

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الدكتور الطاهر مولاي سعيدة

Université Saida Dr Tahar Moulay –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Mémoire de fin d'étude présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

En : Électrotechnique

Spécialité : Réseaux Électriques

Par : KERROUM Fatima et MOUKADDEM Sara

Sujet

**Etude expérimentale d'un système hybride
éolien-photovoltaïque**

Soutenue publiquement en 25/06/2024 devant le jury composé de :

Mr. BOUMEDIENE Larbi	Pr	Univ. Saida	Président
Mme. KENNICHE Fatiha	Pr	Univ. Saida	Examineur
Mr. TERRAS Tahar	MCA	Univ. Saida	Rapporteur

Année universitaire 2023/2024

Remerciements

Notre reconnaissance et nos plus sincères remerciements à notre directeur et encadreur de mémoire Dr T.TERRAS pour nous avoir dirigé, encadré et même recarder par les précieux conseils qu'il nous a prodigué et surtout par ses orientations, sa disponibilité et ses encouragements tout le long de la réalisation de ce travail. Nos remerciements au département électrotechnique de l'université de Saida et à tous les enseignants qui nous enseignés durant les années du cursus. Nos remerciements sont également adressés aux membres de jury qui ont accepté de juger ce travail. Enfin nous remercions aussi toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin à la rédaction de ce travail, Nous vous remercions de la collection.

Dédicace

Je dédie cet ouvrage

À mon très cher père, Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse, je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, ta compréhension et Ton soutien qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui. Merci d'être toujours là papa.

À ma très chère mère, tu es la chose la plus précieuse au monde pour moi, Aucune dédicace ne peut exprimer tout mon amour et ma gratitude, merci pour ton encouragement, ton amour, ton soutien et tes sacrifices, merci d'être toujours à mes côtés Mama.

À mes très chères sœurs, À mon très cher frère, mes grands parents et Ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

À ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

À tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

À tous ceux que j'aime.

Merci !

M .Sara

Dédicace

Je dédie cet ouvrage

À mon très cher père, Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse, je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, ta compréhension et Ton soutien qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui. Merci d'être toujours là papa.

À ma très chère mère, tu es la chose la plus précieuse au monde pour moi, Aucune dédicace ne peut exprimer tout mon amour et ma gratitude, merci pour ton encouragement, ton amour, ton soutien et tes sacrifices, merci d'être toujours à mes côtés Mama.

À ma très chère sœur, À mes très chers frères, mes grands parents et Ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

À ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

À tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

À tous ceux que j'aime.

Merci !

K. Fatima

Résumé

L'énergie électrique provenant de sources renouvelables, en particulier le vent et le soleil, est considérée comme une alternative de production importante dans les systèmes d'énergie électrique du monde d'aujourd'hui. En effet, les systèmes hybrides éoliens et photovoltaïques ont connu un grand essor ces derniers temps dans les pays industrialisés et même dans quelques pays sous-développés, et sont devenus de plus en plus accessibles en terme de technologies et de coûts.

Une fois installés, ces systèmes ne dépendent d'aucune source ou réseau et présentent l'avantage de se trouver à proximité des sites de consommation telque :

- Maisons et chalets en régions isolés.
- Alimentation des villages (micro-réseaux)
- Exploitation agricoles (chauffage et alimentation de serre, pompage de l'eau ...etc.)
- Systèmes industriel : télécommunication (relais de télécommunication))

Le banc d'essais PMWGP/EV offre un système qui permet l'étude et l'expérimentation de la conversion de l'énergie du soleil en énergie électrique par effet photovoltaïque et de l'énergie éolienne en énergie électrique grâce à l'utilisation d'un aérogénérateur. La configuration du système est autonome (isolé du réseau électrique)

Sommaire

Résumé.

Liste des figures.

Liste des tableaux.

Notions et symboles.

1	Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur le système hybride éolien photovoltaïque		
I.1	Introduction	3
I.2	Généralités sur le système hybride	3
I. 2.1	Définition d'un système hybride.	3
I.2.2	Principaux composants d'un système d'énergie hybride	4
I.2.3.	Classification	4
I.2.3.1.	Le régime du fonctionnement	4
I.2.3.2.	La structure du système hybride	5
I.2.4.	Configuration du système hybride	6
I.2.4.1	Architecture série	6
I.2.4.1.1.	Configuration à bus à courant continu	6
I.2.4.1.2.	Configuration à bus à courant alternatif	7
I.2.4.2.	Architecture parallèle	8
I.2.5.	Présentation du système hybride photovoltaïque-éolien	8
I.2.6.	Système de conversion d'énergie hybride	8
I.2.7.	Avantages et inconvénients d'un système hybride	
I.3.	Descriptions des composantes du système hybride photovoltaïque-éolien	9
I.3.1.	Généralités sur le soleil	10
I.3.1.1.	Définition de l'énergie solaire	11
I.3.1.2.	Gisement solaire en Algérie	11
I.3.1.3	Energie solaire photovoltaïque	12
I.3.1.3.1.	Définition	12

I.3.1.3.2.	Historique	12
I.3.1.3.3.	Cellule photovoltaïque	13
I.3.1.3.4	Principe de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque	14
I.3.1.3.5.	Dopage du silicium	14
I.3.1.3.6.	La jonction P-N	16
I.3.1.3.7.	Les différents types de technologies de cellules photovoltaïques	16
I.3.1.3.8.	Architecture classique d'un module PV	19
I.3.1.3.9.	Avantages et inconvénients de l'énergie solaire.	20
I.3.1.3.10.	Présentation et modélisation du panneau solaire.	21
I.3.1.3.11.	Simulation sous l'environnement Matlab/ Simulink	24
I.3.1.3.12.	Interprétation des résultats	27
I. 3.2.	Généralités sur les systèmes éoliens	28
I.3.2.1	Introduction sur le système éolien	28
I.3.2.2.	Historique de l'éolienne	28
I.3.2.3.	Évolution du SCEE (Système de la Conversion de l'Energie Eolienne) en puissance	31
I.3.2.4.	Vision énergétique Algérienne	31
I.3.2.5.	Energie éolienne	32
I.3.2.6.	Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	33
I.3.2.7.	Les différents types d'éoliennes	34
I.3.2.7.1	Eoliennes A Axe Vertical	35
I.3.2.7.2	Eoliennes A Axe Horizontal	36
I.3.2.8.	Constitution d'une éolienne à horizontal.	38
I.3.2.9	.Principe de fonctionnement	41
I.3.2.10.	Etat de l'art des technologies utilisées et choisies dans le cadre de l'étude	42
I.3.2.10. 1.	Systèmes utilisant le générateur Asynchrone	42
I.3.2.10.2.	Systèmes utilisant une machine synchrone	43
I.3.2.11.	Modélisation du système éolien	45
I.3.2.11.1.	Modélisation du vent	45
I.3.2.11.2.	Modèle de la turbine	51
I.3.2.11. 3.	Modèle du multiplicateur	53
I.3.2.11.4.	Modèle de l'arbre	53

I.3.3.	Système du stockage	55
I.3.4.	Convertisseurs	55
I.3.5.	Charges.	56
I.4.	Conclusion	
Chapitre II : Description du banc didactique du système hybride		
II.1	Introduction	57
II.2	Description des composants principaux	61
II.2.1	Le panneau de commande du système hybride	61
II.2.2	Le panneau photovoltaïque de cellules au silicium	64
II.2.3	Le générateur éolien .	64
II.2.4	La batterie tampon	65
II.2.5	Le régulateur de charge	66
II.2.6	Onduleurs inverseurs GTI	67
II.2.7	Onduleurs	68
II.3	Conclusion	70
Chapitre III: Essai pratique		
III.1.	Introduction	71
III.2	Essais pratiques	71
III.2.1.1	Essai 1 : Analyse du comportement du système sans soleil ni vent et avec / sans charge électrique	71
III.2.1.2	Préparation de l'essai 1	71
III.2.1.3	Mesures et interprétation des résultats	72
III.2.2.1	Essai 2 :Analyse du comportement du système avec la lumière du soleil et sans charge électrique	73
III.2.2.2	Préparation de l'essai 2	73
III.2.2.3	Mesures et interprétation des résultats	74
III.2.3.1	Essai 3 : Analyse du comportement du système avec la lumière du soleil et charge électrique (PV alimentant la batterie et une charge électrique)	75
III.2.3.2	Préparation de l'essai 3	75
III.2.3.3	Mesures et interprétation des résultats	76
III.2.4.1	Essai 4 : Calcul du rendement du panneau photovoltaïque	77

III.2.4.2	Préparation de l'essai 4	77
III.2.4.3	Mesures et interprétation des résultats	77
III.2.5.1	Essai 5 : Calcul du rendement de l'onduleur	79
III.2.5.2	Préparation de l'essai 5	79
III.2.5.3	Mesures et interprétation des résultats	79
III.2.6.1	Essai 6 : Analyser le comportement du système éolien sans charge électrique	80
III.2.6.2	Préparation de l'essai 6	80
III.2.6.3	Mesures et interprétation des résultats	81
III.2.7.1	Essai 7 : Analyser le comportement du système éolien avec charge électrique	84
III.2.7.2	Préparation de l'essai 7	84
III.2.7.3	Mesures et interprétation des résultats	84
III.2.8.1	Essai 8 :Analyser le comportement du système hybride (éolien-PV) avec la lumière du soleil, vent et sans charge électrique	86
III.2.8.2	Préparation de l'essai 8.	86
III.2.8.3	Mesures et interprétation des résultats	87
III.2.9.1	Essai 9 :Analyser le comportement du système hybride avec charge électrique	88
III.2.9.2	Préparation de l'essai 9	88
III.2.10.1	Essai 10 :Tracer les courbes caractéristiques du panneau photovoltaïque	90
III.2.10.2	Préparation de l'essai 10	90
III.2.10.3	Mesures et interprétation des résultats	91
III.2.11.1	Essai 11 :Tracer les courbes caractéristiques du panneau photovoltaïque avec différentes valeurs de rayonnement solaire	93
III.2.11.2	Préparation de l'essai 11	93
III.2.11.3	Mesures et interprétation des résultats	93

III.2.12.1	Essai 12 : Tracer les courbes du rendement du panneau photovoltaïque	97
III.2.12.2	Préparation de l'essai 12	97
III.2.12.3	Mesures et interprétation des résultats	97
III.2.13.1	Essai 13 : Analyser le comportement du système connecté au réseau	102
III.2.13.2	Préparation de l'essai 13	102
III.2.13.2	Mesures et interprétation des résultats	103
III.2.14.1	Essai 14 : Analyser le comportement du système en variant l'inclinaison du panneau photovoltaïque	105
III.2.14.3	Mesures et interprétation des résultats	105
III.3	Conclusion	106
3	Conclusions générales	107

Références bibliographiques

Annexes

Liste des figures.

Figures chapitre I	N°	Page
Classification des systèmes hybrides	1	6
Configuration d'un système hybride à bus CC	2	7
Configuration d'un système hybride à bus CA	3	7
Configuration d'un système hybride à connexion parallèle	4	8
Schéma synoptique du système hybride étudié	5	9
Les deux types d'énergie solaire	6	11
Gisement solaire en Algérie	7	12
Cellule photovoltaïque	8	14
Dopage de type N	9	15
Dopage de type P	10	15
jonction PN	11	16
cellules en silicium monocristallin	12	17
cellules en silicium poly-cristallin	13	18
Cellule au Silicium amorphe (couche mince)	14	18
Association des cellules photovoltaïques en parallèles	15	19
Association des cellules photovoltaïques en séries	16	20
Association mixte « Série et Parallèle »	17	20
Modèle équivalent d'une cellule PV	18	22
modèle général d'un panneau photovoltaïque	19	24
Caractéristique I(V) pour deux niveaux d'éclairement(T=25°C)	20	25
Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement(T=25°C)	21	25
Caractéristique (I .V) pour différentes Températures et E=1000w/m ²	22	26

Caractéristique (P . V) pour différentes Températures et $E= 1000w/m^2$	23	26
Eolienne de Charles .F.Brush (Etats-Unis, 1888	24	29
Moulins à vent dans la région de La Mancha, Espagne	25	29
Capacité mondiale d'énergie éolienne et ajouts annuels, 2010-2020	26	30
Capacité de production d'énergie éolienne et ajouts, Top 10 pays, 2020.	27	30
Évolution de la taille des turbines éoliennes.	28	31
Parc éolien à Kabertene d'Adrar	29	32
Schéma fonctionnel du système de conversion éolienne	30	33
Différents types d'éoliennes. (I.30.a): axe horizontal – (I.30.b): axe	31	34
Les éoliennes à axe vertical	32	36
Turbine éolienne en amont et en aval	33	37
Principales composants de l'éolienne à axe horizontal	34	38
un mât d'une éolienne	35	39
un élément constitutif d'une éolienne, à savoir une pale et un moyeu	36	40
la nacelle d'une éolienne	37	41
Éolienne à base de machine asynchrone à cage d'écureuil	38	42
Systèmes éoliens basés sur la Machine Synchrone à Aimants Permanents	39	44
Système éolien à coût minimum basé sur GSAP	40	45
diagramme simulink du modèle du vent sous MATLAB/Simulink . (A) et (B).	41	47
Allure du profil du vent utilisé reproduit sous MATLAB(A)	42	47
Allure du profil du vent utilisé reproduit sous MATLAB.(B)	43	48
Variation de la vitesse du vent	44	48
Variation du coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse	45	50
variation de la puissance en fonction de la vitesse du vent	46	51
Coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative sous différents angles d'orientation des pales	47	52
Modèle mécanique simplifié de la turbine	48	54

Schéma bloc du modèle de toute la turbine éolienne	49	55
--	----	----

Figures chapitre II	N°	Page
image de banc didactique du système hybride	1	57
Instrument optionnels du banc d'essais du système hybride	2	59
Principe de fonctionnement	3	60
le détail des connexions électriques entre les différents composants du système (source logiciel LABVIEW RUN-time)	4	61
face avant le panneau de commande de l'équipement	5	62
Côté gauche du panneau de commande	6	63
Côté droit du panneau de commande	7	63
Le panneau photovoltaïque	8	64
le générateur éolien de	9	65
Batterie	10	66
Vis pour ajuster la tension de charge de la batterie	11	67
Onduleur réseau GT-INV/EV	12	68
Onduleur	13	68
le détail des connexions électriques entre les différents composants du système (source logiciel LABVIEW RUN-time)	14	69

Figures chapitre III	N°	Page
Image de préparation de l'essai 1	1	72
Image de préparation de l'essai 2	2	74
Image de préparation de l'essai 3	3	75
Variation du rendement du PV en fonction de la charge	4	79

Variation du rendement de l'onduleur en fonction de la puissance de charge	5	80
Image de préparation de l'essai 6	6	81
la variation de la vitesse via logiciel Lab-View	7	81
étapes de l'enregistrement du fichier data (Lab- View)	8	83
variation de la puissance de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent	9	84
Image de préparation de l'essai 8	10	86
Image de la manipulation de l'essai 10	11	90
Courbe caractéristique du courant fourni par rapport à la tension de sortie Rayonnement solaire = 900 W/m^2	12	92
Courbe caractéristique de la puissance électrique fournie par rapport à la Tension de sortie, Rayonnement solaire = 900 W/m^2	13	92
Courbe caractéristique du courant fourni par rapport à la tension de sortie Rayonnement solaire = 600 W/m^2	14	95
Courbe caractéristique de la puissance électrique fournie par rapport à la Tension de sortie, Rayonnement solaire = 600 W/m^2	15	95
Courbe caractéristique du courant fourni par rapport à la tension de sortie Courbe bleue: rayonnement solaire = 600 W / m^2 Courbe rouge: rayonnement solaire = 900 W / m^2	16	96
Courbe caractéristique de la puissance électrique fournie par rapport à la tension de sortie Courbe bleue: rayonnement solaire = 600 W/m^2 Courbe rouge: rayonnement solaire = 900 W/m^2	17	96
Courbe caractéristique du rendement en fonction de la tension de sortie Rayonnement solaire = 900 W/m^2	18	99
Courbe caractéristique du rendement par rapport à la tension de sortie Rayonnement solaire = 600 W/m^2	19	101
Courbe caractéristique du rendement par rapport à la tension de sortie Courbe bleue: rayonnement solaire = 900 W/m^2 , Courbe rouge: rayonnement solaire = 600 W/m^2	20	102
Connexion entre onduleur, panneau photovoltaïque et réseau	21	103
ajouter des données d'onduleur GT-INV/EV	22	104

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II.1	Spécifications électriques du panneau photovoltaïque dans la conduction STC
---------------------	---

Chapitre III

Tableau III.1	Tableau de mesures de l'essai 1
Tableau III.2	Tableau de mesures de l'essai 2
Tableau III.3	Tableau de mesures de l'essai 3
Tableau III.4	Tableau de mesures de l'essai 4
Tableau III.5	Tableau de mesures de l'essai 5
Tableau III.6	Tableau de mesures de l'essai 6
Tableau III.7	Tableau de mesures de l'essai 7
Tableau III.8	Tableau de mesures de l'essai 8
Tableau III.9	Tableau de mesures de l'essai 9
Tableau III.10	Tableau de mesures de l'essai 10
Tableau III.11	Tableau de mesures de l'essai 11
Tableau III.12	Tableau de mesures de l'essai 12
Tableau III.13	Tableau de mesures de l'essai 12
Tableau III.14	Tableau de mesures de l'essai 13
Tableau III.15	Tableau de mesures de l'essai 14

Liste des tableaux

Notations et symboles

PV : panneau photovoltaïque

WT: wind turbine

CC: courant continue

AC: courant alternative

DC: direct current

SHE: Système d'Energie Hybride

N: négatif

P: positive

I_{CC} : courant de court-circuit parallèle

V_{PCO}: tension de circuit ouvert parallèle

N_P : nombre de cellules parallèle

I_{CC}: courant de court-circuit

V_{CO} : tension de court-circuit

I_{SC} : courant de court-circuit séries

V_{SCO} : tension de circuit ouvert séries

N_s : nombre de cellules séries

MPPT: maximum point power tracker

STC: standard test conditions

E: Rayonnement Solaire

T: température

G: irradiation

I_{ph}: est un courant généré par la lumière ou le photo courant.

I_p: courant qui circule dans la résistance parallèle, est donnée par l'équation suivante

I_s : est le courant de saturation inverse en ampère (A)

q: charge d'électrons ($1,6 \times 10^{-19}$ C)

k: constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J / K)

T_c: est une température de cellule en Kelvin (K)

A: est un facteur idéal

R_s: est une résistance série (Ω)

I_{sc}: est le courant de court-circuit de la cellule à 25 ° C et 1000W / m²,

K_i: le coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule,

T_{ref}: est la température de référence de la cellule, en Kelvin (K) (= 25C ° + 273),

G: est l'ensoleillement en watt /mètre carré (W / m^2),

G_{ref}: est l'insolation de référence de la cellule ($= 1000W / m^2$),

I_{rs}: le courant de saturation inverse de la cellule à une température de référence et un rayonnement solaire

E_g: est l'énergie de gap du semi-conducteur utilisé dans la cellule en électronvolt (eV)

N_s: nombre des cellules en série d'un module PV

I_{sc}: est le courant de court-circuit

V_{oc}: est la tension en circuit ouvert

A: La valeur moyenne de la vitesse du vent

a_k: Amplitude de l'harmonique de l'ordre

ω: Pulsation de l'harmonique de l'ordre

i: Le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent

ρ : Masse volumique de l'air $\rho = 1.22 kg / m^3$

S : Surface circulaire balayée par la turbine ; $S = \pi.R^2$

R : Correspond pratiquement à la longueur de la pale

P_m: La puissance extraite par le rotor en (W)

m_t: Est la masse par seconde (Kg/s)

V₁ : La vitesse avant le passage à travers le plan de rotor en (m/s)

V₂: La vitesse après le passage à travers le plan de rotor en (m/s)

R : Rayon des pales [m],

λ : Vitesse relative de la turbine,

β : Angle d'orientation des pales [°],

Ω_t: Vitesse de rotation de la turbine [rad/s].

G: Rapport de multiplication.

C_g: Couple mécanique adaptant la vitesse de la turbine à celle du générateur ainsi

W_p: Puissance nominale

I_{sc} : Intensité de court-circuit

V_{oc} : Tension de circuit ouvert

V_m : Tension à puissance maxi

I_m : Intensité à puissance maxi

GWEC: Global Wind Energy Council

HAWT: horizontal axis wind turbine

MADA: machine asynchrone à double stator

GSAP: générateur synchrone à aimants permanent

MLI: modulation de largeur d'impulsion

V: vitesse moyenne du vent traversant le rotor

P_{mt}: puissance totale d'un flux d'air non perturbé en watts

C_p: coefficient de puissance

J: inertie total

J_g: inertie de la génératrice

Ω_g: vitesse mécanique

C_{méc}: couple mécanique appliqué au rotor de la génératrice

C_{em}: le couple électromagnétique produit par la génératrice

C_f: le couple de frottement visqueuse

PWM: pules width modulation

LED: light emitting diode

BATT: batteries

INV: onduleur

LOAD: signifie "charge" en français

WG: àéro générateur

GRID: réseau électrique

P_{INV}: puissance d'onduleur

P_s: puissance solaire incidente

S: surface du panneau

η: rendement

P_u : puissance électrique fournie par le panneau

P_{LOAD} : puissance des charge

Introduction générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis le début du siècle, la consommation énergétique mondiale est en très forte croissance dans toutes les régions du monde. Il semble que tendanciellement, les consommations d'énergie vont continuer à augmenter, sous l'effet de la croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant d'autre part, quels que soient les cas de figures envisagés. Les chercheurs du monde entier s'efforcent de changer les anciennes visions de la production d'électricité, en appelant à l'utilisation de sources d'énergie renouvelables, notamment l'énergie solaire et éolienne. Dans ce contexte, ces sources d'énergie sont nécessaires pour remplacer les autres ressources fossiles et l'énergie nucléaire pour répondre aux besoins actuels. En effet, leur utilisation constitue une solution inépuisable et non polluante, idéale pour une production décentralisée.

À cette fin, les chercheurs estiment que les sources d'énergie renouvelables, telles que la biomasse, la géothermie, l'éolien, le solaire, etc., apportent des solutions appropriées pour répondre aux besoins énergétiques en réduisant les émissions de gaz provenant des sources d'énergie fossiles.

Cette source d'énergie renouvelable se caractérise par sa flexibilité, sa facilité d'utilisation et sa diversité de domaines d'activité. Cependant, l'utilisation de ces sources d'énergie est limitée par la variabilité des ressources et la nécessité d'un investissement initial assez conséquent pour des rendements qui fluctuent en fonction de la zone d'installation, de la saison, voire des aléas climatiques ce qui réduit leur fiabilité. Pour pallier cette lacune, les chercheurs ont approuvé l'utilisation de systèmes hybrides.

Actuellement, plusieurs stations ont vit le jour, comme ce système hybride d'un coût de 5 millions de dollars installé en 2019, à Pélican Rapids dans l'ouest du Minnesota aux États-Unis.

La Tour de la Rivière des Perles à Guangzhou, en Chine, combine des panneaux solaires sur ses fenêtres et plusieurs éoliennes à différents étages de sa structure. Avec l'appoint de micro-turbines à gaz, Dans plusieurs régions de Chine et d'Inde, sont installés des pylônes d'éclairage combinant panneaux solaires et éoliennes à leur sommet.

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement de l'utilisation de l'énergie solaire et éolienne. Notre pays dispose de l'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). Quant à la puissance éolienne, elle varie d'une région à une

autre. Ceci est principalement dû à la topographie et au climat très diversifiés essentiellement dans le Sud-ouest, avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar [1].

Dans ce contexte, nous nous intéressons à l'étude et l'expérimentation d'un système hybride éolien-photovoltaïque à cause de la disponibilité d'un banc d'essais dans notre laboratoire des réseaux électriques. Ce banc combine deux sources d'énergie renouvelable, à savoir un panneau photovoltaïque pour convertir l'énergie du soleil et un générateur éolien entraîné par un dispositif spécifique pour simuler l'effet du vent. En plus d'une source réserve de stockage (Batterie). Ce système hybride éolien photovoltaïque simule l'alimentation en énergie électrique des zones isolées.

Et pour se faire, notre projet sera subdivisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la définition du système hybride utilisé (Eolien-photovoltaïque) , en commençant par le système solaire photovoltaïque et en finissant par le système éolien , une description un peu détaillé de leurs éléments constitutifs est présentée, leurs principes de fonctionnement illustré avec une modélisation d'une cellule photovoltaïque et la partie mécanique du système éolien. Enfin, une simulation sous MATLAB/Simulink est nécessaire pour simuler quelques caractéristiques intéressantes

Le second chapitre porte sur la description du banc didactique du système hybride éolien-photovoltaïque en se basant sur la documentation délivrée par son fournisseur « *Electronica Veneta* »

Enfin, le dernier chapitre sera consacré à la description des manipulations réalisées sur notre banc d'essais tout en interprétant les résultats trouvés.

Ce mémoire sera clôturée par une conclusion générale

Chapitre I :

Généralités sur le système
hybride

éolien-photovoltaïque

I.1 Introduction :

Afin de changer la vision ancienne dans la production de l'électricité, les chercheurs appellent aux ressources d'énergies renouvelables (photovoltaïque, éolien, etc.). Cependant, ces dernières présentent un inconvénient commun par leur caractère aléatoire et la dépendance des conditions météorologiques et climatiques qui changent avec le temps.

Pour cela les systèmes hybrides combinés entre plusieurs formes d'énergie font l'axe principal de plusieurs travaux de recherches essentiellement pour les sites éloignés du réseau électrique.

Dans ce chapitre, nous exposerons deux types d'énergies renouvelables à savoir l'énergie éolienne et l'énergie solaire photovoltaïque, en exploitant un banc d'essai disponible au niveau de notre laboratoire des réseaux électriques ; en commençant par la définition du système hybride ainsi que ses différents composants. Ensuite, nous donnerons les différentes architectures des systèmes hybrides, à savoir l'architecture série et parallèle.[1]

I.2 Généralités sur le système hybride :

Le terme «Système d'Energie Hybride »fait référence aux systèmes de génération d'énergie électrique multi-sources. Il s'agit de systèmes complexes associant différentes sources renouvelables ou bien combinées avec des sources conventionnelles (générateur diesel...), différents éléments de stockage et différentes charges. Ils permettent la compensation du caractère intermittent des sources renouvelables et offrent un rendement énergétique global plus élevé.

Le système hybride de production de l'énergie dans sa vue la plus générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles facilement mobilisables. Le système qui nous intéresse regroupe deux parties pour la production de l'énergie.

Les systèmes d'énergie hybrides peuvent être connectés aux réseaux électriques ou autonomes, pour le premier cas La production énergétique hybride est alors centralisée et mise en réseau entre plusieurs sites de production et de consommation. La connexion des sources hybrides aux réseaux électriques doit respecter certaines normes qui ne sont pas forcément spécifiques au domaine d'énergies renouvelables.

Dans les sites isolés où le réseau n'existe pas, il est donc pratique et dans la majorité des cas d'associer un élément de stockage de type accumulateur électrochimique ou hydrogène au système.[1]

I.2.1 Définition d'un système hybride :

Qu'est-ce qu'un système hybride d'énergie?

De façon générale, un système hybride d'énergie est un système qui combine différents systèmes de production. Par exemple, la combinaison éolien-diesel est un système hybride d'énergie. De nos jours, les systèmes hybrides d'énergie associent au moins deux technologies complémentaires : une ou plusieurs sources d'énergie classiques, généralement des générateurs au diesel, et au moins une source d'énergie renouvelable.

Les systèmes hybrides d'énergie sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées. Les systèmes hybrides à énergies renouvelables sont fiables, sans pollution et permettent de répondre à la demande d'énergie sur de longues périodes.[1]

I.2.2 Principaux composants d'un système d'énergie hybride:

- Les systèmes hybrides sont généralement composés de
- Un système générateur (photovoltaïque ; éolien ; groupe diesel...etc.).
- Un système de régulation.
- Un système de stockage.
- Des équipements de puissance.
- Des équipements de protection.
- Une charge.

Le système générateur est composé de deux ou plusieurs sources de nature différentes.

Il est indispensable que les deux fonctionnent à la même tension nominale. La régulation doit agir pour faire fonctionner les deux systèmes à la même tension et on a un point optimal pour la charge des batteries.[3]

I.2.3. Classification :

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi. Dans la suite sont présentées les classifications les plus répandues (figure I.1)

I.2.3.1. Le régime du fonctionnement :

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, on trouve les systèmes hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectés au réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique. Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique : refuges de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière etc...

I.2.3.2. Le contenu du système hybride :

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système.

- Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complet – une centrale tout entière.
- Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, etc....
- La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimenté. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle etc...[2]

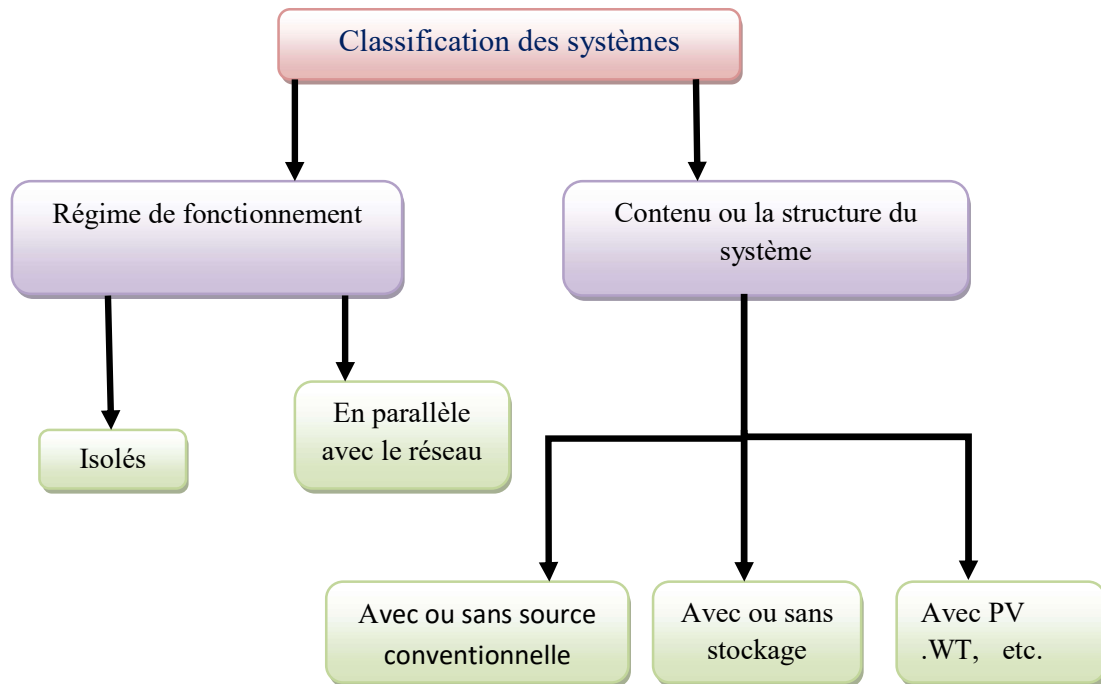


Figure I.1 : Classification des systèmes hybrides.

I.2.4. Configuration du système hybride :

Il existe différentes topologies de systèmes hybrides selon le couplage de générateurs d'énergie renouvelable. On peut distinguer deux structures parmi d'autres, à savoir : l'architecture série et l'architecture parallèle.[1]

I.2.4.1 Architecture série :

I.2.4.1.1. Configuration à bus à courant continu :

Dans le cas d'une architecture série, toutes les sources sont connectées à un même bus à courant continu (CC) comme l'indique la figure (I.2). Pour cette architecture, les tensions délivrées par les modules à courant alternatif (générateur éolien et groupe Diesel) sont redressées en tension continue grâce à des convertisseurs AC/DC. La charge est alors alimentée par un onduleur (convertisseur DC/AC).

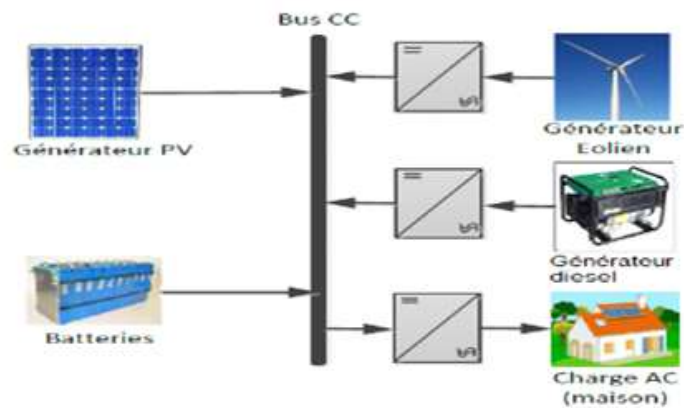


Figure I.2 : Configuration d'un système hybride à bus CC.

1.2.4.1.2. Configuration à bus à courant alternatif :

L'architecture à bus à courant alternatif (CA) s'est développée grâce à l'émergence de l'électronique de puissance et de l'apparition des onduleurs plus performants. Cette architecture dispose d'un seul bus CA sur lequel sont connectés tous les modules du système hybride (figure I.3)

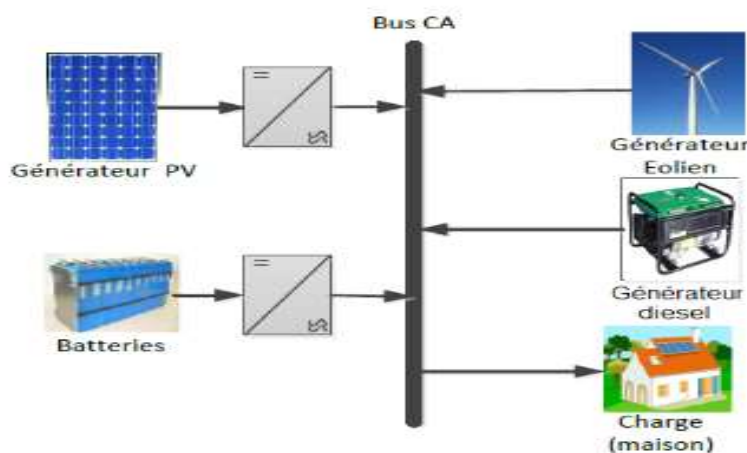


Figure I.3 : Configuration d'un système hybride à bus CA.

