 3.2: Microcontrôleur ATmega2560	48
Figure 3.3: Architecture de Harvard pour les ATMEL	48
Figure 3.4: Module multiplexeur et démultiplexeur pour Arduino	51
Figure 3.5: Structure d'un programme pour Arduino	52
Figure 3.6: Environnement Arduino IDE Version: 2.0.0-rc6.....	53
Figure 3.7: Baud Rate et Bit Rate.....	54
Figure 3.8: Chaîne d'acquisition pilotée par LabVIEW	56
Figure 3.9: Développement d'instruments virtuels (VI)	57
Figure 3.10: Présentation de la Face avant et Block Diagram.....	57
Figure 3.11: Présentation des barres d'outils	57
Figure 3.12: Palette d'outils.....	58
Figure 3.13: Palette de commandes	58
Figure 3.14: Présentation du menu commande	59
Figure 3.15: Présentation du menu commande	59
Figure 3.16: Différents types de structures de données dans LabVIEW.....	60
Figure 3.17: Bibliothèque boucles et structures données	60
Figure 3.18: Configuration de la carte Arduino Mega2560 via LINX.....	62
Figure 3.19: Interfaçage Arduino avec l'environnement LabVIEW.....	63
Figure 4.1 : Connexion de la carte d'acquisition du kit avec le pc.....	66
Figure 4.2 : Illustration des fiches de l'ancienne carte	67
Figure 4.3 : Identification des fils provenant des capteurs	67
Figure 4.4 : Vue interne du tunnel du vent	68
Figure 4.5 : Première raccordement des fils à l'Arduino	69
Figure 4.6 : Schéma interne de l'amplificateur opérationnel TL082	70
Figure 4.7 : Présentation des tensions de bloc d'alimentation ATX	70
Figure 4.8 : Schéma de circuit d'offset et le montage réalisé.....	71
Figure 4.9 : Schéma de raccordement général de la carte Arduino avec le BANC d'essai	71
Figure 4.10 : Interfaçage logiciel.....	72
Figure 4.11 : Programme sous LabVIEW	73
Figure 4.12: Sauvegarde des données dans un fichier Excel.....	78

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Bref historique des installation éolienne	8
Tableau 2.1: Caractéristiques de section des câbles électriques de connexion	31
Tableau 2.2: Section nécessaire pour vitesse du vent de 12mph.....	31
Tableau 2.3: Facteurs de correction de la vitesse	32
Tableau 3.1: Constitution de la carte Arduino Mega 2560.....	47
Tableau 4.1: Coefficients d'étalonnage.....	74
Tableau 4.2: Coefficient d'étalonnage pour le courant I2.....	74

Sommaire

Remerciements	i
Dédicace	ii
Liste des abreviations et nomenclatures	iv
Liste des figures.....	v
Liste des tableaux	vii
Sommaire.....	viii
Introduction générale.....	1

CHAPITRE-1

ÉNERGIE ÉOLIENNE

1.1 Introduction	4
1.2 Généralités sur les énergies renouvelables	4
1.3 Energie éolienne	5
1.3.1 Histoire de l'énergie éolienne	5
1.4 Principes et caractéristiques	8
1.4.1 Régime planétaire des vents.....	8
1.5 Aérodynamique des éoliennes	10
1.6 Principe de fonctionnement du rotor d'un aérogénérateur	10
1.7 Conversion de l'énergie cinétique d'un courant fluide en travail mécanique avec une hélice dans une machine éolienne	14
1.7.1 Puissance totale disponible	14
1.7.2 Puissance maximale utilisable (théorie de Betz)	14
1.7.3 Puissance réelle.....	18
1.8 Paramètres et caractéristiques d'un aérogénérateur.....	18
1.8.1 Puissance du vent.....	19
1.8.2 Zone balayée	20
1.9 Aérogénérateurs.....	21
1.10 Contrôle de la vitesse.....	23
1.11 Installation des générateurs	23
1.12 Types de tour	23
1.13 Assemblage du rotor.....	25
1.14 Conclusion.....	25

CHAPITRE-2

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU KIT DIDACTIQUE

D'AÉROGÉNÉRATEUR (MOD.WG/EV)

2.1 Introduction	27
2.2 Instructions pas-à-pas d'installation	27
2.3 Installation de l'aérogénérateur	30
2.3.1 Sécurité d'installation et d'utilisation	30
2.4 Régulateur de charge	34
2.5 Générateur sans balais	34
2.5.1 Principe de fonctionnement des alternateurs (sans balais)	36
2.6 Dispositifs de stockage de l'énergie	38
2.6.1 Choix de la batterie en fonction de la capacité	38
2.6.2 Batteries fournies avec l'équipement.....	39
2.7 Convertisseur CC/CA	39
2.7.1 Caractéristiques techniques.....	40
2.8 Application des aérogénérateurs.....	40
2.8.1 Applications à systèmes "OFF-GRID"	40
2.8.2 Connexion au réseau local	42
2.9 Conclusion.....	43

CHAPITRE-3

DISPOSITIFS MATÉRIELS ET LOGICIELS UTILISÉS

3.1 Introduction	45
3.2 Description matériel et logiciels	45
3.2.1 Description matériel.....	45
3.2.1.1 Définition du module Arduino	45
3.2.2 Gammes de la carte Arduino	46
3.2.3 Carte Arduino Mega2560	46
3.2.4 Caractéristique technique de la carte Arduino Mega 2560.....	47
3.2.5 Partie matérielle	47
3.2.6 Microcontrôleur ATMega2560.....	48
3.2.7 Mémoires	48
3.2.8 Sources de l'alimentation de la carte	49
3.2.9 Entrées et sorties numériques	49

3.2.10 Broches analogiques	50
3.2.11 Autres broches	50
3.2.12 Les Accessoires de la carte Arduino	50
3.2.13 Communication de l'Arduino	50
3.2.13.1 Module multiplexeur analogique et multiplexeur numérique	51
3.2.14 Programmation de l'Arduino	51
3.2.15 Structure d'un programme sous Arduino	51
3.2.16 Code minimal.....	52
3.2.17 Syntaxe du langage	52
3.2.18 Environnement de développement.....	52
3.2.18.1 Description des icônes de la barre de boutons.....	53
3.2.19 Fonctionnement et utilisation	53
3.2.20 Débit en bauds (Baud Rate -Bd) :.....	54
3.2.21 Description de Baud Rate	54
3.2.21.1 Exemple	54
3.3 Environnement LabVIEW	55
3.3.1 Importance de LabVIEW	55
3.3.2 Ce qui rend Arduino idéal pour LabVIEW	55
3.3.3 Compétences requises pour utiliser LabVIEW et Arduino.....	55
3.3.4 Domaines d'application	56
3.3.5 Présentation de l'interface logicielle.....	56
3.3.5.1 Barres d'outils	57
3.3.5.2 Palette d'outils.....	57
3.3.5.3 Palette de commandes	58
3.3.5.4 Description des menus et les sous menus de commande et de fonctions.....	58
3.3.5.5 Menus et sous menus de commande	58
3.3.5.6 Menus et sous menus de fonction	59
3.3.6 Structure dans LabVIEW	60
3.3.6.1 Structure de données	60
3.3.6.2 Structure de programme.....	60
3.3.7 Interfaçage LabVIEW avec Arduino	61
3.3.8 Acquisition de données par la carte Arduino Mega2560.....	63
3.4 Conclusion.....	64

CHAPITRE-4

RÉALISATION D'UNE CHAÎNE D'ACQUISITION DE DONNÉES ET DÉVELOPPEMENT D'UNE INTERFACE LOGICIELLE

4.1 Introduction	66
4.2 Problématique.....	66
4.3 Identification des signaux d'entrées analogiques	67
4.4 Câblage du nouveau système.....	68
4.4.1 Première câblage.....	69
4.4.2 Deuxième câblage	69
4.4.2.1 Dispositifs utilisés	69
4.5 Conception de l'interface logicielle.....	72
4.5.1 Interface graphique du logiciel	72
4.5.2 Principaux modules utilisés dans le programme.....	72
4.5.3 Programme sous LabVIEW	73
4.5.4 Etalonnage des signaux d'entrées	74
4.6 Tests et résultats obtenus.....	74
4.7 Sauvegarde des données	78
4.8 Conclusion.....	79
Conclusion générale	81
Bibliographie et webographie.....	82

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

L'énergie est vitale pour permettre le développement durable de notre civilisation moderne. Les combustibles fossiles ont été essentiels pour le développement des technologies et pour la modernisation de notre société. Cela a conduit à de nombreux résultats négatifs, tels qu'une dramatique pollution, l'épuisement de certaines réserves naturelles, et la prise de contrôle de pays ou par des pays qui possèdent des réserves de combustible fossiles. La demande en énergie continue de croître avec l'augmentation globale de la population et l'augmentation de la consommation par personne.

Sans l'électronique, il n'y aurait aucun appareil que nous considérons nécessaire tel que: les ordinateurs, téléphones, télévision, etc. L'électronique permet la fabrication de dispositifs indispensables au bon fonctionnement des systèmes hybrides d'alimentation aussi bien qu'à celui des machines, des réseaux de distribution, des avions, des locomotives, des automobiles. L'électronique est indispensable dans tout système d'énergie électrique car elle permet de rendre compatible la forme du courant produit avec la forme du courant nécessaire pour la charge à laquelle il est destiné. L'électronique permet de convertir du courant continu (DC) en courant alternatif (AC), d'élever ou de réduire la tension, la stabilisation de la tension à la valeur désirée, ou génère la forme et la fréquence de la tension nécessaire au contrôle d'un moteur. Sans l'électronique, l'énergie électrique produite par les sources d'énergies renouvelables telles que le photovoltaïque, ou l'éolien ne serait pas implémenté ni utilisable.

Les systèmes d'acquisitions sont un concentré des technologies modernes de l'électronique analogique, numérique, des systèmes embarqués (microprocesseur + FPGA), de l'informatique temps réel et des nouvelles techniques de l'informatique et des communications. Cela nécessite une compréhension profonde de ce qu'est une acquisition. De façon directe, le dimensionnement d'une chaîne d'acquisition nécessite la maîtrise des outils de traitement du signal analogique et numérique, une analyse poussée du traitement des signaux aléatoires (bruit), des connaissances sur les composants électroniques, les langages de synthèses hardware (VHDL, Verilog), du fonctionnement des microprocesseurs, des langages informatiques (Java, C, C++, LabVIEW, XML...) et des bibliothèques (Framework, API) associés (ICE, Root, boost...). De plus, pour assurer l'optimisation des performances, il faut une culture en refroidissement des systèmes électroniques, en compatibilité électromagnétique et une dose de physique pour comprendre le fonctionnement des capteurs et des détecteurs.

Le présent mémoire décrit une étude approfondie sur une carte d'acquisition de données intégrée dans un système éolien connecté au kit d'émulation l'aérogénérateur Mod.WG/EV. L'objectif principal de ce travail est la mise en œuvre d'un kit d'émulation l'aérogénérateur Mod. WG/EV connecté au générateur éolien. Pour cette raison nous avons utilisé une carte Arduino programmé par de logiciel LabVIEW pour acquérir des signaux, faire des mesures et les traduire en valeur et en courbe en temps réel sur une interface logicielle développer pour cette fin.

Ce mémoire est composé de quatre chapitres : Dans le premier chapitre, nous présentons quelques préliminaires sur les énergies renouvelables et spécialement l'énergie éolienne, les principaux éléments les constituant ainsi que leurs installations de recharge. Nous abordons quelques généralités sur aérogénérateur (définitions, notion théorique, historique, principaux éléments et architectures). Le second chapitre est consacré au principe de fonctionnement et méthode de pilotage du kit didactique d'aérogénérateur Mod. WG/EV (400W) ; nous commençons par l'assemblage et les instructions d'installation de l'aérogénérateur, puis nous citons les consignes de sécurités pour prévenir tous les risques mécaniques et les dangers électriques dérivant de l'usage de ce kit.

Afin de bien comprendre le principe de fonctionnement de ce kit nous avons décrit brièvement tous les composants qui le constituent; les capteurs, les dispositifs électriques et les cartes électroniques. Le troisième chapitre illustre la stratégie d'acquisition de données que nous avons proposés tel que ; la méthode de pilotage, la description matérielle et l'interface logicielle. Dans un premier temps, nous avons présenté notre carte d'acquisition Arduino Mega2560 ainsi que ses principaux éléments et architectures et caractéristiques techniques. Dans un deuxième temps, nous avons détaillé la description du logiciel LabVIEW et la procédure suivre l'interface de contrôle réalisé.

Le quatrième et dernier chapitre est dédié au système de supervision et d'acquisition de données ; nous avons identifié les signaux des entrées analogiques, et nous réalisons les cartes électroniques auxiliaires pour lire les valeurs mesurées, puis nous nous présentons les résultats expérimentaux obtenus lors des tests du kit.

CHAPITRE-1

ÉNERGIE ÉOLIENNE

CHAPITRE-1

ÉNERGIE ÉOLIENNE

1.1 Introduction

L'énergie fait partie intégrante de notre société moderne, elle permet la vie après le coucher du soleil, les transports des gens et des marchandises ainsi que le développement continu des sciences et des technologies. Les sources d'énergie actuelles, telles que le pétrole, et le gaz naturel ont permis de satisfaire les besoins en énergie croissants d'une population en augmentation aussi bien pour la consommation résidentielle ou industrielle que pour les transports.

Cependant l'utilisation des combustibles fossiles pour générer l'énergie nécessaire a eu de nombreuses conséquences négatives, soit : une pollution considérable, l'exploitation intensive des ressources naturelles, d'importantes tensions géopolitiques envers les pays disposant d'importantes ressources de combustible.

Il est bénéfique pour notre terre et pour toutes les espèces qui l'habitent que nous prenions conscience de l'énergie que nous consommons. Le set éducatif relatif aux énergies renouvelables, permet de découvrir toutes les formes d'énergies renouvelables de base : l'éolienne, solaire photovoltaïque, et l'hydrogène (production et consommation grâce à un électrolyseur et une pile à combustible).

Dans ce chapitre une brève description sur les énergies renouvelables, tels que le solaire photovoltaïque ou thermique, l'hydroélectrique, la bioénergie, la géothermie, et l'énergie éolienne. Vu l'utilisation du générateur éolienne dans notre projet elle sera particulièrement présentée en détail dans ce chapitre.

1.2 Généralités sur les énergies renouvelables

On appelle énergie renouvelable une source d'énergie dont le renouvellement naturel est immédiat ou très rapide, de telle façon qu'on peut la considérer comme inépuisable à une échelle de temps humaine. Il existe de nombreuses sources d'énergie qui peuvent être utilisées pour remplacer les combustibles fossiles. Le solaire, l'éolien, l'énergie hydro-électrique, la bioénergie, l'énergie géothermique, et bien d'autres. Les cellules solaires photovoltaïques utilisent la lumière du soleil pour produire de l'électricité, l'énergie éolienne capte l'énergie cinétique contenue dans le vent, la bioénergie est extraite des plantes.

Chacune de ces formes d'énergie présente des avantages et des inconvénients et se trouvent toutes à des stades différents de leur développement. Les plus prometteuses et les plus développées sont le solaire, l'éolien, et les piles à combustible. Un système hybride comprenant ces trois technologies, combiné avec l'électrolyse de l'eau et le stockage de l'hydrogène serait idéal [1].

L'importante augmentation de la demande d'énergie, conjointement à l'exigence de limiter l'impact environnemental que l'utilisation des sources énergétiques traditionnelles présente, a entraîné un intérêt croissant dans la diffusion des systèmes pour la production d'énergies propres en particulier par l'intermédiaire de l'utilisation de "sources renouvelables". L'une des sources énergétiques définie renouvelable par excellence est l'énergie éolienne [2].

La caractéristique d'être de l'énergie à "émission zéro" et à coût réduit, a entraîné inévitablement une augmentation exponentielle de l'utilisation de cette forme énergétique, non seulement dans de grandes installations, mais surtout dans des utilisations de type hybride de petites dimensions où les aérogénérateurs offrent la possibilité aux utilisateurs de réduire leur dépendance vis-à-vis des solutions traditionnelles (connexion à réseaux publics, utilisation de combustibles fossiles, etc.). Il est évident que le problème principal lié à l'usage de cette technologie réside dans l'existence de sites appropriés en mesure de fournir une quantité suffisante du vent, afin de satisfaire l'exigence énergétique de l'utilisateur [2].

Avant de procéder à la description des aérogénérateurs, nous estimons opportun d'aborder certaines notions relatives aux transformations énergétiques de type mécanique se produisant entre le vent et les pales de la turbine [2].

1.3 Energie éolienne

1.3.1 Histoire de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne a été utilisée depuis au moins 5500 ans pour des tâches telles que le pompage de l'eau, les moulins à grains, la navigation à voile, l'animation de divers équipements, la ventilation naturelle des habitations. L'empereur Babylonien Hammourabi avait prévu d'utiliser l'énergie éolienne pour animer son ambitieux projet d'irrigation au 17ème siècle BC.

Dans certains pays comme le Danemark, entre 20 et 40% de l'énergie consommée en 2007 provenait d'énergies renouvelables et principalement d'éoliennes. Ceci démontre que l'énergie éolienne n'est pas seulement capable d'alimenter une ferme isolée en énergie, mais qu'elle est à même d'alimenter des villes entières en électricité. [2].



Figure 1.1: Anciens moulins à vent

Hammurabi fut le premier empereur de Babylone. L'empire de Babylone contrôla toute la Mésopotamie après avoir remporté toute une série de guerres face aux royaumes voisins. Hammurabi est reconnu pour avoir créé un ensemble de lois appelé le « code d'Hammurabi ». Celui-ci reste le plus ancien code écrit et reconnu par les historiens. Les lois étaient gravées sur des tables de pierre qui mesuraient environ 180 cm de hauteur. Des preuves ont été trouvées que les anciens Sinhalese utilisaient les vents de la mousson pour la ventilation de leurs fours dès 300 BC dans des villes telles qu'Anuradhapura et Sri Lanka. [2].

La ventilation permettait d'atteindre des températures de 1100 – 1200 C° à l'intérieur des fours. Les premiers moulins à vent connus furent construits au Sistan, Afghanistan vers le 7ème siècle. Il s'agissait de moulins à vent à axe vertical possédant entre 6 et 12 « voiles », constituées de tissu ou canevas. Des moulins à vent à axe vertical furent utilisés dans l'industrie de la canne à sucre et de mouture de grains. Des moulins à vent à axe horizontal firent leur apparition en Europe du nord-ouest vers 1180 et de nombreux moulins de ce style Néerlandais existent encore. La Figure 1.1, montre l'un de ces anciens moulins alors que la Figure 1.2 résume les événements importants de l'histoire de l'énergie éolienne. [2].

Le développement des moulins à vent utilisés pour actionner des pompes à eau fut un facteur important du développement de l'agriculture en Amérique du Nord. Une vaste proportion du territoire Nord-Américain ne disposait pas d'eau dans les années 1800. Les moulins à vent actionnant des pompes à eau furent aussi importants pour le développement du transport ferroviaire en permettant l'alimentation en eau des locomotives à vapeur.

Un Américain nommé Charles F. Brush est reconnu comme étant la première personne qui a produit de l'électricité à partir d'énergie éolienne. Il mit en fonction sa première éolienne durant l'hiver 1887. En 1891, un professeur d'université Ecossais, James Blyth, effectua les mêmes expériences au Royaume Uni. Son éolienne de 10 mètres de hauteur munie de pales en tissu fut installée dans le jardin de sa résidence secondaire pour produire de la lumière. Il a également construit une autre éolienne pour fournir l'énergie de secours à l'infirmerie d'un asile d'aliénés à Montrose. Cependant, ces installations ne se multiplièrent pas car elles furent considérées comme non viables économiquement. [2].

Dane Poul de la Cour fut le premier à développer une éolienne pour produire de l'électricité, en tenant compte des principes de l'aérodynamique en Europe, vers 1891. Ces éoliennes très pratiques pour la production d'électricité se multiplièrent au Danemark. La Cour utilisait l'électricité de ses éoliennes pour électrolyser de l'eau et produire de l'hydrogène. Cet hydrogène était utilisé pour alimenter les lampes à gaz dans les écoles locales.

De cette manière, on peut dire qu'il était en avance d'une centaine d'années car son invention comprenait un ensemble d'énergie renouvelable pour produire de l'hydrogène par électrolyse et de stocker cet hydrogène comme réserve d'énergie pour une utilisation différée. Cependant, à la fin de la première guerre mondiale, les carburants fossiles, les centrales à vapeur avaient mis les éoliennes de la cour au rancart.

Tableau 1.1: Bref historique des installations éoliennes

7ème siècle	Les premiers moulins à vent apparaissent au Sistan , Afghanistan
1180	Les premiers moulins à vent à axe horizontal en Europe du Nord-Ouest
1887	Charles F. Brush est le premier Américain à produire de l'électricité à l'aide une éolienne
1891	Le professeur Ecossais, James Blyth fut le premier en Europe à produire de l'électricité au moyen d'une éolienne. Dane La Cour inventa la première éolienne tenant compte de paramètres aérodynamiques.
Début 1990	Des centaines de milliers de moulins à vent, en Europe, aux USA furent utilisés dans les zones rurales dépourvues de réseau électrique.
1980- a nos jours	Des centaines de milliers de moulins à vent, en Europe, aux USA furent utilisés dans les zones rurales dépourvues de réseau électrique.

Dès le début des années 1900, des centaines de milliers d'éoliennes sont installées dans les zones rurales dépourvues de réseau de distribution électrique. Le nombre d'éolienne diminua avec l'expansion du réseau de distribution électrique, avec l'amélioration de sa fiabilité et la diminution du prix de la vente de l'énergie électrique. Le choc pétrolier des années 1970 fit renaître l'intérêt pour les problèmes énergétiques, pour les énergies renouvelables et pour les éoliennes. Durant la décennie suivante, d'innombrables éoliennes furent installées dans le monde entier, dont un très grand nombre en Californie. [2].

L'Etat de Californie avait instauré un système de crédit d'impôt qui fit croître la popularité des éoliennes. Cependant, vers la moitié des années 1980, ces crédits furent stoppés et ceci mit pratiquement fin à l'expansion à l'expansion des éoliennes aux Etats-Unis jusqu'au début des années 1990. Le développement de la technologie des éoliennes continua en Allemagne, au Danemark, en Espagne, etc. L'Allemagne, le Danemark, les Etats-Unis, l'Espagne, les Indes, sont les pays où la production d'électricité par éoliennes est la plus développée.

1.4 Principes et caractéristiques

1.4.1 Régime planétaire des vents

Il est bien connu que l'axe de la terre est légèrement incliné et que celle-ci tourne sur elle-même et orbite autour du soleil. Pour cette raison, les différentes parties de la terre reçoivent des quantités différentes d'énergie solaire.

La quantité de rayonnement qu'une région terrestre reçoit varie avec le temps, en fonction de sa position relative au soleil. La variation d'inclinaison de l'axe de la terre en au cours de l'année provoque le réchauffement ou le refroidissement de certaines parties du globe (les saisons). Ces différentes surfaces plus chaudes ou plus froides produisent le système de convection de l'atmosphère du globe qui s'étend de la surface du globe jusqu'à la stratosphère [1][2].

Dans les régions où la surface de la terre est chaude, l'air se réchauffe, et s'élève vers le ciel. La gravité (force d'attraction de la terre) permet d'éviter que la masse d'air de l'atmosphère ne s'éloigne vers l'espace. La plus grande partie de l'énergie cinétique du vent se trouve aux grandes altitudes, là où les vents soufflent presque constamment à 160kmh. L'énergie cinétique du vent est finalement transformée en chaleur, par le frottement entre les différentes masses d'air en mouvement. Cette chaleur diffuse réchauffe l'atmosphère et la terre. On peut donc en déduire que le vent représente une forme de stockage de l'énergie solaire et que les éoliennes parviennent à capter cette énergie. La Figure 1.2 représente le régime des vents autour du globe.[1][2].

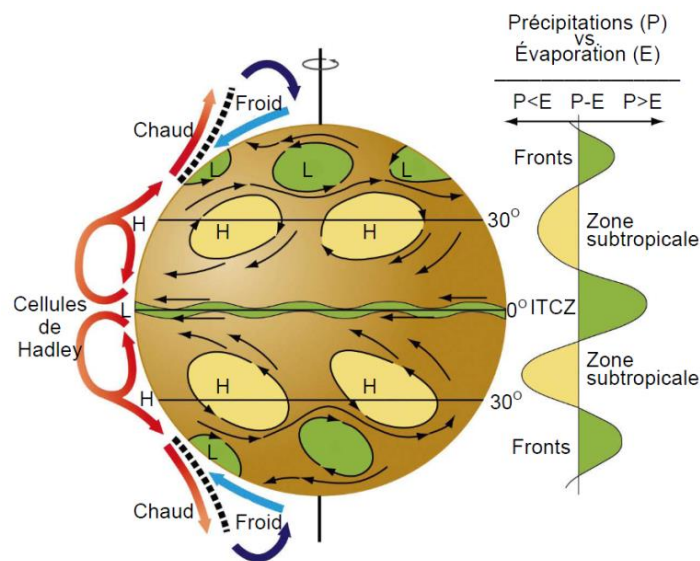


Figure 1.2: Régime des vents autour du globe

Les océans, les montagnes et même les immeubles affectent les régimes des vents, mais les principaux courants se développent et persistent car ils sont induits par les gradients de température. Sur les cartes météorologiques, vous observerez qu'il existe des zones de haute et des zones de basse pression, et que ces zones forment des contours de formes variables. Ces contours représentent les « isobares », c'est à dire les lignes le long desquelles la pression est la même. Figure 1.2

1.5 Aérodynamique des éoliennes

Lorsqu'une force est transmise d'un objet vers un autre, ce deuxième objet se déplacera dans la même direction que le premier. Cependant, lorsqu'un objet solide transfère une force ou de l'énergie vers un « fluide », la réaction est différente. Deux forces en résultent alors, la traînée et la portance, qui agissent perpendiculairement l'une par rapport à l'autre. Leur proportion dépend de la forme de l'objet, de la direction de la force initiale, de la densité du solide et du fluide, ainsi que des vitesses réciproques. Dans le cas de l'éolienne, le solide est la pale de l'éolienne et le fluide est l'air.

