

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES

Faculté de Génie Electrique

Département d'Électrotechnique



Thèse présentée par :

BRAHAMI IMEN SOUHILA Epouse BOUSMAHA

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat en Électrotechnique

**Intitulé de la formation : Réseaux Electriques/Commande des Actionneurs
Electriques**

Option : Réseaux Electriques

Intitulé de la thèse :

*Optimisation du fonctionnement d'un générateur photovoltaïque
par guidage automatique des panneaux solaires*

Devant le jury composé de :

Président :	Dr. HADJERI Samir	Professeur	UDL Sidi Bel Abbès
Directeur de thèse :	Dr. BRAHAMI Mostefa	Professeur	UDL Sidi Bel Abbès
Examineurs :	Dr. KANSSAB Abdelkader	M.C.A	U Chlef
	Dr. SAYAH Houari	Professeur	UDL Sidi Bel Abbès
	Dr. KHATIR Mohammed	M.C.A	UDL Sidi Bel Abbès
Invité :	Dr TILMATINE Amar	Professeur	UDL Sidi Bel Abbès

Soutenu en: 2018

Laboratoire: Intelligent control And Electrical Power Systems ICEPS

Remerciements

Je remercie tout d'abord **ALLAH** de m'avoir prêté santé et volonté pour mener à terme cette thèse de doctorat.

Je profite de cette occasion pour exprimer ma sincère gratitude à mon directeur de thèse : Professeur **Mostéfa Brahami** pour ses précieux conseils, ses encouragements, ses discussions techniques novatrices et pour m'avoir fourni toutes les facilités nécessaires tout au long de ce travail. Cela n'aurait pas été possible sans ses motivations et son soutien sans fin.

J'exprime ma profonde reconnaissance au Professeur **Amar Tilmatine**, pour ses qualités humaines, son assistance, ses conseils judicieux et pour toutes ses directives scientifiques qui m'ont apporté un plus durant la publication de l'article.

J'adresse mes remerciements les plus sincères au Professeur **Hadjeri Samir** pour avoir accepté de présider le jury, tout comme j'adresse ma profonde reconnaissance au Professeur **Sayah Houari**, aux Docteurs **Khatir Mohammed**, **Kanssab Abdelkader** de l'université de **Chlef**, pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce modeste travail.

J'exprime ma plus grande admiration envers mes parents qui sont l'origine de mon inspiration.

J'adresse particulièrement mes plus vifs remerciements à ma mère pour les bénédictions, les sacrifices, les encouragements et le soutien moral qu'elle m'a apporté tout au long de ma carrière.

Je remercie également mes deux frères cadets pour leur aide durant la rédaction et l'achèvement de ma thèse ainsi que mon frère aîné à qui je dédie ce travail.

Toute ma reconnaissance revient à mon mari qui a su trouver le temps et la patience pour m'épauler durant ces longues années d'études.

Je ne pourrais terminer sans avoir à remercier mes collègues du laboratoire ICEPS et particulièrement ceux qui ont été très utiles pour le soutien scientifique et personnel: **Bechekir Seyf Eddine**, **Nehari Larbi** et **Hallouche Omar**.

Du fond du cœur, je remercie toutes les personnes m'ayant aidé de près ou de loin à mener ce travail à bien.

Liste des abréviations

PV photovoltaïque

UAI union astronomique internationale

p positif

n négatif

MPP point de puissance maximal: MPP (en anglais : maximal power point)

EVA éthylène- vynil- acétate

AM Air Mass

BIPV L'énergie photovoltaïque intégrée dans les bâtiments

DC/DC continu/ continu

GPV générateur photovoltaïque

PF point de fonctionnement

MPP maximum de puissance produit

ICEPS laboratoire d'électrotechnique Intelligent control and Electrical Power System

PWM Pulse With Modulation

BS batterie solaire

AGM Absorbed Glass Mat

GEL technologie qui repose sur de l'électrolyte figé par l'addition de gel de silice

Ni-Cd Nickel cadmium

Nimh Nickel métal hybride

MLI Commande à modulation de largeur d'impulsion

LDR photorésistances ou résistance photo-dépendante

PIC contrôleur d'interface périphérique

TBT Très Basse Tension

BT Basse Tension

Liste des symboles

SiO₂ Silice

MG Si Silicium Métallurgique

Cl- chlorures (Cl-)

SiHCl₃ Trichlorosilane

SoG-Si Monocrystalline silicon

GaAs Composite monocristallin pour système de concentrateur aérospatial

GaAs Cds CdTe Culn GaSe₂ Composite poly cristallin pour appareil électronique

V_{co} tension à vide

I_{cc} courant de court-circuit

V_{opt}, I_{opt} tension et courant optimaux

Si silicium

I_{scc} courant de court-circuit des cellules en série

V_{sco} tension à vide des cellules en série

n_s nombre des cellules associées en série

I_{pcc} courant de court-circuit des cellules en parallèle

V_{pco} tension à vide des cellules en parallèle

n_p nombre de p cellules associées en parallèle

I_{cci} courant de court-circuit idéal

V_{coi} tension à vide idéale

PF point de fonctionnement

AGM batterie solaire, Absorbed Glass Mat (sans entretien)

GEL batteries solaire, plomb à électrolyte gélifié.

CO₂ dioxyde de carbone

I_{pv} Courant du générateur PV

V_{pv} Tension aux bornes du générateur PV

P_L Pertes en ligne

I_{load} Courant dans la charge

V_{load} Tension de la charge

R_{load} Résistance de la charge

U_s tension à la source

I_s courant à la source

U_d tension à la sortie du diviseur

I_d courant à la sortie du diviseur

P_s Puissance à la source

P_d Puissance à la sortie du diviseur

n rendement

d rapport cyclique du commutateur

t_{on} le temps pendant lequel l'interrupteur est fermé

T période de commutation du montage

t_{off} le temps pendant lequel l'interrupteur est ouvert

dT période pendant laquelle l'interrupteur est fermé

(1-d) T période pendant laquelle l'interrupteur est ouvert

K commutateur

D diode

C1 condensateur

V_i tension d'alimentation

V₀ valeur moyenne

TC4420 HIGH-SPEED DRIVERS

IRFZ44N MOSFET

G éclairage

Pb plomb

PbO₂ oxyde de plomb

H₂SO₄ acide sulfurique dilué

Ah Ampères Heure

W_c watt crête

Li Lithium

U_c tension aux bornes de la charge

m indice de modulation

f_p fréquences de la modulation (porteuse)

f_m fréquences de la référence (modulante)

r Le coefficient de réglage en tension

A_m Amplitude modulante

A_p Amplitude de la porteuse

Th Thyristor

n₁ nombre de spire du primaire

n₂ nombre de spire du secondaire

τ constante de temps de la charge

CS convertisseur statique

SCd sulfure de cadmium.

R : la résistance du matériau

σ la conductivité du matériau

L la largeur de la bande du semi-conducteur photosensible

A la surface de la bande du semi-conducteur photosensible

E l'éclairement

γ constante généralement comprise entre 0.5 et 1

HS angle de hauteur

AZ angle d'azimute

SOMMAIRE

Introduction générale		1
<i>Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques</i>		
I.1.	Introduction	4
I.2.	Disposition du soleil	4
I.3.	Spectre du rayonnement	6
I.4.	Mouvements de la terre	6
	I.4.1. Mouvement de la terre autour du soleil	6
	I.4.2. Mouvement journalier de la terre	7
	I.4.3. Différence de chaleur sur terre	8
I.5.	Type de rayonnement solaire	8
I.6.	Energie solaire	10
	I.6.1. Utilités	10
	I.6.2. Historique de l'énergie photovoltaïque	10
I.7.	Constitution d'un système photovoltaïque	11
	I.7.1. Cellules	11
	I.7.2. Module photovoltaïque	15
	I.7.3. Caractéristiques électriques d'un module	16
	I.7.4. Puissance crête	19
	I.7.5. Champ photovoltaïque	21
I.8.	Avantages du système photovoltaïque	21
I.9.	Inconvénients	23
I.10.	Conclusion	23
<i>Chapitre II : Régulateurs de charge et batteries de stockage</i>		
II.1.	Introduction	25
II.2.	Convertisseurs DC-DC	25
	II.2.1. Principe de fonctionnement d'un convertisseur DC/DC	26
	II.2.2. Définition du rapport cyclique	28
II.3.	Types de convertisseurs DC-DC	29
	II.3.1. Convertisseur dévolteur (Buck converter)	29
	II.3.2. Hacheur survolteur	33
	II.3.3. Convertisseur Buck-Boost	37
	II.3.4. Hacheur survolteur pour onduleur	42
II.4.	Batteries d'accumulateurs	43
	II.4.1. Principe de Fonctionnement	43
	II.4.2. Caractéristiques de la batterie	44
	II.4.3. Différents types de batteries	45
II.5.	Conclusion	47
<i>Chapitre III : Onduleurs</i>		
III.1.	Introduction	48
III.2.	Schéma synoptique de l'onduleur	48
III.3.	Domaine d'utilisation des onduleurs	49

III.4.	Classification	50
	III.4.1. Onduleurs non autonomes	50
	III.4.2. Onduleurs autonomes	50
III.5.	Réalisation de l'onduleur	50
	III.5.1. Interrupteurs bidirectionnels	51
III.6.	Commandes des onduleurs	51
	III.6.1. Commande symétrique	52
	III.6.2. Commande décalée	54
	III.6.3. Modulation de largeur d'impulsion MLI	55
III.7.	Architecture de l'onduleur	57
	III.7.1. Onduleur en demi-pont	57
	III.7.2. Onduleur avec transformateur à point milieu	57
	III.7.3. Onduleur en pont complet	58
III.8.	Principe de fonctionnement d'un onduleur à deux interrupteurs en demi-pont	59
	III.8.1. Onduleur débitant sur une charge résistive	59
	III.8.2. Charge inductive	60
III.9.	Critères de différenciation entre les trois types d'onduleurs de tension	62
III.10.	Onduleurs réalisés au laboratoire ICEPS	63
	III.10.1. Onduleur à commande symétrique et décalée	63
	III.10.2. Onduleur à commande MLI	65
III.11.	Filtre d'entrée	66
III.12.	Connexion et emplacement de l'onduleur photovoltaïque	67
	III.12.1. Connexion	67
	III.12.2. Emplacement de l'onduleur photovoltaïque	69
III.13.	Caractéristiques propres d'un onduleur pour systèmes photovoltaïques	69
III.14.	Principe de la Recherche du MPPT	70
III.15.	Conclusion	71
Chapitre IV : SUIVEURS SOLAIRES		
IV.1.	Introduction	72
IV.2.	Généralités sur les suiveurs	72
	IV.2.1. Définition	72
	IV.2.2. Principe de fonctionnement:	72
	IV.2.3. Orientation des panneaux solaires	73
IV.3.	Types courants de traqueurs	75
	IV.3.1. Traqueurs passifs	75
	IV.3.2. Traqueurs actifs	75
IV.4.	Mécanisme de suivi	76
	IV.4.1. Arrangements des panneaux solaires	76
IV.5.	Avantages des traqueurs solaires	79
IV.6.	Suiveurs réalisés au laboratoire ICEPS	79
IV.7.	Composants électroniques utilisés	81
	IV.7.1. Pont en H	81
	IV.7.2. Capteur LDR	83
	IV.7.3. Microcontrôleur PIC pour circuit de commande	84

	IV.7.4.	Identification des Pics	85
	IV.7.5.	Choix des PIC	86
	IV.7.6.	Structure interne du pic 16f876	87
IV.8.	Description du système		89
	IV.8.1.	Programmation du PIC	90
	IV.8.2.	Ecriture du programme	91
	IV.8.3.	Organigramme	92
	IV.8.4.	Réalisation	92
	IV.8.5.	Routage	95
	IV.8.6.	Réalisation du montage	96
IV.9.	Conclusion		97
<i>Chapitre V : Simulation et Réalisation d'un Générateur Photovoltaïque</i>			
V.1.	Introduction		98
V.2.	Description du système		98
V.3.	Conception du générateur photovoltaïque		99
V.4.	Armoire électrique		100
	V.4.1.	Régulateurs	101
	V.4.2.	Onduleur	101
	V.4.3.	Batteries de stockage	101
	V.4.4.	Fusibles	102
	V.4.5.	Précautions de sécurité	102
	V.4.6.	Câblage de l'armoire du générateur PV	103
V.5.	Vérins mécaniques pour suiveur solaire		104
	V.5.1.	Commande de l'orientation Est-ouest	105
	V.5.2.	Commande de l'inclinaison Nord-Sud	105
V.6.	Simulation du générateur PV réalisé		106
	V.6.1.	Présentation du logiciel	106
	V.6.2.	Menus principaux	106
	V.6.3.	Caractéristiques géographiques du site	107
	V.6.4.	Simulation du système PV envisagé	108
V.7.	Caractérisation, essais et mesures du générateur PV		113
	V.7.1.	Matériel utilisé pour les essais	113
	V.7.2.	Essais à vide pour des panneaux orientés plein sud	114
	V.7.3.	Essais avec panneaux orientés	117
	V.7.4.	Essais avec suiveur	122
V.8.	Conclusion		127
Conclusion générale			128
Références bibliographiques			

Introduction générale

De nos jours, une grande partie de la production d'électricité est assurée par des ressources non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium. Leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine, ce qui entrainera à plus ou moins courte échéance un risque non nul d'épuisement de ces ressources. D'autant plus que la demande ne cesse de croître et tend dès à présent à être supérieure à l'offre.

D'autre part, ce type de consommation d'énergie a un impact néfaste sur l'environnement. A titre d'exemple pour les hydrocarbures et le charbon, d'importantes émissions de gaz à effet de serre sont générées quotidiennement jouant un rôle prépondérant au niveau du dérèglement climatique et de l'augmentation de la pollution. Ce constat pousse à rechercher de plus en plus de solutions innovantes palliant le déficit énergétique et limitant l'impact négatif sur l'environnement. De ce fait, le développement des sources non-polluantes à base d'énergie renouvelable est de plus en plus sollicité à la fois par les producteurs d'énergie et les autorités publics.

Les énergies renouvelables utilisent des sources inépuisables d'énergies d'origine naturelle: rayonnement solaire, vents, cycles de l'eau et du carbone dans la biosphère, flux de chaleur interne de la terre, effet solaire sur les océans,

Parmi les énergies renouvelables qui connaissent jours après jours des développements considérables : l'énergie solaire est considérée depuis longtemps comme l'origine des majorités d'énergies.

L'énergie solaire permet d'assurer des conditions de température favorables à la vie et anime les cycles de l'eau, des vents et du carbone dans la biosphère. Mais elle peut aussi être utilisée directement pour produire de la chaleur à différents niveaux de température pour divers usages : chauffage et climatisation de locaux, séchage de produits agricoles, production d'eau chaude et de vapeur, production d'électricité par le biais de cycles thermodynamiques.

La production d'électricité peut être aussi obtenue directement par la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire au moyen de photopiles. Cette dernière, bien qu'elle soit connue depuis de nombreuses années, comme source pouvant produire de l'énergie allant de quelques milliwatts au mégawatt, commence à se développer dans de grandes proportions, notamment à grâce à la baisse des coûts des équipements mis en œuvre.

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire. En effet vu l'importance de l'intensité du rayonnement reçu ainsi que la durée de l'ensoleillement qui dépasse les dix heures par jour pendant plusieurs mois, notre pays peut couvrir certains de ces besoins en énergie solaire, ces avantages pourraient être profitables dans les régions les plus reculées surtout dans les applications photovoltaïques.

Ces différents constats ont motivé différents travaux de recherches pour rendre viables des sources photovoltaïques.

Dans ces domaines, de nombreux progrès effectués sur les matériaux et les cellules au cours de ces dernières années sont à noter, notamment en termes de réduction de coût.

Les générateurs solaires doivent être orientés plein sud pour les habitants de l'hémisphère nord de manière à être perpendiculaire aux rayons solaires le plus de temps dans la journée Sachant que le soleil se lève à l'est et se couche à l'ouest le rayonnement solaire n'est pas toujours perpendiculaire et il est important que le générateur photovoltaïque suit la trajectoire du soleil.

L'Algérie a implanté plus d'une vingtaine de centrales photovoltaïques de types fixes reliées au réseau moyenne tension d'une capacité de 20 à 25 Mégawatts.

Dans ce contexte, notre motivation est de développer et d'optimiser l'énergie fournie par les panneaux photovoltaïques dans le but de maximiser la quantité d'éclairement absorbé en suivant le mouvement du soleil pendant la journée.

Pour cela la présente thèse est intitulée : **Optimisation du fonctionnement d'un générateur photovoltaïque par guidage automatique des panneaux solaires.**

Le but recherché dans le présent travail est :

De concevoir et réaliser un générateur de 810 Watts pouvant servir à alimenter un site isolé, un site de télécommunication, des personnes en, détresse durant les crues, les tremblements de terre ou toutes autres catastrophes naturelles.

De développer et réaliser un suiveur à un axe (Est-Ouest) avec une inclinaison Nord-Sud bien étudiée entraînant un moteur de faible puissance relié à un multiplicateur d'effort permettant un bon suivi des rayons solaires d'est en ouest et une grande économie d'énergie.

Après une introduction générale on présente des généralités sur la conversion photovoltaïque, on cite les différentes technologies des cellules photovoltaïques et leurs regroupements (séries ou parallèles), les différentes caractéristiques des modules photovoltaïques tout cela est présenté dans le premier chapitre.

Au deuxième chapitre on présente les différents types de convertisseurs continu-continu permettant de réguler, abaisser ou élever la tension délivrée par le générateur photovoltaïque, le stockage d'énergie par batterie est également cité. On discutera également de la recherche du maximum de puissance en présentant des exemples des régulateurs réalisés au laboratoire ICEPS.

Une étude générale des onduleurs monophasés dans laquelle nous citons les différents types d'onduleurs ainsi que leurs commandes (symétrique, décalée et MLI) sont présentés au chapitre trois. A la fin on donne des exemples d'onduleurs réalisés au laboratoire ICEPS.

Le quatrième chapitre porte sur la réalisation du suiveur solaire développé, en commençant par une simulation du schéma développé sur le logiciel ISIS PROTEUS, puis on passe à la réalisation sur la plaque d'essai et enfin sur le circuit imprimé.

Les essais et mesures sur le générateur photovoltaïque réalisé sont développés au chapitre cinq. On présente les différents essais et mesures: générateur fixe orienté sud, générateur mobile d'est en ouest avec inclinaison fixe et variable. Enfin on fait entrer en action le suiveur à un axe avec une inclinaison optimisée à 30° plein sud pour caractériser le générateur photovoltaïque réalisé

On termine notre travail par une conclusion générale et des perspectives.

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction

Le mot « Photovoltaïque » est la combinaison de deux mots: « photo », mot d'origine grecque qui signifie lumière ; et « voltaïque », qui vient de « volt » et représente l'unité utilisée pour mesurer le potentiel électrique [1].

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant des photons, comprise dans le rayonnement solaire, en énergie électrique, par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible (nommés cellules PV) [2].

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque [3].

Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel.

Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur [4].

Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules

I.2. Disposition du soleil

L'unité astronomique, qui correspond à la distance entre la terre et le soleil a été officiellement gravée dans le marbre par l'union astronomique internationale (UAI) et est de 149 597 870.700 km [5, 6, 7].

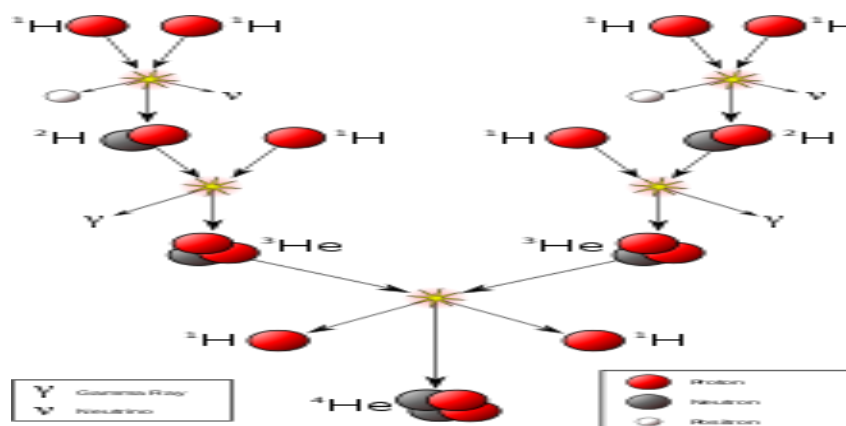
Le soleil est composé de matière gazeuse principalement d'éléments légers: hydrogène à 74 % et hélium à 24 % (voir le tableau I.1). Ces derniers sont moins abondants sur la Terre qui est plutôt constituée de matériaux lourds, qui entrent pour 0,1 % seulement dans la composition du soleil [8]

Tableau I.1: Composition chimique du soleil [9].

Composition photosphérique (en masse)	
Hydrogène	73,46 %
Hélium	24,85 %
Oxygène	0,77 %
Carbone	0,29 %
Fer	0,16 %
Néon	0,12 %
Azote	0,09 %
Silicium	0,07 %
Magnésium	0,05 %
Soufre	0,04 %

Le soleil est le siège de réactions de fusion nucléaire permanentes et sa température de cœur atteint 10^7 K.

Actuellement, dans le cœur du soleil, chaque seconde, environ 627 millions de tonnes d'hydrogène fusionnent pour produire environ 622,7 millions de tonnes d'hélium (voir figure I.1). La différence de masse de 4,3 millions de tonnes d'hydrogène (une masse de l'ordre de celle de la pyramide de Gizeh) équivaut à l'énergie lumineuse produite ($4 \cdot 10^{26}$ joules). Cette énergie lumineuse migre lentement par rayonnement et par convection vers la surface solaire et est émise dans l'espace sous forme de rayonnements électromagnétiques (lumière, rayonnement solaire) et de flux de particules (vent solaire) [10].

**Figure I.1 :** Transformation de l'hydrogène en hélium [11]

I.3. Spectre du rayonnement

Les rayons solaires arrivent en permanence sur Terre et chauffent la surface de notre planète, sans cet apport d'énergie, la terre serait glaciale.

Le soleil émet un rayonnement de type électromagnétique. La lumière blanche nous parvient en très peu de temps (elle met en moyenne environ 8 minutes et 19 secondes à nous parvenir) car il se déplace à la vitesse de la lumière, soit 299 792 458 m/s [12].

Le rayonnement solaire est composé de plusieurs types de rayons, certains sont filtrés ou arrêtés par l'atmosphère et les nuages, alors que d'autres ne le sont pas. Les rayons solaires sont aussi appelés les radiations [13] (voir figure I.2).

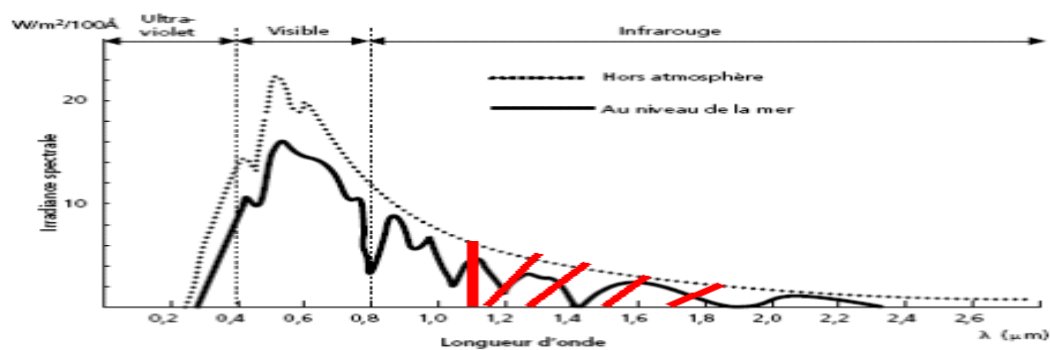


Figure I.2: Spectre électromagnétique par et hors atmosphère.

I.4. Mouvements de la terre

I.4.1. Mouvement de la terre autour du soleil

La Terre fait sa révolution autour du soleil en un an. Durant cette période, l'axe de rotation de la terre pointe toujours dans la même direction (vers l'étoile polaire dans l'hémisphère nord). Par conséquent, l'axe pointe vers le soleil durant une partie de l'année, et en direction opposée 6 mois plus tard. Ces deux faits ; axe de rotation incliné pointant toujours dans la même direction et révolution terrestre, expliquent l'alternance des saisons et la variation de la longueur des jours et des nuits durant l'année voir figure I.3.

Ce mouvement de révolution s'effectue dans un plan nommé le plan de l'écliptique. L'axe des pôles, autour duquel s'effectue le mouvement de rotation de la Terre, n'est pas perpendiculaire au plan de l'écliptique [14].

La déclinaison varie au cours de l'année, de $-23^{\circ}27'$ à $+23^{\circ}27'$. Le centre de gravité de la terre décrit une ellipse dont le soleil occupe l'un des foyers. Le sens des variations de la déclinaison peut être appréhendé à travers des 4 positions clés suivantes :

Au solstice d'hiver (21 décembre) : les rayons solaires frappent la terre avec un angle de déclinaison de $-23^{\circ}27'$; c'est la valeur minimum de la déclinaison.

A l'équinoxe de printemps (21 mars): le rayon solaire est dans le plan de l'équateur et la déclinaison vaut alors 0° ; cette position traduit l'égalité des jours et des nuits.

Au solstice d'été (23 juin) : la position de la terre est opposée à celle du 21 décembre et le soleil frappe l'hémisphère Nord avec l'angle maximum de déclinaison de $23^\circ 27'$.

A l'équinoxe d'automne (22 septembre): la situation est identique à celle du 21 mars et la déclinaison repasse à 0° [15].

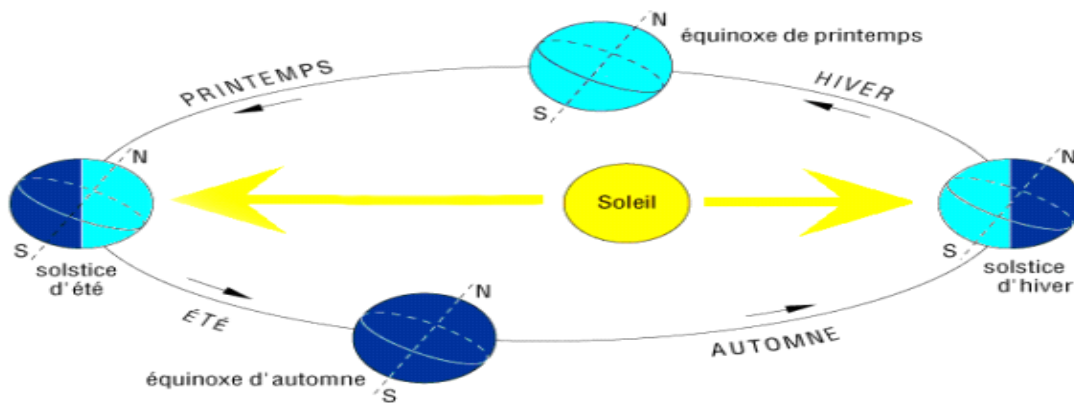


Figure I.3: Mouvement de la terre autour du soleil [16].

I.4.2. Mouvement journalier de la terre

Ceci signifie le mouvement de rotation de la Terre sur elle-même autour de l'axe des pôles géographiques qui relie le pôle Nord au pôle Sud et perpendiculairement au plan équatorial (comme montrée sur la figure I.4).

Ainsi, la rotation et l'inclinaison de la Terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison [17, 18].

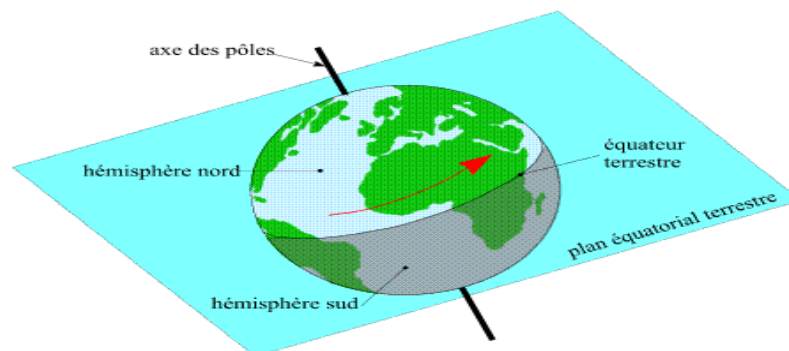


Figure I.4: Mouvement de la terre sur elle-même.

I.4.3. Différence de chaleur sur terre

Lorsque le soleil est bas dans le ciel, les rayons lumineux arrivent au sol avec un angle plutôt faible (A). Un faisceau lumineux de 1 m de largeur couvrira une zone assez large, disons 1,6m.

Si le soleil est plus haut, l'angle des rayons lumineux sera élevé (B), et un même faisceau de 1 m de largeur couvrira une zone plus petite. La même quantité de chaleur sera répartie sur une surface plus petite, la surface sera donc plus chaude (comme montrée sur les figures I.5.a et I.5.b).

C'est la raison pour laquelle il fait plus chaud lorsque le soleil est plus haut dans le ciel. Ça explique les différences de température entre les pôles et l'équateur, d'une saison à l'autre et même au cours de la journée : c'est plus chaud au milieu de la journée, lorsque le soleil est au point le plus haut [19].

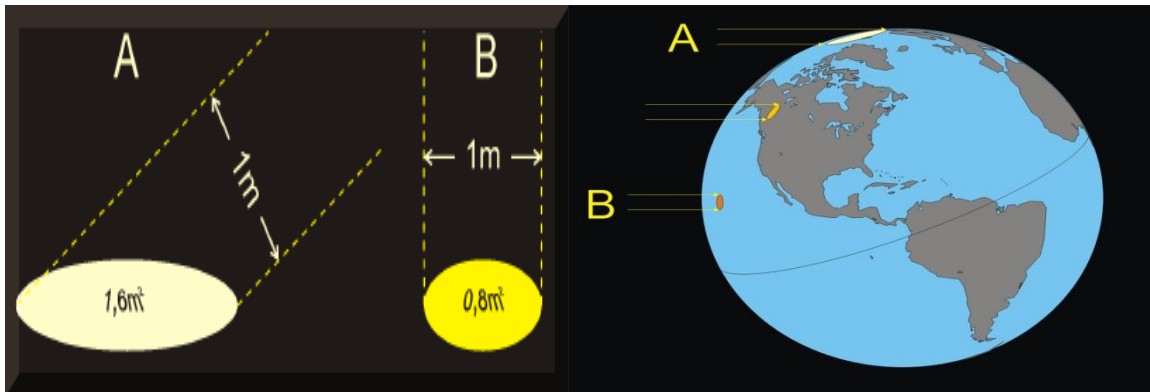


Figure I.5.a: Eclairage Terre-Soleil

Figure I.5.b: Différence de chaleur sur terre

A chaque heure, la rotation est donc de 15° ($360^\circ / 24$ heures). Au cours de ce mouvement diurne, à une date donnée, un point A situé à la surface de la terre va donc successivement se trouver placé dans une situation particulière par rapport au soleil et voir son état d'éclairage modifié [20].

I.5. Type de rayonnement solaire

L'énergie que transmet le soleil à la surface de l'atmosphère par rayonnement est égale à 1350 Watts/m^2 [21] (c'est la constante solaire). Cependant, en traversant l'atmosphère, des parties de ce rayonnement sont réfléchies, absorbées ou diffusées comme montré sur la figure I.6, ce qui diminue significativement cette valeur. Cette diminution est d'autant plus forte que la couche d'atmosphère est importante. Ainsi, l'énergie que nous transmet le soleil dépend de plusieurs facteurs comme l'épaisseur de l'atmosphère où l'on se trouve ou encore la position du soleil et sa valeur atteint dans les meilleures conditions 900 à 1000 Watts/m^2 . [21]

- **Le rayonnement direct** : le plus puissant, qui provient directement du soleil sans subir d'obstacles sur sa trajectoire (nuage, immeubles...). C'est lui qui nous aveugle lorsque l'on cherche à regarder le soleil "droit dans les yeux" par temps découvert.
- **Le rayonnement diffus** : provient des multiples diffractions et réflexions du rayonnement solaire direct par les nuages. C'est à lui que nous devons la "lumière du jour" qui nous permet d'y voir clair même quand le temps est couvert.
- **Le rayonnement dû à l'albédo ou réfléchi** : résulte de la réflexion du rayonnement solaire direct par le sol, qui est d'autant plus important que la surface est claire et réfléchissante (neige, étendue d'eau, ...). C'est lui qui peut nous faire attraper des coups de soleil à la montagne ou à la mer sans qu'on les sente venir.
- **Le rayonnement global sur une surface horizontale** : est la somme des rayonnements: Direct et Diffus
- **Le rayonnement global sur une surface inclinée** : est la somme des rayonnements: Direct, Diffus et Réfléchi [22, 23]

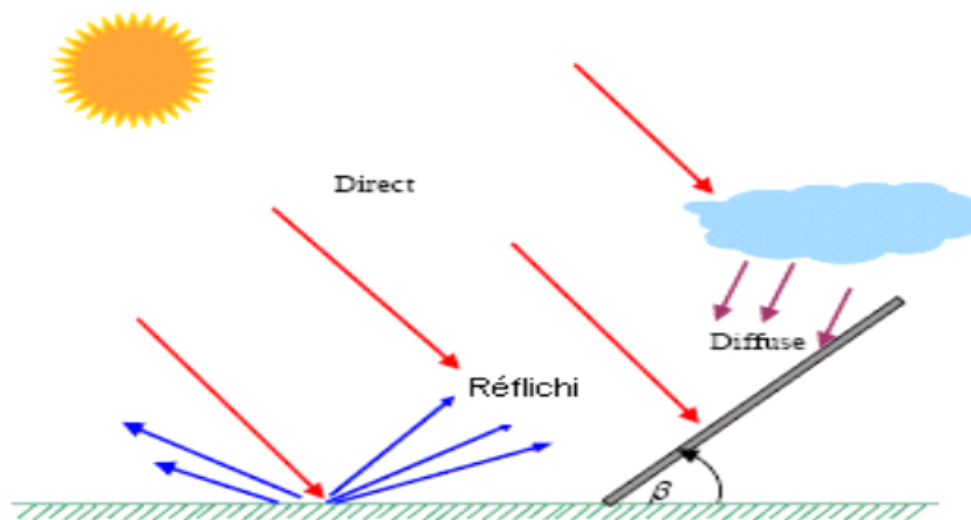


Figure I.6: composantes du rayonnement solaire global [23]

I.6. Energie solaire

I.6.1. Utilités

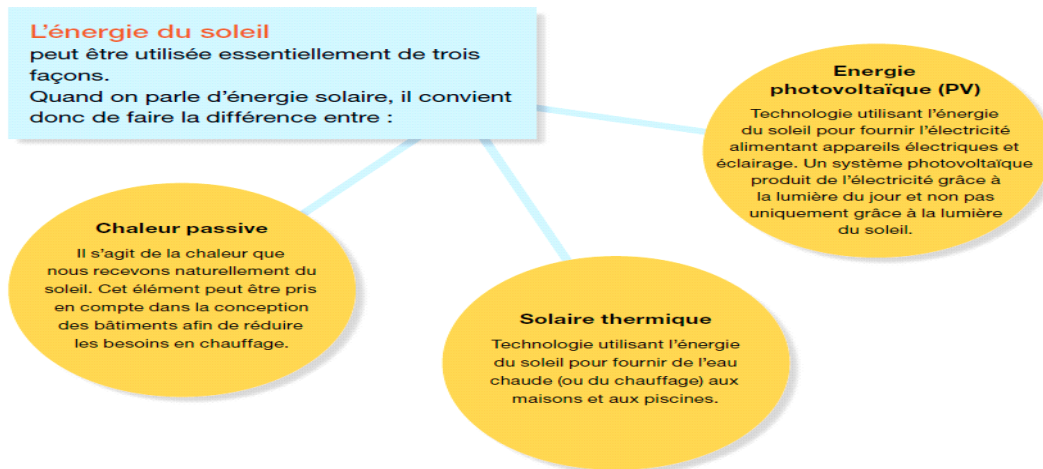


Figure I.7: Exploitation de l'énergie solaire [24]

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'étude de l'énergie solaire photovoltaïque.

I.6.2. Historique de l'énergie photovoltaïque

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque [25, 26].

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.

1905 : Albert Einstein a écrit que la lumière pouvait entrer à l'intérieur des atomes, et que la collision entre les photons et les atomes pouvait faire sortir des électrons de leurs orbites et permettre la création d'un courant électrique.

1912 : Albert Einstein sera le premier à expliquer le phénomène d'effet photovoltaïque, et reçoit le prix Nobel de physique en 1921 pour cette explication.

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 à l'Université de Delaware.

1983: La première voiture alimentée par l'énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

1995: Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

Actuellement la production mondiale de l'électricité à base d'énergie solaire est d'environ: 185.9 TWh [27].

I.7. Constitution d'un système photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés "semi-conducteurs", dont le plus communément utilisé est le silicium, un élément présent en grande quantité dans le sable [28].

Un système photovoltaïque se compose principalement de :

I.7.1. Cellules

Éléments de base de l'unité qui collectent la lumière du soleil; la fabrication des cellules s'agit dans un premier temps d'élaborer du silicium de grade solaire utilisable pour former des plaques de Silicium. Le Silicium est tiré de la Silice (SiO_2), que l'on trouve abondamment dans la nature, dans le quartz ou dans le sable et est raffiné par réduction carbo thermique effectuée dans un four à Arc afin d'obtenir du Silicium Métallurgique (MG Si) qui n'est pas encore exploitable pour la création de panneau solaire [29].

Pour purifier le Silicium métallurgique, on peut le faire de différentes manières mais la voie chimique est la plus répandue. Ceci en utilisant le principe du Chlore du fait de la forte attraction des atomes de Silicium et des ions chlorures (Cl^-). Ces composés sont purifiés ensuite par distillation et décomposition thermique [30] (voir figure I.8).

Le Silicium solaire ou poly cristallin obtenu lors de la précédente étape va être ensuite fondu et ré solidifié en lingots. C'est dans ces lingots que l'on découpe finalement les plaques de silicium qui serviront à fabriquer les cellules [31] (voir figure I.9).

En effet, c'est lorsque le silicium est en fusion que les produits dopants sont ajoutés afin qu'un courant électrique se forme au sein des cellules. C'est aussi lors de cette étape que se crée la distinction entre panneaux monocristallins et poly cristallins [32].