Le choix de cette structure est judicieux car celle-ci fournit directement une tension alternative et assure continuellement l'alimentation de la charge. Le groupe électrogène démarre automatiquement dès qu'un manque de puissance apparaît au niveau du bus. Néanmoins, l'inconvénient réside dans la difficulté d'imposer la fréquence et l'amplitude de la tension du bus..[1]

I.2.4.2. Architecture parallèle :

La configuration parallèle (mixte) utilise deux bus : un bus CC où sont connectées les sources à courant continu (batterie et panneaux PV), et un bus CA sur lequel sont connectés l'éolienne, le groupe diesel et la charge (maison). Les deux bus sont reliés à l'aide d'un convertisseur bidirectionnel. Le convertisseur bidirectionnel travaille soit en mode redresseur lorsque le générateur diesel couvre complètement la demande de la charge et participe à charger la batterie, soit en mode onduleur lorsque la charge est alimentée par les panneaux et/ou les batteries. De cette façon, la charge peut être alimentée par les deux bus simultanément. L'architecture d'un tel système est représentée (figure I.4).[1]

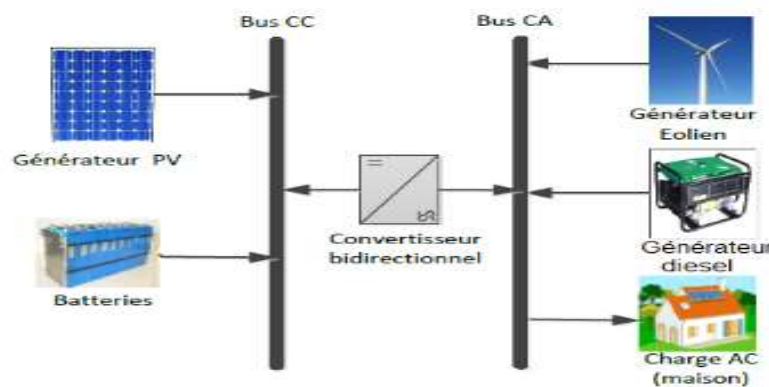


Figure I.4: Configuration d'un système hybride à connexion parallèle

I.2.5. Présentation du système hybride photovoltaïque-éolien :

Dans notre cas précis, on s'intéresse aux systèmes de petites puissances qui regroupent deux parties à savoir l'éolienne et les panneaux solaires. Ces deux sources de production de l'énergie passent par un stockage électrochimique (Figure I.5), et produisent du courant continu facilement convertible en courant alternatif, grâce à l'intégration d'un onduleur autonome dans le circuit. En couplant ces systèmes et en les associant à un dispositif de stockage de l'énergie, nous aurons alors les avantages suivants :

- Exploitation du système sans interruption;
- Possibilité de préserver le surplus d'énergie produite par ce système;
- Sécurité d'approvisionnement quelles que soient les conditions météorologiques.[3]

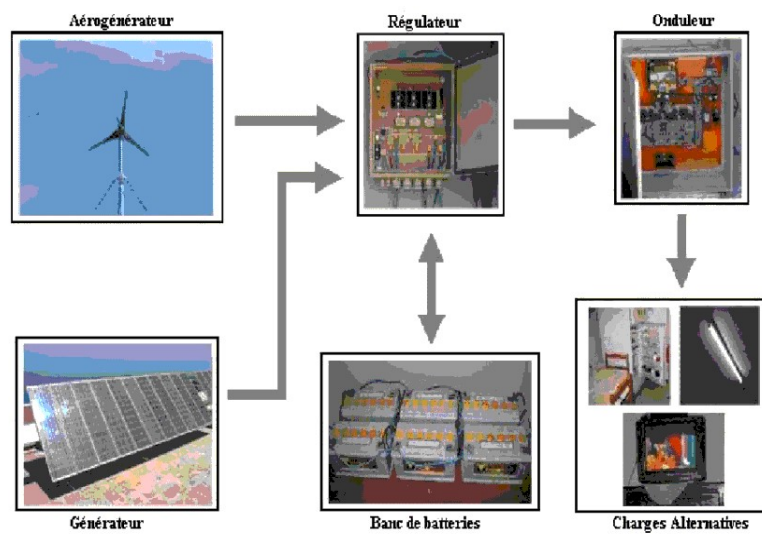


Figure I .5: Schéma synoptique du système hybride étudié.

I.2.6. Avantages et inconvénients d'un système hybride :

L'intérêt essentiel d'utiliser les technologies d'hybridation est d'assurer l'énergie demandée par la charge sans interruption et, si possible, de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable :

De plus, les technologies d'hybridation permettent de

- Lisser la puissance délivrée par les sources d'énergies : il s'agit d'être capable, de délivrer régulièrement des puissances supérieures à la puissance moyenne du générateur électrique ou de récupérer de l'énergie pour recharger la source de puissance.
- Palier pendant une durée limitée à l'incapacité partielle ou totale de la source d'énergie. Par exemple, si on prend le système hybride PV-Eolien qui est souvent utilisé, on remarque que le système PV fournit l'énergie pendant le jour où le rayonnement solaire est plus fort, par contre, le système éolien produit l'énergie dans la nuit où le vent peut souffler. De même, le vent souffle plus pendant l'hiver et l'automne et il diminue au printemps tandis que le rayonnement solaire le plus intense se situe pendant l'été. Cette complémentarité journalière et saisonnière des ressources solaires et éoliennes permet par exemple au site isolé d'avoir une disponibilité de l'énergie plus fiable. Néanmoins, les technologies l'hybridation posent **certains problèmes** :

- La nature stochastique des sources d'énergie renouvelable : la difficulté principale des SEH comportant ce type de sources est de pouvoir produire à chaque instant l'énergie demandée par la

charge.

- Le problème de l'interconnexion de plusieurs sources complique le système de contrôle : les technologies d'hybridation sont très complexes comparativement à l'utilisation d'une seule source.
- Le problème de la gestion énergétique : il est nécessaire de trouver un algorithme de contrôle efficace afin d'améliorer les performances globales du système.
- La dynamique des générateurs d'énergie renouvelable peut causer des problèmes dans le fonctionnement des SEH : par exemple le démarrage d'une éolienne quand la vitesse du vent est élevée, dans ce cas la puissance produite par l'éolienne atteint presque instantanément la puissance nominale du générateur, en effet la production de l'énergie électrique peut connaître des changements rapides, il en résulte des problèmes de qualité d'énergie (variations de tension et de fréquence) qui peuvent détruire des appareils électroniques sensibles et même l'arrêt complet du système.
- La durée de vie des composants d'un SEH peut être beaucoup plus courte que la durée de vie des composants individuels. [4]

I.3. Descriptions des composantes du système hybride photovoltaïque-éolien:

Dans ce qui suit, nous donnons une description un peu détaillée sur les deux systèmes choisis en commençant par le système photovoltaïque

I.3.1. Généralités sur le soleil :

Le soleil est une sphère avec une matière extrêmement chaude et gazeuse avec un diamètre de $1,39.10^9 m$, et est à distance moyenne de $1,49.10^{11} m$ de la terre. Comme vu de la terre, le soleil tourne autour de son axe une fois toutes les quatre semaines, cependant il ne tourne pas comme un corps solide; une rotation est faite en 27 jours à l'équateur et en 30 jours aux régions polaires. Il est considéré comme un corps noir avec une température effective de $5800^\circ K$, et rayonne principalement dans le visible et le proche d'infrarouge (de 300 nm à 1200 nm) avec un maximum aux environs de 500 nm.

Cette énergie est produite par les réactions de fusion dans le soleil et est filtrée par l'atmosphère. Le rayonnement solaire apporte sur terre une énergie de 2000 à 2500 Kwh/m² par an, ce qui est supérieur à la totalité des ressources fossiles jamais découvertes (Figure I.6).

La quantité d'énergie exploitable de ces ressources malheureusement "non renouvelables" ne représente que 0,5% de ce que nous recevons chaque année par rayonnement solaire [5].

1.3.1.1. Définition de l'énergie solaire :

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des énergies renouvelables, mais elle est très atténuée.

Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteur photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique (Figure I.6). [5]

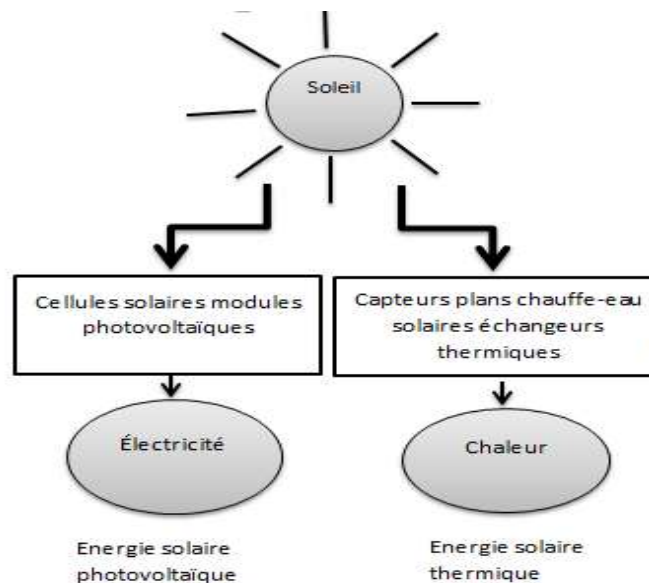


Figure. I.6: Les deux types d'énergie solaire.

1.3.1.2. Gisement solaire en Algérie :

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire.

Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique.

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde comme le montre la figure I.8.

La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une

surface horizontale de 1 m^2 est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/ m^2 /an au Nord et 2263 kwh/ m^2 /an au Sud du pays, Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWH.[6]

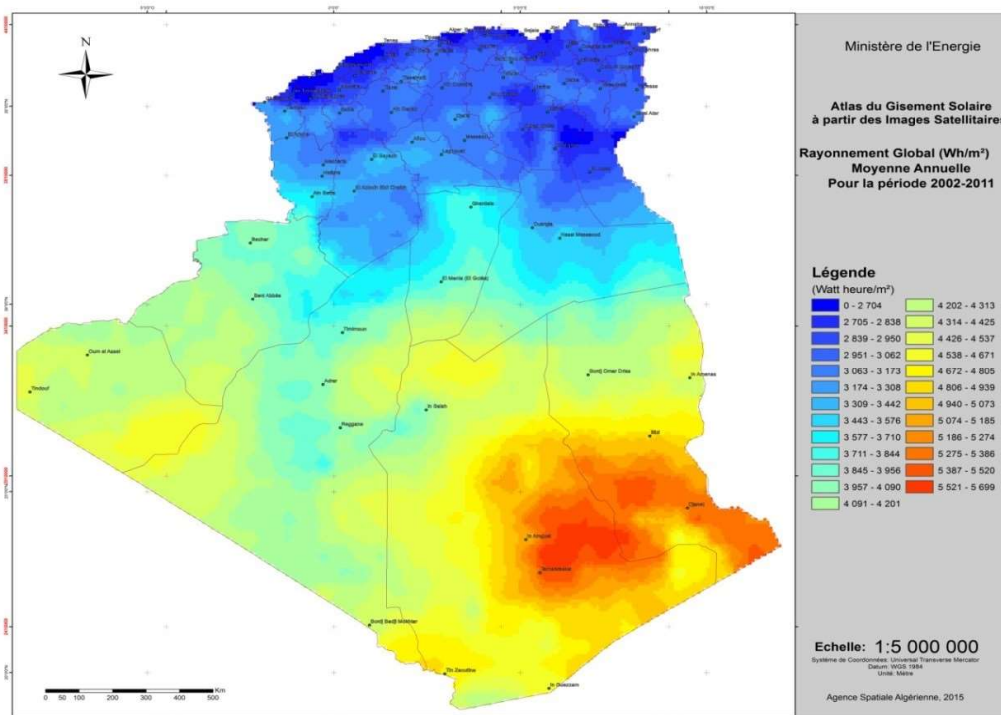


Figure I.7 : Gisement solaire en Algérie

I.3.1.3.Énergie solaire photovoltaïque

I.3.1.3.1.Définition

Le terme photovoltaïque est formé à partir de deux mots : « Phos » signifie lumière et « Volta », du nom du physicien Alessandro Volta (1745- 1827, inventeur de la pile électrique)..[7]

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable qui produit de l'électricité par la transformation du rayonnement solaire grâce à une cellule photovoltaïque. Plusieurs de ces cellules sont reliées entre-elles sur un panneau photovoltaïque..[8]

L'ensemble de panneaux photovoltaïques interconnectés forme un générateur photovoltaïque Celui-ci convertit la radiation solaire incidente en puissance électrique..[9]

I.3.1.3.2.Historique :

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite l'Université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.[10]

1.3.1.3.3. Cellule photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par le physicien français Becquerel. Un panneau solaire fonctionne par l'effet photovoltaïque c'est-à-dire par la création d'une force électromotrice liée à l'absorption d'énergie lumineuse dans un solide

C'est le seul moyen connu actuellement pour convertir directement la lumière en électricité.

La cellule photovoltaïque constitue l'élément de base des panneaux solaires photovoltaïques.

Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur à base de silicium délivrant une tension de l'ordre de 0,5 à 0,6 V.[11]

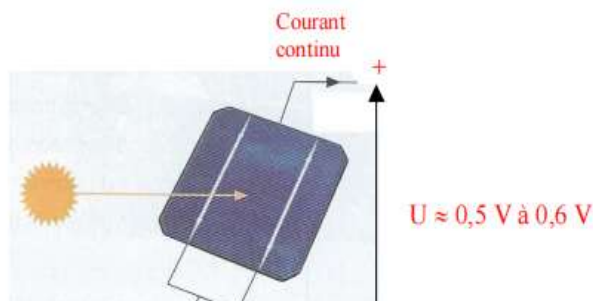


Figure I.8 : Cellule photovoltaïque

1.3.1.3.4. Principe de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants : absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ; conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur ; collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction p-n.[12]

1.3.1.3.5. Dopage du silicium :

Le dopage est une méthode permettant de réaliser la jonction P-N. Cela consiste à introduire des impuretés dans un cristal intrinsèque pour modifier ces propriétés électriques. Le semi-conducteur dopé est alors appelé "semi-conducteur extrinsèque".

Il existe deux types de dopage : le type N (Négatif) et le type P (Positif).

- ***Dopage de type N :***

Le dopage de type N consiste à ajouter un atome de phosphore au sein de la structure cristalline du silicium. Le phosphore disposant de 5 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un électron : Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale négative.

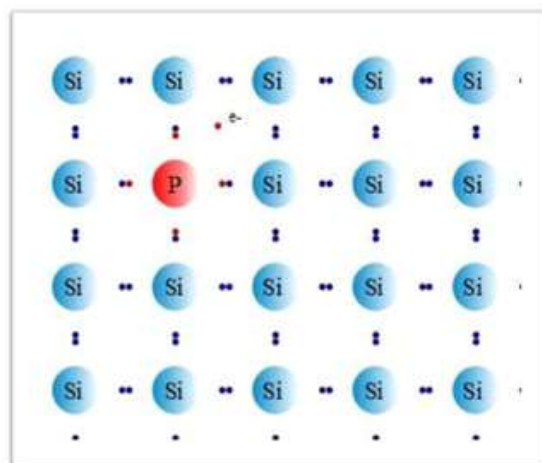


Figure I.9 : Dopage de type N

- **Dopage de type P :**

Le dopage de type P consiste à ajouter un atome de bore au sein de la structure cristalline du silicium. Le bore disposant de 3 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un trou :

Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale positive.

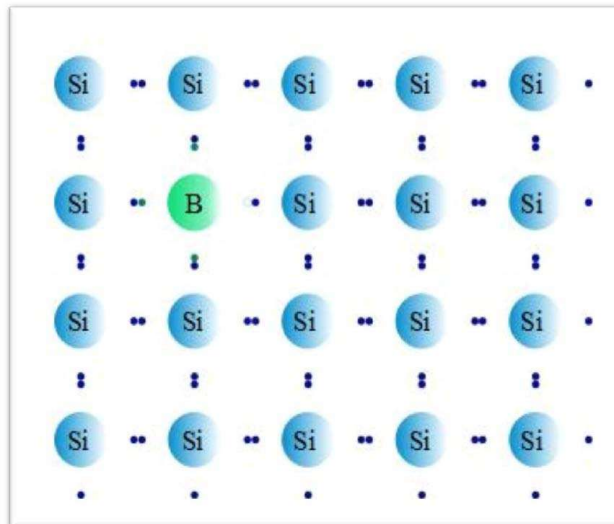


Figure I.10 : Dopage de type P

Lorsqu'un photon de la lumière arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques. Les atomes, chargés positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargés négativement, dans la zone N. Une différence de potentiel électrique, c'est-à-dire une tension électrique, est ainsi créée. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque

A la surface, le contact électrique (électrode négative) est établi par la grille afin de permettre à la lumière du soleil de passer à travers les contacts et de pénétrer dans le silicium

Les cellules solaires sont recouvertes d'une couche antireflet qui protège la cellule et réduit les pertes par réflexion. C'est une couche qui donne aux cellules solaires leur aspect bleu foncé.[13]

1.3.1.3.6. La jonction P-N :

Lorsque les deux zones sont mises en contact, certains électrons de semi-conducteur de type N passent vers le matériau de type P tandis que les trous du semi-conducteur de type P se déplacent au même moment dans la direction opposée. Ces mouvements forment des paires électron-trou neutres, nous obtenons alors une région appelée jonction PN dans laquelle la conductibilité passe progressivement du type P au type N.[14]

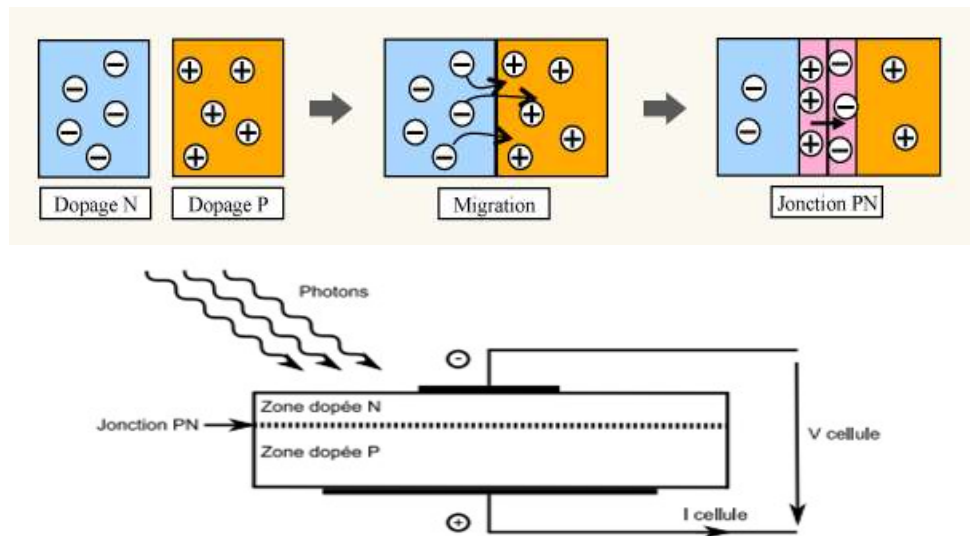


Figure I.11 : jonction PN

I.3.1.3.7. Les différents types de technologies de cellules photovoltaïques :

- **Silicium monocristallin :**

Pour ce genre d'applications technologiques, le silicium pur est obtenu à partir de la silice de quartz ou de sable par transformation chimique métallurgique. Le silicium a un rendement électrique et une durée de vie de l'ordre de deux fois celle du silicium amorphe, mais il est nettement plus cher.

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal (Figure I.12). Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium poly-cristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 15 à 22 %.[15]

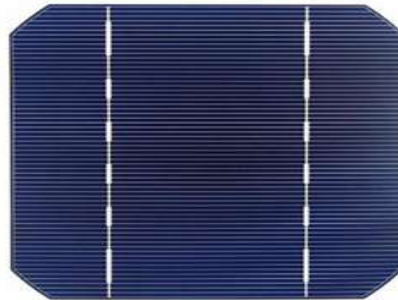


Figure I.12 : cellules en silicium monocristallin

- ***Silicium poly-cristallin :***

Le silicium poly-cristallin est un matériau composé de cristaux juxtaposés obtenus par moulage. Ce matériau est moins coûteux (que le monocristallin). Les cellules carrées ou rectangulaires sont faciles à utiliser. Les cellules poly cristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes), (Figure I.13). Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication.

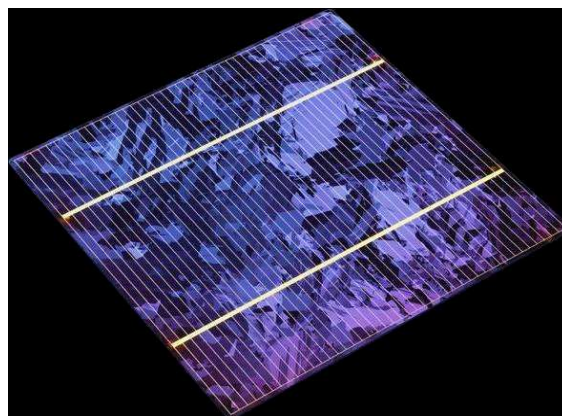


Figure I.13 : cellules en silicium poly-cristallin

- ***Silicium amorphe :***

Le silicium absorbe le rayonnement solaire jusqu'à 100 fois mieux qu'en état cristallin; les cellules sont constituées par des couches très minces. Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies Poly cristallines ou monocristallines. Cependant, le silicium amorphe (Figure (I.14)) permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première.



Figure I.14 : Cellule au Silicium amorphe (couche mince)

I.3.1.3.8. Architecture classique d'un module PV :

Dans des conditions d'ensoleillement standard (1000W/m^2 ; 25°C), la puissance maximale délivrée par une cellule en silicium de 150 cm^2 est d'environ 2.3W sous une tension de 0.5V .

Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plupart des applications. De ce fait, les générateurs photovoltaïques sont réalisés par association en série et/ou en parallèle d'un grand nombre de cellules élémentaires. [16]

- ***Association des cellules photovoltaïques en parallèles :***

Dans un groupement des cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension, la caractéristique résultante de ce groupement est obtenue par addition des courants à tension

donnée. La figure (I.15) qui suit montre la caractéristique résultante (I_{PCC} , V_{PCO}) obtenues en associant en parallèle N_p cellules identiques

$$I_{PCC} = N_p \times I_{CC} \quad V_{PCO} = V_{CO} \quad (I.1)$$

Avec (P induit parallèle)

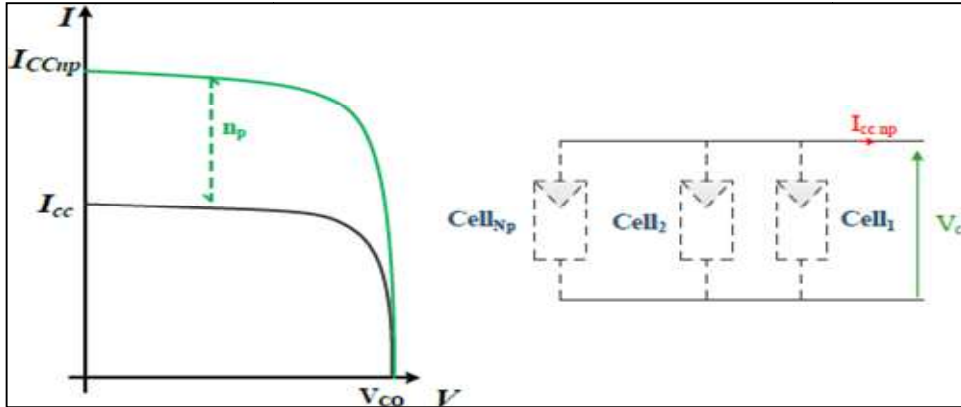


Figure I.15 : Association des cellules photovoltaïques en parallèles

- **Association des cellules photovoltaïques en série :**

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par la même, courant résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. La figure (I.16) montre cette caractéristique

$$I_{SCC} = I_{CC} \quad \text{Et} \quad V_{SCO} = N_s \times V_{CO} \quad (I.2)$$

Avec :(S indice séries)

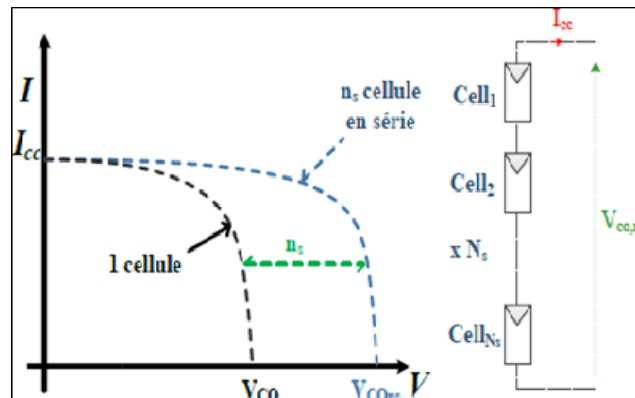


Figure I.16 : Association des cellules photovoltaïques en séries

- **Association mixte « Série et Parallèle » :**

La caractéristique (I_{PV} - V_P) d'un générateur solaire peut être considérée comme le fruit d'une association d'un réseau de ($N_S \cdot N_P$) cellules en série/parallèle.

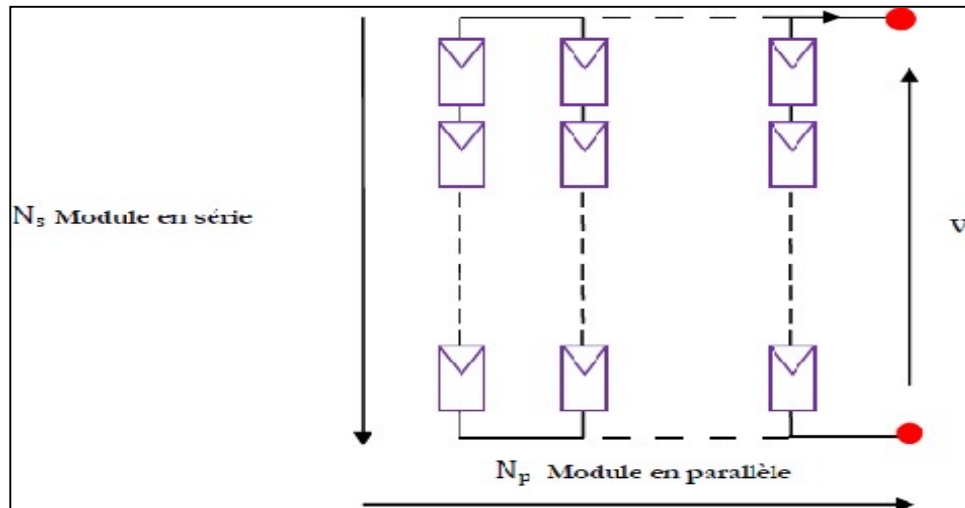


Figure I.17 : Association mixte « Série et Parallèle »

I.3.1.3.9. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire :

- **Avantage :**

1. une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
2. Consommation gratuite dès l'installation du système.
3. Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du Milliwatt au Mégawatt.
4. Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
5. La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu.

- **Les inconvénients:**

1. La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des Investissements d'un coût élevé.
2. Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule mono cristallin de 28%.
3. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
4. Tributaire des conditions météorologiques.
5. Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le Coût du générateur est accru.
6. Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.
7. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au Moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV Perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.[17]

I.3.1.3.10.Présentation et modélisation du panneau solaire:

a - Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque PV :

Un module PV se compose d'un certain nombre de cellules solaires connectées en série et en parallèle pour obtenir les niveaux de tension et de courant désirés. Une cellule de panneau solaire est essentiellement une jonction de semi-conducteur P-N. Lorsqu'elle est exposée à la lumière, un courant continu est généré. Pour simplifier l'étude, le modèle à une seule diode de la figure I.18est utilisé dans ce document. Ce modèle offre un bon compromis entre simplicité et précision avec la structure de base.

Le circuit équivalent du modèle général se compose d'un photo-courant (I_{ph}), d'une diode, d'une résistance parallèle (R_p) exprimant un courant de fuite et d'une résistance série (R_s) due aux contacts entre les semi-conducteurs et les parties métalliques Figure I.18

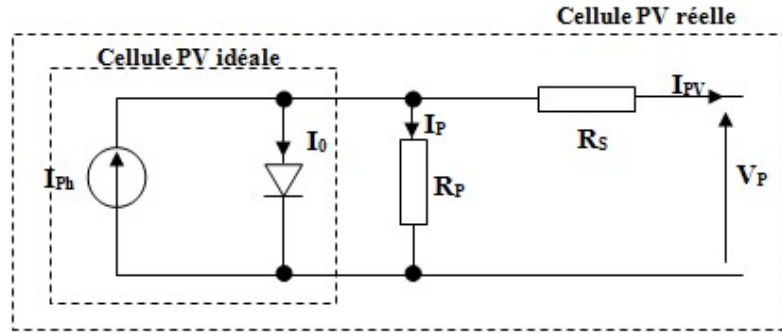


Figure I.18: Modèle équivalent d'une cellule PV

b - Equations de la cellule PV

Dans la Figure I.18 En appliquant la loi de Kirchhoff, le courant sera obtenu par l'équation suivante

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 - I_p \quad (I.3)$$

Avec :

- I_{ph} : est un courant généré par la lumière ou le photo courant.
- I_p : Courant qui circule dans la résistance parallèle, est donné par l'équation suivante

$$I_p = \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (I.4)$$

- I_0 :le courant de la diode qui est proportionnel au courant de saturation, il est donné par l'équation suivante :

$$I_0 = I_s \left[\exp \left(\frac{q \cdot (V + I.R_s)}{K.T_C.A} \right) - 1 \right] \quad (I.5)$$

Avec :

- I_s : Est le courant de saturation inverse en ampère (A)
- q : charge d'électrons ($1,6 \times 10^{-19}$ C)
- k : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J / K)
- T_C : est une température de cellule en Kelvin (K)
- A : est un facteur idéalité
- R_s : est une résistance série (Ω)

Nous remplaçons dans l'équation (I.3), l'équation (I.1) non obtenus

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{q \cdot (V + I.R_s)}{K.T_C.A} \right) - 1 \right] - \frac{(V + I.R_s)}{R_p} \quad (I.6)$$

Le photo courant dépend principalement de l'ensoleillement et de la température de fonctionnement de la cellule, et décrit par l'équation

$$I_{ph} = [I_{SC} + K_i \cdot (T_c - T_{ref})] \cdot \frac{G}{G_{ref}} \quad (I.7)$$

- I_{SC} : est le courant de court-circuit de la cellule à 25 ° C et 1000W /m² ,
- K_i : Le coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule,
- T_{ref} : est la température de référence de la cellule, en Kelvin (K) (= 25C ° + 273),
- G : est l'ensoleillement en watt /mètre carré (W /m²),
- G_{ref} : est l'insolation de référence de la cellule (= 1000W /m²),

D'autre part, le courant de saturation de la cellule varie avec la température de la cellule, qui est décrite comme suit

$$I_s = I_{rs} \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 \cdot \exp \left[\frac{q \cdot E_g \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right)}{K \cdot A} \right] \quad (I.8)$$

Où

- I_{rs} : Le courant de saturation inverse de la cellule à une température de référence et un rayonnement solaire
- E_g : est l'énergie de gap du semi-conducteur utilisé dans la cellule en électronvolt (eV)
- A : est le facteur idéal qui dépend de la technologie PV. [18]

Le courant de saturation inverse est donné par l'équation suivante

$$I_{rs} = \frac{I_{SC}}{\exp \left(\frac{q \cdot V_{oc}}{N_s \cdot A \cdot K \cdot T_c} \right) - 1} \quad (I.9)$$

Où

- N_s : Nombre des cellules en série d'un module PV
- I_{SC} : Est le courant de court-circuit
- V_{oc} : est la tension en circuit ouvert

c - Modélisation d'un module photovoltaïque:

Une cellule PV typique produit moins de 2W à 0,5V environ; les cellules doivent être connectées en série-parallèle sur un module pour produire suffisamment de puissance. Une matrice PV est un groupe de plusieurs modules PV qui sont connectés électriquement en série et en parallèle pour générer le

courant et la tension requis. Le circuit équivalent pour un module solaire disposé d'un nombre N_s des cellules montées en série et d'un nombre N_p des cellules montées en parallèle est représenté sur la Figure I.19

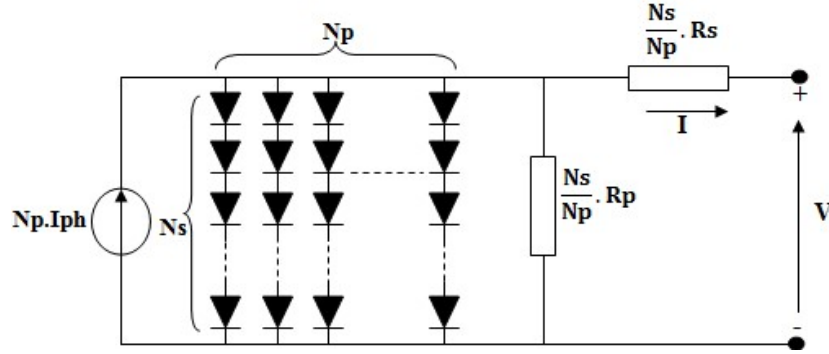


Figure I.19: modèle général d'un panneau photovoltaïque

L'équation terminale pour le courant et la tension d'un module PV devient la suivante:[19] [20]

$$I = N_p \cdot I_{ph} - N_p I_s \left[\exp \left(\frac{q \cdot \left(\frac{V}{N_s} + \frac{I R_s}{N_p} \right)}{K \cdot T_c \cdot A} \right) - 1 \right] - \frac{\left(\frac{N_p \cdot V}{N_s} + I \cdot R_s \right)}{R_p} \quad (I.10)$$

I.3.1.3.12.Simulation sous l'environnement Matlab/ Simulink

Le modèle donne la possibilité de connaître le comportement du module photovoltaïque pour différents valeurs d'irradiation G

Les courbes de la figure (I.20) et (I.21) ont été tracées pour deux valeurs différentes d'irradiation G avec une température constante de 25°C : $500\text{W}/\text{m}^2$ et $1000\text{W}/\text{m}^2$.