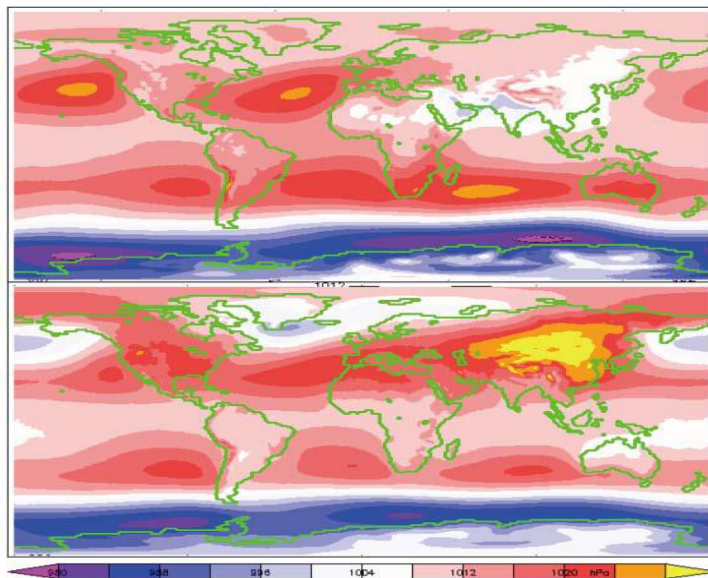


Figure 1.3: Carte météorologique montrant les hautes et les basses pressions

1.6 Principe de fonctionnement du rotor d'un aérogénérateur

Une description qualitative du fonctionnement d'un aéromoteur résulte plus immédiate grâce à la comparaison avec l'aérodynamique d'un avion. Une surface ayant une section à profil d'aile placée dans un flux d'air est sujette à une force résultant de deux composantes la portance, perpendiculaire à la vitesse du vent et la résistance parallèle à la vitesse du vent. Ces deux forces dépendent, entre d'autres facteurs, du type de profil et pour chaque profil de l'angle avec lequel le flux d'air frappe l'aile [3].

Dans les avions, la portance est la force utile qui soutient le poids de l'avion, tandis que la résistance est la force compensée par la poussée de propulsion de l'avion. Dans l'aéromoteur la portance est la force utile qui produit la rotation des pales en compensant également la force due à la résistance de l'air [3].

Nous analysons à présent brièvement les caractéristiques fluidodynamiques d'un profil d'aile, pour visualiser les paramètres influençant le mouvement d'un aérogénérateur frappé par un courant fluide. La figure 1.4 illustre un profil au repos par rapport au courant fluide qui le traverse à une vitesse v_0 et avec angle d'incidence α l'interaction du profil avec le courant fluide instaure un circuit qui engendre des variations de vitesse sur l'extrados et sur l'intrados du profil et, par conséquent, des variations de pression qui sont exprimées par le coefficient de pression obtenu en analysant l'équation de Bernoulli [3] :

$$\frac{P}{\rho} + \frac{c^2}{2} + gz = \text{constante (J/kg)} \quad (1.1)$$

On définit le coefficient de pression ou de poussée :

$$C_s = (P - P_0)/\rho \frac{V}{2} = 1 - \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 \quad (1.2)$$

Avec :

P = pression dans la section examinée de l'aérogénérateur,

P_0 = pression de l'air au repos,

V = vitesse de l'air dans la section examinée de l'aérogénérateur,

V_0 = vitesse de l'air non perturbé.

Nombre adimensionnel tenant compte de trois paramètres :

- Géométrie de l'aile ;
- Profil de l'aile ;
- Angle d'incidence.

Sur le profil naissent deux forces, une de soutien S et une de résistance R donnant une résultante F qui agit sur le centre de pression, dont la position est fonction de l'angle d'incidence. L'action fluidodynamique du courant sur le profil engendre une force de soutien alaire S (portance) qui est représentée par l'équation suivante :

$$S = \frac{1}{2} \rho V_0^2 A C_s \quad (N/m^2) \quad (1.3)$$

Où

ρ = densité de l'air (kg/m^3)

V_0 = vitesse du flux d'air qui frappe l'aile, à savoir le vent relatif (m/s)

A = surface alaire (m^2)

D'où l'on constate que la force de soutien S s'annule quand le courant frappe le profil selon la direction de portance nulle DPN [3].

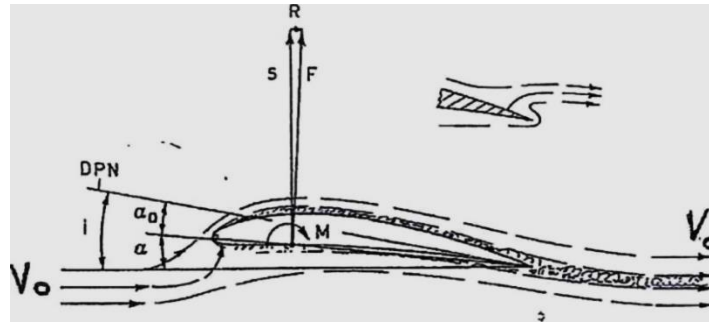


Figure 1.4: Action fluidodynamique d'un courant sur un profil à l'air

Ce que nous venons d'observer en ce qui concerne la théorie de la portance d'une pale peut être appliqué aux différents aérogénérateurs qui peuvent être caractérisés en fonction du nombre de pales [3]:

- Une pale (monopale)
- Deux pales (bipales)
- Trois pales (tripales)
- Plusieurs pales.

En analysant en effet une pale du haut Figure 1.5, on peut facilement identifier :

- L'extrémité intérieure ou racine où est fixée la tête du rotor
- L'extrémité extérieure
- La longueur de la pale, distance entre les deux extrémités (généralement fournie en pieds 1 foot = 1ft = 30.48 cm = 0.3m)
- Le rayon R , distance entre l'extrémité extérieure et le centre de rotation du rotor.
- Le centre de pression C_p , point d'application de la force aérodynamique F (placé approximativement à environ 70% du rayon de la pale).
- Le centre de gravité G , point d'application de la force poids.

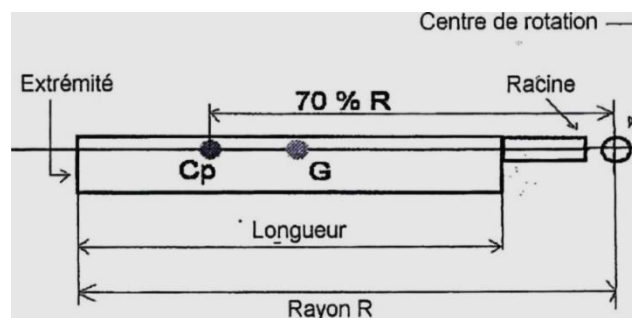


Figure 1.5: Représentation schématique d'une pale d'aérogénérateur

Prenons en considération une pale qui tourne sur un point fixe, il n'y a pas de mouvement de translation mais seulement de rotation. La résultante de la portance engendrée par le rotor peut être considérée comme appliquée en un point appelé centre de pression (C_p) placé, comme nous l'avons vu précédemment, à environ 70% du rayon de la pale. La distribution des composantes individuelles de portance, calculée à chaque point, a une évolution assez singulière Figure 1.6 [3].

Dans le mouvement circulaire la vitesse périphérique augmente avec l'augmentation du rayon décrit par le point pendant sa rotation et, par conséquent, les différents points de la pale ont une vitesse périphérique V de plus en plus grande au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre de rotation. En se rappelant alors la formule de la portance (1.3) [3].

Nous constatons immédiatement que chaque élément individuel de pale fournit une contribution toujours plus grande à la portance. La distribution ne sera pas constante mais elle augmente de la racine vers l'extrémité. Une pale de ce type est dite non voilée, l'angle du pas est constant sur toute la longueur de la pale. L'utilisation d'une pale de ce type, non voilée, avec composante élevée de la portance vers l'extrémité est utile pour favoriser le mouvement de battement, c'est-à-dire la possibilité de se déplacer verticalement en montant et descendant.

Dans certains cas, comme l'hélicoptère, on préfère par contre avoir une distribution de la portance uniforme le long de la pale. On fait en sorte alors que la pale ait un angle de pas différent le long de son rayon [3].

De cette manière, on agit sur l'angle d'incidence en augmentant ainsi la portance vers la racine et en la diminuant vers l'extrémité [3].

➤ Position $C_p > 70\%$ rayon de la pale *PALE NON VOILÉE*

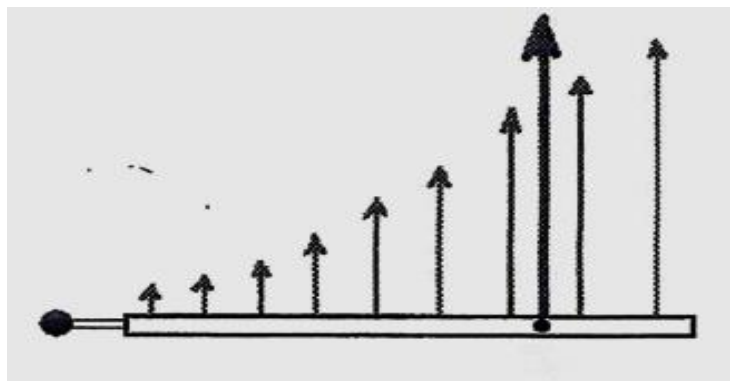


Figure 1.6: Représentation schématique de la distribution de la portance dans une pale d'aérogénérateur non voilée

Souvent les rotors sont également classés en fonction des degrés de liberté (mouvements) que les pales peuvent accomplir. Nous pouvons avoir des rotors de type rigide, où la pale ne peut effectuer aucun mouvement, en pareil cas on exploite les déformations élastiques du matériau. Des rotors semi-rigides avec un seul mouvement vertical qui prend le nom de battement. Des rotors articulés avec deux mouvements, un vertical, battement, et un horizontal, balancement [3].

1.7 Conversion de l'énergie cinétique d'un courant fluide en travail mécanique avec une hélice dans une machine éolienne

1.7.1 Puissance totale disponible

La puissance totale disponible dans un courant du vent est égale au flux d'énergie cinétique, à savoir ;

$$P_{tot} = m \frac{V_i^2}{2} \quad (1.4)$$

Où :

P_{tot} = Puissance totale, (W),

m = Débit en masse, (kg/s),

V_i = Vitesse du flux incident (m/s).

Le débit en masse est donné par l'équation de continuité :

$$m = \rho A V_i \quad (1.5)$$

Où :

ρ = Densité de l'air, (kg/m³),

A = Section normale au courant, (m²)

Donc,

$$P_{tot} = \frac{1}{2} \rho A V_i^3 \text{ (W)} \quad (1.6)$$

Il en résulte par conséquent que la puissance totale disponible dans le courant est proportionnelle au cube de sa vitesse, à la zone interceptée et à la densité de l'air incident [3].

1.7.2 Puissance maximale utilisable (théorie de Betz)

Prenons à présent en considération une machine à axe horizontal avec roue type hélice (la turbine éolienne actuellement la plus répandue). Supposons que la roue de la turbine a une épaisseur $a-b$ (Figure 1.7-1.8) ; que la pression et la vitesse du vent incident, suffisamment loin de la turbine, sont P_i et V_i , et qu'à la sortie la pression et la vitesse du vent, à nouveau

suffisamment loin de la machine, sont respectivement, P_e et V_e . La vitesse V_e résultera être inférieure à V_i puisque de l'énergie cinétique a été enlevée par la turbine au courant [3].

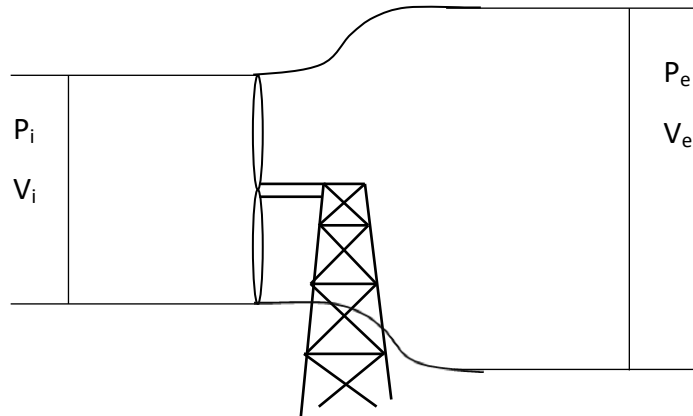


Figure 1.7: Tube de flux de la théorie de Betz

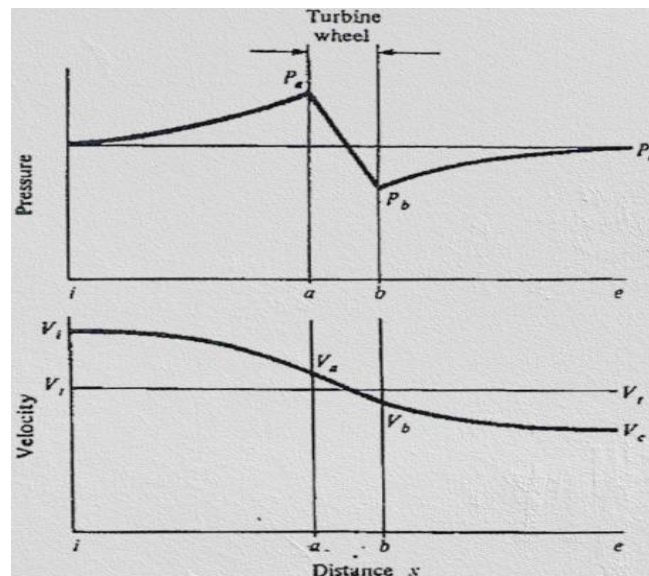


Figure 1.8: Profils de pression et vitesse d'un courant du vent qui passe à travers une turbine éolienne à axe horizontal

En considérant l'air incident compris entre i et a (Figure 1.8) comme un système thermodynamique, et en supposant constante sa densité (une approximation valable puisque pression et température varient peu par rapport aux valeurs initiales de l'environnement), dans l'hypothèse qu'il n'y a pas de variations dans l'énergie potentielle et qu'il n'y a pas de cession ou extraction de travail et chaleur (entre i et a), l'équation de la conservation de l'énergie vue précédemment peut être écrite comme suit [3]:

$$P_i + \rho \frac{V_i^2}{2} = P_a + \rho \frac{V_a^2}{2} \quad (1.7)$$

De la même façon, pour la région de sortie $b-e$:

$$P_e + \rho \frac{V_e^2}{2} = P_b + \rho \frac{V_b^2}{2} \quad (1.8)$$

La vitesse du vent à travers la turbine diminue de a à b , puisqu'une partie de son énergie cinétique est convertie en travail. La vitesse du vent ne diminue pas brusquement mais graduellement, en passant de la valeur V_i de rapprochement à la valeur V_a , puis en atteignant la valeur V_e . Donc $V_i > V_a$ et $V_b > V_e$, par conséquent $P_a > P_i$ et $P_b < P_e$; c'est-à-dire que la pression du vent augmente quand il s'approche de la machine et augmente quand il s'éloigne d'elle. En combinant les équations (1.7) et (1.8), on obtient:

$$P_a - P_b = \left(P_i + \rho \frac{V_i^2 - V_a^2}{2} \right) - \left(P_e + \rho \frac{V_e^2 - V_b^2}{2} \right) \quad (1.9)$$

On peut donc raisonnablement supposer que loin de la roue, en e , la pression du vent revient égale à la pression ambiante, à savoir :

$$P_e = P_i = P_0 \quad (1.10)$$

La vitesse à l'intérieur de la roue, V_t , peut être estimée dans une première approximation constante (l'ampleur de la pale $a-b$ est petite par rapport à la distance totale considérée), de sorte que :

$$V_t \approx V_a \approx V_b \quad (1.11)$$

La combinaison des équations (1.9), (1.10) et (1.11) donne :

$$P_a - P_b = \rho \left(\frac{V_i^2 - V_e^2}{2} \right) \quad (1.12)$$

La force axiale F_x > dans la direction du courant, sur la roue, de section A perpendiculaire au flux, est donnée par :

$$F_x = (P_a - P_b)A = \rho A \left(\frac{V_i^2 - V_e^2}{2} \right) \quad (1.13)$$

Cette force est égale à la variation de la quantité de mouvement du courant : Δ (mV)

$$m = \rho A V_t \quad (1.14)$$

$$F_x = \rho A V_t (V_i - V_e) \quad (1.15)$$

En égalisant les équations (1.13) et (1.15), on obtient :

$$V_t = \frac{1}{2} (V_i + V_e) \quad (1.16)$$

On prend en considération à présent le système global délimité par les sections i et e . Les variations d'énergie potentielle sont, comme auparavant, nulles, tout comme les variations d'énergie interne ($T_i = T_e$) et l'énergie de propulsion ($P_i/\rho = P_e/\rho$) il n'y a pas de chaleur ajoutée ou soustraite par le système. La conservation de l'énergie fournit alors le travail W :

$$W = \frac{1}{2}(V_i^2 - V_e^2) \quad (1.17)$$

La puissance P se calcule ensuite comme flux de travail :

$$P = m \frac{(V_i^2 - V_e^2)}{2} = \frac{1}{2} \rho A V_t (V_i^2 - V_e^2) \quad (1.18)$$

À partir de l'équation (2.13) :

$$P = \frac{1}{4} \rho A (V_i + V_e)(V_i^2 - V_e^2) \quad (1.19)$$

L'équation (1.18) se simplifie dans (1.6) par : $P = P_{tot}$, quand $V_t = V_i$, $V_e = 0$. C'est-à-dire quand le vent s'arrête complètement en aval de la turbine. Cela est évidemment impossible puisque le vent ne peut pas être accumulé à la sortie de la turbine. Il existe une valeur optimale de la vitesse de sortie $V_{e,opt}$ en correspondance de laquelle on a une puissance maximale P_{max} , pouvant être obtenue par la différenciation de P dans l'équation (1.19) par rapport à V_e pour une valeur donnée V_i et en rendant égale à zéro la dérivée.

$$3V_e^2 + 2V_i V_e - V_i^2 = 0 \quad (1.20)$$

La racine positive V_e qui résout l'équation précédente donne $V_{e,opt}$

$$V_{e,opt} = \frac{1}{3} V_i \quad (1.21)$$

De l'équation (1.19), on obtient ensuite $V_{e,opt}$:

$$V_{e,opt} = \frac{8}{27} \rho A V_i^3 \quad (1.22)$$

Le rendement (ou *coefficient de puissance*) idéal, *maximal*, théorique η_{max} d'une turbine éolienne, peut être évalué comme rapport entre la puissance maximale pouvant être obtenue et celle disponible :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{tot}} = \frac{8}{27} \times 2 = \frac{16}{27} = 0,5926 \quad (1.23)$$

En d'autres termes, une turbine éolienne est en mesure, au maximum, de convertir pas plus d'environ 60% de la puissance totale disponible en courant [3].

1.7.3 Puissance réelle

Le long des pales d'une turbine éolienne la vitesse périphérique varie sensiblement de la base au sommet, de sorte que les pales sont souvent voilées. Le coefficient maximal de puissance donné par l'équation (1.23) prend des conditions uniformes tout au long de la pale.

Un calcul plus strict de la puissance extraite par la turbine montre que le coefficient de débit idéal dépend du rapport vitesse périphérique (au sommet de la pale) /vitesse du vent et atteint la valeur de 0.6 seulement quand la vitesse périphérique correspond à environ 6-7 fois la vitesse du vent. La figure 1.9 montre le coefficient de puissance pour une turbine éolienne idéale à hélice et pour des machines réelles : les rendements effectifs du rotor sont tout au plus 50-70% de l'efficacité idéale [3].

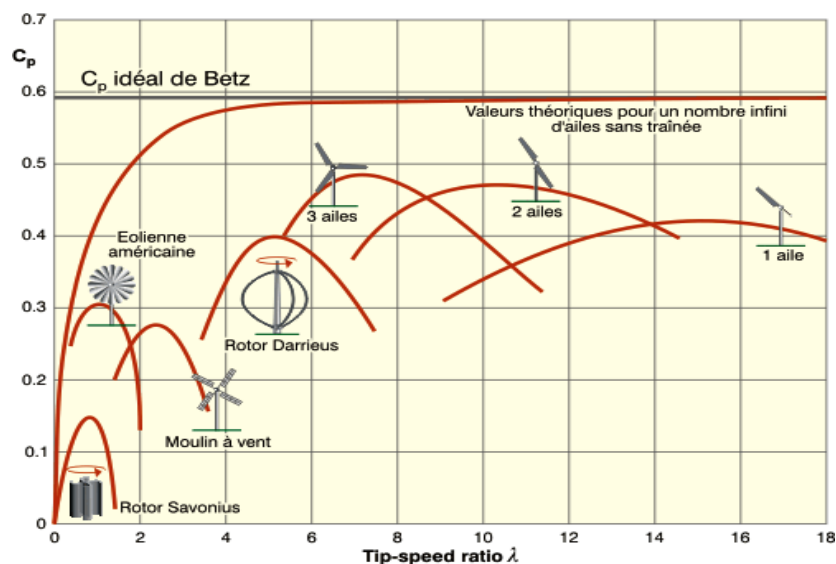


Figure 1.9: Coefficient de puissance pour certains aérogénérateurs en fonction du rapport de vitesse périphérique/vitesse du vent

1.8 Paramètres et caractéristiques d'un aérogénérateur

Les paramètres caractérisant un aérogénérateur sont essentiellement liés à la capacité de transférer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique et ensuite électrique destinée aux utilisateurs. Une analyse détaillée des performances d'un aérogénérateur passe par la détermination de certaines caractéristiques fondamentales de ce dernier et du site géographique où il est placé : Puissance du vent, zone balayée, vitesse et distribution du vent, et évolution de la vitesse du vent avec la hauteur d'installation [3].

1.8.1 Puissance du vent

Les performances d'un aéromoteur sont résumées au moyen d'une courbe qui représente l'évolution de la puissance rendue (en ordonnée) en fonction de la vitesse du vent (en abscisse) [3].

Pour l'aérogénérateur, on prend en considération la puissance électrique rendue aux bornes. Une courbe relative à un aérogénérateur idéal est représentée à la figure 1.10. On définit comme vitesse du vent de "démarrage" ("initiale", ou de "start-up") la vitesse minimale à laquelle la machine commence à tourner [3].

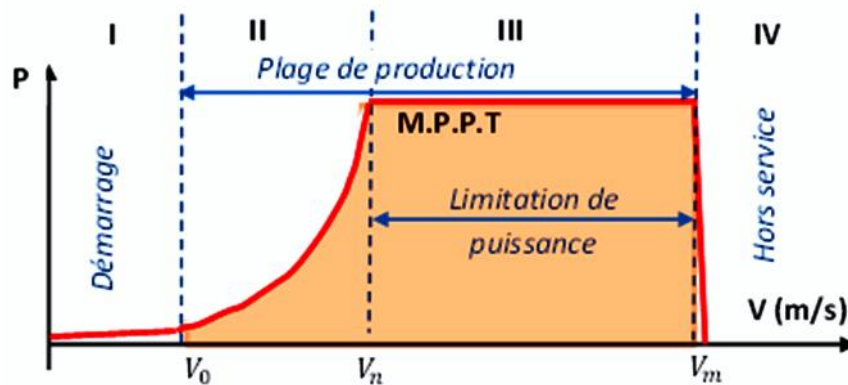


Figure 1.10: Caractéristique typique puissance rendue - vitesse du vent

On définit par contre *vitesse du vent d'insertion* ou de génération ("cut-in") la vitesse minimale à laquelle l'aérogénérateur commence à distribuer de l'énergie électrique. Elle correspond généralement à l'insertion de la machine en réseau.

La vitesse du vent "nominale" ("rated") est en général la vitesse minimale du vent qui donne la puissance rendue correspondant au rendement maximal aérodynamique du rotor (puissance nominale) (la valeur typique de la vitesse du vent est : 9-12 m/s).

La vitesse du vent de "hors service" (ou de "déconnexion" ou de "cut-out") est la vitesse à laquelle la machine est débranchée du réseau, en provoquant l'intervention des protections contre les survitesses.

Enfin la vitesse du vent à la limite de la résistance est la vitesse maximale qu'une machine peut supporter sans dommage.

Pour un aérogénérateur idéal, l'a courbe puissance-vitesse du vent montre une puissance qui augmente de la vitesse de "cut-in" à celle nominal, puis se maintient constante jusqu'à la vitesse de "cut-out".

Ce dernier fait est lié à l'exigence d'éviter que la machine électrique ne soit surchargée ou qu'un générateur surdimensionné ne soit choisi, dont les possibilités seraient ensuite exploitées pendant une période très réduite. Dans les machines réelles, cette courbe est réalisée par la régulation continue (mécanique) du pas ("pitch régulation"), qui permet, une fois la puissance maximale atteinte, de 'frôler' la puissance en excès fournie par le vent. Quand la vitesse du vent atteint la valeur de "déconnexion", les pales "décrochent" [3].

1.8.2 Zone balayée

Puisque nous avons déjà discuté de la densité et de la vitesse de l'air, nous abordons un autre facteur qui influence la puissance distribuée par un aérogénérateur : la zone balayée par le rotor et qui intercepte le vent. Contrairement à la vitesse, dans ce cas la dépendance est directe, et la zone balayée peut être déterminée par la connaissance du rayon de la pale selon la formule suivante [3]:

$$A = \pi R^2 \text{ (m}^2\text{)} \quad (1.24)$$

Avec : R= rayon du rotor (m), correspondant à environ la longueur de la pale.

La relation entre le rayon du rotor et le captage de l'énergie est fondamentale pour la conception d'une turbine éolienne. Des incréments relativement petits du diamètre du rotor comportent des incréments de la zone balayée et, par conséquent, de la puissance produite. En augmentant le diamètre du rotor par exemple de 20%, on obtient une augmentation de la zone balayée de plus de 40%.

$$A_2 = A_1(R_2/R_1) \quad (1.25)$$

La zone balayée constitue par conséquent un paramètre fondamental dans le choix d'un aérogénérateur, puisqu'un rotor plus grand, indépendamment des performances de fonctionnement, engendre une puissance supérieure à celle d'une turbine de dimensions inférieures. Le générateur utilisé par nous avec un diamètre de rotor correspondant à 1,17m engendre par exemple une zone balayée de : $A = 3.14 \times 1,17^2/4 = 1.07 \text{ m}^2$

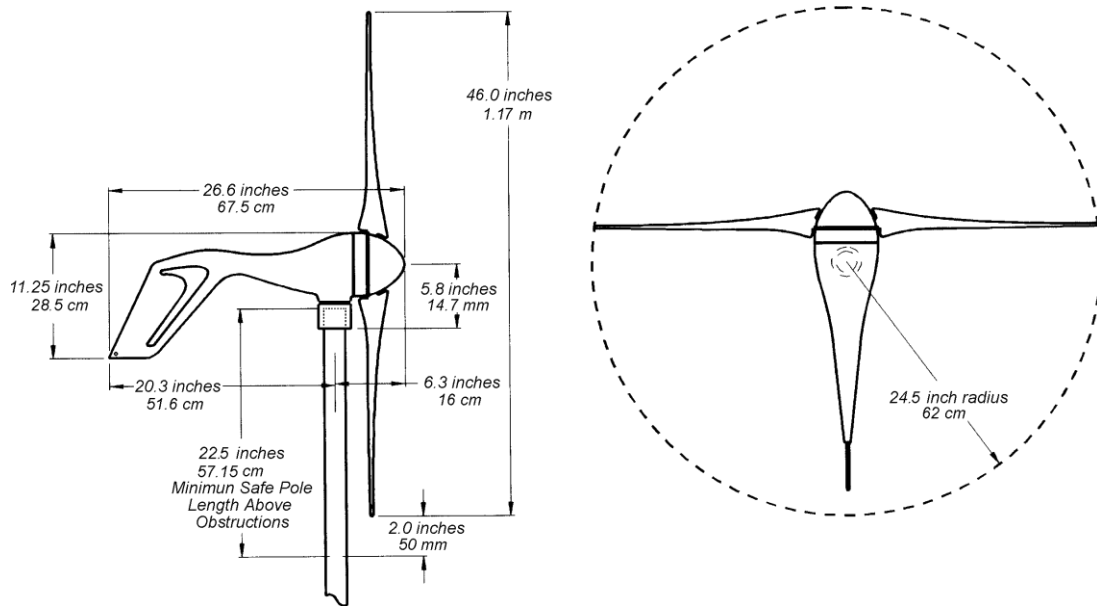


Figure 1.11: Géométrie de l'aérogénérateur

1.9 Aérogénérateurs

La configuration typique d'un aérogénérateur à axe horizontal est schématisée à la figure 1.12 le soutien porte à son sommet le carter ou nacelle, constitué par une base ou par une enveloppe externe dans la nacelle sont contenus l'arbre de transmission lent, le multiplicateur de tours, l'arbre rapide, le générateur électrique et les dispositifs auxiliaires. À l'extrémité de l'arbre lent et à l'extérieur de la nacelle est fixé le rotor, constitué par un moyeu, sur lequel sont montées les pales (1, 2 ou 3 avec un diamètre de 1 à 40 m pour des machines respectivement de petite et moyenne grandeur). Le rotor peut être placé aussi bien au vent que sous vent par rapport au soutien [3].