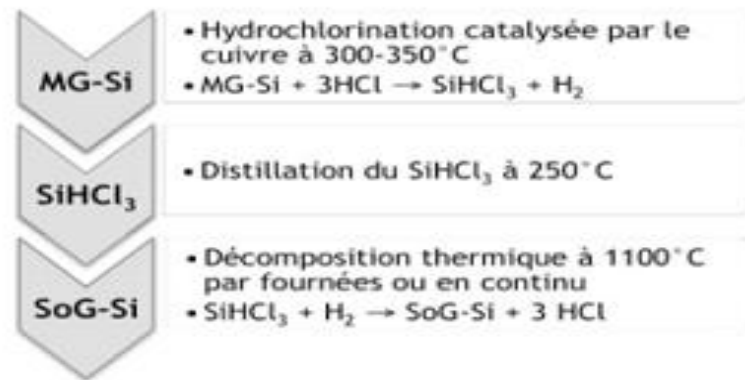


Figure I.8: Purification du Silicium Métallurgique [33]

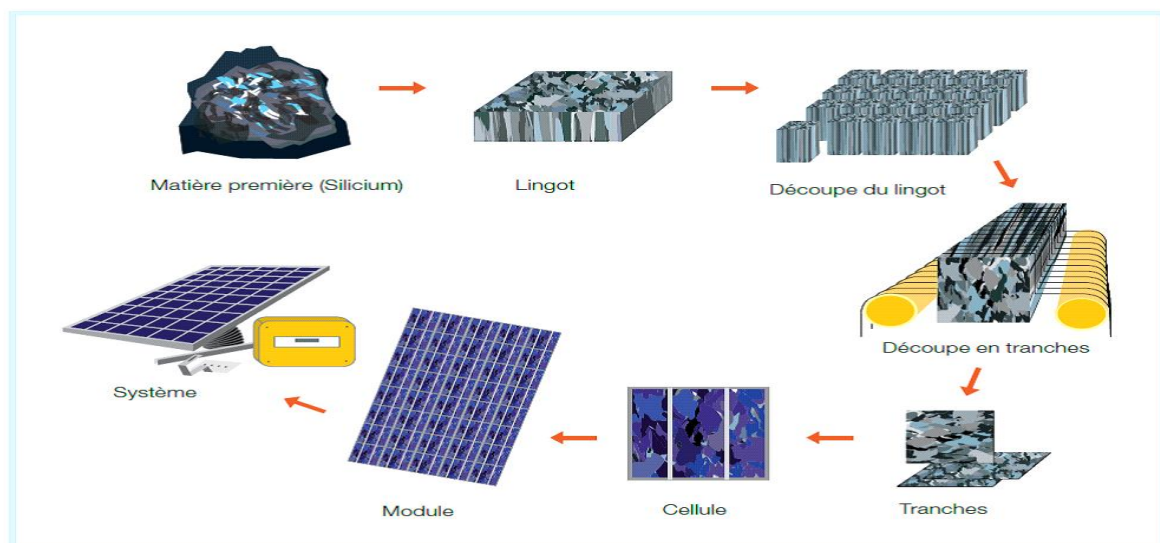


Figure I.9: Chaîne de production de panneaux photovoltaïque (technologie cristalline) [34].

I.7.1.a. Principe de fonctionnement

Pour passer de l'effet photovoltaïque à l'application pratique, il est nécessaire de trouver des matériaux qui permettent d'optimiser les deux phases essentielles de ce principe:

- Absorption de la lumière incidente
- Collection des électrons en surface

Les cellules PV sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs qui sous l'effet de la lumière sont capables de conduire l'électricité ou de la transporter.

Une des faces de la cellule est dopée **n** (par exemple du phosphore possédant 5 électrons sur sa dernière couche ainsi l'atome susceptible à libérer un électron). L'autre face est dopée **p** (par exemple du bore qui possède lui 3 électrons seulement sur sa périphérie, ainsi l'atome manque un électron pour la réalisation des liaisons, le bore va donc capter un électron dans le reste du matériau).

Des électrodes métalliques sont placées sur les 2 faces pour permettre de récolter les électrons et de réaliser un circuit électrique voire figure I.10.

La face supérieure de la cellule est traitée de manière à optimiser la quantité de lumière entrant dans la cellule au moyen de traitement de surface, par l'application d'une couche anti réflexion.

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent). Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie $h\nu$ à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons pour rejoindre les trous de la face antérieure à travers un circuit extérieur créant ainsi un courant électrique continu qu'on appelle le photo courant, les électrons sont délivrés sous la tension créée dans la jonction PN qu'on appelle la photo tension (comme montrée sur la figure I.11) [35].

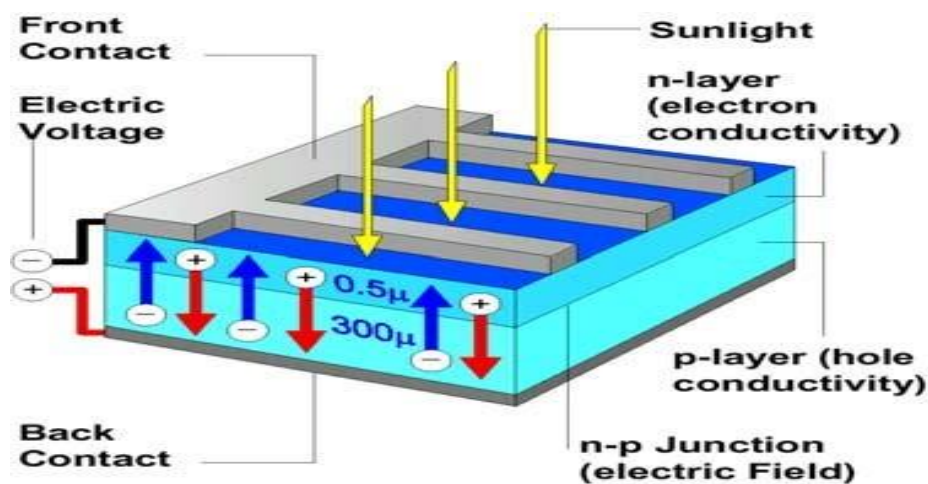


Figure I.10: Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque [36]

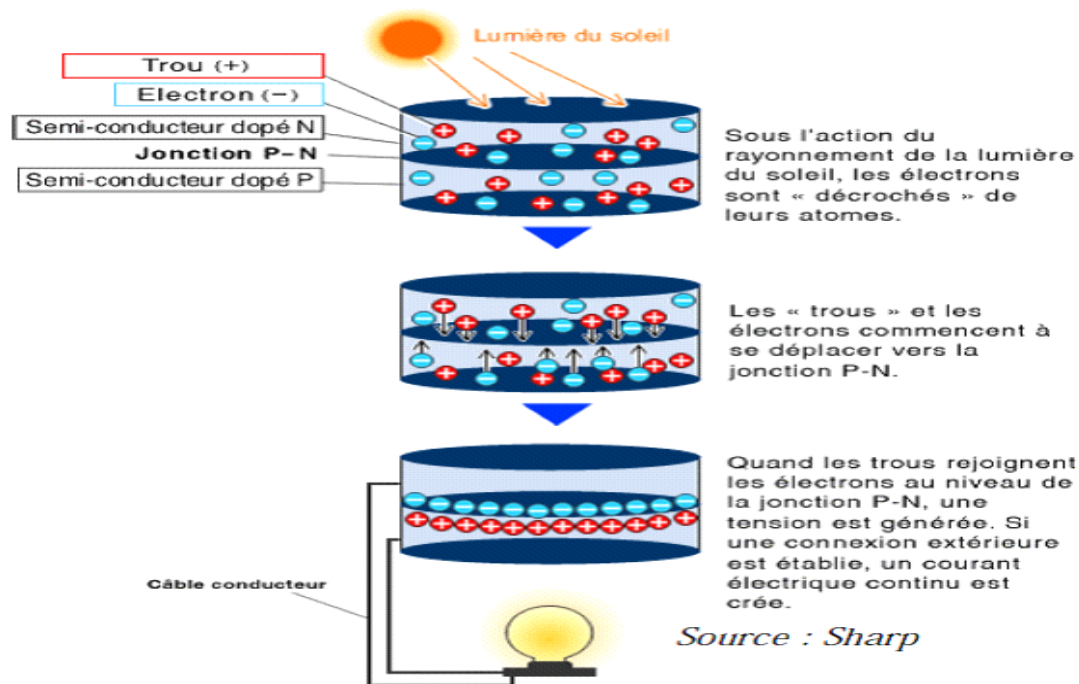


Figure I.11 : Principe de fonctionnement [37]

I.7.1.b. Différentes technologies

Il existe différentes technologies de cellules photovoltaïques. Les différences entre elles se situent au niveau des matériaux utilisés et des procédés de fabrication (tableau I.2)

Tableau I.2: Comparatif des différentes technologies [38].

Matériau	Rendement	Longévité	caractéristiques	Principales utilisations
Silicium mono cristallin	12 à 18% <i>(24,7% en laboratoire)</i>	20 à 30 ans	* Très performant * Stabilité de production d'W * Méthode de production coûteuse et laborieuse.	Aérospatiale, modules pour toits, façades,...
Silicium poly cristallin	11 à 15% <i>(19,8% en laboratoire)</i>	20 à 30 ans	* Adapté à la production à grande échelle. * Stabilité de production d'W. Plus de 50% du marché mondial. * Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. * Fonctionnement si faible luminosité.	Modules pour toits, façades, générateurs...
Amorphe	5 à 8% <i>(13% en laboratoire)</i>		* Fonctionnement par temps couvert. * Fonctionnement si ombrage partiel * La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment
Composite mono cristallin (GaAs)	18 à 20% <i>(27,5% en laboratoire)</i>		* Lourd, fissure facilement	Systèmes de concentrateurs Aérospatiale (satellites)
Composite poly cristallin (CdS, CdTe, CuInGaSe2, etc.)	8% <i>(16% en laboratoire)</i>		Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment

I.7.1.c. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :

Sous un éclairement donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (Figure I.12) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe [39]:

- Sa tension à vide: V_{co} : cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Son courant de court-circuit: I_{cc} : cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Son point de puissance maximal: MPP (en anglais : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimaux : V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{mpp} , I_{mpp}).

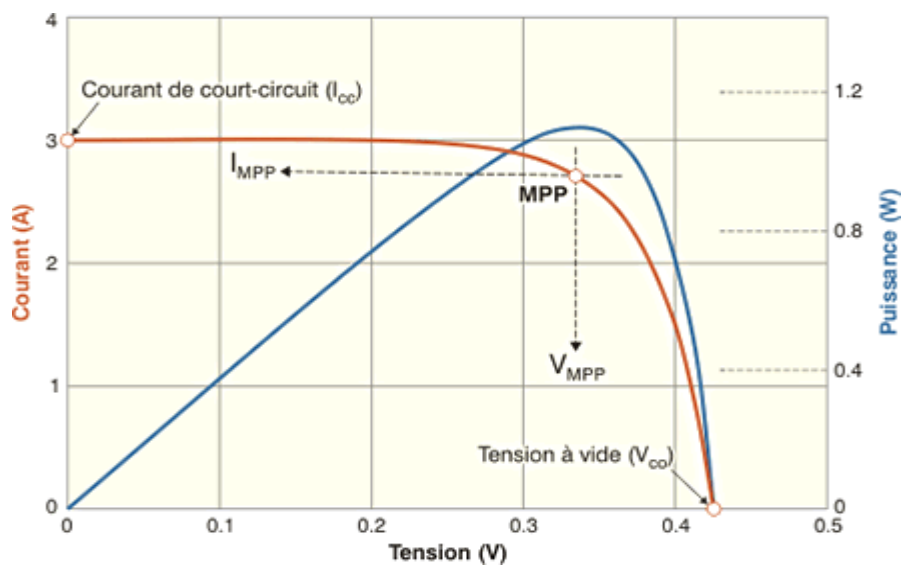


Figure I.12: Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire photovoltaïque

I.7.2. Module photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module. Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension [40].

Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène- vinyl- acétate) (voir figure I.13) et protégées sur la surface avant d'un verre trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique et sur la surface arrière de polyéthylène [41]

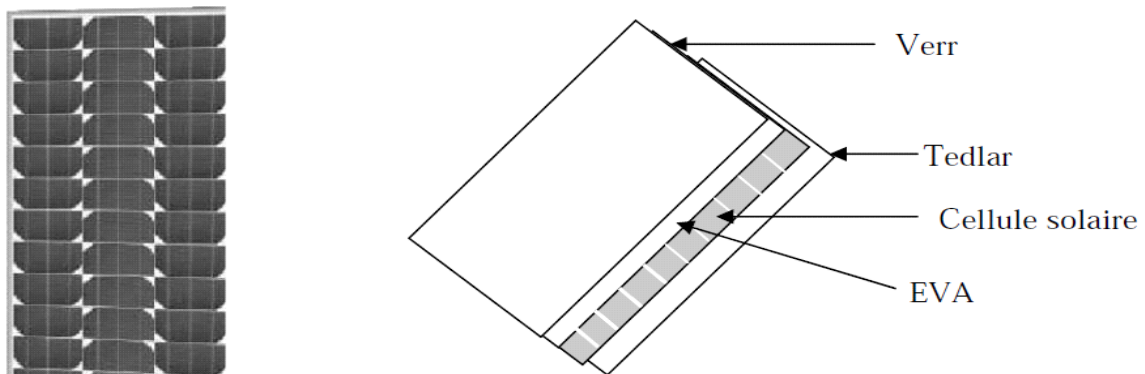


Figure I.13: Module photovoltaïque

Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation.

A l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant 2 diodes antiparallèles (figure I.14).

Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre [42].

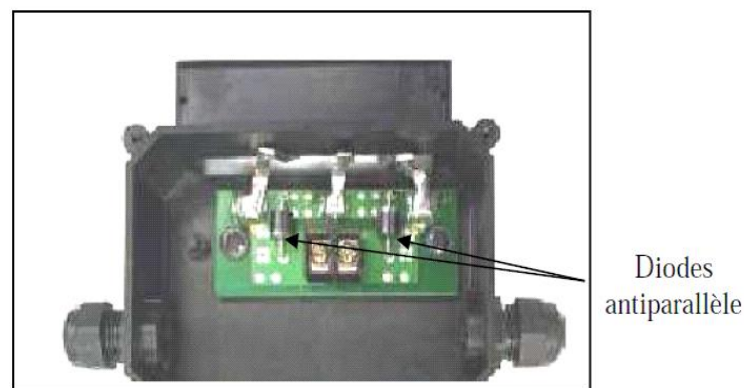


Figure I.14: Boîte de jonction

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.

I.7.3. Caractéristiques électriques d'un module

Dans les conditions standardisées de test, la puissance maximale pour une cellule Si (silicium) de 100 cm² (10 sur 10) tourne aux alentours de 1,25 Watt.

Cette cellule constitue donc un générateur de très faible puissance, insuffisant pour les applications électriques courantes. Les modules sont donc réalisés par association, en série et/ou en parallèle, de cellules élémentaires.

Pour que l'électricité générée soit utilisable pour les applications électriques, il est donc nécessaire d'associer entre elles un grand nombre de cellules.

Les modules (généralement présentés sous forme de panneaux) sont constitués d'un certain nombre de cellules élémentaires placées en série afin de rendre la tension à la sortie utilisable. Ces modules sont ensuite associés en réseau (série-parallèle) de façon à obtenir les tensions/courants désirés [43].

I.7.3.a. Association en série

Par association en série (appelée "String"), les cellules sont traversées par le même courant et la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules (Figure I.15) [44].

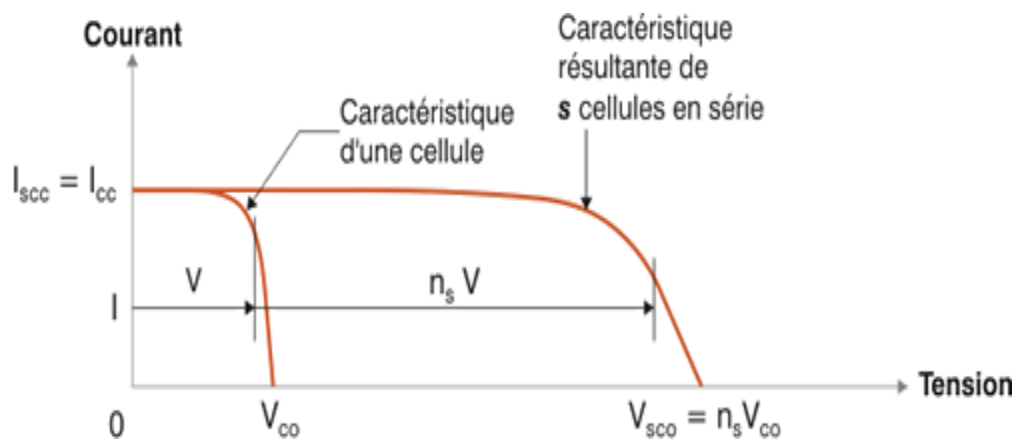


Figure I.15: Caractéristique électrique par association en série

V_{co} tension à vide

I_{cc} courant de court-circuit

n_s nombre de cellule série

I_{sco} courant de court-circuit des cellules en série

I.7.3.b. Association en parallèle

Par association en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et le courant résultant correspond à la somme des courants générés par chacune des cellules Figure I.16.

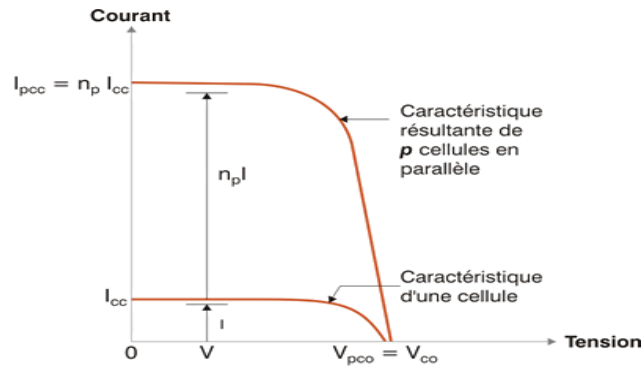


Figure I.16: Caractéristique électrique par association en parallèle

n_p nombre de cellule en parallèle

I_{pcc} courant de court-circuit des cellules en parallèle

I.7.3.c. Association en série-parallèle

Les caractéristiques globales d'une installation se déduisent donc d'une combinaison des caractéristiques des constituants des $n_s \cdot n_p$ (Figure I.17).

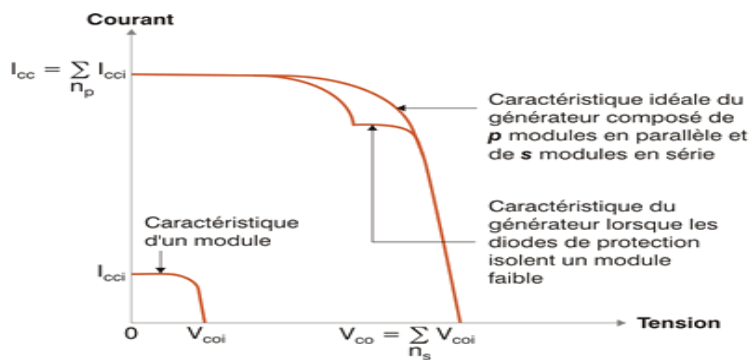


Figure I.17: Caractéristique électrique par association en parallèle

I.7.3.d. Diodes de by-pass

Il arrive fréquemment que les cellules élémentaires qui composent le module ne présentent pas toutes la même courbe caractéristique au même moment. Les raisons peuvent être multiples: variété inévitable de fabrication, défaillance, différence d'éclairement ou de température (dus par exemple à un ombrage non uniforme du module, un encrassement,...).

Sous certaines conditions, la cellule la plus faible peut alors se comporter comme une cellule réceptrice, dissipant la puissance générée par la cellule la plus forte. Celle-ci peut même être détruite si la contrainte ou la température devient trop importante. Pour éviter ce phénomène, on place des diodes de by-pass (empêchant tout courant ou tension inverses). Celles-ci sont placées en série lorsque les cellules sont connectées en parallèle et en parallèle lorsque les cellules sont connectées en série.

Les modules commercialisés aujourd'hui comprennent généralement des diodes de protection situées en parallèle des différents strings qui le composent [43] Figure (I.18, I.19).

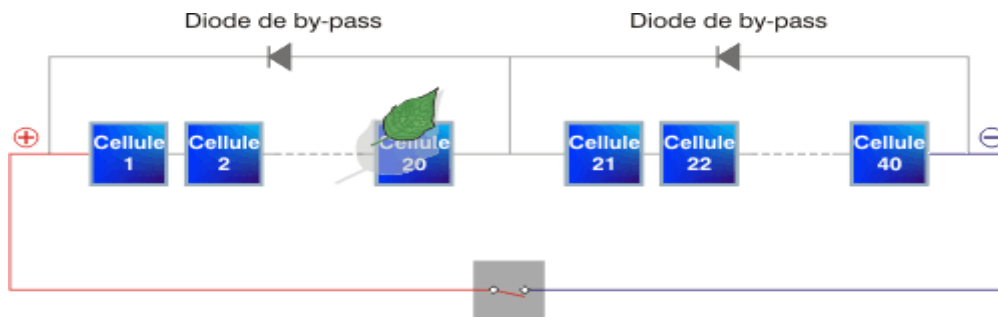


Figure I.18: Protection du module par les diodes by-pass

L'utilisation de ces by-pass induit néanmoins des perturbations de la courbe caractéristique, modifiant le point de puissance maximal du module

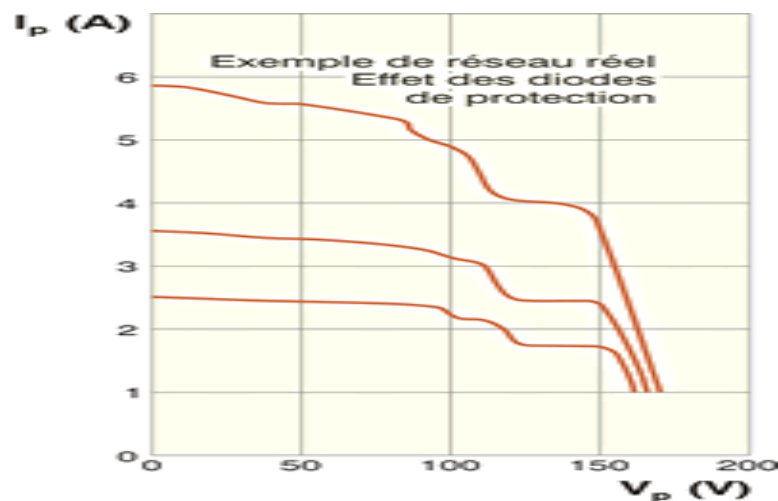


Figure I.19: Caractéristique électrique par diode by-pass

Pour ne pas induire inutilement ces pertes, il est donc très important que ces diodes de by-pass soient utilisées et placées en cohérence avec les ombres générées par l'environnement du module.

I.7.4. Puissance crête

Les constructeurs spécifient toujours la puissance crête d'un panneau photovoltaïque. Elle représente la puissance maximum fournie par le panneau lorsque l'éclairement est $1\,000\text{ W/m}^2$, la température est 25 °C et le spectre solaire Air Mass (AM) 1,5.

Cependant, cette puissance est rarement atteinte car l'éclairement est souvent inférieur à $1\,000\text{ W/m}^2$ et la température des panneaux en plein soleil dépasse largement les 25 °C [44, 45].

I.7.4.a. Influence de l'éclairement

A température constante, la caractéristique *courant-tension* dépend fortement de l'éclairement (Figure I.20).

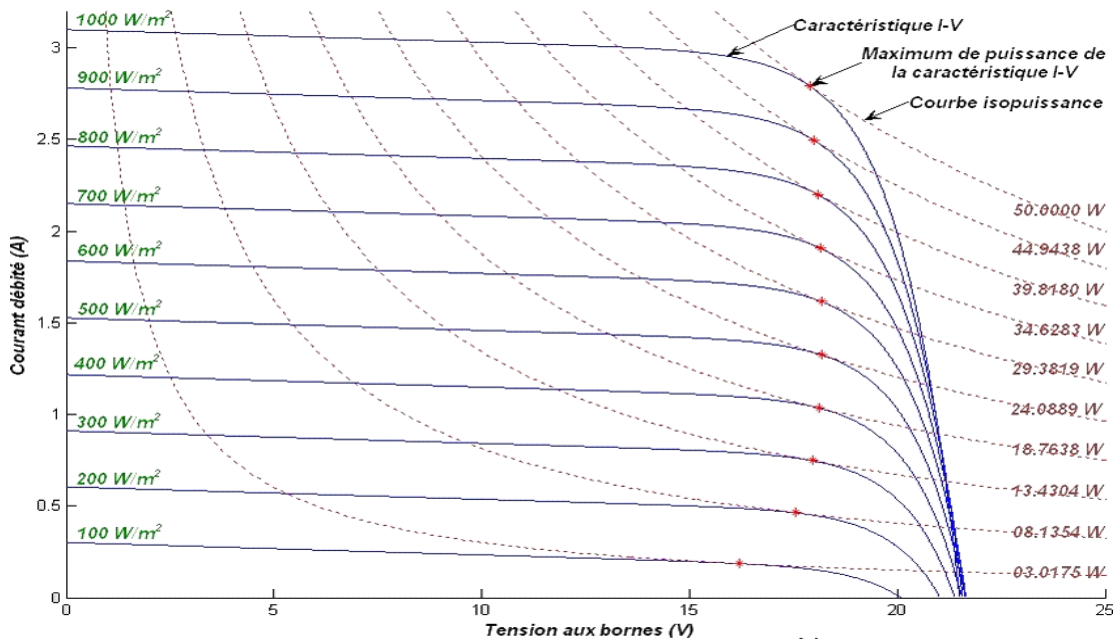


Figure I.20: Influence de l'éclairement sur la caractéristique courant-tension

Nous remarquons que le courant débité augmente avec l'accroissement de l'ensoleillement, et que le point de fonctionnement optimal varie d'une manière non linéaire. La tension aux bornes est légèrement influencée par l'ensoleillement.

I.7.4.b. Influence de la température

Pour un éclairement fixe, les caractéristiques *courant-tension*, varient avec la température de la cellule photovoltaïque (Figure I.21).

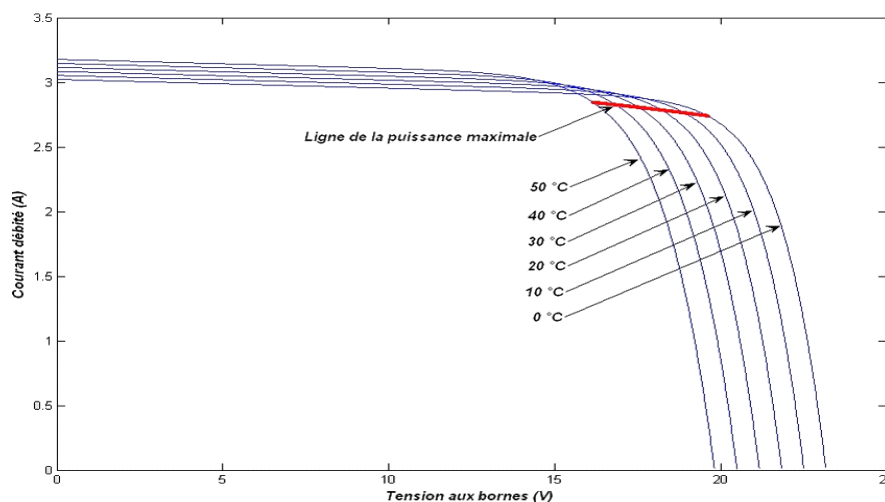


Figure I.21: Influence de la température sur la caractéristique courant-tension

La température a une influence considérable sur le comportement de la cellule et donc sur son rendement, cette influence se traduit principalement par la diminution de la tension générée, et une très légère augmentation de courant.

Suivant les modèles, ce comportement induit par degré une perte de 0.5 % du rendement par rapport au rendement maximum de la cellule, on comprendra donc l'intérêt d'avoir une ventilation correcte à l'arrière des panneaux [46].

I.7.5. Champ photovoltaïque

Lorsqu'on a besoin de plus de puissance, on utilise plusieurs modules, formant ce que l'on appelle un champ photovoltaïque orienté de manière à optimiser la quantité d'énergie solaire reçue, c'est-à-dire par exemple un toit incliné face au sud, dans l'hémisphère Nord Figure I.22.



Figure I.22 : Champ photovoltaïque [47]

I.8. Avantages du système photovoltaïque

Grâce à ses nombreux avantages environnementaux et économiques, ainsi qu'à sa fiabilité avérée, le photovoltaïque s'affirme comme une source majeure d'électricité [48].

- **Son carburant est gratuit** : Le soleil est la seule ressource dont a besoin un panneau solaire. Et le soleil brillera jusqu'à la fin des temps. De plus, la plupart des cellules photovoltaïques sont fabriquées à base de silicium, un matériau abondant et non-toxique (second matériau le plus abondant sur Terre).

• **L'énergie solaire photovoltaïque ne génère ni bruit, ni émissions nocives, ni gaz polluants :** La combustion de ressources naturelles pour fabriquer de l'énergie engendre de la fumée, provoque des pluies acides, pollue l'eau et l'air. Cela génère aussi du dioxyde de carbone (CO₂), l'un des principaux gaz à effet de serre. L'électricité solaire utilise seulement l'énergie du soleil comme carburant. Elle ne crée aucun coproduit nocif et contribue activement à réduire le réchauffement climatique.

• **Les systèmes photovoltaïques sont très sûrs et d'une grande fiabilité :** L'espérance de vie d'un module solaire est d'environ 30 ans. La performance des cellules photovoltaïques est généralement garantie par les fabricants pour une durée de 20 à 25 ans. Au-delà, la puissance d'une cellule reste néanmoins supérieure à 80% de la puissance initiale. Le photovoltaïque est donc une technologie fiable sur le long terme. De plus, la fiabilité des produits est garantie aux consommateurs par des standards de qualité très élevés au niveau européen.

• **Les modules photovoltaïques sont recyclables** et les matériaux utilisés pour leur production (silicium, verre, aluminium, etc.) peuvent être réutilisés. Le recyclage n'est pas seulement bénéfique pour l'environnement, il contribue également à réduire l'énergie nécessaire pour produire ces matériaux et ainsi à réduire leur coût de fabrication.

• **L'énergie solaire photovoltaïque exige peu de maintenance :** Les modules solaires ne nécessitent pratiquement aucune maintenance et sont faciles à installer.

• **L'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité aux zones rurales les plus isolées :** Les systèmes photovoltaïques apportent une valeur ajoutée aux zones rurales (en particulier dans les pays en développement où il n'y a pas de réseau électrique disponible). L'éclairage domestique, les systèmes de réfrigération des hôpitaux et le pompage de l'eau font partie des nombreuses applications possibles des systèmes non connectés au réseau. Les systèmes de télécommunications en zones isolées utilisent également des panneaux solaires.

• **L'énergie solaire photovoltaïque peut être intégrée de manière esthétique dans les bâtiments :** Les modules solaires peuvent couvrir toits et façades, contribuant ainsi à l'autonomie énergétique des bâtiments. Ils sont silencieux et peuvent être intégrés de manière très esthétique.

- **Le temps de retour énergétique d'un module diminue constamment :** Cela signifie que le temps mis par un module photovoltaïque pour générer autant d'énergie qu'il en a fallu pour le produire est très court ; il varie entre 1,5 et 3 ans. Sur sa durée de vie, un module produit donc entre 6 et 18 fois plus d'énergie qu'il n'en faut pour le fabriquer.

- **L'énergie solaire photovoltaïque permet la création de milliers d'emplois :** Avec une croissance annuelle moyenne de 40% [INES 2017] ces dernières années, le secteur photovoltaïque contribue de plus en plus à la création de milliers d'emplois en Europe et dans le monde.

- **L'énergie solaire photovoltaïque contribue à améliorer la sécurité de l'approvisionnement énergétique de l'Europe :** Pour répondre à 100% de la demande européenne en électricité, il suffirait de recouvrir 2% de la superficie totale de l'Europe de panneaux solaires. Le photovoltaïque peut donc jouer un rôle important dans l'amélioration de la sécurité de l'approvisionnement énergétique de l'Europe.

I.9. Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%.

- Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent au 220 à 230V alternatif. Or, l'énergie issue du générateur PV est unidirectionnelle et de faible voltage (< 30V), elle doit donc être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur.

- Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batteries) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru.

- Limites de charge et de décharge pour des batteries : de 30% à 80% pour une durée de vie de 7 à 10 ans [44].

I.10. Conclusion

Nous présentons dans ce chapitre, une nouvelle source de production de l'énergie électrique plus avantageuse que les sources fossiles, c'est l'énergie photovoltaïque.

Pour cela, on a décrit l'origine de l'éclairage solaire en introduisant les éléments de base de cette source inépuisable.

Ensuite, on a présenté le principe de fonctionnement du système photovoltaïque, les éléments de base de ce système à savoir la cellule solaire, ses caractéristiques et les technologies utilisés dans la conception de ces cellules.

On a également décrit les avantages et les inconvénients lors de la production de l'énergie électrique à base de l'énergie solaire photovoltaïque.

L'énergie photovoltaïque solaire produit du courant sous forme continu avec une tension variable. Il est nécessaire de la réguler à une tension prédéfinie afin de la stocker dans les batteries. Cela nécessite l'emploi des régulateurs de charges, ceci fera l'objet du chapitre suivant.

Régulateurs de charge et batteries de stockage

II.1. Introduction

Un régulateur de charge ou convertisseur continu-continu est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue.

Cette conversion d'énergie s'effectue grâce à un "découpage" haute fréquence caractérisé par un rendement élevé (jusqu'à 94% pour les modules à "haut rendement") [49].

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source DC variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante.

II.2. Convertisseurs DC-DC

Les Hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Le convertisseur DC/DC (dans le cadre du panneau PV) a pour rôle d'assurer l'adaptation entre la source (GPV) et la charge pour un transfert maximal de puissance. Ceci est fait en maintenant le point de fonctionnement (PF) sur ou assez proche du maximum de puissance produit MPP pour n'importe quelles conditions de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc.) [50].

Un des régulateurs solaires utilisé au laboratoire ICEPS est illustré à la figure II.1.



Figure II.1 : Régulateur solaire STECA (12V-24V/20A)

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs [51].

II.2.1. Principe de fonctionnement d'un convertisseur DC/DC

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu permettant d'obtenir une source de tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe. La figure II.2 illustre le schéma de principe du hacheur. [52]

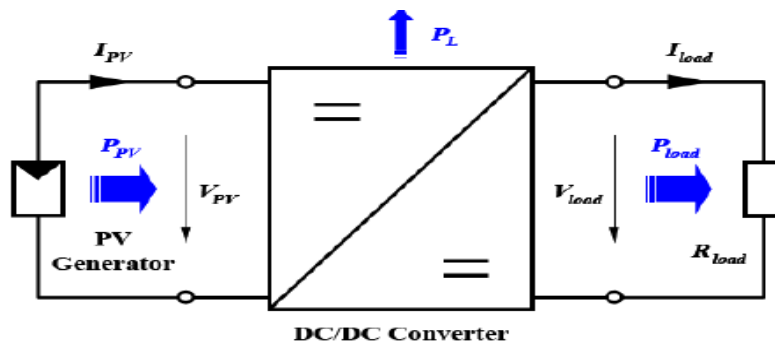


Figure II.2 : Principe de fonctionnement du hacheur.

I_{pv} : Courant du générateur PV

V_{pv} : Tension aux bornes du générateur PV

P_L : Pertes en ligne

I_{load} : Courant dans la charge

V_{load} : Tension de la charge

R_{load} : Résistance de la charge

Il est évident que le procédé le plus simple pour transformer une tension continue de valeur fixe en une tension continue réglable est le montage en potentiomètre diviseur de tension décrit sur Figure II.3 :

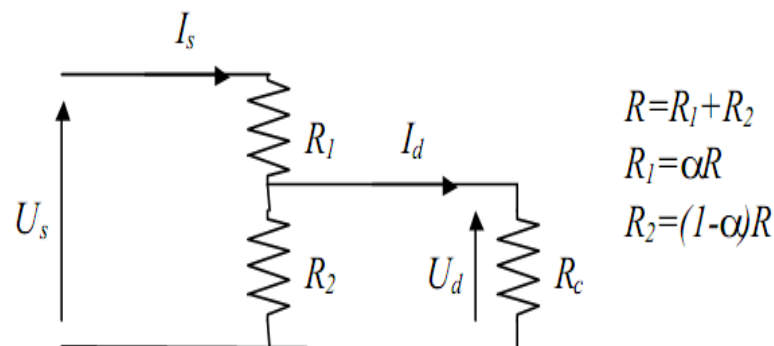


Figure II.3 : Montage en potentiomètre diviseur de tension

Le réglage de α permet de faire varier la tension disponible aux bornes de la charge U_d : A vide $R_c = \infty$

$$U_d = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_s = (1 - \alpha) U_s \quad (\text{II.1})$$

Pour $\alpha = 0$ $U_d = U_s$.

Pour $\alpha = 1$, on a : $U_d = 0$

L'inconvénient de ce montage est son rendement médiocre, ce qui s'avère critique pour des applications faisant intervenir des puissances non négligeables.

$$\eta = \frac{P_d}{P_s} \quad (\text{II.2})$$

Le rendement s'écrit :

Avec : $P_d = U_d \cdot I_d$ et $P_s = U_s \cdot I_s$

$$\text{Soit après calculs : } \eta = \frac{R_c \cdot R_2^2}{(R_c + R_2)((R_c + R_2)R_1 + R_c R_2)} \quad (\text{II.3})$$

$$\text{Ou encore : } \eta = \frac{R_c R_2 (1 - \alpha)^2}{R_c^2 + R_c R_2 + \alpha R_2^2 - \alpha^2 (R_c R_2 + 2R_2^2) + \alpha^2 R_2^2} \quad (\text{II.4})$$

Ainsi les montages potentiométriques sont utilisés uniquement en électronique de faible puissance (quelques Watts maximum). En électronique de puissance, on fera systématiquement appel à des hacheurs. On distingue plusieurs types de hacheurs, les deux types de base étant le montage série et le montage parallèle.

Le principe consiste à interrompre périodiquement l'alimentation de la charge par la source. Ce principe est illustré par le schéma de la figure II.4. [53]

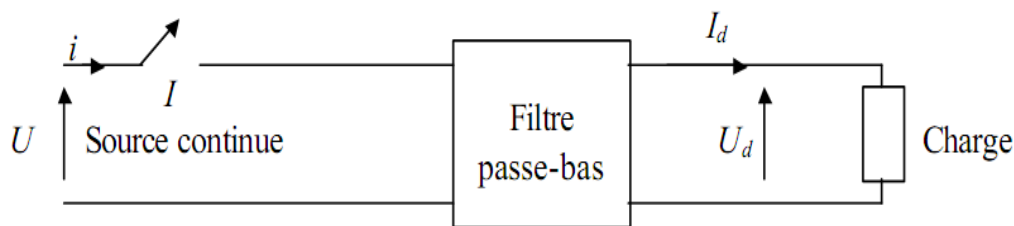


Figure II.4 : Principe du hacheur série.