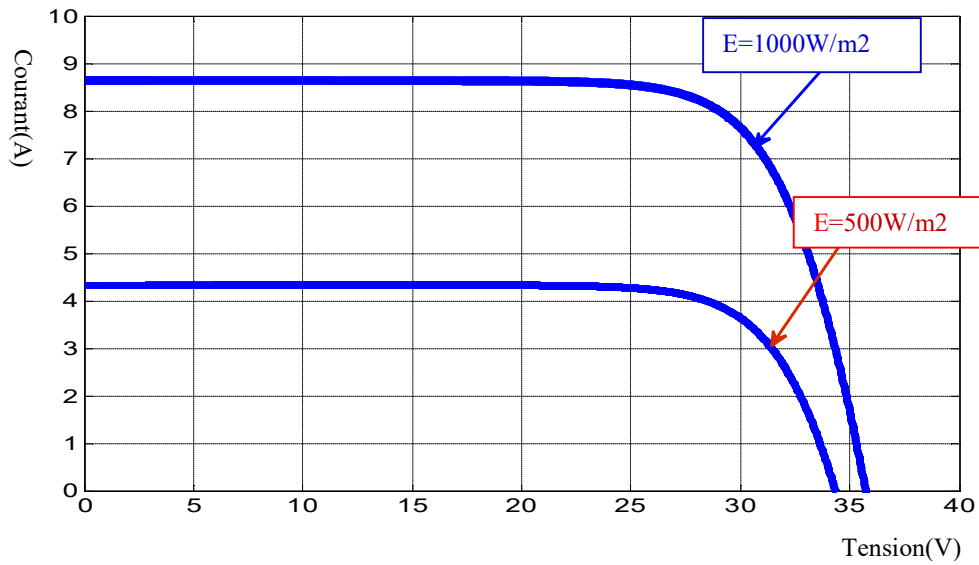


Figure I.20 : Caractéristique (I .V) pour différentes éclaircissement et $T = 25^\circ\text{C}$

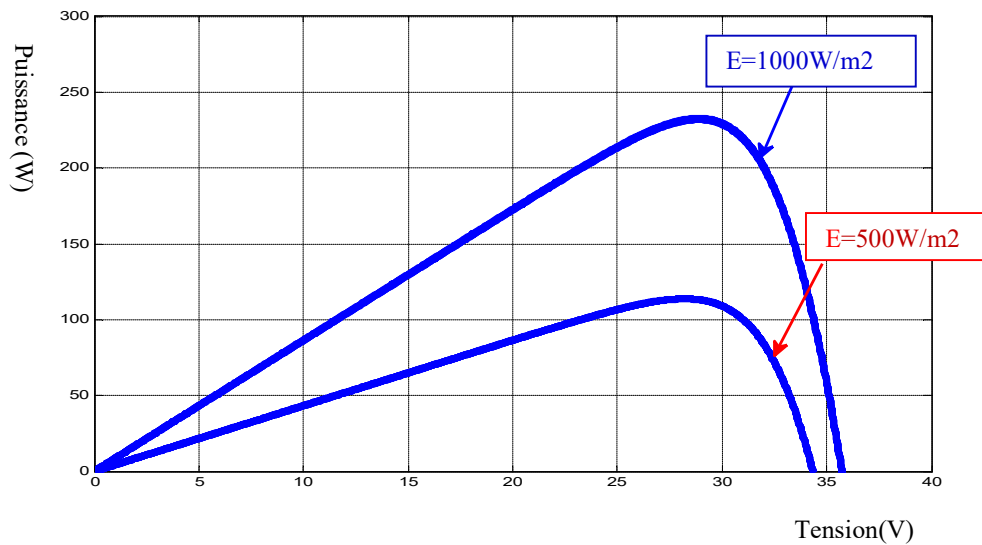


Figure I.21: Caractéristique (P .V) pour différentes éclaircissement et $T = 25^\circ\text{C}$

Les courbes de la figure (I. 22)et(I. 23) ont été tracées pour deux valeurs différentes de température avec une d'irradiation G constance 1000W/m^2 : 25°C , 50°C

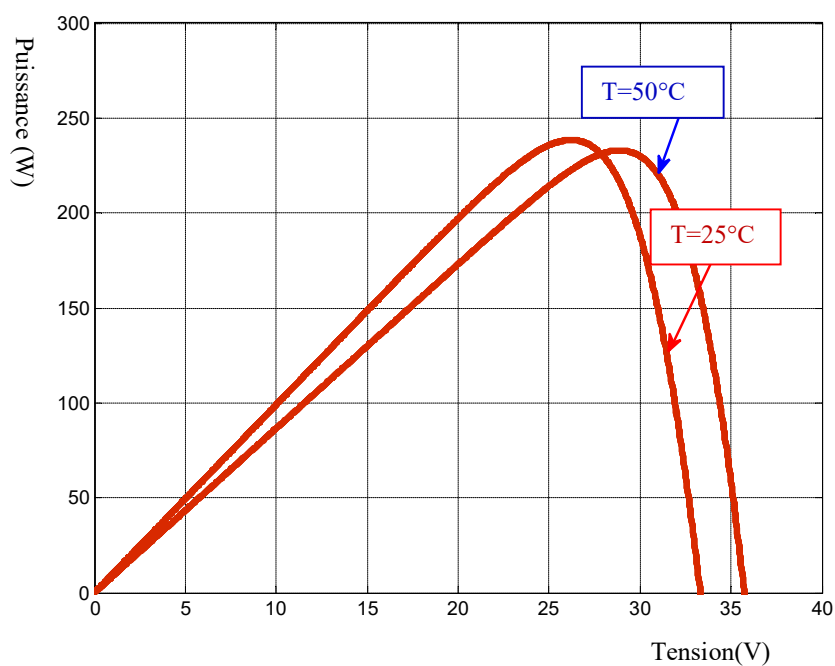


Figure I.22 : Caractéristique (P .V) pour différentes Températures et $E=1000\text{w}/\text{m}^2$

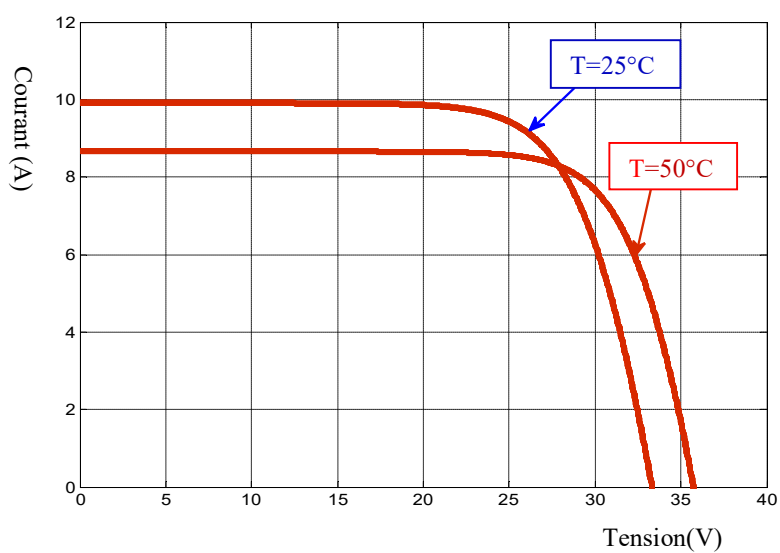


Figure I.23 : Caractéristique (I .V) pour différentes Températures et $E=1000\text{w}/\text{m}^2$

I.3.1.3.13. Interprétation des résultats :

Les résultats de simulation obtenus de la caractéristique I-V pour différents valeurs de l'irradiation G et une température ambiante fixe $T=25^{\circ}\text{C}$ (figures I.20), montrent clairement que :

-le courant produit par une cellule photovoltaïque est proportionnelle à l'éclairement G , tandis que la tension du circuit ouvert V_{CO} varie peu avec l'éclairement, et par conséquent la puissance maximale délivrée à la charge et définit par le point (V_{pm}, I_{pm}) augmente exponentiellement

Les résultats de simulation de la même caractéristique pour différentes températures et un éclairement fixe $G=1000\text{w/m}^2$ (figures (I.23)) pris pour les conditions standards STC, montrent que :

-la tension V_{CO} diminue lorsque la température augmente, tandis que le courant I_{CC} augmente légèrement et par conséquent la puissance maximale délivrée à la charge diminue.

En conclusion, le fonctionnement d'un panneau photovoltaïque est affecté par la variation de l'ensoleillement et la température, ce qui affecte la puissance délivrée à la charge qui impose également sa propre caractéristique. Pour améliorer le rendement d'un système PV, il est nécessaire d'intégrer une commande MPPT pour assurer la poursuite de la puissance maximale fournir par le générateur

I. 3.2. Généralités sur les systèmes éoliens

I.3.2.1 Introduction sur le système éolien

Depuis plusieurs années, la protection de l'environnement a suscité beaucoup d'intérêt et conséquemment, plusieurs technologies se sont développées. C'est le cas de l'énergie éolienne. en utilisant cette source énergie pour pomper de l'eau ou pour moulinier le blé afin d'en faire de la farine. De nos jours, cette source d'énergie sert encore à pomper l'eau mais elle est principalement utilisée pour produire de l'électricité, et ce sans aucun effet néfaste sur l'environnement. La hausse des coûts d'exploitation des centrales nucléaires et des carburants fossiles ont aussi permis à l'énergie éolienne de devenir beaucoup plus compétitive .

I.3.2.2. Historique de l'éolienne :

Depuis plusieurs siècles (avant 3000 ans environ) l'énergie du vent, comme étant une source d'énergie inépuisable non polluante, a été exploitée. Avant que les énergies fossiles (le pétrole et le charbon) aient été découvertes, les égyptiens et les perses ont commencé à utiliser cette énergie pour le pompage d'eau [21]. Ensuite, des siècles avant les Européens l'homme servi des moulins à vent pour moulinier le blé (environs 200000 moulins à vent en Europe vers le milieu du 19ème siècle). Probablement, la première turbine à vent générant de l'électricité a été construite par le danois Poule La Courant 1891. Cette technologie n'a cessé d'évoluer, durant la première et la deuxième guerre mondiale elle a été améliorée avec une grande échelle par les ingénieurs danois. L'investissement pour l'amélioration et la modernisation de la technologie des aérogénérateurs a commencé juste après la crise pétrolière de 1974. Entre ces investissements, on cite le premier marché de la Californie au cours des années 1980/1986. Au début avec des turbines de moyenne puissance (55 kW), puis 144 machines d'une puissance totale de 7 MW en 1981 et 4687 machines avec un total de 368 MW en 1985. Après ces années, l'industrie de l'éolienne a été développée dans des pays comme l'Allemagne, le Danemark et l'Espagne (Figure I.24) après le décolllement du marché européen. En 1998, la contribution de ces trois pays au marché mondial atteint 10000 MW et en 2004 environ 47000 MW avec une croissance annuelle 7500 MW [21].



Figure I.24: Eolienne de Charles.F.Brush (Etats-Unis, 1888).



Figure I.25 : Moulins à vent dans la région de La Mancha, Espagne.

D'après les statistiques 2012 du Global Wind Energie Council (GWEC), la puissance éolienne totale installée fin 2012 dans le monde s'élevait à 282 482 MW. La capacité ajoutée sur la période 2011-2012 représente un taux de croissance de 19 %. Depuis dix ans, ce taux de croissance est en moyenne de 26% par an. D'après les prévisions 2011 du GWEC, la capacité mondiale devrait s'élever à 493 330 MW fin 2016. En 2020, leur scénario prévoit environ 832 000 MW de puissance installée [22].

Des programmes nationaux ont été lancés ces dernières années dans des pays européens (Allemagne, Espagne, Danemark, France ...), La (Figure I.26) présente les capacités éoliennes cumulées annuelles installées dans le monde. (La Figure I.27), indique les dix premiers pays en termes de capacité éolienne installée cumulative et annuelle dans le monde [23].

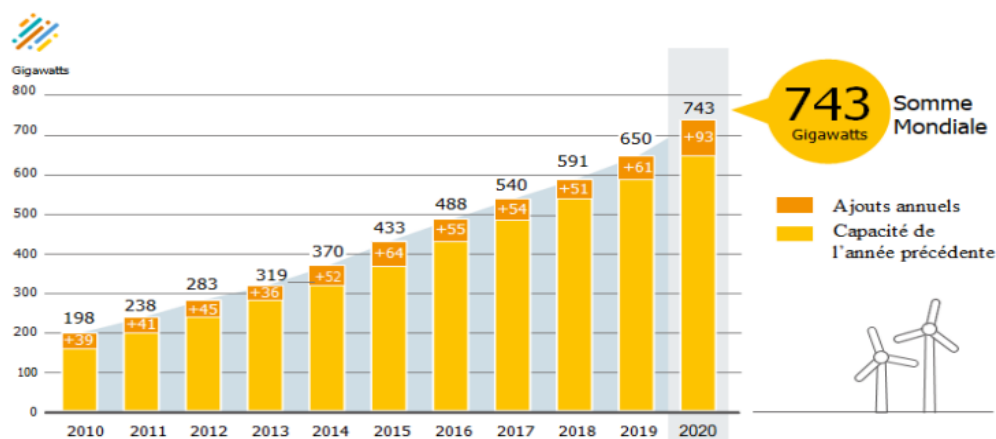


Figure I.26: Capacité mondiale d'énergie éolienne et ajouts annuels, 2010-2020[23].

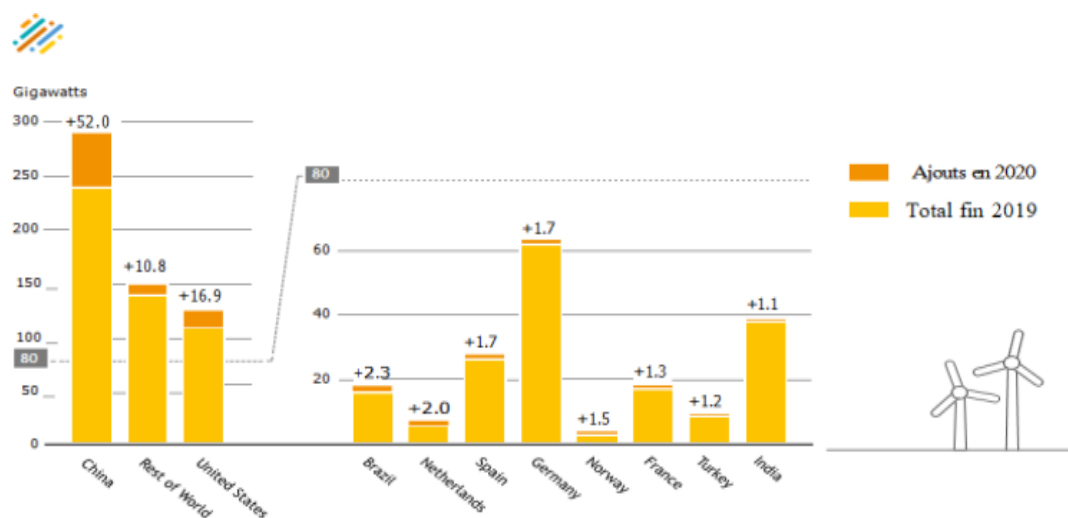


Figure I.27: Capacité de production d'énergie éolienne et ajouts, Top 10 pays, 2020.

I.3.2.3. Évolution du SCEE (Système de la Conversion de l'Énergie Éolienne) en puissance :

L'industrie éolienne a connu au fil des ans de nombreuses avancées technologiques en termes de conception, de systèmes mécaniques, de générateurs, d'intégration avec des systèmes d'alimentation et théorie du contrôle. Alors que du point de vue de l'électrotechnique, les générateurs électriques et les convertisseurs de puissance électroniques ont été des composants clés dans le fonctionnement des systèmes de conversion de l'énergie éolienne depuis le début de l'exploitation connectée au réseau dans les années 1980 [24]. La puissance d'une éolienne est proportionnelle au carré du diamètre du rotor et au cube de la vitesse du vent. Les grandes turbines peuvent capter plus puissance éolienne avec des coûts d'installation et de maintenance inférieurs à ceux d'un petit ensemble de turbines. En conséquence, la taille des éoliennes commerciales a considérablement augmenté au cours des 30 dernières années, comme le montre la (Figure I.28). La taille des turbines est passée de 50 kW en 1980 à 15-20 MW en 2020[25].

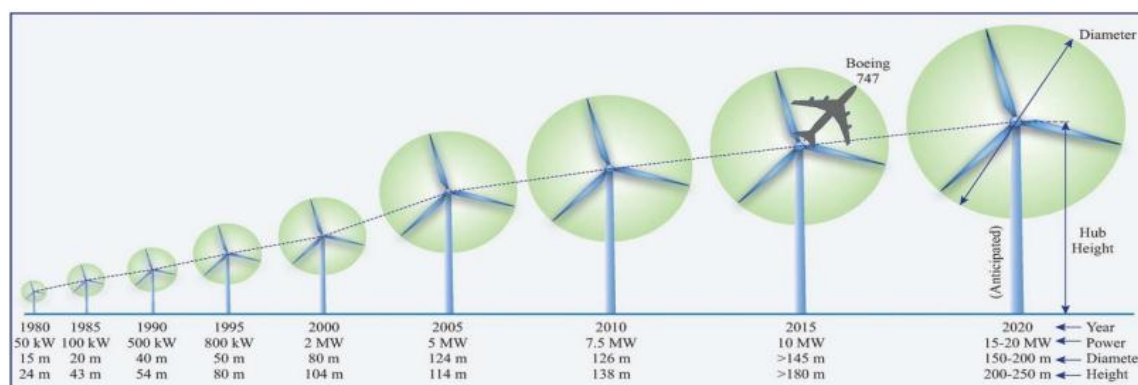


Figure I.28 : Évolution de la taille des turbines éoliennes.

I.3.2.4. Vision énergétique Algérienne

L'Algérie vise à entamer un processus de passage à l'énergie verte par le lancement d'un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables et l'efficacité énergétique. Ce programme est basé sur le développement des ressources inépuisables, telles que l'énergie solaire et éolienne ; le potentiel des énergies renouvelables en Algérie est fortement dominé par l'énergie solaire.

Récemment, l'Algérie s'est engagée dans une nouvelle phase d'exploitation des énergies renouvelables avec un programme gouvernemental qui vise à produire 22 GW d'électricité de source renouvelable à l'horizon 2030 [26]. Bien que la part dédiée à l'éolien dans le nouveau programme reste relativement faible par rapport au solaire photovoltaïque, l'énergie d'origine éolienne constitue le deuxième axe de développement avec une production qui devrait avoisiner 5GW en 2030, dont 1GW à l'horizon 2020 [26]. A ce jour, une première et "unique" parc éolienne de 10MW a été installée dans la région de Kaberten (70km d'Adrar) [27] et mise en service en juin 2014 (Figure I.29) avec une capacité estimée à environ de 516 MW Ce parc éolien pilote est constituée de 12 éoliennes d'une puissance unitaire de 0.85MW chacune et dont l'énergie produite sera évacuée vers le poste 220/30 KV situé dans la même localité.



Figure I.29 : Parc éolien à Kabertene

I.3.2.5.Energie éolienne:

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure I.30) [28]

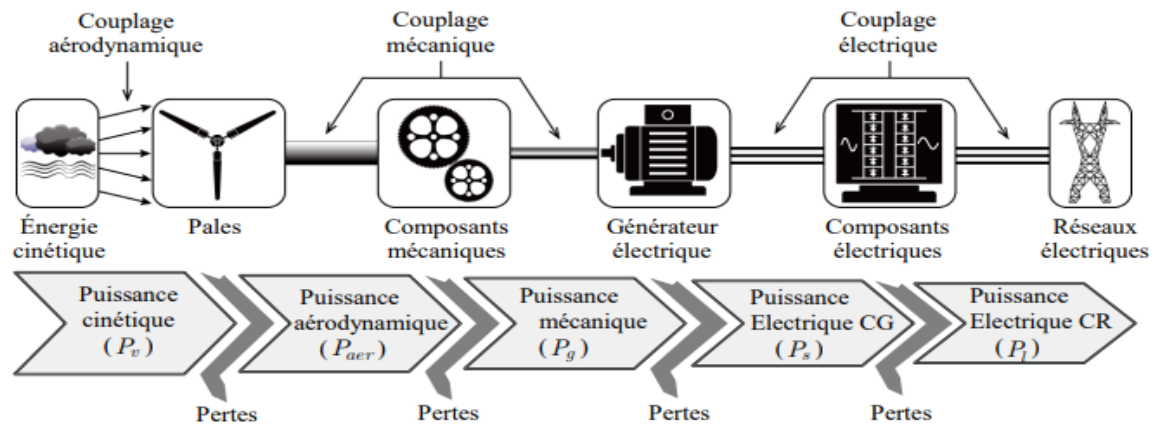


Figure I.30 : Schéma fonctionnel du système de conversion

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffusée, de plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences.

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible).

Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.[29]

I.3.2.6. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne:

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après [30].

a) Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est-à-dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées.

- L'énergie éolienne est une énergie propre.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace. L'énergie éolienne possède d'autre part des atouts économiques certains.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont minimales.

b) Inconvénients

- La nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour le raccordement au réseau.
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classiques surtout sur les sites moins ventés.
- Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe.

I.3.2.7. Les différents types d'éoliennes:

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal :

[29]

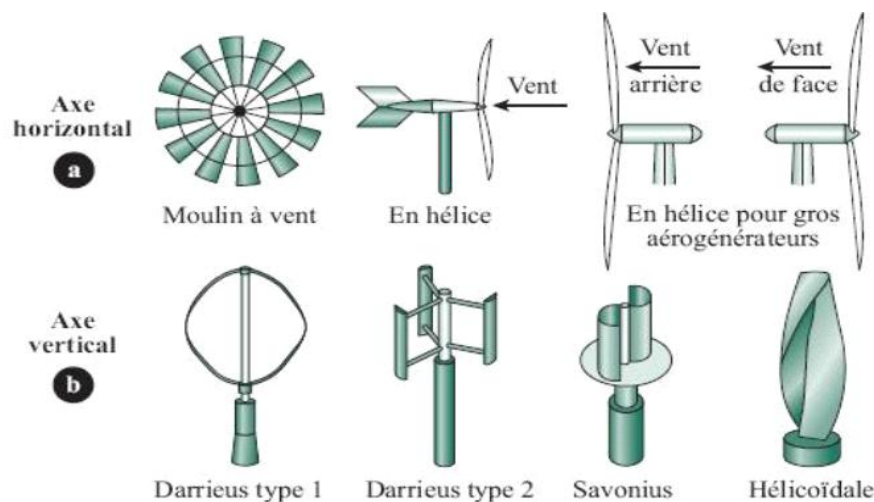


Figure I.31 : Différents types d'éoliennes.

(I.31.a): à axe horizontal – (I.31.b): à axe vertical.

I.3.2.7.1 Eoliennes A Axe Vertical :

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles et il s'agit d'une turbine à axe vertical de forme cylindrique qui peut facilement être installée sur le toit d'une maison moderne et dont les avantages sont : faible impact visuel, pratiquement pas de bruit et très grande tolérance aux vents forts.

Il existe des systèmes grâce auxquels les ailes se décalent plus ou moins pour augmenter l'étendue des vitesses d'action. Si la vitesse du vent est basse, les ailes sont complètement déployées, si la vitesse est trop forte, les ailes sont complètement fermées et l'éolienne forme un cylindre.

Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées. Selon Les avantages théoriques d'une machine à axe vertical sont les suivantes :

- Elle vous permet de placer la génératrice, le multiplicateur, etc. à terre, et vous n'avez pas besoin de munir la machine d'une tour.
- Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent.

Les inconvénients principaux sont les suivants :

- L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas impressionnante.

L'éolienne ne démarre pas automatiquement. Cependant, ceci ne constitue qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, étant donné qu'il est alors possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne.



Figure I.32 : Les éoliennes à axe vertical

I.3.2.7.2 Eoliennes A Axe Horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal.

Aujourd'hui, pratiquement les seules éoliennes commerciales sont à axe horizontales. Les plus grandes éoliennes mesurent jusqu'à 180m en bout de pale avec un moyeu à 120m pour une puissance de 6 MW.

Les éoliennes à axe vertical ont été prometteuses dans les années 80 et au début des années 90, mais leur faible rendement aérodynamique ainsi que les fluctuations élevées de la puissance électrique générée les ont écartées du marché.

Dans ce contexte, quelques notions principales au sujet de la technologie éolienne ont été données

comme les méthodes de description du gisement éolien, des exemples d'architectures, les génératrices utilisées, etc. Nos travaux portent sur un système éolien de petite puissance dédié à un site perturbé comme le milieu urbain, des exemples de réalisations pratiques et industrielles de cette catégorie sont proposés. La turbine à axe vertical de type Savonnais qui semble être particulièrement adaptée est alors étudiée du point de vue de son rendement en collaboration avec l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse donnant des indices sur les différents perfectionnements du rendement possibles.

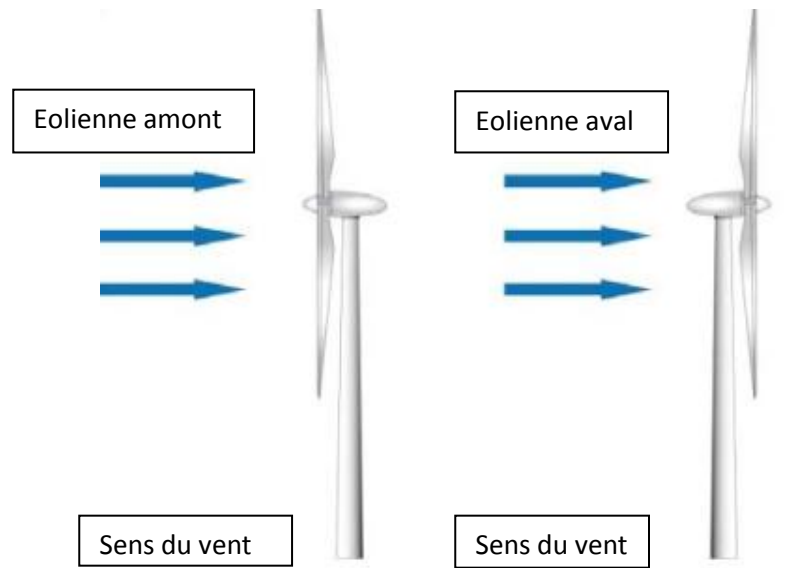


Figure I.33 : Turbine éolienne en amont et en aval

Suivant leur orientation en fonction du vent (orienté selon la direction du vent) les HAWT (horizontale axis wind turbine) sont dites en amont (up-wind) ou en aval (down-wind), les premières ont le rotor face au vent, le flux d'air atteindra le rotor sans obstacle, un mécanisme d'orientation est nécessaire pour maintenir en permanence le rotor en face du vent, les éoliennes à rotor en aval n'ont pas besoin de ce mécanisme d'orientation mais le rotor est placé dans l'autre côté de la tour ; la disposition de la turbine en amont est la plus utilisée à cause de sa simplicité et donne les meilleurs résultats pour les fortes puissances sachant que les efforts de manœuvre sont moins importants et donnent une meilleure stabilité [31].

I.3.2.8. Constitution d'une éolienne à horizontal

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne classique est généralement constituée de trois éléments principaux [32]:

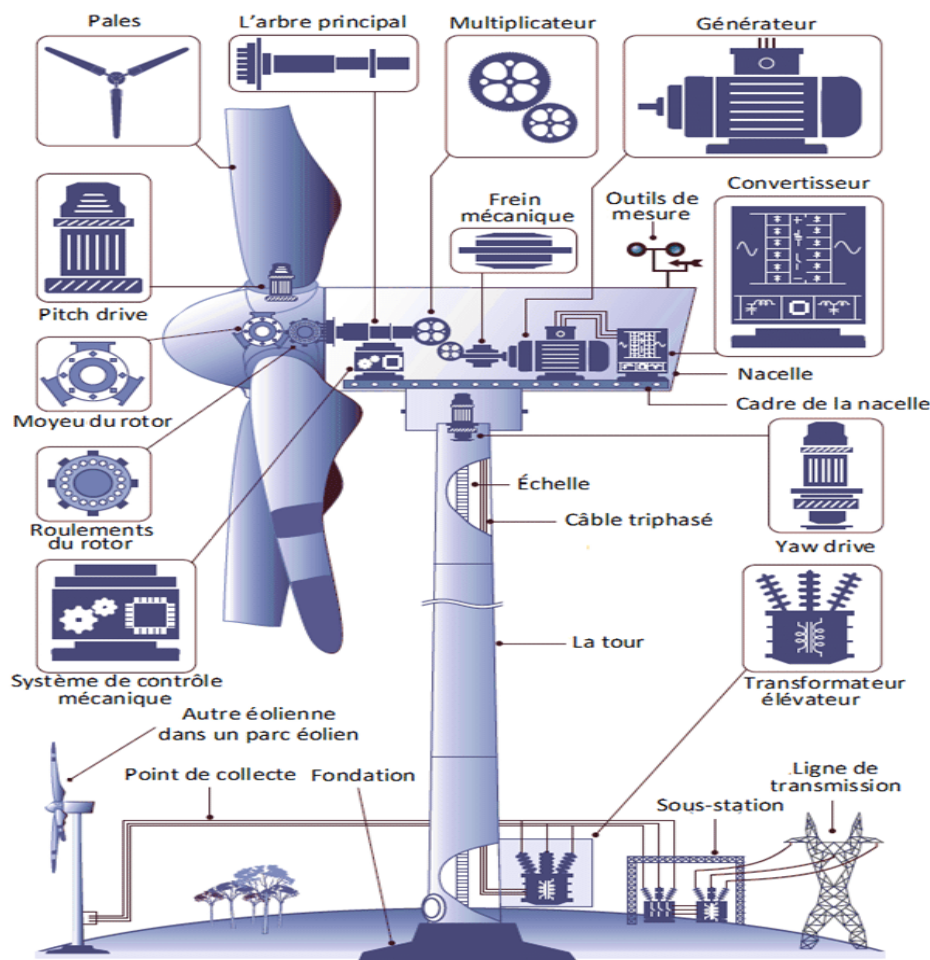


Figure I.34 : Principales composantes de l'éolienne à axe horizontal

- | | | | |
|---|---------------------------|----|---|
| 1 | Les pales. | 7 | Le mat. |
| 2 | Le moyeu. | 8 | Le système d'orientation de nacelle. |
| 3 | L'arbre primaire. | 9 | Le système de refroidissement |
| 4 | Le multiplicateur. | 10 | Les outils de mesure du vent (girouette et anémomètre). |
| 5 | L'arbre secondaire. | 11 | Le système de contrôle électronique. |
| 6 | Le générateur électrique. | 12 | Un transformateur. |

1) La tour :

La tour ou Le mât est généralement est un tube en acier, son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi il permet de placer le rotor à une hauteur élevée au-dessus du sol, où la vitesse du vent est supérieure et les effets des obstacles locaux sont moindres, améliorant ainsi la captation de l'énergie , de plus il permet d'accéder à la nacelle pour des opérations d'entretien et d'inspection. Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Le mât peut mesurer entre 10 et 80 m de haut et ceci dépend du type d'éolienne et de sites d'implantation. Typiquement une éolienne de 1 MW a une hauteur de 80 mètres de haut, ce qui correspond à la hauteur d'un immeuble de 32 étages. Trois grands types de tour peuvent se rencontrer, mât haubané, tour en treillis et tour tubulaire. La tour à une forme légèrement conique ou, à l'intérieur, sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle .



Figure I.35 : un mât d'une éolienne.

2) Le rotor

Formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.

Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié. Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique) [33].



Figure I.36 : éléments constitutifs du rotor : pale et moyeu.

3) La nacelle

Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone ou même une machine à courant continu en plus des systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne [32].



Figure I.37 : la nacelle d'une éolienne

I.3.2.9.Principe de fonctionnement :

Les éoliennes ont pour but de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en quatre étapes :

➤ Au niveau des pales

Les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion, la différence de pression entre deux faces crée une force aérodynamique, mettant en mouvement le rotor par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique [34].

➤ Au niveau du multiplicateur

Les pales tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, les générateurs ont besoin généralement de 1000 à 2000 tours par minute pour produire de l'électricité, c'est pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par un multiplicateur [34].

➤ Au niveau de générateur

Transmise par le multiplicateur l'énergie mécanique se transforme en énergie électrique par le générateur, le rotor du générateur tourne à grande vitesse et produit de l'électricité à une tension d'environ 960 volts [34].

➤ Au niveau du transformateur

L'électricité ne peut pas être utilisée directement ; elle est traitée grâce à un convertisseur, puis sa tension est élevée à 20 000Volts par un transformateur. Puis acheminée à travers un

câble enterrée jusqu'à un poste de transformation, pour être injectée sur le réseau électrique [35]

I.3.2.10. Etat de l'art des technologies utilisées et choisies dans le cadre de l'étude

I.3.2.10. 1. Systèmes utilisant le générateur Asynchrone

Le générateur asynchrone en forme de cage d'écureuil est beaucoup utilisé due à son faible coût, son simple construction, sa robustesse et la facilité d'utilisation dans les climats rigoureux. Il existe plusieurs types de configurations qui utilisent la machine asynchrone sous toutes ses formes (machine de bobinage asynchrone), machine asynchrone Cage, machine asynchrone double stator, MADA, etc.)

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau. La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine.

Malgré sa simplicité, ce système fonctionne à vitesse fixe car la fréquence est imposée par le réseau

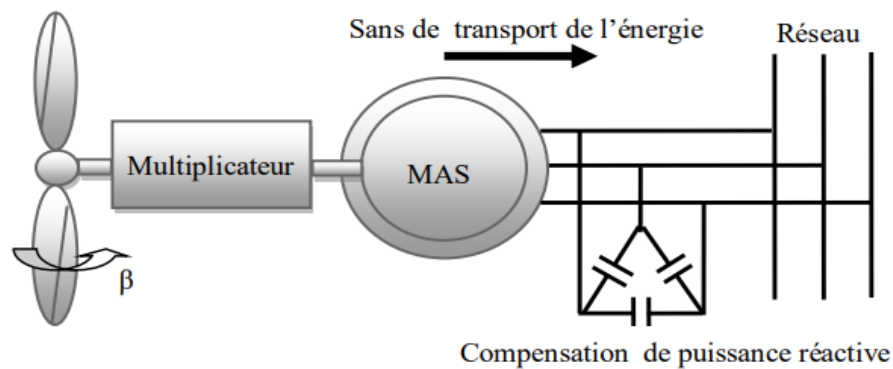


Figure I.38:Éolienne à base de machine asynchrone .