La nacelle est en mesure de tourner par rapport au soutien dans le but de maintenir l'axe de la machine toujours parallèle à la direction du vent et c'est pour cette raison que l'aérogénérateur est défini "horizontal". Des câbles appropriés acheminent vers le sol l'énergie électrique produite et transmettent les signaux nécessaires pour le fonctionnement. La forme des pales est dessinée de manière à ce que le flux de l'air qui les frappe actionne le rotor. Du rotor, l'énergie cinétique du vent est transmise à un générateur du courant connecté aux systèmes de contrôle et transformé en mesure de régler la production d'électricité et l'éventuel raccordement en réseau. L'aérogénérateur opère en fonction de la force du vent en dessous d'une certaine vitesse, la machine est incapable de démarrer pour son démarrage, il est nécessaire que la vitesse atteigne un seuil minimal d'insertion, différent d'une machine à l'autre (environ 4-5 m/s) [3].

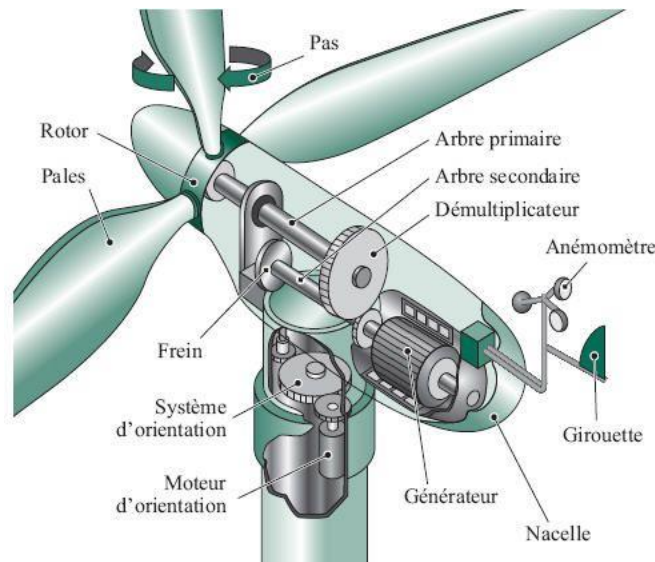


Figure 1.12: Générateur à axe horizontal

Pendant le fonctionnement, la vitesse du vent "nominale" est la vitesse minimale du vent permettant à la machine de fournir la puissance de projet (10-12m/s pour quelques centaines de kW pour des machines de grandeur moyenne). À des vitesses élevées (20-25m/s), l'aérogénérateur est placé hors service pour des raisons de sécurité [3].

Nous examinerons dans ce paragraphe principalement les petits aérogénérateurs qui, dans leur configuration générale, sont constitués d'un axe horizontal où le corps du générateur forme un axe parallèle à la ligne de l'horizon. Les différences essentielles peuvent résider dans la quantité des pales (monopale, bipale, tripale, etc.). Les générateurs les plus répandus sont certainement les bipales, pour des raisons de coût inférieur à la tripale, qui garantit toutefois un mouvement meilleur du rotor étant donné qu'il résulte plus équilibré et uniforme. À la Figure 1.13 sont représentées les principales configurations des aérogénérateurs à axe horizontal [3].

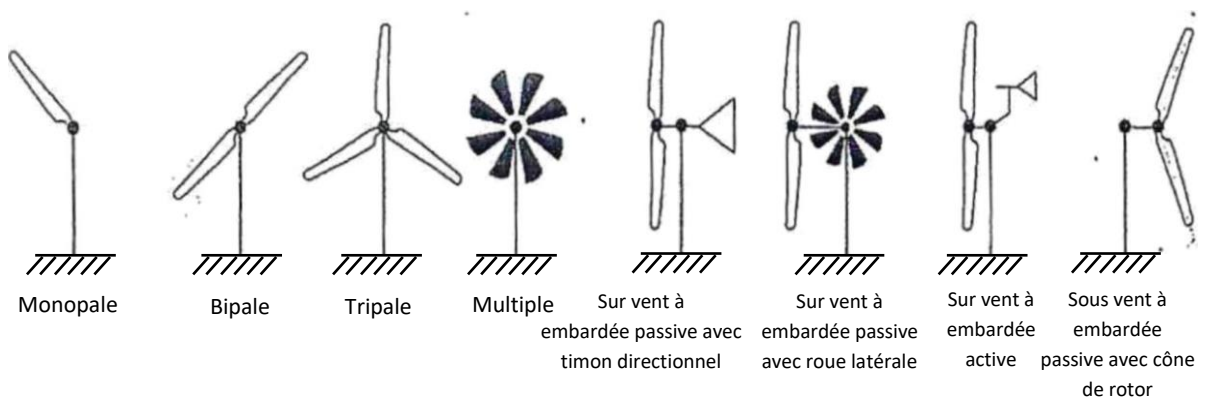


Figure 1.13: Turbines éoliennes à axe horizontal

1.10 Contrôle de la vitesse

Toutes les turbines ont généralement un dispositif apte à contrôler le régime de rotation du rotor dans des conditions du vent fort. Le contrôle de la survitesse est l'une des caractéristiques de différenciation de tout aérogénérateur. La plus grande partie des micro-turbines se replie sur une charnière de manière à amener le rotor à tourner vers le timon directionnel, en limitant ainsi l'influence du vent [3].

Pour placer le rotor en position passive dans des conditions de régime du vent fort, l'axe du rotor doit en effet être désaligné de l'axe de rotation de la pale. Le générateur utilisé par contre des pales en fibre de carbone, en mesure de décharger la charge aérodynamique excessive à proximité de la limite maximale de fonctionnement qui est égal à environ 17.9m/s, à travers une torsion élastique qui déforme les pales mêmes en freinant leur rotation [3].

1.11 Installation des générateurs

Les petits aérogénérateurs sont généralement installés sur tours ou treillis opportunément configurés. Les tours tubulaires peuvent être à forme cylindrique ou à pointe conique, les tours haubanées peuvent être à treillis ou tubulaires [3].

Très souvent, pour favoriser un entretien aisé, les tours ou les treillis sont munis de charnières pour être levés ou abaissés. Les fabricants des générateurs fournissent des indications concernant la constitution des supports en fonction de la typologie de produit utilisé [3].

1.12 Types de tour

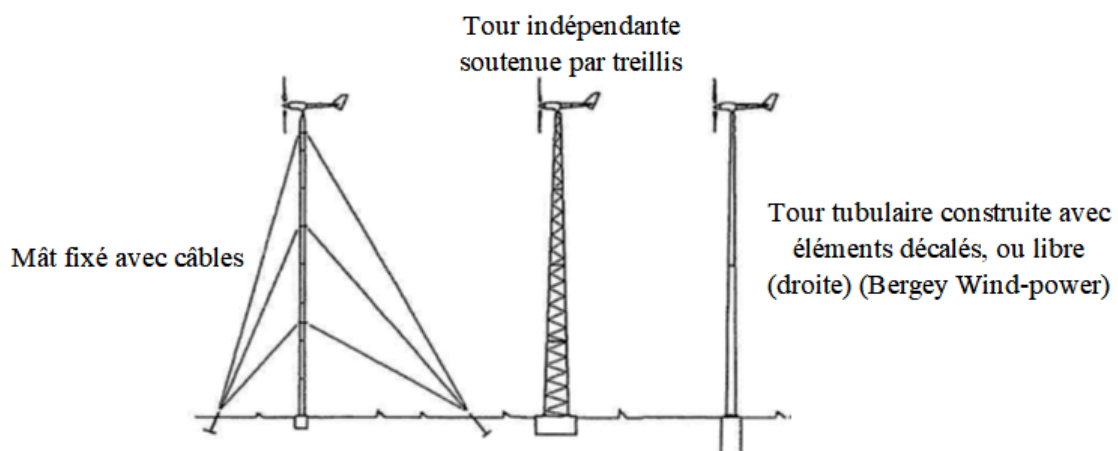


Figure 1.14: Typologies de tours

Le montage direct sur toit représente cependant une question controversée si d'une part il est en effet plus économique, d'autre part il peut avoir des effets négatifs étant donné que les vibrations engendrées par l'aérogénérateur peuvent se transmettre à la structure du bâtiment en l'endommageant. En outre, la structure de l'édifice même peut interférer sur les profils du vent en créant des turbulences pouvant modifier les performances du générateur [3].

Le générateur utilisé sur l'équipement Mod. WG/EV a été conçu pour être installé sur des tubes en acier d'un diamètre externe correspondant à 48mm. Sur la base de l'aérogénérateur, un joint spécifiquement étudié permet un raccordement sûr et est en mesure de limiter le transfert des vibrations à la tour. Pour fixer le tube à la structure, respecter les précautions suivantes:

- Les soutiens doivent être solidement fixés avec les vis spécifiques fournies à une structure de l'édifice ayant une robustesse appropriée.
- S'assurer que le générateur ne puisse pas entrer en contact avec aucun obstacle dans son mouvement de rotation dans les deux axes. Le positionnement du soutien ne devra en aucun cas interférer avec la rotation des pales, qui devront être éloignées de plus de 50 mm de tout obstacle possible (Figure 1.15-1.11).
- La distance de l'aérogénérateur par rapport au dernier raccord du soutien au mur ne doit pas dépasser 1.0m et de toute façon ne jamais dépasser 2 fois la distance prévue entre les deux soutiens de 0.5 m (Figure 1.15).

S'il est nécessaire d'utiliser un mât de longueur supérieure, prévoir une installation où la distance de l'aérogénérateur par rapport au dernier raccord du soutien au mur ne dépasse pas 2,5 m, en outre l'écart ne doit pas être > de 2 fois la distance entre les deux soutiens [3].

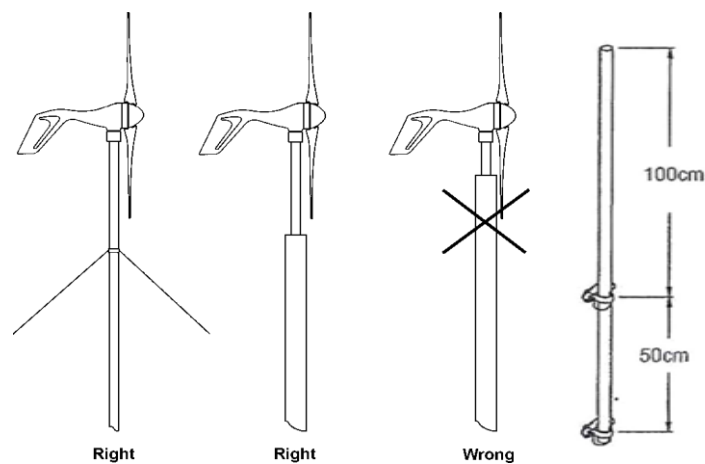


Figure 1.15: Positionnement correcte de l'aérogénérateur sur le mât de 1.5 m fourni avec l'équipement

1.13 Assemblage du rotor

Assembler les pales de l'aérogénérateur au rotor comme illustré à la Figure 1.16 au moyen des vis fournies. Pour prévenir tous dommages, ne pas monter les pales quand le générateur est déjà positionné sur le mât de soutien. Une fois les pales installées, positionné le cône au centre du rotor, en s'assurant de sa bonne fixation [3].

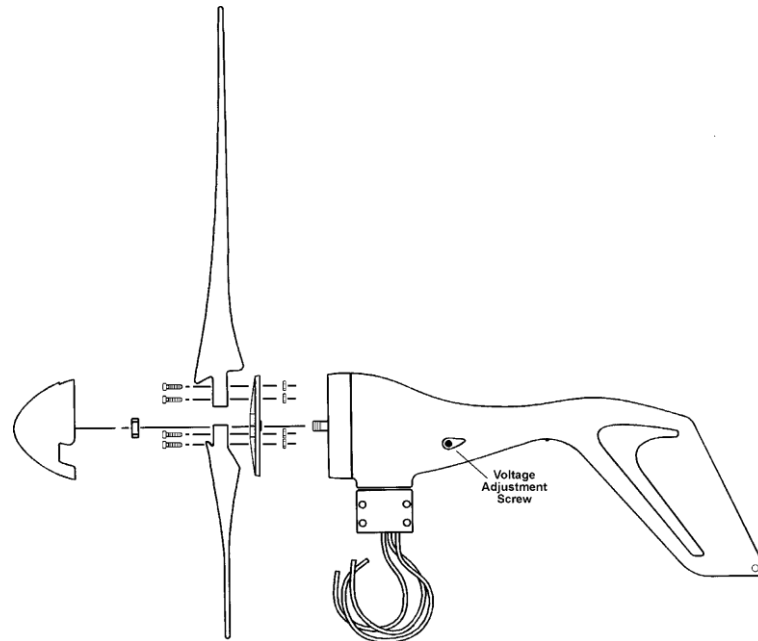


Figure 1.16: Assemblage de l'aérogénérateur

1.14 Conclusion

Ce chapitre a donné en relief, des énergies renouvelables, ou nous avons traité théoriquement la question du potentiel pour l'énergie éolienne de devenir l'une des principales sources d'énergie dans l'économie du futur.

Dans le prochain chapitre, nous allons voir l'un des kits d'émulation qui a nous permettre d'étudier en pratique la production d'énergie éolienne.

CHAPITRE-2

***PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU
KIT DIDACTIQUE D'AÉROGÉNÉRATEUR***

MOD. WG /EV

CHAPITRE-2

**PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU KIT DIDACTIQUE
D'AÉROGÉNÉRATEUR (MOD.WG/EV)****2.1 Introduction**

Il convient de noter que l'entraîneur d'essai de l'aérogénérateur **Mod.WG/EV** n'a pas été fonctionné depuis l'année de réception en 2008, car son CD-ROM n'était pas attaché avec lui pour des raisons quelconques.

Malgré nos efforts, dans un premier temps, où nous avons contacté la société mère (**Elettronica Veneta S.p.A.** sise en Italie) pour lui demander de nous fournir soit le CD-ROM, soit le driver d'installation de la carte d'acquisition du BANC. Cependant, nous n'avons pas reçu les informations demandées, ainsi en deuxième temps nous sommes passés à la recherche du driver de la carte sur internet, mais malheureusement cette recherche n'a pas été fructueuse.

Nous nous sommes basés sur les documents du kit, pour expliquer son principe de fonctionnement, et la méthode correcte d'installation de l'ensemble du kit.

2.2 Instructions pas-à-pas d'installation

Ouvrir le tableau de commande (qui doit être électriquement débranché et déconnecté de la batterie), identifier les borniers de connexion Figure 2.1 [3].

1. Déployer les fils de connexion du tableau de commande à travers le mât (10m de câble fourni, en maintenant la section du câble. On peut atteindre 25m de distance entre générateur et tableau de commande) si nécessaire, prolonger les fils en respectant la polarité.
2. Apposer sur les câbles des plaquettes d'identification pour identifier le positif, le négatif et celui de terre. Il convient de rappeler que les câbles provenant de l'aérogénérateur ont la polarité / couleur suivante : **Rouge = positif // Noir = négatif // Vert = terre.**
3. Unir momentanément entre eux, le câble rouge et le câble noir en provoquant ainsi l'autofreinage des pales.
4. S'assurer que les câbles sont correctement étendus, sans que cela ne compromette la mobilité de l'aérogénérateur. Soulever de 2 mm le support du générateur du mât afin

d'éviter qu'il y ait un contact direct mât-générateur et la connexion au tube doit se produire seulement avec le coussinet en caoutchouc.

5. Serrer le support du générateur au mât et s'assurer qu'il tourne librement.
6. Vérifier les supports de soutien du mât.
7. Installer la sonde anémométrique à proximité a de l'aérogénérateur, au moyen du support fourni. Il est conseillé de ne jamais dépasser le 1.5m de l'aérogénérateur.
8. Déconnecter entre eux les câbles provenant de l'aérogénérateur et les raccorder au bornier contenu dans le tableau de commande, en respectant la polarité comme illustré à la figure 2.2 en tenant compte de la polarité, des connexions erronées endommagent les composants électroniques du générateur.
9. Raccorder le câble provenant dalla sonde anémométrique au bornier du tableau de commande comme illustré à la figure 2.3.
10. Ouvrir l'interrupteur Q2 (OFF) et raccorder la batterie au moyen des câbles fournis en veillant à respecter la polarité : Rouge = positif et Noir = négatif ; Figure 2.4. Il faut connecter auparavant les bornes et successivement la batterie en évitant tout court-circuit.
11. Fermer le tableau et activer l'alimentation s'il y a du vent, l'éolienne commence à tourner.
12. Mettre l'interrupteur Q1 en position (OFF), on active ainsi l'autofreinage de la turbine.
13. Ramener les interrupteurs Q1 et Q2 en position (ON) quand les pales du générateur tourneront rapidement, la LED placée sur le corps de la turbine s'éclairera et commence à distribuer de l'énergie en l'acheminant dans la batterie. Les valeurs produites seront visibles sur les instruments fournis.
14. Vérifier si les valeurs de puissance électrique distribuées sont cohérentes avec les données indiquées dans les données techniques de la turbine, en fonction de la vitesse, du vent instantané lue par la sonde anémométrique.

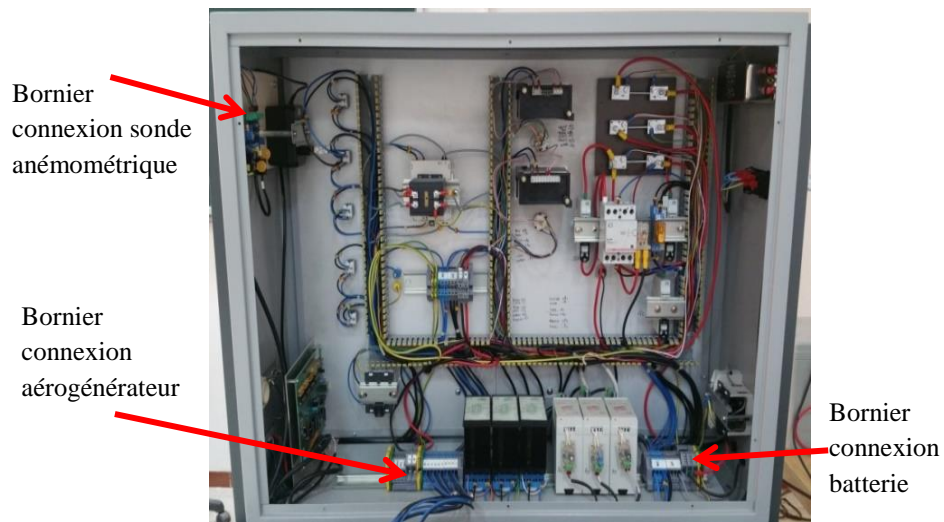


Figure 2.1: Bornier de connexion câbles de l'aérogénérateur

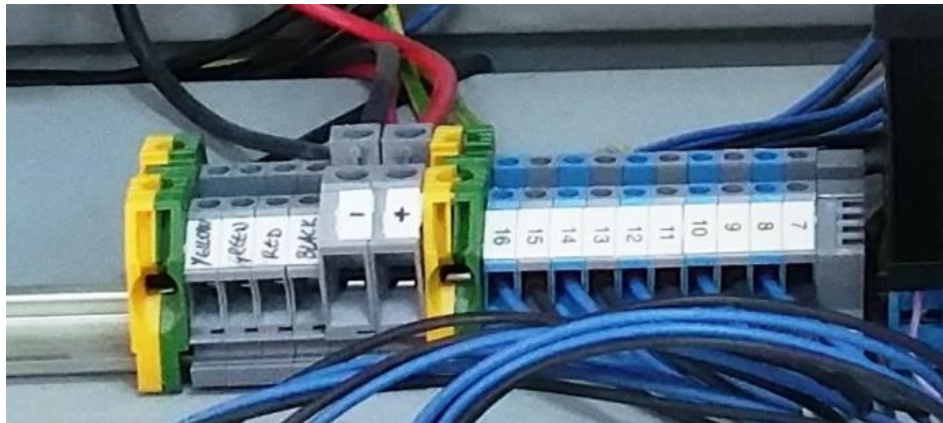


Figure 2.2: Connexion des câbles au bornier



Figure 2.3: Connexion des câbles provenant de l'anémomètre

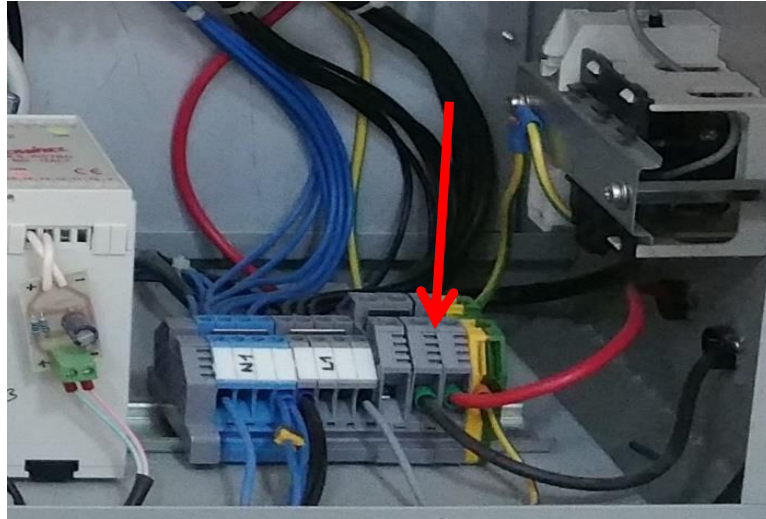


Figure 2.4: Connexion des câbles provenant de la batterie

2.3 Installation de l'aérogénérateur

2.3.1 Sécurité d'installation et d'utilisation

Afin de prévenir tout risque dérivant de l'usage de cet appareil, il faut suivre attentivement ce qui suit, ainsi que les indications présentes dans le mode d'emploi de la machine fourni en annexe [3].

a) Risques mécaniques

La rotation du générateur peut provoquer des risques, puisque les pales se déplaçant à haute vitesse sont une source de danger. Dans l'évaluation du site d'installation, il faudra par conséquent prendre en considération ce risque mécanique et éviter que quelqu'un puisse entrer en contact même accidentellement avec les pales.

b) Risques électriques

L'aérogénérateur est équipé d'une électronique interne en mesure de contrôler le fonctionnement du générateur et la production électrique, avec le contrôle correspondant de la charge des accumulateurs. Le tableau de commande est muni de systèmes de contrôle et de sécurité aptes à prévenir tous risques électriques toutefois les principales normes de sécurité et la mise à la terre tant du générateur que des batteries devront être respectées.

Une attention particulière doit être accordée aux choix des câbles de connexion électriques, en tenant compte du fait qu'une section supérieure réduit les pertes énergétiques pour effet Joule sur le conducteur [3].

Les tableaux 2.1- 2.2 extraits du manuel du fabricant de la turbine, fournissent des indications sur la section minimale des câbles à utiliser, en prenant en considération une vitesse moyenne du vent de 12mph. Il faut observer également que la résistance des câbles peut influencer le point de consigne de régulation de la turbine de grandes résistances dues à des câbles de section inférieure, réduisent le voltage avec lequel se produit la charge des batteries et arrêtent avant le procédé de charge [3].

Tableau 2.1: Caractéristiques de section des câbles électriques de connexion

AWG SIZE	14	12	10	8	6	4	3	2	1	0	2/0	3/0	4/0
Diam inches	0.0641	0.081	0.102	0.129	0.162	0.204	0.229	0.258	0.289	0.325	0.365	0.41	0.46
Diam mm	1.628	2.057	2.591	3.277	4.115	5.182	5.817	6.553	7.341	8.255	9.271	10.414	11.684

Tableau 2.2: Section nécessaire pour vitesse du vent de 12mph

#turbines	0-30ft	31ft-60ft	61ft-90ft	91ft-150ft	151ft-190ft	191ft-250ft	251 ft-310ft	311ft-390ft	391ft-500ft
1	8g	6g	4g	2g	1g	0g	00g	000g	000g
2	6g	4g	1g	00g	000g	0000g	*	*	*
3	4g	2g	0g	000g	0000g		*	*	*

Faisons à présent un exemple, en prenant en considération une application où la distance entre les batteries et le générateur est d'environ 15 m et la vitesse moyenne du vent de 4.5 m/s. En utilisant les unités de mesure anglo-saxonnes, souvent utilisées dans les systèmes éoliens, et en se rappelant que :

$$1 \text{ mph} = 1.6 \text{ km/h, et que } 1\text{ft} = 0.30 \text{ m on obtient: } D= 15\text{m} = 50\text{ft}$$

$$V_{\text{moy}} = 4.5 \text{ m/s} = 16.2 \text{ km/h} = 10 \text{ mph}$$

En introduisant le facteur de compensation valable pour différentes valeurs de vitesse moyenne, dans notre cas égal à 1.5 (voir Tableau 2.3), la longueur équivalente est $50 \times 1.5 = 75$ fit, qui selon le tableau 2.1 exige l'utilisation d'un câble de type 4g, ayant un diamètre de 5.182mm. Par conséquent, on appliquera un câble ayant un diamètre supérieur, correspondant à 6mm.

Tableau 2.3: Facteurs de correction de la vitesse

Vitesse moyenne	Multiplieur for Wire Lengths
9mph	2
10mph	1,5
11mph	1,25
12mph	1
13mph	0,8
14mph	0,6

Si elles ne sont pas correctement connectées, les batteries peuvent provoquer des court-circuit, suivre par conséquent attentivement les instructions de connexion en respectant les polarités.

Note : Une mauvaise connexion batterie-générateur (par ex. pôle positif turbine avec pôle négatif batterie, et pôle négatif turbine avec pôle positif batterie) provoque l'endommagement irréparable du circuit électrique présent dans l'aérogénérateur [3].

La présence d'un interrupteur de sécurité magnétothermique muni de fusible de 32A interrompt le flux du courant en cas de panne ou de connexion erronée.

Le contrôle sur la vitesse de rotation est effectué au moyen d'un système de réglage placé à l'intérieur de l'aérogénérateur, qui veille à interrompre la distribution du courant si le niveau de charge des batteries a été atteint et l'aérogénérateur dans ce cas se place en état (OFF). Il est important de ne mettre aucun régulateur externe entre les batteries et l'aérogénérateur pour ne pas perturber ce contrôle.