L'interrupteur commandé hache la tension d'alimentation U de la source. Après filtrage, on obtient une tension U_d de charge constante (avec : $U_d < U$).

En faisant abstraction du filtre passe-bas, on peut comparer ce montage, au montage potentiométrique voir figure II.5. [53]

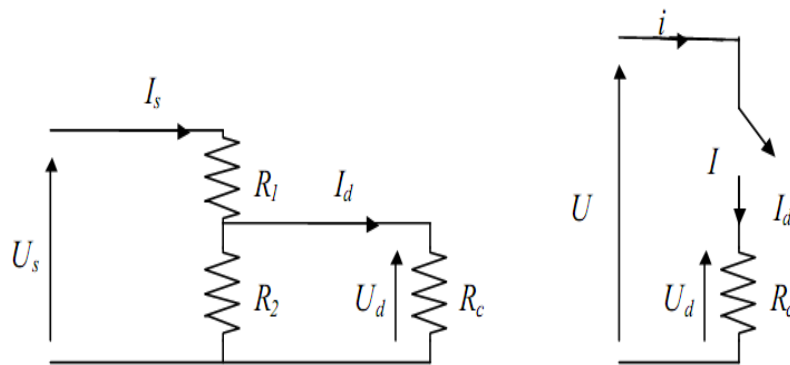


Figure II.5 : Comparaison du hacheur série avec le montage potentiométrique.

II.2.2. Définition du rapport cyclique

La régulation de la tension de sortie à un niveau constant est réalisée par une action sur le "rapport cyclique" symbolisé par (α, d, \dots) , défini comme la fraction de la période de découpage où l'interrupteur est passant voir figure II.6. Le rapport cyclique est défini comme le temps t_{on} pendant lequel l'interrupteur est fermé divisé par la période de fonctionnement du montage T [54], soit :

$$d = \frac{t_{on}}{T} \quad (II.5)$$

On définit également le temps pendant lequel l'interrupteur est ouvert par :

$$t_{off} = T - t_{on} \quad (II.6)$$

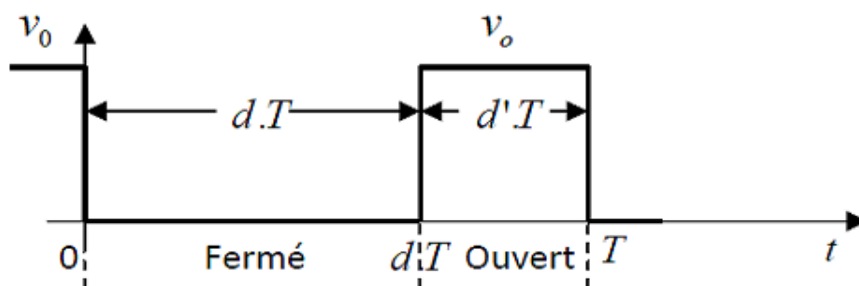


Figure II.6 : Périodes de fermeture et d'ouverture d'un commutateur

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante f avec un temps de fermeture égale à dT et un temps d'ouverture égale à $(1-d)T$.

Où:

- T est la période de commutation qui est égale à $1/f$
- d le rapport cyclique du commutateur ($d \in [0, 1]$).

II.3. Types de convertisseurs DC-DC

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC. Parmi lesquels, on présente le principe des trois types des convertisseurs à découpage (dévolteur, survolteur et mixte), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec différentes charges [55].

II.3.1. Convertisseur dévolteur (Buck converter)

Le convertisseur Buck (hacheur série) est un convertisseur de puissance de type DC-DC (figure II.7), communément appelé « abaisseur » car il permet d'obtenir sur son port de sortie une tension inférieure à la tension présente sur le port d'entrée, mais en contrepartie son courant de sortie est plus élevé.

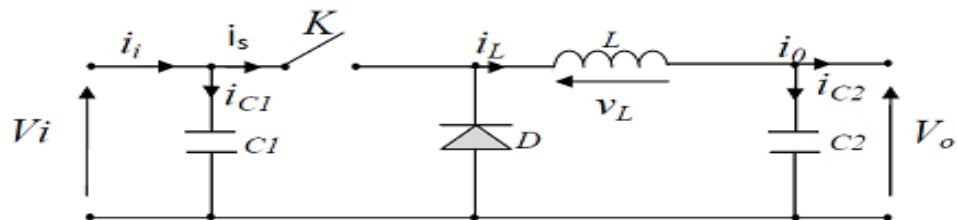


Figure II.7 : Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur.

Pour connaître le comportement réel de ce convertisseur, il est nécessaire de savoir en détail son modèle mathématique.

Pour cela on représente le circuit équivalent pour les deux états du commutateur et de trouver ensuite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure II.8 montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur dévolteur dans les deux cas : l'interrupteur fermé pendant dT et l'interrupteur ouvert pendant $(1-d)T$ [55].

- **Pendant dT**

Si le commutateur **K** est fermé, un courant circule dans le circuit, mais ne passe pas par la diode **D** puisqu'elle est inversement polarisée. Le courant i_L n'augmente pas immédiatement, mais plutôt linéairement avec un taux d'accroissement imposé par l'inductance [56], voir figure II.8.a.

- **Pendant $(1-d)T$**

Pendant ce temps, l'inductance emmagasine de l'énergie sous forme magnétique. Si **K est ouvert**, la charge est déconnectée de son alimentation. Le courant est toutefois maintenu par l'énergie stockée dans l'inductance **L** et circule à travers la diode **D** appelée 'diode de roue libre. Cette dernière permet d'évacuer l'énergie emmagasinée

dans l'inductance à l'ouverture du commutateur sans créer de surtension [57]
Voir figure II.8.b.

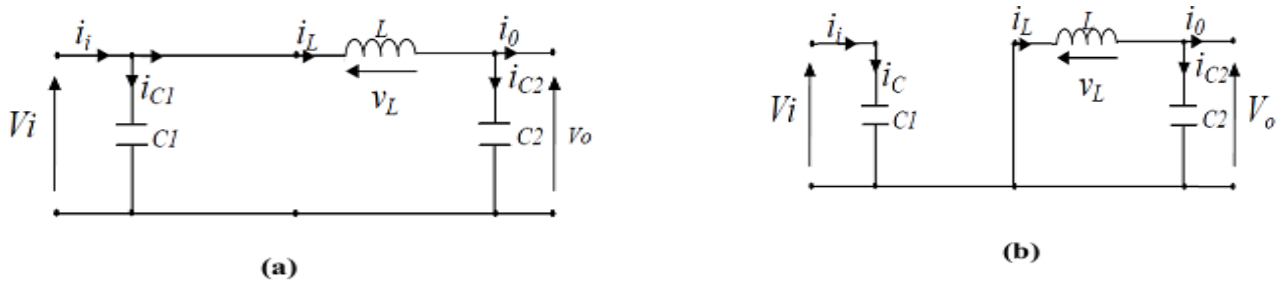


Figure II.8 : Schémas équivalents du hacheur dévolteur

(a) : K fermé, (b) : K ouvert

Le condensateur **C1** permet de réduire les pics du courant tiré du **GPV**, de soutenir la tension d'alimentation **V_i** et d'atténuer les bruits. La tension aux bornes de la charge présente une ondulation qui peut être lissée par l'ajout d'un condensateur **C2**. Quoi qu'il en soit, la valeur moyenne **V₀** est inférieure à **V_i**. Dans le cas où la fréquence est augmentée, par exemple jusqu'au kHz, l'inductance nécessaire peut être réduite considérablement. [55]

Il est à noter que l'interrupteur utilisé est un dispositif à semi-conducteur en commutation. Généralement, un transistor MOSFET est utilisé pour son faible temps de commutation afin de minimiser les pertes de puissance.

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits de la figure (II.8), on obtient les systèmes d'équations suivants :

- **Pour la première période dT :**

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \end{array} \right. \quad (II.7)$$

- **Pour la deuxième période (1-d)T :**

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ I_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_o(t) \end{array} \right. \quad (II.8)$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour toute la période T , on utilise généralement l'expression suivante:

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)T = \frac{dx}{dt}DT + \frac{dx}{dt(1-D)T(1-d)T} \quad (\text{II.9})$$

En appliquant la relation (II.9) sur les systèmes d'équations (II.7) et (II.8), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} T = dT(i_i - i_L) + (1-d)Ti_i \\ C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} T = dT(i_L - i_0) + (1-d)T(i_L - i_0) \\ L \frac{di_L}{dt} = dT(V_i - V_0) + (1-d)T(-V_0) \end{array} \right. \quad (\text{II.10})$$

Après arrangement, on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_0(t) = i_L(t) - C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} \\ i_L(t) = \frac{1}{d(i_i(t) - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt})} \\ V_i(t) = \frac{1}{d(L \frac{di_L(t)}{dt} + V_0(t))} \end{array} \right. \quad (\text{II.11})$$

La figure II.9 représente les formes d'onde des tensions V_{pv} et V_{load} pour le convertisseur dévolteur

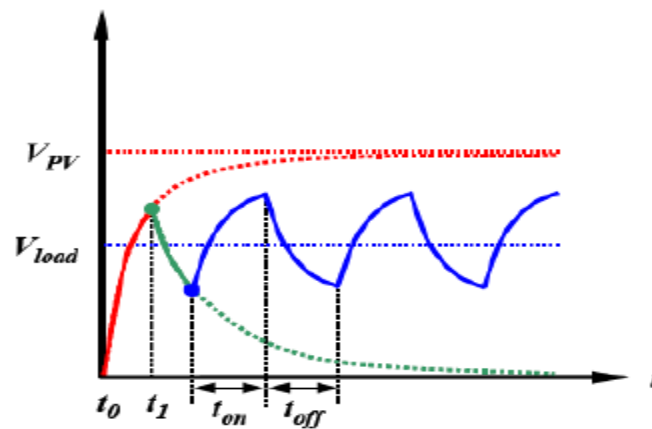


Figure II.9 : Formes d'onde des tensions V_{pv} et V_{load} dans le cas du convertisseur Buck.

II.3.1.a. Convertisseur abaisseur réalisé au laboratoire ICEPS

Un hacheur dévolteur est réalisé pour abaisser la tension de 24V à 12V. La fréquence choisie est 50Hz, car plus la fréquence est grande plus on peut diminuer la taille des composants. De plus, on évite de travailler dans les « moyennes fréquences » car cela crée du bruit, et aussi on évite le retard de la sortie par rapport à l'entrée.

La figure II.10, représente le schéma de simulation du prototype réalisé.

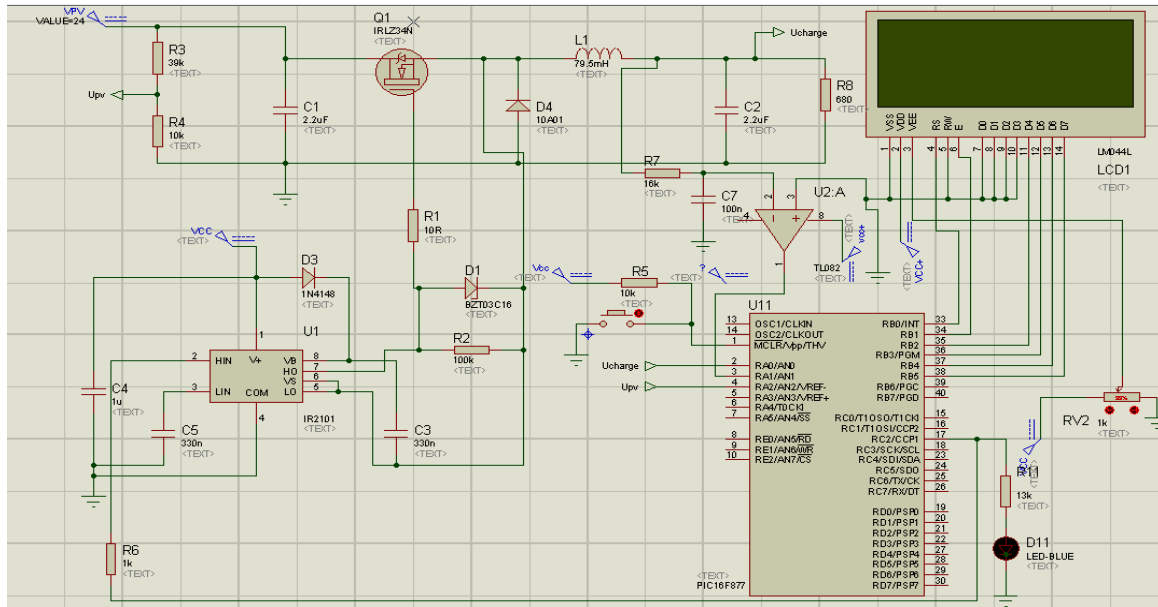


Figure II.10 : Schéma de simulation du convertisseur dévolteur. [58]

La Figure II.11 représente le prototype réalisé au laboratoire ICEPS.

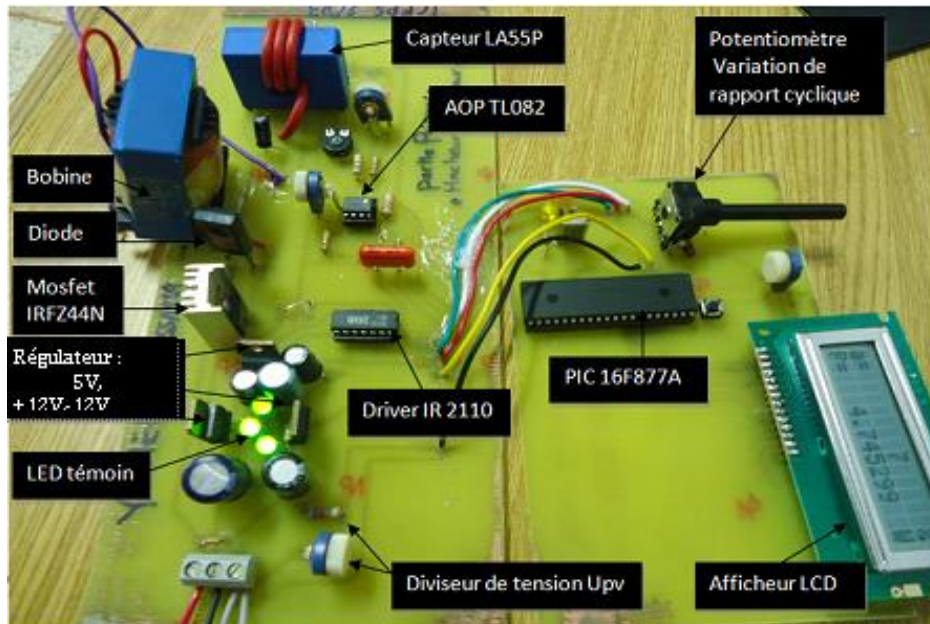


Figure II.11 : Circuit complet du convertisseur abaisseur [58]

II.3.2. Hacheur survolteur

C'est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « Boost » ou Hacheur parallèle. Son schéma de principe de base est celui de la figure II.12. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie plus grande.

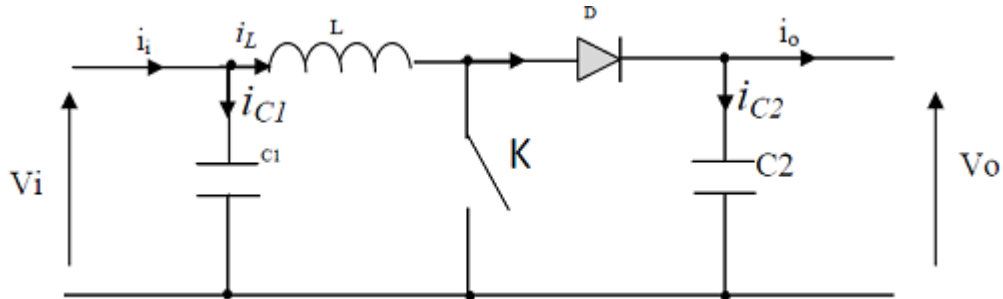


Figure II.12: Schéma de principe d'un convertisseur Boost.

Lorsque le commutateur est activé figure(II.13.a), la tension de la charge chute immédiatement à zéro si le condensateur C1 est omis. Le courant du circuit i_L circule à travers l'inductance L et augmente suivant l'équation : [51]

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{V_i}{L} \tag{II.12}$$

Comme pour le convertisseur dévolteur, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (voir figure II.13) des deux phases de fonctionnement sont données :

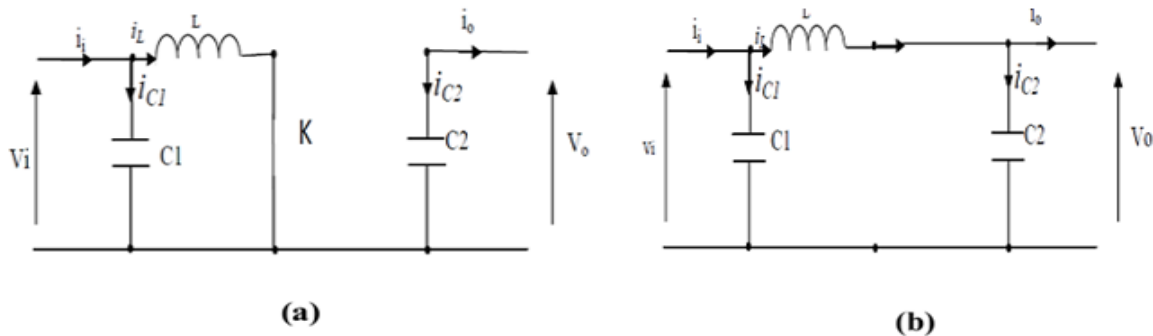


Figure II.13 : Schémas équivalents du hacheur survolteur a) K fermé, (b) : K ouvert

- **Pour la première période dT :**

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_{i1}(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_{o}(t)}{dt} = -i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_i(t) \end{array} \right. \tag{II.13}$$

- **Pour la deuxième période (1-d) T :**

Lorsque **k** est ouvert (Figure II.13.b), l'inductance se trouve en série avec le générateur et sa tension s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant i_L traversant l'inductance traverse ensuite la diode **D**, le condensateur **C1** et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers le condensateur, Le courant décroît ensuite progressivement, car $V_0 > V_i$:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \end{array} \right. \quad (II.14)$$

En appliquant la relation (II.9) sur les systèmes d'équations (II.13) et (II.14), comme pour le convertisseur dévolteur, on trouve le modèle approché du convertisseur survolteur :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_L = i_i - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ i_0 = (1-d)i_L - C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} \\ V_i = L \frac{di_L(t)}{dt} + (1-d)V_0 \end{array} \right. \quad (II.15)$$

La figure II.14 représente les tensions V_{PV} et V_{Load} du convertisseur survolteur (Boost).

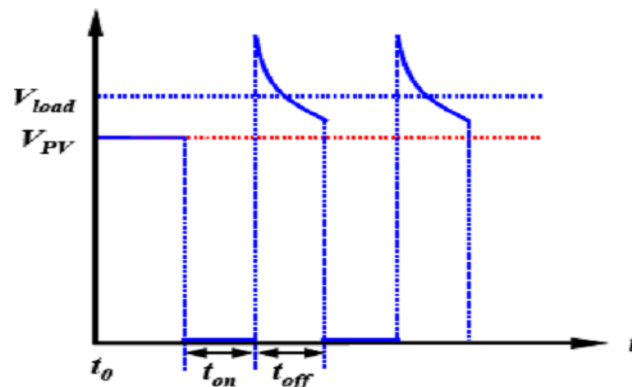


Figure II.14 : Tensions V_{PV} et V_{Load} dans le cas du convertisseur Boost.

II.3.2.a. Convertisseur survolteur réalisé au laboratoire ICEPS

- Circuit de puissance

Le circuit de puissance (Voir Figure II.15) est constitué du panneau solaire, du convertisseur de type BOOST nécessaire pour la régulation de la tension et de la batterie

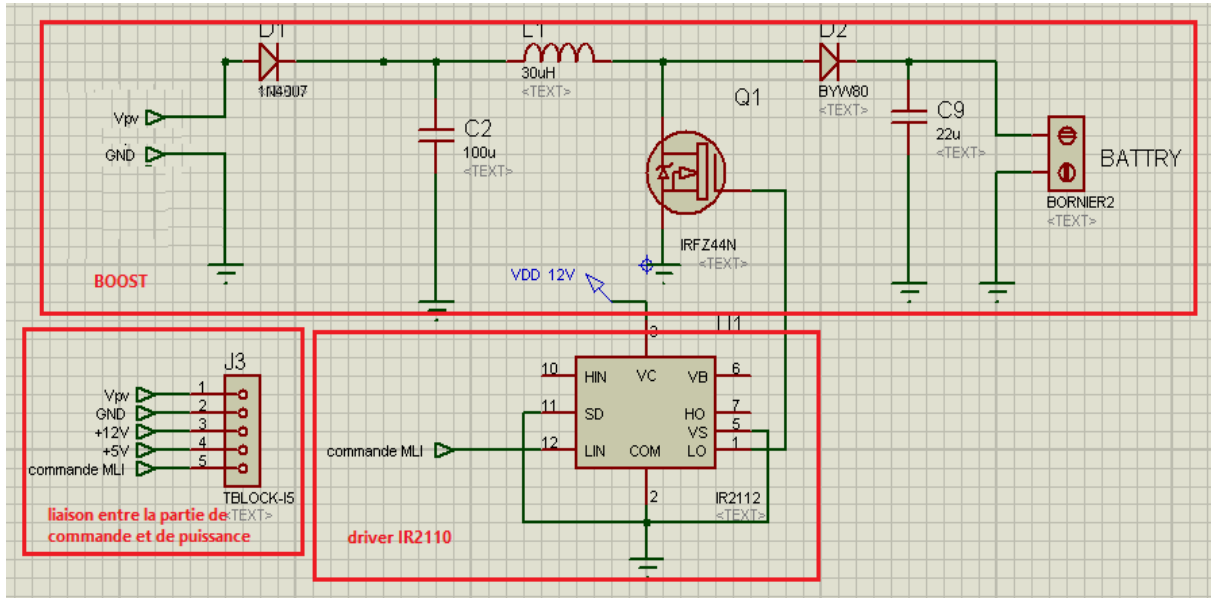


Figure II.15 : Schéma du circuit de puissance. [58]

- Circuit de commande du convertisseur

La figure II.16 représente le schéma de commande MPPT Numérique

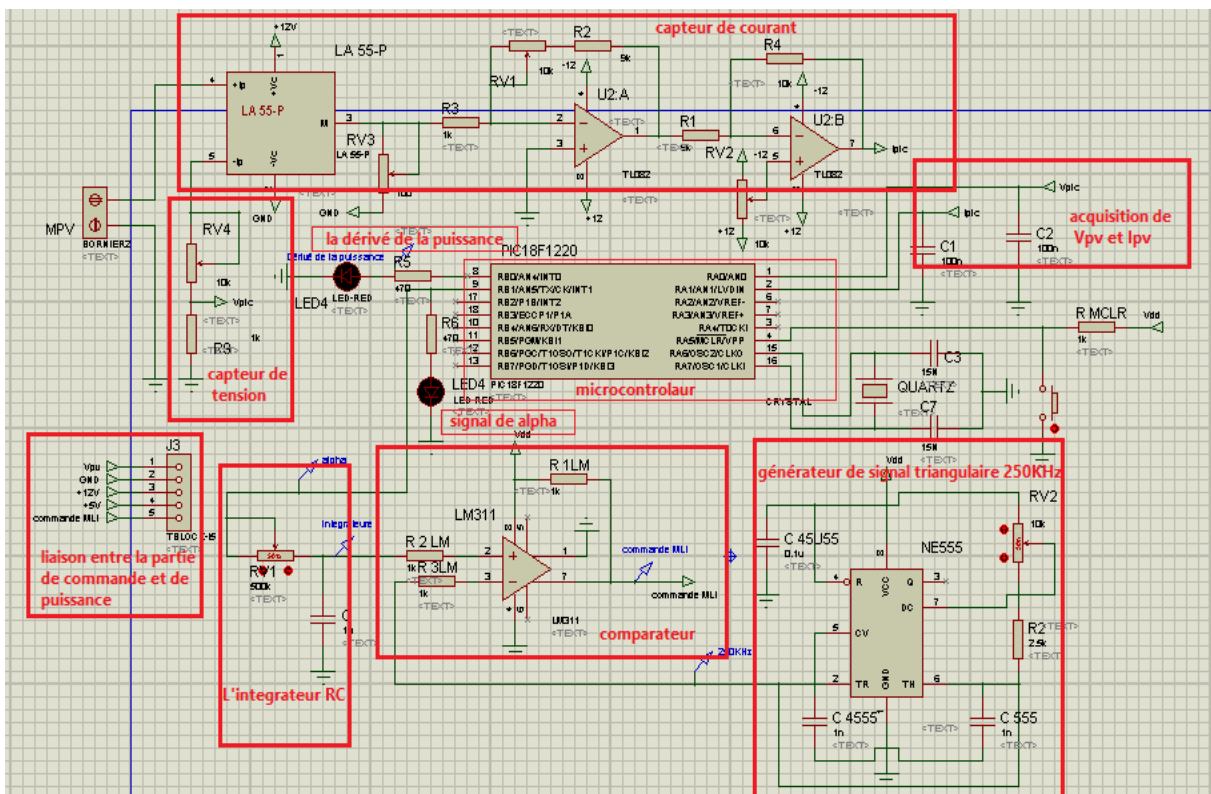


Figure II.16 : Schéma de la commande MPPT Numérique. [58]

- **Photo du circuit de puissance :** Le circuit de puissance est illustré à la figure II.17.

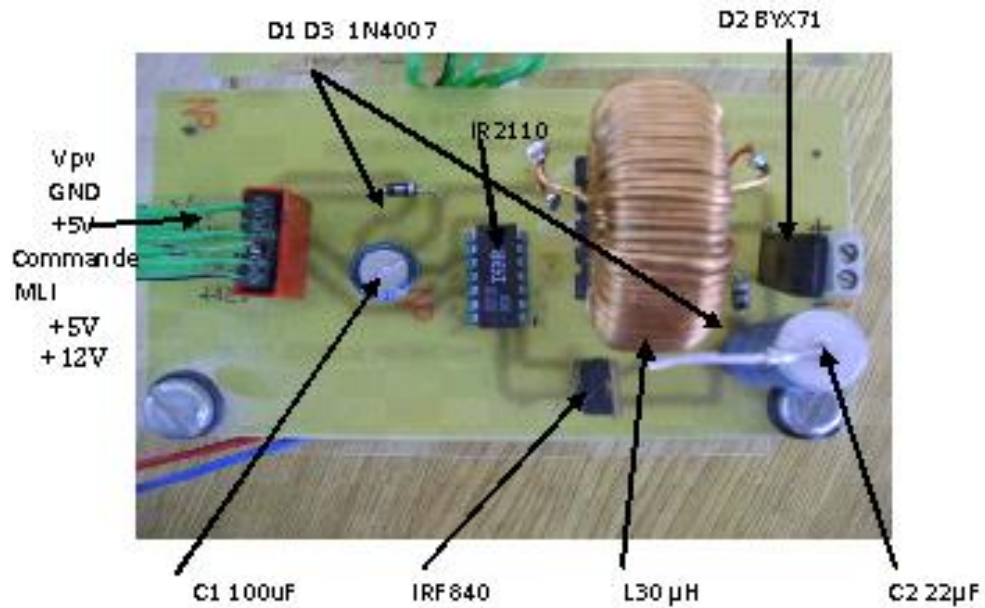


Figure II.17 : Photo du circuit de puissance. [58]

- **Photo de la carte de commande :** Voir figure II.18



Figure II.18 : Photo de la carte de commande. [58]

La Figure II.19 représente le prototype réalisé au laboratoire ICEPS

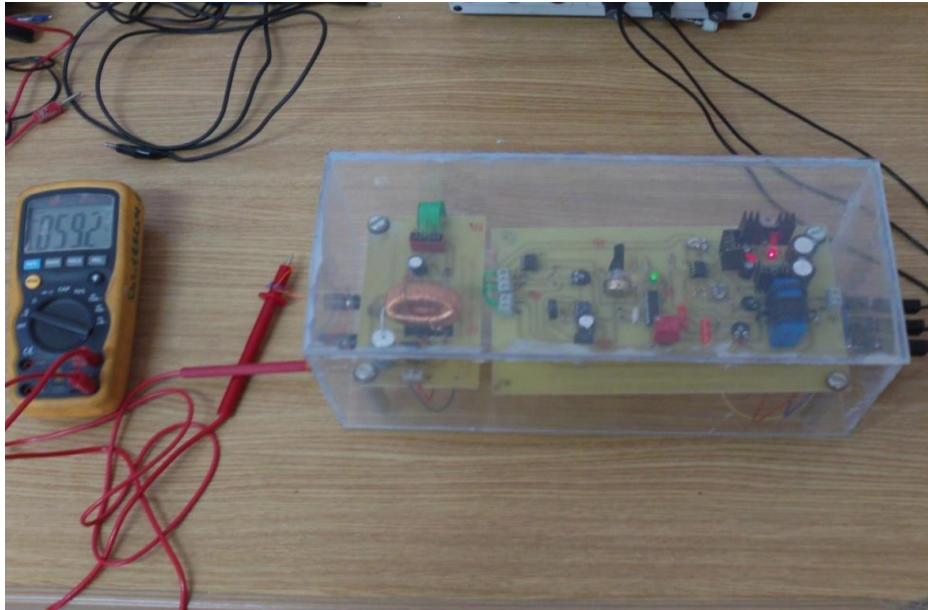


Figure II.19 : Photo du prototype du convertisseur MPPT. [58]

II.3.3. Convertisseur Buck-Boost

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse [60], figureII.20.

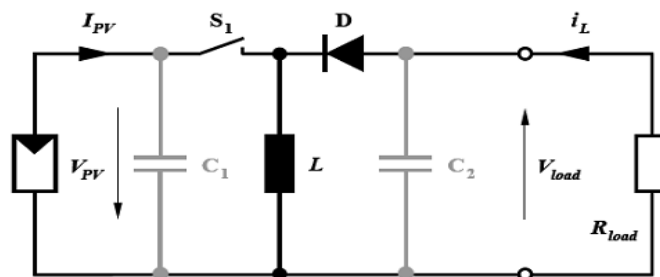


Figure II.20 : Schéma électrique d'un convertisseur Buck-Boost.

Durant l'état «ON», l'énergie apportée par la source (générateur PV) est stockée dans l'inductance L figure(II.21). L'énergie stockée dans l'inductance L est livrée ensuite à la charge pendant l'état «OFF» Figure(II.22) [61].

En raison de la présence de la diode D , le courant circule à travers l'inductance L seulement dans une direction durant les deux états. Par conséquent, V_{load} a une polarité opposée à V_{pv} . Pour cette raison, ce circuit est aussi appelé convertisseur inverseur. Les équations décrivant ce circuit peuvent être obtenues de la même manière qu'auparavant.

Comme indiqué précédemment, le condensateur C_1 soutient la tension d'alimentation V_{PV} , C_2 lisse la tension de la charge. L'amplitude de V_{Load} peut être inférieure ou supérieure à V_{PV} suivant la valeur de t_{on} et t_{off} :

$$V_{load} = -\frac{t_{on}}{t_{off}} V_{PV} = -\frac{D}{1-D} V_{PV} \quad (\text{II.16})$$

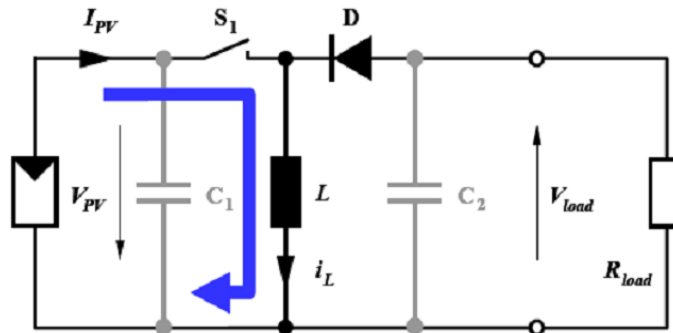


Figure II.21 : Convertisseur Buck-Boost durant l'état ON.

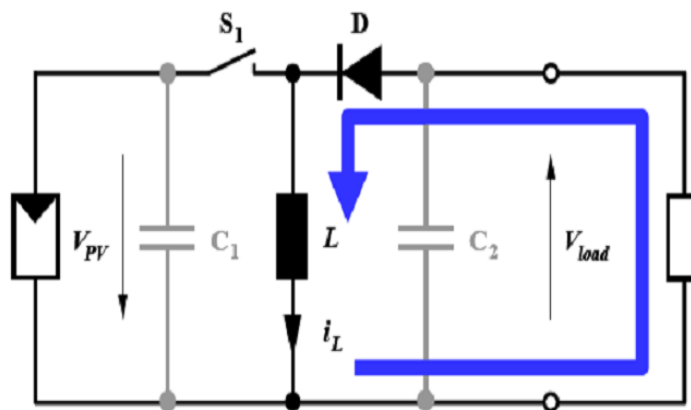


Figure II.22 : Convertisseur Buck-Boost durant l'état OFF.

Dans les trois cas cités en haut, l'adaptation entre la source et la charge est réalisée en choisissant des valeurs adéquates du rapport cyclique.

Généralement, pour les convertisseurs DC/DC, l'interrupteur est commandé par un signal PWM (Pulse With Modulation) ou MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion). Un signal PWM est un signal rectangulaire de fréquence fixe, mais dont le rapport cyclique D est variable. La valeur du rapport cyclique permet de contrôler la quantité d'énergie transmise. [49]

Il existe d'autres types de convertisseur DC/DC plus complexes. Le tableau II.1 donne une idée sur la complexité de chaque type de convertisseur. [62]

Tableau II.1: Paramètres des différents convertisseurs DC-DC

Type	Fonction	Interrupteur	Diode	Transformateur	Complexité
Buck	Abaisseur	1	1	Non	Faible
Boost	Élévateur	1	1	Non	Faible
Buck-Boost	Abaisseur/ Élévateur	1	1	Non	Faible
Fly back	Abaisseur/ Élévateur	1	1	Oui	Moyenne
Half Horward	Abaisseur/ Élévateur	1	1	Oui	Moyenne
Push Pull	Abaisseur/ Élévateur	2	2	Oui	Forte
Half Bridge	Abaisseur/ Élévateur	2	4	Oui	Forte
Full Bridge	Abaisseur/ Élévateur	4	4	Oui	Forte à Très forte

II.3.3.a. Convertisseur SEPIC muni d'une MPPT réalisé au laboratoire ICEPS

Le dimensionnement du SEPIC dépend des contraintes imposées par le panneau solaire et la batterie. La source d'énergie (le panneau solaire) peut fournir un courant continu allant jusqu'à 9A et une tension à vide de 23 Volts. Voir figures (II.23), (II.24), (II.25)

Le convertisseur SEPIC est composé de :

- Un condensateur C_{in} dont la capacité est $440\mu F$, branché aux bornes du module pour filtrer la tension d'entrée du hacheur et diminuer les ondulations d'entrée.
- Un condensateur de couplage dont la capacité est de $10\mu F$.
- Le MOSFET IRFZ44N est un dispositif robuste qui possède une vitesse de commutation rapide avec une dissipation d'environ 200 W max.

- Diode schottky MBR2045CT
- TC4420 (HIGH-SPEED DRIVERS) est capable de débiter le courant nécessaire pour piloter le MOSFET.