I.3.2.10.2. Systèmes utilisant une machine synchrone

L'avantage d'un générateur synchrone par rapport à un générateur asynchrone est qu'il n'y a pas de courant magnétisant réactif. Le champ magnétique d'un générateur synchrone peut être obtenu par aimant ou par bobine d'excitation classique. Si l'alternateur a un nombre d'arbres suffisant, il est polyvalent pour les applications à entraînement direct qui ne nécessitent pas de boîte de vitesses. Cependant, un générateur synchrone est plus adapté pour une connexion indirecte au réseau électrique via un transformateur statique, ce qui permet un fonctionnement à vitesse variable. Pour les petites unités, un générateur à aimant permanent est plus simple et moins coûteux. Au-delà (environ) 20 kW, un générateur synchrone est plus cher et plus complexe qu'un générateur asynchrone de taille équivalente, dans le cas de notre étude, on s'intéresse à un générateur à aimant permanent.

I.3.2.10.3. Machines synchrones à aimants permanents

Le développement des matériaux magnétiques a permis de construire des machines synchrones à aimants permanents à des coûts devenus compétitifs. Les machines de ce type possèdent un grand nombre d'arbres et permettent de développer un couple mécanique important. L'avantage d'un bon rendement et d'un bon couple massique, les inductances à aimants de forte puissance permettent d'obtenir environ 25% de la masse par rapport à celles du type bobiné. Mais leur principal inconvénient est le manque de régulation du débit d'excitation. Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance est devenu plus économiquement viable, ce qui en fait un concurrent sérieux des doubles générateurs asynchrones. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance considéré comme aussi faible que l'élimination du multiplicateur de vitesse et le système d'anneaux et de balais des générateurs magnétiques. Ensuite, le coût est plus faible, ce qui est très avantageux dans les applications de l'énergie éolienne, en particulier dans les endroits difficiles d'accès. La présence obligatoire d'une électronique de puissance permet une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une efficacité énergétique améliorée.

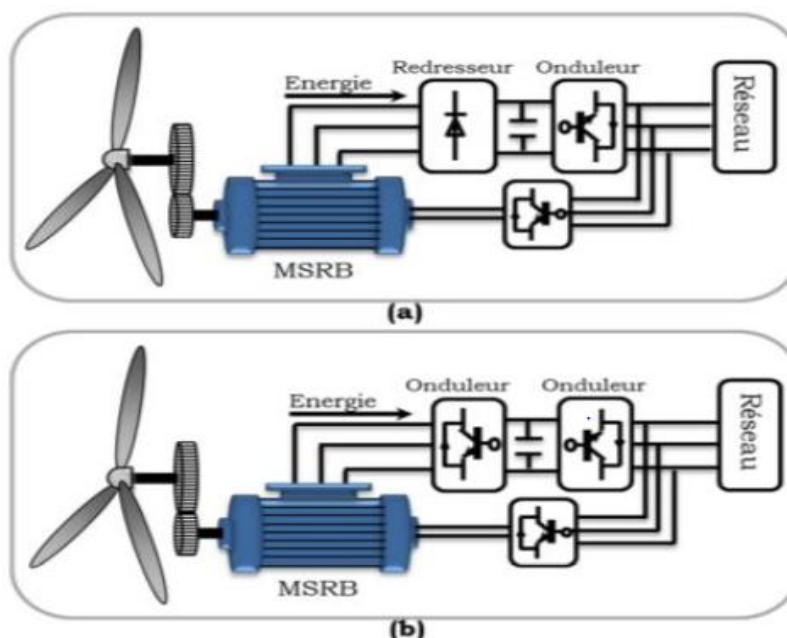


Figure I.39 : Systèmes éoliens basés sur la Machine Synchrone à Aimants Permanents

- (a) GSAP avec convertisseurs MLI.
 (b) GSAP avec redresseur, hacheur et convertisseur.

Dans la configuration de la GSAP de la (Figure I.39) -b, la génératrice est connectée à un redresseur triphasé suivi d'un hacheur, qui a pour rôle de contrôler le couple électromagnétique. La liaison au réseau est assurée par un onduleur MLI qui assure la régulation de la tension du bus continu aussi bien qu'il contrôle le facteur de puissance. L'inconvénient de cette configuration est l'utilisation du redresseur, ce qui augmente l'amplitude du courant et la déformation de la tension. En conséquence, cette configuration a été considérée pour les petites puissances (inférieures à 50KW).

Dans la configuration de la (Figure I.39) -a, un redresseur MLI est placé entre la génératrice et le bus continu, et la liaison au réseau est assurée par un onduleur MLI. L'avantage de cette configuration par rapport à la configuration précédente est l'utilisation de la commande vectorielle ce qui permet à la génératrice de fonctionner au voisinage du point optimal. Cependant, ces performances dépendent de la bonne connaissance des paramètres de la génératrice qui dépendent de la température et la fréquence. En choisissant judicieusement les paramètres du système représenté sur la (Figure I.40), un système à vitesse « Non constante », à coût minimum et énergétiquement assez performant peut être obtenu.

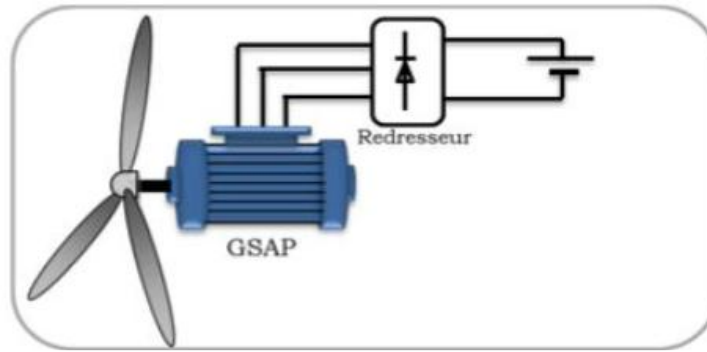


Figure I.40: Système éolien à coût minimum basé sur GSAP

I.3.2.11. Modélisation du système éolien :

Le rôle d'une éolienne est de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents composants sont conçus pour maximiser cette conversion d'énergie, et d'une manière générale, un bon ajustement entre les caractéristiques de la turbine et du générateur électrique est nécessaire. Dans ce qui suit nous nous intéresserons à la modélisation de la partie mécanique du système éolien. Cette étape permet en premier lieu de comprendre le comportement dynamique de l'éolienne dont le but d'entamer une modélisation précise du système global.

I.3.2.11.1. Modélisation du vent :

Le vent est la source principale d'énergie pour faire fonctionner une éolienne, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître son modèle mathématique. Celui-ci peut être une simple loi exponentielle où bien utilisant des distributions spectrales et spatiales très complexes qui rendent compte de sa phénoménologie turbulente [36].

La modélisation du vent est primordiale que ce soit pour :

- Définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne ;
- Définir les sollicitations qui s'appliquent sur les pales ;
- Développer et affiner la modélisation du rotor ;
- Évaluer le potentiel d'énergie utilisable ;
- Fournir une aide pour l'implantation des machines.

La définition du modèle du vent nécessite des données climatiques et géographiques du site concerné, ainsi que la période de l'an concernée par l'étude. Le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourier qui présente le vent comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques. Il est donné par l'équation (I.9)

$$V_v(t) = A + \sum_k^i a_k \sin(\omega_k t) \quad (I.11)$$

Avec :

A : La valeur moyenne de la vitesse du vent

a_k : Amplitude de l'harmonique de l'ordre k

ω : Pulsation de l'harmonique de l'ordre k

i : Le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent

Les modèles utilisés dans notre étude sont donnés par les relations [37]:

$$V_v(t) = 8 + 0.2\sin(0.15t) + 0.2\sin(0.25t) + 0.2\sin(0.35t) + 0.2\sin(0.45t) \quad (I.12)$$

$$V_v(t) = 8 + 0.2\sin(0.1047t) + 2\sin(0.2665t) + 0.2\sin(3.6645t) \quad (I.13)$$

Avec $\omega_v = \frac{2\pi}{10}$.

La (Figure I.41) : représente le diagramme Simulink du modèle du vent sous Matlab/Simulink. (A) et (B) :

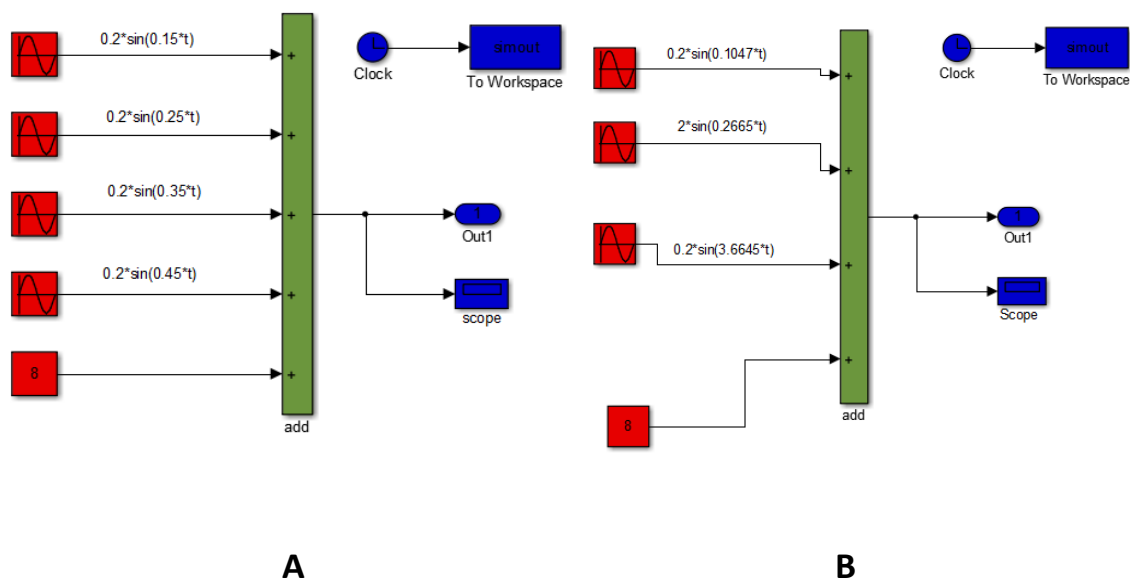


Figure I.41 diagramme Simulink du modèle du vent sous MATLAB/

Les (Figures I.42 et I.43) représente le profil du vent simulé avec une vitesse moyenne de 8 m/s.

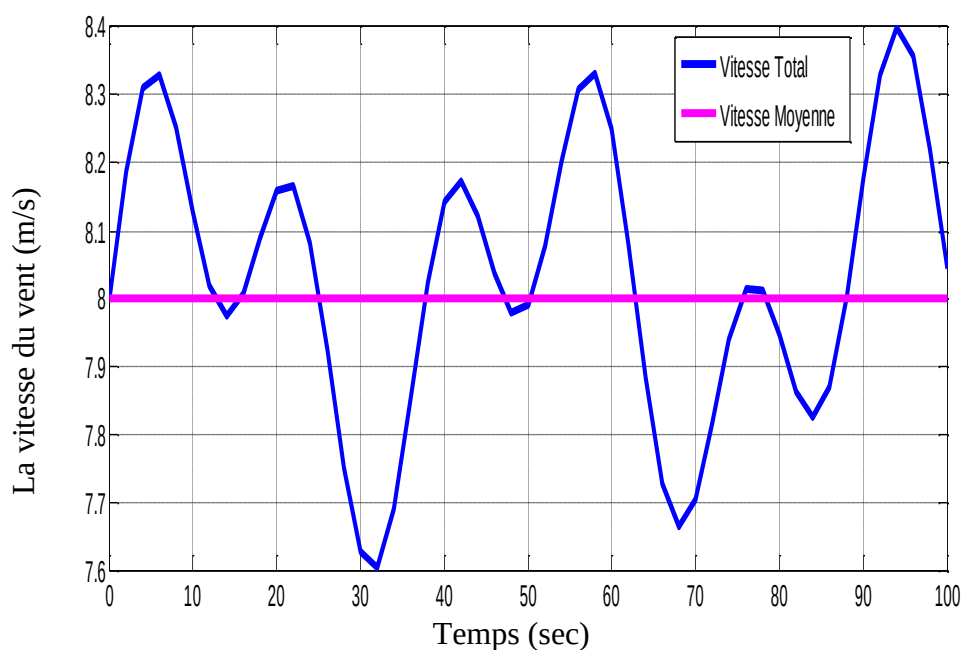


Figure I.42 : Allure du profil du vent utilisé reproduit sous MATLAB. (A)

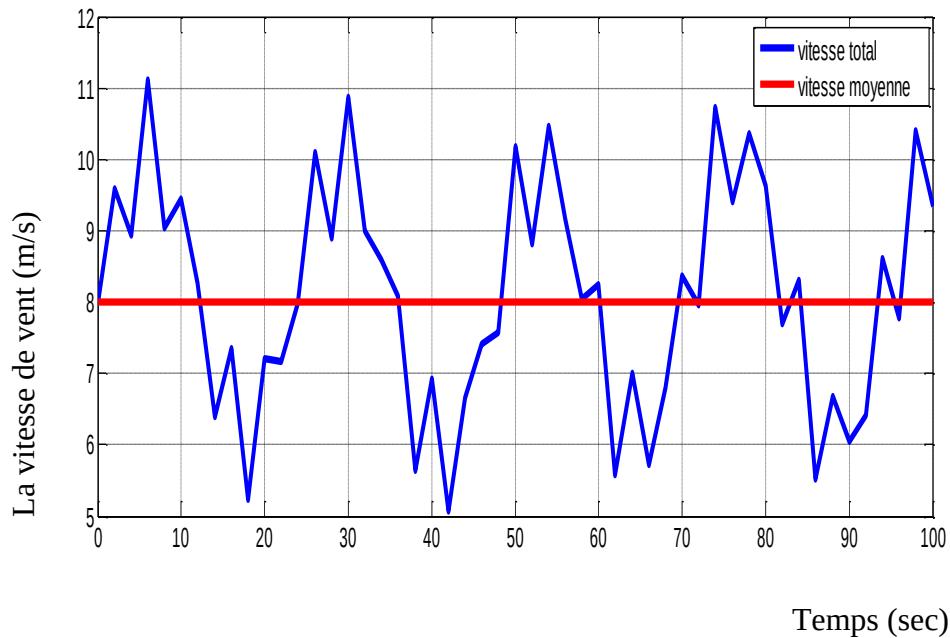


Figure I.43 : Allure du profil du vent utilisé reproduit sous MATLAB.(B)

a) Limite de BETZ

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la (Figure I.33) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit : [38]

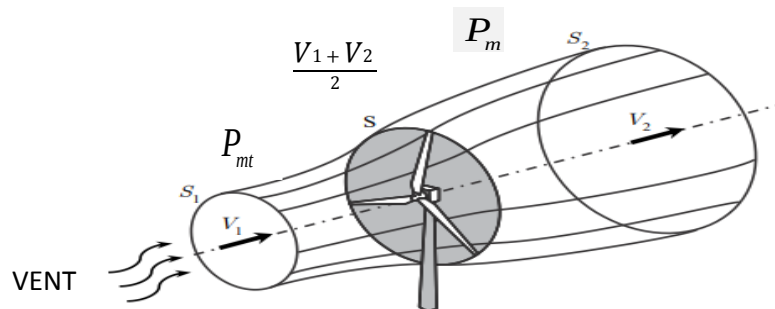


Figure I.44 : Variation de la vitesse du vent.

La masse d'air en mouvement m_t (Kg / s) de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est :

$$m_t = \rho \text{Volume} = \rho S \text{Longueur} = \rho S V \quad (\text{I.14})$$

ρ : Masse volumique de l'air ; $\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$.

S : Surface circulaire balayée par la turbine ; $S = \pi R^2$;

R : Correspond pratiquement à la longueur de la pale ;

Avec V la vitesse moyenne du vent traversant le rotor en (m/s)

$$m_t = \rho S \frac{(V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{I.15})$$

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (selon la seconde loi de Newton).

$$P_m = \frac{1}{2} m_t (V_1^2 + V_2^2) \quad (\text{I.16})$$

$$P_m = \frac{1}{2} \rho S V (V_1^2 + V_2^2) \quad (\text{I.17})$$

P_m : La puissance extraite par le rotor en (W)

m_t : La masse par seconde (Kg/s)

V_1 : La vitesse avant le passage à travers le plan du rotor en (m/s)

V_2 : La vitesse après le passage à travers le plan du rotor en (m/s)

Soit en remplaçant m par son expression dans (I.16), nous obtenons

$$P_m = \frac{\rho S}{4} (V_1 + V_2) (V_1^2 + V_2^2) \quad (\text{I.18})$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \quad (\text{I.19})$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et celle du vent non perturbé sera alors :

$$C_p = \left(\frac{P_m}{P_{mt}} \right) = \frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right) \right) \quad (\text{I.20})$$

D'où P_{mt} est la puissance totale d'un flux d'air non perturbé en watts (W) Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus la Figure (I.45), on s'aperçoit que le ratio

$\frac{P_m}{P_{mt}}$ Appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maximum de $(16/27)$ soit 0,59.

C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative.

Avec

$$\lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_1} \quad (I.21)$$

Représentant le rapport entre La vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent et de l'angle de l'orientation de la pale β .

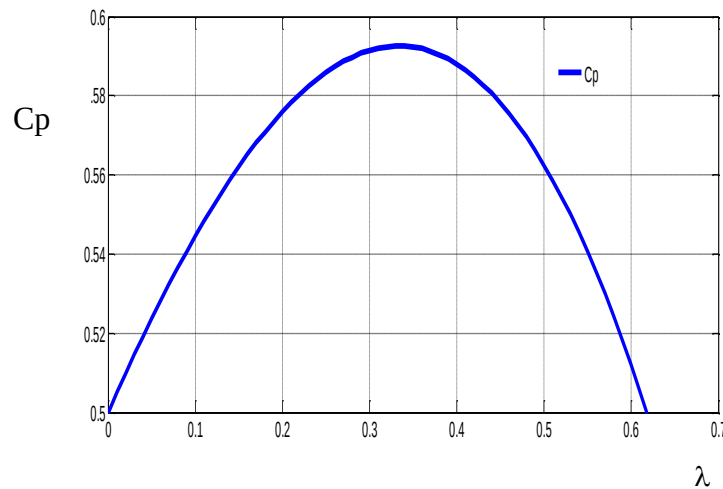


Figure I.45: Variation du coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse λ .

On peut voir que la fonction atteint son maximum pour $V_1/V_2 = 1/3$, (freinage du vent à 1/3 de sa vitesse originale) la valeur maximale pour la puissance extractible du vent étant de 0,59 ou 16/27 de la puissance totale contenue dans le vent.

Il est important de souligner que le coefficient de puissance peut être en fonction de la vitesse relative $C_p(\lambda, \beta)$ pour les turbines éoliennes utilisant un système à décrochage aérodynamique "stall" ou en fonction de la vitesse relative λ et de l'angle de calage β , $C_p(\lambda, \beta)$ pour les turbines éoliennes utilisant un système d'orientation des pales "pitch".

I.3.2.11.2. Modèle de la turbine :

La mise en rotation des pales par le vent crée une puissance mécanique P_t sur l'arbre de la turbine exprimée par :

$$P_t = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S V_{\text{vent}}^3}{2} \quad (\text{I.22})$$

Si l'on souhaite comparer les coefficients de puissance des différentes éoliennes, on peut prendre pour repère la limite de Betz qui est environ 0,59; celui d'une éolienne Savonius est environ 0,22; celui d'une éolienne tripale très performante est environ 0,48 (notre cas). Pour les éoliennes Darrieux, il est environ 0,4[38].

pour un $C_p(\lambda, \beta)$ égal 0.59

La (Figure I.46) : variation de la puissance en fonction de la vitesse du vent

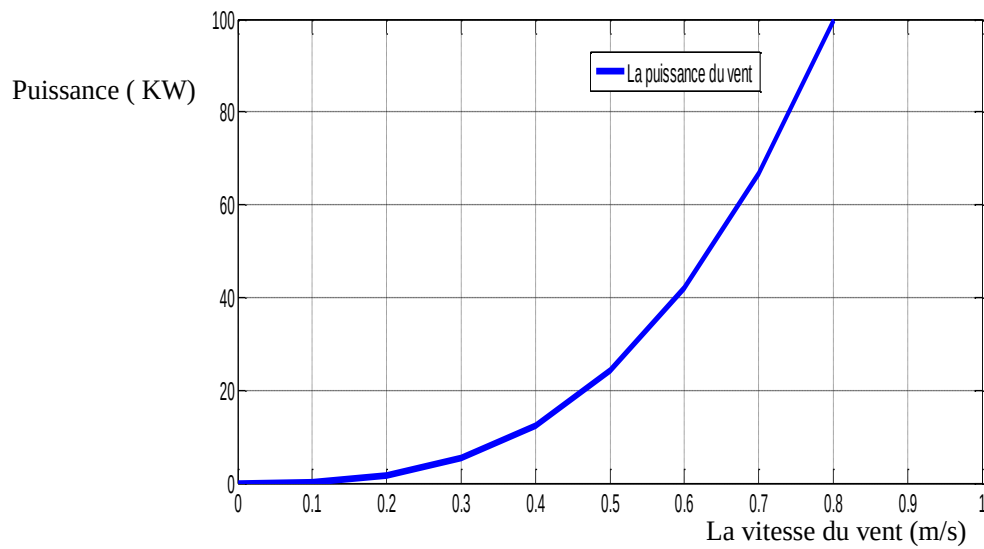


Figure I.46 : variation de la puissance en fonction de la vitesse

En se basant sur les caractéristiques de la turbine, le coefficient de puissance est représenté par l'expression suivante [39]:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (\text{I.23})$$

Avec :

$$\begin{cases} \frac{1}{\lambda_t} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{1}{\beta^3 + 1} \\ \lambda = \frac{\Omega_t R}{V_1} \end{cases} \quad (I.24)$$

Tel que:

R : Rayon des pales [m],

λ : Vitesse relative de la turbine,

β : Angle d'orientation des pales [°],

Ω_t : Vitesse de rotation de la turbine [rad/s].

$c_1 = 0.5176, c_2 = 116, c_3 = 0.4, c_4 = 5, c_5 = 21, c_6 = 0.0068$

Donc, la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors:

$$P_{aér} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (I.25)$$

La Figure (I.47) illustre un exemple, montrant l'évolution du coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse relative λ pour différentes valeurs de l'angle d'orientation des pales β

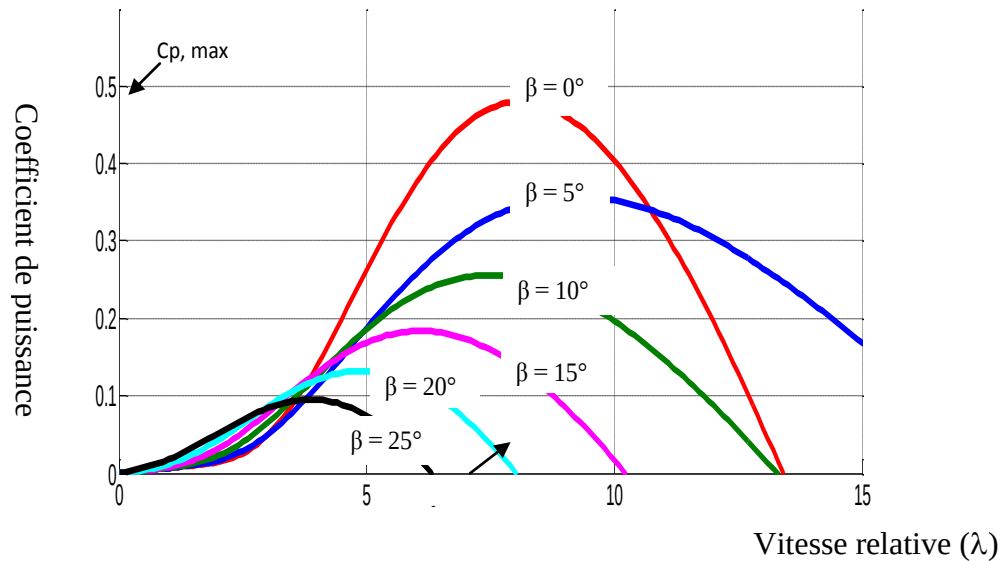


Figure (I.47) : Coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative sous différents angles d'orientation des pales

Nous remarquons aussi que l'augmentation de β permet de dégrader le coefficient et par conséquent, provoquer la diminution de la puissance mécanique récupérée sur l'axe de la turbine éolienne. Et on observe que la valeur maximale de la courbe ne dépassera jamais la limite théorique de Betz qui est égale à 0.59.

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_t} \quad (I.26)$$

I.3.2.11. 3. Modèle du multiplicateur :

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de turbine à la vitesse de génératrice .Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain .Les frottement du multiplicateur sont négligés et les pertes sont considérées nulles. Donc le couple mécanique sur l'arbre du générateur [40] :

$$\begin{cases} \Omega_g = G \cdot \Omega_t \\ C_g = \frac{1}{G} C_t \end{cases} \quad (I.27)$$

G : Rapport de multiplication.

C_g : Couple mécanique adaptant la vitesse de la turbine à celle du générateur ainsi :

I.3.2.11.4. Modèle de l'arbre :

La liaison entre la turbine et la partie électrique de l'éolienne est représentée ici par l'intermédiaire de l'équation du mouvement. Plusieurs modèles du comportement mécanique de l'arbre de l'éolienne, sont proposés dans la littérature. La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J_t et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine.

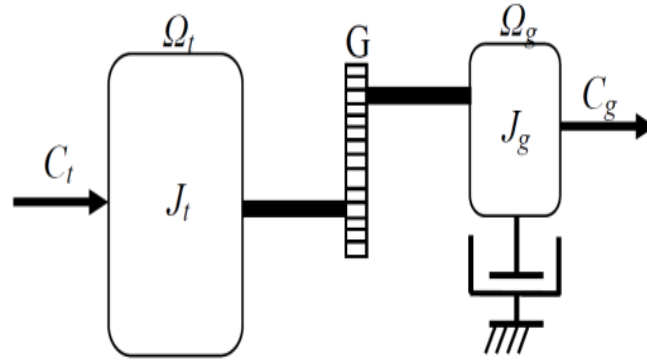


Figure I.48:Modèle mécanique simplifié de la turbine

Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice J_g : [43]

$$J = J_g + J_t / G^2 \quad (\text{I.28})$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. D'après la Figure (I.38), nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la génératrice par

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} = C_{méc} = C_g - C_{em} - C_f \quad (\text{I.29})$$

Donc, l'évolution de la vitesse mécanique Ω_g dépend du couple mécanique appliqué au rotor de la génératrice $C_{méc}$ qui est la résultante du couple de la turbine après multiplicateur, le couple électromagnétique produit par la génératrice C_{em} , et le couple de frottement visqueux C_f donné par la relation :

$$C_f = f \cdot \Omega_g \quad (\text{I.30})$$

On remplace les équations (I.29), (I.30), nous aurons :

$$C_g - C_{em} = J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega_g \quad (\text{I.31})$$

Le schéma bloc de la Figure (I.38) correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation Ω_g de la génératrice, donc de la

turbine, peut être contrôlée par action soit sur l'angle de calage des pales β , soit sur le couple électromagnétique C_{em} de la MADA. La vitesse du vent v est considérée comme une entrée perturbatrice au système.

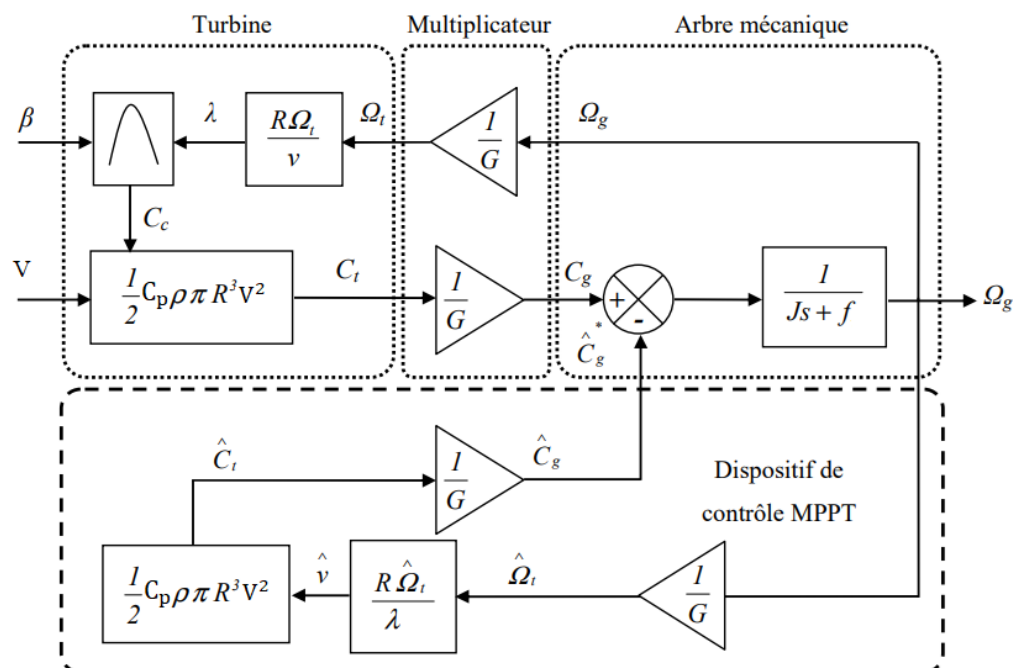


Figure I.49 : Schéma bloc du modèle de toute la turbine éolienne

I.3.3. Système du stockage:

Les systèmes hybrides sont généralement équipés de systèmes du stockage afin de garantir une alimentation de la charge à une durée relativement longue (des heures ou même des jours) ou pour éliminer les fluctuations dans le cas d'un système hybride connecté au réseau

Le système de stockage est généralement à base des batteries qui sont d'habitude de type plomb-acide, mais il existe aussi le stockage par pompage d'eau, par volant d'inertie ou le stockage d'hydrogène comme forme de stockage de l'énergie électrique. [41]

I.3.4. Convertisseurs:

Dans un système hybride, plusieurs convertisseurs sont impliqués dans la chaîne de transformation de l'énergie, et ce, à cause de l'existence de plusieurs formes de courant. Nous pouvons distinguer trois types des convertisseurs : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs [42][41]

- Les redresseurs convertissent le courant alternatif en courant continu afin de pouvoir charger les batteries, ce type des convertisseurs sont des appareils simples, pas cher et ont un bon rendement. [42][41]
- Les onduleurs réalisent la conversion du courant continu en courant alternatif, les redresseurs et les onduleurs sont parfois remplacés par un seul appareil qui effectue les deux fonctions, appelé convertisseur bidirectionnel. [42][41]
- Les hacheurs sont des convertisseurs qui permettent de réaliser la conversion CC /CC pour adapter la tension entre deux sources [46].

I.3.5. Charges :

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Il existe des charges à caractère résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau etc. Les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de puissance réactive. Les charges à CC peuvent avoir aussi des composants inductifs, mais les seuls effets introduits par ceux-ci sont les variations transitoires de tension et courant pendant les changements dans le fonctionnement du système. [3]

I.4. Conclusion :

Ce chapitre a été dédié à une description un peu détaillé d'un système hybride constitué essentiellement de deux sources d'énergie renouvelables à savoir ; le système solaire photovoltaïque et le système éolien dont l'objectif est de comprendre les fonctionnalités et les lois qui régissent chaque système

Dans le chapitre qui suit, nous exposerons la description détaillée du banc d'essais didactique du système hybride éolien-photovoltaïque

Chapitre II :

Description du banc didactique
du système hybride

II.1 Introduction

Le banc d'essais didactique du système hybride permet l'étude et l'expérimentation de la conversion de l'énergie du soleil en énergie électrique par effet photovoltaïque et de l'énergie éolienne en énergie électrique grâce à l'utilisation d'un aérogénérateur. La configuration du système est autonome (isolé du réseau électrique). A la (figureII.1)on montre une image d'ensemble[44]



FigureII.1 :image du bancdidactique du système hybride

Composition:

A) Panneau photovoltaïque de cellules au silicium monté sur roues

B) Aérogénérateur à axe horizontal

C) Panneau de commande avec:

C.1) Régulateur de charge

C.2) onduleur à commande PWM

C.3) Charges électriques

C.4) Instrumentation électrique pour détecter le flux (courant et tension) d'énergie dans les différentes branches du circuit

C.5) Carte d'acquisition de données avec interface USB pour la connexion au PC

D) Batterie tampon

E) Capteur de rayonnement solaire

F) Capteur de vitesse et de direction du vent

1. Caractéristiques principales:

- Le banc peut fonctionner tant en présence qu'en absence de soleil et/ou vent.