La turbine, si elle n'est pas connectée aux batteries, fonctionne en régime libre et de cette manière elle tournera sans contrôle afin d'éviter tous dommages possibles dérivant de ce régime de rotation, il s'avère nécessaire de raccorder toujours le générateur à la batterie ou le placer en sécurité en court-circuitant les connexions.

Cette dernière fonction est exécutée automatiquement chaque fois que l'interrupteur **Q1** est ouvert Figure 2.5 Pendant la phase d'installation et d'entretien éventuel, les batteries devront toujours être déconnectées et le générateur placé en court-circuit.

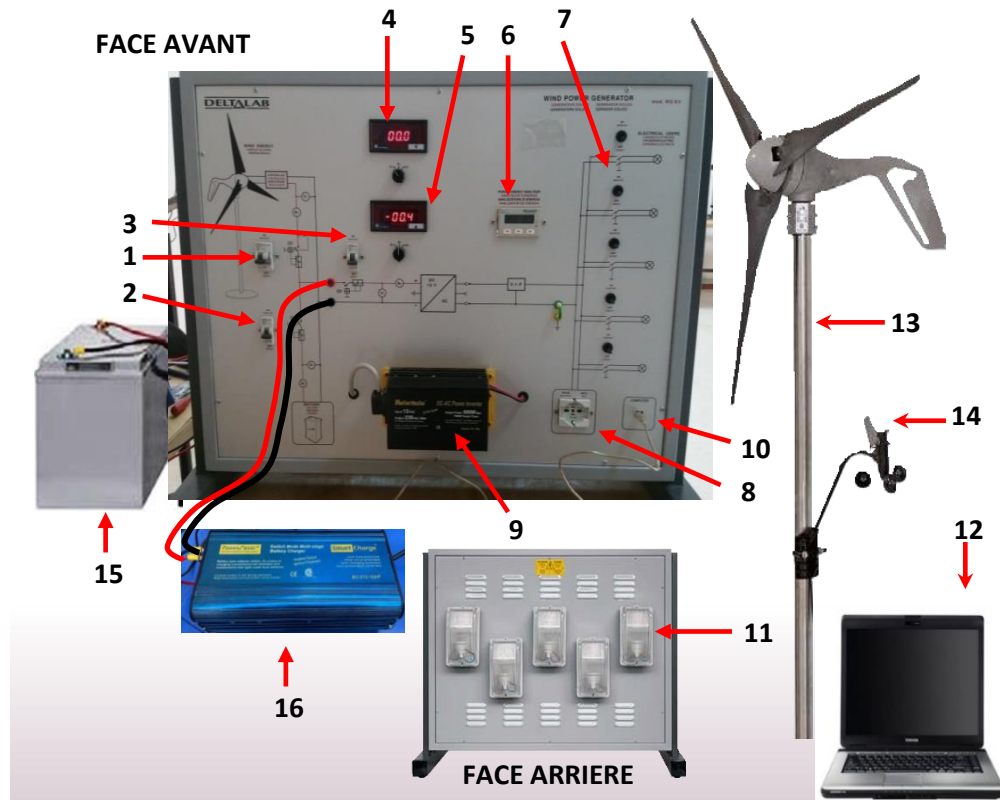


Figure 2.5: Schéma fonctionnel du système

1. Interrupteur automatique magnétothermique de sécurité Q1 In=32A
2. Interrupteur automatique magnétothermique de sécurité Q2 In=32A
3. Interrupteur automatique magnétothermique de sécurité Q3 In~50A
4. Afficheur pour la visualisation du courant
5. Afficheur pour la visualisation de la tension DC
6. Instrument mesureur des paramètres électriques AC (P, V, I)
7. Interrupteur de charges électriques
8. Prise électrique pour charges externes
9. Convertisseur (onduleur) 10÷15V/230V-50 Hz
10. Connexion USB
11. Système de charges AC constitué de 05 lampes (220V/30W)
12. Ordinateur (optionnel)
13. Aérogénérateur
14. Anémomètre
15. Batterie
16. Chargeur batterie externe 12V / 10A (BC-012-10AP)

2.4 Régulateur de charge

Le régulateur de charge s'active pour le chargement de la batterie si le voltage descend en dessous de la valeur de charge sélectionnée. Pour 12V de réglage, la charge est réactivée quand 12.6V sont atteints. Ce régulateur est réglé pour la batterie fournie, dans le cas de générateurs de 12 V la plage de variabilité est de 13.8 + 17.8 V et la valeur de réglage est 14.1V [3].

Pour modifier la valeur, on peut agir sur la manette positionnée sur le générateur, Figure 1.16 (chapitre-1). Il faut toutefois tenir compte du fait qu'augmenter le point de consigne n'élève pas la tension ni l'ampérage à la sortie de l'aérogénérateur, mais modifie simplement le point de consigne d'interruption de charge. Il faut par conséquent faire attention à ne pas provoquer des conditions de surcharge des batteries [3].

Note : Pour un fonctionnement correct, le régulateur doit pouvoir toujours surveiller l'état de charge des batteries, il ne doit pas être par conséquent déconnecté de l'accumulateur !

2.5 Générateur sans balais

a) Génération du courant électrique

La plus grande partie des mini-turbines éoliennes utilise des alternateurs à aimants permanents, qui allient des caractéristiques de simplicité de construction et de résistance. Dans certains alternateurs, les aimants permanents s'attachent à un "aimant cylindrique central", qui tourne à l'extérieur du stator de cette manière les pales peuvent être directement fixées au cylindre, et on obtient l'avantage que c'est la force centrifuge elle-même qui pousse les aimants contre la paroi du cylindre [3].

Dans la Figure 2.6 pour le générateur utilisé, on peut remarquer les aimants liés au rotor et la disposition du stator auquel ils s'approchent pendant la rotation.

Beaucoup d'alternateurs pour machines éoliennes engendrent de l'énergie électrique en courant alternatif triphasé, d'autres le redressent au moyen d'un dispositif de contrôle monté sur le générateur. Un aspect négatif dérivant de l'emploi des aimants permanents est lié à la résistance au mouvement qui se crée quand le rotor est à l'arrêt et les aimants s'alignent avec les bobines, en créant ainsi une résistance électromagnétique à la rotation [3].

L'aérogénérateur utilisé dans l'équipement Mod. WG/EV présente un alternateur "sans balais" triphasé, un redresseur de tension, un régulateur et un chargeur de batterie intégré dénommé "autobreak", en mesure de ralentir la rotation du rotor dès que le point de consigne de charge sélectionné est atteint [3].

En réglant le générateur pour un fonctionnement à 12V, la charge de la batterie reprend dès que 12.6V sont atteints et le générateur reprend son régime normal de rotation. Quand le générateur est déconnecté de la batterie, il prend le fonctionnement appelé "free-spin", dans lequel le générateur sans charge peut se porter dans des régimes de rotation élevés proches de 17.9 m/s dans ce cas, c'est la déformation même des ailes qui empêche d'atteindre des conditions critiques pour la résistance et la stabilité du système. Un système de protection interne du générateur évite les dommages dus au survoltage [3].

Pour prévenir les pannes dues aux longues périodes de temps dans des conditions de "free-spin", c'est-à-dire de déconnexion de la charge, il est conseillé de maintenir connectée la batterie ou bien court-circuiter les contacts de l'aérogénérateur au moyen de l'interrupteur de stop (ftg.3.1 pos. 1), avec lequel si en état de OFF on a le frein du rotor [3].

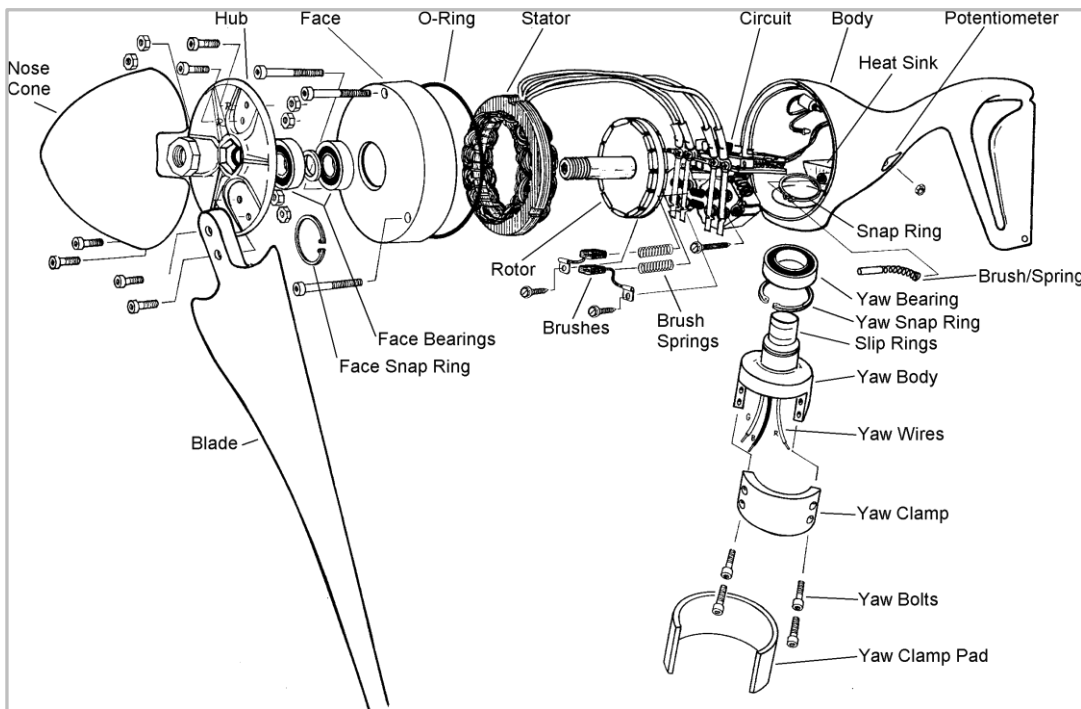


Figure 2.6: Éclaté de la turbine utilisée sur le Mod. WG/EV

b) Machines synchrones

Nous fournissons ci-après certaines indications purement descriptives sur le principe de fonctionnement des machines synchrones et du générateur de type "sans balais" pour la production d'énergie électrique. La machine synchrone est une machine rotative réversible, que nous venons ici sous l'aspect du générateur ou plus couramment alternateur. Les phénomènes se produisant à l'intérieur de la machine pendant son fonctionnement sont extrêmement conditionnés par les aspects de construction et par le niveau de saturation du fer du noyau [3].

La figure 2.7 représente une machine synchrone typique qui comprend un enroulement de champ alimenté par courant continu placé sur le rotor et un enroulement triphasé placé sur le stator. L'interaction entre le champ magnétique produit par l'enroulement du rotor et celui produit par l'enroulement du stator, produit un couple pulsatoire variable dans le temps avec vitesse moyenne nulle. Afin qu'un couple constant soit produit, rotor et stator doivent être synchronisés et avoir la même vitesse de rotation. La vitesse de rotation du rotor de la machine synchrone est fixée par la vitesse de rotation du champ du stator, qui est appelée vitesse synchrone [3].

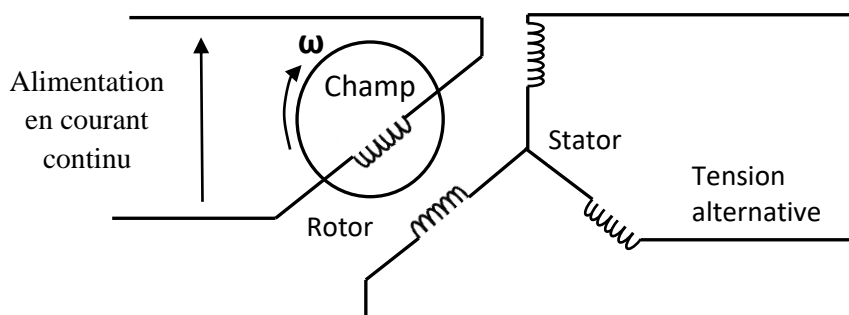


Figure 2.7: Schématisation fonctionnelle d'une machine synchrone

2.5.1 Principe de fonctionnement des alternateurs (sans balais)

L'alternateur présent sur l'aérogénérateur **Mod. WG/EV** est du type sans balais et se compose essentiellement de deux parties : Système inducteur et système d'induit [3].

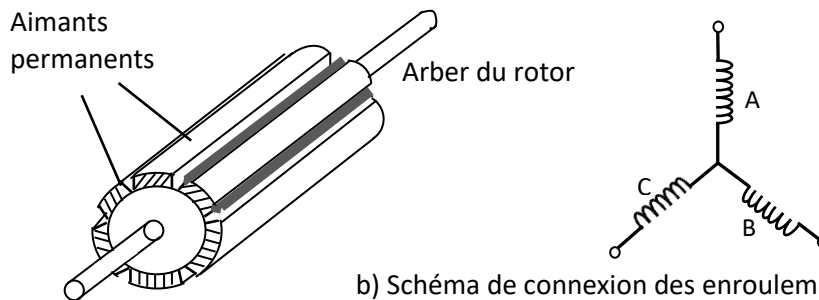
a) Système inducteur

Contrairement aux machines synchrones normales, l'enroulement de champ est constitué par un puissant aimant permanent placé sur le rotor, comme l'illustre la figure 2.8, en éliminant ainsi l'exigence d'un commutateur et des balais rotatifs. Dans le cas spécifique du générateur associé à la turbine éolienne WG/EV, le système inducteur est constitué par 12 aimants permanents placés sur le rotor.

b) Système d'induit

C'est un système constitué par un enroulement triphasé ouvert pour courants alternatifs, installé dans des cavités spécifiques du stator (partie statique de la machine, semblable à celle présente dans les machines synchrones). Le circuit magnétique du stator, étant intéressé par des flux variables dans le temps, est réalisé au moyen de fines tôles ferromagnétiques.

Le nombre de pôles de l'enroulement d'induit doit être égal au nombre de pôles de l'inducteur ou bien au nombre d'aimants permanents. Dans le cas d'un alternateur monophasé, l'enroulement statorique est du type monophasé [3].



a) Structure de construction du Rotor

b) Schéma de connexion des enroulements de stator

Figure 2.8: Structure de construction et schéma de connexion d'une machine électrique de type sans balais

Le fonctionnement de la machine se produit en portant en rotation à vitesse n [g/l'] le rotor (qui est couplé par l'intermédiaire de l'arbre à la roue de la turbine éolienne). Il se produit ainsi que les conducteurs actifs, installés dans les cavités du stator, sont coupés par le champ inducteur qui a distribution sinusoïdale dans l'espace et, selon la loi de l'induction électromagnétique, deviennent logement de f.e.m. induites sinusoïdales dans le temps. Les f.e.m. induites dans les conducteurs individuels actifs sont rassemblées en série pour composer la f.e.m. de chaque phase et, si les enroulements des trois phases sont correctement écartés entre eux, les trois phases constitueront un terme triphasé symétrique de f.e.m [3].

Il est facile de se rendre compte que, si p est le nombre de couples polaires et n [g/l'] est la vitesse de rotation du rotor, la fréquence des f.e.m. induites dans le stator sera égale à :

$$f = \frac{p \cdot n}{60} [Hz]$$

Dans le cas où les bornes de sortie des enroulements statoriques sont connectées à une charge triphasée équilibrée, on aura la distribution du courant vers la charge et dans la machine une série de phénomènes se produira, phénomènes résumés par le terme réaction

d'induit. Par ailleurs, si le courant distribué a une composante en phase avec la tension étoilée de sortie, on a la distribution de puissance électrique active à laquelle correspondra une puissance mécanique absorbée par l'alternateur (fournie par la turbine qui l'entraîne) et, par conséquent, dans le temps la transformation (typique des générateurs) de travail mécanique en énergie électrique [3].

Une machine électrique qui accomplit également la transformation de travail mécanique en énergie électrique est la dynamo (générateur du courant continu). Toutefois l'utilisation de l'alternateur s'est consolidée étant donné que, dans le cas de la dynamo, toute la puissance engendrée est obligée de s'acheminer à travers un système très critique (le collecteur à lamelles), tandis que dans le cas de l'alternateur seule la puissance d'excitation (pas plus d'1,5% de la puissance distribuée) est obligée de s'acheminer à travers le système constitué des brosses et des bagues (système de toute façon beaucoup moins critique que le collecteur à lamelles). Pour ces raisons, les générateurs sans balais sont très utilisés, notamment grâce à leurs caractéristiques de construction qui présentent de nombreux avantages :

- Entretien réduit
- Rapport supérieur couple/volume
- Protections plus simples
- Meilleure caractéristique de couple, notamment aux hautes vitesses.

2.6 Dispositifs de stockage de l'énergie

2.6.1 Choix de la batterie en fonction de la capacité

La capacité d'une batterie est la quantité d'énergie (en Ah) qu'elle est en mesure de fournir à un circuit externe. Elle est obtenue avec la formule suivante : $C = I * t$. Où I est le courant de décharge et "t" est le temps de décharge en heures [3].

La capacité pouvant être distribuée par une batterie est influencée par plusieurs paramètres tels que :

- Régime de décharge (la capacité rendue est inférieure aux régimes hauts par rapport aux régimes bas).
- Température et densité de l'électrolyte (à basse température, la capacité disponible diminue).
- Tension finale de décharge (la capacité se rapporte à une valeur de tension de fin de décharge, qui est en général de l'ordre de 0,3 V inférieur à la valeur de tension initiale).

2.6.2 Batteries fournies avec l'équipement

Les batteries solaires CSV (GEL) fournies, sont à faible contenu d'antimoine avec liquide de type électronique présentant des pertes d'eau négligeables. Elles peuvent être chargées sur plus de 150 cycles, quand elles sont déchargées à 70% de la capacité, et plus de 800 cycles quand elles sont déchargées seulement de 20%. Ces batteries sont spécifiquement conçues pour l'application à des systèmes éoliens/ photovoltaïques et utilisent des électrodes plus épaisses et des séparateurs doubles. Les données techniques des batteries CSV sont comme suit [3]:

➤ Voltage nominal	V_n : 12V
➤ Capacité nominale	C_n :140Ah
➤ Courant nominal	I_n :7A
➤ Voltage de charge	14.1V à 25°C
➤ Voltage final	10.5V
➤ Température limite	-20°C + +50°C
➤ Température recommandée	+5° C + 30°C
➤ Auto-déchargement	6% mois
➤ Durée	3 - 5 ans
➤ Déchargement max. permis	80% C_n
➤ Entretien	remplissage annuel si nécessaire
➤ Dimensions	345 x 170 x 285mm.

2.7 Convertisseur CC/CA

Le convertisseur sinusoïdal adopté est un convertisseur statique CC/CA en mesure d'engendrer une tension alternative sinusoïdale (230Vca \pm 2% 50Hz, puissance nominale à la sortie 600 W) en partant d'une tension continue (12Vcc). La figure 2.9 illustre clairement le principe de fonctionnement du convertisseur, dans lequel en commandant de manière favorable les interrupteurs, la charge est parcourue par le courant dans un sens (quand deux interrupteurs situés sur des côtés opposés du pont conduisent), puis dans le sens opposé (quand les deux autres conduisent) [3].

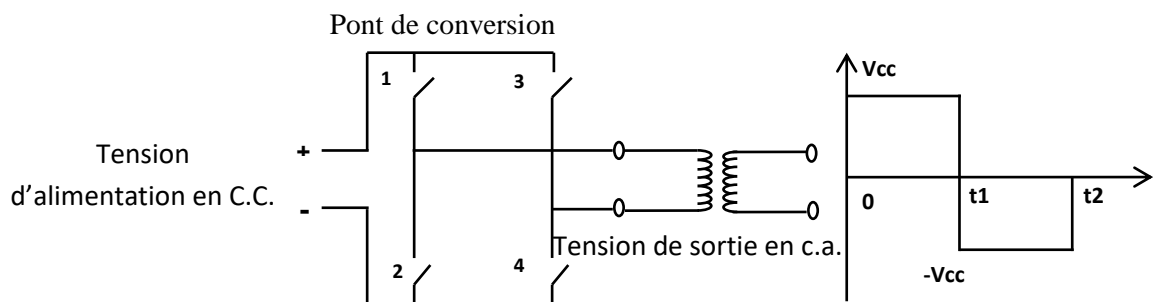


Figure 2.9: Schéma de principe d'un convertisseur monophasé à pont interne

2.7.1 Caractéristiques techniques

- Tension d'entrée CC : 12V (10-15V) ou 24V (20-30V)
- Tension de sortie CA : 220V
- Fréquence de Sortie : 50Hz
- Forme d'onde de sortie : Onde sinusoïdale modifiée
- Puissance de sortie continue : 470 W
- Puissance de crête : 1500 W
- Efficacité : supérieure à 90%
- Déconnexion convertisseur : CC $10 \pm 0.5V$
- Prise de sortie : De type européen
- Interrupteur d'allumage : Contrôle ON/OFF sur tension CC
- Dimensions : 160 x 115 x 70mm
- Poids : 1,2 kg.

2.8 Application des aérogénérateurs

2.8.1 Applications à systèmes "OFF-GRID"

Grâce à la particularité du vent et à la possibilité de le combiner alternativement à l'énergie solaire, on assiste à la diffusion toujours plus importante de systèmes hybrides, constitués par un ensemble de micro-turbine éolienne et panneau photovoltaïque Figure 2.10.

Une des principales applications des aérogénérateurs trouve une vaste diffusion dans les systèmes "off-grid", c'est-à-dire autonomes en mesure de produire de l'énergie électrique sans besoin de raccordement au réseau électrique national. Ils sont généralement utilisés pour charger des batteries, pour distribuer aussi bien de l'énergie en courant alternatif qu'en courant continu, Figure 2.11a [3].

Grâce aux unités de contrôle électroniques modernes, ces générateurs peuvent alimenter directement des pompes pour puits hydriques ou bien d'autres moteurs, sans devoir passer par les batteries, Figure 2.12b. D'autres solutions prévoient le chauffage domestique au moyen de résistances électriques Figure 2.12c, tandis que sont très présentes les applications directement connectées par exemple à des moulins à vent agricoles voire la Figure 2.12d [3].

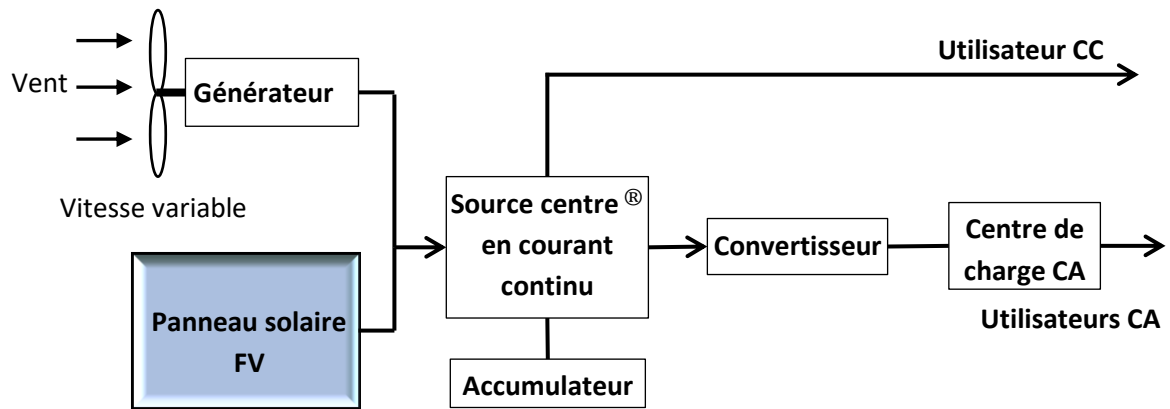


Figure 2.10: Système intégré

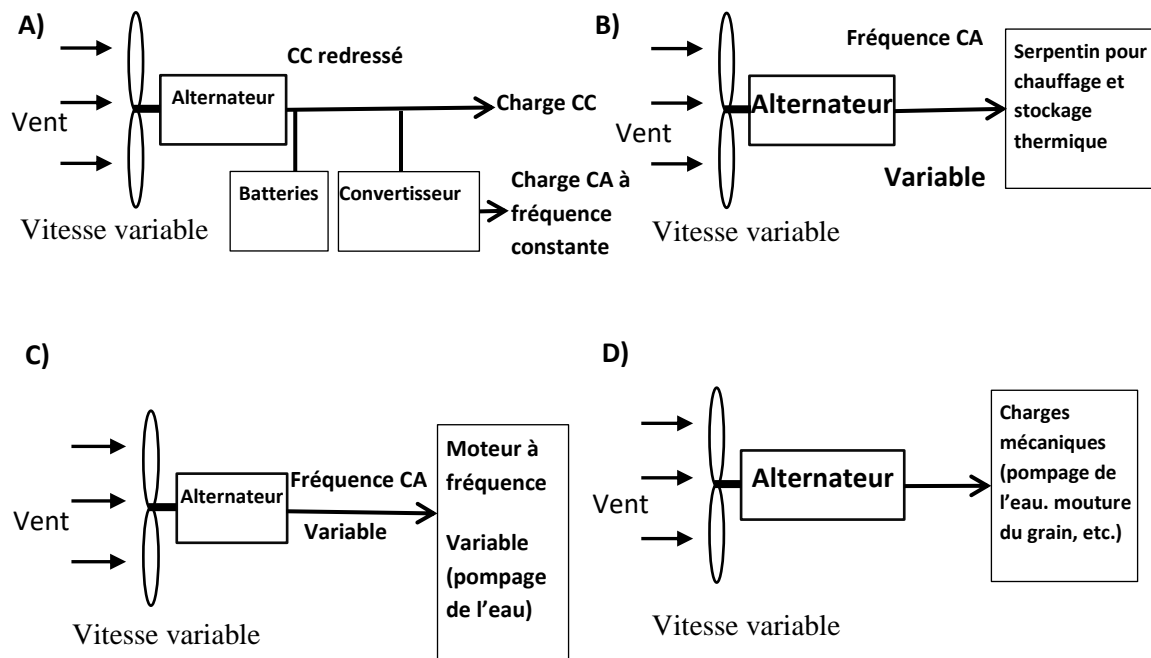


Figure 2.11: Machines éoliennes "Stand-Alone" ou "Off-Grid"

Le fonctionnement correct de ces systèmes dépend essentiellement des composants de réalisation tels que par exemple convertisseurs et batteries. Ces dernières représentent encore l'anneau le plus petit de la chaîne étant donné que seulement 50% de l'énergie accumulée peut être utilisée sans provoquer la sulfatation des plaques. En outre, en moyenne une batterie peut être utilisée pendant environ 2.000 cycles, ce qui signifie qu'une batterie est en mesure de produire en moyenne 1.000 kWh d'énergie électrique nette pendant sa vie [3].

Si l'on prend en considération, en outre, une série d'accumulateurs de 6V de capacité globale de 200Ah, correspondant à environ 1kW d'énergie chimique, coûtant environ 100

euros, cela signifie que le poids du coût énergétique est seulement pour les batteries égal à 100 euros par kWh [3].

L'intégration des différents composants utilisés dans les systèmes hybrides est permise par un "DC source center", à savoir une barre de distribution du courant continu qui facilite la connexion entre batterie, générateur et convertisseur en toute sécurité [3].