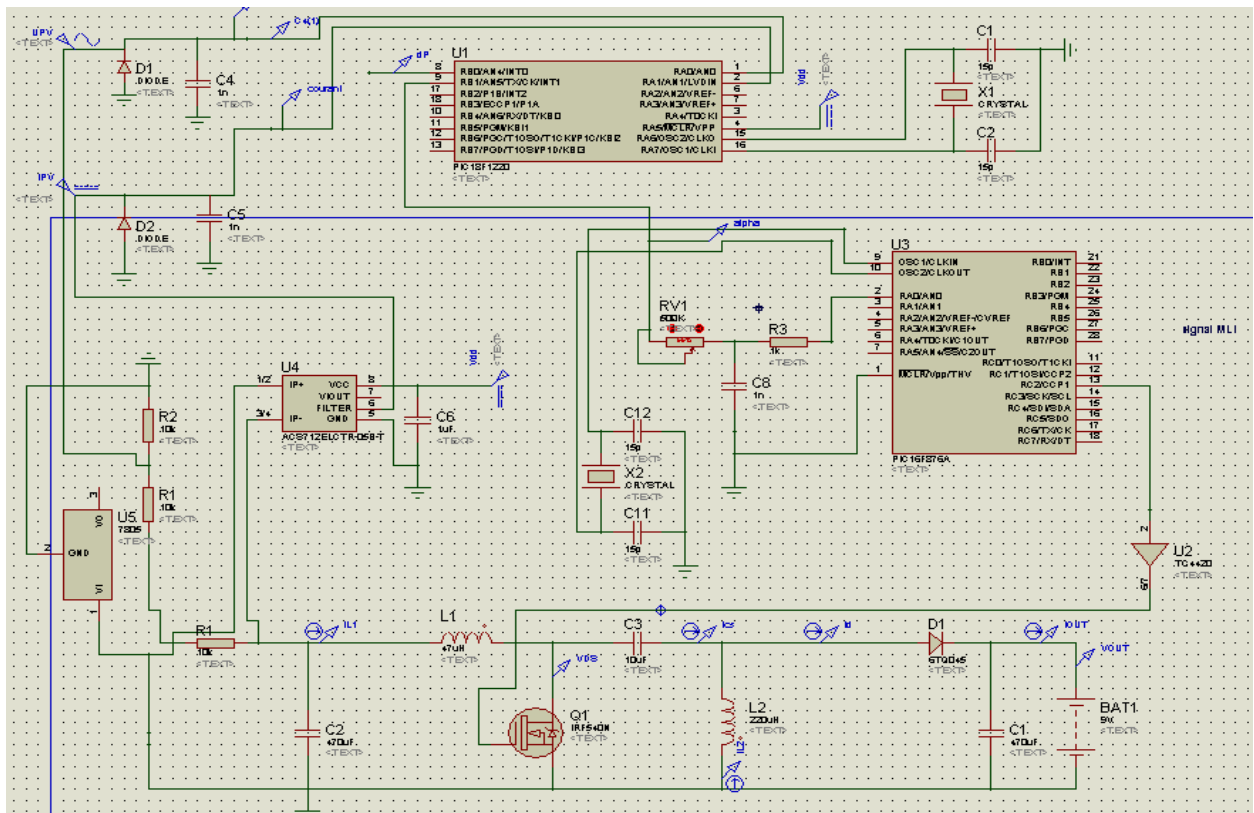


Figure II.23 : Schéma du circuit du convertisseur SEPIC. [62]

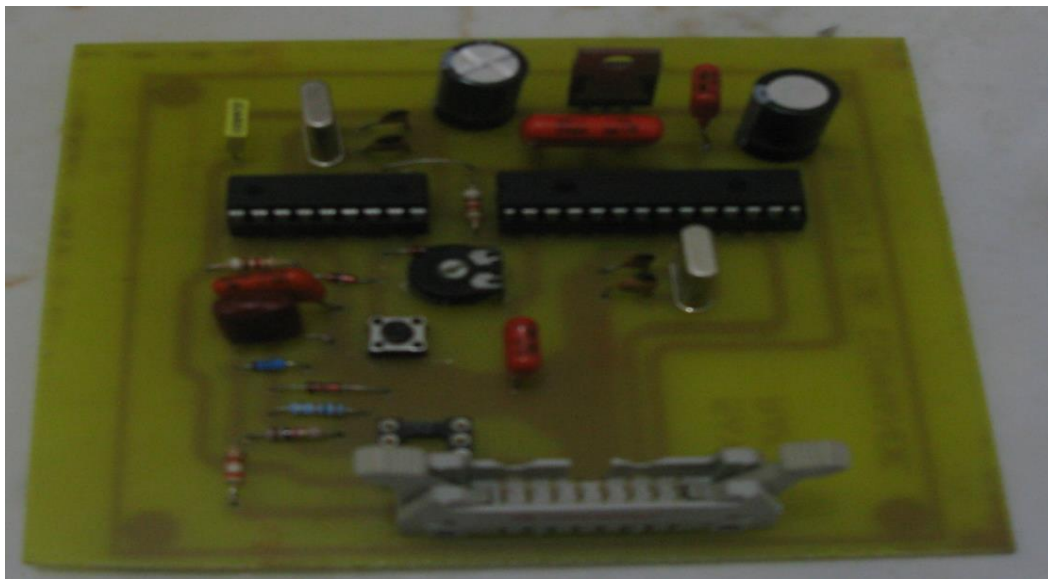


Figure II.24 : Photo de la carte MPPT Numérique. [62]

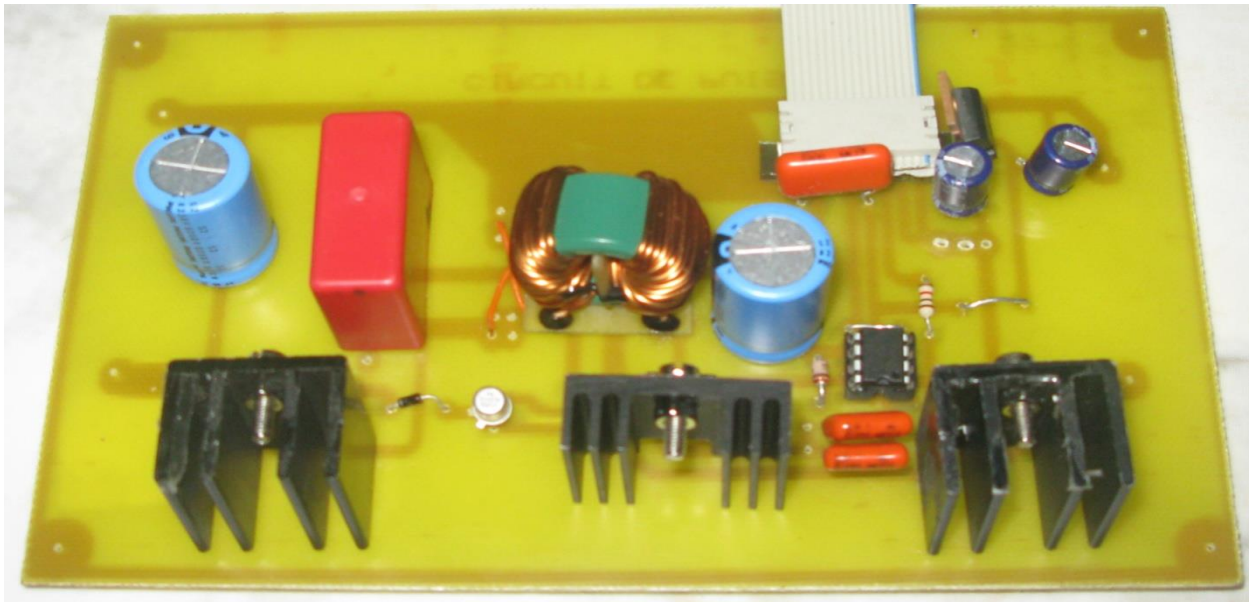


Figure II.25 : Photo du convertisseur SEPIC DC-DC. [62]

II.3.3.b. Chronologie des essais du convertisseur SEPIC avec MPPT

Etape 1 : connexion directe du panneau avec la batterie (sans régulation)

Etape 2 : connexion du panneau avec l'étage d'adaptation (Sepic + MPPT) et la batterie

Tableau II.2 Mesures avec et sans SEPIC

Eclairage (Lux)	Etape 1		Etape2	
	P_{pv} (W)	V_{pv} (V)	P_{pv} (W)	V_{pv} (V)
1162	92	12	128	17,3
440	44	12	51,2	16,4
320	36	12	40,6	14,5

- D'après les relevés expérimentaux (étape 1 et 2), on remarque que :
- la tension a augmenté de 12 volt à 17,3 volt pour $G = 1162\text{Lux}$,
De 12 volts à 16,2 volts pour $G = 440\text{ Lux}$, et de 12 volts à 14 volts pour $G = 320\text{ Lux}$
 - la puissance du panneau a augmenté de $P_{pv} = 92\text{ W}$ à 128 W pour $G = 1162\text{ Lux}$, de $P_{pv} = 44\text{ W}$ à $51,2\text{ W}$ pour $G = 440\text{ Lux}$ et de $P_{pv} = 36\text{ W}$ à $40,6\text{ W}$ pour $G = 320\text{ Lux}$.

Cela signifie que la commande MPPT réagit avec la variation de l'éclairage.

- D'autre part les résultats de l'étape 2 et l'étape 3 montre que l'étage d'adaptation (SEPIC +MPPT) force le GPV a travaillé au niveau de la tension optimale afin que ce dernier délivre une puissance maximale correspondante sous le même éclaircissement.

II.3.4. Hacheur survolteur pour onduleur réalisé au laboratoire ICEPS [63]

Un hacheur survolteur jouant le rôle de transformateur pour onduleur a été réalisé présenté à la figure II.26. La tension de sortie est présentée à la figure II.27

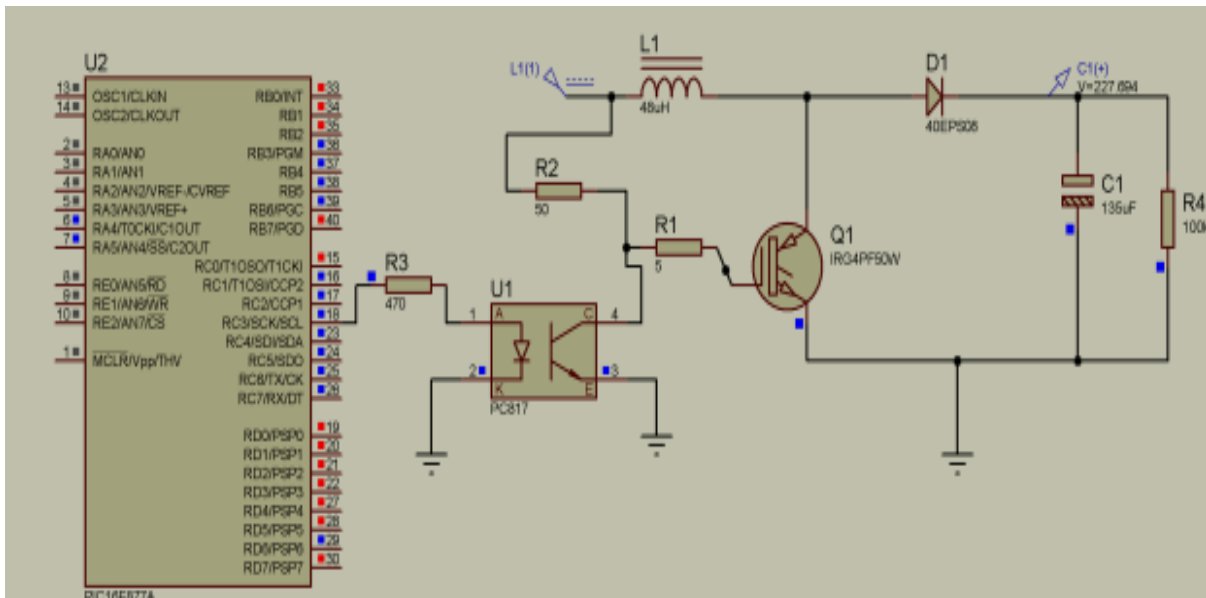


Figure II.26 Schéma du hacheur survolteur

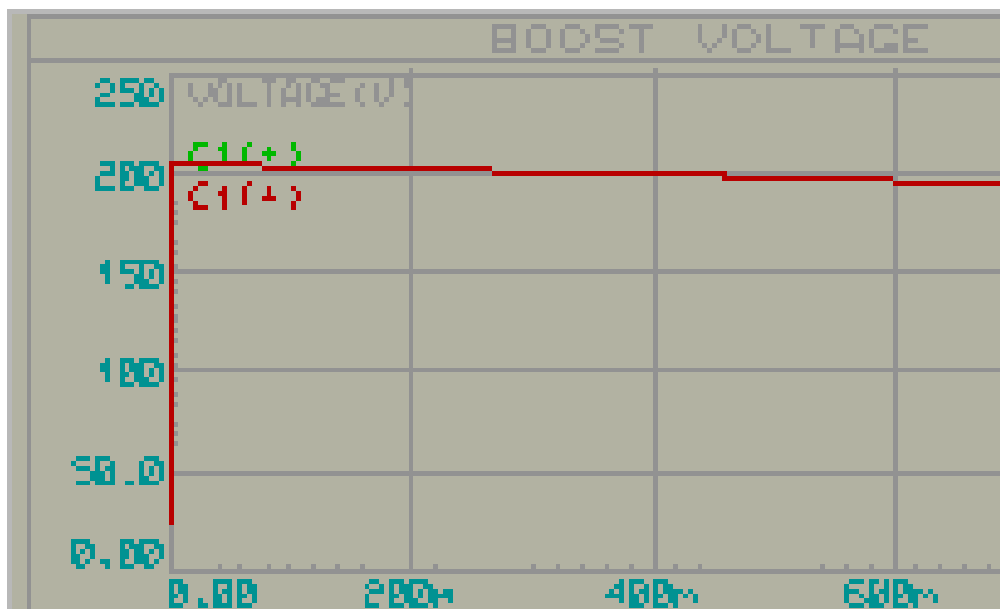


Figure II.27 : Tension de sortie hacheur survolteur

Tension d'entrée =24V, Tension de sortie supérieur à 200V

II.4. Batteries d'accumulateurs

Les batteries solaires stockent l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques afin d'assurer l'alimentation électrique en toutes circonstances (jour ou nuit, ciel dégagé ou couvert).

Une batterie utilisée avec des panneaux solaires ou une éolienne est une batterie à décharge lente (appelée aussi batterie solaire). Ces batteries sont spécifiquement conçues pour les applications solaires ou éoliennes. Elles n'ont pas les mêmes caractéristiques qu'une batterie de voiture par exemple, elles se déchargent plus progressivement et supportent mieux les décharges fréquentes peu profondes. [65]

II.4.1. Principe de Fonctionnement

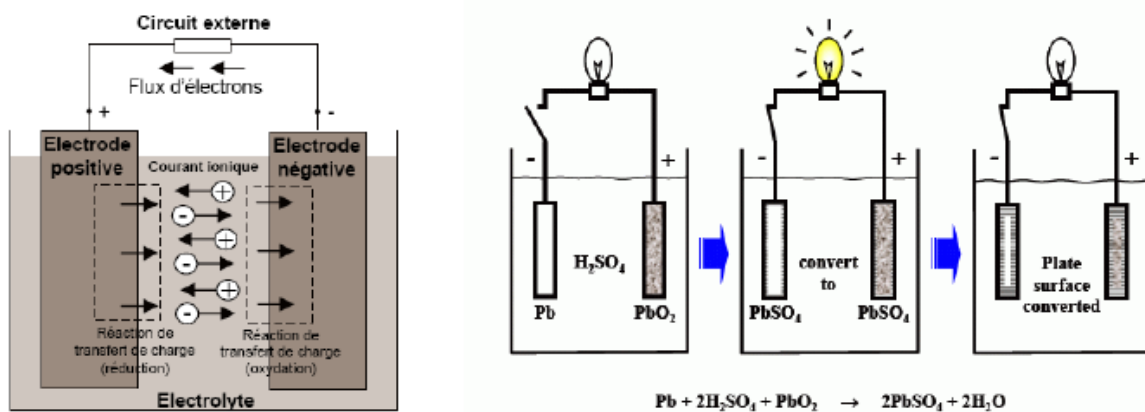


Figure II.28 : Processus de charge et décharge de la batterie

La batterie est un ensemble d'éléments ou de cellules électrochimiques capable de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique, puis de la restituer partiellement par la suite.

Grâce à la réversibilité des réactions mises en jeu. Ces réactions consistent en des oxydations et des réductions au niveau des électrodes, le courant circulant sous forme d'ions dans l'électrolyte et sous forme d'électrons dans le circuit raccordé à la batterie (Figure II.26).

La capacité énergétique de la batterie (exprimée en Wattheures, Wh) dépend des quantités et de la nature des éléments chimiques compris dans la cellule.

L'anode est l'électrode à laquelle l'oxydation (perte d'un ou plusieurs électrons) se produit et à partir de laquelle les électrons vont alimenter le circuit extérieur (la charge).

La cathode est l'électrode à laquelle se produit la réduction (gain d'un ou plusieurs électrons), les électrons revenant de la charge arrivent sur cette électrode.

En décharge, l'anode est la borne négative de la batterie et la cathode la borne positive.

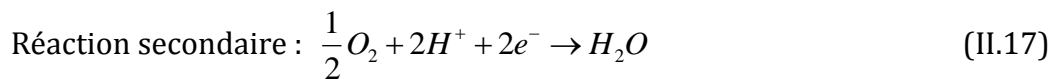
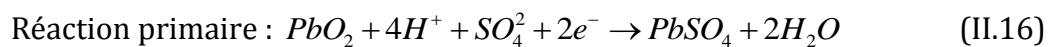
Par contre, en charge, l'électrode négative est la cathode et l'électrode positive est l'anode, les électrons circulant alors dans l'autre sens.

Dans le cas d'une batterie au plomb, l'anode est en plomb (Pb), la cathode en oxyde de plomb (PbO₂) et l'électrolyte utilisé est l'acide sulfurique dilué (H₂SO₄) [66-68].

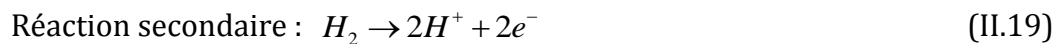
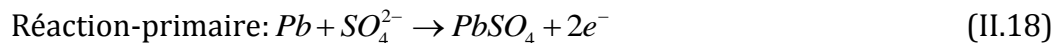
La figure II.27 montre le processus de décharge d'une batterie au plomb.

Durant le processus de décharge de la batterie, les électrodes réagissent avec l'électrolyte selon les équations suivantes :

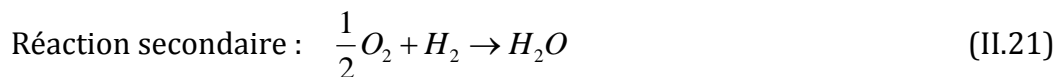
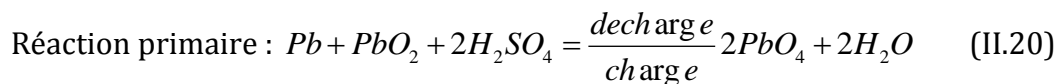
- **Electrode positive :**



- **Electrode négative :**



- **Cellule :**



Durant la décharge, la concentration de l'acide dans l'électrolyte diminue, alors que durant la recharge, l'effet inverse se produit.

II.4.2. Caractéristiques de la batterie

a- Une batterie d'accumulateurs ou généralement une batterie, est un ensemble d'accumulateurs électriques reliés entre eux de façon à créer un générateur de courant continu de la capacité et de la tension désirée.

- La capacité d'une batterie solaire est exprimée en Ampères Heure (Ah) ce qui désigne le débit totale d'énergie de la batterie dans des conditions données (10 heures, 20 heures, ...)

Avec un régulateur solaire (qui se branche entre les panneaux solaires et la batterie), il est possible de réguler la charge de la batterie, qui ne doit pas dépasser 90%, ni ne doit descendre sous les 40%, car une surcharge comme une décharge trop profonde endommage ces batteries et diminue leur durée de vie.

Donc, si nous prenons comme exemple, une batterie 100 Ah – 12V, pourra se décharger au mieux de 60Ah (60% x 100Ah). Cela représente par rapport au besoin quotidien en énergie $60 \text{ Ah} \times 12\text{V} = 720 \text{ Wh}$

-Ensuite, il faut déterminer la tension de stockage de l'énergie solaire : 12V, 24V ou 48V.

La règle pour cela est assez simple : plus vous utilisez d'énergie, plus vous devez utiliser une tension élevée, afin de diminuer les déperditions, qui surviennent quand l'énergie est transportée ou stockée, On peut conseiller les trois cas du tableau II.2 ci-dessous:

Tableau II.3: Gamme de tension des batteries d'accumulateurs

Puissance de l'installation photovoltaïque	Tension recommandée
De 0 à 800 Wc	12 V
De 800 à 1600 Wc	24V
Au-dessus de 1600 Wc	48V

b- Le montage des batteries se fait en série ou en parallèle pour augmenter la tension ou la capacité :

- Le montage en parallèle (qui consiste à relier les bornes "+" aux bornes "+" et les bornes "-" aux bornes "-") permet d'additionner les capacités de stockage (en Ah) tout en conservant la même tension (en Volts).

- Le montage en série permet d'additionner la tension des batteries, en revanche la capacité en Ah reste celle d'une seule batterie.

c- Une décharge et une charge de la batterie constitue un cycle, les batteries solaires sont prévues pour fonctionner un certain nombre de cycles.

-Batterie solaire au plomb ouvert : 400 à 500 cycles

- Batterie solaire AGM : 600 à 700 cycles

-Batterie solaire GEL : 800 à 900 cycles.

II.4.3. Différents types de batteries

Le tableau II.3 illustre les différentes technologies de batteries existantes ainsi que le rapport qualité/prix. [69-70]

Tableau II.4: Différentes technologies des batteries d'accumulateurs.

Type de la batterie	Avantages	Inconvénients
Plomb (Pb)	<ul style="list-style-type: none"> - Prix bas - Solides - Capables de fournir des courants élevés - Eléments standards trouvables n'importe où dans le commerce - Facilité de mise en œuvre - Sans effet mémoire (c'est à dire qu'on peut les recharger quand on veut, à n'importe quel niveau de décharge) - Souplesse d'utilisation - Excellent rapport prix/durée de vie (3/4 ans) - Ne pollue pas si bien recyclé 	<ul style="list-style-type: none"> - Densité d'énergie - Poids - Autodécharge (1% par jour environ) - Sensibles aux températures négatives (perte d'autonomie jusqu'à -25% à -10°C) - Risque de cristallisation de sulfate de Pb si laissée trop longtemps déchargée et donc perte de capacité irréversible
Nickel Cadmium (Ni – Cd)	<ul style="list-style-type: none"> - Aptes à supporter de grands courants de charge et décharge grâce à leurs faibles résistances internes. - Faible coût - Solidité mécanique et électrique - Recharge facile et grande tolérance face aux surcharges 	<ul style="list-style-type: none"> - Effet mémoire - Densité énergétique moyenne - Recyclage compliqué à cause du cadmium qui est un métal lourd et polluant
Nickel Métal Hydride (Nimh)	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne densité d'énergie - Supporte des courants importants car résistance interne faible (les Ni-cd gardent cependant l'avantage dans ce domaine) - Simples à stocker et à transporter - Ne pollue pas si bien recyclé 	<ul style="list-style-type: none"> - Fragile car ne supportent pas la surcharge, nécessitant par conséquent l'usage de chargeurs automatiques performants et coûteux - Détection de fin de charge difficile - Durée de vie faible - Auto-décharge importante - Technologie dépassée
Lithium (Li)	<ul style="list-style-type: none"> - Densité énergétique très élevée grâce aux propriétés physiques du lithium - Autodécharge très faible (5% par mois) - Aucun effet mémoire - Poids - Agrément d'utilisation - Accepte un nombre de cycles important (jusqu'à 1500 pour les meilleures) - Faible résistance interne 	<ul style="list-style-type: none"> - Prix très élevé - Nécessite un circuit de protection sérieux (B.M.S. et P.C.M.) pour gérer la charge et la décharge afin d'éviter la destruction des éléments... coûteux - Usure même en cas de non utilisation

II.5. Conclusion

Les hacheurs nous permettent d'avoir un rendement fiable de tension, il est par ailleurs possible d'abaisser la tension de l'alimentation ou de l'élever, cela dépend de l'utilisation.

Les hacheurs ont différentes applications : le hacheur parallèle est utilisé dans des applications de faible tension comme les systèmes d'éclairage portatifs, ainsi que dans des applications de grandes tensions comme les véhicules hybrides. Les hacheurs série sont utilisés dans le domaine de la variation de vitesse pour machines à courant continu.

Malgré le rôle important des convertisseurs DC/DC dans le cycle de la conversion photovoltaïque, il est nécessaire d'installer un onduleur, car la plupart des charges sont de type alternatif. L'étude de l'onduleur fera l'objet du chapitre suivant.

Onduleurs

III.1. Introduction

Au niveau mondial, le marché des systèmes photovoltaïques connaît, depuis maintenant plus de 10 ans, un taux de croissance très élevé, de l'ordre de 30 à 40% par an. [71]

Cette croissance exceptionnelle, est due principalement aux systèmes photovoltaïques raccordés au réseau de distribution d'électricité, se traduit bien évidemment par des technologies et une baisse de coûts des modules photovoltaïques mais aussi à des efforts importants de recherche et développement dans le domaine de l'électronique de puissance.

L'onduleur est l'appareil qui rend utilisable l'électricité produite par le module photovoltaïque.

En effet, les performances techniques et la fiabilité des onduleurs utilisés pour le raccordement des modules photovoltaïques au réseau de distribution d'électricité, sont des paramètres qui peuvent très fortement faire varier la production d'énergie électrique annuelle et donc la rentabilité financière d'un système [72].

Le rendement de l'onduleur doit être supérieur à 90% voire 95%. Comme tout composant électronique, l'onduleur a une durée de vie limitée. Ainsi il faut prévoir de le changer tous les 10 ans environ [71, 73].

III.2. Schéma synoptique de l'onduleur

Les panneaux solaires produisent du courant continu. Le courant du réseau public est un courant alternatif à 220 volts. L'onduleur transforme le courant continu issu des panneaux solaires en courant alternatif à la tension du réseau, voir figure III.1.

Selon la taille des installations, il faut un ou plusieurs onduleurs, généralement un seul dans le cas de maisons individuelles.

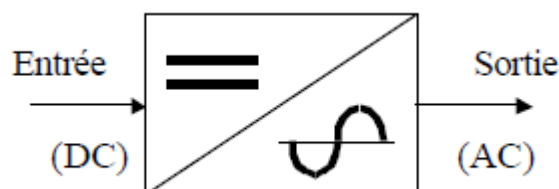


Figure III.1 : Convertisseur Continu (DC) - Alternatif (AC)

L'onduleur inclut également des fonctions de sécurité (protection de découplage). Pour des raisons de sécurité, l'onduleur s'arrête automatiquement de fonctionner lorsque le réseau est mis hors tension (coupure de courant de cause accidentelle ou pour travaux). C'est ce qu'on appelle : « la protection de découplage » qui permet de supprimer tout risque d'électrocution lorsque des techniciens font une opération de maintenance sur le réseau.

L'onduleur se présente sous la forme d'un boîtier métallique de petite dimension, muni d'un radiateur (à privilégier) ou d'un ventilateur (à éviter quand c'est possible). En effet le ventilateur peut tomber en panne et l'onduleur passer en surchauffe ...). Il doit être placé sur un support vertical (mur par exemple) et dans un espace ventilé. Il n'émet aucun parasite électromagnétique et ne génère quasiment aucun bruit. Afin de limiter les pertes d'électricité en ligne, il doit être placé le plus près possible des modules photovoltaïques (moins de 10 mètres), voir figure III.2.



Figure III.2 : Photos d'onduleurs commercialisés

III.3. Domaine d'utilisation des onduleurs

Les onduleurs sont utilisés:

- Comme source de secours ou d'alimentation sans coupure à partir d'une batterie d'accumulateurs lorsque sa fréquence est fixée.
- Pour la variation de vitesse des moteurs à courant alternatif, si sa fréquence est variable.
- Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes (La France fournit de l'énergie électrique à la Grande-Bretagne, mais la fréquence du réseau anglais est 60 Hz. Il faut donc adapter la fréquence).

III.4. Classification

De nombreux essais de classification plus ou moins avantageux, ont été élaborés. En général, les classifications sont liées aux modes de commutation des éléments semi-conducteurs constituant l'onduleur.

Un premier mode de classification qui se présente comme une nécessité, peut être fait, on dissocie grossièrement les différents onduleurs existants en :

- Onduleurs autonomes ;
- Onduleurs non autonomes.

III.4.1. Onduleurs non autonomes

Ces onduleurs ne peuvent assurer la conversion que s'ils débitent sur un réseau alternatif déjà alimenté, dont la fréquence et la tension alternative sont imposés par celui-ci.

Le circuit de ces onduleurs qui sont employés dans la majorité des installations de grandes puissances utilise la propriété de réversibilité des redresseurs comportant uniquement des thyristors (parfois des transistors) commandés. Il s'ensuit que la source à courant continu débite de l'énergie qui doit être absorbée par le réseau à courant alternatif, lorsque le thyristor conduit. Il en résulte une conversion d'énergie courant continue en énergie de type courant alternatif.

III.4.2. Onduleurs autonomes

Contrairement à un onduleur assisté, un onduleur autonome détermine lui-même sa propre fréquence et sa propre tension alternative. Il dépend essentiellement de la nature du générateur et du récepteur entre lesquels il est monté. Cela conduit à distinguer :

- Onduleur de tension alimenté par une source de tension continue ;
- Onduleur de courant alimenté par une source de courant continu.

III.5. Réalisation de l'onduleur

Qu'il soit à deux ou quatre interrupteurs, le principe de base et la constitution sont les mêmes :

- Créer aux bornes de la charge une tension de valeur positive et négative en alternance.
- Utilisation de l'électronique de puissance.
- Utilisation d'interrupteurs bidirectionnels formés par un transistor et une diode montée en antiparallèle (voir schéma III.3).
- Commande permettant de gérer les interrupteurs.

III.5.1. Interrupteurs bidirectionnels

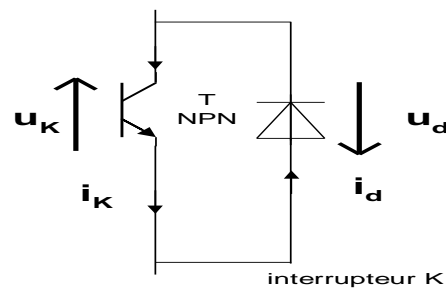


Figure III.3 : Bloc d'interrupteurs bidirectionnel

Le transistor constitue l'élément commandé. Il est unidirectionnel tout comme la diode. L'assemblage des deux composants permet de créer un bloc qui sera, lui, bidirectionnel, voir figure III.3.

Pour l'étude théorique, nous supposons toujours que les composants sont parfaits (tension à leurs bornes nulle lorsqu'ils sont conducteurs). Ainsi, le transistor sera schématisé par un interrupteur parfait, voir figure III.4.

Au point de vue du vocabulaire, on dit qu'un interrupteur est susceptible d'être passant lorsqu'il est commandé à la fermeture. Inversement, il sera bloqué quand il est commandé à l'ouverture.

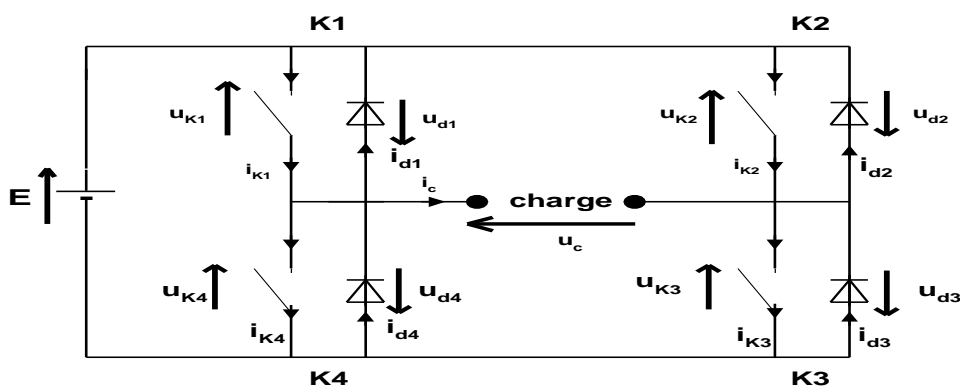


Figure III.4: Montage de l'onduleur à quatre interrupteurs

III.6. Commandes des onduleurs

D'après le type de commandes de l'onduleur monophasé on trouve trois catégories:

Nous nommerons K chaque interrupteur bidirectionnel, chacun est commandé indépendamment des autres.

Le but est de créer aux bornes de la charge une tension alternative. Pour cela, il suffit de commander les interrupteurs deux à deux on y trouve la :

- Commande symétrique
- Commande décalée.
- Commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI).

Dans un premier temps, nous étudierons la commande la plus simple (symétrique) puis nous verrons la commande décalée et la commande à MLI avec ce qu'elles apportent de plus.

L'allure de la tension dépend uniquement de la commande utilisée et non pas de la charge. Seul dépendra de la charge, l'allure des courants, voir figure III.5.

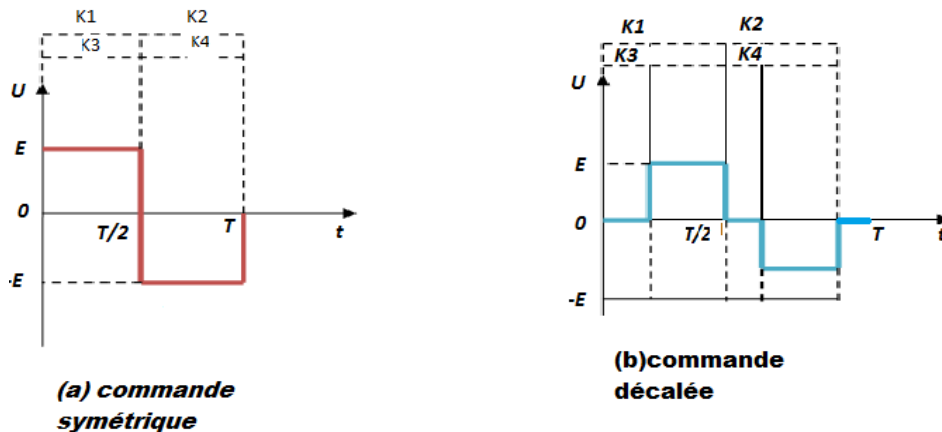


Figure III.5: Niveaux de tensions et le diagramme des conductions des interrupteurs

III.6.1. Commande symétrique

Cette commande se résume à commander les interrupteurs K_1 et K_3 à la fermeture pendant une demi-période puis K_2 et K_4 durant la deuxième demi-période. (Nous entendons que les interrupteurs non commandés à la fermeture sont en fait commandés à l'ouverture). [74] L'analyse se décompose en deux phases:

1ère phase : K_1 et K_3 sont commandés à la fermeture de l'instant 0 à $T/2$.

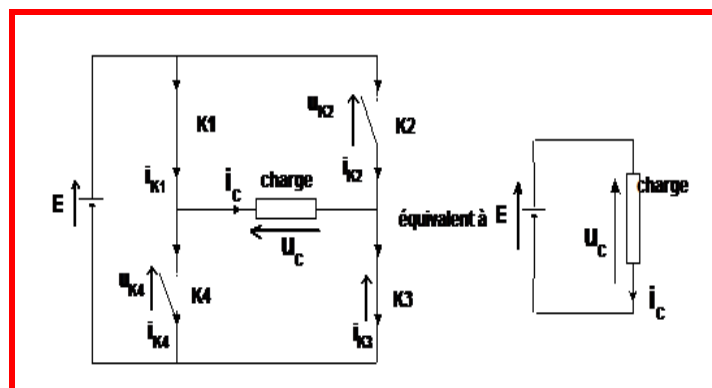


Figure III.6: Montage de l'onduleur à quatre interrupteurs période $[0, T/2]$

La tension aux bornes de la charge aura donc la valeur $U_c = E$.

Durant cette phase K2 et K4 sont ouverts.

Nous obtenons donc le schéma équivalent très simple suivant, voir figure III.6.

2^{ème} phase : K2 et K4 sont à leur tour commandés à la fermeture de l'instant $\frac{T}{2}$ à T .

$U_c = -E$, voir figure III.7.

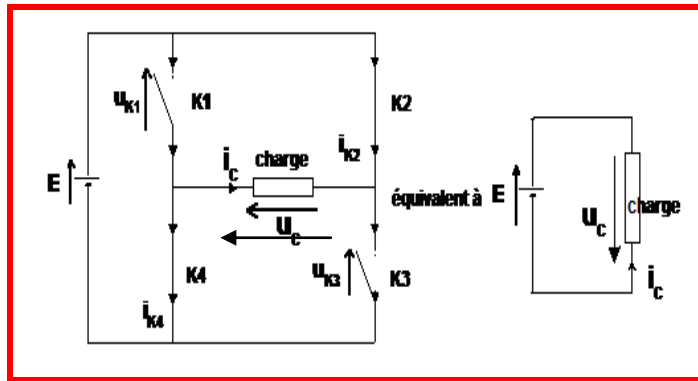
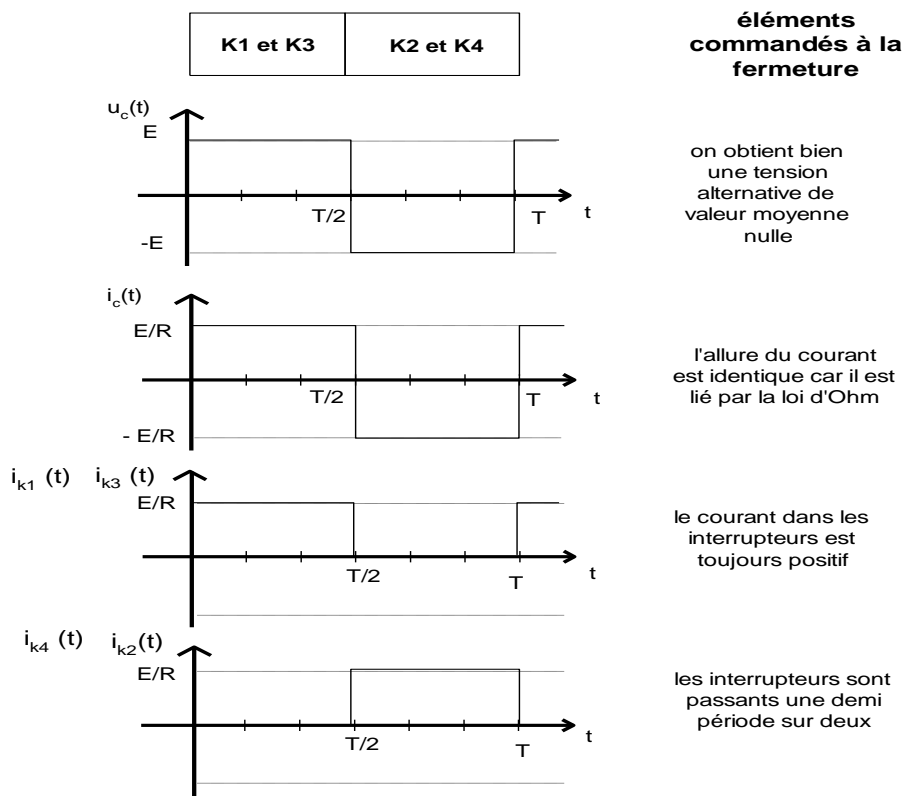


Figure III.7: Montage de l'onduleur à quatre interrupteurs périodes $[T/2, T]$



Il suffit donc de dessiner des oscillogrammes suivant la charge choisie

Figure III.8: Représentation de la tension et des courants pour une charge résistive.

III.6.2. Commande décalée [75]

Cette commande, plus améliorée dans sa conception, est une première étape vers l'obtention d'un courant sinusoïdal. Si nous nous attachons à une analyse spectrale, nous verrions dans la commande précédente que la tension, ainsi que le courant, sont riches en harmoniques ce qui pose des problèmes pour une utilisation avec des moteurs (pertes joules, couples pulsatoires..).

La commande décalée permet d'éliminer en partie ces harmoniques et améliorer donc le convertisseur. Au niveau de la commande, il suffit de décaler la fermeture des différents interrupteurs dans un ordre précis (ordre donné ci-dessous), voir figure III.9.