- Le panneau photovoltaïque peut être utilisé tant en extérieur qu'en intérieur. Dans le second cas, un dispositif optionnel est nécessaire. Qui consiste en l'utilisation d'un dispositif d'éclairage par lampes à incandescence (figure II.2(a))
- Le panneau photovoltaïque peut être déconnecté du système pour la construction de la courbe caractéristique. Un instrument optionnel est nécessaire (un rhéostat de valeur $20\ \Omega$ 600 W) est livrée avec le banc(figure II.2(b)).
- L'aérogénérateur peut être utilisé tant en extérieur qu'en intérieur. Dans le second cas, un dispositif optionnel est nécessaire (un moteur asynchrone commandé par un variateur de vitesse pour simuler l'effet du vent extérieur (figure II.2(c)).
- En cas d'utilisation en extérieur, l'aérogénérateur suit la direction du vent étant libre de tourner autour de l'axe du support vertical.
- Le système peut être connecté au réseau public. Dans ce cas, un dispositif optionnel est nécessaire.
- Les données expérimentales peuvent être enregistrées pour une analyse ultérieure[44]

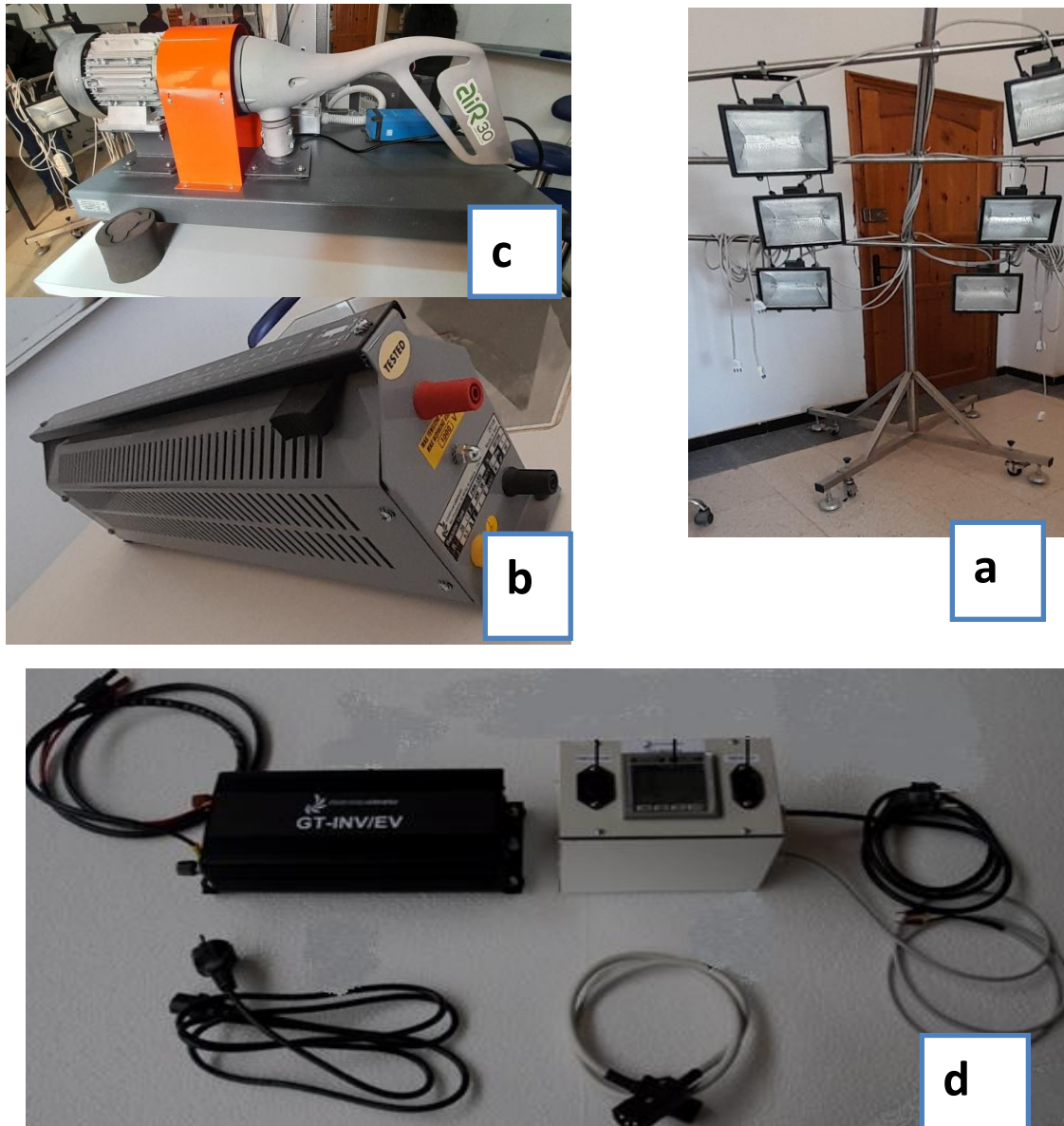


Figure II.2 : Instrument optionnels du banc d'essais du système hybride

- a- Dispositif d'éclairage par lampes b- Rhéostat
c- Système d'entraînement de l'éolienned- Onduleur GT-INV/EV

Principe de fonctionnement:

La figure suivante montre le schéma synoptique du banc d'essais en cas de présence et absence de la source primaire : le vent et le soleil[44]

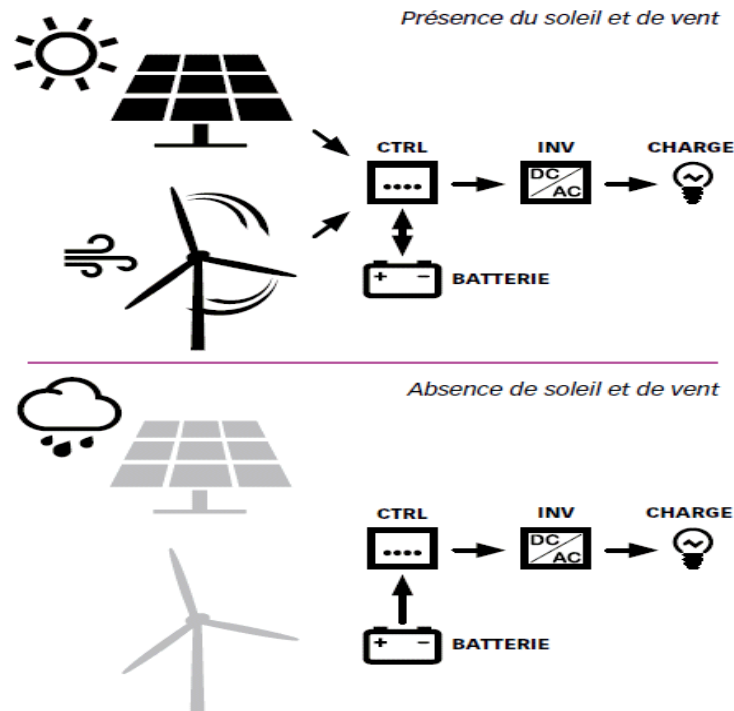


Figure II.3 : Principe de fonctionnement

- En présence du soleil et/ou de vent et en absence de charges, toute l'énergie produite par le système recharge la batterie.
- En absence de soleil et de vent, toute l'énergie consommée par l'utilisateur (charges) est prise sur la batterie.
- En présence de soleil et/ou de vent et des charges, l'énergie produite par le système recharge en partie la batterie et en partie alimente les charges.
- Lorsque la consommation est supérieure à l'énergie solaire et/ou éolienne disponible, l'énergie supplémentaire nécessaire est fournie par la batterie.

Le générateur éolien et / ou le panneau photovoltaïque produisent de l'électricité à partir de la source d'énergie renouvelable disponible. Cette électricité est utilisée pour alimenter la batterie et / ou pour alimenter les charges. Lorsque la demande de puissance des charges est supérieure à l'énergie disponible, l'énergie supplémentaire requise est fournie par la batterie. Au contraire, quand il est plus bas, l'énergie excédentaire alimente la batterie.

En ce qui concerne le fonctionnement du générateur éolien, notez qu'au-dessus d'un seuil minimum de vent, la turbine commence à tourner. Lorsque les pales tournent à une vitesse suffisante, la LED, placée sur le corps de la turbine et signalant la fourniture d'énergie à la batterie, s'active. [44]

La figure suivante montre le détail des connexions électriques entre les différents composants du système.

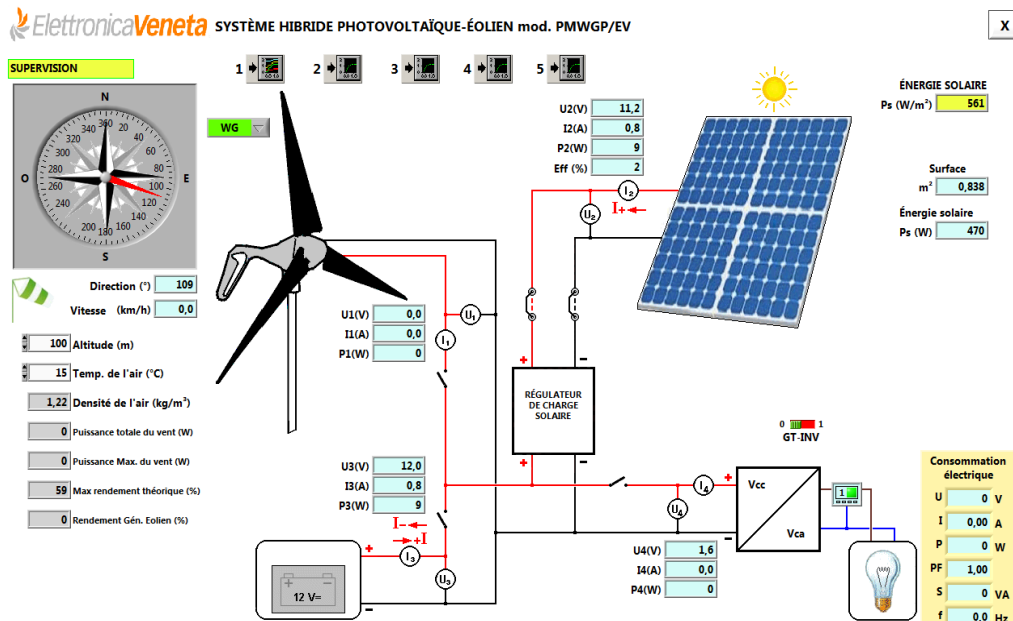


Figure II.4 : le détail des connexions électriques entre les différents composants du système (source logiciel LABVIEW RUN-time)

II.2 Description des composants principaux

II.2.1 Le panneau de commande du système hybride

Les figures II.5 montrent le panneau de commande de l'équipement. [44]

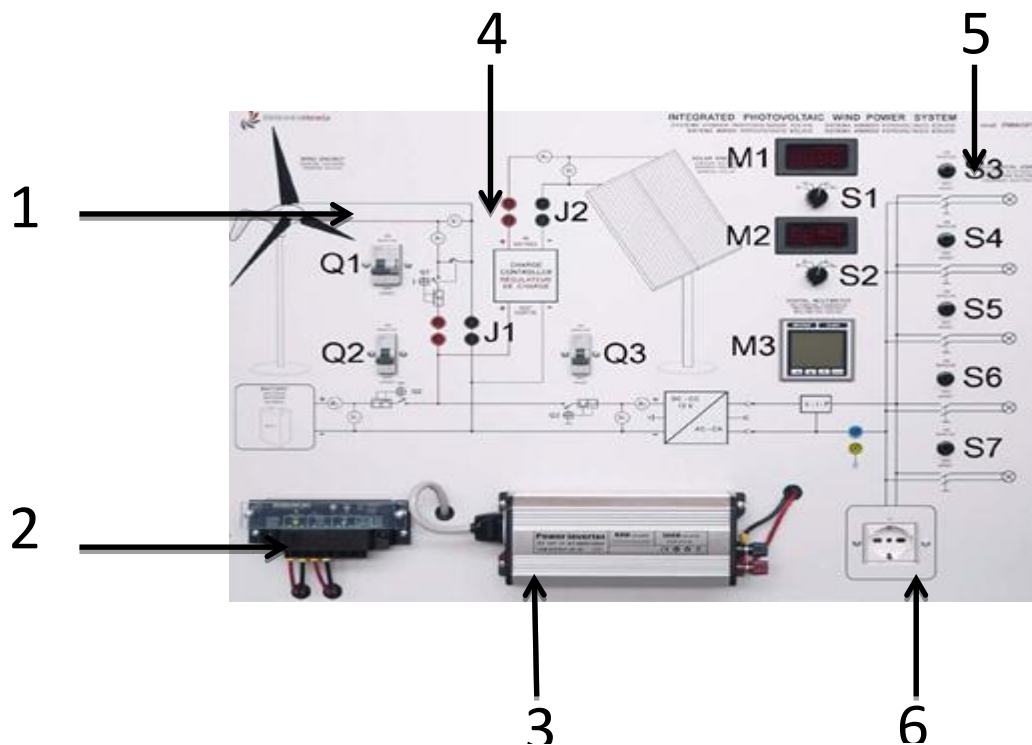


Figure II.5: face avant du panneau de commande

1. Diagramme synoptique coloré
2. Régulateur de charge solaire
3. Convertisseur CC / CA

J1: bornes du générateur éolien

J2: bornes du panneau solaire

Q1: interrupteur du générateur éolien

Q2: interrupteur de la batterie

Q3: interrupteur de l'inverseur les lampes

4. Bornes de sécurité

5. Interrupteurs pour charges électriques

6. Prise pour connexion de charges externes

S1: sélecteur du voltmètre

S2: sélecteur de l'ampèremètre

M1: voltmètre numérique CC

M2: ampèremètre numérique

M3: multimètre numérique CA

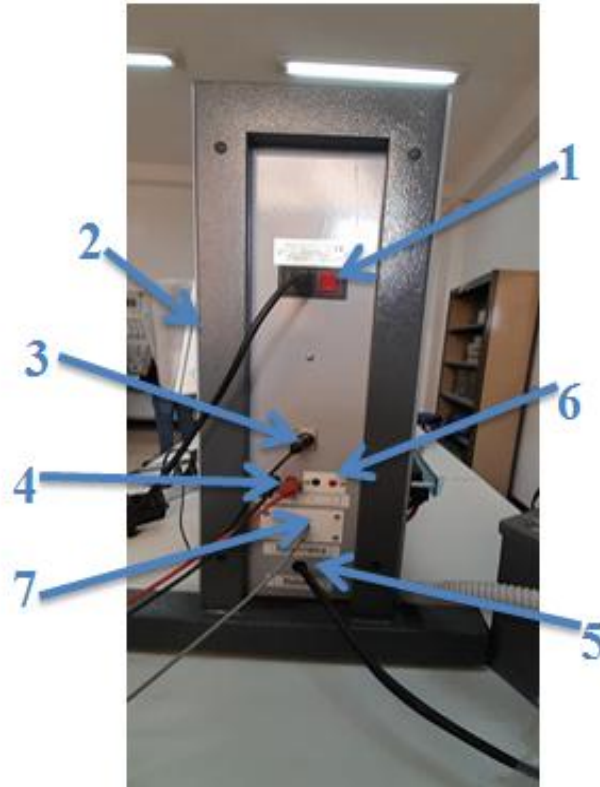


Figure II.6: Côté gauche du panneau de commande

- | | |
|-------------------------------------|---|
| 1. Interrupteur général et fusible | 5. Câble de connexion à la batterie |
| 2. Lampes (charges CA) | 6. Bornes du GT-INV/EV (option) |
| 3. Port USB | |
| 4. Bornes du panneau photovoltaïque | 7. Connecteur du capteur de rayonnement solaire |



Figure II.7: Côté droit du panneau de commande

1. **Connecteur** du générateur éolien
2. **Trou** pour capteur de vitesse et de direction du vent

II.2.2 Le panneau photovoltaïque de cellules au silicium

La Figure II.8 montre le panneau photovoltaïque de l'équipement

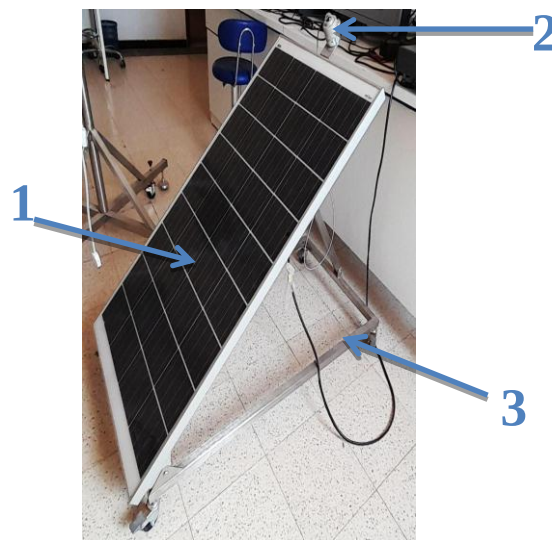


Figure II.8 : Le panneau photovoltaïque

1. Panneau photovoltaïque avec puissance nominale de 120 W
2. Capteur de rayonnement solaire
3. Châssis en acier avec roues

Le tableau II.1 montre les spécifications électriques du panneau Photovoltaïque fourni avec l'équipement.

Puissance nominale(W_p)	W	120
Intensité de court-circuit (I_{SC})	A	7,40
Tension de circuit ouvert (V_{OC})	V	21,5
Tension à puissance maxi (V_m)	V	17,7
Intensité à puissance maxi (I_m)	A	6,78

Tableau II.1 :Spécifications électriques du panneau photovoltaïque dans la conduction STC

II.2.3 Le générateur éolien

La figure II.9 montre le générateur éolien de l'équipement. [44]

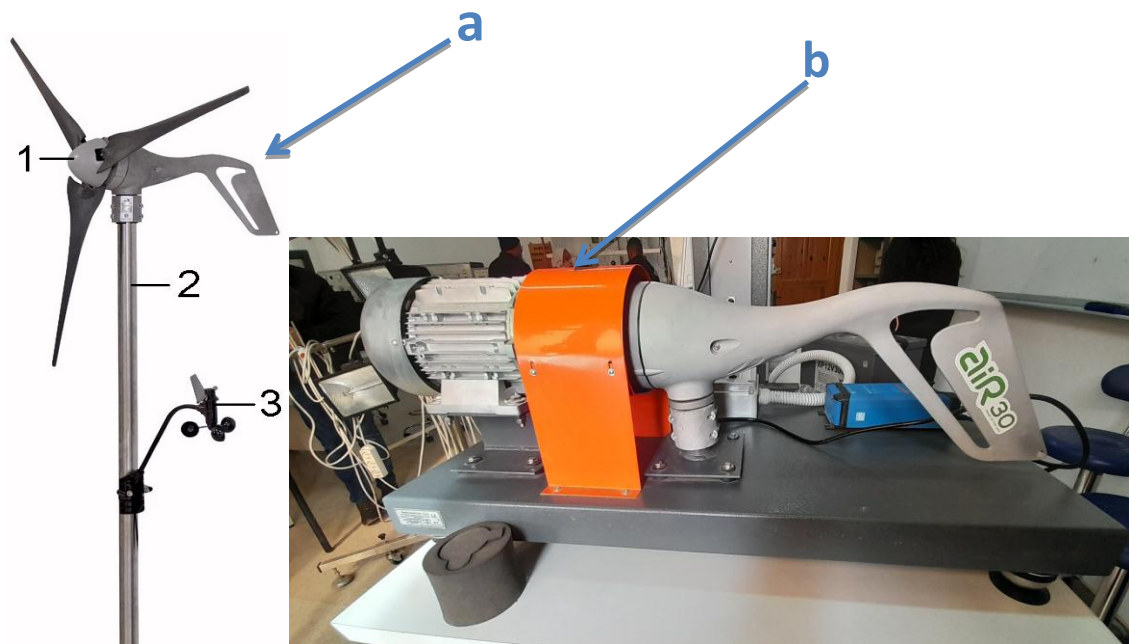


Figure II.9: le générateur éolien de l'équipement

a.1 Générateur éolien, entraîné par un rotor à trois pales en matériaux composites dont les caractéristiques suivantes :

- Diamètre du rotor: 1,17 m
- Energie produite: environ 30 kWh/mois avec vitesse moyenne du vent 5.8 m/s
- Vitesse du vent d'activation (seuil): 3.6 m/s
- Vitesse du vent max: 49.2 m/s

En plus

- Alternateur de type brushless à aimants permanents (GSAP)

- Régulateur à microprocesseur: avec une tension de sortie 12 Vcc
- Protection contre les vents forts: contrôle électronique du couple

a.2 Poteau(mat) ou support en acier inox dont les caractéristiques:

- Longueur 1,5 m
- Diamètre extérieur: 48,1 mm

a.3 Capteur de vitesse et de direction du vent

b. Générateur éolien entraîné par un moteur asynchrone dont les caractéristiques :

la fréquence 50 Hz la tension 230/400 V (triangle / étoile)

le courant 7.9/4.6 A(triangle / étoile) la puissance 1.8 KW

facteur de puissance :0,78

II.2.4 La batterie tampon :

La figure II.10 montre la batterie tampon de l'équipement. [44]



Figure II.10 : batterie

- Tension nominale: 12 Vcc
- Capacité nominale (quantité de charge) : 100 Ah

II.2.5 Le 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.

Le régulateur de charge est réglé pour la batterie fournie, dans le cas de générateurs de 12 V la plage de variabilité est de 13,6 ÷ 17,0 V et la valeur de réglage est 14,1 V.

Pour modifier la valeur, on peut agir sur la manette positionnée sur le générateur, figure II.11 pos. A. 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.[44]

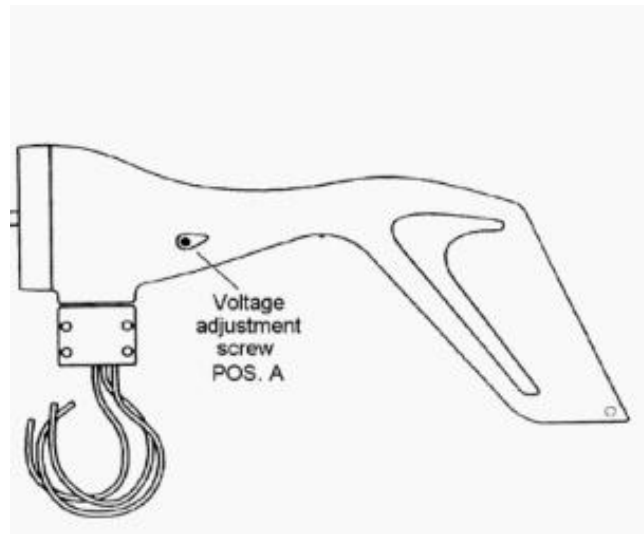


Figure II.11 : Vis pour ajuster la tension de charge de la batterie

II.2.6 Onduleurs inverseurs GT-INV/EV :

L'onduleur injecteur de réseau GT-INV/EV est une application spécifique conçu pour la liaison des Sources d'énergie renouvelable entre elles et au réseau public, d'une façon complètement "transparente" pour l'utilisateur.

En effet, ses fonctions principales consistent :

- à produire une sortie c.a. variable d'une entrée de tension c.c. constant (fonctionnement comme onduleur). La tension et la fréquence de sortie sont compatibles avec les paramètres du réseau, et elles peuvent être utilisées directement par les appareils électroménagers;
- à synchroniser sa sortie avec le réseau public (fonctionnement comme injecteur de réseau) pour envoyer de l'énergie électrique au réseau public, ou pour la recevoir du même réseau.

[45]

Description

L'onduleur réseau GT-INV/EV est un appareil que l'on devra nécessairement associer au générateur photovoltaïque du banc. Il en complète les potentialités didactiques et permet de simuler le fonctionnement d'un système de génération photovoltaïque connecté au réseau. La figure II.12 montre l'équipement. [45]

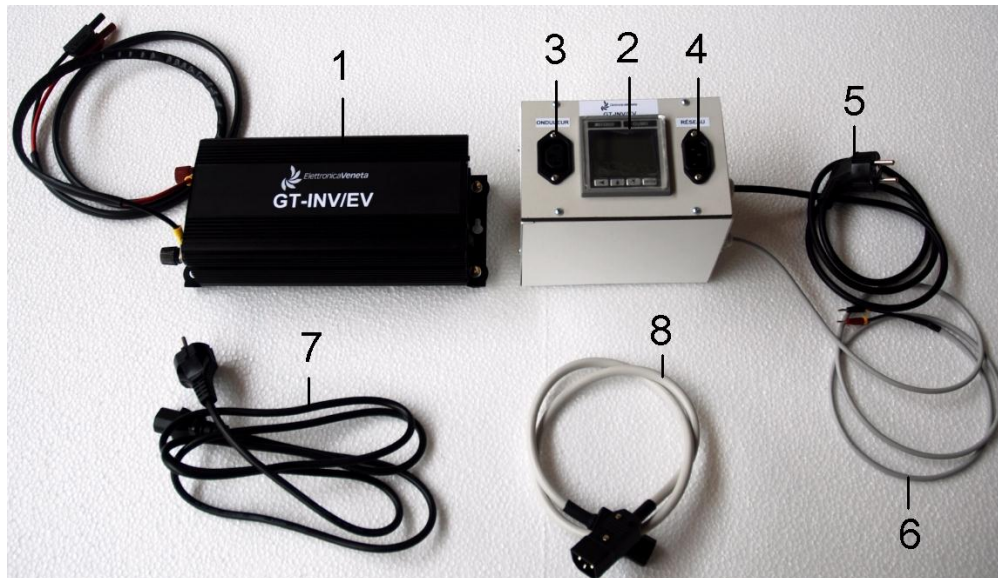


Figure II.12 : Onduleur réseau GT-INV/EV

- | | |
|---|--------------------------------------|
| 1- Onduleur réseau | 5- Câble d'alimentation |
| 2- Multimètre numérique MR | 6- Câble pour connexion RS485 |
| 3- Prise électrique pour connexion à l'onduleur | 7- Câble pour connexion au réseau |
| 4- Prise électrique pour connexion au réseau | 8- Câble pour connexion à l'onduleur |

II.2.7. Onduleur:

Un onduleur est un convertisseur statique (DC-AC) qui assure la conversion de l'énergie provenant d'une source continue en une énergie alternative



Figure II.13 : onduleur

PROGRAMME D'APPLICATION POUR PMWGP/EV

De Menu de Windows sélectionnez Start – Programs – ElettronicaVeneta PM-WGP – PM-WGP.

Quand on lance le programme, sur l'écran on voit apparaître la page- écran de SUPERVISION.

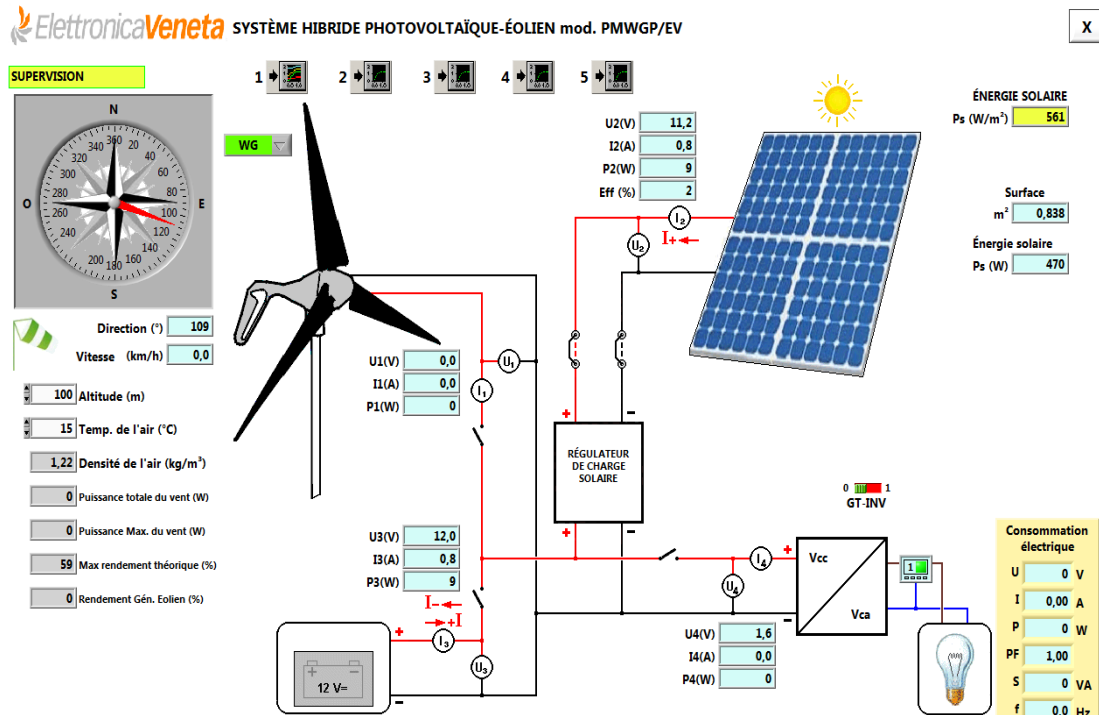


Figure II.14 : le détail des connexions électriques entre les différents composants du système (source logiciel LABVIEW RUN-time)

Elle permet d'afficher :

- Courant électrique sortant de l'aérogénérateur I1 (A);
- Tension électrique sortant de l'aérogénérateur U1 (V);
- Puissance électrique produite par l'aérogénérateur P1 (W), qui Peut être exprimée comme produit $U1 \times I1$;
- Courant électrique sortant du panneau photovoltaïque I2 (A);
- Tension électrique sortant du panneau photovoltaïque U2 (V);
- Puissance électrique produite par le panneau photovoltaïque P2(W), qui peut être exprimée comme produit $U2 \times I2$;
- Courant électrique sortant de la batterie I3 (A)
- Tension électrique sortant de la batterie U3 (V)

- Puissance électrique sortant de la batterie P3 (W), qui peut être exprimée comme produit $U_3 \times I_3$;
- Courant électrique en amont de l'onduleur I4 (A);
- Tension électrique en amont de l'onduleur U4 (V);
- Puissance électrique en amont de l'onduleur P4 (W), qui peut être exprimée comme produit $U_4 \times I_4$
- Vitesse instantanée du vent v (km/h);
- Direction du vent ($^{\circ}$);
- Densité de l'air ρ (kg/m³);
- Puissance totale du vent (W),

TENDANCE DE DONNÉES

Pour la visualisation des différentes courbes, on accède aux icônes 1 , 2, 3, 4, 5



Pour plus de détails voir [44]

II.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le banc didactique du système hybride éolien-photovoltaïque en se basant sur la documentation délivrée par son fournisseur « **ElectronicaVeneta** » ; et qui nous a permis de nous familiariser avec le banc afin de réaliser différents essais pratiques en toute simplicité. Ce qui fera l'objet du chapitre suivant

Chapitre III :

Essais pratiques

III.1 Introduction :

Afin de mieux comprendre les fonctionnalités des différents composants de notre banc didactique qui simule le fonctionnement d'un système hybride Eolien-Photovoltaïque, nous effectuerons dans ce qui suit une série d'essais pratiques [44]:

III.2 Essais pratiques :

III.2.1.1 Essai 1 : Analyse du comportement du système sans soleil ni vent et avec / sans charge électrique

Le but de cet exercice est d'analyser le comportement du système sans que les rayons du soleil ne heurtent le panneau photovoltaïque ni vent qui alimente le générateur éolien et avec la batterie comme source unique d'énergie : le test est d'abord réalisé sans connecter la charge, ensuite une charge électrique connectée.

Les charges électriques utilisées dans cet exercice seront les lampes disponibles sur le panneau arrière de l'équipement. [44]

III.2.1.2 Préparation de l'essai 1

- Allumer l'interrupteur général du banc.
- Fermer l'interrupteur Q2 de la batterie (**BATT**).
- Fermer l'interrupteur Q3 de l'onduleur (**INV**).
- Agissez sur les sélecteurs **S1** et **S2** (**Figure II.5**) et lisez les valeurs indiquées par les instruments de mesure **M1**, **M2** et **M3** (**Figure II.5**) du panneau de commande, au début sans charge électrique appliquée au système, puis après avoir alimenter la charge. L'insertion des interrupteurs **S3÷S7** (**Figure II.5**) permet d'alimenter la charge (**LAMPES**).
- Résumer les résultats dans un tableau de mesures



Figure III.1 : Image de préparation de l'essai 1

III.2.1.3 Mesures et interprétation des résultats

Le tableau III.1 répertorie les données résultant des mesures et des calculs (la puissance électrique transférée à chaque branche du circuit en courant continu est obtenue en multipliant les valeurs correspondantes des tensions et de courants)[44]

			MESURE 1	MESURE 2	MESURE 3	MESURE 4	MESURE 5	MESURE 6
Lampes allumées			0	1	2	3	4	5
Instrument M1	3	V	12.3	11.8	11.6	11.2	11.4	11.4
	4		12.3	11.8	11.6	11.2	11.4	11.4
Instrument M2	3	A	0.3	4.5	9	13.6	14.3	15.4
	4		0.3	4.5	9	13.6	14.3	15.4
Instrument M3	V		229.5	228.5	228.5	226	230	230.2
	A		0	0.209	0.412	0.618	0.64	0.712
	W		0	47	93	139	146	162
Puissance BATT	W		3.69	53.1	104.4	152.32	163.02	175.56
Puissance INV	W		3.69	53.1	104.4	152.32	163.02	175.56
Puissance LOAD	W		0	47	93	139	146	162

Tableau III.1 : Tableau de mesures de l'essai 1

Remarque : Il faut noter que **M1** indique dans la position 3 la tension aux bornes de la batterie et dans la position 4 la tension aux bornes de l'onduleur.

M2 : indique dans la position 3 le courant délivré par la batterie et dans la position 4 le courant absorbé par l'onduleur.

M3 : indique la tension, le courant et la puissance active consommée par la charge.[44]

Interprétation des résultats :

- On constate qu'il y a une légère diminution de la tension aux bornes de la batterie avec l'augmentation de la charge.
- La tension délivrée par l'onduleur à la charge est proche à la valeur nominale 230V.
- La puissance délivrée par la batterie et transmise par l'onduleur à la charge est la somme des deux puissances : une faible partie est perdue ou consommée par l'onduleur tandis que la majeure partie est transmise à la charge. Par exemple : dans la mesure 4 :

$P_{Batt} = P_{inv} = 104,4 = 93 + 11,4 \text{ W}$, 11,4 W représente la puissance consommée par l'onduleur.[44]

III.2.2.1 Essai 2 : Analyse du comportement du système avec la lumière du soleil et sans charge électrique

Le but de cet exercice est d'analyser le comportement du système lorsque les rayons du soleil frappent le panneau PV et qu'aucune charge n'est connectée. Dans cette condition, la batterie est considérée comme seule charge.