2.8.2 Connexion au réseau local

Très souvent survient l'exigence de décharger le surplus d'énergie qui n'est pas directement employé par l'utilisateur, par l'intermédiaire de connexion au réseau électrique, qui se comporte comme un accumulateur énergétique. Il existe des normes bien précises qui régissent ce type de rapport entre l'utilisateur privé et la société de distribution de l'énergie électrique, par exemple les normes CEI 11-20 et les spécifications du distributeur local. Le réseau stocke l'énergie électrique qui n'est pas utilisée, et ce déversement d'énergie est surveillé et compté au moyen de compteurs spécifiques en mesure de distinguer l'énergie achetée de celle revendue au gérant du réseau électrique national ou local [3].

Avec l'apparition des convertisseurs modernes auto commutés, on a la production d'électricité compatible avec celle de réseau en effet, ces convertisseurs sont en mesure d'utiliser le courant continu engendré par un système de batteries à accumulation et produire du courant alternatif avec une onde sinusoïdale similaire à celle du réseau électrique. Les nouveaux systèmes sont en mesure d'interagir avec le réseau électrique et, si la demande du courant est supérieure à celle disponible et les batteries sont déchargées, ils puisent l'énergie du réseau jusqu'à ce que les batteries se soient rechargées [3].

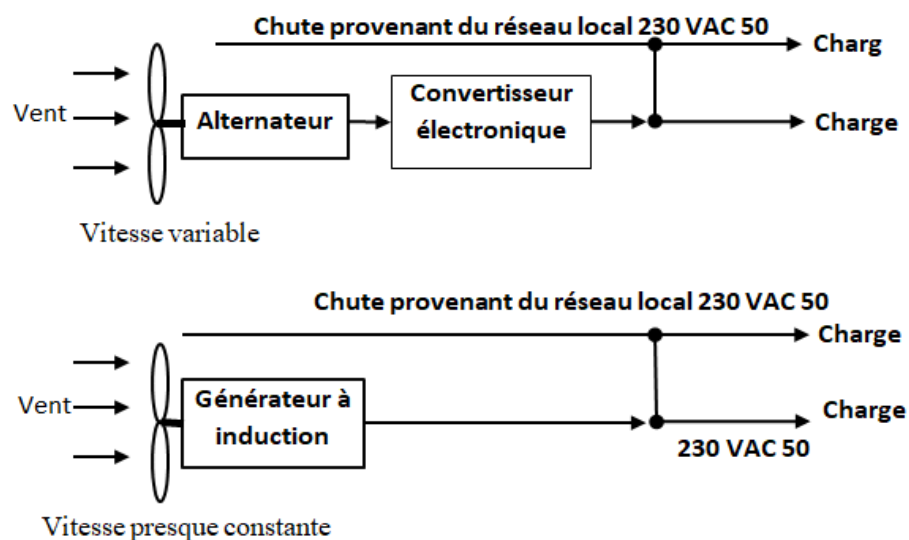


Figure 2.12: Systèmes éoliens compatibles avec le réseau

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présente le principe de fonctionnement du kit didactique d'aérogénérateur (MOD.WG/EV) et les déférents partie de kit ou nous avons mis les descriptions nécessaires et suffisantes pour bien comprendre la mise en marche et le fonctionnement de kit. Afin de concevoir et de développer un système de surveillance des données pour ce kit nous avons procédé dans le chapitre suivant à la modélisation de notre système.

CHAPITRE-3

***DISPOSITIFS MATÉRIELS ET
LOGICIELS UTILISÉS***

CHAPITRE-3

DISPOSITIFS MATÉRIELS ET LOGICIELS UTILISÉS

3.1 Introduction

Vu de ce qui précède, le kit MOD.WG/EV n'a jamais fonctionné depuis l'année 2008, en raison de l'indisponibilité du logiciel et du driver d'installation, de ce fait nous avons décidé de changer l'ancienne carte, et créer un nouveau système d'acquisition de données, par conséquent, nous avons opté pour que ce système soit un système pseudo embarqué incluant l'**Arduino & LabVIEW**, nous avons choisi d'utiliser la carte **Arduino Mega2560** comme carte d'acquisition car elle possède suffisamment d'entrées analogiques, et l'environnement LabVIEW pour développer l'interface logiciel, tout en assurant la communication entre eux via le package **LINX**, que nous avons ajouté à la bibliothèque LabVIEW à l'aide de **VIPM** (Virtual Instrument Package Manager), afin d'identifier la famille d'Arduino.

Dans ce chapitre on donne une description matérielle (**Arduino Mega2560**) et une description logicielle (**LabVIEW**), ainsi que le processus de connexion entre eux, dans le but de montrer la capacité de la carte Arduino utilisée dans le remplacement, de l'ancienne carte.

3.2 Description matériel et logiciels

3.2.1 Description matériel

3.2.1.1 Définition du module Arduino

Arduino est une plate-forme de prototypage sous la forme d'une carte électronique équipée d'un microcontrôleur qui interagit avec un milieu extérieur grâce à des capteurs

La carte électronique avec un environnement de programmations interactives à usage créatif constituée d'un environnement matériel et logiciel vont permettre à l'utilisateur de formuler ses projets par l'expérimentation directe à l'aide de nombreuses ressources disponibles en ligne.

Arduino est un projet open source (accessibles et libres de droits), il permet à la grande communauté d'utilisateurs et de concepteurs de trouver les réponses à ces questions et de réaliser leurs projets.

Les projets Arduino peuvent être autonomes, comme ils peuvent communiquer avec d'autres logiciels installés sur l'ordinateur tel que Flash, Processing ou Max MPS, MATLAB, LabVIEW). Ces cartes sont faites à base d'une interface entrée/sortie simple et d'un environnement de développement proche du langage C [4] [5].

3.2.2 Gammes de la carte Arduino

Actuellement, il existe plus de 20 versions de module Arduino, on cite quelques versions afin d'éclaircir l'importance de ce produit scientifique et académique :

- **Le NG d'Arduino**, avec une interface USB pour programmer et usage d'un ATmega8.
- **Le NG d'Arduino plus**, avec une interface USB pour programmer et usage d'un ATmega168.
- **L'Arduino Nano**, une petite carte avec une interface USB, cette version un microcontrôleur ATmega168 (ATmega328 pour les nouvelles versions).
- **L'Arduino Mini**, une version miniature de l'Arduino qui utilise un microcontrôleur ATmega168.
- **L'Arduino UNO**, elle utilise un microcontrôleur ATmega328.
- **L'Arduino Mega2560**, elle utilise un microcontrôleur ATmega2560, et possède une mémoire de 256 KBS. Elle incorpore également le nouvel ATmega8U2 (ATmega16U2 dans le jeu de puces d'USB de révision 3).
- **L'Arduino Leonardo**, avec un module ATmega3U4 qui élimine le besoin de raccordement d'USB et peut être employé comme clavier [6].

Parmi ces types, nous avons choisi une carte **Arduino MEGA 2560**. L'intérêt principal de cette carte est qu'elle dispose un nombre suffisant des entrées analogiques, ce qui facilite la mise en œuvre d'une de notre application.

3.2.3 Carte Arduino Mega2560

La carte Arduino Mega2560 est une carte à microcontrôleur basée sur un ATmega 2560, et possède les éléments suivants :

- 54 broches numériques d'entrées/sorties (dont 14 peuvent être utilisées en sorties PWM (MLI : Modulation de largeur d'impulsion)).
- 16 entrées analogiques qui peuvent être utilisées en broches entrées/sorties numériques
- 4 UART (port série matériel).
- Quartz de 16Mhz.
- d'une connexion USB.
- Connecteur d'alimentation jack.
- Connecteur ICSP (programmation "in-circuit").
- Bouton de réinitialisation (reset).

Elle contient tout ce qui est nécessaire pour le fonctionnement du microcontrôleur ; Pour pouvoir l'utiliser, il suffit de la connecter à un ordinateur à l'aide d'un câble USB.

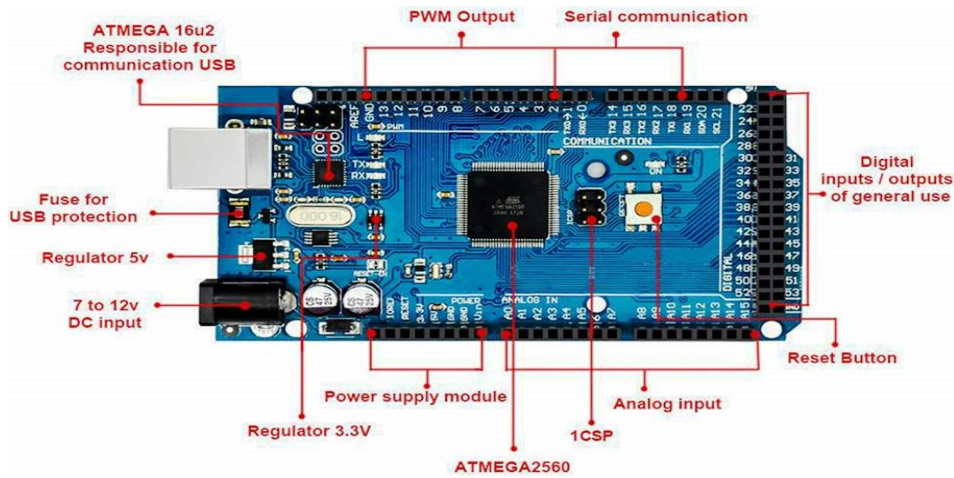


Figure 3.1: Présentation de la carte Arduino Mega2560

3.2.4 Caractéristique technique de la carte Arduino Mega 2560

Un module Arduino est généralement construit autour d'un microcontrôleur ATMEL AVR, et de composants complémentaires qui facilitent la programmation et l'interfaçage avec d'autres circuits. Chaque module possède au moins un régulateur linéaire 5V et un oscillateur à quartz 16 MHz (ou un résonateur céramique dans certains modèles). Le microcontrôleur est préprogrammé avec un bootloader de façon à ce qu'un programmeur dédié ne soit pas nécessaire.

3.2.5 Partie matérielle

Généralement tout module électronique qui possède une interface de programmation est basé toujours dans sa construction sur un circuit programmable ou plus.

Tableau 3.1: Constitution de la carte Arduino Mega 2560

Microcontrôleur	ATMEGA2560
Tension de fonctionnement	5V
Tension d'alimentation	7 à 12V
Broches E/S numérique	54 (dont 14 disposent de sortie PWM)
Broches d'entrées analogiques	16
Vitesse d'horloge	16 MHz
Mémoire programme Flash	25 6Ko dont 8 Ko utilisés en bootloader
Mémoire SRAM	8 Ko
Mémoire EEPROM	4 Ko

3.2.6 Microcontrôleur ATmega2560

Le microcontrôleur ATmega2560 est un circuit intégré qui rassemble plusieurs éléments complexes sur une puce, le processeur de la carte s'occupe de tout ce qui est calculs, exécution des instructions du programme et gestion des ports d'entrée/sortie [7].



Figure 3.2: Microcontrôleur ATmega2560

Le microcontrôleur de cette carte est un objet capable de traiter, de stocker et de restituer de l'information. Il est en particulier constitué d'un microprocesseur, qui constitue la partie centrale et permet de traiter les informations : il comprend des milliers, voire des millions de transistors. Ils réalisent les fonctions logiques suivantes :

- Calculs arithmétiques et logiques.
- Mémorisation.
- Interface de communication.

Les ATMEL sont des composants dits RISC (Reduced Instruction Set Computer), ou en français, (composants à jeux d'instructions réduit). Ces microcontrôleurs utilisent l'architecture de Harvard : c'est-à-dire le programme et les données sont stockés dans des mémoires physiquement séparées. (Deux bus de données. Un bus est utilisé pour les données et un autre pour les instructions).

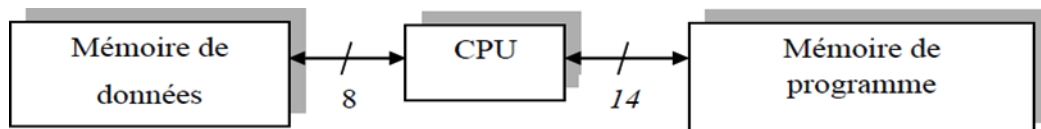


Figure 3.3: Architecture de Harvard pour les ATMEEL

3.2.7 Mémoires

L'ATmega 2560 à 256Ko de mémoire FLASH pour stocker le programme (dont 8Ko également utilisés par le bootloader), 8Ko de mémoire SRAM (volatile) et 4Ko d'EEPROM (non volatile).

3.2.8 Sources de l'alimentation de la carte

La carte Arduino Mega 2560 peut être alimentée soit via la connexion USB (qui fournit 5V jusqu'à 500mA) ou à l'aide d'une alimentation externe. La source d'alimentation est sélectionnée automatiquement par la carte.

La carte peut fonctionner avec une alimentation externe de 6 à 20 volts. Cependant, si la carte est alimentée avec moins de 7V, la broche 5V pourrait fournir moins de 5V, et la carte pourrait être instable. Si on utilise plus de 12V, le régulateur de tension de la carte pourrait chauffer ce dernier. Les broches d'alimentation sont les suivantes :

- **VIN** : La tension d'entrée positive lorsque la carte Arduino est utilisée avec une source de tension externe (à distinguer du 5V de la connexion USB ou autre source 5V régulée).
- **5V**. La tension régulée utilisée pour faire fonctionner le microcontrôleur et les autres composants de la carte. Le 5V régulé fourni par cette broche peut donc provenir soit de la tension d'alimentation VIN via le régulateur de la carte, ou bien de la connexion USB ou de tout autre source d'alimentation régulée.
- **3.3V** : Cette tension est fournie par le circuit intégré FTDI (circuit intégré faisant l'adaptation du signal entre le port USB de l'ordinateur et le port série de l'ATmega) de la carte. L'intensité maximale disponible sur cette broche est de 50mA
- **GND** : Broche de masse (0V).

3.2.9 Entrées et sorties numériques

Chacune des 54 broches numériques de la carte Arduino Mega peut être utilisée soit comme une entrée numérique, soit comme une sortie numérique. Ces broches fonctionnent en 5V. Chaque broche peut fournir ou recevoir une intensité maximale de 40mA et dispose d'une résistance interne de déconnexion par défaut (pull-up) de 20-50 Kohms. Cette résistance interne s'active sur une broche en entrée à l'aide de l'instruction digitalWrite (broche, HIGH). De plus, certaines broches ont des fonctions spécialisées :

- **Communication Série**: Port Serie Serial : 0 (RX) and 1 (TX); Port Serie Serial 1: 19 (RX) and 18 (TX); Port Serie Serial 2: 17 (RX) and 16 (TX); Port Serie Serial 3: 15 (RX) and 14 (TX). Utilisées pour recevoir (RX) et transmettre (TX) les données séries de niveau TTL. Les broches 0 (RX) and 1 (TX) sont connectées aux broches correspondantes du circuit intégré ATmega8U2 programmé en convertisseur USB-vers-série de la carte, composant qui assure l'interface entre les niveaux TTL et le port USB de l'ordinateur.

- **Interruptions Externes:** Broches 2 (interrupt 0), 3 (interrupt 1), 18 (interrupt 5), 19 (interrupt 4), • 20 (interrupt 3), et 21 (interrupt 2). Ces broches peuvent être configurées pour déclencher une interruption sur une valeur basse, sur un front montant ou descendant, ou sur un changement de valeur.
- **Impulsion PWM** (Modulation de largeur d'impulsion): Broches 0 à 13 fournissent une impulsion PWM 8-bits à l'aide de l'instruction `analogWrite ()`.
- **SPI** (Périphérique d'Interface Série): Broches 50 (MISO), 51 (MOSI), 52 (SCK), 53 (SS). Ces broches supportent la communication SPI.
- **I2C:** Broches 20 (SDA) et 21 (SCL). Supportent les communications de protocole I2C.
- **LED:** Broche 13. Il y a une LED incluse dans la carte connectée à la broche 13.

3.2.10 Broches analogiques

La carte Mega2560 dispose de 16 entrées analogiques, chacune pouvant fournir une mesure d'une résolution de 10 bits (1024 niveaux soit de 0 à 1023) à l'aide de la très utile fonction `analogRead ()` du langage Arduino. Par défaut, ces broches mesurent entre le 0V (valeur 0) et le 5V (valeur 1023). Les broches analogiques peuvent être utilisées en tant que broches numériques.

3.2.11 Autres broches

Il y a deux autres broches disponibles sur la carte :

- **AREF** : Tension de référence pour les entrées analogiques (différent du 5V). utilisée avec l'instruction `analogReference ()`.
- **Reset** : Mettre cette broche au niveau BAS entraîne la réinitialisation du microcontrôleur.

3.2.12 Les Accessoires de la carte Arduino

La carte Arduino est associée aux accessoires qui simplifient les réalisations.

3.2.13 Communication de l'Arduino

Pour permettre à cette carte de s'adapter à de nombreuses applications, la société a fabriqué divers accessoires appelés **Shields**, liés aux divers domaines ainsi qu'à l'environnement dans lequel l'application sera implémentée, en général on fonctionne sur une communication série (**RX/TX**).

3.2.13.1 Module multiplexeur analogique et multiplexeur numérique

Multiplexeur analogique 16 canaux, il s'agit d'un multiplexeur / démultiplexeur analogique / numérique 16 canaux CD74HC4067 très pratique, il convient aux signaux numériques et analogiques (la tension ne dépasse pas la tension VCC) et peut être connecté dans les deux sens. Pour contrôler cela, les quatre sorties numériques doivent être connectés à la broche de sélection d'adresse de la puce (S0-S3) et lui envoyer l'adresse binaire du canal souhaité.

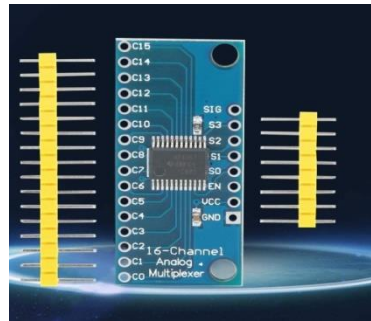


Figure 3.4: Module multiplexeur et démultiplexeur pour Arduino

3.2.14 Programmation de l'Arduino

Le langage Arduino est basé sur le C/C++, la programmation d'Arduino est en effet une implémentation de **Wiring** (une plateforme open source similaire de *physical computing* qui proposait elle-même une bibliothèque appelée **Wiring** qui simplifie les opérations d'entrée/sortie), un programme Arduino est aussi appelé un **sketch**, l'éditeur **Arduino IDE** peut être téléchargé gratuitement (pour Mac OS X, Windows, et Linux).

3.2.15 Structure d'un programme sous Arduino

Déroulement du programme [8] :

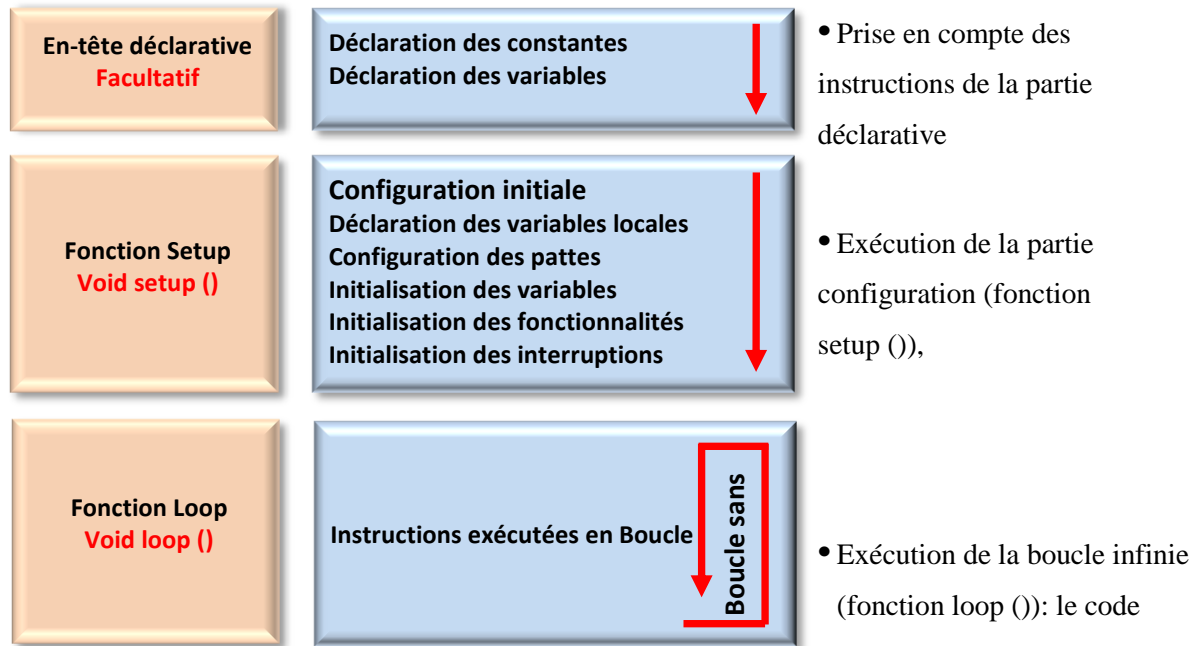


Figure 3.5: Structure d'un programme pour Arduino

3.2.16 Code minimal

Avec Arduino, on doit utiliser un code minimal lorsque l'on crée un programme. Ce code permet de diviser le programme qu'on va créer en deux grosses parties.

```

void setup () //fonction d'initialisation de la carte
{
//contenu de l'initialisation
}
void loop () //fonction principale qui se répète (s'exécute) à l'infini
{
//contenu du programme
}

```

3.2.17 Syntaxe du langage

Pour plus d'informations sur la syntaxe nous pouvons également voir la section des références sur: <http://www.arduino.cc/reference>

3.2.18 Environnement de développement

La figure ci-dessous montre l'interface principale de l'environnement Arduino IDE

Version: 2.0.0-rc6

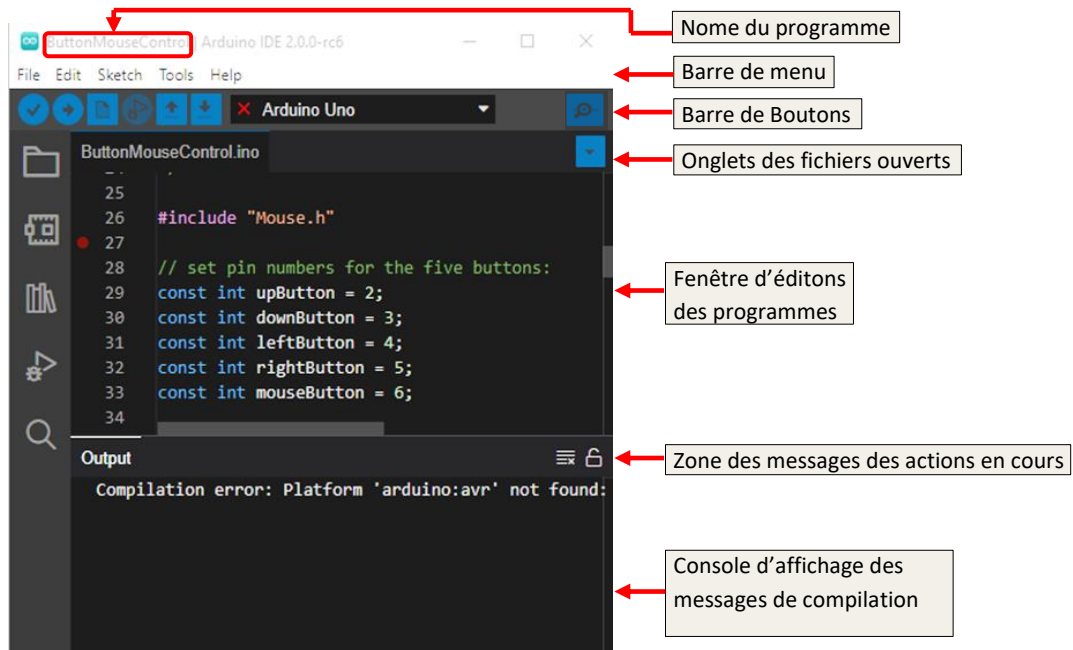
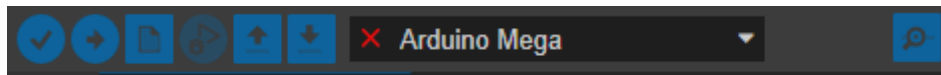








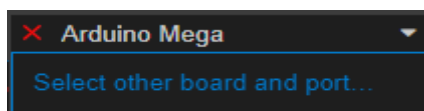
Figure 3.6: Environnement Arduino IDE Version: 2.0.0-rc6

3.2.18.1 Description des icônes de la barre de boutons

La barre de boutons est constituée des boutons suivants :



-  Vérifier (Verify) : vérifier les erreurs dans le code
-  Charge (Upload) : compiler le code et charger le programme sur la carte Arduino
-  Nouveau (New) : créé un nouveau sketch
-  Ouvrir (Open) : ouvrir un des sketches déjà présent
-  Sauvegarder (Save) : sauvegarder le sketch
-  Serial Monitor : permet d'accéder au port série (en RX/TX)



Sélectionnée une autre Carte Arduino ainsi le port COM

3.2.19 Fonctionnement et utilisation

L'utilisation des cartes Arduino est très simple, on commence par la connexion de la carte à l'ordinateur (via le câble USB), puis on lance l'éditeur Arduino IDE, on mis en place les composants, et relie-le à la carte, et en fin on test le programme en cliquant sur le bouton 'vérifier' pour voir s'il y a des erreurs dans le code, Après la vérification du code, il sera changé sur l'aide du bouton de Upload, et le programme commence à s'exécuter.

3.2.20 Débit en bauds (Baud Rate -Bd) :

Signifier le débit de transmission des bits, le terme « baud » provient du patronyme d'Émile Baudot, l'inventeur du code Baudot utilisé en télégraphie.

3.2.21 Description de Baud Rate

Vous configurez Baud Rate en bits par seconde. Les bits transférés comprennent le bit de démarrage, les bits de données, le bit de parité (s'il est utilisé) et les bits d'arrêt. Cependant, seuls les bits de données sont stockés.

Le débit en bauds est le débit des informations transférées dans un canal de communication. Dans le cas du port série, "**9600 bauds**" signifie que le port série est capable de transférer un maximum de 9600 bits par seconde. Si l'unité d'information est un baud (un bit), alors le débit binaire et le débit en bauds sont identiques. Si un Baud est donné sous la forme de 10 bits (par exemple, huit bits de données plus deux bits de trame), le débit binaire est toujours de 9600 mais le débit en bauds est de $9600/10$ ou 960. On configure toujours Baud Rate en bits par seconde. Par conséquent, dans l'exemple ci-dessus, Baud Rate définit sur 9600 [9].

Note.

L'ordinateur et l'instrument doivent être configurés sur le même débit en bauds pour pouvoir lire ou écrire des données avec succès [9].