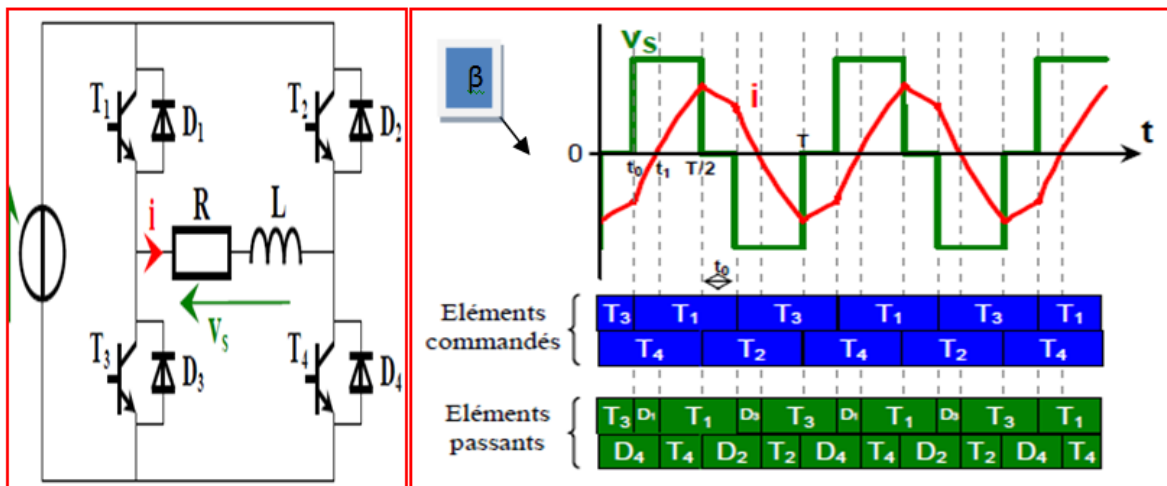


Figure III.9 : Représentation de la tension et des courants

III.6.2.a. Analyse des chronogrammes pour $0 < t < T$

De 0 à t_0 : T₃ et T₄ sont commandés, $V_s=0V$

Donc i tend vers 0 mais encore négatif - le courant passe donc par T₃ et D₄

C'est la phase de roue libre (l'énergie est dissipée dans la résistance).

De t_0 à t_1 : T₁ et T₄ sont commandés, $V_s=E$

Donc i augmente mais encore négatif-le courant passe par les diodes D₁ et D₄

C'est la phase de récupération (l'énergie est renvoyée vers la source).

De t_1 à $T/2$: T₁ et T₄ sont toujours commandés. Le courant i est devenu positif- Les transistors T₁ et T₄ sont conducteurs (D₁ et D₄ se bloquent), c'est la phase d'alimentation (l'énergie est fournie par la source).

De $T/2$ à $T/2+t_0$: T₁ et T₂ sont commandés $V_s=0V$

Donc i tend vers 0 mais est encore positif. Le courant passe par T₁ et D₂. C'est la phase de roue libre (l'énergie est dissipée dans la résistance).

De $T/2+t_0$ à $T/2+t_1$: T₃ et T₂ sont commandés, $V_s=-E$

Donc i diminue mais est encore positif. Le courant passe par les diodes D_2 et D_3 . C'est la phase de récupération (l'énergie est renvoyée vers la source).

De $T/2+t_2$ à T : T_3 et T_2 sont toujours commandés. Le courant i est devenu négatif. Les transistors T_2 et T_3 sont conducteurs (D_2 et D_3 se bloquent). C'est la phase d'alimentation (l'énergie est fournie par la source).

III.6.2.b. Amplitude des harmoniques de rang n :

En comparant l'amplitude des harmoniques issus des deux commandes symétrique et décalée on aura:

- Pour la commande symétrique :

$$A_n = \frac{E}{n\pi} [1 - \cos(n\pi)] \quad (\text{III.1})$$

$$\text{Si } n=1 \quad A_1 = \frac{2E}{\pi} \quad (\text{III.2})$$

Pour la commande décalée :

$$A_n = A_n = \frac{E}{\pi n} [-\cos(n\pi) + \cos(n\beta) + \cos(2n\pi) - \cos(n(\pi+\beta))] \quad (\text{III.3})$$

$$\text{Si } n=1 : \quad A_1 = \frac{2E}{\pi} [1 + \cos(\beta)] \quad (\text{III.4})$$

Avec A Angle de décalage des commandes.

III.6.2.c. Comparaison

La puissance échangée par la charge comporte une phase de plus avec la commande décalée. Pendant deux intervalles de temps, elle est nulle: il s'agit de phase de roue libre. Au cours de ces intervalles, l'énergie emmagasinée par la bobine est cédée à la résistance car la tension aux bornes de la charge est nulle. De plus, nous retrouvons les phases de récupération.

III.6.3. Modulation de largeur d'impulsion MLI

Les Onduleurs étudiés jusqu'ici délivrent des ondes rectangulaires ou en créneau (un créneau par alternance) ne sont pas convenables pour un certain nombre d'applications telle que l'alimentation de secours en informatique à cause de leur taux d'harmonique très important. Pour l'atténuation des harmoniques contenus dans ces ondes, on peut se servir d'un filtre qui sera placé à la sortie de l'onduleur. Ce filtre est un élément qui peut être parfois d'un poids ou d'un prix élevé. Cependant pour diminuer le poids et le prix du filtre, on préfère dans certains cas faire appel à des techniques d'onduleurs plus perfectionnées.

Actuellement on utilise de plus en plus la technique de la modulation de largeur d'impulsions [76]. Il s'agit de l'étape supérieure pour obtenir un courant quasi sinusoïdal. La tension aux bornes de la charge est fragmentée en plusieurs impulsions de tension (négative et positive). Cette fragmentation permet si elle est savamment calculée d'éliminer les harmoniques gênants.

Pour cela on compare un signal sinusoïdal nommé sous le nom la référence avec un signal triangulaire symétrique ou asymétrique nommé sous le nom de porteuse [77], voir figure III.10.

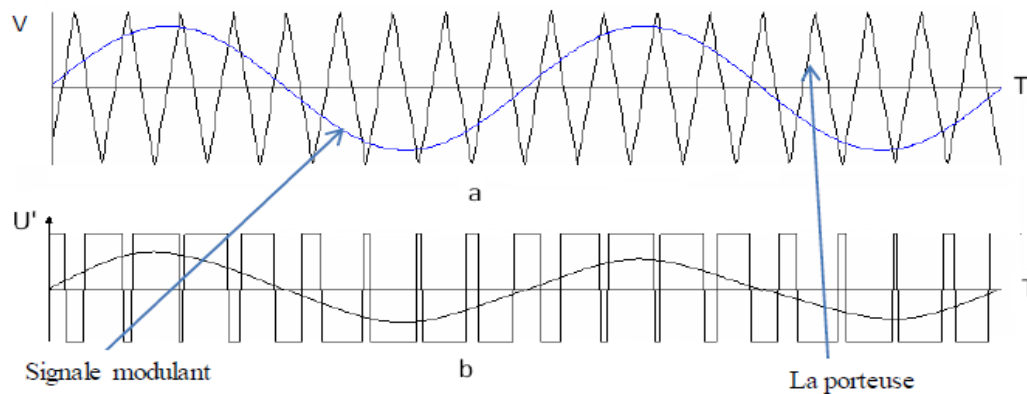


Figure III.10: Forme de tension de sortie obtenue par la commande MLI

III.6.3.a. Caractéristiques de la commande

Deux paramètres caractérisent la commande:[78]

L'indice de modulation (m) est égal au rapport des fréquences de la modulation (porteuse) et de la référence (modulante). Ce rapport découle entre un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur. Ce dernier se détériore au fur et à mesure que la fréquence de hachage augmente.

$$m = \frac{f_p}{f_m} \quad (\text{III.5})$$

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

$$r = \frac{A_m}{A_p} \quad (\text{III.6})$$

A_m : Amplitude de la modulante

A_p : Amplitude de la porteuse

III.7. Architecture de l'onduleur [79]

L'architecture des circuits de puissance pour les onduleurs, on trouve aussi trois types :

- Onduleur en demi-pont
- Onduleur avec transformateur à point milieu (isolé)
- Onduleur en pont complet

III.7.1. Onduleur en demi-pont

On utilise deux interrupteurs bidirectionnels en courant (Thyristor associé à une diode en antiparallèle) et une source de tension à point milieu obtenue grâce à des condensateurs pour pouvoir réaliser un onduleur en demi pont.

L'interrupteur peut être un transistor (Mosfet ou IGBT) équipé d'une commande automatique de blocage lors de l'annulation du courant le traversant associé à une diode en antiparallèle.

C_1, C_2 ont la même capacité C et constituent un diviseur de tension, on obtient deux tensions sensiblement constantes est égales à $E/2$, voir figure III.11.

Si $0 < t < T/2$: Th1 fermé, Th2 ouvert, $U' = \frac{E}{2}$

Si $T/2 < t < T$: Th2 fermé, Th1 ouvert, $U' = -\frac{E}{2}$

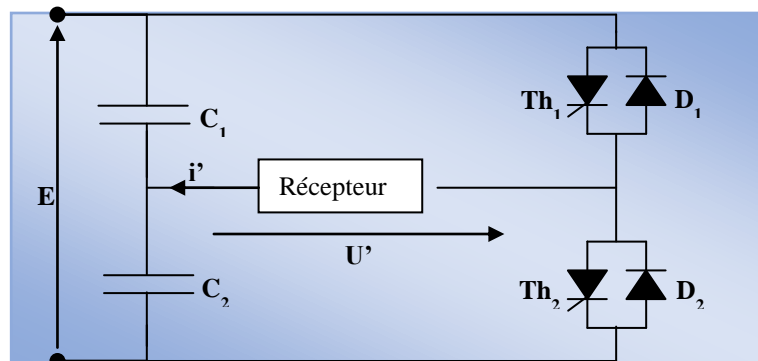


Figure III.11: Schéma d'un onduleur en demi-pont

III.7.2. Onduleur avec transformateur à point milieu [80]

La figure III.12 représente un montage d'un onduleur avec transformateur à point milieu utilisant des thyristors. Son principe de fonctionnement est basé sur la commutation forcée : Th1 et Th2, sont à l'état passant à tour de rôle, ce qui produit des impulsions de courant de sens inverse, I_1 et I_2 , dans les deux moitiés du primaire du transformateur. On obtient, au secondaire du transformateur, une tension alternative de forme rectangulaire. Le condensateur de commutation C empêche les deux thyristors de

laisser passer le courant en même temps, de sorte qu'il provoque le blocage d'un thyristor lorsque l'autre s'amorce.

L'inductance de lissage L tend à garder un courant constant dans le circuit. Il en résulte que les courants I_1 et I_2 sont égaux et de forme rectangulaire.

$$\text{Si Th1 fermé, Th2 ouvert } U = 2 \times \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \times E \quad \text{(III.7)}$$

$$\text{Si Th2 fermé, Th1 ouvert } U = -2 \times \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \times E \quad \text{(III.8)}$$

n_1 : nombre de spire du primaire

n_2 : nombre de spire du secondaire.

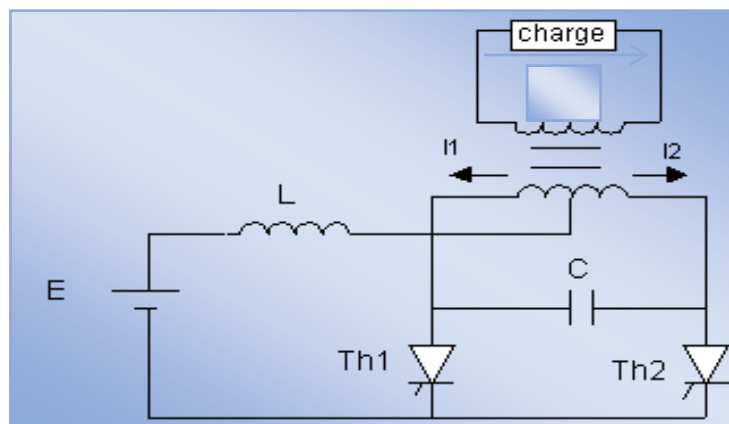


Figure III.12: Schéma d'un onduleur avec transformateur à point milieu

III.7.3. Onduleur en pont complet

Le montage III.13 comprend quatre interrupteurs commandés ainsi que quatre diodes montées en parallèle en inverse aux bornes des interrupteurs. Si on prend le cas des thyristors on ajoute les circuits d'amorçage ou de blocage.

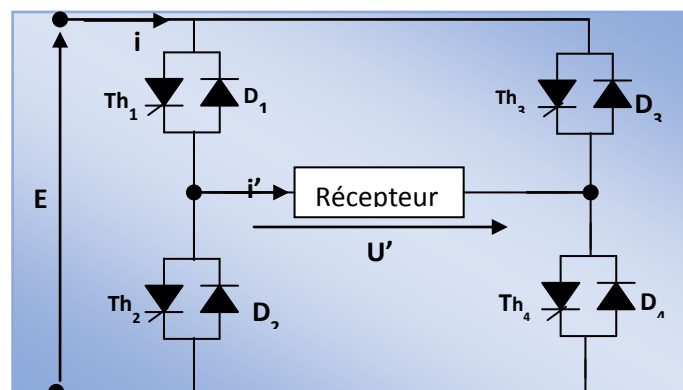


Figure III.13: Schéma d'un onduleur en pont complet

Pour : $0 < t < T/2$, (Th1 et Th4 sont fermés, Th2 et Th3 sont ouverts) $U' = E$

Pour : $T/2 < t < T$, (Th2 et Th3 sont fermés, Th1 et Th4 sont ouverts) $U' = -E$

III.8. Principe de fonctionnement d'un onduleur à deux interrupteurs en demi-pont

III.8.1. Onduleur débitant sur une charge résistive

Deux alimentations délivrant deux tensions, continues égales, alimentent une charge résistive par l'intermédiaire de deux interrupteurs K_1 et K_2 . Ces deux interrupteurs peuvent être des transistors ou des thyristors (composants électroniques commandés) [81]. Ils sont tels que si le premier est ouvert, l'autre est nécessairement fermé et inversement. Le basculement des interrupteurs est pratiquement instantané. Le montage est illustré à la figure III.14

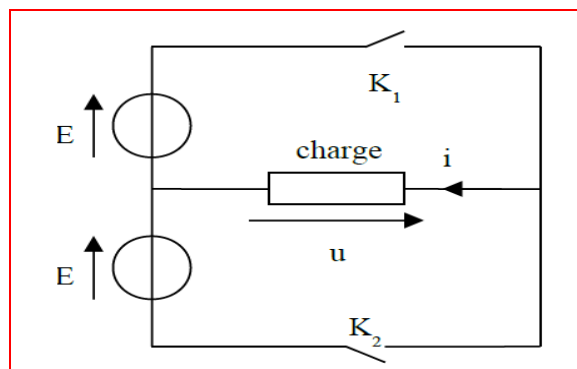


Figure III.14: Onduleur à deux interrupteurs (Charge résistive)

III.8.1.a. Etude de la tension aux bornes de la Charge [82]

La tension U ne peut donc prendre que les deux valeurs suivantes : figure III.15

K_1 fermé, K_2 ouvert $U = E$

K_1 ouvert, K_2 fermé $U = -E$

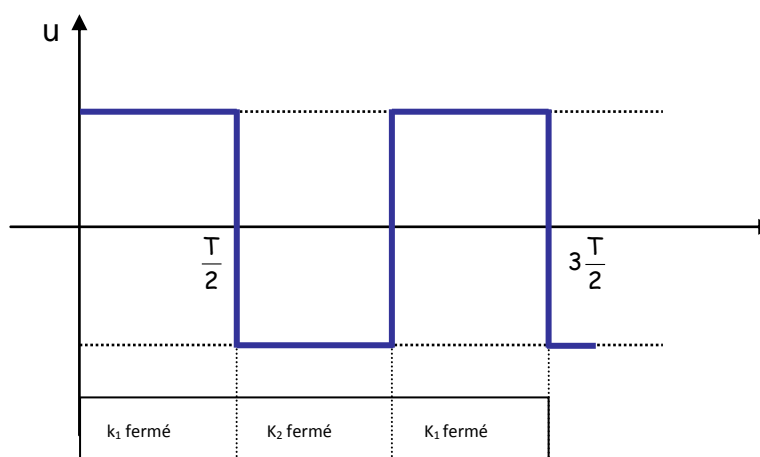


Figure III.15: Représentation de la tension aux bornes de la charge

-La valeur moyenne de $U(t)$, en volts, est donc : $U=0V$

-La valeur efficace de $U(t)$, en volts, est donc : $U = E$

-La fréquence f , en Hertz [Hz], $f= \frac{1}{T}$

-La fréquence est réglée par le dispositif de commande des interrupteurs.

III.8.1.b. Etude du courant (charge résistive)

La charge résistive ne modifie pas l'image du courant, la représentation est donc la suivante, voir figure III.16.

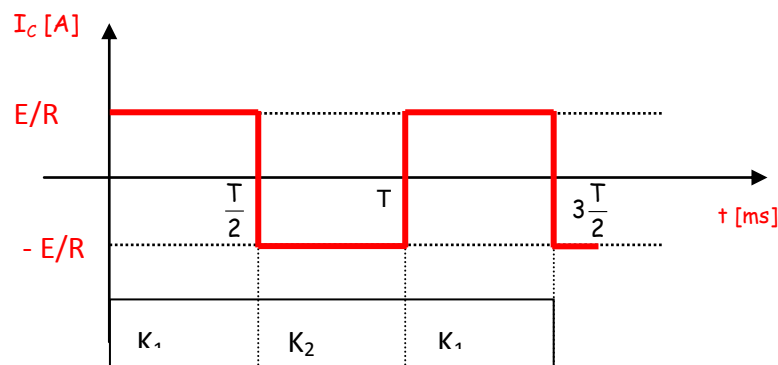


Figure III.16 : Représentation du courant (charge résistive)

La valeur moyenne de $i_c(t)$, en ampères [A], est donc : $\bar{I}_c = 0A$.

La valeur efficace de $i_c(t)$, en ampères [A], est donc : $I_c = \frac{E}{R}$ (III.9)

La fréquence f , en Hertz [Hz] : $f = \frac{1}{T}$ (III.10)

A partir de deux tensions continues fixes, nous avons maintenant un courant alternatif de fréquence réglable.

III.8.2. Charge inductive

La charge est maintenant composée d'une résistance associée à un élément fortement inductif. Ce nouveau composant oblige l'adjonction de deux diodes montées en antiparallèle sur les interrupteurs. Elles permettent ainsi à la bobine, de restituer l'énergie emmagasinée, lors de l'ouverture des interrupteurs, et au courant de ne pas subir de discontinuité ainsi qu'aux interrupteurs électroniques de ne pas être le siège de surtensions, voir figure III.17.

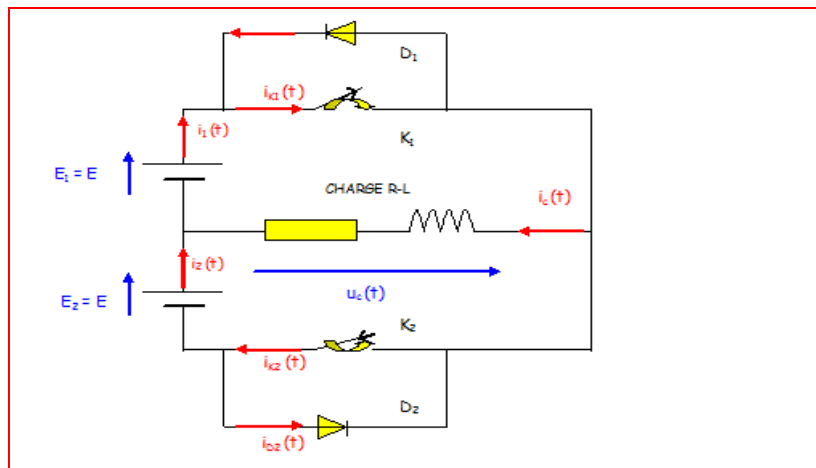


Figure III.17: Onduleur à deux interrupteurs (Charge inductive)

III.8.2.a. Etude de la tension aux bornes de la charge

La tension $U_c(t)$ ne peut donc prendre que les deux valeurs suivantes:

$$K_1 \text{ fermé } K_2 \text{ ouvert } u_c(t) = E$$

$$K_1 \text{ ouvert } K_2 \text{ fermé } u_c(t) = -E$$

La représentation de la tension $u_c(t)$ ne change pas les calculs des valeurs moyenne et efficace. Elles s'effectuent comme précédemment (charge résistive).

Les diodes D_1 et D_2 ne jouent aucun rôle dans la représentation de la tension qui reste similaire à la figure (III.15).

III.8.2.b. Etude du courant (charge inductive):

La charge est maintenant inductive, le courant $i_c(t)$ n'est plus la réplique de la tension

$$\text{Calcul du courant direct : } U_c = E = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (\text{III.11})$$

Soit $\tau = \frac{L}{R}$ la constante de temps de la charge, il vient :

$$i_c(t) = Ae^{\frac{t}{\tau}} + \frac{E}{R} \quad (\text{III.12})$$

$$i_c(t) = \left(I_0 - \frac{E}{R} \right) e^{\frac{t}{\tau}} + \frac{E}{R} \text{ avec } i(0) = I_0 \quad (\text{III.13})$$

La courbe obtenue est représentée ci-après, voir figure III.18.

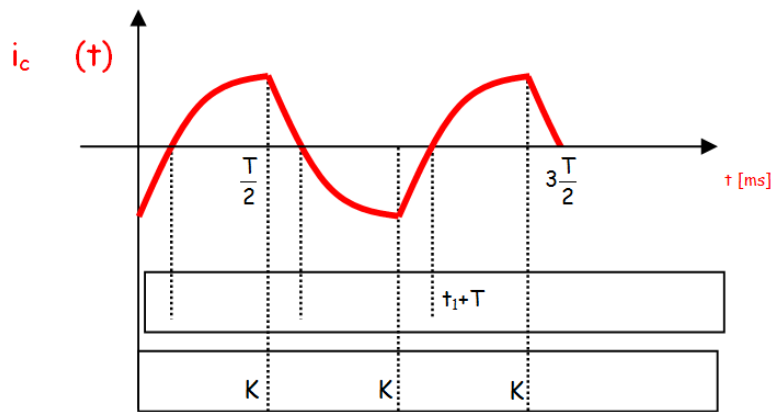


Figure III.18: Représentation du courant pour une charge inductive

L'intensité du courant dans la charge peut être positive alors que la tension à ses bornes est tantôt positive et tantôt négative, il en est de même lorsque l'intensité du courant $i_c(t)$ est négative, les diodes sont donc essentielles dans l'étude de la circulation du courant. Toutes ces données sont contenues dans le tableau III.1 suivant :

Période	Courant	Tension	I_{K1}	I_{K2}	I_{D1}	I_{D2}
$0 < t < t_1$	Négatif	E	0	0	$i_c(t)$	0
$t_1 < t < \frac{T}{2}$	Positif	E	$i_c(t)$	0	0	0
$\frac{T}{2} < t < t_2$	Positif	- E	0	0	0	$i_c(t)$
$t_2 < t < T$	Négatif	- E	0	$i_c(t)$	0	0

Tableau III.1: Valeurs des courant et tension pendant l'intervalle $[0, T]$

III.9. Critères de différenciation entre les trois types d'onduleurs de tension

A première vue ce qui différencie les onduleurs à deux interrupteurs à ceux de quatre, réside dans le fait que :

Dans le premier cas, on a besoin seulement de deux semi-conducteurs commandés et deux diodes ; tandis que dans le second cas on a recours à quatre semi-conducteurs commandés associée à quatre diodes, donc à un nombre deux fois plus grand

Cette différence qui se compte pour les premières comme avantage est souvent réduite du fait du doublement de la tension ou du courant :

Pour l'onduleur en pont

$$U_{I_{max}} = -U_{u_{max}} = U_e \quad (III.14)$$

Pour l'onduleur en demi-pont

$$I_{k1} = i_e \quad U_{max} = -U_{max} = U_e / 2 \quad (III.15)$$

De plus avec les montages à deux interrupteurs on ne peut régler que la cadence d'ouverture et de fermeture des deux interrupteurs donc de leur fréquence; par contre dans le montage à quatre interrupteurs spécialement celui à commande décalée, on peut régler la cadence et même la tension de sortie.

D'autre part malgré que le principe est le même, l'onduleur en pont ne nécessite ni transformateur, ni diviseur capacitif comme c'est le cas pour les onduleurs à deux interrupteurs. Toutefois l'importance de cet inconvénient (des deux derniers) diminue car :

La présence du transformateur dans la plupart des onduleurs a pour but d'assurer l'isolement galvanique et d'obtenir en sortie la tension désirée.

Presque dans tous les onduleurs, la présence du filtre d'entrée est indispensable. Pour l'onduleur en demi-pont, ce sont les capacités de son diviseur qui peuvent aussi jouer le rôle de capacités de filtrage. En plus, l'onduleur en pont présente une chute de tension plus au moins grande aux bornes des interrupteurs série qui fonctionnent en même temps. Par conséquent on aura plus de pertes qui seront à l'origine d'une forte réduction du rendement en cas où la tension d'alimentation est peu élevée [83,84].

III.10. Onduleurs réalisés au laboratoire ICEPS**III.10.1. Onduleur à commande symétrique et décalée**

Le premier onduleur réalisé est à quatre interrupteurs à commande symétrique et décalée (ce travail a fait l'objet d'une communication internationale) Voir figures III.19, III.20, III.21 et III.22 [85].

On remarque que la commande décalée a amélioré grandement le signal du courant de charge par rapport à la commande symétrique. Le courant est presque sinusoïdal.

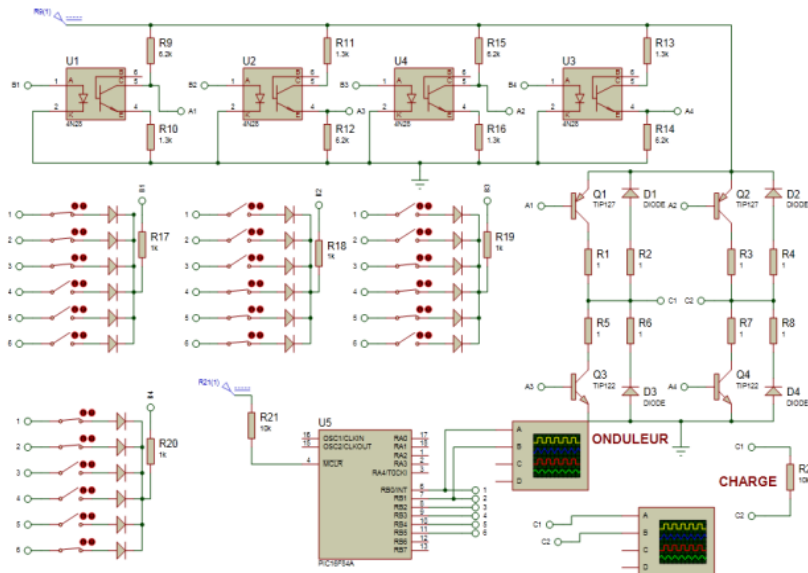


Figure III.19 : Onduleur à commande symétrique et décalée

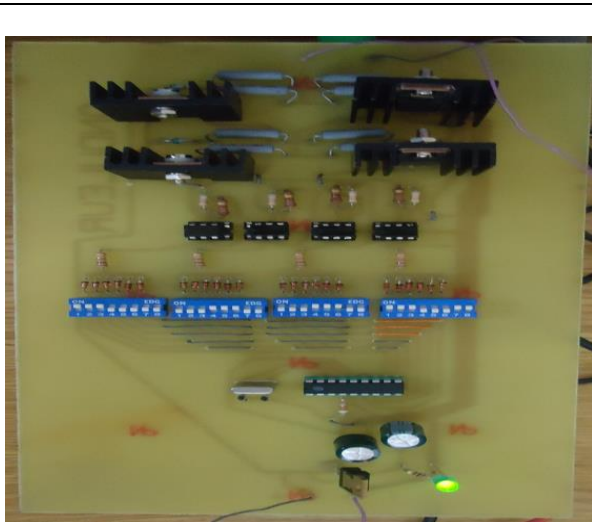


Figure III.20 : Photo de la carte de l'onduleur

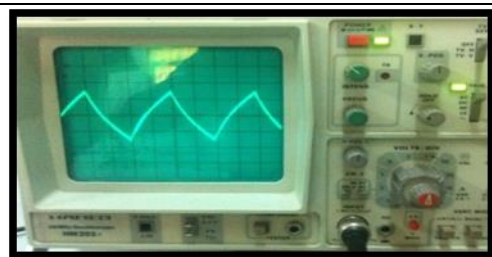


Figure III.21 b : Courant aux bornes d'une charge inductive commande symétrique

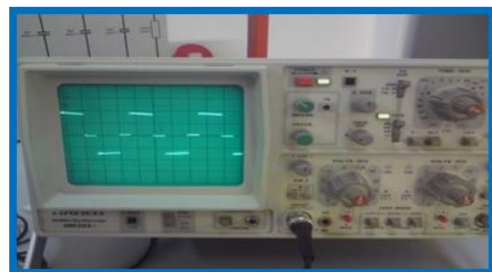


Figure III.22 a : Tension aux bornes d'une charge inductive commande décalée



Figure III.21 a : Tension aux bornes d'une charge inductive commande symétrique

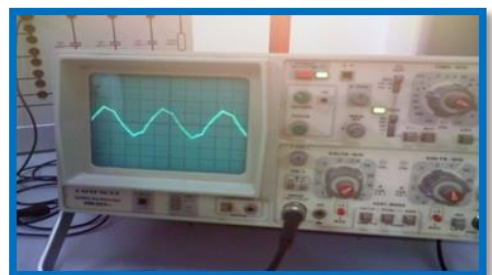


Figure III.22 b : Courant aux bornes d'une charge inductive commande décalée

III.10.2. Onduleur à commande MLI

Ce travail a fait l'objet d'une communication internationale [86]. La commande MLI a permis d'avoir un courant sinusoïdal aux bornes de la charge voir figure III.23. On remarque une nette amélioration par rapport à la commande décalée

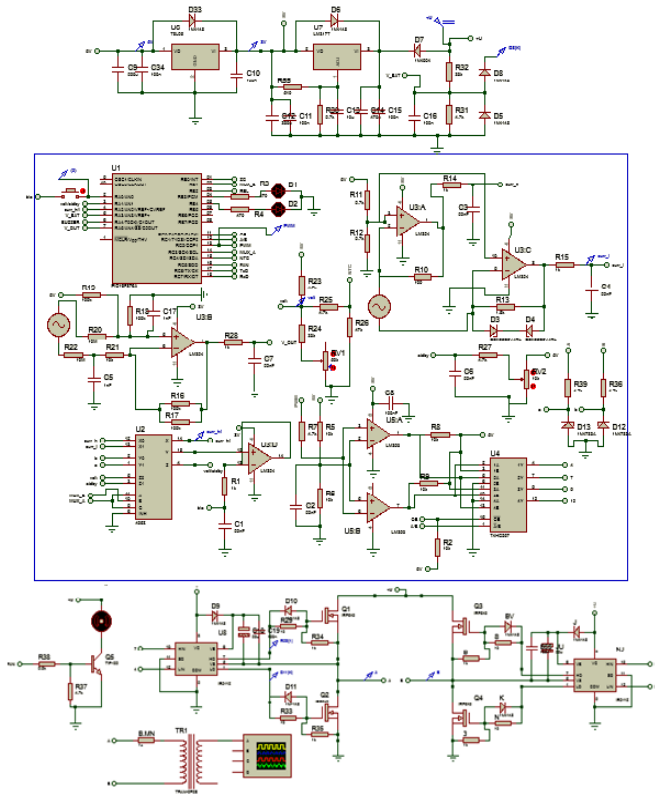


Figure III.23.a: Schéma du circuit de l'onduleur

à commande MLI

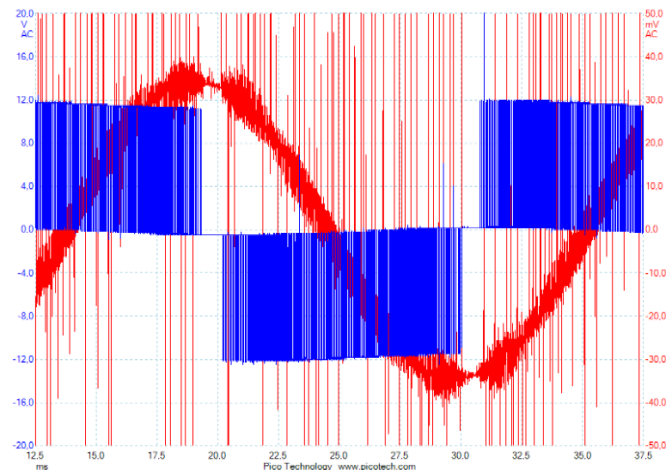


Figure III.23.c : Tension et courant de l'onduleur à Commande MLI.

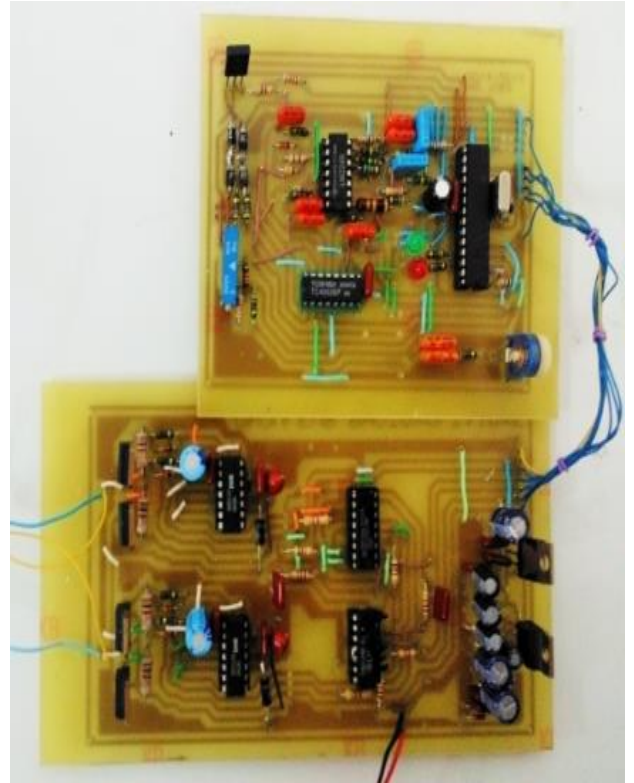


Figure III.23.b: Photo de l'onduleur à

commande MLI.

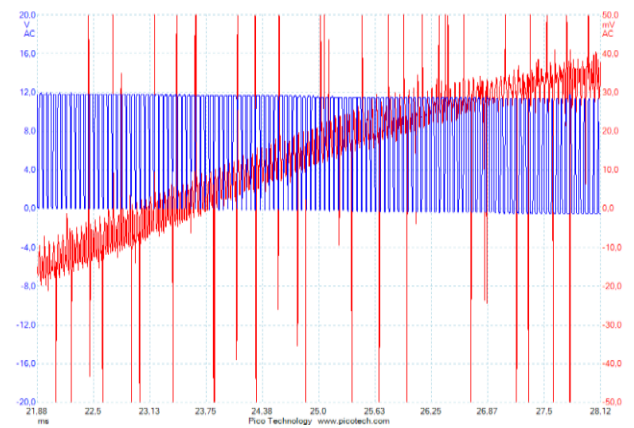


Figure III.23.d : Zoom de la tension et du Courant de l'onduleur à commande MLI

III.11. Filtre d'entrée

L'onduleur de tension impose à sa sortie un système de tensions sous forme de créneaux modulés en largeur d'impulsions (MLI ou PWM en anglais). Ces créneaux ne posent aucun problème pour l'alimentation d'un moteur, mais sont incompatibles avec les tensions sinusoïdales du réseau.

On place alors entre chaque sortie de l'onduleur et chaque phase du réseau (onduleur monophasé ou triphasé) une inductance qui joue le rôle de filtre de type L-C voir figure III.24. Cela permet à l'onduleur de fournir au réseau des courants quasi sinusoïdaux: d'un point de vue formel elle transforme l'onduleur de tension en onduleur de courant.

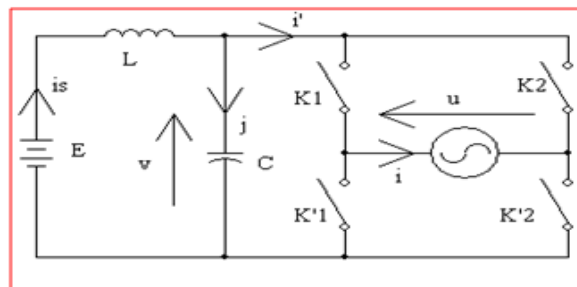


Figure III.24 : Onduleur en pont en présence d'un filtre

La source présente toujours une inductance parasite, or le courant de source présente une discontinuité à chaque commutation dans l'onduleur; le condensateur C permettra cette discontinuité tout en lissant la tension appliquée à l'onduleur, voir figure III.25.

L'inductance L réduit l'ondulation du courant dans la source afin de limiter les pertes.

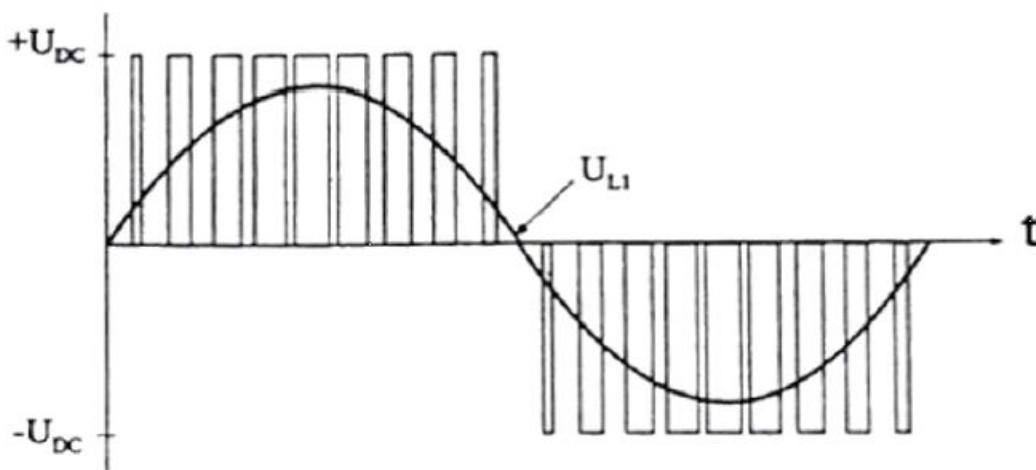


Figure III.25 : Filtrage de la tension par l'inductance de sortie

U_{DC} correspond à la tension aux bornes du condensateur d'entrée d'un montage simple et U_{L1} à la tension injectée au réseau donc de fréquence 50 Hz.