III.2.2.2 Préparation de l'essai 2 (Figure III.2)

- Placer le panneau en face des rayons soleil (position sud) avec une bonne inclinaison
- Lire le niveau d'éclairement à l'aide du logiciel Lab-View
- Allumer l'interrupteur général du banc.
- Fermer l'interrupteur Q2 de la batterie (**BATT**).
- Insérer les cavaliers électriques du panneau photovoltaïque J2 (**PV**).
- Agissez sur les sélecteurs **S1** et **S2** et lisez les valeurs indiqués par les instruments **M1** et **M2** du panneau de commande [44]

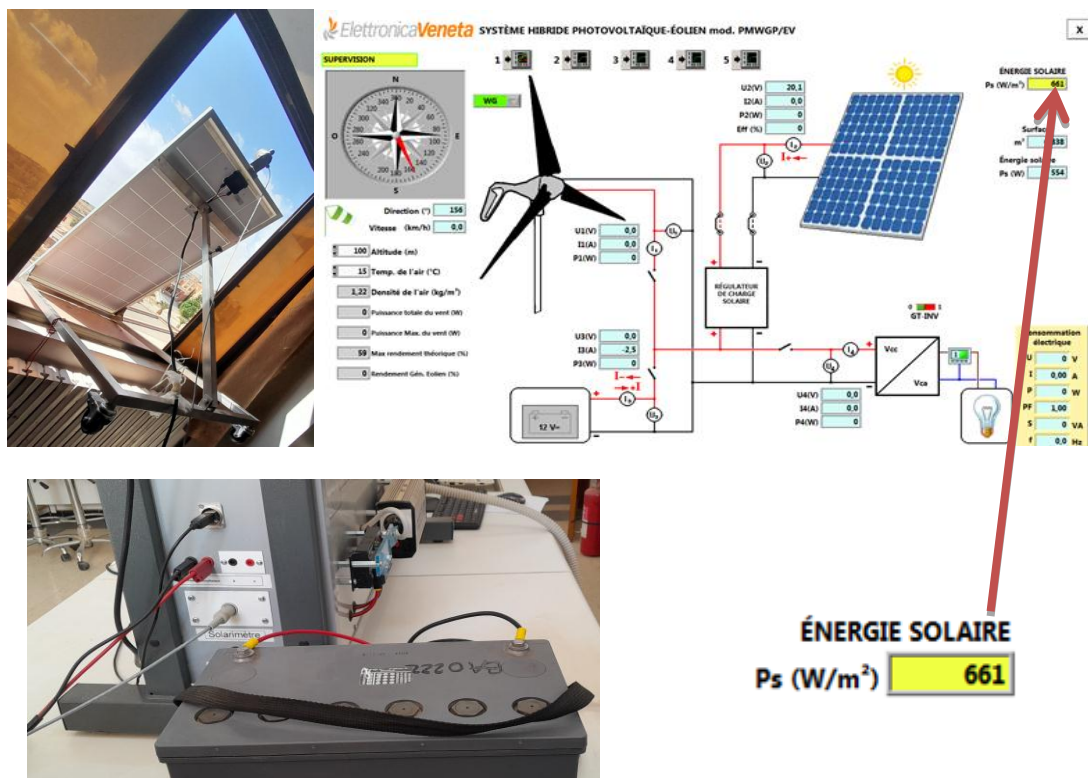


Figure III.2 : Image de préparation de l'essai 2

III.2.2.3 Mesures et interprétation des résultats

Le tableau 3.2 répertorie les données résultant des mesures et des calculs (la puissance électrique transférée à chaque branche du circuit est obtenue en multipliant les valeurs correspondantes de tension et de courant).[44]

Rayonnement Solaire (irradiation)		$E = 855W/m^2$	
Instrument M1	1	V	0
	2		13.1
	3		12.7
	4		0
Instrument M2	1	A	0
	2		6.3
	3		-6.3
	4		0
Puissance PV		(W)	82.53
Puissance BATT		(W)	-80.01

Tableau III.2 ; Tableau de mesure de l'essai 2

Interprétation des résultats

- Dans cet essai, le flux énergétique délivré par le panneau photovoltaïque sert à charger la batterie (**PV** $\longrightarrow$ **Batterie**), les instruments de mesure M1, M2 indiquent dans **les positions 2 et 3** : les tensions et les courants aux bornes du PV et la batterie, on remarque la tension de la batterie reste légèrement inférieure à cause du rôle que joue le régulateur de charge
- Dans **la position 4** : le courant absorbé par la batterie est égal à celui du PV et prend un signe négatif (la batterie agit comme une charge)
- Les puissances sont presque égales (la petite différence est due à la limitation de tension de la batterie) [44]

III.2.3.1 Essai 3 : Analyse du comportement du système avec la lumière du soleil et charge électrique (PV alimentant la batterie et une charge électrique)

Le but de cet exercice est d'analyser le comportement du système lorsque les rayons du soleil frappent le panneau photovoltaïque et qu'une charge électrique est connectée. Dans cette condition, la batterie peut aussi servir comme charge.

Les lampes disponibles sur le panneau arrière du banc seront utilisées comme charge électrique.

III.2.3.2 Préparation de l'essai 3

- Placer le panneau en face des rayons soleil (position sud) avec une bonne inclinaison.
- Lire le niveau d'éclairement à l'aide du logiciel Lab-View
- Allumer l'interrupteur général du banc.
- Fermer les interrupteurs Q2 et Q3 de la batterie (**BATT**) et de l'onduleur (**INV**).
- Insérer les cavaliers électriques du panneau photovoltaïque J2 (**PV**).
- Agissez sur les sélecteurs **S1** et **S2** et lisez les valeurs indiquées par les instruments **M1**, **M2** et **M3** du panneau de commande, au début sans charge électrique appliquée au système, puis après avoir alimenté la charge. L'insertion des interrupteurs **S3 ÷ S7** permet d'alimenter la charge (**LAMPES**). [44]

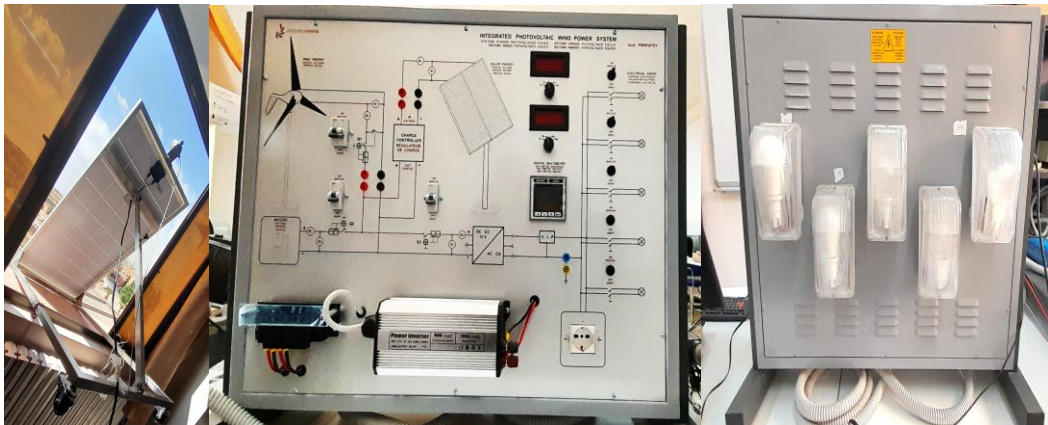


Figure III.3 : Image de préparation de l'essai 3

III.2.3.3 Mesures et interprétation des résultats

Le tableau III.3 répertorie les données résultant des mesures et des calculs (la puissance électrique transférée à chaque branche du circuit est obtenue en multipliant les valeurs correspondantes de tension et de courant).[44]

			MESURE 1	MESURE 2	MESURE 3	MESURE 4	MESURE 5	MESURE 6
Rayonnement solaire (W/m ²)			742	743	745	743	750	786
Lampes allumées			0	1	2	3	4	5
INSTRUMENT M1	2	V	13.1	12.7	12.3	12	11.8	11, 7
	3		12.8	12.4	12	11,8	11,6	11,5
	4		12.8	12.3	11,9	11.6	11.4	11,4
INSTRUMENT M2	2	A	6.4	6.5	6.4	6.5	6.5	6.5
	3		-6.4	-1.8	2.2	6.8	7.4	8.6
	4		0	4,5	8.7	13,3	14	15.2
INSTRUMENT M3		V	0	228.7	226.7	231.5	228.6	225.5
		A	0	0,2	0,41	0,62	0.64	0,72
		W	0	47	93	144	146	152
PUISSANCE (PV)		W	83.84	82.55	78.72	78	76.7	76.05
PUISSANCE (BATT)		W	-81.92	-22.32	26.4	80.24	85.84	98.9
PUISSANCE (INV)		W	0	55.35	103.53	154.28	159.6	173.28
PUISSANCE(LOAD)		W	0	47	93	144	146	152

Tableau III.3 : Tableau de mesure de l'essai 3

Interprétation des résultats :

➤ Dans cet essai, le flux énergétique est indiqué ci-dessous :

-En absence de charge :

1) PV → BATT (Mesure à vide)

-Si la puissance demandée par la charge est inférieure à la puissance photovoltaïque disponible (Mesures 1 et 2) :

2) PV → BATT + INV (Onduleur) → LOAD (Charge)

Si la puissance demandée par la charge est supérieure à la puissance photovoltaïque disponible (la BATTERIE fournit la différence de puissance entre PV et LOAD)

(Mesures 3, 4, 5 et 6):

3) (PV + BATT) → INV (Onduleur) → LOAD

Il faut noter que la puissance délivrée par l'onduleur (INV) compense la charge et sa consommation interne

- Les mesures se sont effectuées avec un éclairage suffisant et presque constant d'où la valeur du courant délivré par le panneau reste presque constant (environ 6.5 A) avec une tension au voisinage de 12V
- Selon que la charge exige une quantité de puissance électrique inférieure ou supérieure à l'énergie solaire disponible, la batterie peut servir de charge ou de générateur (lorsque le sélecteur **S2** est en troisième position, le signe du courant mesuré par l'instrument **M2** passe de négatif, pendant les deux premières mesures, à positif, à partir de la troisième mesure).
- Plus le nombre de lampes allumées est grand, plus l'absorption de courant et de puissance est importante. Dans le même temps, la tension de la batterie chute un peu tandis que la tension à la charge reste environ constante.[44]

III.2.4.1 Essai 4 : Calcul du rendement du panneau photovoltaïque

Le but de cet essai est de calculer le rendement du panneau photovoltaïque, à partir des données acquises lors de l'essai précédent. [44]

III.2.4.2 Préparation de l'essai 4

Cet essai est similaire à l'essai précédent (Essai 03) de point de vue préparation de la manipulation [44]

III.2.4.3 Mesures et interprétation des résultats :

Complétez le tableau III.3 (Essai 3) en considérant que :

- la surface totale du panneau photovoltaïque est de 0,838 m² ;
- l'énergie (Puissance) solaire incidente P_s sur le panneau photovoltaïque est égale au produit du rayonnement solaire E par la surface du panneau s ou $P_s = E \times S$;
- le rendement de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique résulte du rapport entre la puissance électrique fournie par le panneau photovoltaïque et l'énergie solaire incidente sur le même panneau. $\eta(\%) = \frac{P_u}{P_s} \times 100$ [44]

Le tableau 3.4 répertorie les données résultant des calculs.

			MESURE 1	MESURE 2	MESURE 3	MESURE 4	MESURE 5	MESURE 6
Rayonnement solaire	w/m ²		742	743	745	743	750	786
Lampes allumées			0	1	2	3	4	5
INSTRUMENT M1	2	V	13.1	12.7	12.3	12	11.8	11, 7
	3		12.8	12.4	12	11,8	11,6	11,5
	4		12.8	12.3	11,9	11.6	11.4	11,4
INSTRUMENT M2	2	A	6.4	6.5	6.4	6.5	6.5	6.5
	3		-6.4	-1.8	2.2	6.8	7.4	8.6
	4		0	4,5	8.7	13,3	14	15.2
INSTRUMENT M3	V		0	228.7	226.7	231.5	228.6	225.5
	A		0	0,2	0,41	0,62	0 .64	0,72
	W		0	47	93	144	146	152
PUISSANCE PV	W		83.84	82.55	78.72	78	76.7	76.05
PUISSANCE BATT	W		-81.92	-22.32	26.4	80.24	85.84	98.9
PUISSANCE INV	W		0	55.35	103.53	154.28	159.6	173.28
PUISSANCE LOAD	W		0	47	93	144	146	152
Surface panneau	m ²		0.838					
Energie solaire	W		622	622	622	622	622	622
Rendement PV	(%)		13.46	13 .25	12.64	12.52	12.31	12.21

Tableau III.4 : Tableau de mesure de l'essai 4

Interprétation des résultats :

- Le rendement du panneau photovoltaïque diminue légèrement lorsque la charge augmente comme le montre la courbe suivante :

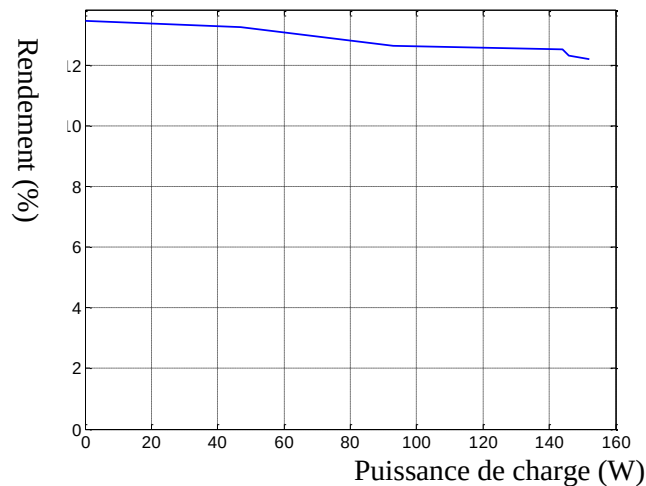


Figure III.4 Variation du rendement du PV en fonction de la charge

III.2.5.1 Essai 5 : Calcul du rendement de l'onduleur

Le but de cet essai est de calculer le rendement de l'onduleur, à partir des données acquises lors de l'essai 3. [44]

III.2.5.2 Préparation de l'essai 5

Cet essai est similaire à l'essai 3 de point de vue préparation de la manipulation [44]

III.2.5.3 Mesures et interprétation des résultats :

Complétez le tableau 3.3 (essai 3) en considérant que:

- le rendement de l'onduleur résulte du rapport entre la puissance électrique fournie à la charge et la puissance électrique absorbée par l'onduleur (INV) ou

$$\eta(\%) = \frac{P_{Load}}{P_{INV}} \times 100$$

Le tableau III.5 répertorie les données résultant des calculs.

		MESURE 1	MESURE 2	MESURE 3	MESURE 4	MESURE 5	MESURE 6
Lampes allumées		0	1	2	3	4	5
PUISSANCE INV	W	0	55.35	103.53	154.28	159.6	173.28
PUISSANCE LOAD	W	0	47	93	144	146	152
Rendement (INV)	(%)	0	84.9	89.82	93.33	91.47	87.71

Tableau III.5 : Tableau de mesure de l'essai 5

Interprétation des résultats :

- En charge, le rendement de l'onduleur reste environ constant comme le montre la figure suivante.

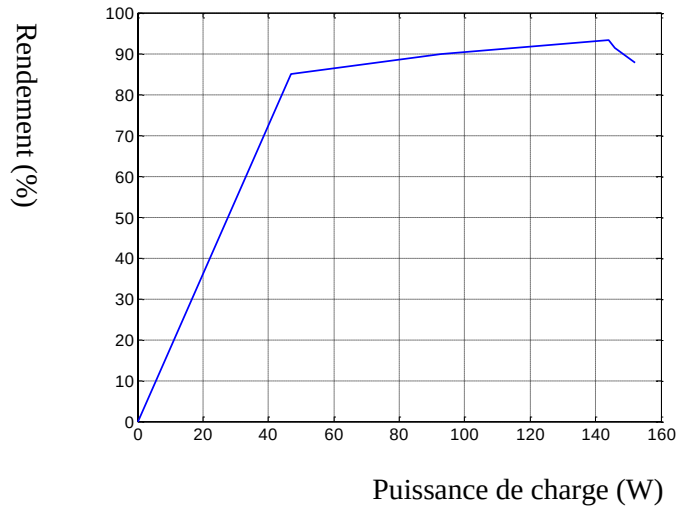


Figure III.5 : Variation du rendement de l'onduleur en fonction de la puissance de charge

III.2.6.1 Essai 6 : Analyser le comportement du système éolien sans charge électrique

Le but de cet exercice est d'analyser le comportement du système éolien lorsque le vent souffle et qu'aucune charge n'est connectée. Dans cette condition, la batterie agit comme la seule charge électrique. [44]

III.2.6.2 Préparation de l'essai 6

Cet exercice a été réalisé uniquement à l'aide du *Système de Fonctionnement Interne au Générateur Éolien* optionnel WG-I/EV vu la difficulté de réaliser des essais avec l'éolienne montée sur un mat de 2.5m et rotor entraîné par les pales (figure III.6)

- Allumer l'interrupteur général du banc.
- Fermer les interrupteurs Q2 et Q1 de la batterie (**BATT**) et de l'aérogénérateur (**WG**).
- Insérer les cavaliers électriques de l'aérogénérateur J1 (**WG**).
- Alimenter électriquement le *Système de Fonctionnement Interne au*

Générateur Éolien WG-I/EV. [44]



Figure III.6 : Image de préparation de l'essai 6

III.2.6.3 Mesures et interprétation des résultats :

Agissez sur les sélecteurs **S1** et **S2** et lisez les valeurs indiqués par les instruments **M1** et **M2** du panneau de commande en modifiant la vitesse du moteur électrique grâce à une commande par PC en utilisant le logiciel Lab-View (figure III.7 logiciel), ceci afin de simuler la variation de vitesse du vent. [44]

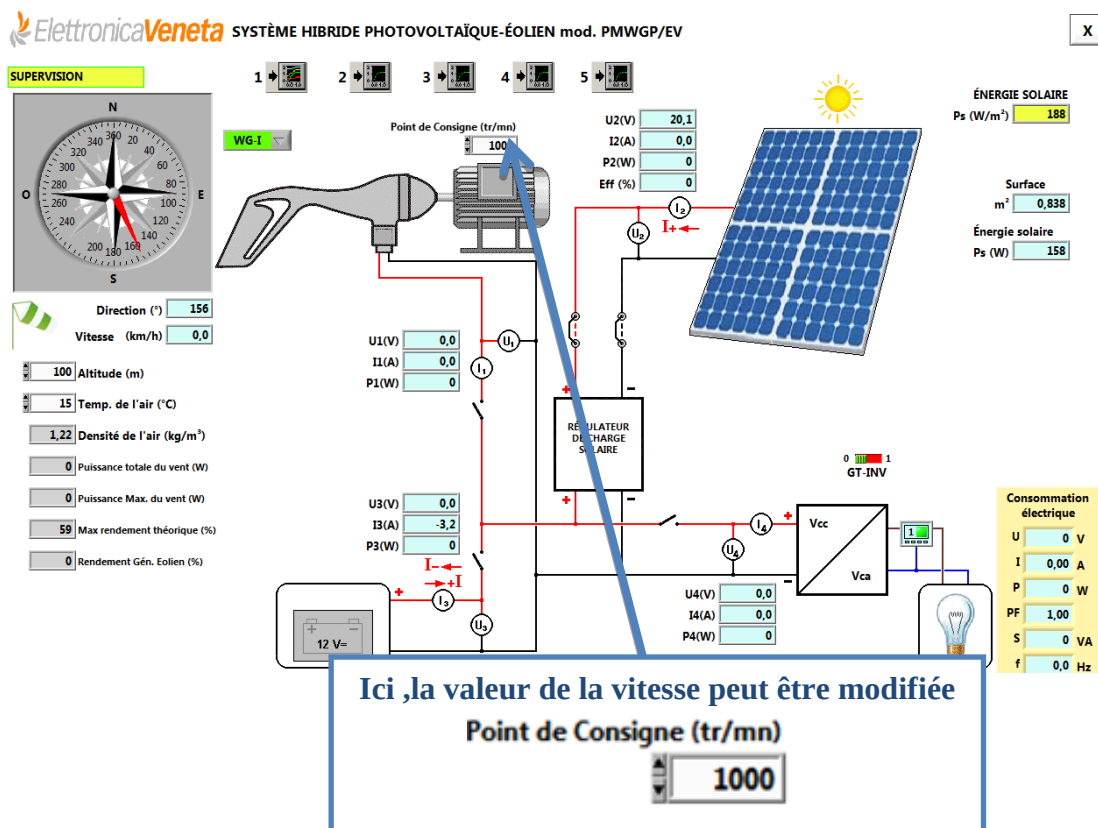


Figure III.7 : la variation de la vitesse via le logiciel

Le tableau III.6 répertorie les données résultant des mesures et des calculs (la puissance électrique transférée à chaque branche du circuit est obtenue en multipliant les valeurs correspondantes de tension et de courant) [44]

		Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Mesure 4	Mesure 5	Mesure 6	Mesure 7	Mesure 8	Mesure 9
Lampes allumées		0	0	0	0	0	0	0	0	0
Vitesse moteur (trs/mn)		0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600
Vitesse de vent	Km/h	0	1.5	4.1	7.4	11.2	15.6	21	26.1	32.6
Vitesse de vent	(m/s)	0	0,41	1,138	2,05	3,11	4,33	5,83	7,25	9,05
Instrument M1	1	V	12.1	12.1	12.2	12.2	12.2	12.4	12.6	12.8
	3		12.1	12.1	12.2	12.2	12.2	12.3	12.6	12.6
Instrument M2	1	A	0	0	0	0.1	0.6	2	3.1	4.6
	3		0	0	0	-0.1	-0.5	-2	-3.1	-4.6
Puissance WG	W		0	0	0	5	18	60	92	133
Puissance BATT	W		0	0	0	-1.22	-6.1	-24.6	-39.06	-57.97

Tableau III.6 : Tableau de mesure de l'essai 6

Interprétation des résultats :

- Le générateur éolien ne peut débiter une puissance chargeant la batterie qu'à partir d'un seuil de la vitesse du vent (7.4 Km/h ou 2.05m/s) , cette puissance faible et ne peut varier sensiblement qu'à partir de 15.6 Km/h ou 4.33m/s (Valeur pratique)
- Le signe du courant mesuré par l'instrument **M2**, troisième position, est négatif, indique que la batterie agit comme une charge,
- Notez que l'augmentation de la puissance électrique du système est plus que proportionnelle à l'augmentation de la vitesse du vent.

La courbe (Figure III.9) montre la variation de la puissance de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent. A partir du fichier data (Lab- View) expliqué dans la figure suivant[44]

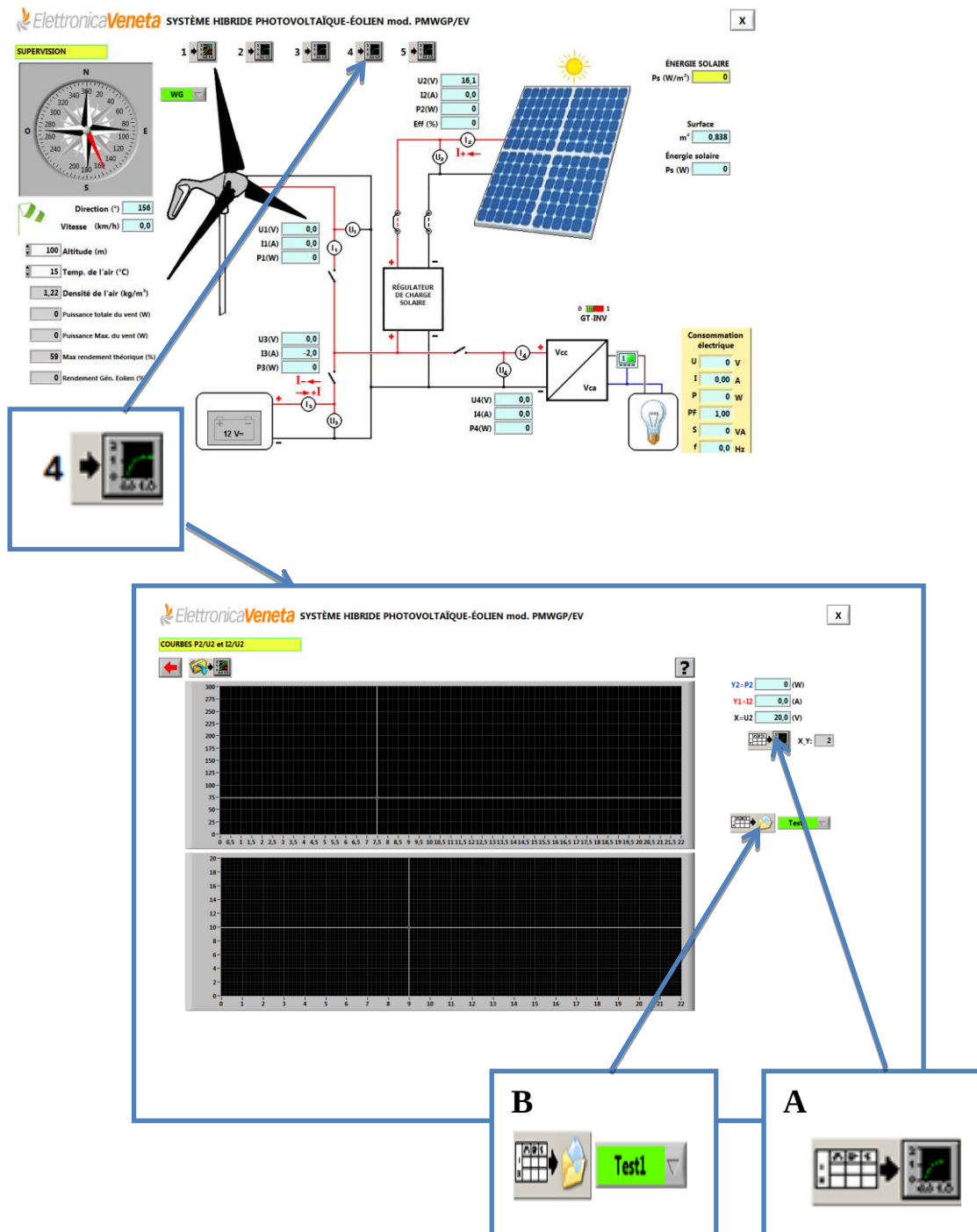


Figure III.8 : étapes de l'enregistrement du fichier data (Lab- View)

A : enregistrer les mesures

B : enregistrer les résultats dans un fichier data

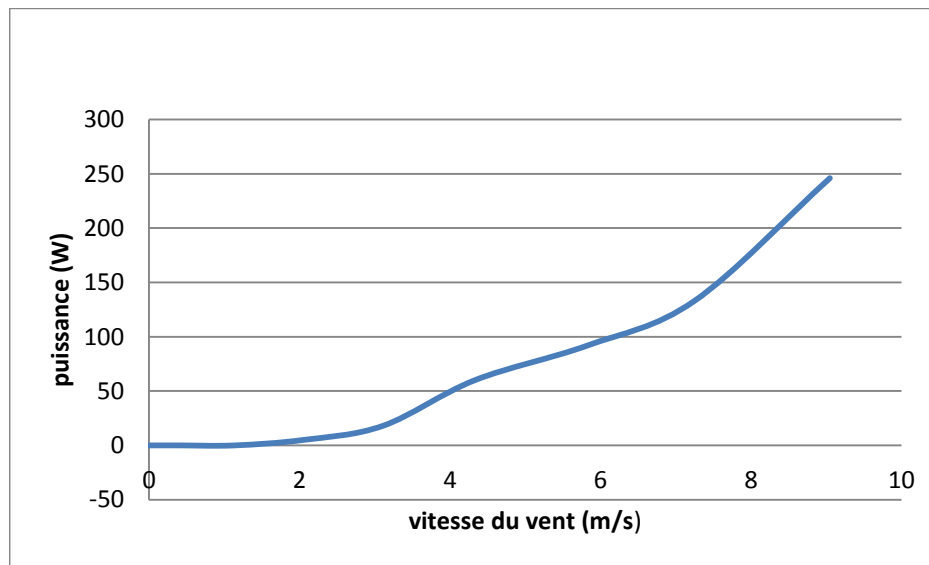


Figure III.9 : variation de la puissance de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent

III.2.7.1 Essai 7 : Analyser le comportement du système éolien avec charge électrique

Le but de cet exercice est d'analyser le comportement du système lorsque le vent souffle et qu'une charge électrique est connectée. Dans cette condition, la batterie peut servir de charge.

Les lampes disponibles sur le panneau arrière du banc seront utilisées comme charge électrique.

Remarque : Cet essai a été réalisé à l'aide du Système de Fonctionnement Interne au Générateur Éolien optionnel WG-I/EV. [44]

III.2.7.2 Préparation de l'essai 7

- Allumer l'interrupteur général du banc.
- Fermer les interrupteurs Q1, Q2 et Q3 de l'aérogénérateur (**WG**), de la batterie (**BATT**), et de l'onduleur **INV**
- Insérer les cavaliers électriques de l'aérogénérateur J1 (**WG**).
- Alimenter électriquement le Système de Fonctionnement Interne au Générateur Éolien WG-I/EV.
- Varier la vitesse de l'éolienne grâce à une commande par PC en utilisant le logiciel Lab-View[44]

III.2.7.3 Mesures et interprétation des résultats :

Pour la mesure, agissez sur les sélecteurs **S1** et **S2** et lisez les valeurs indiquées par les instruments **M1**, **M2** et **M3** du panneau de commande, au début sans charge électrique. Ensuite, les charges seront alimentées progressivement. L'insertion des interrupteurs **S3** ÷ **S7** permet d'alimenter la charge (**LAMPES**). Le tableau III.7 répertorie les résultats de mesures et des calculs [44]

		Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Mesure 4	Mesure 5	Mesure 6	Mesure 7	Mesure 8	
Lampes allumées		2	4	2	4	2	4	2	4	
Vitesse moteur	Trs/mn	1000	1000	1200	1200	1400	1400	1600	1600	
Vitesse du vent	Km/h	15.6	15.7	20.5	20.6	26.1	26.2	32.7	32.8	
Vitesse du vent	(m/s)	4.33	4.361	5.69	5.72	7.25	7.27	9.08	9.11	
Instrument M1	1	V	11.8	11.5	11.9	11.7	12.1	11.8	12.6	12.4
	3		11.8	11.6	11.9	11.6	11.9	11.7	12.2	12
	4		11.7	11.4	11.8	11.5	11.9	11.6	12.2	11.9
Instrument M2	1	A	2.3	2.6	4.3	4.7	6.2	6.8	11.6	12.3
	3		6.5	11.6	4.4	9.4	2.4	7.3	-2.9	1
	4		8.9	14.1	8.8	14	8.6	13.9	8.7	13
Instrument M3	V	226.4	226.3	227	228	227	230	228	227	
	A	0.412	0.635	0.41	0.63	0.41	0.65	0.41	0.63	
	W	93	143	94	146	94	149	94	145	
Puissance WG	W	27.14	29.9	51.17	54.99	75.02	80.24	146.16	152.52	
Puissance BATT	W	76.7	134.56	52.36	109.04	28.56	85.41	-35.38	12	
Puissance INV	W	104.74	160.74	103.84	161	102.34	161.24	106.14	154.7	
Puissance LOAD	W	93	143	94	146	94	149	94	145	

Tableau III.7 : Tableau de mesure de l'essai 7

Interprétation des résultats :

- Dans les conditions du vent considérées dans cet essai, le générateur éolien produit de l'énergie électrique.
- Selon que la charge exige une quantité de puissance électrique supérieure ou inférieure à celle produite par le système éolien, la batterie joue le rôle de générateur ou de charge (le signe du courant mesuré par l'instrument M2, passé du positif au négatif).
- Les mesures de l'instrument M3 montrent que la tension d'alimentation est maintenue constante pour toute énergie éolienne disponible considérée dans cet essai.

- À la même vitesse du vent, plus la charge est importante, plus la puissance produite par le système est importante (contribution de la batterie comme source de réserve) [44]

III.2.8.1 Essai 8 : Analyser le comportement du système hybride (éolien-PV) avec la lumière du soleil, vent et sans charge électrique

Le but de cet essai est d'analyser le comportement du système lorsque les rayons du soleil frappent le panneau photovoltaïque, le vent souffle et qu'aucune charge n'est connectée. Dans cette condition, la batterie agit comme la seule charge électrique.

Remarque : Cet exercice a été réalisé à l'aide du Système de Fonctionnement Interne au Générateur Éolien optionnel WG-I/EV. [44]

III.2.8.2 Préparation de l'essai 8

- Placer le panneau photovoltaïque
- Allumer l'interrupteur général du banc.
- Fermer les interrupteurs Q2 et Q1 de la batterie (**BATT**) et de l'aérogénérateur (**WG**).
- Insérer les cavaliers électriques de l'aérogénérateur J1 (**WG**) et du panneau photovoltaïque J2 (**PV**).
- Alimenter électriquement le Système de Fonctionnement Interne au générateur Éolien WG-I/EV.
- Varier la vitesse de l'éolienne grâce à une commande par PC en utilisant le logiciel Lab-View[44]



Figure III.10 : Image de préparation de l'essai 8

III.2.8.3 Mesures et interprétation des résultats

Agissez sur les sélecteurs **S1** et **S2** et lisez les valeurs indiqués par les instruments **M1** et **M2** du panneau de commande. Le tableau III.8 répertorie les résultats de mesures et des calculs[44]

			Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Mesure 4
Lampes Allumées			0	0	0	0
Eclairement (W/m ²)			535	562	528	559
Vitesse moteur	trs/min		0	600	800	1000
Vitesse du vent	Km/h		0	8.3	12.4	17
Vitesse du vent	m/s		0	2.3	3.44	4.72
Instrument M1	1	V	13.5	13.4	13.5	14.3
	2		13.7	13.5	13.7	20
	3		13.5	13.3	13.5	14
Instrument M2	1	A	0	0.1	0.3	0.9
	2		4.7	3.8	4.1	5.1
	3		-4.4	-3.8	-4.4	-5.6
Puissance WG	W		0	1.34	4.05	12.87
Puissance PV	W		64.39	51.3	56.17	102
Puissance BATT	W		-59.4	-50.54	-59.4	-78.4

Tableau III.8 : Tableau de mesure de l'essai 8

Interprétation des résultats :

- La puissance électrique fournie par le panneau photovoltaïque est presque constante pendant tout l'exercice (un niveau d'éclairement presque constant)
- Lorsque la vitesse du vent augmente, la puissance électrique produite par le générateur éolien augmente également.
- D'un point de vue théorique, l'équation de puissance suivante peut être écrite

$$(B = \text{branche}) : B1 + B2 = |B3|$$

la puissance totale de charge de la batterie est égale à la somme des deux puissances fournies par le (PV) et (WG)

- Lorsque la vitesse du vent augmente, la tension de charge de la batterie ainsi que le courant et la puissance électrique absorbés augmentent également.
- L'objectif final du système est d'alimenter la batterie.
- Le signe du courant mesuré par l'instrument M2, troisième position, est négatif, dans toute condition considérée dans cet essai, c'est-à-dire que la batterie agit comme une charge.[44]

III.2.9.1 Essai 9 :Analyser le comportement du système hybride avec charge électrique

Le but de cet exercice est d'analyser le comportement du système lorsque les rayons du soleil frappent le panneau photovoltaïque, le vent souffle et qu'une charge électrique est connectée. Dans cette condition, la batterie peut servir de charge ou comme une source de réserve. Les lampes disponibles sur le panneau arrière du banc seront utilisées comme charge électrique.