3.2.21.1 Exemple

- Nombre de changements de chronologie par seconde
 - Définissez le débit en bauds sur 4 (4 changement par seconde)
 - Définissez les bits de chaque ligne changée à 2
 - Bit rate = 8 bits per second
 - Bit rate = $\times 2$ Baud rate dans cet exemple

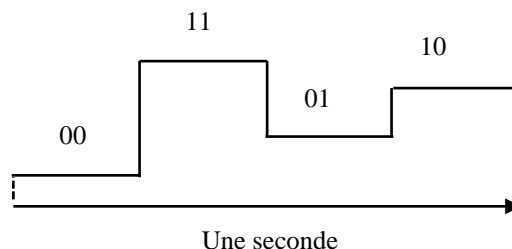


Figure 3.7: Baud Rate et Bit Rate

3.3 Environnement LabVIEW

National Instruments Corporation, est leadeur mondial en matière d'équipements de test automatisés et de logiciels d'instrumentation virtuelle. LabVIEW est un produit qu'ils ont développé, il est utilisé dans de nombreux laboratoires à travers le monde. LabVIEW signifie **L**aboratory **V**irtual **I**nstrument **E**ngineering **W**orkbench, il est programmé avec un langage graphique connu sous le nom de **G** ; c'est un langage de programmation de flux de données. LabVIEW est supporté par Virtuel Instrument Package Manager (VIPM). VIPM contient tous les outils et les kits pour améliorer le produit LabVIEW [10].

3.3.1 Importance de LabVIEW

LabVIEW est un langage de programmation graphique conçu pour les ingénieurs et les scientifiques.

Avec plus de 20 ans de développement derrière lui, il devient un outil de développement mature qui fait de l'automatisation un plaisir. La conception graphique du système élimine la complexité de l'apprentissage du C ou du C++, qui est le langage natif d'Arduino il permet à l'utilisateur de se concentrer sur l'obtention du proto complet.

LabVIEW réduit considérablement la courbe d'apprentissage du développement, car les représentations sont des notations de conception plus intuitives que le code textuel. Les outils peuvent être accessibles facilement via des palettes interactives, des boîtes de dialogue, des menus et de nombreux blocs de fonction appelés instruments virtuels (**VI**). Vous pouvez glisser-déposer ces VIs sur le bloc Diagramme pour définir le comportement de votre application. Cette approche pointer-cliquer déduit le temps nécessaire pour passer de la configuration initiale à une solution finale [10].

3.3.2 Ce qui rend Arduino idéal pour LabVIEW

La communauté Arduino est extrêmement vaste avec des milliers, voire des centaines de milliers de projets qui peuvent être trouvés à l'aide de simples recherches sur **Google**. L'intégration de LabVIEW à Arduino rend le prototypage encore plus simple en utilisant l'environnement graphique de LabVIEW avec la plate-forme Arduino.

Officiellement, LabVIEW fonctionnera avec **Uno** et **Mega 2560** [10].

3.3.3 Compétences requises pour utiliser LabVIEW et Arduino

LabVIEW étant principalement conçu et destiné aux scientifiques et aux ingénieurs, il peut aussi être utilisé par des amateurs. Les utilisateurs qui n'ont aucune compétence en

programmation ont pu mener à bien des projets entiers en suivant simplement le processus intuitif consistant à faire glisser des contrôles sur le diagramme et à le configurer pour l'automatiser [10].

3.3.4 Domaines d'application

LabVIEW permet de faire de la programmation graphique pour :

- Les mesures
- L'automatisation
- Réseau de capteurs pour la métrologie de COVs.
- Analyse automatisée de plasma
- Développement de dispositifs de traitement de l'information
- Il permet l'acquisition, traitement et commande à partir d'un PC, il peut développer et piloter toute une chaîne d'acquisition.

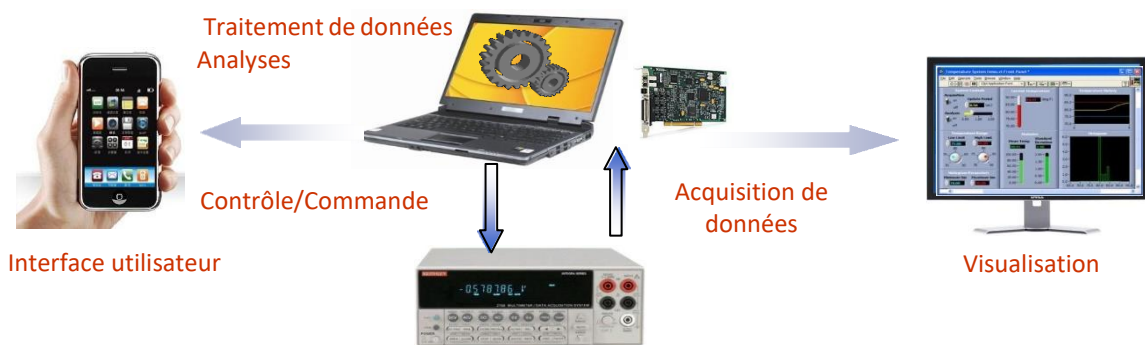


Figure 3.8: Chaîne d'acquisition pilotée par LabVIEW

3.3.5 Présentation de l'interface logicielle

L'interface graphique de LabVIEW contient deux fenêtres de travail séparées mais associées.

- **1^{ère} fenêtre : face avant (*front panel*)**

Elle contient les contrôles et les afficheurs de données, interrupteurs, variateurs, potentiomètres avec curseurs, boîtes de dialogue. LEDs, compteurs à aiguilles, vumètres, boîtes de message, graphes.

- **2^{ème} fenêtre : diagramme (*block diagram*)**

Elle contient le programme des Terminaux de commandes, des nœuds (sous-programme, fonctions, structures, interfaces code), des constantes, des Terminaux d'affichage, des connecteurs et des fils.

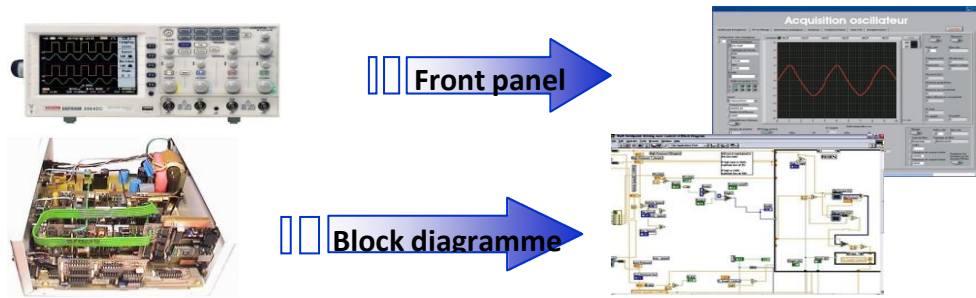


Figure 3.9: Développement d'instruments virtuels (VI)

Interface utilisateur Interface programmeur

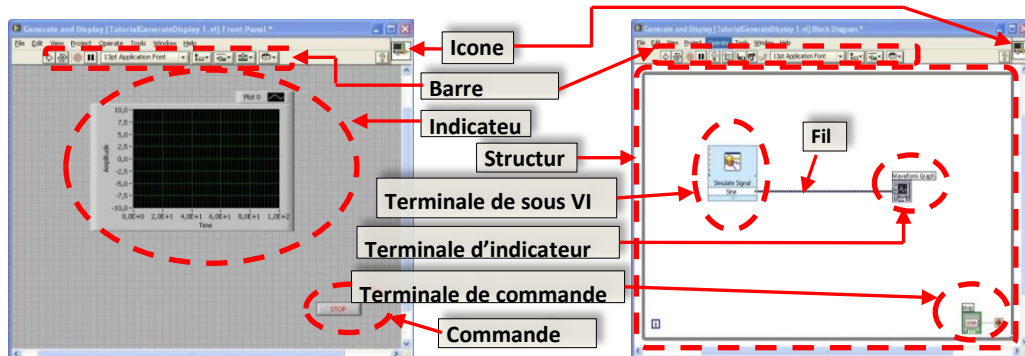


Figure 3.10: Présentation de la Face avant et Block Diagram

3.3.5.1 Barres d'outils

Le rôle des boutons des barres d'outils de l'interface logiciel est donné dans la figure ci-dessous.

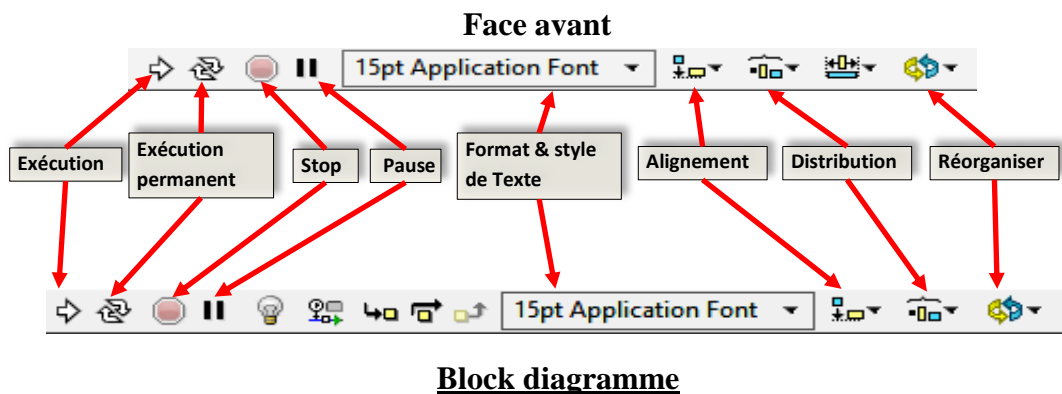


Figure 3.11: Présentation les barres d'outils

3.3.5.2 Palette d'outils

Elle est disponible sur la face-avant et sur le diagramme, elle contient les outils nécessaires pour faire fonctionner et modifier la face avant et les objets du diagramme.

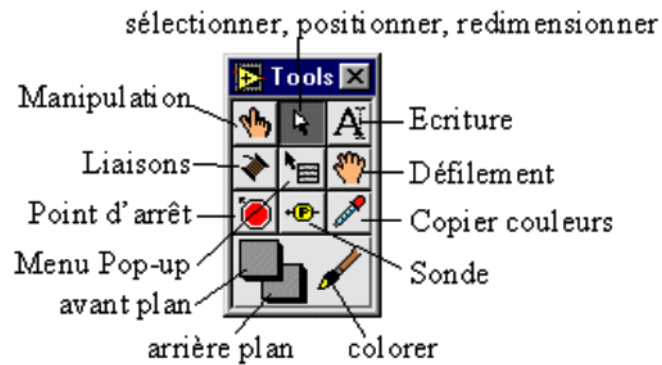


Figure 3.12: Palette d'outils

3.3.5.3 Palette de commandes

Elle est disponible uniquement sur la face-avant, elle contient les commandes, les éléments graphiques et indicateurs de la face-avant nécessaire pour créer l'interface utilisateur. Ceux-ci sont hiérarchisés par type de données ou par grandes familles d'objets [11].

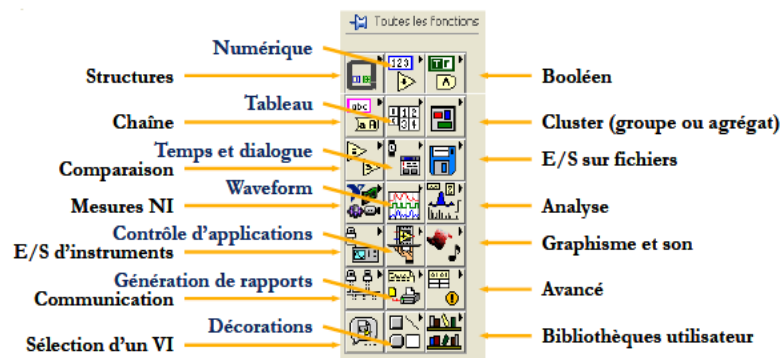


Figure 3.13: Palette de commandes

3.3.5.4 Description des menus et les sous menus de commande et de fonctions

A travers les menus de commande et de fonctions, le programmeur peut manipuler le graphique afin de réaliser n'importe quel interface de commande et de contrôle, donc, ces menus sont des éléments nécessaires qui vont permettre de créer l'interface utilisateur.

3.3.5.5 Menus et sous menus de commande

Il s'agit des commandes et des indicateurs formant l'interface utilisateur tel que, le voltmètre, les boutons poussoirs, les indicateurs numériques et analogiques, les boutons rotatifs, ...etc.

Tous ces éléments sont à placer sur la face avant et sont accessibles via la palette de commandes

Après avoir ouvert la palette des commandes, on peut placer directement les commandes et les indicateurs sur la face-avant [12].

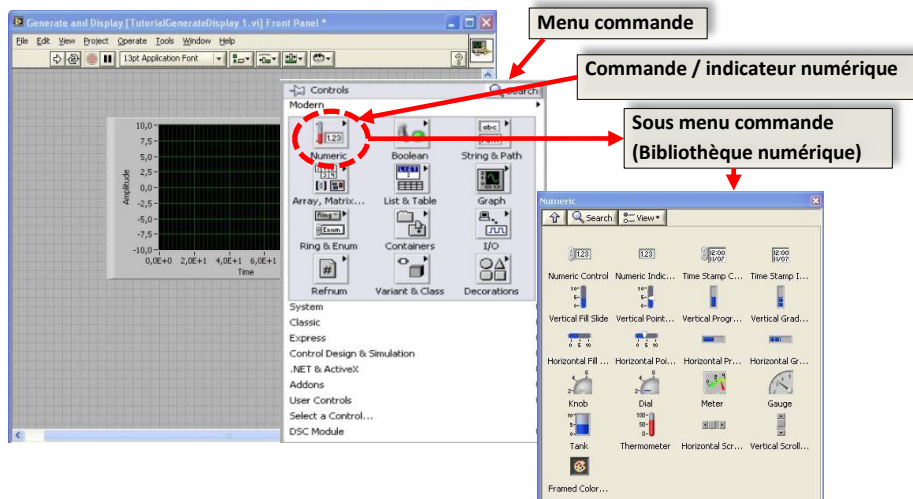


Figure 3.14: Présentation du menu commande

3.3.5.6 Menus et sous menus de fonction

Pour placer des objets sur le diagramme, faites-les simplement glisser et déposez-les depuis la palette Fonctions. La palette Fonctions apparaît automatiquement lorsque vous cliquez avec le bouton droit n'importe où dans l'espace de travail du diagramme. Il contient des fonctions, des constantes, des structures et certaines des sous Vis [12].

LabVIEW dispose les bibliothèques des fonctions logiques et arithmétiques, qui manipulent les bits et facilitent les opérations de calcul au niveau des équations simple et complexe [12].

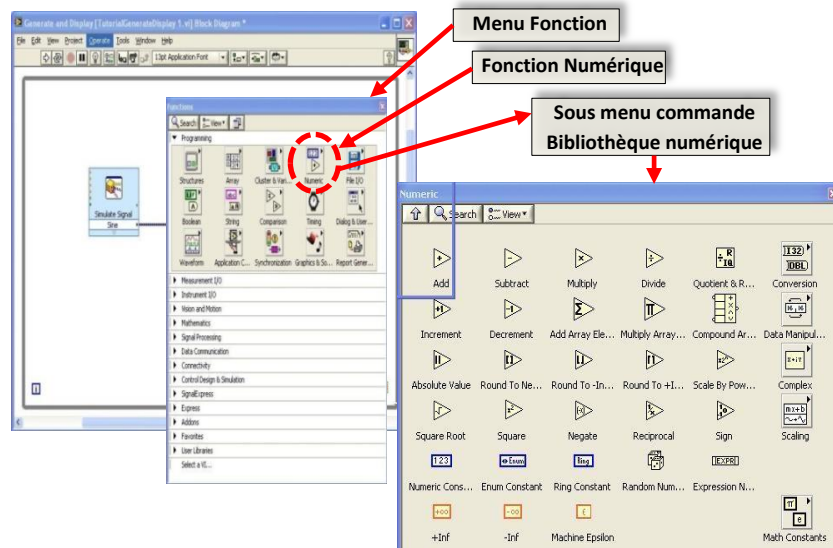


Figure 3.15: Présentation du menu commande

3.3.6 Structure dans LabVIEW

3.3.6.1 Structure de données

LabVIEW utilise un langage fortement typé et toutes données ou structure de données ne peuvent être manipulées qu’avec des fonctions admettant ce type, en fait dans LabVIEW on trouve les types de base scalaire, les types entiers (signés ou non, codés sur 8, 16 ou 32 bits), le type réel (codé sur 16, 32 ou 64 bits), le type booléen, le type chaîne de caractères, le type tableau (matrice) et cluster. Il est important de noter que les éléments représentant ces données, ainsi que les liaisons issues de ces éléments, sont de forme et de couleur différente. Ces fils associés aux variables servent à l’acheminement des données entre terminaux et les nœuds du V.I.



Figure 3.16: Différents types de structures de données dans LabVIEW

Le langage permet aussi de créer des structures de données plus élaborées.

3.3.6.2 Structure de programme

LabVIEW utilise un langage de flux de données pur qui a été enrichi de quatre types de structures : la séquence, deux structures d’itération la boucle ‘FOR’ avec un nombre d’itérations fixe et la boucle ‘While’ avec un nombre d’itérations soumis à condition et la structure de choix

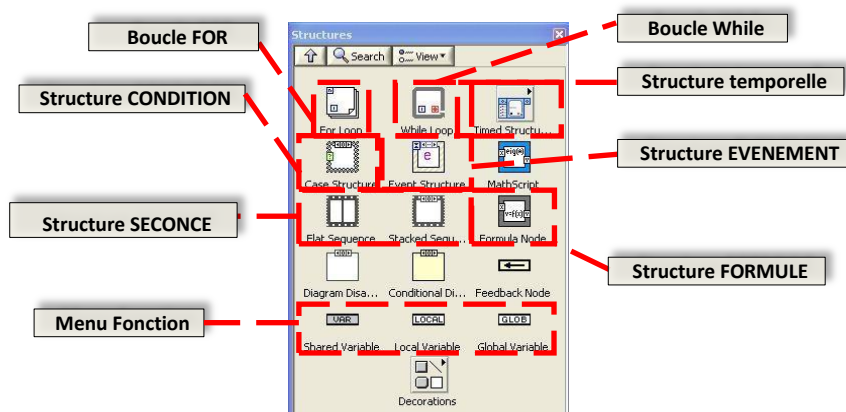



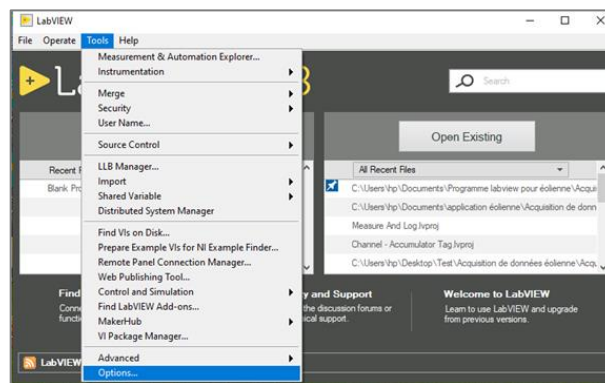


Figure 3.17: Bibliothèque boucles et structures données

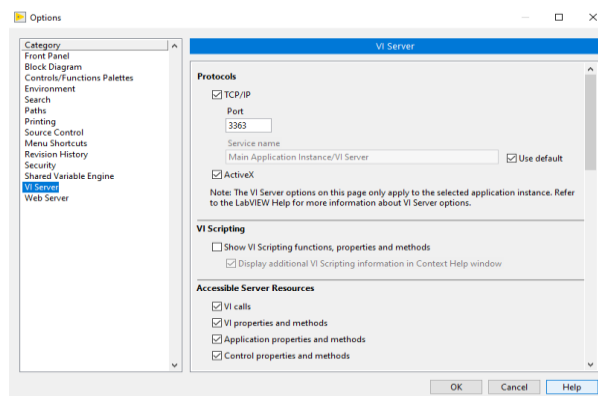
3.3.7 Interfaçage LabVIEW avec Arduino

Grâce à un module appelé **LINX**, il est devenu très simple d'interfacer Arduino et LabVIEW. Cela signifie qu'on peut contrôler les projets Arduino sans avoir à taper une seule ligne de code [10].

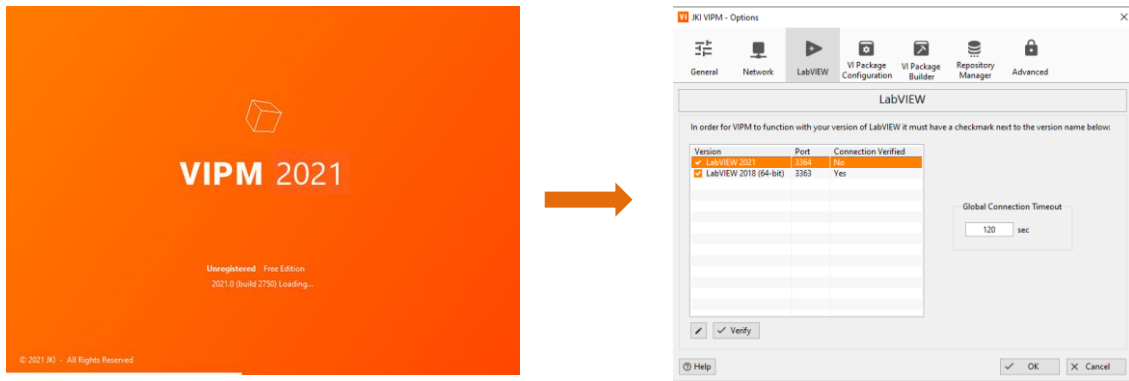
- Après avoir installé LabVIEW, lancez Visual Package Manager 
- Installer l'**IDE** Arduino 
- Dans le gestionnaire de packages VI installer le package **LINX** 
- Configurer LabVIEW et le package LINX en suivant les étapes suivantes :
 - Démarrez LabVIEW, cliquez sur Tools puis sur Options.



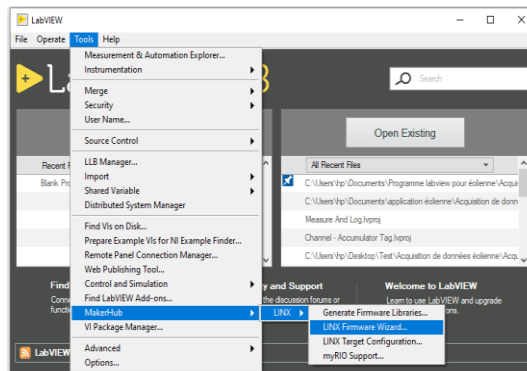
- Aller dans le menu du serveur VI, voir qu'il existe certaines options que vous pouvez modifier ici. Modifiez toutes les options afin qu'elles correspondent aux options affichées dans la capture d'écran suivante.



- Après cela, on doit faire la même chose sur le VI Package Manager pour que les deux LabVIEW et le Package Manager puissent communiquer entre eux, Pour ce faire, ouvrez simplement le packages Manager, allez dans Tools puis menu Options, puis cliquez sur l'icône LabVIEW, tout en assurons la même valeur du port de celle qu'on a définie dans LabVIEW, Corrigez-le ici si ce n'est pas le cas, et validez.



- Vérifiez l'installation LabVIEW/LINX et commencer à tester notre interface LabVIEW pour Arduino, on va vers la fenêtre principale de LabVIEW ; puis, sur Tools puis LabVIEW Hacker, qui est le lien pour accéder à l'interface LINX, ensuite, sur LINX, et enfin, on clique sur LINX Firmware Wizard.



- Cela vous mènera à l'interface graphique LINX qu'on utilisera pour configurer la carte Arduino pour le projet. Notez que cette étape ne doit être effectuée qu'une seule fois ; une fois le bon logiciel chargé dans la carte Arduino, vous n'aurez plus à y toucher.

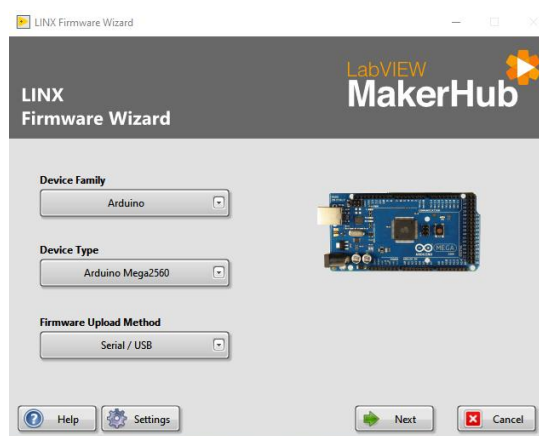
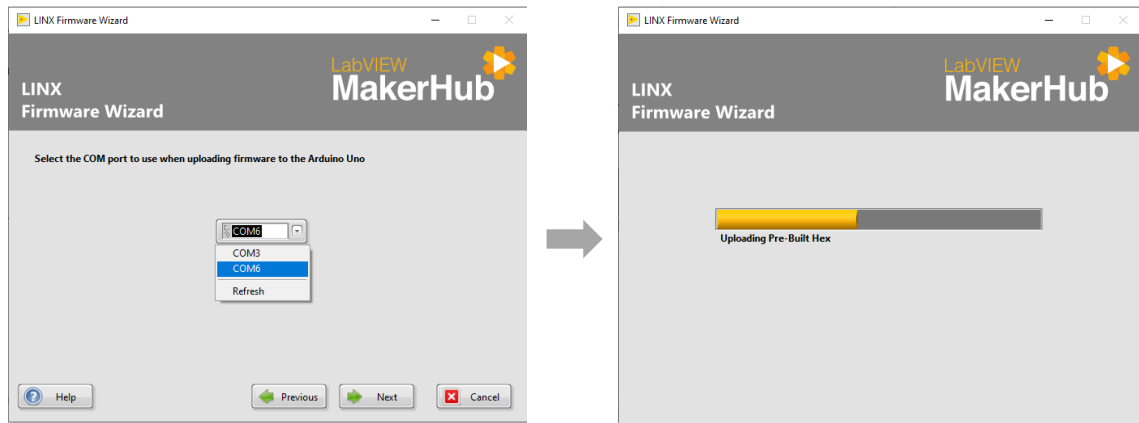


Figure 3.18: Configuration la carte Arduino Mega2560 via LINX

- Enfin, confirmez votre choix port série et commencez à télécharger le **firmware** sur la carte Arduino.



- Il devra peut-être installer le package **NI-VISA**, que vous pouvez télécharger à partir de ce lien: <http://www.ni.com/download/ni-visa-4.3/988/en/>

3.3.8 Acquisition de données par la carte Arduino Mega2560

Parmi les nombreuses façons d'utilisation de la carte Arduino, l'une des possibilités est d'en faire un système d'acquisition permettant de récolter à l'aide d'un ou plusieurs capteurs les informations essentielles à l'analyse d'une expérience. Dans ce contexte la carte Arduino **Mega2560** peut être utilisée comme :

- ✓ Serveur de données (Data server) vers **LabVIEW** à travers une liaison USB.
- ✓ Enregistreur de données (Datalogger) autonome avec un shield SD, les données sont sauvegardées sur une carte SD pour ensuite être lues et exploitées à l'aide d'un langage de programmation ou d'un logiciel, dans notre cas les données transmises vers LabVIEW sont stockés dans un fichier Excel.

Pseudo système embarqué (Embedded System) avec traitement des données, des opérations de calcul doivent être faites en réponse à un évènement extérieur avant stockage ou transmission de l'information [13].