III.12. Connexion et emplacement de l'onduleur photovoltaïque

III.12.1. Connexion

Actuellement, il existe principalement trois architectures de techniques d'onduleurs

- Un seul onduleur pour toutes les installations (onduleur simple ou central, figure III.26.a)
- Un onduleur pour chaque string (onduleur string, figure III.26.b)
- Installations multi-onduleurs (onduleurs modulaire, figure III.26.c)

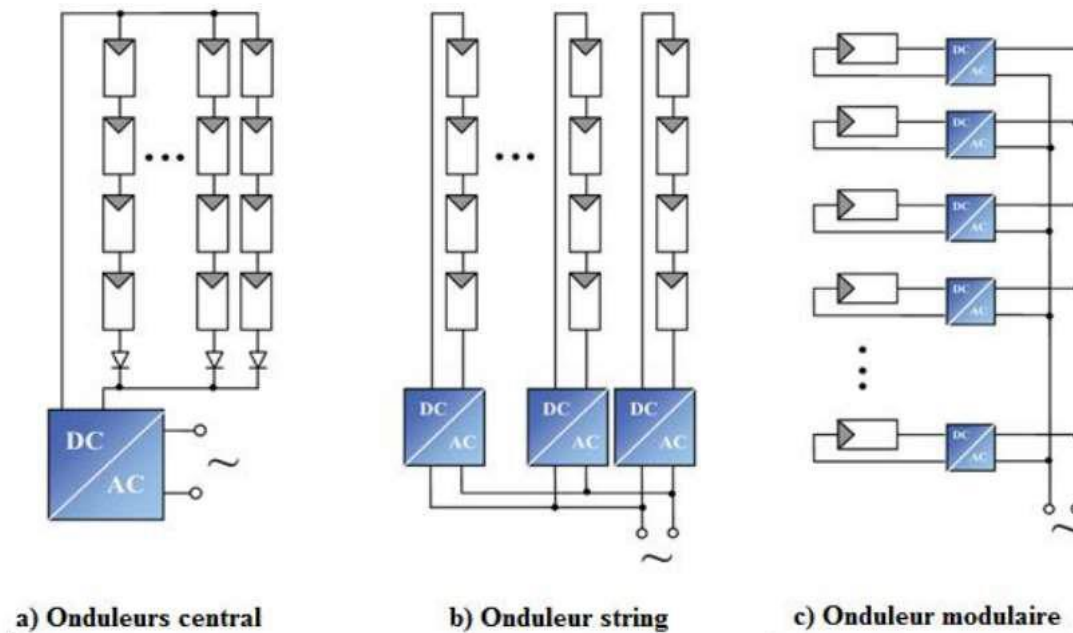


Figure III.26: Différentes topologies des installations PV connectés aux réseaux électriques.

[87]

III.12.1.a. Installation mono-onduleur (onduleur central)

Cette configuration est utilisée dans les petites installations avec des modules du même type ayant la même exposition. La présence d'un onduleur unique présente des avantages économiques, en réduisant l'investissement initial et les coûts d'entretien. Cependant, la défaillance de l'onduleur peut entraîner l'arrêt de la production de l'ensemble de l'installation. De plus, cette solution n'est pas très adaptée à l'agrandissement de l'installation PV, car elle augmente les problèmes de protection contre les surintensités et ceux liés à un ombrage différent, autrement dit lorsque l'exposition des panneaux n'est pas la même dans l'ensemble de l'installation.

Le fonctionnement de l'onduleur est régulé par le MPPT en tenant compte des paramètres moyens des strings raccordés à l'onduleur; par conséquent, si tous les

strings sont raccordés à un onduleur unique, l'ombrage ou la défaillance de tout ou partie des strings entraîne une réduction accrue des performances électriques de l'installation par rapport à d'autres configurations.

II.12.1.b. Installation avec un onduleur pour chaque string (onduleur string)

Dans une installation de taille moyenne, chaque string peut être directement raccordé à son propre onduleur et donc fonctionner selon son propre Maximum Power Point.

Dans cette configuration, la diode, qui empêche la source de circuler dans le sens inverse, est généralement incluse dans l'onduleur.

Ce dernier réalise un diagnostic de la production et assure également la protection contre les surintensités et les surtensions d'origine atmosphérique du côté DC.

De plus, la présence d'un onduleur sur chaque string limite les problèmes de couplage entre les modules et les onduleurs de même que la réduction des performances causée par l'ombrage ou une exposition différente.

Par ailleurs, avec plusieurs strings, des modules présentant différentes caractéristiques peuvent être utilisés, augmentant par conséquent l'efficacité et la fiabilité de l'ensemble de l'installation.

II.12.1.c. Installation multi-onduleurs (Onduleur modulaire)

Suivant ce concept, chaque module solaire dispose d'un onduleur individuel. Pour les installations plus importantes, tous les onduleurs sont connectés en parallèle côté courant alternatif. Les onduleurs modulaires sont montés à proximité immédiate du module.

Dans les installations de grande taille, le champ PV est généralement divisé en un plus grand nombre de parties (sous-champs), chacune étant alimentée par un onduleur auquel différents strings sont raccordés en parallèle.

Par rapport à la configuration précédente, le nombre d'onduleurs est dans ce cas inférieur, entraînant une réduction conséquente de l'investissement et des coûts d'entretien.

Cette configuration présente également l'avantage de réduire les problèmes liés à l'ombrage et à la différence d'exposition des strings mais également ceux liés à l'utilisation de modules différents, à condition que les strings du sous champ ayant des modules et une exposition identiques soient raccordés au même onduleur.

De plus, la défaillance d'un onduleur n'implique pas la perte de production de l'ensemble de l'installation (comme dans le cas de l'onduleur unique) mais du sous-champ correspondant uniquement.

Il est recommandé de pouvoir déconnecter chaque string séparément, de manière à ce que les vérifications de fonctionnement et d'entretien requises puissent être réalisées sans mettre hors service l'ensemble du générateur PV.

Dans cette configuration, le diagnostic de l'installation est réalisé par un système de supervision qui vérifie la production des différents strings.

Le système modulaire est en général conseillé pour les petites installations photovoltaïques (de puissance inférieure à 3kWc) du point de vue du prix comme des spécificités techniques.

III.12.2. Emplacement de l'onduleur photovoltaïque

- Le plus proche possible des panneaux photovoltaïques
- Dans un endroit aéré et accessible, protégé de la pluie et du soleil
- Evitez la proximité avec les chambres en raison du bruit produit par l'onduleur en fonctionnement
- Veillez à ce qu'un dispositif de coupure de l'arrivée de courant sur le réseau soit facilement accessible à l'extérieur de la maison.

III.13. Caractéristiques propres d'un onduleur pour systèmes photovoltaïques [88]

L'onduleur couplé au réseau est utilisé pour les installations photovoltaïques. Il permet de transformer le courant continu, produit par les modules solaires, en un courant ondulé conforme à celui du réseau.

Il adapte également le courant produit à la fréquence et à la tension du réseau. Donc la principale caractéristique de l'onduleur PV est la recherche du meilleur point de fonctionnement du système.

En effet, le générateur PV a une courbe caractéristique, voir figure III.27 non linéaire.

Dans les installations d'habitation, le courant solaire produit est d'abord utilisé par l'habitation elle-même, si le courant produit pour l'habitation est excédentaire, l'excédent est injecté dans le réseau.

Donc, un système de régulation est obligatoire pour maintenir la tension et la fréquence aux valeurs nominales de réseau, quelle que soit la tension d'entrée et aussi un filtrage en sortie de l'onduleur, qui tend à lisser la forme de la tension donc à réduire le taux d'harmonique.

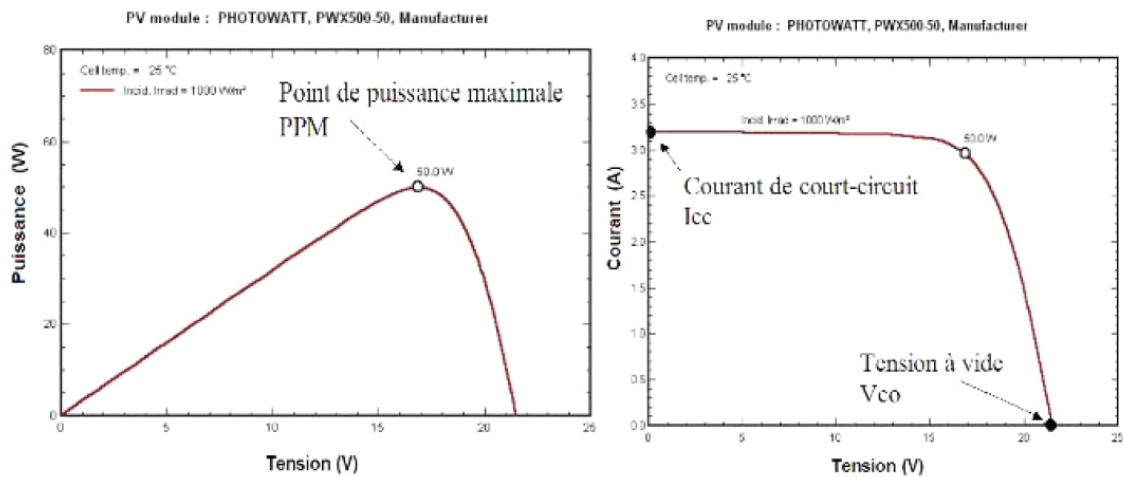


Figure III.27 : Courbes caractéristiques d'un module photovoltaïque

Le meilleur point de fonctionnement du système correspond au point de cette courbe où la puissance, produit de la tension et du courant, est maximisée. Il se situe au milieu de la caractéristique (Figure III.27).

En régime permanent établi, la tension et le courant du capteur sont considérés comme constants. L'utilisation d'un onduleur de tension plutôt qu'un onduleur de courant est alors essentiellement motivé par des raisons technologiques figure III.28.

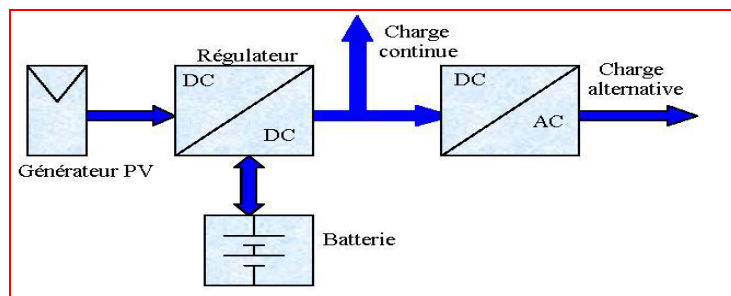


Figure III.28 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque [40]

III.14. Principe de la Recherche du MPPT [89]

La figure III.29 représente le schéma de principe d'un convertisseur MPPT (Maximum Power Point Tracker) classique. La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le générateur PV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP (Maximum Power Point).

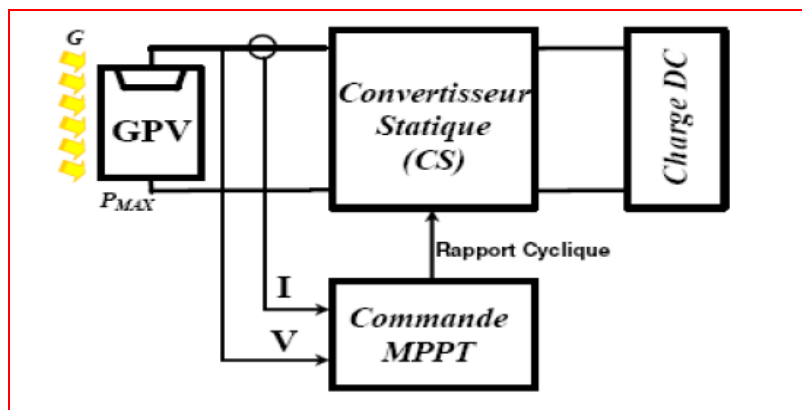


Figure III.29: Schéma de principe du convertisseur MPPT

III.15. Conclusion

Les onduleurs sont basés sur une structure en pont en H, constituée le plus souvent d'interrupteurs électroniques tels que les IGBT, transistors de puissance ou thyristors. Par un jeu de commutations commandées de manière appropriée (généralement une modulation de largeur d'impulsion), on module la source afin d'obtenir un signal alternatif de fréquence désirée.

Il existe deux types d'onduleurs : les onduleurs de tension et les onduleurs de courant. On distingue aussi les onduleurs autonomes et les onduleurs non autonomes.

Les onduleurs hybrides ou intelligents sont une nouvelle génération dédiée aux applications d'énergie renouvelable pour l'autoconsommation et en particulier pour les panneaux solaires photovoltaïques (onduleur solaire).

L'énergie des panneaux solaires photovoltaïques est active seulement pendant la journée et principalement à l'heure de midi : elle est donc fluctuante et non synchronisée avec la consommation des habitations. De ce fait, il est nécessaire de stocker l'excédent de production avant utilisation. Une autre possibilité existe en vendant l'intégralité de sa production à un tarif préférentiel, ce qui évite les contraintes du stockage de l'excédent de production.

Pour augmenter le rendement des générateurs photovoltaïques on les équipe de suiveur solaire. Ce travail fera l'objet du chapitre suivant.

SUIVEURS SOLAIRES

IV.1. Introduction

Un traqueur solaire est un dispositif utilisé pour aligner un générateur PV perpendiculairement au soleil. L'efficacité est en particulier améliorée dans les heures du matin et de l'après-midi où un panneau fixe fera face loin des rayons du soleil.

Les dépenses initiales d'un système de suiveur solaire dépendront du type et de la taille du traqueur qui doit être employé.

Les modules PV sont chers et dans la plupart des cas le coût des modules eux-mêmes est supérieur au coût du système traqueur [90].

En plus un système bien conçu qui utilise un traqueur aura besoin de moins de panneaux pour augmenter l'efficacité, ayant pour résultat une réduction de coûts initiaux d'installation.

IV.2. Généralités sur les suiveurs

IV.2.1. Définition

Le trackeur solaire peut aussi porter le nom de traqueur, héliostat ou suiveur solaire, suiveur de trajectoire pour panneau solaire, suiveur de soleil, tracking system (en anglais).

Un traqueur solaire est un dispositif permettant à un télescope héliographique (devant observer le soleil ou certains de ses effets dans l'atmosphère), ou à une installation de production d'énergie solaire de suivre le soleil selon le principe de l'héliostat. Cette structure portante motorisée oriente les panneaux solaires pour en augmenter la productivité.

Un héliostat (de hélios, mot grec signifiant Soleil, et stat, racine de stationnaire) est un dispositif permettant de suivre la course du soleil, généralement pour orienter toute la journée les rayons solaires vers un point ou une petite surface fixe, à l'aide de miroirs. [91]

IV.2.2. Principe de fonctionnement:

Le système vise à orienter en temps réel les capteurs vers le soleil, pour placer le panneau dans une position optimale par rapport à l'incidence du rayonnement solaire (perpendiculaire au rayonnement si possible), car tout au long de la journée et de l'année (selon les saisons) la position du soleil varie constamment et d'une manière différente selon la latitude. [92]

Cette adaptation en temps réel a pour effet de substantiellement augmenter la captation et la production d'énergie.

Pour un observateur situé en un lieu précis de la surface terrestre (latitude + longitude), la position du soleil dans le ciel, à un instant donné (date + heure), peut être repérée par deux coordonnées angulaires (Figure IV.1). [93]

- **AZIMUT** : angle mesuré par rapport au sud dans un plan horizontal, à mesure de l'avancée de la journée

- **ELEVATION** : angle mesuré par rapport à l'horizontale dans un plan vertical, selon la saison et, l'avancée de la journée.

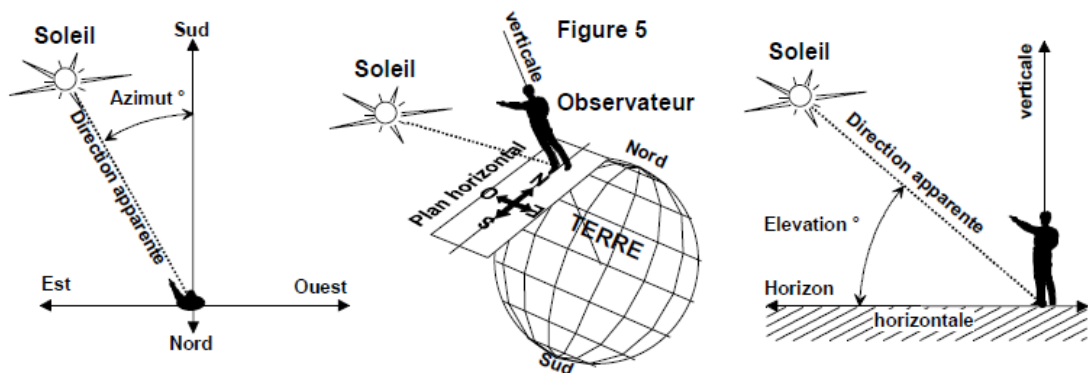


Figure IV.1 : Représentation de la latitude (hauteur) angulaire et l'azimut

IV.2.3. Orientation des panneaux solaires

Le soleil se déplace au cours de la journée et suivant les saisons (Figure IV.2).

Le panneau solaire, en revanche, se trouve généralement en position fixe, ce qui entraîne des pertes énergétiques précieuses. [94]

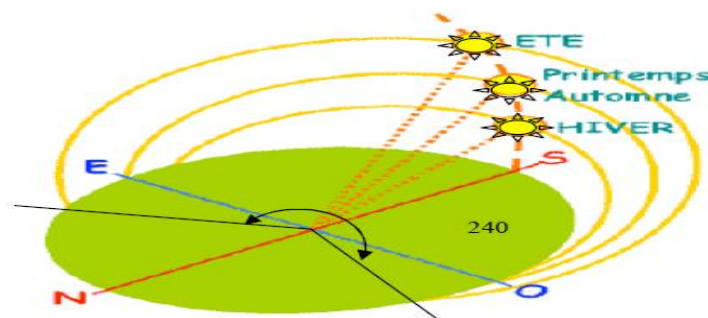


Figure IV.2: Définition de la position du soleil (latitude et azimut)

IV.2.3.a. Choix de l'orientation des modules :

L'orientation des modules doit être en plein sud pour les sites de l'hémisphère Nord et en plein nord pour les sites de l'hémisphère sud (Figure IV.3).

L'utilisation d'une boussole est fortement recommandée pour éviter toute approximation qui risquerait d'introduire une perte de puissance consécutive à une mauvaise orientation [95].

IV.2.3.b. Choix de l'inclinaison des modules

Pour que les modules produisent un maximum d'énergie, il faut que leur surface soit perpendiculaire aux rayons solaires. On doit donc incliner les modules pour qu'ils soient face au soleil.

La valeur d'inclinaison correspond à l'angle que font les modules avec l'horizontale. Comme il est difficile de modifier plusieurs fois aux cours de l'année l'inclinaison des modules, on choisit généralement une valeur moyenne pour toute l'année [96-97] (Tableau IV.1).

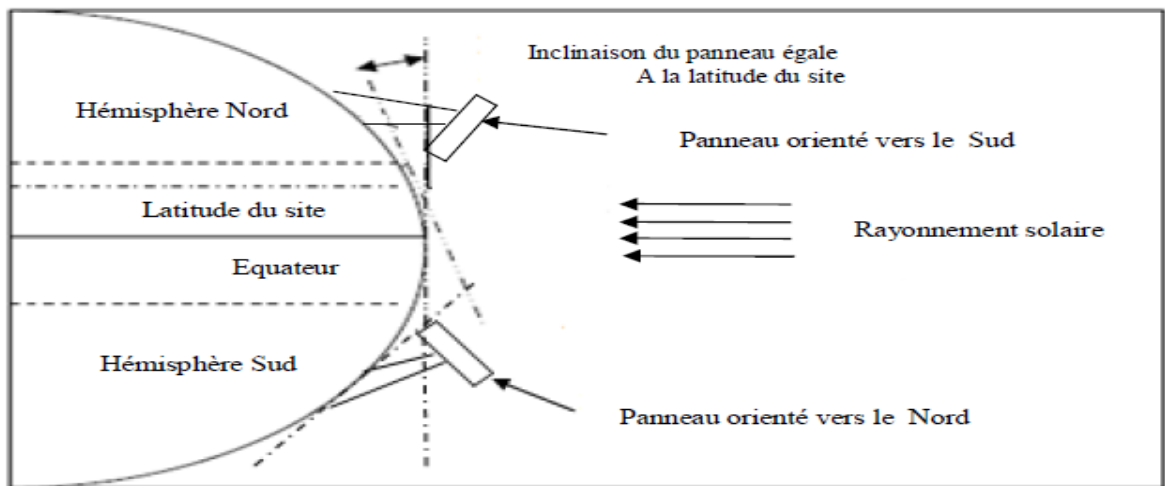


Figure IV.3: Orientation des panneaux solaires

Tableau IV.1: Facteurs de correction pour une inclinaison et une orientation données

FACTEURS DE CORRECTION POUR UNE INCLINAISON ET UNE ORIENTATION DONNEES					
INCLINAISON \ ORIENTATION					
		0° —	30° /	60° /	90°
Est		0,93	0,90	0,78	0,55
Sud-Est		0,93	0,96	0,88	0,66
Sud		0,93	1,00	0,91	0,68
Sud-Ouest		0,93	0,96	0,88	0,66
Ouest		0,93	0,90	0,78	0,55

: position à éviter si elle n'est pas imposée par une intégration architecturale

source Hespul
NB : ces chiffres n'incluent pas les possibles masques qui pourraient réduire la production annuelle.

IV.3. Types courants de traqueurs [98]

Différentes conceptions des traqueurs solaires sont proposées, et le fonctionnement de la plupart dépend des capteurs (avec une boucle fermée), et du contrôle de temps (avec une boucle ouverte).

L'ancien type de traqueur exige que la position du soleil soit déterminée par des capteurs de photocellules, et la précision de ce type de commande dépend du nombre de capteurs dans tous les sens, tandis que le plus récent comporte la détermination locale de (latitude et longitude) du site de l'installation, ainsi que du jour et la période de l'année à l'aide des équations qui décrivent la voie de piste solaire dans le ciel.

Des traqueurs solaires peuvent être divisés en deux types principaux selon le type de la commande et de la sensibilisation ou du système de positionnement qu'ils incorporent:

IV.3.1. Traqueurs passifs

Emploient le rayonnement du soleil pour chauffer un gaz qui déplace le traqueur à travers le ciel.

IV.3.2. Traqueurs actifs

Emploient les commandes électriques ou hydrauliques pour déplacer le traqueur.

IV.3.2.a. Traqueur en boucle ouverte

Les traqueurs en boucle ouverte déterminent la position du soleil en utilisant des algorithmes commandés par ordinateur ou des systèmes de synchronisation. Ils n'emploient aucune sensibilisation mais déterminent à la place la position du soleil par des données préenregistrées pour un emplacement particulier.

D'ailleurs, le processus traqueur solaire peut être mis en application en utilisant un axe incliné près de l'angle de la latitude du site, et la rotation de suivi est déterminée par l'angle horaire. Cependant, pour une précision plus élevée, un système de traqueur du soleil à deux axes est recommandé.

IV.3.2.b. Traqueurs synchronisés

Ceux-ci emploient un temporisateur pour déplacer le traqueur à travers le ciel par accroissement des mouvements tout au long du jour. Les modules doivent être perpendiculaires aux rayons du soleil. Les traqueurs de ce type peuvent utiliser un ou deux axes selon leurs applications.

L'inconvénient principal des systèmes synchronisés est que leur mouvement ne tient pas compte de la variation saisonnière de la position du soleil.

IV.3.2.c. Traqueur en boucle fermée

Sont ceux qui utilisent des capteurs de lumière, les photocellules (généralement deux) pour déterminer la partie la plus lumineuse dans le ciel.

Leur principe de fonctionnement est basé sur la différence de potentiel reçue de chacune.

Quand la différence n'est pas nulle, alors le panneau n'est pas aligné correctement et une différence de potentiel est générée pour commander le moteur vers la position dont la différence soit nulle. [99]

Quand la différence est nulle alors aucun courant ne circule dans le moteur et le panneau devra être arrêté.

IV.4. Mécanisme de suivi

Il peut s'agir d'un mécanisme d'horlogerie (en un lieu donné, la meilleure direction d'orientation ne dépend que de l'heure et de la date) ou d'un dispositif d'asservissement.

La puissance nécessaire est toujours très faible (quelques watts) et ne constitue pas un inconvénient.

IV.4.1. Arrangements des panneaux solaires

Les panneaux solaires sont les sous-systèmes qui convertissent la lumière entrante en énergie électrique.

Ils comprennent une multitude de modules solaires, montés sur des structures de support et interconnectés pour délivrer une sortie de puissance aux sous-systèmes électroniques de conditionnement de puissance. [100]

Une minorité de parcs solaires à grande échelle sont configurés sur des bâtiments et utilisent donc des panneaux solaires montés sur les bâtiments.

La majorité des systèmes sont à champ libre utilisant des structures montées au sol, habituellement de l'un des types suivants : [101]

IV.4.1.a. Panneaux fixes

De nombreux projets utilisent des structures de montage où les modules solaires sont montés à une inclinaison fixe calculée pour fournir le profil annuel optimal Figure IV.4.

Les modules sont normalement orientés vers l'équateur, à un angle d'inclinaison légèrement inférieur à la latitude du site (quelques degrés).

Dans certains cas, selon les conditions climatiques locales, topographiques ou du prix de l'électricité, différents angles d'inclinaison peuvent être utilisés.

Une variante de cette conception est l'utilisation de panneaux, dont l'angle d'inclinaison peut être ajusté deux ou quatre fois par an pour optimiser la production saisonnière. Ils exigent également plus de superficie pour réduire l'ombrage interne à l'angle d'inclinaison d'hiver qui est plus raide. Parce que l'augmentation de la production est en général de seulement quelques pour cent, il justifie rarement l'augmentation du coût et la complexité de cette conception. [102-103]

IV.4.1.b. Traqueurs à double axe

Afin de maximiser l'intensité du rayonnement entrant, les panneaux solaires doivent être orientés perpendiculairement aux rayons du soleil. Pour ce faire, les panneaux peuvent être orientés à l'aide de traqueurs à deux axes, capables de suivre le soleil dans son orbite quotidienne à travers le ciel Figure IV.5.

Ces panneaux doivent être espacés afin de réduire l'inter-ombrage au fur et à mesure que le soleil se déplace et que les orientations des panneaux changent, ce qui nécessite une plus grande superficie. Ils nécessitent également des mécanismes plus complexes pour maintenir la surface des panneaux à l'angle requis Figure IV.6.

L'augmentation de la production peut être de l'ordre de 30% dans les endroits où les rayonnements directs sont élevés, en revanche, elle est faible dans les climats tempérés ou ceux qui présentent un rayonnement diffus plus important en raison des conditions nuageuses. [104]

Pour cette raison, les traqueurs à double axe sont les plus couramment utilisés dans les régions subtropicales.

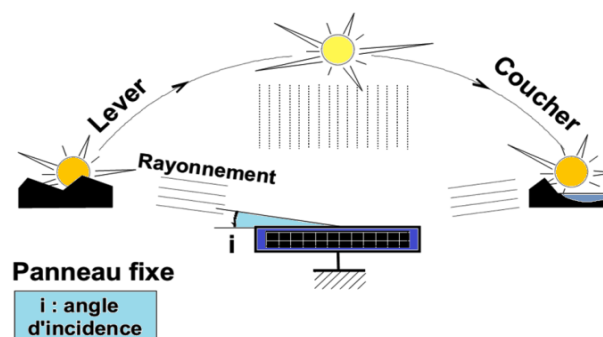


Figure IV.4: Panneau fixe

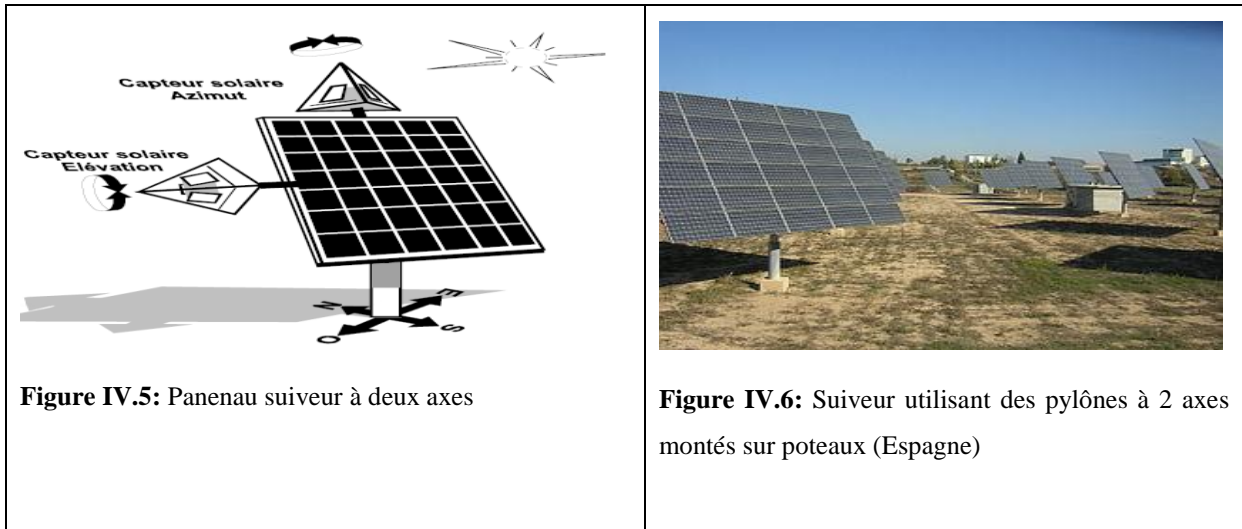


Figure IV.5: Panneau suiveur à deux axes



Figure IV.6: Suiveur utilisant des pylônes à 2 axes montés sur poteaux (Espagne)

IV.4.1.c. Traqueurs à axe unique

Une troisième approche permet d'obtenir certains des avantages en matière de suivi, avec une pénalité moindre en termes de superficie, de capital et de coûts d'exploitation. Cela implique de suivre le soleil dans une dimension mais ne s'ajuste pas pour les saisons.

L'angle de l'axe est normalement horizontal, bien que certains, comme le parc solaire de la base aérienne de Nellis, qui ont une inclinaison de 20° , inclinent l'axe vers l'équateur dans une orientation nord-sud, en fait un hybride entre le traqueur et l'inclinaison fixe.

Les systèmes de suivi à un axe sont alignés suivant des axes sensiblement Nord-Sud.

Certains utilisent des liaisons entre les rangées afin que le même actionneur puisse ajuster l'angle de plusieurs rangées à la fois.

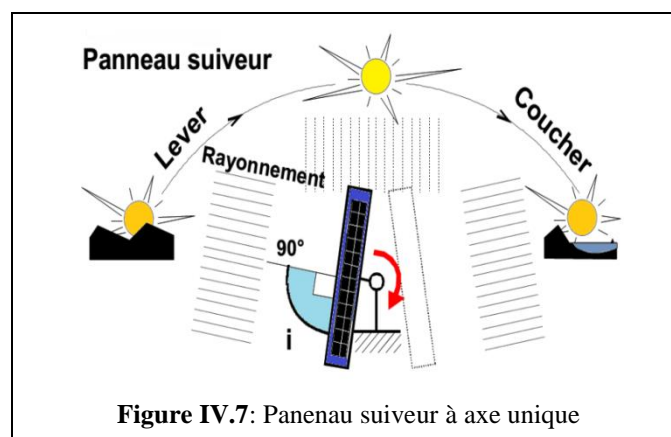


Figure IV.7: Panneau suiveur à axe unique

IV.5. Avantages des traqueurs solaires

Les avantages des traqueurs solaires sont multiples, citons : Orientation optimale en permanence sur plus de 240° d'Est en Ouest, le traqueur solaire suit la course du soleil.

Les panneaux solaires sont très bien ventilés. Plus de production pour moins de surface de panneaux solaires ce qui fait du traqueur solaire une solution bien plus écologique ; 60 m² de panneaux sur traqueur solaire produiront autant que 100 m² de panneaux au sol d'où une économie de 40 m² de panneaux.
-Nettoyage facile.

-Faible emprise au sol, ce qui permet la culture habituelle des sols.
- Monté sur mât, le traqueur solaire n'est pas soumis aux ombres basses.

-La précision du positionnement vis-à-vis du soleil (type d'asservissement), éventuellement en présence d'ombre portée.

- Montés sur mât, les panneaux solaires photovoltaïques ne sont pas accessibles.

- Le diagramme comparatif de production électrique (Figure IV.8) montre pour une journée ensoleillée d'été, le gain de production électrique obtenu en passant d'une installation fixe à une installation équipée d'un suiveur de trajectoire solaire.

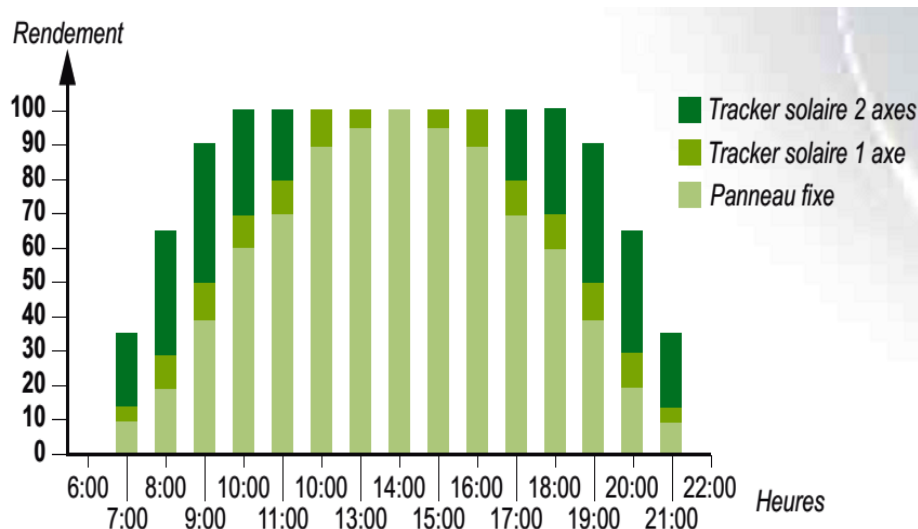
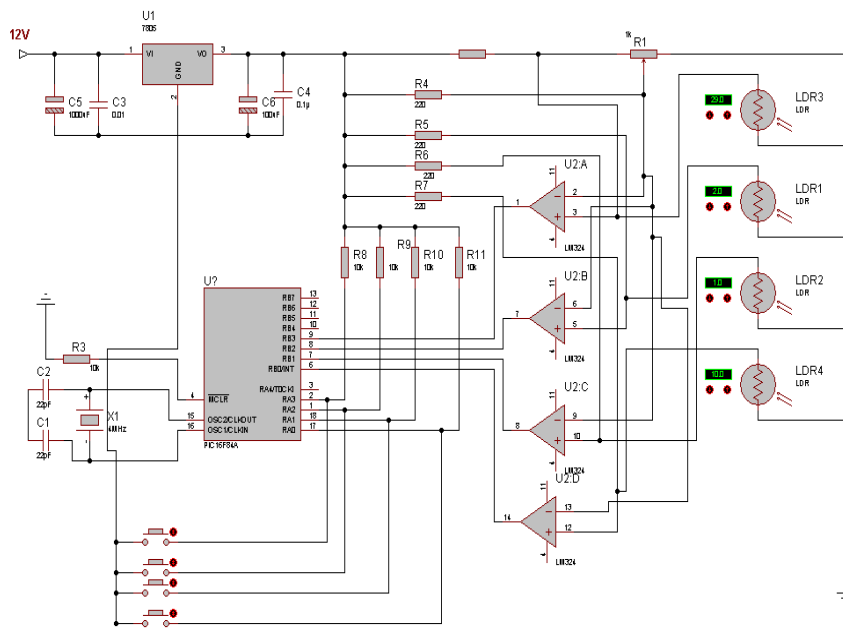


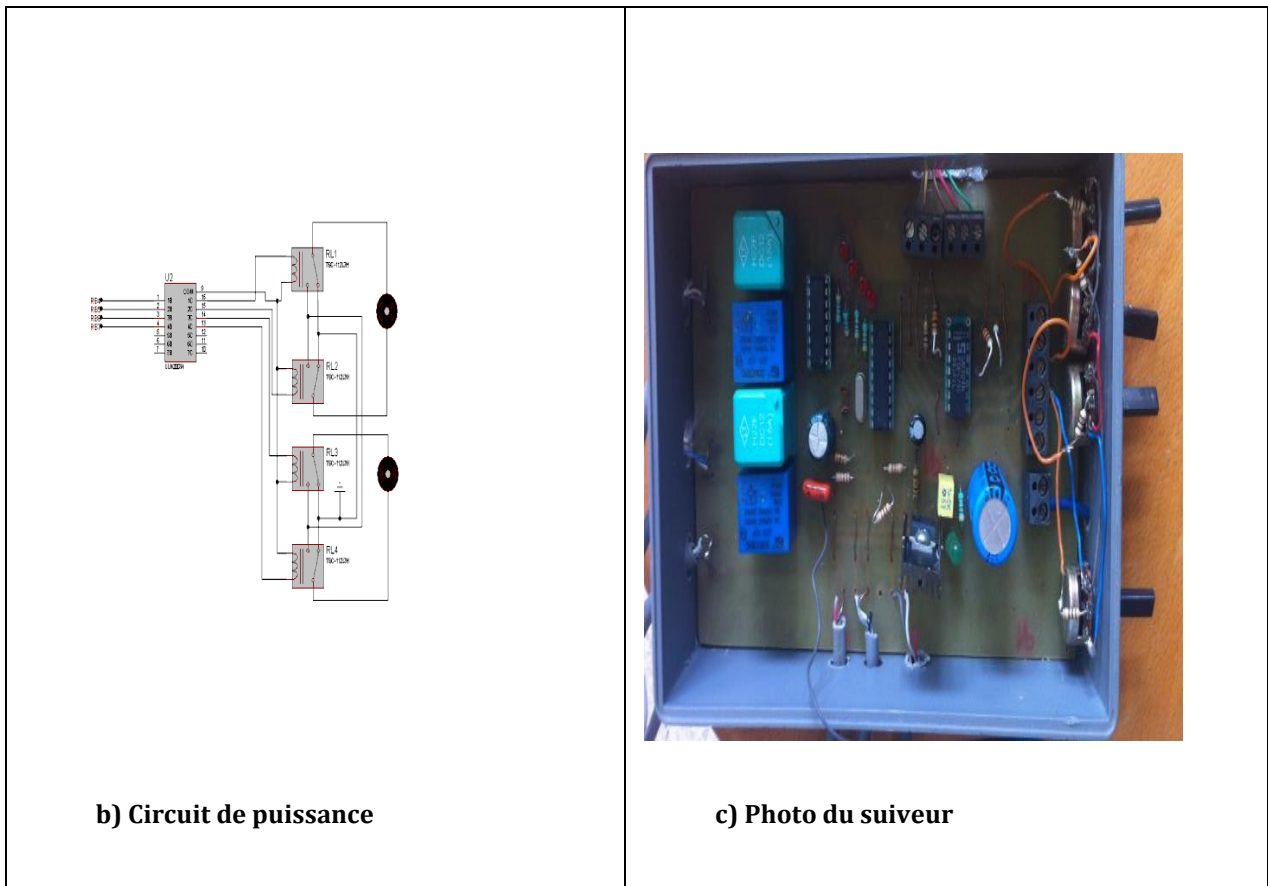
Figure IV.8: Diagramme comparatif de rendement pour des différentes installations de panneau [105]

IV.6. Suiveurs réalisés au laboratoire ICEPS

La figure IV.9 a, b et c représente le circuit de commande et de puissance du premier suiveur à deux axes développé au laboratoire ICEPS [106].



a) Circuit de commande



b) Circuit de puissance

c) Photo du suiveur

Figure IV.9 : Circuit de commande et de puissance du suiveur à deux axes.