III.2.9.2 Préparation de l'essai 9

- Allumer l'interrupteur général du banc.
- Fermer les interrupteurs Q2, Q1 et Q3 de la batterie (**BATT**), de l'aérogénérateur (**WG**) et de l'onduleur (**INV**).
- Insérer les cavaliers électriques de l'aérogénérateur J1 (**WG**) et du panneau photovoltaïque J2 (**PV**).
- Alimenter électriquement le Système de Fonctionnement Interne au

Générateur Éolien WG-I/EV. [44]

III.2.10.3) Mesures et interprétation des résultats

Agissez sur les sélecteurs **S1** et **S2** et lisez les valeurs indiquées par les instruments **M1**, **M2** et **M3** du panneau de commande, au début sans charge électrique appliquée au système, puis après avoir alimenté la charge. L'insertion des interrupteurs **S3** ÷ **S7** permet d'alimenter la charge (**LAMPES**). Le tableau III.9 répertorie les résultats de mesures et des calculs [44]

			Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Mesure 4	Mesure 5	Mesure 6	Mesure 7	Mesure 8
Lampes Allumées			2	4	2	4	2	4	2	4
Rayonnement (W/m²)Solaire			560	600	732	925	780	747	666	510
Vitesse moteur		trs/mn	1000	1000	1200	1200	1400	1400	1600	1600
Vitesse du vent		Km/h	17	17	22.4	22.4	28.4	28.4	35.5	35.5
Instrument M1	1	V	12	11.9	12.3	12.9	12.6	12.3	13	12.9
	2		12.1	12	12.5	12.4	12.7	12.4	13	12.7
	3		12	11.8	12.2	12.1	12.4	12.2	12.7	12.6
	4		11.9	11.7	12.2	12	12.4	12	12.8	12.5
Instrument M2	1	A	2.2	2.3	3.6	4	5.1	5.9	9.4	10.6
	2		3.9	5.2	6.3	7.1	5.7	5.4	5.2	3.3
	3		2.5	6	-1.3	2.4	-2.2	2.2	-6	-1
	4		8.6	13.8	8.5	13.5	8.3	13.5	8.1	13
Instrument M3		V	228.4	225.7	228.2	228.4	226.6	228.5	229	228.2
		A	0.41	0.64	0.41	0.63	0.41	0.637	0.41	0.63
		W	93	144	95	145	93	145	93	144
Puissance WG		W	26.4	27.37	44.28	51.6	64.26	72.57	122.2	136.74
Puissance PV		W	47.19	62.4	78.75	88.04	72.39	66.96	67.6	41.91
Puissance BATT		W	30	70.8	-15.86	29.04	-27.28	26.84	-76.2	-12.6
Puissance INV		W	102.34	161.46	103.7	162	102.92	162	103.68	162.5
Puissance LOAD		W	93	144	95	145	93	145	93	144

Tableau III.9 : Tableau de mesure de l'essai 9

Interprétation des résultats :

- Dans cet essai, le flux énergétique est indiqué comme suit :

$$(WG + PV) \rightarrow BATT + INV \rightarrow LOAD$$

Si la puissance demandée par la charge est inférieure à l'énergie éolienne / solaire disponible;

$$(WG + PV) + BATT \rightarrow INV \rightarrow LOAD$$

Si la puissance demandée par la charge est supérieure à la puissance éolienne/solaire disponible
(La Batterie fournit la différence de puissance entre WG + PV et LOAD)

- Selon que la charge exige une quantité d'énergie électrique inférieure ou supérieure à celle produite par le vent / soleil, la batterie agit comme une charge ou un générateur (le signe du courant mesuré par l'instrument M2, position 3, passe du négatif au positif).
- Lorsque la vitesse du vent augmente (les charges appliquées étant égales), la tension de charge de la batterie augmente ; au contraire, lorsque la charge appliquée augmente, cette tension diminue
- L'objectif final du système est d'alimenter une charge (les lampes) et de charger la batterie, si possible.[44]

III.2.10.1 Essai 10 : Tracer les courbes caractéristiques du panneau photovoltaïque (rhéostat portable en option requis)

Le but de cet exercice est de tracer les courbes caractéristiques du panneau photovoltaïque

- courant de sortie par rapport à la tension de sortie ($I - V$)
- puissance électrique par rapport à la tension de sortie ($P - V$)[44]

III.2.10.2 Préparation de l'essai 10

- réaliser le montage selon la figure (III.11) : rhéostat alimentée par le PV
- faire varier la résistance du rhéostat au début sans connecter l'équipement (PV) au rhéostat
- Lisez les valeurs indiqués par les instruments **M1** et **M2** du panneau de commande avec les sélecteurs **S1** et **S2** en position 2, au début sans connecter l'équipement (PV) au rhéostat portable (condition de circuit ouvert) et ensuite après avoir connecté le rhéostat : chaque fois, on modifie la position du curseur.
- La valeur du rayonnement est indiquée par le logiciel Lab-View (figure 10) [44]

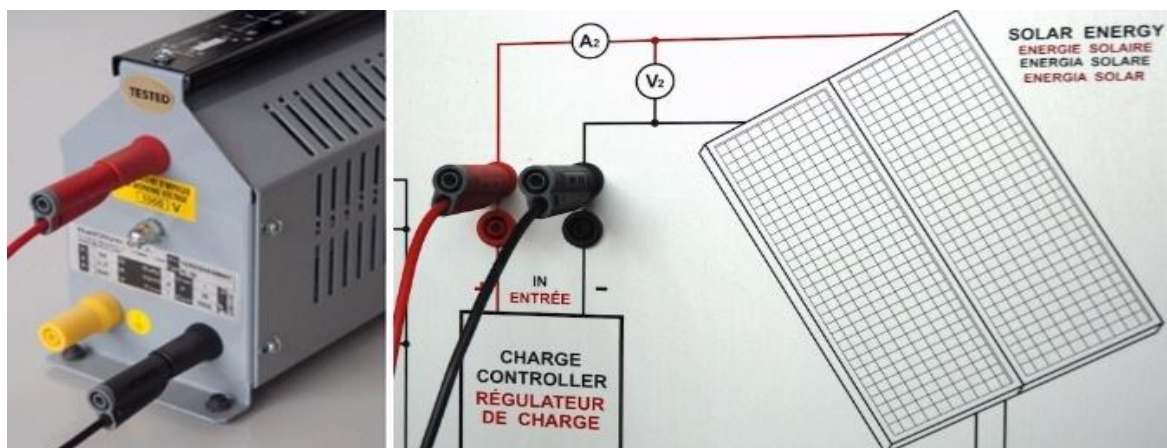


Figure III.11 : Image de la manipulation de l'essai 10

III.2.10.3 Mesures et interprétation des résultats

Le tableau III.10 répertorie les données résultant des mesures et des calculs (la puissance électrique transférée par le panneau photovoltaïque est obtenue en multipliant les valeurs correspondantes de tension et de courant). A partir du fichier data (Lab- View) expliqué dans la figure suivant[44]

	Tension	Courant	Puissance électrique	Rayonnement Solaire
	V	A	W	W/m ²
A vide	0	8,092015	0	900
Mesure1	2,029304	8,084982	15,406886	
Mesure 2	1,92674	8,120147	15,645411	
Mesure 3	2,112332	8,123077	17,158636	
Mesure 4	3,616606	8,117216	29,356769	
Mesure 5	8,007326	8,032234	64,31672	
Mesure 6	13,252747	7,78315	103,148122	
Mesure 7	15,821734	7,361172	116,466507	
Mesure 8	16,705739	6,950916	116,120182	
Mesure 9	17,345543	6,171429	107,046782	
Mesure 10	17,760684	5,711355	101,437576	
Mesure 11	18,21978	4,4337	80,781033	
Mesure 12	18,698413	3,736264	69,862201	
Mesure 13	19,137973	3,120879	59,727301	
Mesure 14	19,411477	2,358974	45,791177	
Mesure 15	19,62149	1,913553	37,546763	
Mesure 16	19,71917	1,726007	34,035431	
Mesure 17	19,811966	1,45641	28,85435	

Tableau III.10 : Tableau de mesure de l'essai 10

Les figures (III.12), (III.13), montrent les caractéristiques essentiels d'un PV dans les conditions proches des STC et qui sont : Un éclairement $E=900\text{W/m}^2$ et une température proche à 25°C

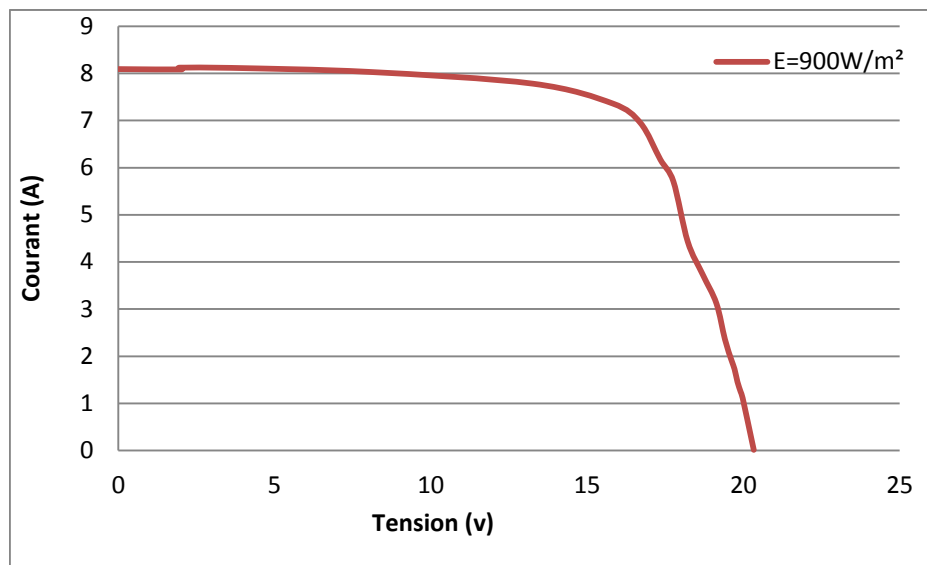


Figure III.12 Courbe caractéristique du courant fourni par rapport à la tension de sortie
Rayonnement solaire = 900 W/m^2

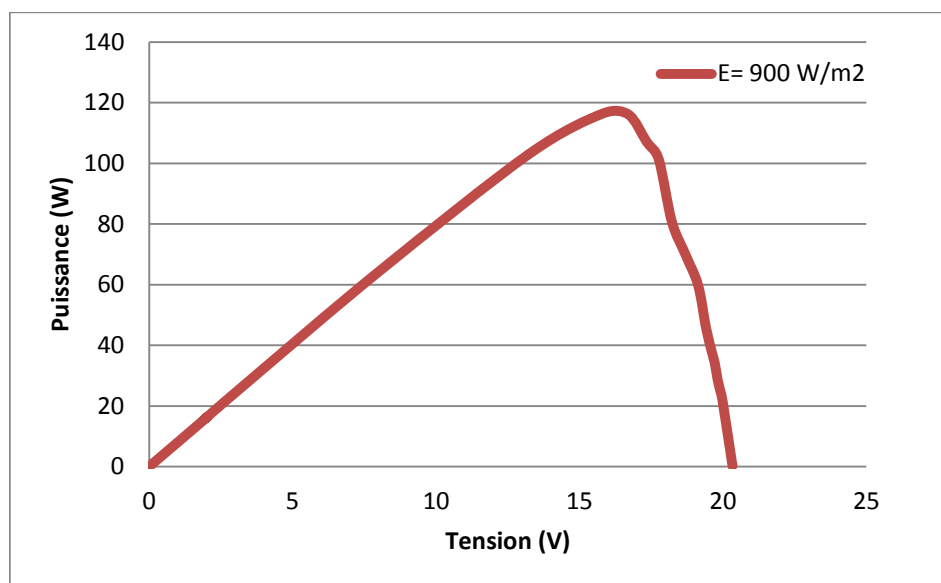


Figure III.13 : Courbe caractéristique de la puissance électrique fournie par rapport à la Tension de sortie, Rayonnement solaire = 900 W/m^2

Interprétation des résultats :

- Dans cet essai, on constate que le flux énergétique a un sens unique :

PV ➡ LOAD (Charge)

- Le courant fourni est maximum lorsque la tension de sortie est égale à zéro (condition de court-circuit ou courant de saturation) ; initialement la courbe décroît linéairement très lentement, puis elle forme un genou et finalement elle diminue progressivement de

manière presque linéaire jusqu'à ce qu'elle coupe l'axe des ordonnées en un point correspondant à la condition de circuit ouvert (courant égal à zéro).

- La courbe de puissance passe par deux zéros correspondant respectivement à la condition de court-circuit (tension de sortie égale à zéro) et à la condition de circuit ouvert (courant fourni égal à zéro); la courbe en forme de cloche est caractérisée par un pic correspondant au point de puissance maximale fournie.
- Le point de puissance maximale fournie correspond au genou de la courbe du courant fourni par rapport à la tension de sortie.
- Comme cette courbe a été tracée avec un rayonnement solaire constant, le fonctionnement au voisinage du point de puissance maximale fournie permet de maximiser l'efficacité du système. Les appareils de contrôle des systèmes photovoltaïques équipés de la fonction *MPPT* (*Maximum Power Point Tracking*) permettent de répondre à cette condition.[44]

III.2.11.1 Essai 11 : Tracer les courbes caractéristiques du panneau photovoltaïque avec différentes valeurs de rayonnement solaire

Le but de cet essai est de tracer les courbes caractéristiques du panneau photovoltaïque :

Courant de sortie par rapport à la tension de sortie et puissance électrique par rapport à la tension de sortie avec des rayonnements solaires différents afin d'illustrer son importance.[44]

III.2.11.2 Préparation de l'essai 11

La préparation de la manipulation de cet essai est similaire au dernier essai, seulement pour avoir un éclairage inférieur au précédent, nous avons choisis une journée avec un ombrage suffisant qui a fait diminuer l'éclairage à un niveau convenable à la mesure ($E=600\text{W/m}^2$) [44]

III.2.11.3 Mesures et interprétation des résultats

Lisez les valeurs indiquées par les instruments **M1** et **M2** du panneau de commande avec les sélecteurs **S1** et **S2** en position 2

Au début sans connecter l'équipement au rhéostat portable (condition de circuit ouvert) et ensuite après avoir connecté le rhéostat : chaque fois on modifie la position du curseur.

Le tableau 3.11 présente les données résultant des mesures.[44]

	Tension	Courant	Puissance électrique	Rayonnement Solaire
	V	A	W	W/m ²
A vide	19,748474	0	0	600
Mesure1	19,601954	0,045421	0,890345	
Mesure 2	19,435897	0,367766	7,147854	
Mesure 3	19,206349	1,003663	19,276702	
Mesure 4	18,918193	1,771429	33,512227	
Mesure 5	18,449328	2,630037	48,52241	
Mesure 6	17,916972	3,575092	64,054815	
Mesure 7	17,452991	4,348718	75,898137	
Mesure 8	17,023199	4,855678	82,659167	
Mesure 9	16,422466	5,242491	86,09463	
Mesure 10	15,533578	5,558974	86,350759	
Mesure 11	14,449328	5,728938	82,779303	
Mesure 12	12,041514	5,802198	69,867246	
Mesure 13	10,07326	5,822711	58,653678	
Mesure 14	8,461538	5,849084	49,492251	
Mesure 15	7,162393	5,863736	41,998385	
Mesure 16	6,859585	5,872527	40,283101	

Tableau III.11 : Tableau de mesure de l'essai 11

Les figures (III.14), (III.15), montrent les caractéristiques essentiels d'un PV dans les conditions proches des STC et qui sont : Un éclairement $E=900\text{W/m}^2$ et une température proche à 25°C

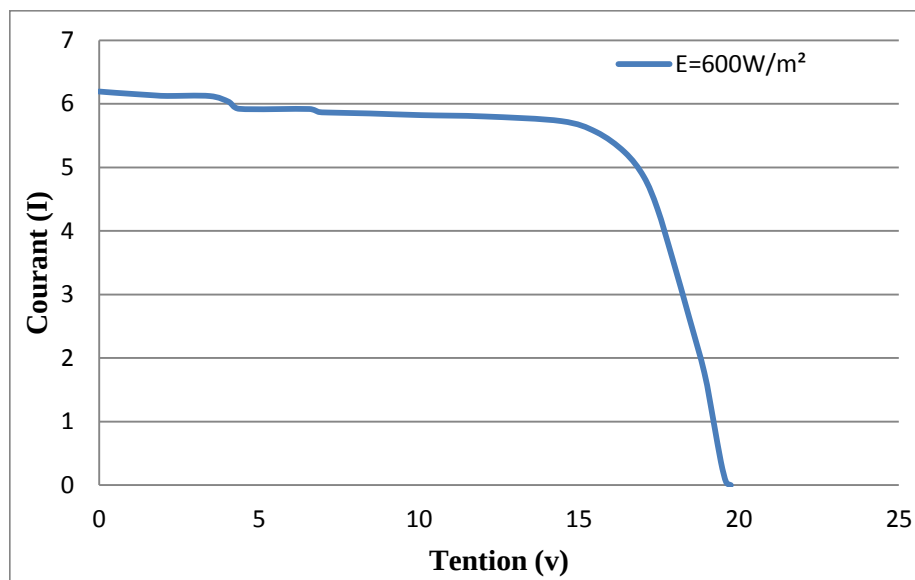


Figure III.14 : Courbe caractéristique du courant fourni par rapport à la tension de sortie
Rayonnement solaire = 600 W/m^2

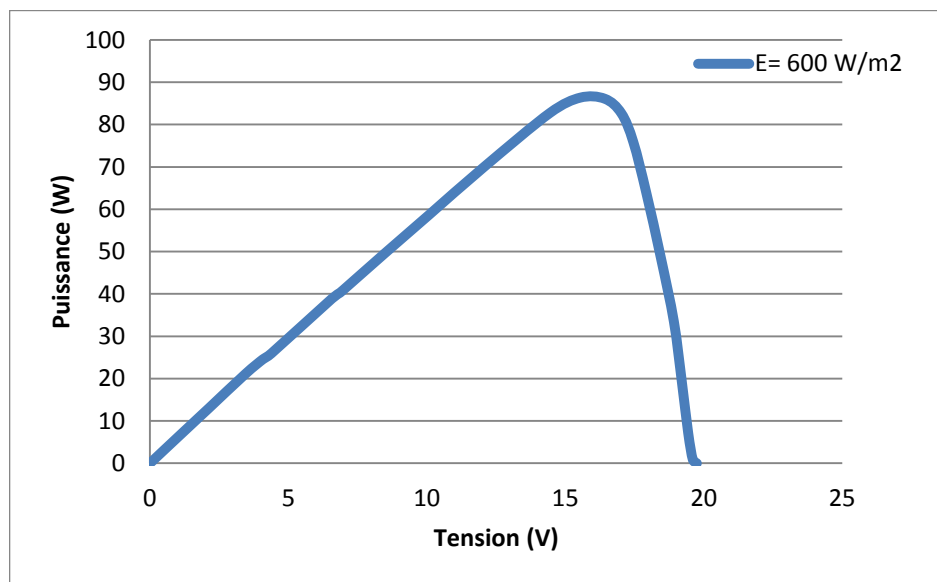


Figure III.15 : Courbe caractéristique de la puissance électrique fournie par rapport à la Tension de sortie, Rayonnement solaire = 600 W/m^2

Interprétation des résultats :

- Dans cet essai, on constate que le flux énergétique a un sens unique :

PV → LOAD (Charge)

- Comme cela a été montré dans l'exercice précédent, le courant fourni est maximum lorsque la tension de sortie est égale à zéro (condition de court-circuit); initialement la courbe décroît linéairement très lentement, puis elle forme un genou et finalement elle diminue progressivement de manière presque linéaire jusqu'à ce qu'elle coupe l'axe des ordonnées en un point correspondant à la condition de circuit ouvert (courant égal à zéro).

Ce qui est expliqué dans l'exercice précédent est toujours valable dans ce cas également.

- La courbe de puissance passe par deux zéros correspondant respectivement à la condition de court-circuit (tension de sortie égale à zéro) et à la condition de circuit ouvert (courant fourni égal à zéro); la courbe en forme de cloche est caractérisée par un pic correspondant au point de puissance maximale fournie.
- Le point de puissance maximale fournie correspond au genou de la courbe du courant fourni par rapport à la tension de sortie.

Les figures (III.16), (III.17), les courbes caractéristiques essentiels d'un PV dans les conditions proches des STC du tracée avant sont comparées dans le même diagramme [44]

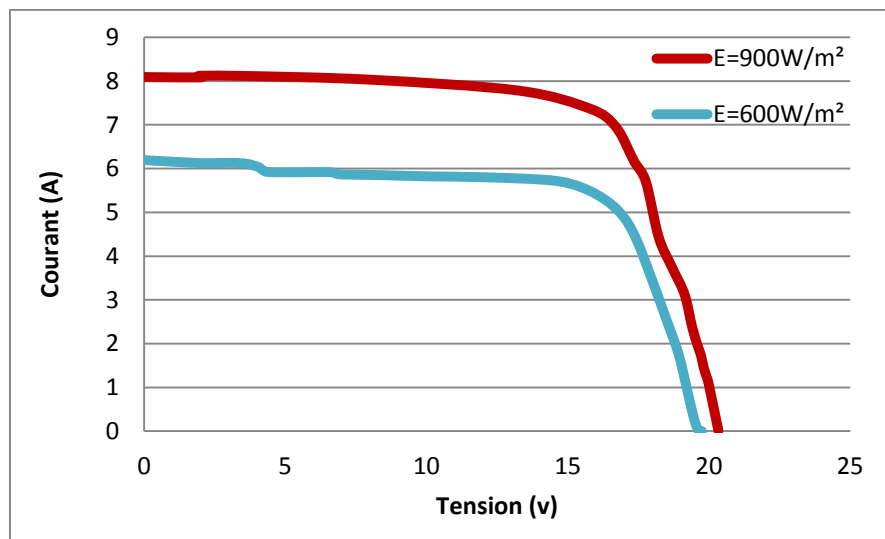


Figure III.16 : Courbe caractéristique du courant fourni par rapport à la tension de sortie
 Courbe bleu: rayonnement solaire = 600 W / m^2
 Courbe rouge: rayonnement solaire = 900 W / m^2

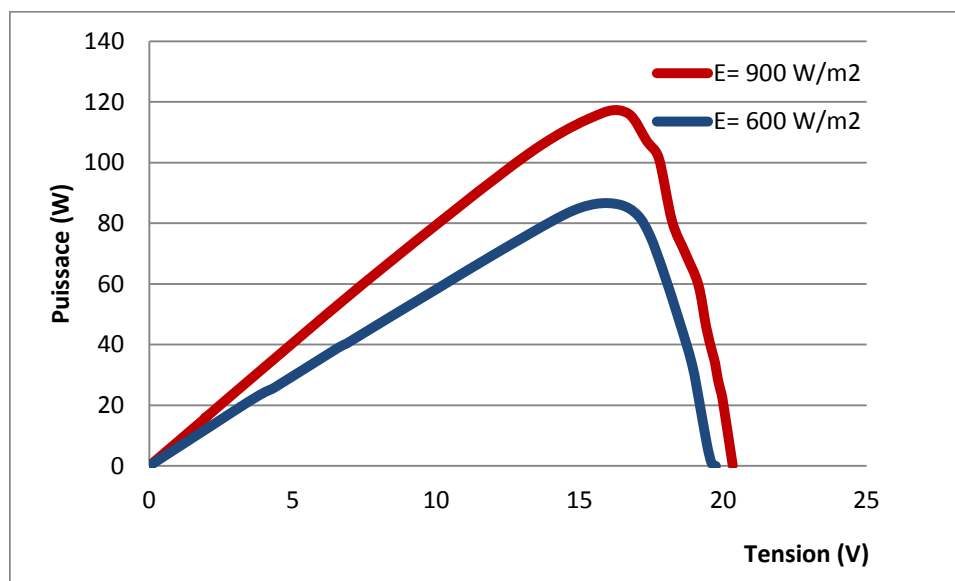


Figure III.17 : Courbe caractéristique de la puissance électrique fournie par rapport à la tension de sortie
 Courbe bleue: rayonnement solaire = 600 W/m^2
 Courbe rouge: rayonnement solaire = 900 W/m^2

Interprétation des résultats

La forme des deux courbes (Courant –Tension) est très similaire, cependant :

- Le courant de court-circuit de la courbe bleue (obtenu avec un rayonnement solaire de 600 W/m²) a une valeur inférieure à celle de la courbe rouge (obtenue avec un rayonnement solaire de 900 W/m²).
- Le rapport entre les courants de court-circuit des deux courbes correspond approximativement au rapport entre les deux valeurs du rayonnement solaire:

$$900 / 600 = 1,5$$

La forme des deux courbes (puissance –Tension) est très similaire, cependant :

- La puissance maximale de la courbe bleue (obtenue avec un rayonnement solaire de 600 W/m²) est inférieure à celle de la courbe rouge (obtenue avec un rayonnement solaire de 900 W/m²).
- Le rapport entre les puissances maximales des deux courbes correspond approximativement au rapport entre les deux valeurs du rayonnement solaire:

$$900 / 600 = 1,5$$

- Le point de puissance maximale fournie de la courbe rouge se situe plus à droite (c'est-à-dire qu'il correspond à une valeur de tension de sortie plus élevée) par rapport à la courbe bleue.[44]

III.2.12.1 Essai 12 : Tracer les courbes du rendement du panneau photovoltaïque

Le but de cet exercice est de tracer la courbe caractéristique du rendement en fonction de la tension fournie par le panneau photovoltaïque, à partir des données obtenues lors des essais précédents 10 et 11. [44]

III.2.12.2 Préparation de l'essai 12

Cet essai est similaire aux essais (10 et 11) de point de vue préparation de la manipulation

III.2.12.3 Mesures et interprétation des résultats

Complétez le tableau III.10 (essai 10) en considérant que:

- la surface totale du panneau photovoltaïque est égale à 0,838 m² ;
- l'énergie solaire incidente sur le panneau photovoltaïque est égale au produit du rayonnement solaire par la surface du panneau; $P_s = E \times S$
- le rendement de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique résulte du rapport entre la puissance électrique fournie par le panneau photovoltaïque et l'énergie solaire incidente sur le même panneau. [44]

$$\eta(\%) = \frac{P_U}{P_S} \times 100$$

Le tableau III.12 présente les données résultant des mesures avec $E=900 \text{ W/m}^2$

	Tension	Courant	Puissance électrique	Rayonnement solaire	Surface panneau	Énergie Solaire	Rendement
	V	A	W	W/m^2	m^2	W	%
Mesure1	0	8,092015	0	900	0.838	754.2	0
Mesure2	2,029304	8,084982	15,406886				2,04
Mesure3	1,92674	8,120147	15,645411				2,07
Mesure4	2,112332	8,123077	17,158636				2,27
Mesure5	3,616606	8,117216	29,356769				3,89
Mesure6	8,007326	8,032234	64,31672				8,52
Mesure7	13,252747	7,78315	103,148122				13,66
Mesure8	15,821734	7,361172	116,466507				15,38
Mesure9	16,705739	6,950916	116,120182				15,40
Mesure10	17,345543	6,171429	107,046782				14,19
Mesure11	17,760684	5,711355	101,437576				13,39
Mesure12	18,21978	4,4337	80,781033				10,61
Mesure13	18,698413	3,736264	69,862201				9,15
Mesure14	19,137973	3,120879	59,727301				7,82
Mesure15	19,411477	2,358974	45,791177				6
Mesure16	19,62149	1,913553	37,546763				5
Mesure17	19,71917	1,726007	34,035431				4,5

Tableau III.12 : Tableau de mesure de l'essai 12

En traçant le diagramme du rendement en fonction de la tension de sortie, on obtiendra la courbe illustrée à la figure III.18. Notez que cette courbe a la même allure que la courbe de la puissance électrique fournie (seule l'échelle sur l'axe des abscisses est différente).

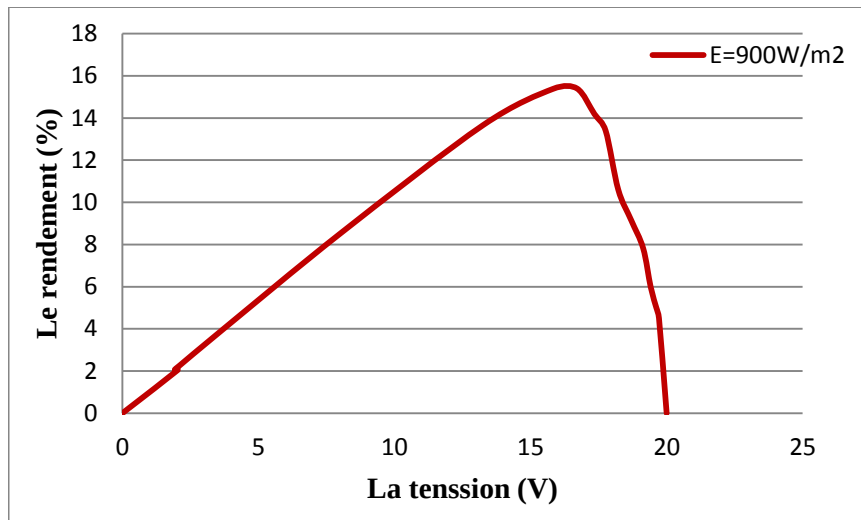


Figure III.18 : Courbe caractéristique du rendement en fonction de la tension de sortie Rayonnement solaire = 900 W/m^2

Pour un éclairement $E=600\text{W/m}^2$

Complétons le tableau III.11 (essai 11), conformément à ce qui a été expliqué ci-dessus: les résultats seront résumés dans le tableau III.13.

	Tension	Courant	Puissance électrique	Rayonnement solaire	Surface panneau	Énergie Solaire	Rendement
	V	A	W	W/m ²	m ²	W	%
Mesure1	19,748474	0	0	600	0.838	716	0
Mesure2	19,601954	0,045421	0,890345				0,12
Mesure3	19,435897	0,367766	7,147854				0,99
Mesure4	19,206349	1,003663	19,276702				2,69
Mesure5	18,918193	1,771429	33,512227				4,68
Mesure6	18,449328	2,630037	48,52241				6,77
Mesure7	17,916972	3,575092	64,054815				8,94
Mesure8	17,452991	4,348718	75,898137				10,59
Mesure9	17,023199	4,855678	82,659167				11,54
Mesure10	16,422466	5,242491	86,09463				12,02
Mesure11	15,533578	5,558974	86,350759				12,06
Mesure12	14,449328	5,728938	82,779303				11,56
Mesure13	12,041514	5,802198	69,867246				9,75
Mesure14	10,07326	5,822711	58,653678				8,19
Mesure15	8,461538	5,849084	49,492251				6,91
Mesure16	7,162393	5,863736	41,998385				5,86
Mesure17	6,859585	5,872527	40,283101				5,6

Tableau III.13 : Tableau de mesure de l'essai 12

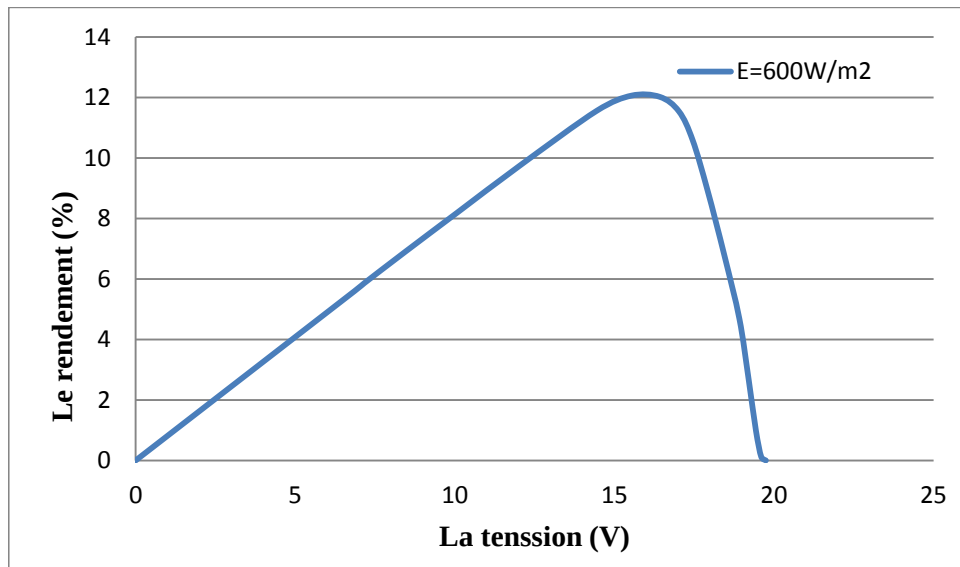


Figure III.19 : Courbe caractéristique du rendement par rapport à la tension de sortie Rayonnement solaire = 600 W/m^2

Interprétation des résultats

Ce qui est expliqué pour les courbes de la puissance fournie est toujours valide:

- Cette courbe a deux zéros correspondant respectivement à la condition de court-circuit (pas de tension de sortie) et à la condition de circuit ouvert (pas de courant fourni); la courbe en forme de cloche se caractérise par un pic correspondant au point de rendement maximale.
- Le point de rendement maximal correspond au genou de la courbe du courant fourni par rapport à la tension de sortie.
- Comme cette courbe a été tracée avec un rayonnement solaire constant, le fonctionnement au voisinage du point de rendement maximal du panneau permet de maximiser le rendement du système.