Figure 3.19: Interfaçage Arduino avec l'environnement LabVIEW

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les dispositifs matériels et logiciels ; en premier partie nous avons commencé par une brève description sur les cartes Arduino ensuite détaillé notre carte Arduino Mega2560 que nous avons utilisé ; caractéristique technique ; architecture, entrée /sortie et leur structure de programme. Nous nous intéressons dans la seconde partie de ce chapitre au dispositif logiciel, avec notamment la Présentation de l'interface logicielle, la description et la structure dans LabVIEW.

Le chapitre suivant est consacré aux travaux effectués au laboratoire et la réalisation pratique de chaîne d'acquisition globale.

Dans ce chapitre, on a exposé les dispositifs matériels et logiciels qui seront utilisé dans notre projet; en première partie on a commencé par une brève description des cartes Arduino, ensuite, on a détaillé l'architecture et le principe de fonctionnement de la carte Arduino Mega2560 qu'on a utilisé dans notre projet (caractéristique technique ; architecture, entrée/sortie et structure de programme). La deuxième partie de ce chapitre a été consacrée au dispositif logiciel, où une description détaillée a été donné à l'environnement LabVIEW connue par sa simplicité dans le développement des interfaces graphiques.

Le chapitre suivant sera consacré à l'interface graphique développé et aux différentes parties de la chaîne d'acquisition réalisée.

CHAPITRE-4

***RÉALISATION D'UNE CHAÎNE
D'ACQUISITION DE DONNÉES ET
DEVELOPPMENT D'UNE
INTERFACE LOGICIELLE***

CHAPITRE-4

RÉALISATION D'UNE CHAÎNE D'ACQUISITION DE DONNÉES ET DEVELOPPMENT D'UNE INTERFACE LOGICIELLE

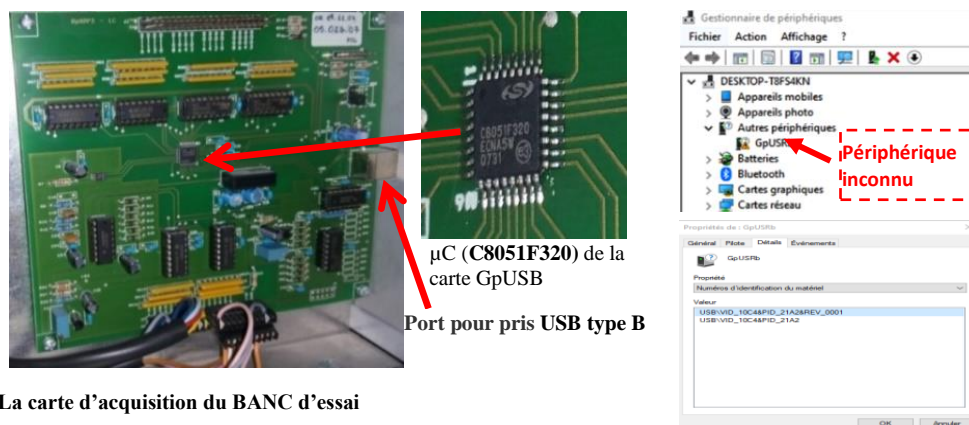
4.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons exposer en détail les différentes parties de l'interface graphique de supervision que nous avons développée, y compris, la chaîne d'acquisition de toutes les données du Kit didactique de l'aérogénérateur (Mod. WG/EV), ces données acquises sont : les courants et les tensions de chaque dispositifs (aérogénérateur, batterie, onduleur) ainsi que la direction du vent et la vitesse du vent.

La première partie de ce chapitre sera consacré à la présentation de la problématique de notre sujet, ensuite nous présentons la solution que nous avons proposée. Dans la deuxième partie, on donne la structure générale de notre réalisation puis les différents dispositifs électroniques utilisés, avec description de l'interface logicielle qu'on a réalisée et surnommée **WIND POWER SUPERVISOR (Superviseur de l'énergie éolienne)**.

4.2 Problématique

Le BANC d'essai de l'aérogénérateur didactique (Mod. WG/EV) est muni d'une carte d'acquisition de données (**GpUSB**), qui assure la communication avec l'ordinateur via un câble USB, néanmoins, le driver d'installation de la carte étant inexistant, ce qui rend la reconnaissance du matériel (carte d'acquisition) impossible (voir figure.4.1). Par ailleurs, nous avons contacté la société (**Elettronica Veneta S.p.A.** sise en Italie) pour qu'elle nous fournit le driver mais notre tentative a échoué, nous avons aussi procédé à la recherche du driver sur internet, mais malheureusement cette recherche n'a pas été fructueuse.



La carte d'acquisition du BANC d'essai

Figure 4.1 : Connexion de la carte d'acquisition du kit avec le pc

Note : L'objet de cette recherche infructueuse est de trouver le pilote correspondant au numéro d'identification matérielle suivant : **USB\VID_10C4&PID_21&REV_0001**. Ainsi, nous avons pensé à une solution alternative. Donc, on a décidé d'utiliser une **carte Arduino Mega2560** comme interface d'acquisition de données et de développer une interface graphique de supervision à l'aide de l'environnement **LabVIEW**.

4.3 Identification des signaux d'entrées analogiques

Dans la première étape, on a identifié les différents signaux provenant des capteurs selon les fiches nommées dans la Figure 4.2:

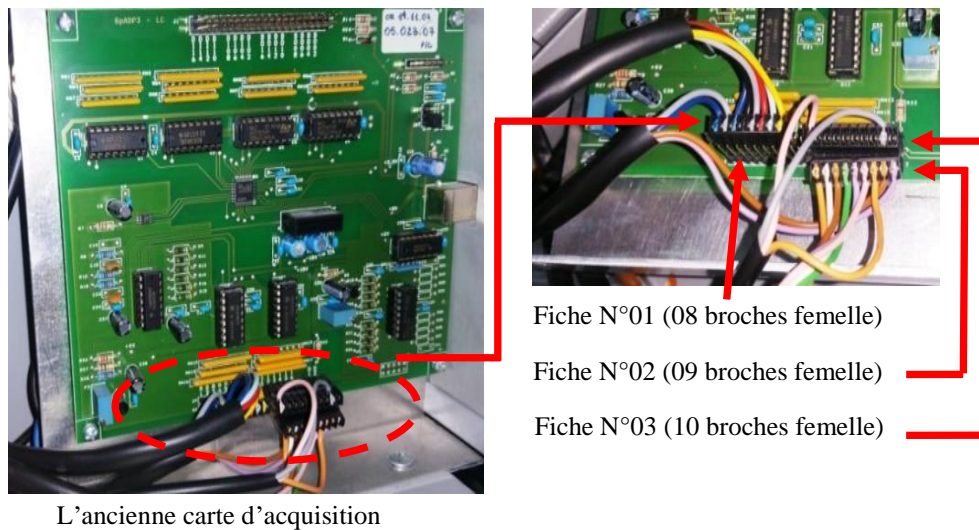


Figure 4.2 : Illustration des fiches de l'ancienne carte

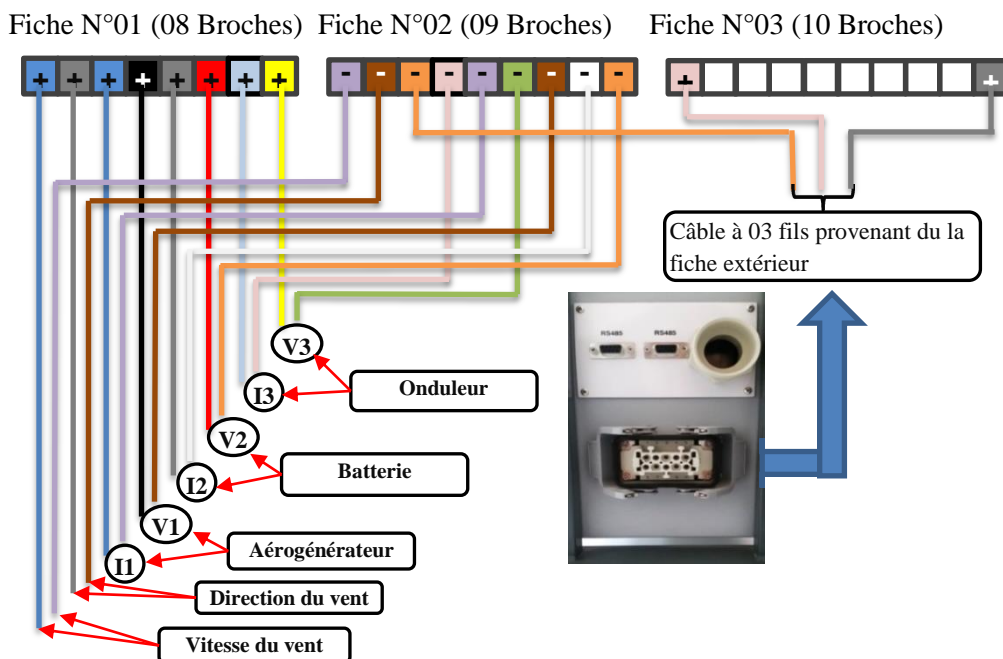


Figure 4.3 : Identification des fils provenant des capteurs

Les tensions des capteurs de la direction du vent et celle de la vitesse, ne sont pas étalonnées car ils ne sont pas exploités dans ce travail en raison de l'indisponibilité d'une émulation du vent au niveau de laboratoire, comme celui illustré dans la figure ci-dessous [14].



Figure 4.4 : Vue interne du tunnel du vent

Dans un premier lieu, on a remplacé l'ancienne carte d'acquisition par la carte Arduino Mega2560 qui assure l'acquisition des tensions, des courants, de la vitesse et de la directions du vent en sortie des capteurs, cette carte communique avec l'ordinateur à travers une connexion USB, en lui injectant 08 signaux analogiques selon l'ordre suivant :

- Pin A0 : Vitesse du vent;
- Pin A1 : Direction du vent;
- Pin A2 : Courant produit par l'aérogénérateur (I1);
- Pin A3 : Tension produite par l'aérogénérateur (V1);
- Pin A4 : Courant de batterie (I2);
- Pin A5 : Tension de batterie (V2);
- Pin A6 : Courant en amont de l'onduleur (I3);
- Pin A7 : Tension en amont de l'onduleur (V3).

4.4 Câblage du nouveau système

Après les mesures faites sur les tensions de sortie de chaque capteur, nous avons remarqué que ces tensions ne dépassent pas **4Volts** (sauf celle de la direction et de la vitesse du vent qui peut aller jusqu'à **10V**), ce qui permet de les injecté directement dans les entrées analogiques de l'Arduino sans aucun risque.

4.4.1 Première câblage

En premier temps, le câblage a été fait selon la structure illustrée dans la figure 4.5,

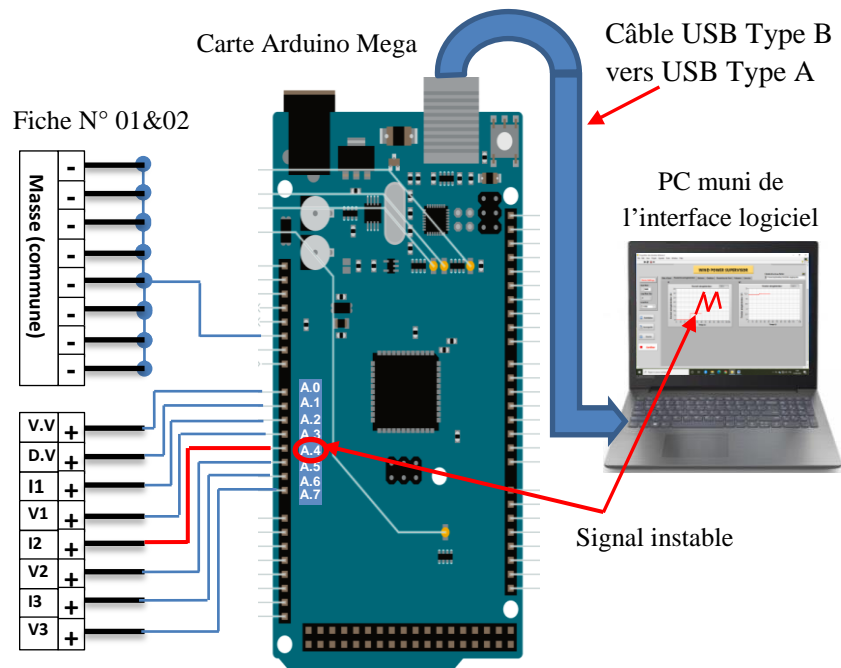


Figure 4.5 : Première raccordement des fils à l'Arduino

Le premier problème qu'on a rencontré lors de l'opération d'acquisition est que le courant de charge à un signe négatif. or la carte Arduino Mega2560 n'accepte que les tensions positive situées dans l'intervalle 0-5V, alors, il devient nécessaire d'ajouter une tension de décalage (offset) à la tension raccordé au **Pin N°04**, qui provient du capteur de courant I2, pour éliminer le signe négatif, puis on applique un diviseur de tension, afin de diminuer cette dernière pour que ne dépasse pas la valeur 5V. Le détaille de cette opération sera donné dans ce qui suit.

4.4.2 Deuxième câblage

Pour faire un offset au signal du courant I2, un circuit électronique, basé sur l'amplificateur opérationnel TL082, a été réalisé au niveau de laboratoire, les figures 4.6/4.7/4.8, montrent le circuit réalisé et les différents dispositifs nécessaires à cette opération.

4.4.2.1 Dispositifs utilisés

a) Amplificateur opérationnel TL082

L'utilisation des amplificateurs opérationnels (AOP) dans la réalisation d'un circuit d'offset donne de très bons résultats en pratique [15].

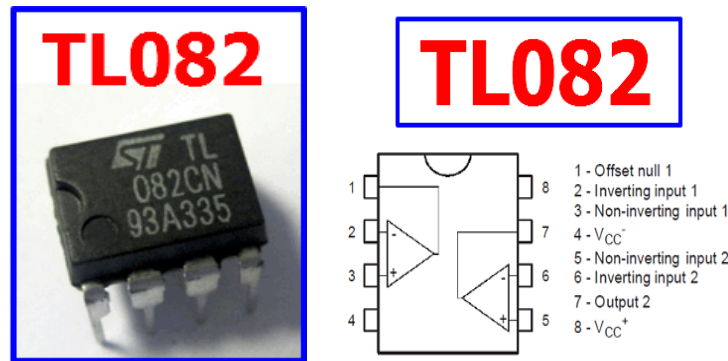


Figure 4.6 : Schéma interne de l'amplificateur opérationnel TL082

a) Bloc d'alimentation

Le circuit d'offset à base d'AOP nécessite une alimentation continue symétrique et stabilisée de (+12V, 0V, -12V), pour cette raison, nous avons utilisé un bloc d'alimentation d'un PC standard model ATX, qui a été placé à l'intérieur du Kit.

Brochage du connecteur sur la carte mère :

		Alimentation Type ATX					
		Couleur	Signal	Pin	Pin	Signal	Couleur
+3.3VDC	+3.3VDC	Orange	+3.3 V	1	11	+3.3 V	Orange
+3.3VDC	-12VDC	Orange	+3.3 V	2	12	+3.3 V sense	Brun.
COM	COM	Orange	+3.3 V	3	13	-12 V	Bleu
+5VDC	PS_ON#	Noir	Masse	4	14	Power on	Vert
+5VDC	COM	Rouge	+5 V	5	15	Masse	Noir
+5VDC	COM	Noir	Masse	6	16	Masse	Noir
PWR_OK	-5VDC	Rouge	+5 V	7	17	Masse	Noir
+5VSB	+5VDC	Noir	Masse	8	18	Réservé	N/C
+12VDC	+5VDC	Gris	Power good	9	19	+5 V	Rouge
		Violet	+5 V standby	10	20	+5 V	Rouge
		Jaune	+12 V				

Figure 4.7 : Présentation des tensions de bloc d'alimentation ATX

b) Schéma de circuit d'offset

Après plusieurs tests pratiques effectués sur le circuit d'offset, on a remarqué que le montage suiveur à base d'AOP est le plus efficace dans le maintien de la tension d'offset, il empêche la chute de cette dernière, par l'effet de variation de la tension d'impédance de montage en aval qui est en parallèle avec lui, et surtout pour les tensions négatives.

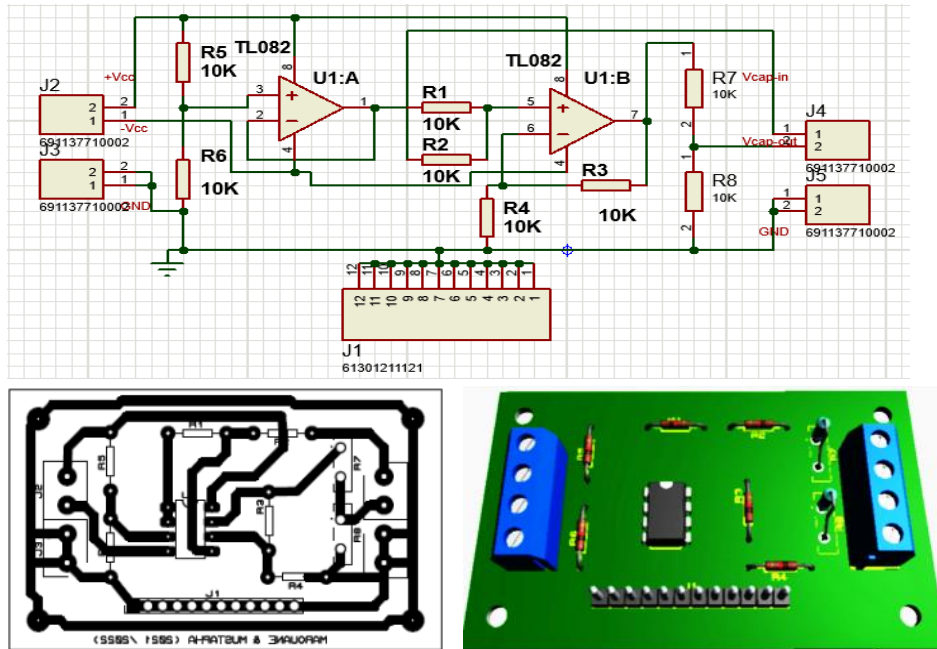


Figure 4.8 : Schéma de circuit d'offset et le montage réalisé

Après l'insertion du montage d'offset, le montage final de raccordements devient comme il est montré sur la Figure 4.9 :

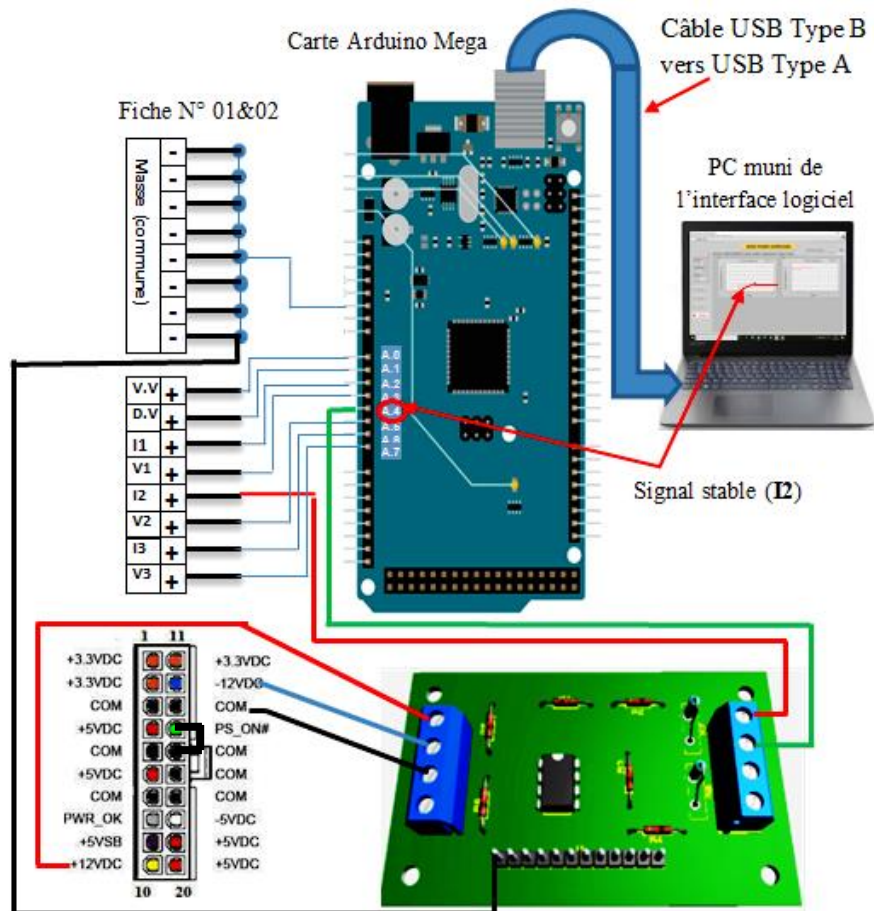


Figure 4.9 : Schéma de raccordement général de la carte Arduino avec le BANC d'essai

4.5 Conception de l'interface logicielle

4.5.1 Interface graphique du logiciel

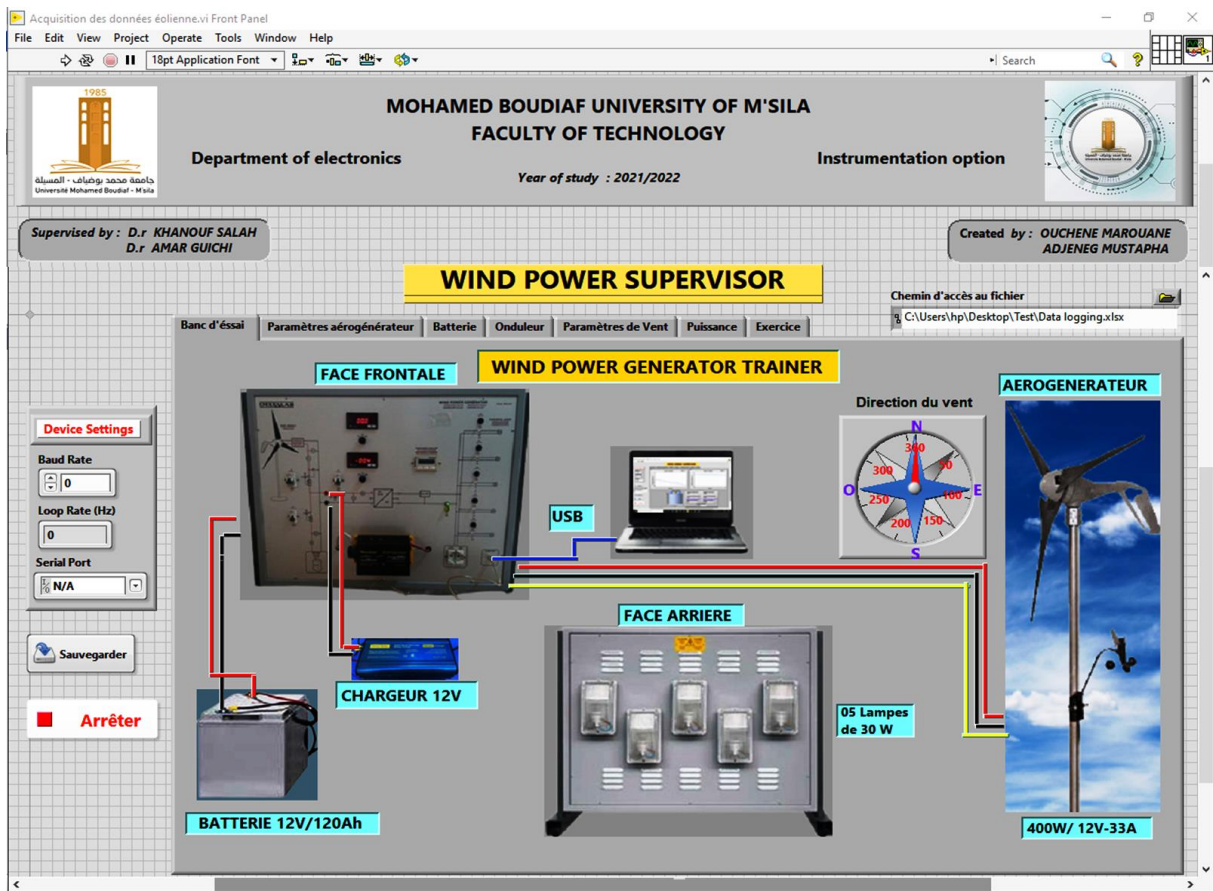


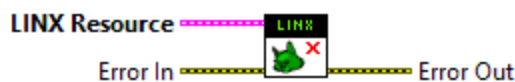
Figure 4.10 : Interfaçage logicielle

4.5.2 Principaux modules utilisés dans le programme

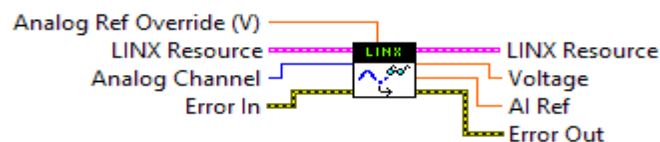
- a) Ouvrez une connexion série vers un périphérique LINX distant.



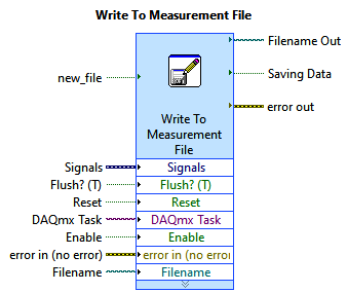
- b) Fermez la connexion au périphérique LINX distant et libérez toutes les ressources d'E/S locales.