La figure IV.10 représente un deuxième suiveur de très faible puissance développé dans le cadre d'un doctorat et a fait l'objet d'une communication internationale [107].

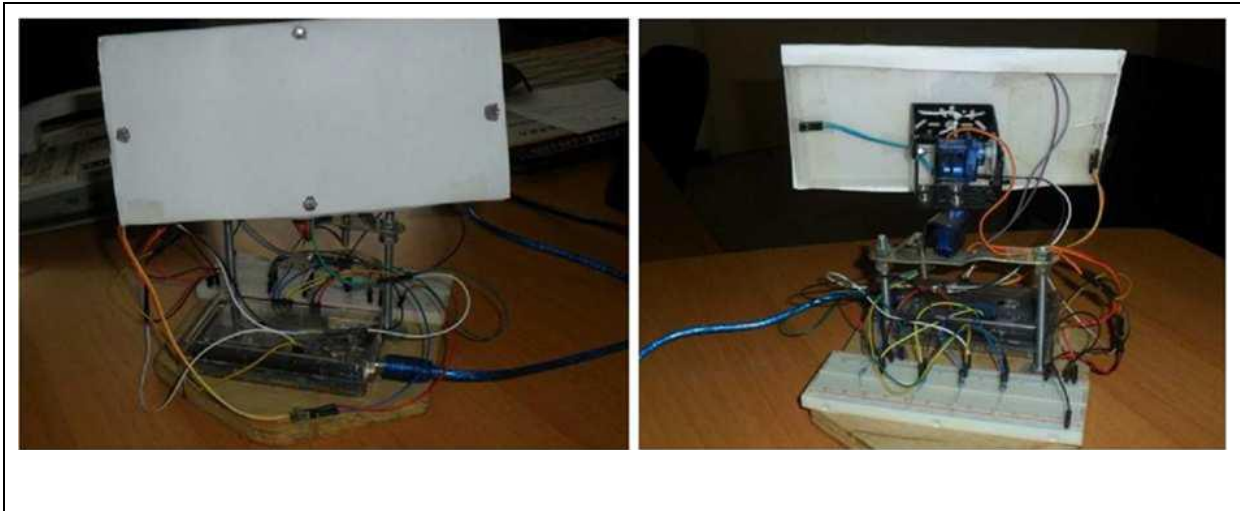


Figure IV.10 : Photo du suiveur de faible puissance à deux axes

IV.7. Composants électroniques utilisés

Avant d'entamer la simulation et la réalisation du suiveur, commençons tout d'abord par le choix des différents systèmes utilisés pour réaliser la carte de commande et de puissance.

IV.7.1. Pont en H

Vu que le suiveur tourne dans deux sens, on utilise alors un pont en H. Il tient son nom de la forme en H du circuit autour du moteur, voir Figure IV.11 : son rôle est

- Commander le sens de rotation d'un moteur (à courant continu ou pas à pas)
- Inverser la polarité.
- Varier la vitesse du moteur.

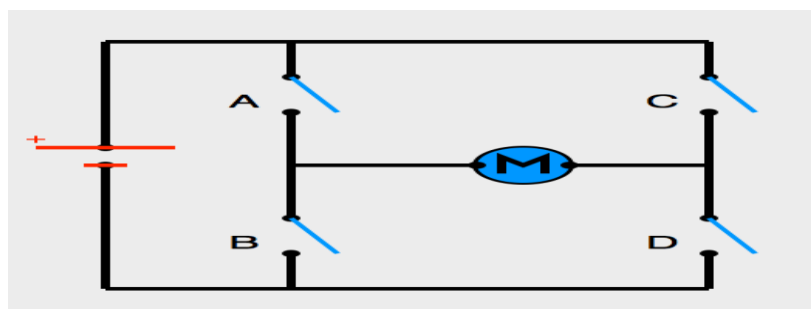


Figure IV.11: pont en H

Les interrupteurs fonctionnent deux par deux. Le A est associé au D et le B est associé au C. Dans le schéma Figure IV.11, le moteur est à l'arrêt car tous les interrupteurs sont ouverts.

Sur le schéma **Figure IV.12** de gauche : les interrupteurs A et D sont fermés. Le courant entre par la patte gauche du moteur et sort par sa droite. Le moteur tourne.

Sur le schéma de droite : les interrupteurs B et C sont fermés. Le courant entre par la patte droite du moteur et sort par sa gauche. Le moteur tourne donc dans le sens inverse !

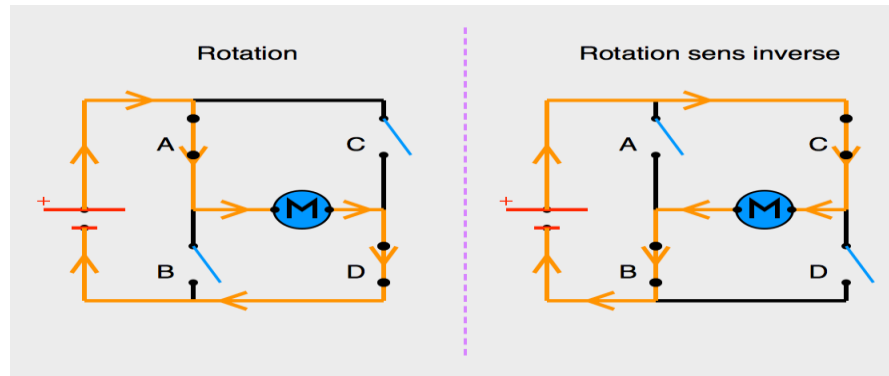


Figure IV.12: Sens du courant en fonction de l'état des interrupteurs

On peut aussi associer le A au C et le B au D.

Lorsqu'un moteur est en roue libre Figure IV.13 (c'est-à-dire qu'il tourne à cause de sa force d'inertie mais pas à cause du courant), il génère un courant, ce courant peut être utilisé dans le pont en H comme frein électromagnétique. Le moteur s'envoie son propre courant à l'envers ! Ça permet de contrôler l'arrêt du moteur plutôt que de le laisser en roue libre.

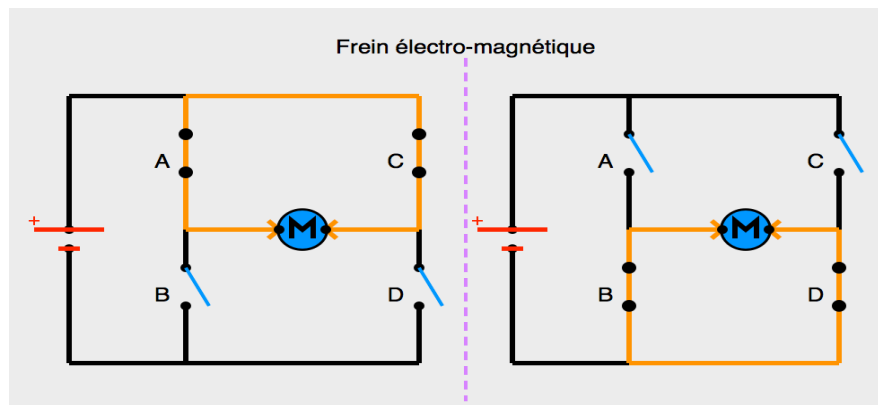


Figure IV.13 : Frein électromagnétique créé par l'inertie du moteur

Remarque : Si tous les interrupteurs A, B, C, D ou A et B, ou C et D sont fermés il se produit un court-circuit. En revanche, il faut les protéger des retours de tensions avec des diodes placées aux bons endroits comme montré sur le schéma de la figure IV.14:

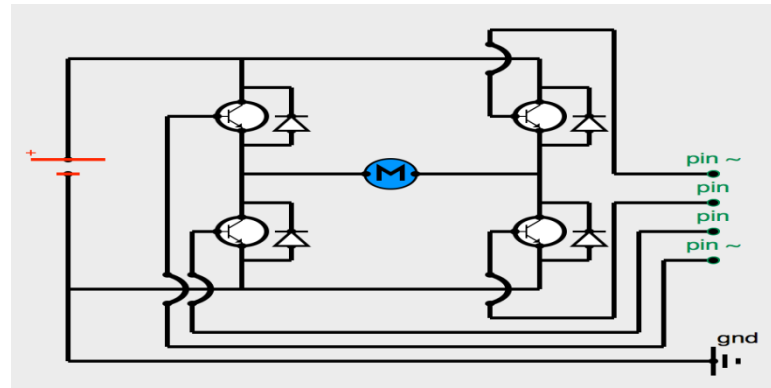


Figure IV.14: Pont en H avec transistors NPN, diodes

IV.7.2. Capteur LDR

Le suiveur envisagé suit le soleil. Des photorésistances type LDR sont utilisées dans ce cadre. Une photorésistance (également appelée résistance photo-dépendante ou cellule photoconductrice) est un composant électronique dont la résistivité varie en fonction de la quantité de lumière incidente : plus elle est éclairée, plus sa résistivité baisse voir figure IV.15.

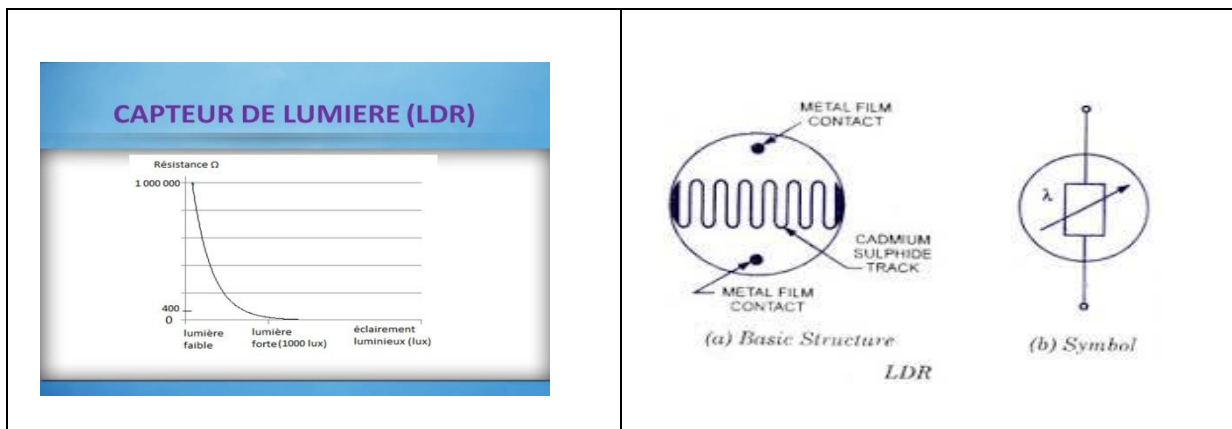


Figure IV.15: Caractéristiques du capteur LDR

Certains composés, à l'instar du sulfure de cadmium (SCd,) possèdent la particularité physique d'avoir une résistance qui varie en fonction de l'éclairement reçu. La résistance vérifie les lois suivantes :

$$R = L/\sigma A, \tag{IV.1}$$

$$R = \alpha.E^{-\gamma} \tag{IV.2}$$

$$R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{L}{A} \text{ et } R = \alpha.E^{-\gamma} \tag{IV.3}$$

Avec : R : la résistance du matériau

σ : la conductivité du matériau qui dépend de l'éclairement reçu

L : la largeur de la bande du semi-conducteur photosensible

A : la surface de la bande du semi-conducteur photosensible

E : l'éclairement

α : constante dépendant du matériau, de la température et du spectre du rayonnement

γ : constante généralement comprise entre 0.5 et 1. Or, la grandeur mesurée dans le cas d'une photorésistance est le courant de sortie.

Il vérifie la loi d'Ohm $U=RI$ d'où : $I = \sigma \cdot \frac{A}{L} \cdot U$ (IV.4)

Afin d'optimiser le capteur et que le courant I soit assez important pour être mesuré, la surface A d'exposition du semi-conducteur doit être grande vis-à-vis de sa largeur de bande. Pour cette raison le semi-conducteur est disposé en "serpentin" voir figure IV.16.

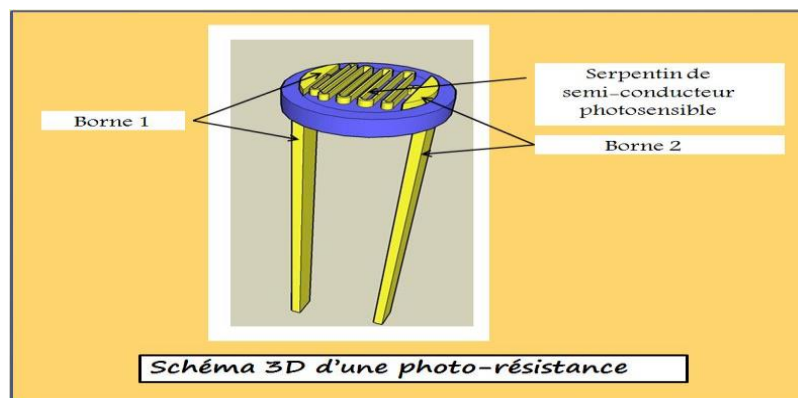


Figure IV.16: Caractéristiques du capteur LDR

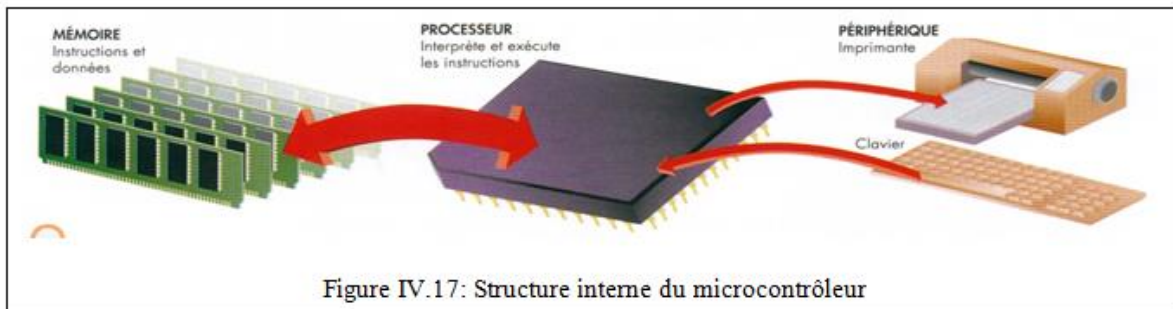
IV.7.3. Microcontrôleur PIC pour circuit de commande

Afin de simplifier le circuit de commande on se base sur un microcontrôleur. C'est un ordinateur monté dans un circuit intégré (en notation abrégée μc ou encore MCU en anglais).

Les avancées technologiques en matière d'intégration, ont permis d'implanter sur une puce de silicium de quelques millimètres carrés la totalité des composants qui

forment la structure de base d'un ordinateur. On peut décomposer la structure interne d'un microcontrôleur en trois parties voir figure IV.17 :

- Les mémoires
- Le processeur
- Les périphériques



- Les mémoires sont chargées de stocker le programme qui sera exécuté ainsi que les données nécessaires et les résultats obtenus.
- Le processeur est le cœur du système puisqu'il est chargé d'interpréter les instructions du programme en cours d'exécution et de réaliser les opérations qu'elles contiennent.

Au sein du processeur, l'unité arithmétique et logique interprète, traduit et exécute les instructions de calcul.

- Les périphériques ont pour tâche de connecter le processeur avec le monde extérieur dans les deux sens. Soit le processeur fournit des informations vers l'extérieur (périphérique de sortie), soit il en reçoit (périphérique d'entrée).

Les microcontrôleurs se caractérisent par un plus haut degré d'intégration, une plus faible consommation électrique, une vitesse de fonctionnement plus faible (de quelques mégahertz à plus d'un gigahertz) et un coût réduit par rapport aux microprocesseurs polyvalents utilisés dans les ordinateurs personnels.

Les microcontrôleurs permettent de diminuer la taille, la consommation électrique et le coût des produits. Ils ont ainsi permis de démocratiser l'utilisation de l'informatique dans un grand nombre de produits et de procédés.

IV.7.4. Identification des Pics

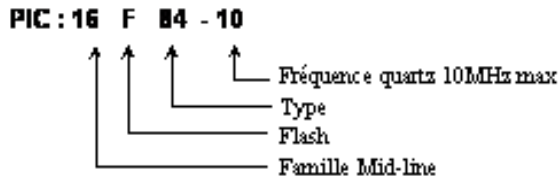
Le nom PIC n'est pas officiellement un acronyme, bien que la traduction en « contrôleur d'interface périphérique » soit généralement admise. Cependant, à l'époque du développement du PIC1650 par General Instrument, PIC était un acronyme de « Programmable Intelligent Computer » ou « Programmable Integrated Circuit ».

Un PIC est généralement identifié par une référence de la forme suivante : **xx(L)**
XX yy- zz voir tableau IV.2:

Tableau IV.2: Identification des Pics

Xx	Famille du composant, actuellement « 12, 14, 16, 17 et 18 ».	
L	Tolérance plus importante de la plage de tension	
XX	Type de mémoire programme	
	C	EPROM ou EEPROM
	CR	PROM
	F	Flash
yy	Identificateur.	
zz	vitesse maximale du quartz de pilotage.	

Exemple :



IV.7.5. Choix des PIC

Le choix d'un PIC est directement lié à l'application envisagée selon les critères suivants :

- Nombre de pattes d'entrées-sorties.
- Taille de mémoire de programme ROM et de la mémoire vive RAM
- Puissance du processeur : Type, largeur de bus, fréquence
- Consommation électrique (tension de fonctionnement- courant consommé)
- Le prix, la disponibilité, l'expérience

Le tableau IV.3 illustre un comparatif des caractéristiques de quelques PICs

Tableau IV.3 : Caractéristiques de quelques pics.

	Mem prog en octets	RAM en octets	EPROM en octets	fmax en MHz	E / S	Boîtier
12C508	512x12	25	-	4	6	8 broches
16C72A	2048x14	128	-	20	22	28 broches
16F84	1024x14	68	64	20	13	18 broches
916F628	2028x14	224	128	20	16	18 broches
16F876	8192x14	368	256	20	22	28 broches
16F877	8192x14	368	256	20	33	40 broches

IV.7.6. Structure interne du pic 16f876

Notre choix est porté sur le microcontrôleur 16F876, au vu de ses propriétés diverses :

- Disponibilité au laboratoire ICEPS.
- Bonne qualité et robustesse du produit.
- Extensible en matière de programmation.

IV.7.6.a. Brochage et caractéristiques principales

Le PIC16F876A est un circuit intégré de 28 broches (Figure IV.18) :

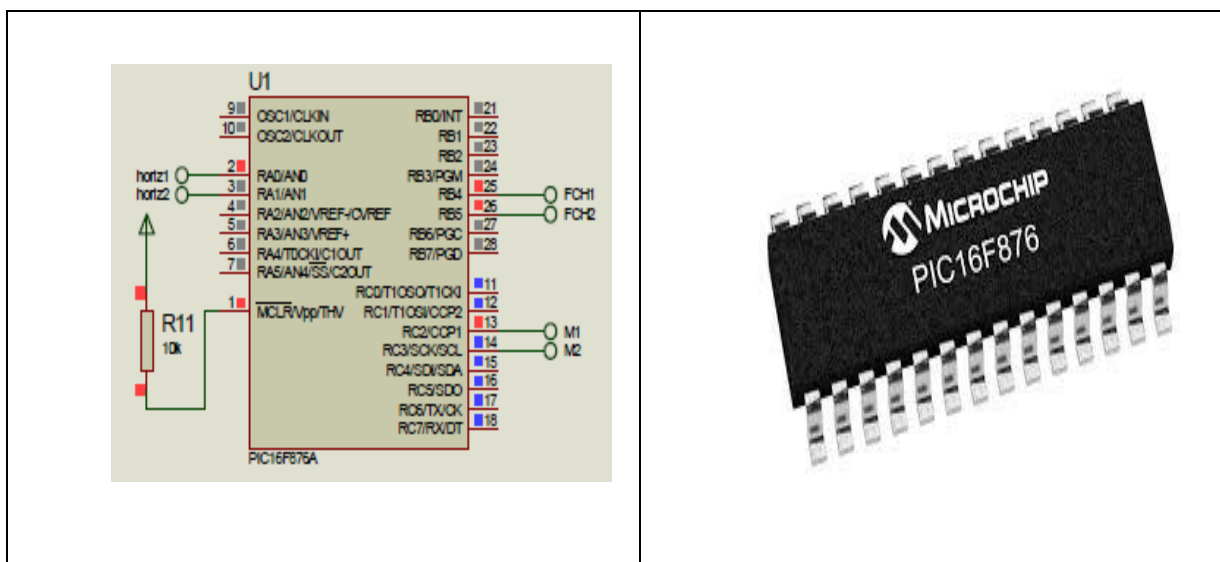


Figure IV.18: Brochage du pic 16F876

- RA0 à RA5 sont les pattes d'entrées/sorties du port A.
- RB0 à RB7 sont les pattes d'entrées/sorties du port B.
- RC0 à RC7 sont les pattes d'entrées/sorties du port C.
- Individuellement, chaque broche des ports A, B et C ne peut débiter plus de 20 mA ou absorber plus de 25 mA. Le total des intensités débitées par le port A ne peut dépasser 50 mA et par le port B, 100 mA. Le total des intensités absorbées par le port A ne peut dépasser 80 mA et par le port B 150 mA.

• OSC1/CLOCKIN et OSC2/CLOCKOUT sont les pattes d'horloges. Plusieurs types d'horloges peuvent être utilisés: externe, à quartz ou à circuit RC. La figure IV.19 (A, B et C) montre les schémas de câblage en version RC et quartz. L'oscillateur à quartz présente une meilleure précision que l'oscillateur RC.

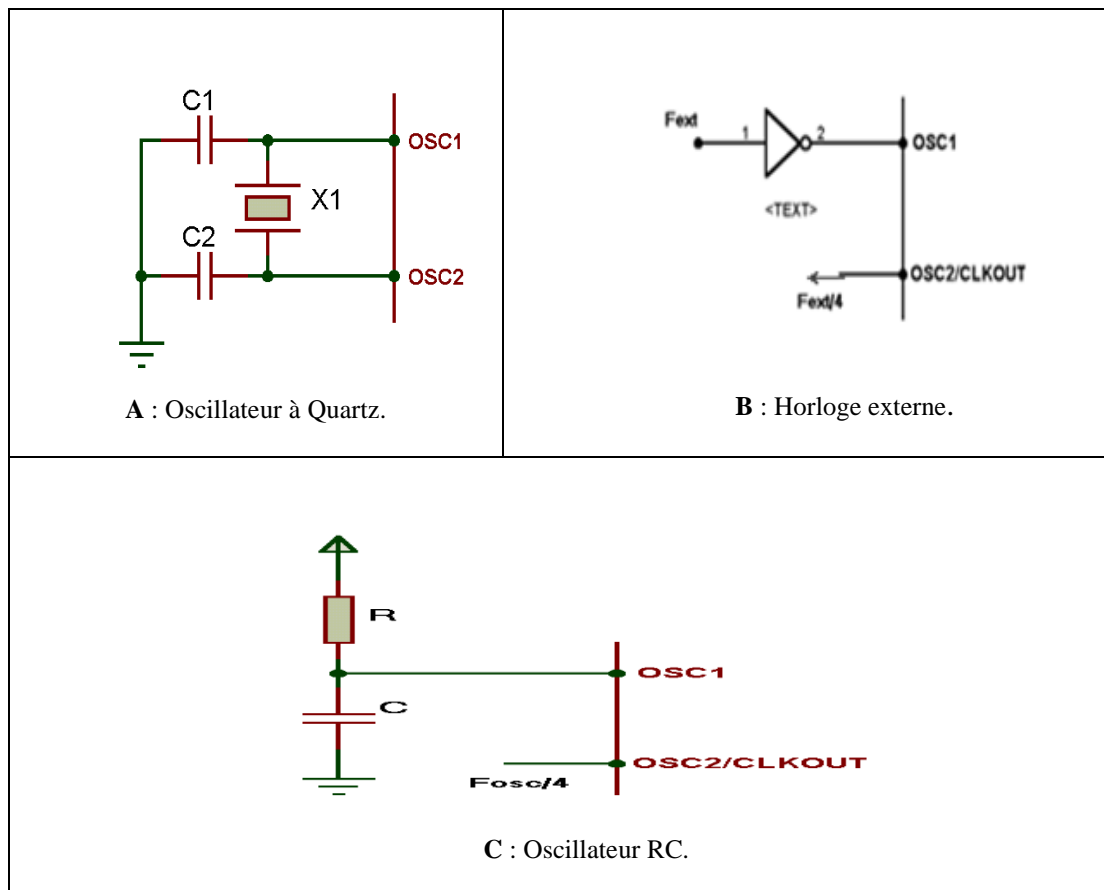


Figure IV.19: Schéma de câblage de l'oscillateur.

• La fréquence de l'horloge interne du PIC est obtenue en divisant par 4 la fréquence de l'horloge externe. Pour un quartz à 4 MHz, la fréquence interne est donc de 1 MHz et la durée d'un cycle est de 1 μ s.

• MCLR/VPP est la patte de Reset et d'entrée de la tension de programmation. Les circuits PIC intégrant en interne le circuit de Reset automatique à la mise sous tension, cette broche doit être reliée à la V_{DD} en utilisation normale.

• V_{SS} et V_{DD} sont les pattes d'alimentation. V_{DD} doit être comprise entre 2 et 6 V en utilisation. Lors de la programmation, V_{DD} doit être comprise entre 4,5 V et 5,5 V et V_{SS} comprise entre 12 V et 14 V.

IV.8.1. Programmation du PIC

Les microcontrôleurs PIC sont fabriqués par la société Microchip qui fournit par ailleurs gratuitement la plate-forme logiciel de développement MPLAB IDE.

IV.8.1.a. Outils pour réaliser une application

Pour développer une application fonctionnant à l'aide d'un microcontrôleur, il faut disposer d'un **éditeur de programme**, d'un **compilateur** et d'un **programmeur** figure IV.21.

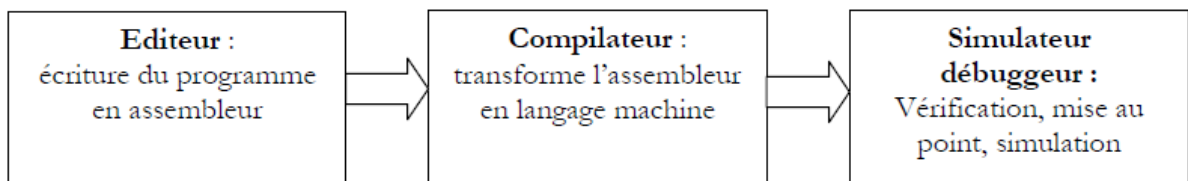


Figure IV.21: Diagramme de programmation du PIC

- L'éditeur de programme est un logiciel permettant d'écrire le programme dans un langage de programmation. Nous utiliserons le logiciel 'MPLAB IDE'.

Le fabricant Microchip fournit gratuitement ce logiciel téléchargeable sur le site www.microchip.com

- Le compilateur est un logiciel traduisant un programme écrit dans un langage donné (C, basic, assembleur) en langage machine. Ce logiciel peut aussi comporter un «debugger» permettant la mise au point du programme et un simulateur permettant de vérifier son fonctionnement.

On utilisera le compilateur CC5X dans sa version gratuite téléchargeable sur www.bknd.com Cette version gratuite permet d'écrire environ 1ko de programme. On peut alors intégrer CC5X dans l'environnement MPLAB. Ainsi CC5X devient un outil de MPLAB dans lequel l'écriture, la simulation et le debugging du programme en C devient alors possible voir figure IV.22.

- Le programmeur permet de transférer le programme compilé (langage machine) dans la mémoire du microcontrôleur. Il est constitué d'un circuit branché sur le port COM ou USB du PC, sur lequel on implante le PIC, et d'un logiciel permettant d'assurer le transfert. Il existe différents logiciels, nous utiliserons Ic prog ou Win Pic 800. De nos jours, il existe des PIC programmable sur site. Les mises à jour du logiciel Ic prog sont téléchargeables sur www.seeit.fr

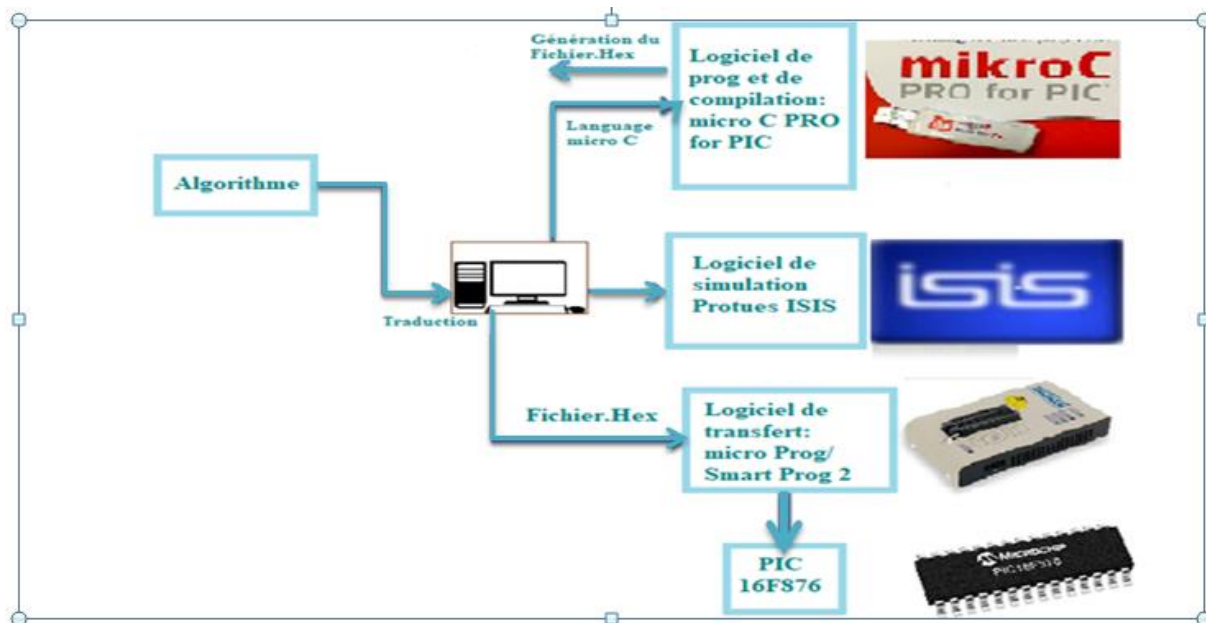


Figure IV.22 : Cheminement de la programmation [108]

IV.8.2. Ecriture du programme

Nous utilisons le langage de programmation évolué c, le code source écrit en langage c doit être compilé en assembleur à l'aide d'un compilateur c

L'utilisation de « mikro c » facilite amplement la programmation des pics, vu son interface qui est très bien étudié avec les instructions en noir et les commentaires en vert.

La figure IV-23 présente une fenêtre du logiciel micro chip « mikro C » utilisé dans ce projet.

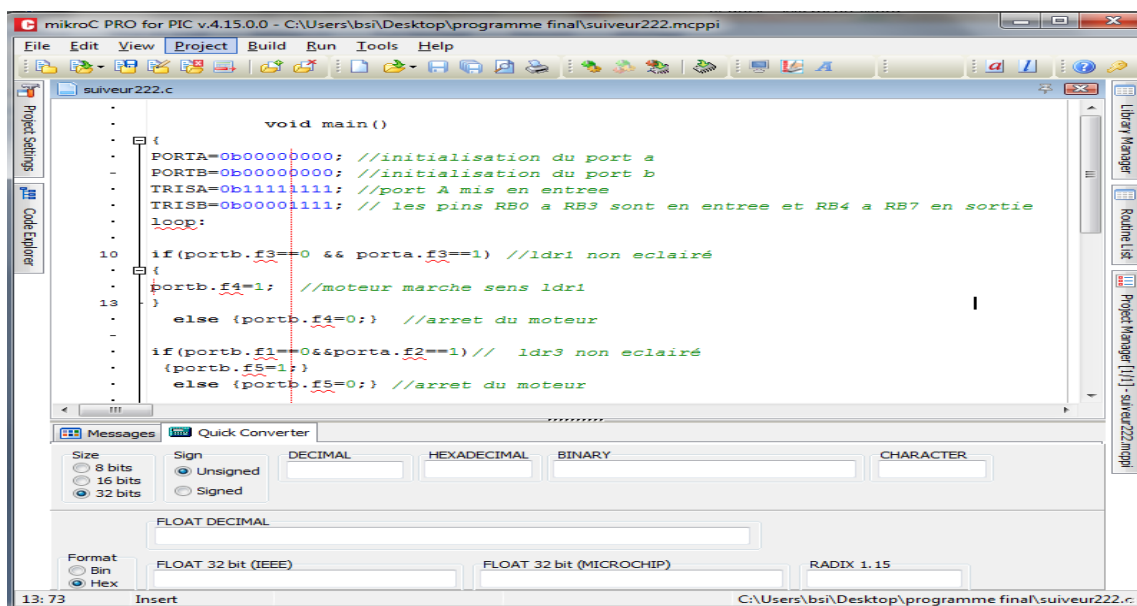


Figure IV-23 : Configuration de programme

IV.8.3. Organigramme

L'organigramme de commande développé est représenté à la figure IV.24

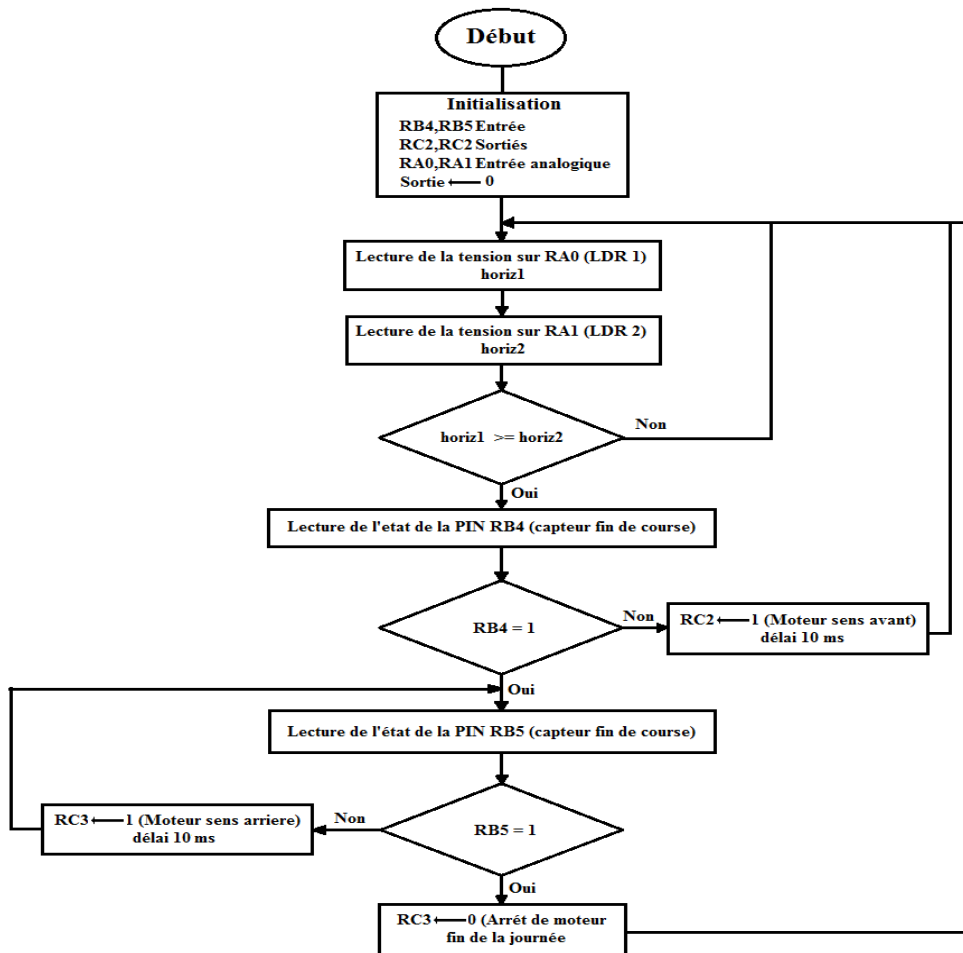


Figure IV-24 : Organigramme de commande du PIC

IV.8.4. Réalisation

Arrivant à ce stade le besoin de simuler notre programme paraît indispensable d'où l'utilisation du logiciel « ISIS »; permettant de mieux visualiser le bon déroulement du système ainsi que d'avoir une idée claire sur la partie matériel que ce soit références et même conception du circuit imprimé.

IV.8.4.a. Présentation de logiciel ISIS PROTEUS

L'intérêt de simuler un programme est bien sûr pédagogique car comme nous le verrons, nous allons pouvoir faire visualiser le fonctionnement du PIC avec tous les périphériques de la carte de commande. De plus, nous allons pouvoir vérifier le fonctionnement du programme avant de le transférer vers la mémoire du microcontrôleur. Cela nous permettra d'économiser du temps et également d'augmenter la durée de vie du PIC.

Pour notre suiveur on propose le schéma suivant figure IV.25. Après simulation le moteur a fonctionné. Donc on peut passer à la réalisation.