Les appareils de contrôle des systèmes photovoltaïques équipés de la fonction *MPPT* (*Maximum Power Point Tracking*) permettent de répondre à cette condition[44]

Les deux courbes caractéristiques du rendement en fonction de la tension sont comparées dans le même diagramme (figure III.20)

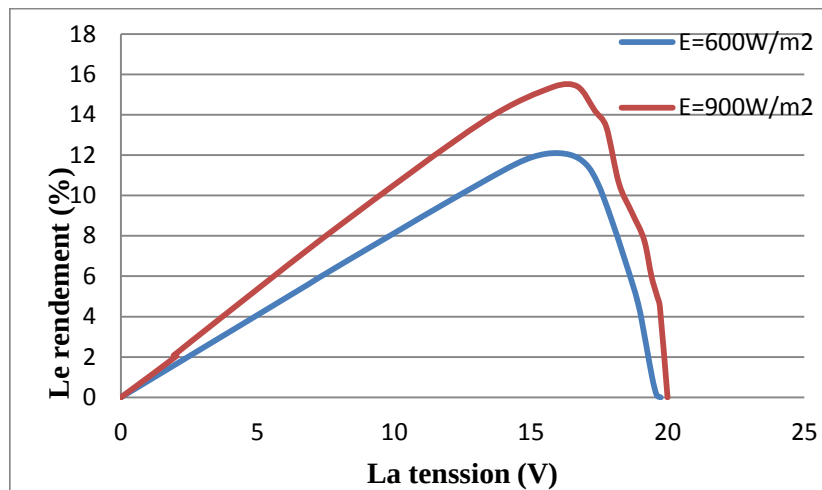


Figure III.20 : Courbe caractéristique du rendement par rapport à la tension de sortie
 Courbe bleue: rayonnement solaire = 600 W/m^2 ,
 Courbe rouge: rayonnement solaire = 900 W/m^2

Interprétation des résultats

- La forme des deux courbes est très similaire.
- Le rendement maximal de la courbe rouge (obtenue avec un rayonnement solaire de 900 W/m^2) est supérieure à celle correspondant à la courbe bleue (obtenue avec un rayonnement solaire de 600 W/m^2).
- Le point du rendement maximal de la courbe rouge se situe plus à droite (c'est-à-dire qu'il correspond à une valeur de tension de sortie plus élevée) par rapport à la courbe bleue. [44]

III.2.13.1 Essai 13 : Analyser le comportement du système connecté au réseau

Le but de cet exercice est d'analyser le comportement du système lorsque les rayons du soleil frappent le panneau photovoltaïque et l'énergie produite est injectée dans le réseau.[45]

III.2.13.2 Préparation de l'essai 13

- Allumer l'interrupteur général du banc.
- Fermer les interrupteurs Q2, Q1 et Q3 de la batterie (**BATT**), de l'aérogénérateur (**WG**) et de l'onduleur (**INV**).
- Insérer les cavaliers électriques de l'aérogénérateur J1 (**WG**) et du panneau photovoltaïque J2 (**PV**).
- Alimenter électriquement le Système de Fonctionnement Interne au Générateur Éolien WG-I/EV.
- Connecter l'onduleur GT-INV/EV.[45]

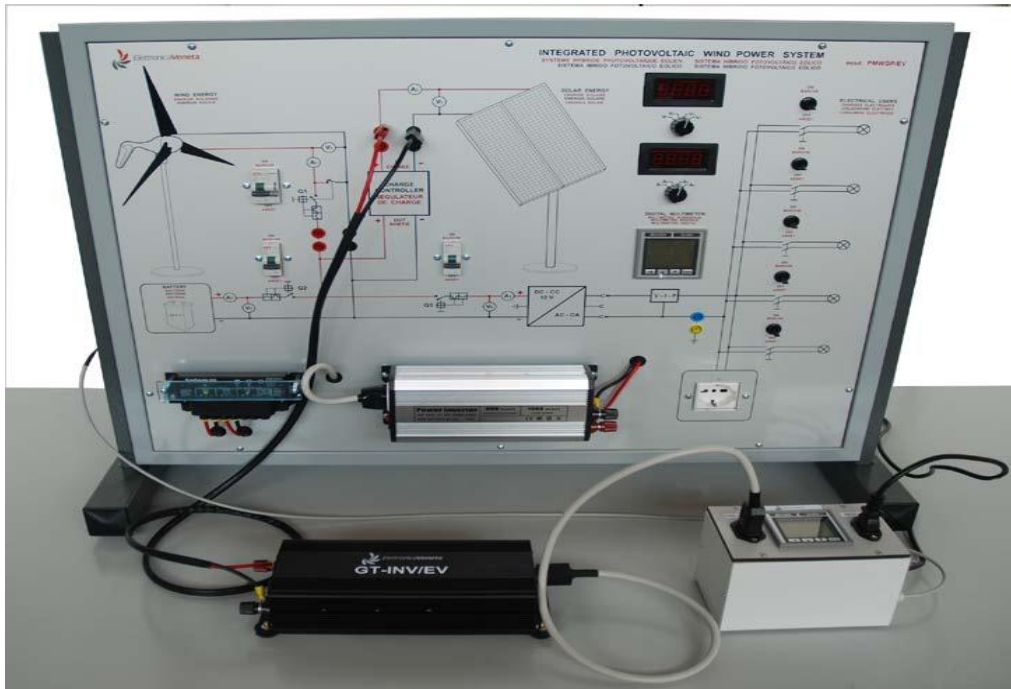


Figure. III.21 :Connexion entre onduleur, panneau photovoltaïque et réseau

III.2.13.2 Mesures et interprétation des résultats

- Agissez sur les sélecteurs **S1** et **S2** et lisez les paramètres indiqués par les instruments **M1** et **M2** du panneau de commande du PMWGP/EV et l'instrument **MR** du GT-INV/EV.
- De Menu de Windows sélectionnez Start – Programs – ElettronicaVeneta PM-WGP – PM-WGP.
- Quand on lance le programme, afin de permettre l'acquisition de données, on doit sélectionner la touche GT-INV (logiciel LAB-VIEW).[45]

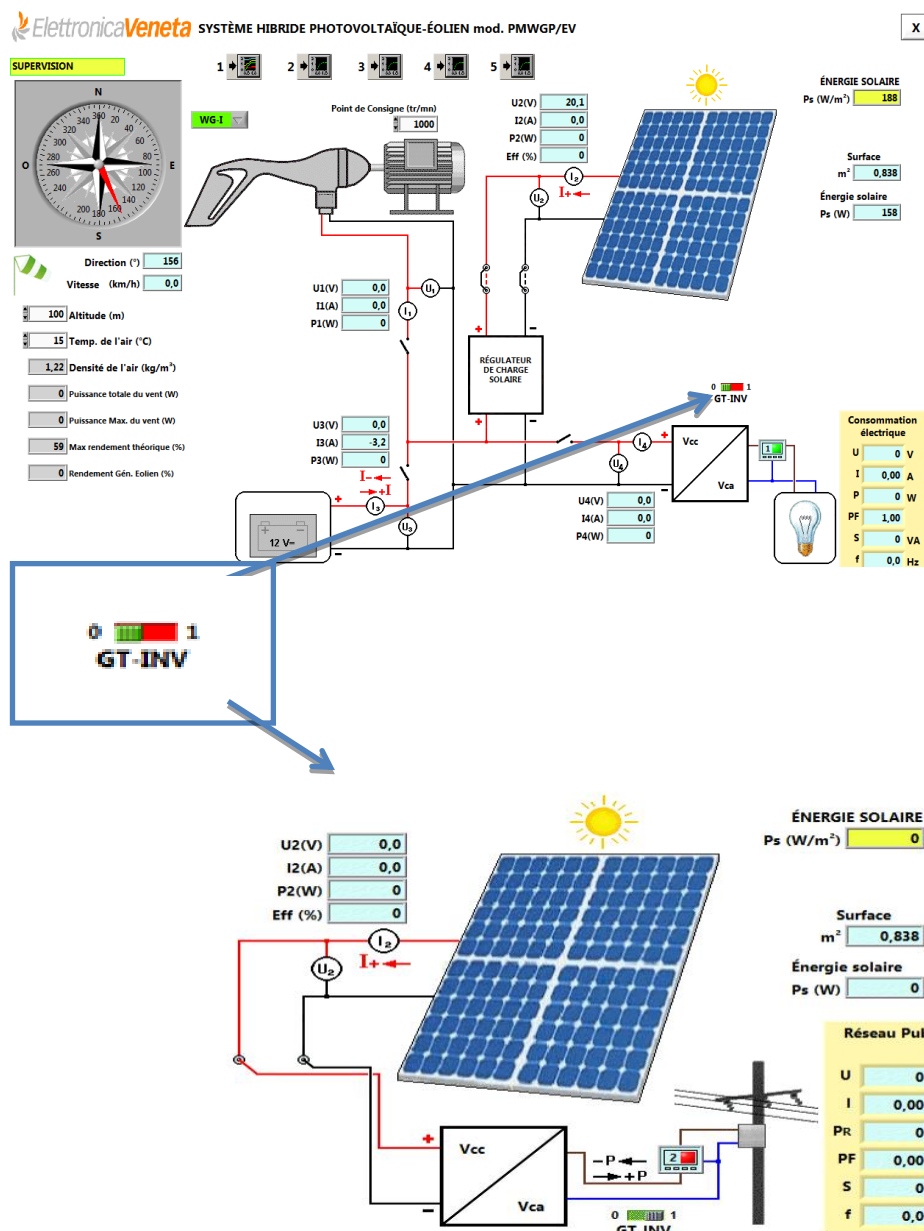


Figure. III.22 : ajouter des données d'onduleur GT-INV/EV

Le tableau III.14 répertorie les données résultant des mesures et des calculs.

			Mesure 1
Rayonnement solaire		W/m ²	879
Instrument M1	2	V	16.6
Instrument M2	2	A	5.8
Instrument MR		V	242
		A	0.38
		W	91.96
Puissance PV		W	96.28
Puissance GRID		W	91.96

Tableau III.14 : Tableau de mesure de l'essai 13

Interprétation des résultats

- Le flux énergétique de cet exercice est indiqué ci-dessous:

PV → INV → GRID

- D'un point de vue théorique, l'équation de puissance suivante peut être écrite (B = branche):

$$B2 = B_{ca} + \text{consommation INV}$$

III.2.14.1 Essai 14 : Analyser le comportement du système en variant l'inclinaison du panneau photovoltaïque

Le but de cet exercice est d'analyser le comportement du système en variant l'inclinaison du panneau photovoltaïque lorsque les rayons du soleil frappent le panneau.

III.2.10.3 Mesures et interprétation des résultats

Agissez sur les sélecteurs **S1** et **S2** et lisez les paramètres indiqués par les instruments **M1** et **M2** du panneau de commande du PMWGP/EV et l'instrument **MR** du GT-INV/EV.

Le tableau III.15 répertorie les données résultant des mesures et des calculs.[45]

			Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3
Inclinaison du panneau			minimale	Moyenne	Maximale
Rayonnement solaire	W/m2		750	784	913
Instrument M1	2	V	16.6	16.6	16.7
Instrument M2	2	A	4.9	5.3	6.1
Instrument MR		V	242.2	242.2	243.8
		A	0.33	0.35	0.40
		W	75	80	91
Puissance PV	W		81.34	87.98	101.87
Puissance GRID	W		75	80	91

Tableau III.15 : Tableau de mesure de l'essai 14

Interprétation des résultats

- Le flux énergétique de cet exercice est indiqué ci-dessous:

PV → INV → GRID

- En augmentant l'inclinaison du panneau photovoltaïque, le rayonnement solaire augmente et, par conséquent, la puissance produite augmente. Ceci est dû au fait que le soleil est bas à l'horizon[44]

III.3 Conclusion :

La validation expérimentale effectuée dans ce chapitre nous a permis une évaluation approfondie des performances du système étudié. L'établissement d'un banc d'essai PMWGP/EV et la conception d'un émulateur éolien-photovoltaïque ont été des étapes essentielles pour surmonter divers défis techniques.

Ces efforts ont abouti à des résultats pratiques significatifs, démontrant l'efficacité du système. Il a été démontré que le système peut s'adapter efficacement aux variations du vent et du soleil, garantissant ainsi un suivi précis des références des différentes grandeurs mesurées. Cela assure une performance optimale du système dans diverses conditions. Les résultats obtenus confirment l'efficacité des stratégies et valident les résultats de simulations obtenus dans le chapitre précédent.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'énergie électrique provenant de sources renouvelables, en particulier le vent et le soleil, est considérée comme une alternative de production importante dans les systèmes d'énergie électrique du monde d'aujourd'hui. En effet, les systèmes éoliens et photovoltaïques ont connu un grand essor ces derniers temps et sont devenus de plus en plus accessibles en termes de technologies et de coûts. Une fois installés, ces systèmes ne dépendent d'aucune source ou réseau et présentent l'avantage de se trouver à proximité des sites de consommation

Le système hybride de production de l'énergie dans sa vue la plus générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles facilement mobilisables. Le système qui nous intéresse regroupe deux parties pour la production de l'énergie passant par un stockage électrochimique dont l'objectif est d'alimenter une charge bien déterminée sur un site spécifique avec une énergie issue de la combinaison de l'éolien et du photovoltaïque

Le problème est de trouver un équilibre entre l'apport énergétique et la demande (la charge)

L'équilibre entre l'apport énergétique de chaque source et la demande (type de charge) n'est pas toujours possible. Le manque d'énergie sera compensé par l'introduction d'un stockage électrochimique tampon dans le système.

Dans notre cas précis on s'intéresse aux systèmes de petite puissance produisant du courant continu facilement convertible en courant alternatif grâce à l'intégration d'un onduleur

C'est dans ce contexte que nous avons essayé d'exploiter le matériel disponible au sein de notre laboratoire de réseaux électriques et qui nous a permis de simuler le fonctionnement d'un système hybride (éolien- photovoltaïque) avec un système de stockage

Les essais pratiques nous ont permis d'explorer le fonctionnement des éléments constitutifs du banc et de valider les notions théoriques régissant le comportement de chaque système, éolien ou photovoltaïque ou en combinant les deux systèmes.

Enfin, nous espérons que ce travail sert à faciliter la tâche délicate de la préparation des travaux pratiques qui peuvent être réalisés facilement sur ce banc didactique en se référant à notre mémoire.

Référence

Bibliographie

N°	Bibliographie
[1]	M .Rabah.Rouas, « <i>Etude d'un système hybride éolien-photovoltaïque</i> », Thèse de doctorat 3ème cycle LMD ,Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou ,2018 .
[2]	Ludmil stoyanov,« <i>Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergies renouvelables</i> » ,Université pascal paoloi, 2011 .
[3]	Billel .Ferrah, « <i>Etude d'un système hybride (photovoltaïque - éolien)</i> », Université Badji Mokhtar annaba , 2014- 2015.
[4]	Madaci Bouthaina,« <i>Architectures intégrées de gestion de l'énergie pour les multi systèmes autonomes utilisant le stockage par accumulateurs</i> », Université des Frères Mentouri Constantine , 2018
[5]	B. Benyoucef, « <i>les énergies renouvelables</i> », Cours de Magister, 2008.
[6]	S.Petibon , « <i>Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques</i> », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2009.
[7]	Capderou M., « <i>Atlas Solaire de l'Algérie</i> », O.P.U, Alger 1985.
[8]	Mefti A., Bouroubi M.Y et Khellaf A., « <i>Analyse Critique du Modèle de l'Atlas de l'Algérie</i> », Revue des Energies Renouvelables, pp, 69 – 85,1999.
[9]	Portail Ministère de l'Energie, www.energy.gov.dz , Consulté en Février 2018.
[10]	http://www.in-terre-actif.com/consultéenavril2012
[11]	SLAMA, F, « <i>Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques Interconnectés au réseau électrique</i> », Mémoire de Magister, université Ferhat Abbas - Setif (Algerie) , 2011.
[12]	A.KAABECHE, M.BELHAMEL, R. IBTIOUEN,S.MOUSSA et M.R. Benhaddadi, « <i>Optimisation d'un système hybride (éolien-photovoltaïque) totalement autonome</i> »,Revue des Energies Renouvelables, Vol.9,N°3199–209,2006.
[13]	M.belhad, « <i>Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome</i> », mémoire de magister université de bachar ,2008.
[14]	www.Halou.com « <i>La fabrication des cellules photovoltaïques</i> »
[15]	B. Flèche - D. Delagnes, « <i>Energie solaire photovoltaïque.doc</i> », juin 2007,
[16]	Haloune Assia, « <i>Modélisation de transfert radiatif dans strates supérieur d'un module photovoltaïque</i> », université de Boumerdes, 2016, Algérie

[17]	Jean-François Reynaud. « <i>Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques</i> ». Thèse de Doctorat Toulouse, 2011, http://www.solarserver.de/ .
[18]	M. Veerachary, T. Senjyu, and K. Uezato, « <i>Voltage-based maximum power point tracking control of PV system</i> », IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 38, no. 1, 2002, pp. 262-270
[19]	D. Turcotte, M. Ross, F. Sheriff « <i>photovoltaic hybrid system Siping and simulation Tools</i> » horizon Canada, 2001.
[20]	Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, and Yi-Jie Su, Member, IAENG, « <i>Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK</i> », Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008 WCECS 2008, October 22 - 24, 2008, San Francisco, USA
[21]	Zahoui Athmane abdessamed et Boudenna Omar abdelhak, « <i>Etude, Modélisation et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Turbine à Axe Vertical</i> » projet de master en Commande électrique, Université Ahmed Draïya Adrar, 2021.
[22]	Yousfi Ismail et Bakou EbdElhakim « <i>commande direct du couple DTC-SVM d'une GADA intégré dans un système éolien</i> » projet de master, Commande Electrique, Université Ahmed Draya d'ADRAR ,2020/2021.
[23]	Murdock, Hannah E., et al, « <i>Renewables 2021-Global status report.</i> », SWC50 Webinar 2021
[24]	V. Yaramasu, B. Wu, P. C. Sen, S. Kouro, and M. Narimani, « <i>High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies</i> », Proceedings of the IEEE, vol. 103, no. 5, p. 740–788, 2015.
[25]	Zouggar El Oualid, « <i>Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'un système éolien basé sur les génératrices asynchrones</i> », Thèse de doctorat, Université de Batna2, Algérie, 2021.
[26]	Commission de éduktion de l'Electricité et de G Z “C EG Progrmme national de développement des énergies renouvelables 2015-2030”, tech. Rep, october 2015. Accessed on February 2020.[Online] Available: https://www.creg.dz/index.php/component/content/article/58-creg/223-leprogramme-national-enr .
[27]	Available : http://portail.cder.dz/spip.php?article4098 (2015).
[28]	Bekhouche Fouad, RAHOU MOHAMED, « <i>Étude théorique d'une éolienne</i> », Projet de fin du cycle Master ,Université Ibn Khaldoun de Tiaret ,2021-2022.
[29]	Laïb Bachir ,Ayadi Bilal « <i>Etude expérimentale d'un système éolien à cité isolé</i> » Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued,2016-2017.

[30]	Khelfat Lotfi et Maataoui Lakhdar « <i>Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée</i> » Mémoire de Master, Electronique de Puissance, université Badji Mokhtar-annaba, juin 2017.
[31]	K. Berabez « <i>Effets des dispositifs FACTS sur l'amélioration de la qualité d'énergie produite par un générateur asynchrone auto-excité</i> », Mémoire de Magister en énergie électrique, Université Abderrahmane MIRA- Bejaia, 2015.
[32]	Yacine Rahab et Mouloud Teggour « <i>Etude de l'association d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) et d'un convertisseur multi niveaux</i> » Master, université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 28 septembre ,2014
[33]	Cheikh Ridha « <i>Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents et d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation</i> », thèse de Doctorat en sciences, Université Mohamed Khider Biskra, 2018.
[34]	Christian Bailleux et Pierre Clément, « <i>L'hydrogène révolutionnaire</i> », Direction des études et Recherches, EDF, 1989
[35]	Giguere, P. and SELIG, M. S.,1998. « <i>New Airfoils for Small Horizontal-Axis Wind turbines</i> », Transactions A.S.M.E., Journal of Solar Energy Engineering, 120, 108 – 114.
[36]	Benyahia, Kh, « <i>Design of Robust Controller of a Doubly-fed Induction Generator for Wind Energy Conversion System with different controllers</i> », Conference:The 3 rd International Seminar on New and Renewable Energies, Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa – Algérie ,October 2014.
[37]	Mesai, A, Kais, N, « <i>Commande de la machine asynchrone à double alimentation apport des techniques de l'intelligence artificielle</i> », projet de Master en Electrotechnique, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, Soutenue le juin 2017.
[38]	Tounsi Oussama LASKRI Zakaria « <i>Etude et commande d'une turbine éolienne Utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation</i> »Mémoire de Master , Electrotechnique industriel, université hadji Mokhtar- Annaba, 2017-2018.
[39]	M. Stiebler, « <i>Wind energy systems for electric power generation</i> », Springer Science & Business Media, 2008
[40]	Belgacem Hassane et Hamoudi Mektoub « <i>Optimisation du Rendement d'un Générateur Eolien à axe Horizontal Basé sur Machine Synchrone</i> » Master en Electromécanique, Electromécanique, Université Akli Mohand Oulhadj –Bouira, : 2017-2018.
[41]	S.Djeraba ,N.Melfi,« <i>Etude et contrôle d'un système énergétique hybride éolien-photovoltaïque</i> » Mémoire d'ingéniorat en électrotechnique, Ecole Supérieure de l'Energie Electrique et Energétique Oran, Algérie,2020

[42]	S. M. Boudia and O. Guerri, « <i>Investigation of wind power potential at Oran,northwest of Algeria</i> », Energy Conversion and Management, vol. 105, pp. 81-92,2015
[43]	Y. Djeriri, « <i>Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle</i> » ; Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université Djillali Liabès, Sidi Bel-Abbès, Algérie, Octobre 2015.
[44]	Elettronica Veneta, « <i>Système Hybride Photovoltaïque éolienne mod. PMWGP/EV</i> »Volume 2/2 Manuel de fonctionnement , université dr moulay taher saida ,algerie 2021
[45]	Elettronica Veneta , « <i>Onduleur injecteur de réseau mod. GT-INV/EV</i> » Manuel de fonctionnement manuel Professeur / Etudiant ,université dr moulay taher saida ,algerie 2021
[46]	Victron energy, « <i>Systèmes sites isolés et Systèmes de secours</i> », Energie en tout temps en tout lieu. Catalogue Victron Energy ,2017.
[47]	G. Segulier, F. Notelet, « <i>Electrotechnique industrielle</i> », Edition Technique et doc, Lavoisier, 1994

Annexe

Annexe A

Paramètres de simulation de panneau photovoltaïque

Puissance maximale du module P_m	260 W
Tension de circuit ouvert V_{CO}	37.94 V
Courant de court-circuit I_{CC}	8.66 V
Tension maximale V_m	31.28 V
Courant maximal I_m	8.32 A
Coefficient de température de la tension de circuit ouvert KV	-0.32 %/°C
Coefficient de température du courant de court-circuit KI	0.05 %/°C
NOCT, Nominal Operating Cell Temperature)	45+/- 2°C
Nombre de cellules en série N_s	60

Tableau 1: Caractéristiques électriques du module Ecoline LX 260P dans les conditions standards (irradiance 1000 W/m² , température 25°C, AM1.5)

Paramètres de simulation de l'éolienne

4. Paramètres de la turbine éolienne :

G= 90=Rapport du multiplicateur

Rayon de la turbine= 13m

R Masse volumique de l'air 3 1.22Kg / m=ρ

Coefficient de puissance maximal C_{p_max} =0.54

Annexe B

Modélisation de la commande à modulation de largeur d'impulsion

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de tension suivant une séquence choisie permet la génération de tensions alternative à la sortie de l'onduleur. La technique de modulation de largeur d'impulsions (MLI) permet la génération de signaux de commandes des interrupteurs de l'onduleur de manière à générer les tensions alternatives triphasées pouvant alimenter la machine asynchrone.[Seg-94].

Les techniques de commandes MLI permettent la génération de tensions alternatives possédant une fondamentale proche de la tension de référence et le reste des harmoniques repoussées vers les fréquences élevées afin de faciliter leur filtrage.

Commande MLI sinus - triangle :

Dans la commande MLI sinus triangle les signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur sont obtenus après comparaison de la tension de référence à une onde porteuse à haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation des interrupteurs sont déterminés par les points d'intersections entre la porteuse et la référence, Figure 1-14.

Caractéristiques de la M.L.I

Si la tension de référence est sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la commande ; l'indice de modulation m et le taux de modulation r .

L'indice de modulation m est égal au rapport de la fréquence de la porteuse sur celle de la référence. La valeur de cet indice est sujette à un compromis entre un bon rejet des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur qui se détériore à cause des pertes de commutations. [Seg-94].

$$m = \frac{f_p}{f_r}$$

Où f_r est la fréquence de la tension de référence et f_p est celle de la porteuse.

Le taux de modulation r est égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence sur la valeur de crête de la porteuse. Dans la pratique, on s'arrange toujours à avoir un taux de modulation inférieur à l'unité, de façon à éviter les ratés de commutation qui pourront entraîner des discontinuités de fonctionnement, et en particulier dans les applications à vitesse variable où l'on fait varier l'amplitude de la tension de référence.

$$r = \frac{V_r}{V_p} \quad (\text{I.48})$$

Où V_r est l'amplitude de la tension de référence et V_p est celle de la porteuse.

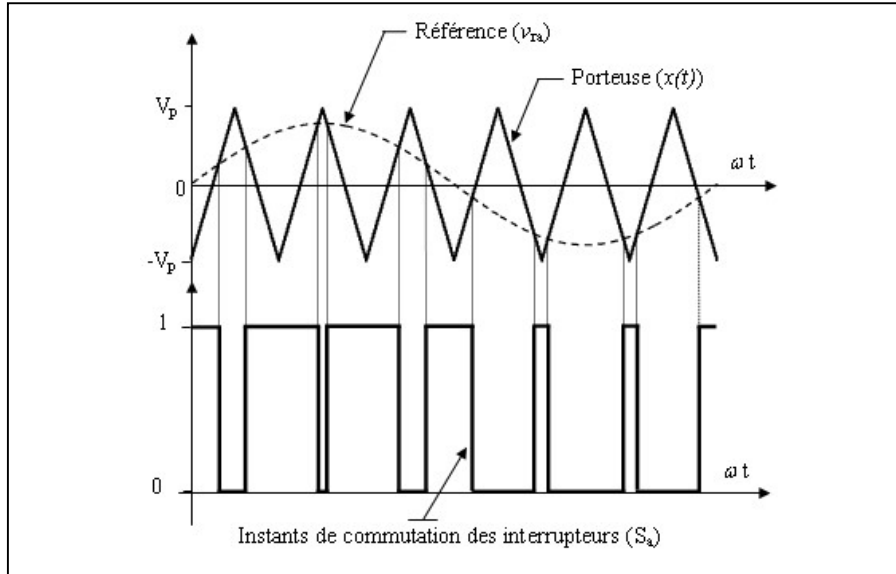


Figure: Description de la commande M.L.I. sinus – triangle

Modélisation de la commande MLI sinus – triangle

a) Equations de la porteuse

La porteuse est un signal triangulaire caractérisé par sa fréquence f_p et sa valeur de crête V_p . On définit l'équation de la porteuse dans sa période $[0, T_p]$ par :

$$\begin{cases} x_1(t) = V_p \left(-1 + 4 \frac{t}{T_p} \right) & \text{si } t \in \left[0, \frac{T_p}{2} \right] \\ x_2(t) = V_p \left(3 - 4 \frac{t}{T_p} \right) & \text{si } t \in \left[\frac{T_p}{2}, T_p \right] \end{cases}$$

b) Equations des tensions triphasées de référence

La référence est un signal sinusoïdal d'amplitude V_r et de fréquence f_r . En triphasé, les trois tensions sinusoïdales de référence sont données par :

$$\begin{cases} v_{ra} = V_r \sin 2\pi f_r t \\ v_{rb} = V_r \sin \left(2\pi f_r t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ v_{rc} = V_r \sin \left(2\pi f_r t + \frac{2\pi}{3} \right) \end{cases}$$

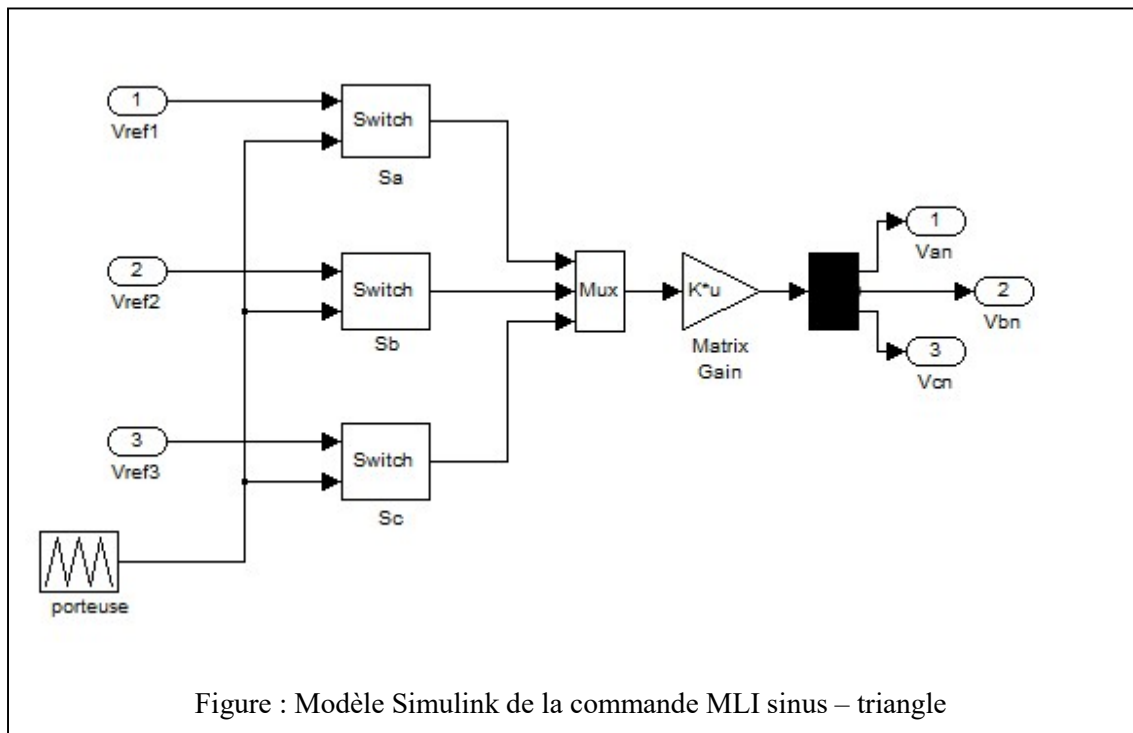
c) Equations des états des interrupteurs de l'onduleur

La commande MLI sinus triangle utilise la comparaison avec la porteuse des trois composantes de la tension de référence afin de calculer les états S_a , S_b et S_c des interrupteurs de l'onduleur. Ceux ci sont donnés par l'équation I.51 suivante :

$$S_{abc} = \begin{cases} 1 & \text{si } (v_{rabc} - x(t)) \geq 0 \\ 0 & \text{si } (v_{rabc} - x(t)) < 0 \end{cases}$$

Simulation de la commande MLI sinus – triangle :

La Figure I.13 représente le modèle Simulink de la commande MLI sinus triangle et la Figure I.14 montre la simulation de l'un des états de commutation des interrupteurs de l'onduleur S_a , ainsi que l'une des tensions de sortie v_{an} avec son spectre d'harmoniques quand les tensions d'entrées sont triphasées sinusoïdales de fréquence 50 Hz et d'amplitude 220 V . Dans la simulation on a pris $r = 0.9$, $m = 8$ et $m = 21$ avec $E = 500 \text{ V}$.



Le choix de l'indice de modulation utilisé dans la commande MLI sinus – triangle dépend aussi du type d'interrupteurs utilisés dans la conception de l'onduleur. Le choix de l'indice de modulation $m = 21$ est basé sur le fait que l'onde en impulsions est meilleure que l'onde rectangulaire si $f_{\text{porteuse}} > 20f_{\text{référence}}$

De plus ce choix convient parfaitement aux IGBT se trouvant sur le marché.

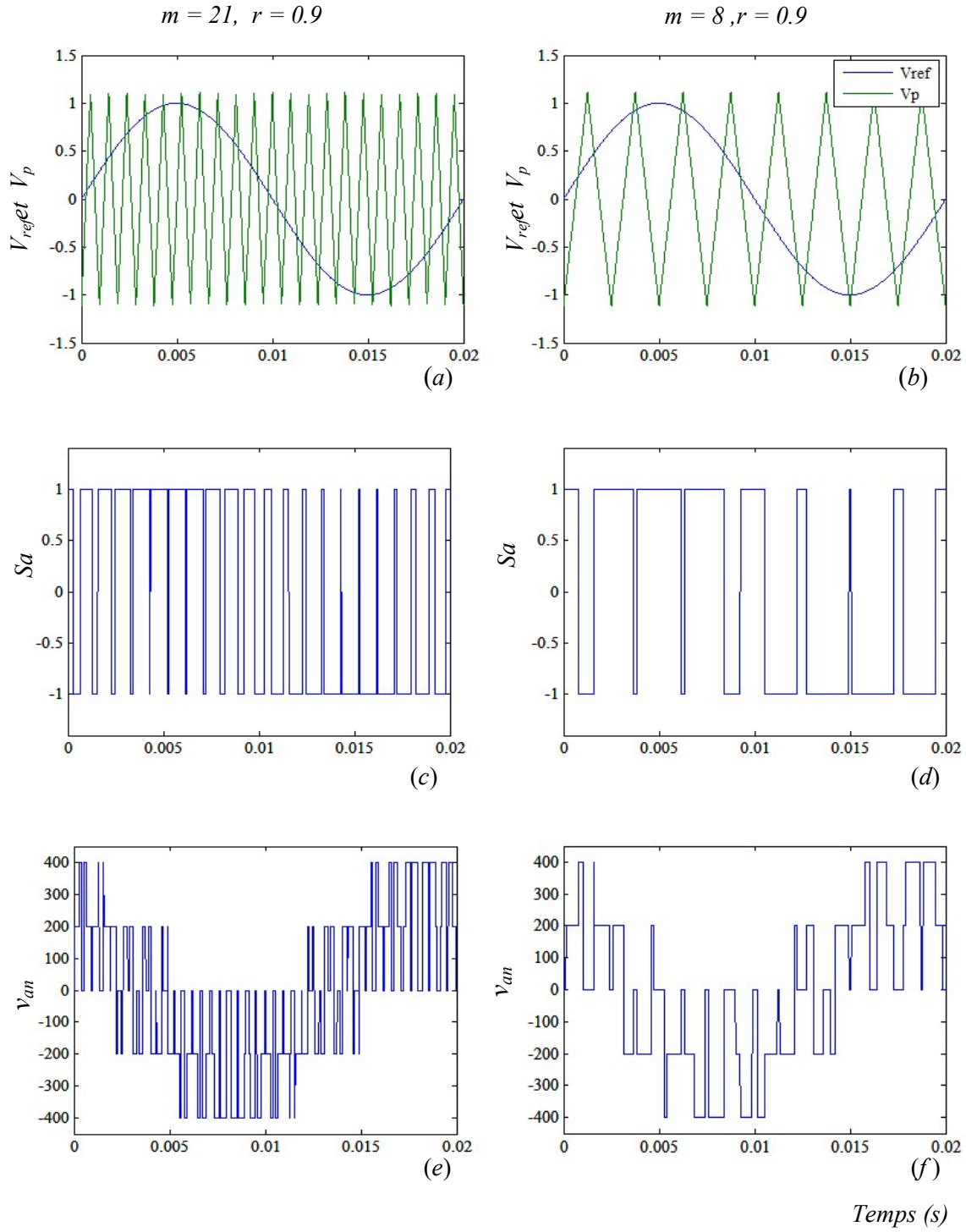


Figure: Simulation de la commande MLI sinus – triangle pour $r = 0.9, m = 8$ et $m = 21$