- c) Lire la valeur de la voie d'entrée analogique spécifiée.



d) Ecrit des données dans des fichiers de mesure Microsoft Excel



4.5.3 Programme sous LabVIEW

Le programme en langage G de l'interface logicielle est montré dans la figure 4.20 :

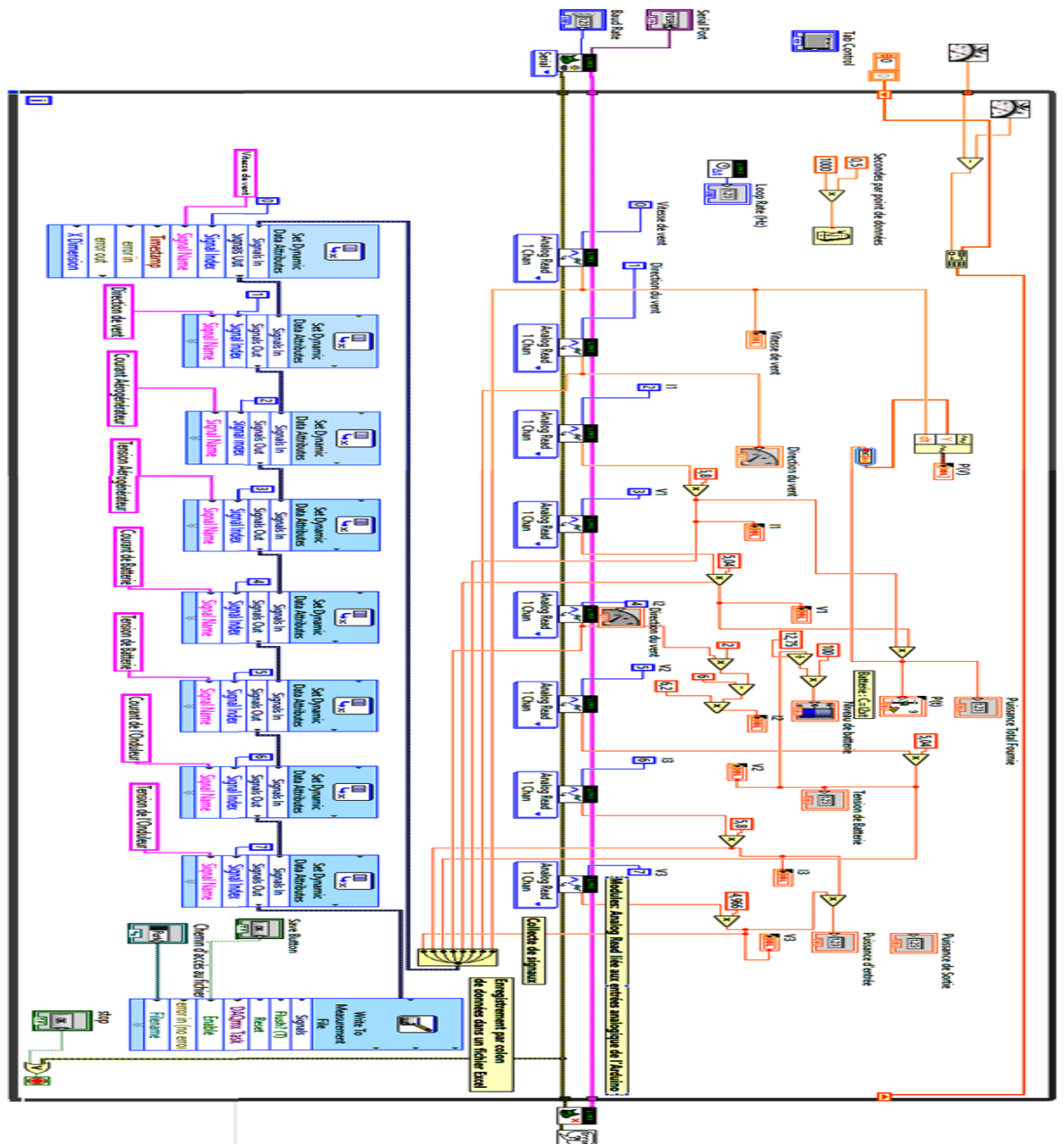


Figure 4.11 : Programme sous LabVIEW

4.5.4 Etalonnage des signaux d'entrées

Les signaux acquis sont des signaux issus des capteurs, qui sont toujours en basse tensions, donc, pour revenir aux valeurs réelles de ces signaux, il faut les multiplier par un coefficient d'ajustement, sauf pour le signal du courant **I2**, son étalonnage nécessite une fonction d'ajustement, car nous lui avons apporté des modifications, à savoir un offset et un diviseur, le tableau suivant montre les coefficients d'ajustement pour chaque signal.

Tableau 4.1: Coefficients d'étalonnage

Signal	Coefficient d'ajustement	Valeur correct du signal
I1	5,80	$I1 \times 5,800$
V1	5,040	$V1 \times 5,040$
V2	5,040	$V2 \times 5,040$
I3	5,800	$I3 \times 5,800$
V3	4,966	$V3 \times 4,966$

Pour étalonner I2, on a fait une expérience comparative, chaque fois on s'allume une lampe et on lit la valeur du courant I2 affichée dans le panneau de commande, ainsi que celle affichée au niveau de l'application logiciel, le coefficient d'étalonnage a été obtenu comme indiqué dans le tableau suivant :

Tableau 4.2: Coefficient d'étalonnage pour le courant I2

Signal	Nb lampes	Valeur sur panneau	Valeur sur logiciel	$I2 \times (\text{Valeur de logiciel}) - 6$	V.P/V.L	Coefficient = Valeur moyenne(V.P/V.L)
I2	1	-4,30	2,68	-0,64	6,718	$\cong 6,3$
	2	-8,05	2,38	-1,24	6,491	
	3	-12,50	2,02	-1,96	6,377	
	4	-16,60	1,66	-2,68	6,194	
	5	-20,60	1,33	-3,34	6,167	

Alors la valeur correcte du courant I2 est la valeur du courant I2 mesuré avec Arduino multiplié par le coefficient d'étalonnage (**6,3**), soit $I2 \times 6,3$.

4.6 Tests est résultats obtenus

Des tests expérimentaux ont été faits sur tous les paramètres de kit d'aérogénérateur, où les résultats obtenus ont été très satisfaisants.

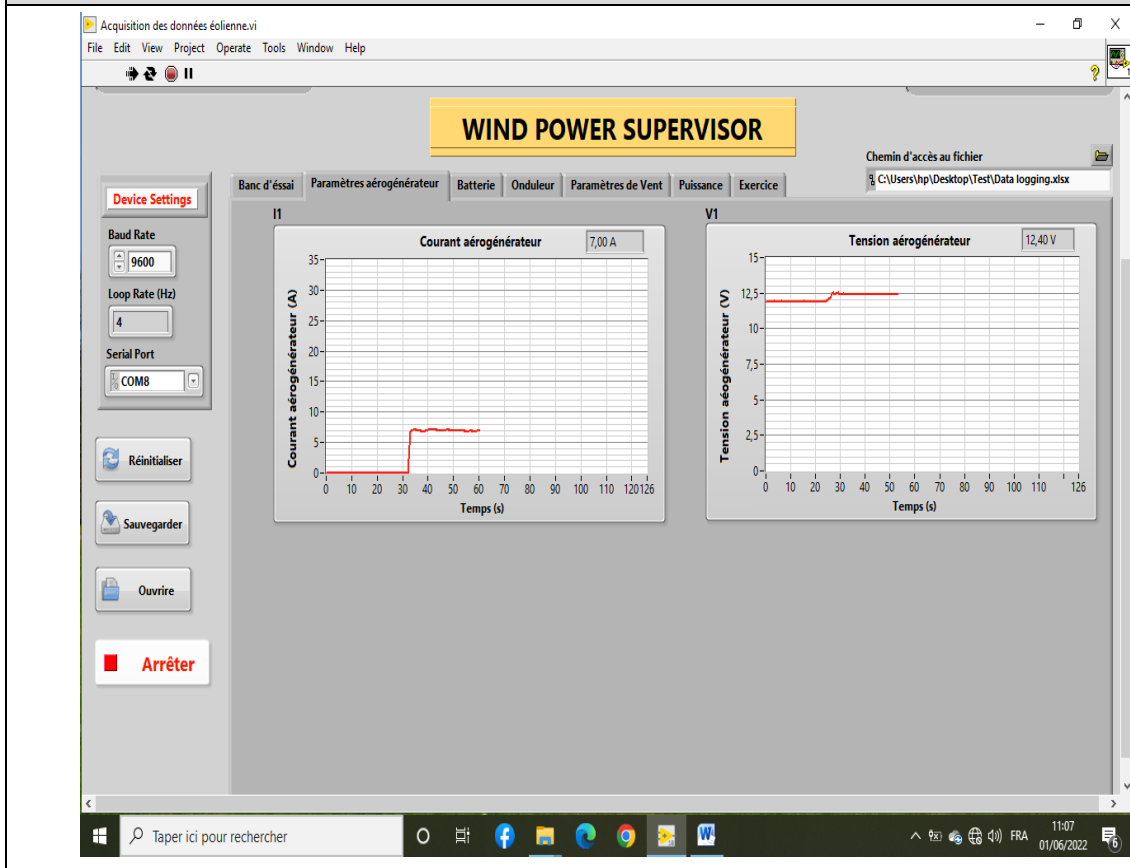
a) Courant et tension de l'aérogénérateur (V1/I1)

L'entraînement de l'aérogénérateur à l'aide d'une visseuse, il nous donne les résultats suivants:

Valeurs affichées sur le panneau (12,4V /7,1A)



Valeurs affichées sur logiciel (12,40V /7A)



b) Courant et tension de la Batterie (V2/I2)

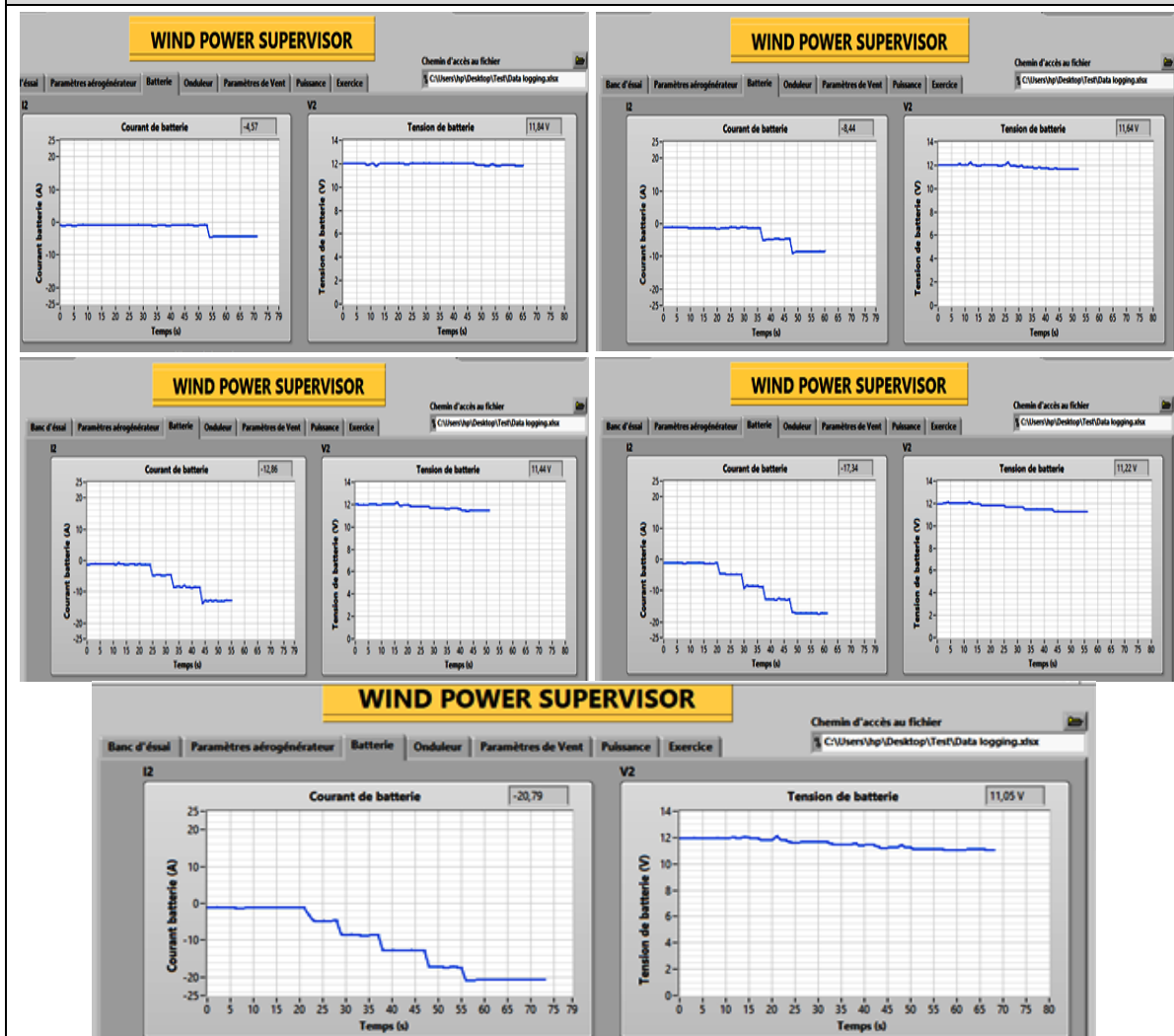
Pour chaque allumage d'une lampe, la lecture du courant et de la tension dans la batterie est affichée directement sur le panneau. Par la suite on compare les résultats de la mesure du panneau avec celle de l'interface logicielle, les résultats obtenus sont illustrés dans les figures suivantes:

Valeurs affichées sur le panneau



Valeurs affichées sur logiciel

(11,84V/-4,57A) (11,64V/-8,44A) (11,44V/-12,86A) (11,22V/-17,34A) (11,05V/-20,79A)



c) Courant et tension en amont de l'onduleur (V3/I3)

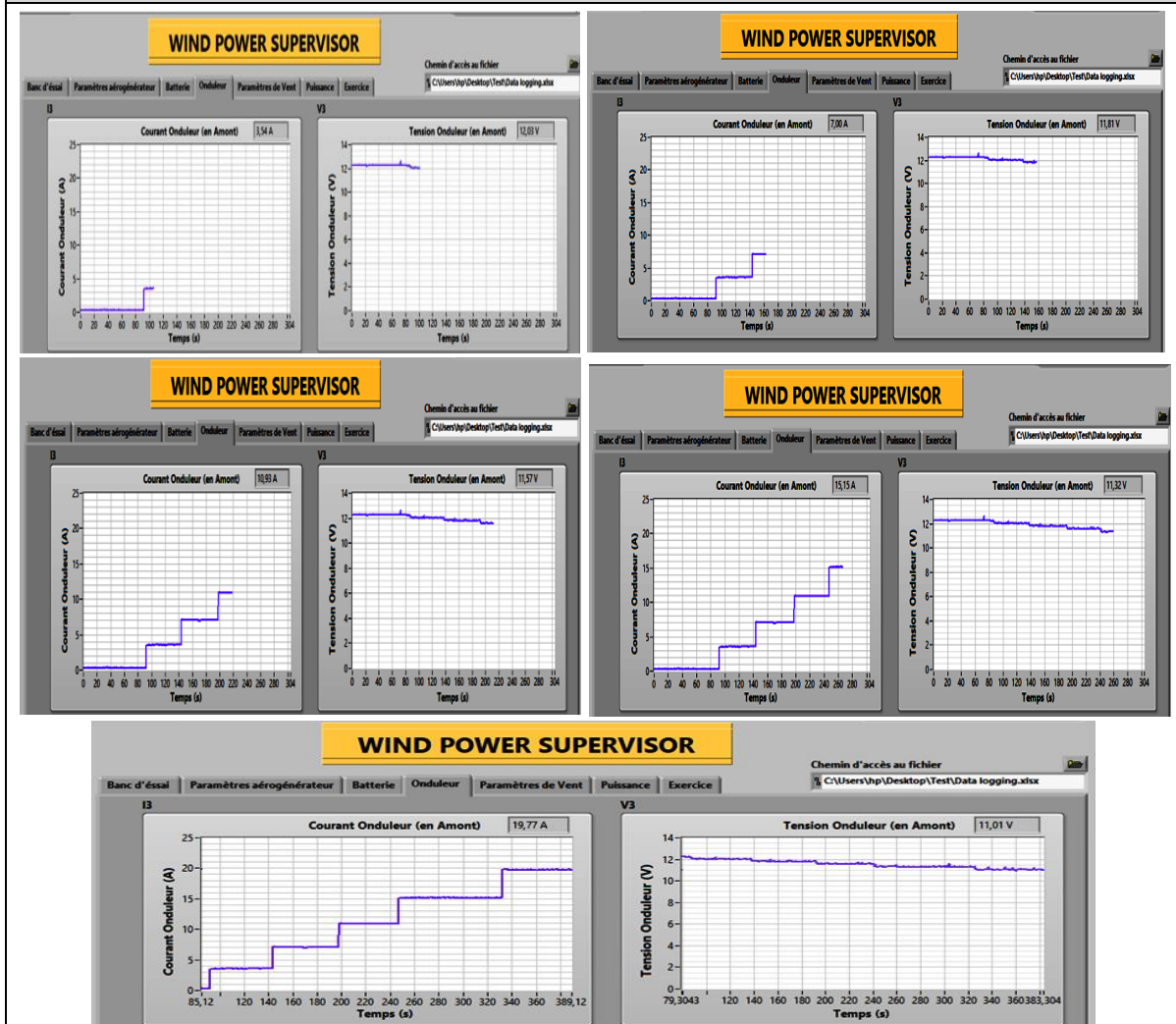
Pour chaque allumage d'une lampe, la lecture du courant et de la tension de l'onduleur est affichée directement sur le panneau. Par la suite on compare les résultats de la mesure du panneau avec celle de l'interface logicielle, les résultats obtenus sont illustrés dans les figures suivantes:

Valeurs affichées sur le panneau



Valeurs affichées sur logiciel

(12,03V /3,54A) (11,81V /7A) (10,93V /11,57A) (11,32V /15,15A) (11,01V /19,77A)



4.7 Sauvegarde des données

Le programme permet à l'utilisateur d'enregistrer les données acquises dans un fichier Excel pour un traitement ultérieur.

	A	B	C	D	E	F	G	H
	Vitesse de vent	Direction de vent	Courant Aérogénérateur	Tension Aérogénérateur	Courant de Batterie	Tension de Batterie	Courant de l'Onduleur	Tension de l'Onduleur
1	0,00	0,00	7,00	12,40	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	7,00	12,40	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	7,00	12,40	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	7,00	12,40	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	7,00	12,40	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	7,00	12,40	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	7,00	12,40	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	7,00	12,40	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	7,00	12,40	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	7,00	12,40	0,00	0,00	0,00	0,00
11	0,00	0,00	7,00	12,40	0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,00	0,00	7,00	12,40	0,00	0,00	0,00	0,00
13	0,00	0,00	7,00	12,40	0,00	0,00	0,00	0,00
14	0,00	0,00	7,00	12,40	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,00	0,00	7,00	12,40	0,00	0,00	0,00	0,00
16	0,00	0,00	7,00	12,40	0,00	0,00	0,00	0,00
17	0,00	0,00	7,00	12,40	0,00	0,00	0,00	0,00
18	0,00	0,00	7,00	12,40	0,00	0,00	0,00	0,00

	A	B	C	D	E	F	G	H
	Vitesse de vent	Direction de vent	Courant Aérogénérateur	Tension Aérogénérateur	Courant de Batterie	Tension de Batterie	Courant de l'Onduleur	Tension de l'Onduleur
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	-4,57	11,84	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	-4,57	11,84	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	-4,57	11,84	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	-8,44	11,64	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	-8,44	11,64	0,00	0,00
11	0,00	0,00	0,00	0,00	-8,44	11,64	0,00	0,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00	-12,86	11,44	0,00	0,00
13	0,00	0,00	0,00	0,00	-12,86	11,44	0,00	0,00
14	0,00	0,00	0,00	0,00	-12,86	11,44	0,00	0,00
15	0,00	0,00	0,00	0,00	-17,34	11,22	0,00	0,00
16	0,00	0,00	0,00	0,00	-17,34	11,22	0,00	0,00
17	0,00	0,00	0,00	0,00	-20,79	11,05	0,00	0,00
18	0,00	0,00	0,00	0,00	-20,79	11,05	0,00	0,00

	A	B	C	D	E	F	G	H
	Vitesse de vent	Direction de vent	Courant Aérogénérateur	Tension Aérogénérateur	Courant de Batterie	Tension de Batterie	Courant de l'Onduleur	Tension de l'Onduleur
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,54	12,03
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,54	12,03
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,54	12,03
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,00	11,81
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,00	11,81
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,00	11,81
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,57	10,93
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,57	10,93
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,57	10,93
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,15	11,32
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,15	11,32
16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,15	11,32
17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,77	11,01
18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,77	11,01

Figure 4. 12: Sauvegarde des données dans un fichier Excel

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué les différentes étapes d'acquisition des signaux issus des capteurs, ainsi les étapes de développement de l'interface graphique de supervision ensuite nous avons testé l'efficacité et la précision du fonctionnement de la chaîne complète, tout en comparant les résultats affichés par l'interface avec ceux affichés sur le kit.

Après les différents tests, on a conclu que l'étalonnage été très excellent, les résultats obtenus sont très satisfaisants et les données ont été bien enregistrées dans un fichier Excel.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

L'objectif de notre projet est de mettre en œuvre le kit didactique de l'aérogénérateur (Mod.WD/E.V), pour permettre aux étudiants de la faculté d'en bénéficier les résultats de cet objectif ont été obtenus avec succès, notre objectif a été atteint à travers la réalisation d'un système de supervision et d'acquisition de données, composé d'une interface logiciel développé à l'aide de l'environnement LabVIEW et d'une carte Arduino Mega2560 utilisé comme une carte d'acquisition.

La réalisation de ce projet nous a permis d'approfondir et d'améliorer nos connaissances et nos compétences dans les domaines de l'électronique ainsi que dans la programmation graphique.

Nous avons rassemblé des informations sur les dispositifs matériels et logiciels utilisés, en particulier la combinaison entre Arduino et LabVIEW.

Nous avons appris à mieux utiliser le langage de programmation Graphique de LabVIEW.

En effet, ce travail a été une expérience très fructueuse, bénéfique et enrichissant; il nous a permis d'exploiter les différentes notions théoriques vues durant notre période d'étude.

Il est à noter que nous nous sommes retrouvés face à de nombreux problèmes, au départ la mise en action du kit (problème de non chargement la Batterie), et puis la partie logicielle nous a pris beaucoup de temps.

Cependant, nous pouvons dire que malgré toutes difficultés rencontrées, les résultats obtenus de cette étude, qu'ils soient pratiques ou théoriques, sont satisfaisants. Nous souhaitons vivement que ce projet puisse servir comme élément de base pour d'autres études plus approfondies.

En perspective, nous pouvons signaler que ce kit peut être plus autonome et plus évolutif en utilisant les autres modes d'entraînement de l'aérogénérateur tel que le mode autonome et le mode d'émulation, par la réalisation d'un émulateur du vent basé sur la commande en vitesse d'un moteur asynchrone et en améliorant l'interface graphique développé.

Enfin, nous espérons que ce travail puisse servir comme clé pour motiver les promotions avenir vers l'exploitation des connaissances acquises au cours de leurs années d'études pour les appliquer au développement de nos propres kits didactique.

Bibliographie et webographie

- [1] J. Debry ; energie éolienne ; Franklin Institute ; 1985
- [2] Alois. Schaffarczyk ; Understanding wind power technology, theory, deployment and optimization, Wiley, 2014
- [3] Aérogénérateur-Mod.WG/EV-Manuel Théorique et de Fonctionnement Vol.1.3
- [4] Jean-Noël Montagné, "Initiation à la mise en œuvre matérielle et logicielle de l'Arduino" Centre de Ressources Art Sensitif novembre 2006.
- [5] S. Landrault, H Weisslinger «Arduino : Premiers pas en informatique embarquée» Mais 2022.
- [6] S.V.D.Reyvanth, G.Shirish, "PID controller using Arduino".
- [7] C. Tavernier, « Arduino applications avancées ». Version Dunod.
- [10] Programming Arduino with LabVIEW (reference: 1210115/ ISBN 978-1-84969-822-1)
Juin 2022

Site web :

- [15] <http://www.datasheetcafe.com/tl082-datasheet-jfet-dual-op-amp/> juin 2022
- [9] <https://www.mathworks.com/help/instrument/baudrate.html> Mais 2022
- [11] http://thierryperisse.free.fr/documents/labview/intro_labview_par_lunivesrite_de_bordeaux_1.pdf juin 2022
- [12] <https://www.ni.com/en-lb/support/documentation/> Juin 2022
- [13] <https://arduino.developpez.com/tutoriels/physique-computationnelle/?page=exemples-d-utilisation-de-la-carte-arduino-en-physique>
- [14] <https://www.elettronicaveneta.com/wp-content/uploads/2019/10/WINDTU-WINDTU2-28A-F-EE-0.pdf>. juin 2022
- [8] http://arduino.education/wp-content/uploads/2018/01/Arduino_cours.pdf Mais 2022

ملخص

يدخل هذا العمل في إطار وضع حيز الخدمة لجهاز محوّل طاقة الرياح (Mod. WG / EV) المتواجد على مستوى مخابر كلية التكنولوجيا. هذا التطبيق مخصص لتلقى ومعاينة الإشارات التماثلية (غير الرقمية) (التوتر، شدة التيار، اتجاه الرياح وسرعتها) القادمة من المستشعرات الموجودة داخل الجهاز. بعد وصف موجز للطاقات المتجددة، وتحديدًا طاقة الرياح، وكذا الوسائل والأجهزة المستخدمة لتصميم واجهة البرنامج؛ تم إجراء دراسة تفصيلية للمشروع. عند إجراء مقارنة بين العديد من بطاقات الإدخال المتوفرة في السوق، وقع اختيارنا على بطاقة أردوينو ميغا 2560 (Arduino Mega2560). تجدر الإشارة إلى أنّ الهدف العام لهذا المشروع هو تمكين طلبة الكلية من استغلال التجهيزات الموجودة على مستوى مخابر الكلية والإفادة منها على أحسن وجه، والتي من بينها جهاز محوّل طاقة الرياح. لأجل ذلك، تم إنشاء برنامج إدخال ومعاينة الإشارات باستخدام لافيو LabVIEW وقد أجريت العديد من اختبارات تجريبية للتحقق من التشغيل العادي للجهاز حيث كانت النتائج المتحصل عليها مرضية للغاية.

الكلمات المفتاحية: محوّل طاقة الرياح، بطاقة ارد وينو ميغا2560، إدخال ومعاينة، لافيو.

Abstract

This work is part of the implementation of the wind power generator equipment (Mod.WG/EV) that exist in the laboratories of the faculty of Technology. This application aimed to acquire and supervise the analogic signals (tension, current, wind speed and wind direction) collected by the sensors inside it. After a brief description of renewable energies, specifically wind energy, as well as the means and devices used to design the program interface; a detailed study of the project was carried out. Among many acquisition boards available in the market, we chose to use the Arduino Mega2560 board. It should be noted that the general objective of this project is to enable the students of the faculty to make the best use of the equipment available at the laboratories, including the wind power generator. For this, an acquisition and supervision program has been created using LabVIEW and several experimental tests were carried out to verify the normal operation of the equipment where the results obtained were very satisfactory.

Keywords: Wind power generator, Arduino Mega2560, Acquisition, Supervision, LabVIEW.

Résumé

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la mise en œuvre de l'aérogénérateur (Mod.WG/EV) existant dans les laboratoires de la faculté de Technologie. Cette application visait à acquérir et superviser les signaux analogiques (tension, courant, vitesse et direction du vent) collectés par les capteurs à l'intérieur de l'appareil. Après une brève description des énergies renouvelables, notamment l'énergie éolienne, ainsi que des moyens et dispositifs utilisés pour concevoir l'interface du programme ; une étude détaillée du projet a été réalisée. Parmi les nombreuses cartes d'acquisition disponibles sur le marché, nous avons choisi d'utiliser la carte Arduino Mega2560. Il est à noter que l'objectif général de ce projet est de permettre aux étudiants de la faculté d'utiliser au mieux les équipements disponibles aux laboratoires, dont cet aérogénérateur. Pour cela, un programme d'acquisition et de supervision a été créé sous LabVIEW et plusieurs tests expérimentaux ont été réalisés pour vérifier le fonctionnement normal de l'équipement où les résultats obtenus ont été très satisfaisants.

Mots-clés: Aérogénérateur, Arduino Mega2560, Acquisition, Supervision, LabVIEW.