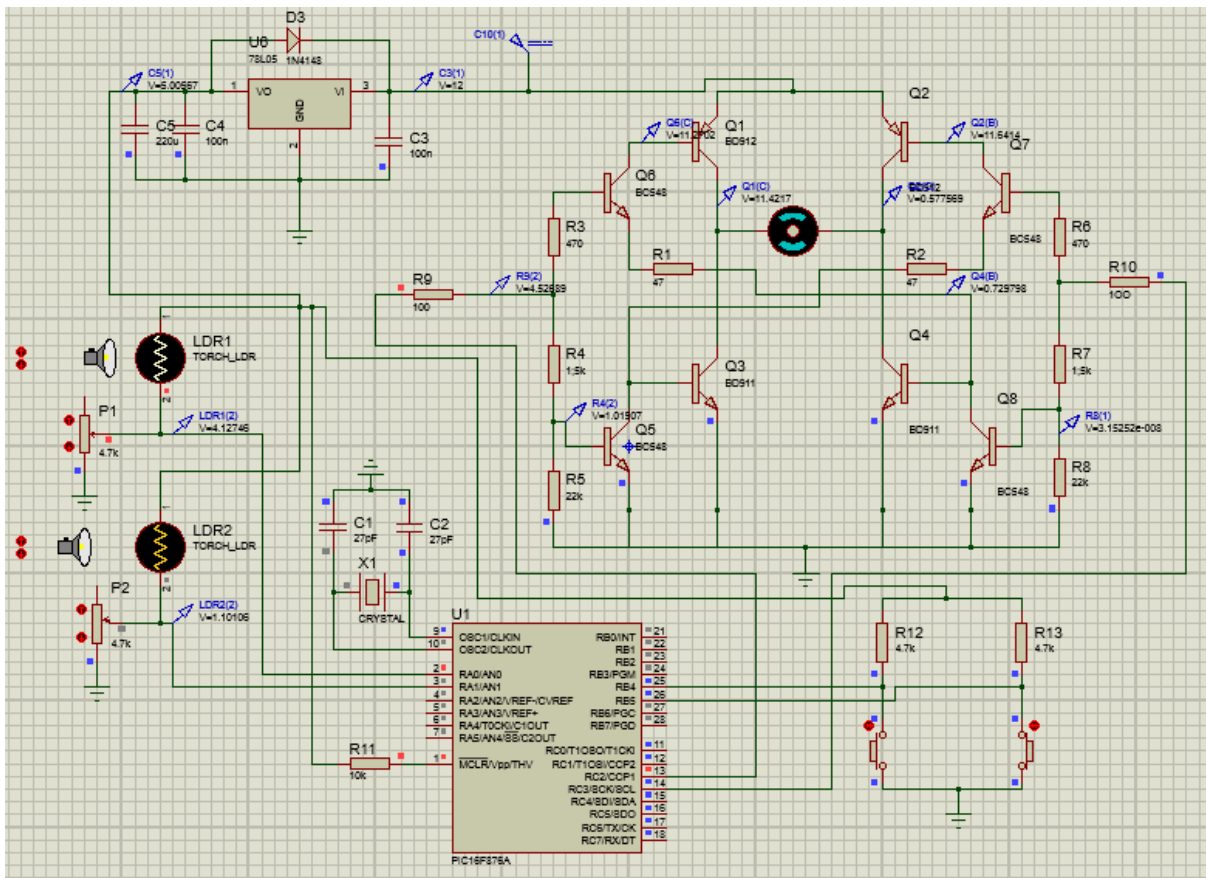


Figure IV-25 : Configuration du schéma de simulation par ISIS

IV.8.4.b. Fonctionnement du schéma de simulation

Les photos résistances envoient un signal électrique au port analogique RA0/AN0, RA1/AN1 (horiz1, horiz2) du PIC. Pendant la journée celui-ci compare les deux tensions, Si 'horiz1 >= horiz2', le PIC envoie un signal aux interrupteurs électroniques à travers la PIN RC2, ce qui provoque la rotation du moteur dans le sens avant, sinon le moteur s'arrête.

Pendant la nuit, le moteur envoie un signal au PIC à travers la PIN RB4 'Fin de course' et le PIC envoie un signal aux interrupteurs électroniques à travers la PIN RC3, ceci provoque la rotation du moteur dans le sens arrière, jusqu'à atteindre sa position initiale. Le moteur envoie un signal au PIC à travers la PIN RB5 'position initiale', arrêt du moteur.

IV.8.4.c. Tableau des composants :

Le tableau IV.3 présente les différents composants électroniques utilisé dans la réalisation du suiveur.

Tableau IV.4 : Liste des composants électroniques

Nombre	Composants	Caractéristiques
2	Capteur LDR	
2	Capacité	220 microfarads chimiques
4	Capacité	100 microfarads chimiques
4	Capacité	27pF céramique
4	Diode	1N4148
2	Régulateur	78L05
8	Transistors	BC548
8	Transistors	BD921
1	PIC	16F876A
1	Quartz	20MHZ
2	Résistance ¼ de Watt	10 kΩ
4	Résistance ¼ de Watt	100 kΩ
4	Résistance ¼ de Watt	470Ω
4	Résistance ¼ de Watt	1.5 kΩ
4	Résistance ¼ de Watt	22 kΩ
4	Résistance ¼ de Watt	47Ω
4	Résistance ¼ de Watt	4.7 kΩ
2	Potentiomètre	4.7 kΩ
1	Led	Verte
1	Fusible	10A, 20V

IV.8.4.d. Plaque d'essai

Avant de passer à la réalisation du circuit imprimé il est nécessaire de faire des essais du montage sur plaque d'essais. Les essais de fonctionnement sont représentés dans la figure IV.26.

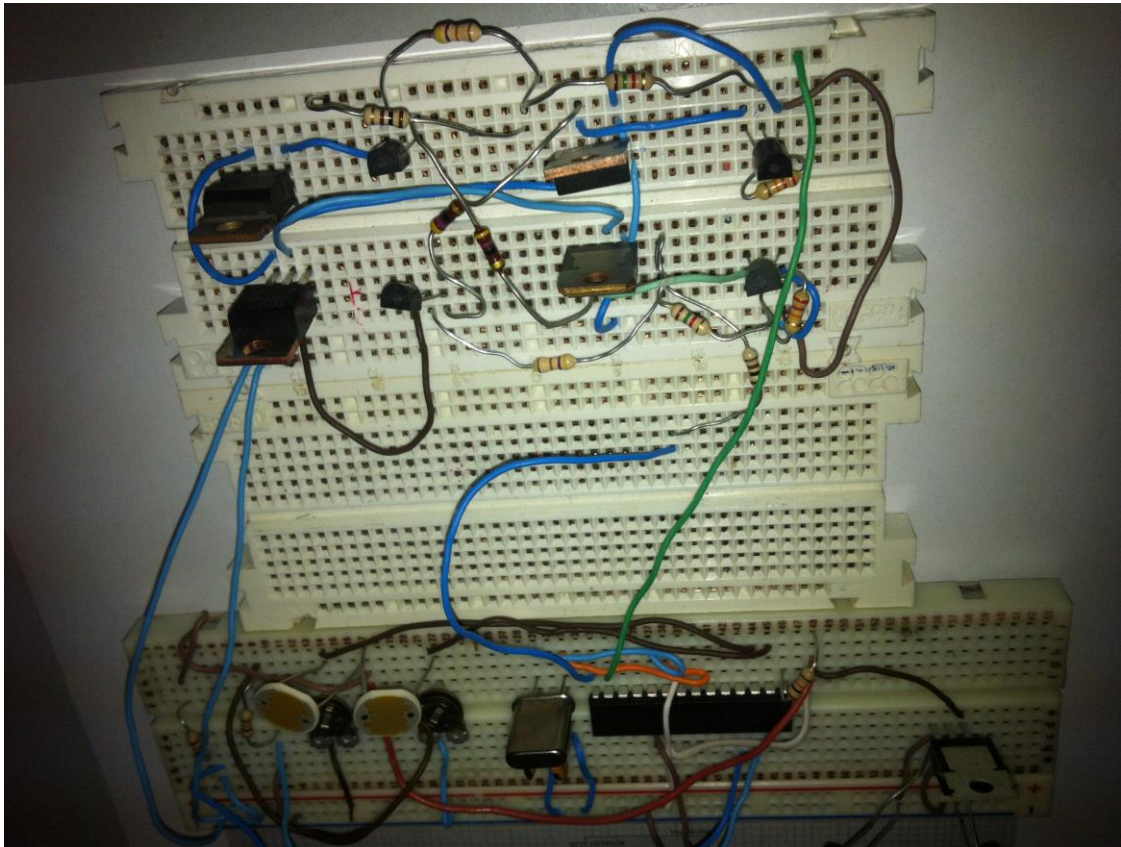


Figure IV-26: Essai du montage sur plaque d'essai

IV.8.5. Routage

Une fois le montage fonctionnel sur plaque d'essais on passe à la réalisation du circuit imprimé voir figure IV-27. La première étape consiste à utiliser le logiciel TCI pour le routage du circuit imprimé. On s'attache à éviter les boucles et les pointes (pour réduire l'effet CEM) ainsi que les courts-circuits entres pistes de potentiel différent. On distingue le circuit de commande du circuit de puissance (pour prévoir un blindage entre les deux).



Figure IV-27 : Circuit imprimé du suiveur

IV.8.6. Réalisation du montage

Après routage et vérification on passe à la réalisation du circuit imprimé.

Une fois réalisé on fait le perçage, l'insertion, la soudure des composants et les essais du montage. Voir la figure IV.28.

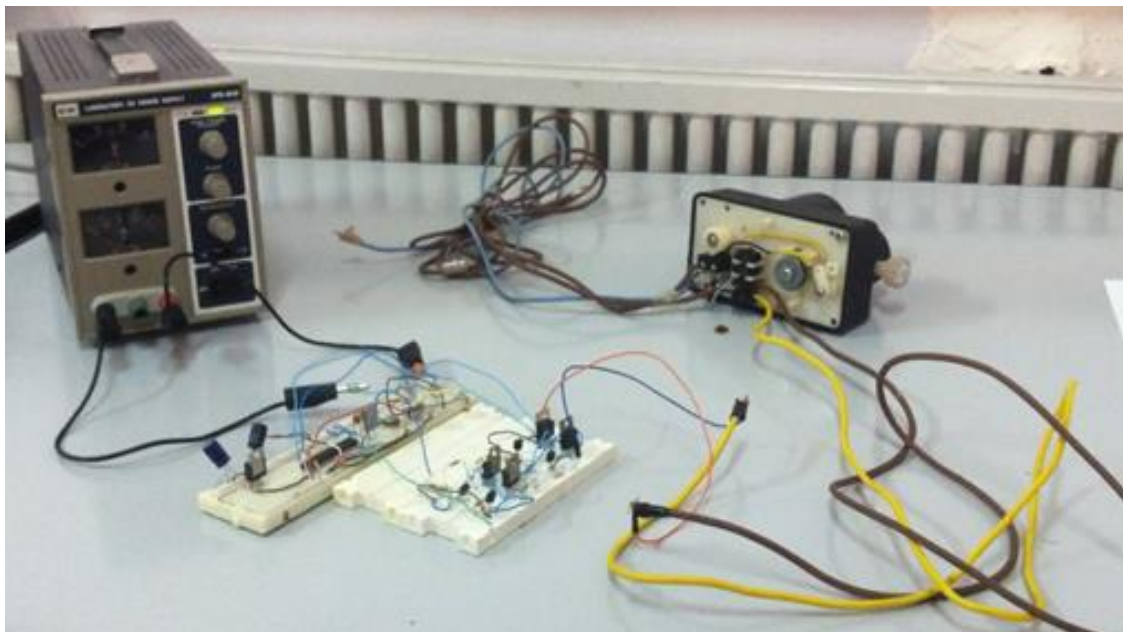


Figure IV-28 : Essai du montage

IV.9. Conclusion

L'étape du choix de schéma électrique et de la simulation sur le logiciel ISIS PROTEUS de suiveur nous a permis de vérifier le fonctionnement du circuit développé.

L'étape de choix des composants du montage, nous a familiarisés avec le Datasheet disponible sur le web.

Durant le montage des composants sur la plaque d'essais, nous avons assimilé le brochage et le câblage des composants.

L'insertion et la soudure des composants dans le circuit imprimé, nous a permis de déceler des problème tels que les court-circuit entre pistes, les soudures sèches, et les composants défectueux.

Le suiveur sera monté sur le générateur PV, pour améliorer le rendement. Ceci fera l'objet du chapitre suivant.

Simulation et Réalisation d'un Générateur Photovoltaïque

V.1. Introduction

L'objectif principal de la thèse consiste à réaliser un système autonome avec un support motorisé entraîné par un moteur à courant continu à deux degrés de libertés de type (Azimut/Altitude), ayant pour fonction d'orienter et aligner un ou plusieurs panneaux face au soleil tout au long de la journée.

Ce système est basé sur la détection de la lumière reçue sur deux photos cellules montées sur la barre qui supporte les panneaux, et la différence de potentiel de celles-ci est utilisée pour la commande d'un moteur à courant continu (vérin de déplacement linéaire).

V.2. Description du système

Dans cette optique, on s'intéresse à développer un générateur solaire de 810 W équipé d'un suiveur solaire à un axe à très bas prix réalisé à base de composants usuels (transistors et résistances) voir figure V.1.

Le circuit de commande est composé uniquement des résistances variables avec la lumière (LDR) montées sur châssis réalisé par nos soins, et d'un microcontrôleur (PIC 16F876A).

Le moteur d'entraînement (vérin de parabole) relié à un multiplicateur d'effort est de très faible puissance d'où sa très faible consommation d'énergie; l'angle de variation sera l'orientation est-ouest.

Le générateur photovoltaïque suivra alors le soleil d'est en ouest avec une inclinaison nord-sud de 30° déjà optimisée par [109]. En fin de journée le suiveur remet automatiquement le générateur PV en position initiale pour le lendemain.

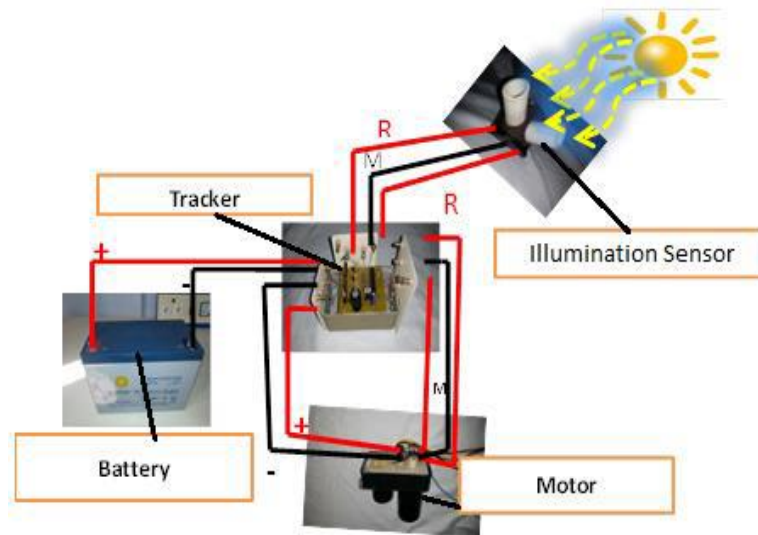


Figure V.1 : Schéma de câblage du suiveur monté sur GPV [110]

V.3. Conception du générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est installé sur un site expérimental au sein de la faculté de technologie de l'université de Sidi Bel Abbès dans un lieu dégagé permettant une expérimentation plein soleil, pouvant aller jusqu'à 14 heures d'ensoleillement par jour (en été).

Ce générateur photovoltaïque de 810 W est composé de 6 panneaux de 135 W chacun dont 4 modules poly cristallins et de 2 modules mono cristallins (figure V.2).



Figure V.2 : Vue du générateur photovoltaïque [111]

Chaque deux modules de même type sont branchés en parallèle et relié à un régulateur de charge. Les caractéristiques des modules sont données dans le tableau V.1.

Les sorties des trois régulateurs sont branchées aux bornes de l'onduleur à travers un bornier.

Tableau V.1 : Caractéristiques des panneaux photovoltaïques utilisés

Grandeurs	Valeur
Eclairement standard, E	1000W/m ²
Température standard, T	25°C
Puissance crête maximale, Pm	135 W
Tension maximale, Vm	17,78 V
Courant maximal, Im	7,59 A
Tension de circuit ouvert, Vco	22,26 V
Courant de court-circuit, Icc	8,28 A

V.4. Armoire électrique

• L'armoire électrique relie les différents éléments du générateur photovoltaïque autonome (figure V.3). Elle rassemble les protections réglementaires nécessaires à toute installation électrique (fusibles, disjoncteur,...). Elle est divisée en deux parties:

- Une section TBT (Très Basse Tension, courant continu 12 V).
- Une section BT (Basse Tension, courant alternatif 220 V).



Figure V.3 : Composants de l'armoire électrique

V.4.1. Régulateurs

Le régulateur de charge dans un système photovoltaïque est le composant de jonction entre le générateur solaire, la batterie de stockage ainsi que les consommateurs intervenant dans le système (figure V.4).



Figure V.4: Régulateurs de charge 12V /20A

V.4.2. Onduleur

Cet élément convertit la tension de la batterie en 230 V alternatif et permet d'utiliser des appareils standards mais néanmoins de faible consommation (figure V.5).



Figure V.5: Onduleur autonome 12V - 750 W

V.4.3. Batteries de stockage

C'est la réserve dans laquelle est stockée l'électricité produite par les panneaux solaires (figure V.6).



Figure V.6 : Batterie solaire 12V-80 Ah

V.4.4. Fusibles (20A unipolaire)

Ces éléments servent à la protection de l'installation contre les surcharges et les courts circuits (figure V.7).



Figure V.7: Fusible (20A)

V.4.5. Précautions de sécurité

- **Régulateurs**

Contrôler toujours les polarités de la batterie avant de les connecter au régulateur. La batterie est connectée avant les modules pour éviter ainsi les éventuelles surtensions susceptibles d'endommager le régulateur.

- **Onduleur**

Prévu uniquement pour une entrée CC 12Vpas de connexion directe des modules et pas de batteries différentes de 12V. Les connexions de sortie sont aussi dangereuses que le réseau.

- **Câbles de connexion**

Le branchement est effectué par un câble électrique de qualité. Il devra subir les agressions du vent, de la pluie, du soleil et du gel.

La section sera d'au moins 1.5mm^2 et de 2.5mm^2 dès que la longueur excède 25m ou que la puissance du module soit supérieure à 100W.

On utilise des boîtes de dérivation pré-câblées étanches, pour la connexion des câbles électriques des modules solaires.

Le câblage de ces boîtes permet d'avoir une sortie en 12, 24, ou 48 Volts selon les modèles. Elles sont généralement prévues pour une intensité de 20A, compatible avec les intensités des régulateurs utilisés.

Chaque boîte est équipée de diodes lumineuses permettant de contrôler individuellement chaque branche de modules.

V.4.6. Câblage de l'armoire du générateur PV

Chaque deux panneaux PV sont regroupés en parallèle avec une protection par fusible du pôle positif. Chacun des trois régulateurs reçoit la tension de deux panneaux en parallèle. La sortie des trois régulateurs est mise en parallèle pour avoir une tension commune de douze volts protégée par fusible à l'entrée de l'onduleur (cette sortie recharge également les batteries).

La sortie de l'onduleur est une tension alternative de 220 volts protégée par disjoncteur alimentant la charge figure V.8.

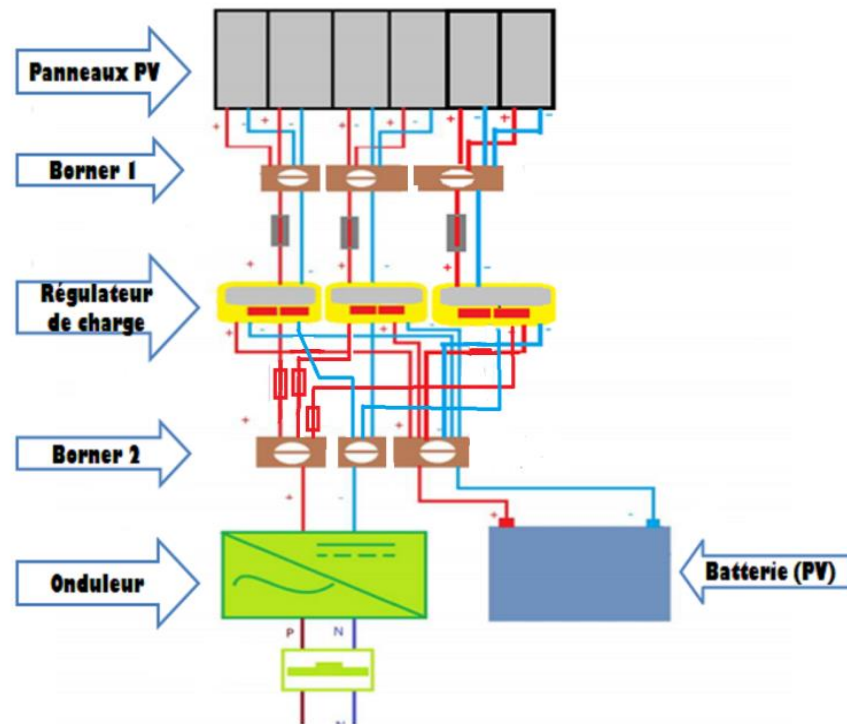


Figure V.8: Câblage de l'armoire du générateur photovoltaïque

V.5. Vérins mécaniques pour suiveur solaire

Les vérins mécaniques permettent de transformer un mouvement rotatif fourni par un moteur électrique, hydraulique ou pneumatique en un mouvement linéaire de traction, de compression ou de positionnement voir figure V.9. Leur utilisation en accouplement avec des arbres de jonction et renvois d'angle, permet d'effectuer des mouvements de levage avec une parfaite synchronisation, même lorsque la charge n'est pas uniformément répartie. Ils existent dans le marché plusieurs type et tailles selon leurs puissance et le type de fonction.



Figure V.9 : Vérins mécaniques du suiveur solaire

V.5.1. Commande de l'orientation Est-ouest

La commande de l'orientation est-ouest est assurée par un multiplicateur d'effort relié à un moteur de parabole de faible puissance commandé par un suiveur (figures V.10, V.11).

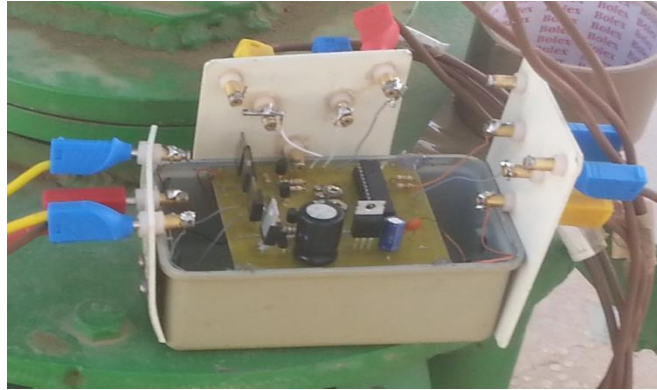


Figure V.10 : Photo réelle du boîtier du suiveur



Figure V.11 : Multiplicateur d'effort d'orientation Est-Ouest

V.5.2. Commande de l'inclinaison Nord-Sud

La commande de l'inclinaison Nord-sud du générateur PV est assurée par un vérin hydraulique manœuvré manuellement par une manivelle (figure V.12).



Figure V.12 : Vérin de commande de l'inclinaison du générateur PV

V.6. Simulation du générateur PV réalisé

Avant chaque réalisation pratique il est recommandé de faire une simulation du produit à développer afin de bien définir les dimensions et prévoir les paramètres de fonctionnement. Le générateur à développer est de type isolé servant à alimenter une habitation ou un site de télécommunication situé à Sidi Bel Abbès. Le logiciel PV System a été utilisé pour la simulation.

V.6.1. Présentation du logiciel

PV SYST 5.2 est un logiciel de dimensionnement des panneaux solaires permettant d'obtenir diverses informations telles que la production d'énergie, l'irradiation et le coût de l'installation, la surface nécessaire, ou la production annuelle d'énergie.

Le logiciel comprend principalement deux modes de fonctionnement.

Le premier est une application de pré-dimensionnement assez simple à prendre en main et accessible. Le deuxième permet une étude beaucoup plus approfondie et prend en compte beaucoup plus de paramètres. De plus il se base sur du matériel concret pour ses calculs, contrairement au premier mode qui effectue ses calculs pour un cas très général.

Pour chacun des deux modes, le principe est le même : on donne la localisation géographique de l'installation, puis on introduit les données concernant l'installation. Vient ensuite une partie résultats où l'on choisit les données concernant l'installation.

V.6.2. Menus principaux

a. Pré-dimensionnement

Pour une étude rapide et simple: on donne une localisation du système puis le logiciel calcule quelques paramètres de pré-dimensionnement ainsi qu'un graphe de production énergétique annuelle, un graphe d'irradiation par mois, un tableau récapitulatif et une étude de coût.

b. Conception du projet

Pour une étude plus approfondie avec de nombreux paramètres à prendre en compte notamment les ombres proches et lointaines. On dispose aussi de plus de choix au niveau de l'orientation des panneaux avec le choix par exemple de panneaux "*tracking*" qui suivent la course du soleil. Les calculs sont basés sur des systèmes réels commercialisés que l'on choisira parmi une vaste liste. On génère ensuite une simulation qui nous fournit un large choix de résultats et de graphes personnalisables.

c. Outils

Permet de modifier les bases de données et d'utiliser des outils du programme sans pour autant créer un projet complet.

V.6.3. Caractéristiques géographiques du site

a) Site d'implantation

Pour la simulation de notre projet photovoltaïque, nous avons choisi le site de Sidi Bel Abbès où les données géographiques et météorologiques sont incluses dans le logiciel PV-SYST.

b) Données géographiques

Le **tableau V.2** présente les données géographiques du site de Sidi Bel Abbès.

Caractéristiques du site	Latitude	Altitude	Longitude
Sidi Bel Abbès	35, 21°	490 m	-0,66°

Tableau V.2 : Données géographiques du site de Sidi Bel Abbès. [112]

c) Données météorologiques

Le tableau V.3 résume les caractéristiques climatiques du site de Sidi Bel Abbès.

	Irrad. Glob. kWh/m ² .jr	Diffus kWh/m ² .jr	Tempér. °C	Vit. vent m/s
Janvier	2.45	1.07	9.8	2.51
Février	3.36	1.27	10.4	2.22
Mars	4.63	1.79	12.8	2.20
Avril	5.76	2.03	14.5	2.83
Mai	6.67	2.44	17.6	2.74
Juin	7.37	2.61	22.3	2.78
Juillet	7.22	2.54	24.6	2.78
Août	6.53	2.23	25.0	2.58
Septembre	5.11	1.97	21.8	2.48
Octobre	3.86	1.45	18.3	2.15
Novembre	2.69	1.19	13.3	2.45
Décembre	2.14	1.10	10.7	2.56
Année	4.82	1.81	16.8	2.5

Tableau V.3: Météo mensuelle de Sidi Bel Abbès [112].

d) Trajectoire du soleil

La connaissance du mouvement apparent du soleil pour un point donné de la surface terrestre est nécessaire pour toute application solaire.

La position du soleil est définie par deux angles: sa hauteur **HS** (angle entre le soleil et le plan horizontal du lieu) et son azimut **AZ** (angle avec la direction du sud, compté négativement vers l'est).

La figure V.13 présente la hauteur du soleil dans le ciel en fonction de l'azimut à Sidi Bel Abbès au cours d'une année.

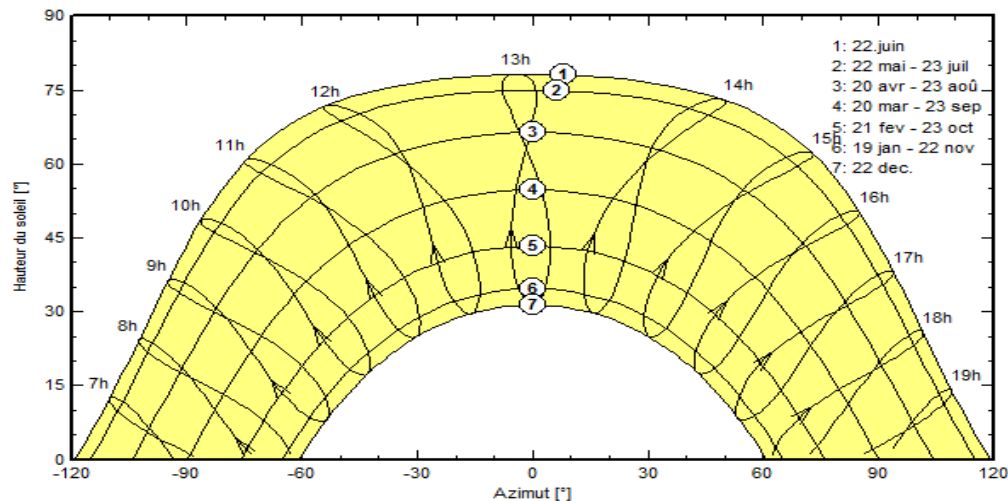


Figure V.13 : Trajectoires du soleil à Sidi Bel Abbès (Lat. 35.21°N, long.- 0.64°E, alt. 490 m) [112]

V.6.4. Simulation du système PV envisagé

La simulation d'un système PV comporte :

- Le choix des composants (panneaux PV, onduleur, matériel de raccordement, ...etc.) ;
- La disposition détaillée du champ de capteurs (orientation, mode de montage, ...etc.) ;
- L'estimation de l'énergie produite;
- Une évaluation des coûts de l'installation, et le prix du kWh résultant.

V.6.5. Orientation des modules PV

Vu le prix élevé des modules PV, il est nécessaire de choisir des orientations et inclinaisons favorables à la production d'énergie.

Nous avons choisi "un plan incliné fixe" d'une inclinaison 30° (par rapport à l'horizontale) et une orientation plein sud de 0° comme l'illustre la figure V.14.

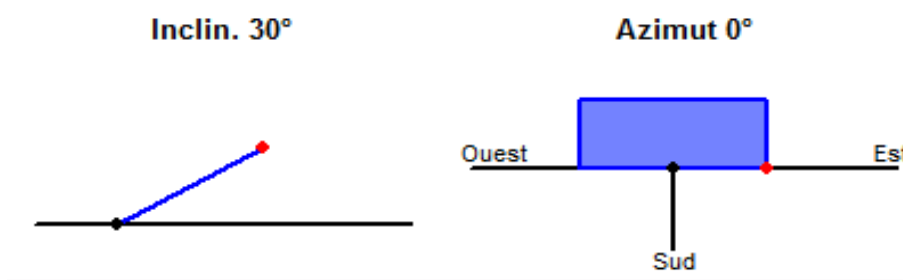


Figure V.14 : Positionnement des systèmes de panneaux (plan incliné fixe).

V.6.6. Simulation

a- Simulation sans suiveur

PVSYST V5.05	11/05/16	
Système isolé avec batteries: paramètres de simulation		
Projet :	projet PV isolé avec batterie à Sidi Bel Abbas	
Site géographique	Sidi Bel Abbas Pays Algérie	
Situation	Latitude 35,21°	Longitude -0.66°E
Temps défini comme	Temps légal Fus. Horaire TU+1	Altitude 490 m
	Albédo 0.20	
Données météo:	Sidi bel Abbas NASA-SSE - Synthétique	
Variante de simulation :	Nouvelle variante de simulation	
	Date de la simulation	11/05/2016 à 12h02
Paramètres de simulation		
1^{ère} étape :		
Orientation plan capteurs	Inclinaison 30°	Azimut 0°
Caractéristique du champ de capteurs		
Module PV Si-poly	Modèle : SW 135 Compact Poly	
Fabricant SolarWorld		
Nombre de modules PV	En série 1 Modules	En parallèle 6 Chaines
Nombre Totale de modules PV	Nombre module 6	Puissance unitaire 135 Wc
Puissance globale du champ	Nominale (STC) 810 Wc	Aux cond. De fonct. 735 WC (50°C)
Caractéristique de fonct. Du champ (50°C)	U mpp 16 V	Impp 46A
Surface totale	Surface modules 9m ²	surface cellules 5.2 m ²
Facteurs de perte du champ PV		
Fact. de perte du thermiques	Uc (const) 29.0W/m ² k	Uv (vent) 0.0 W/m ² k/m/s
	=>Tempér. de fonct. Nominale (G=800 W/ m ² , Tamb=20°C, Vit.Vent=1m/s) NOCT 45°C	
Résistance de câblage	Rés.globale champ 11 m Ohm	Frac.pertes 2.9% aux STC
Perte diode série	Frac.pertes 3.7% aux STC	
Perte de qualité module	Frac.pertes 2.5%	
Perte de " mismatch" modules	Frac.pertes 4.0% (tension fixée)	
Effet d'incidence, para métrisation ASHRAE	IAM= 1-b0 (1/cos i-1)	Paramètre b0 0.05
Paramètres du système	Type de système	Système Isolé avec batteries
Batterie	Modèle isofoton	

Caractéristique du banc de batteries	Tension 12 V	capacité nominale 664 Ah
	Nombre d'unités 1 en série x4 en parallèle	
	Température Fixée (20°C)	
Régulateur	Modèle Général Pur pose Default	
	Technologie Steca Coeff.de temp. -5.0 mV/°C/elem.	
Seuils de régulation batterie	Charge 13.7/13.1 V	Décharge 11.8/12.6 V
Commande génératrice d'appoint	11.8/12.9 V	
Besoins de l'utilisateur:	Consommation domestique Constante sur l'année	
	Moyenne 3.6 kWh/Jour	
Principaux résultats de la simulation		
Plan fixe		
Production du système	Energie disponible 1202 kWh/an	Productible 1383 kWh/kWc/an
	Energie utilisée 1131kWh/an	En excès (inutilisée) 71 kWh/an
	Indice de performance (PR) 65.1 %	Fraction Solaire (SF) 85.3 %

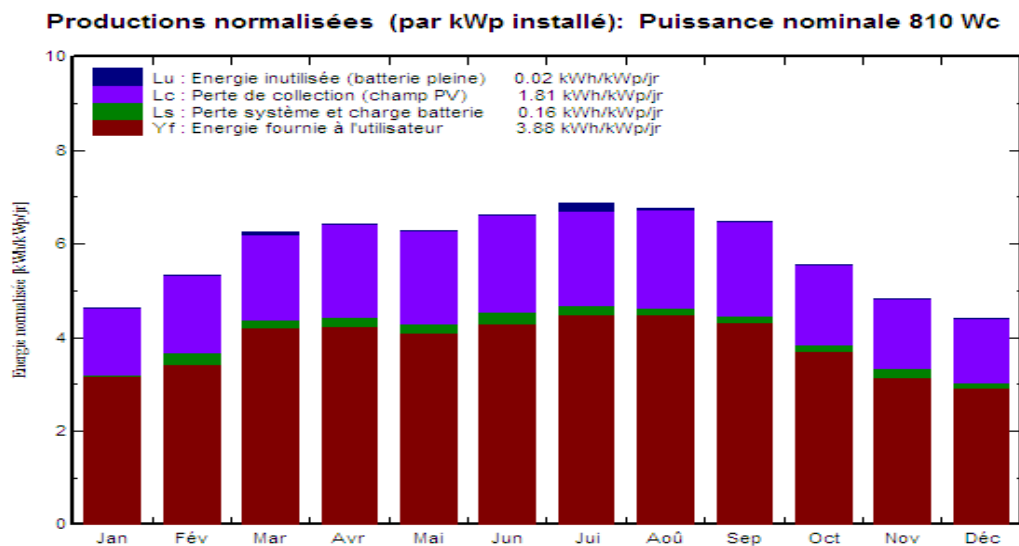


Figure V.15 : Plan fixe (Sans suiveur)

b- Simulation avec suiveur

PVSYST V5.05	11/05/16		
Système isolé avec batteries: paramètres de simulation			
Projet :	projet PV isolé avec batterie à Sidi Bel Abbès		
Site géographique	Sidi Bel Abbès Pays Algérie		
Situation	Latitude 35,21°	Longitude -0.66°E	
Temps défini comme	Temps légal Fus. Horaire TU+1	Altitude 490 m	
	Albédo 0.20		
Données météo:	Sidi bel Abbès NASA-SSE - Synthétique		

Variante de simulation : Nouvelle variante de simulation	
Date de la simulation 11/05/2016 à 12h30	
Paramètres de simulation	
2^{ém} étape :	
Suiveur à deux axes Inclination minimum 0°	inclinaison Maximale 90°
Limite de course : Azimut minimum : - 90°	Azimut maximale: + 90°
Caractéristique du champ de capteurs	
Module PV Si-poly Modèle : SW 135 Compact Poly	
Fabricant SolarWorld	
Nombre de modules PV	En série 1 Modules En parallèle 6 Chaines
Nombre Totale de modules PV	Nombre module 6 Puissance unitaire 135 Wc
Puissance globale du champ	Nominale (STC) 810 WC Aux cond. De fonct. 735 WC (50°C)
Caractéristique de fonct. Du champ (50°C)	U mpp 16 V Impp 46A
Surface totale	Surface modules 9m ² surface cellule 5.2 m ²
Facteurs de perte du champ PV	
Fact. De perte du thermiques	Uc (const) 29.0W/m ² k Uv (vent) 0.0 W/m ² k/m/s
=>Tempér. De fonct. Nominale (G=800 W/ m ² , Tamb=20°C, Vit.Vent=1m/s) NOCT 45°C	
Résistance de câblage	Rés.globale champ 11 mOhmFrac.pertes 2.9% aux STC
Perte diode série	Frac.pertes 3.7% aux STC
Perte de qualité module	Frac.pertes 2.5%
Perte de " mismatch" modules	Frac.pertes 4.0% (tension fixée)
Effet d'incidence, para métrisation ASHRAE	IAM= 1-b0 (1/cos i-1) Paramètre b0 0.05
Paramètres du système	Type de système Système Isolé avec batteries
Batterie	Modèle isofoton
Caractéristique du banc de batteries	Tension 12 V capacité nominale 664 Ah
Nombre d'unités 1 en série x4 en parallèle	
Température Fixée (20°C)	
Régulateur	Modèle Générale Pur pose Default
Technologie Steca Coeff. De temp. -5.0 mV/°C/elem.	
Seuils de régulation batterie	Charge 13.7/13.1 V Décharge 11.8/12.6 V
Commande génératrice d'appoint 11.8/12.9 V	
Besoins de l'utilisateur:	Consommation domestique Constante sur l'année
Moyenne 3.6 kWh/Jour	
Principaux résultats de la simulation	
Suiveur à deux axes	
Production du système	Energie disponible 1940 kWh/an Productible 2405 kWh/kWc/an
Energie utilisée 1300 kWh/an En excès (inutilisée) 640 kWh/an	
Indice de performance (PR) 53.6 % Fraction Solaire (SF) 97.5 %	

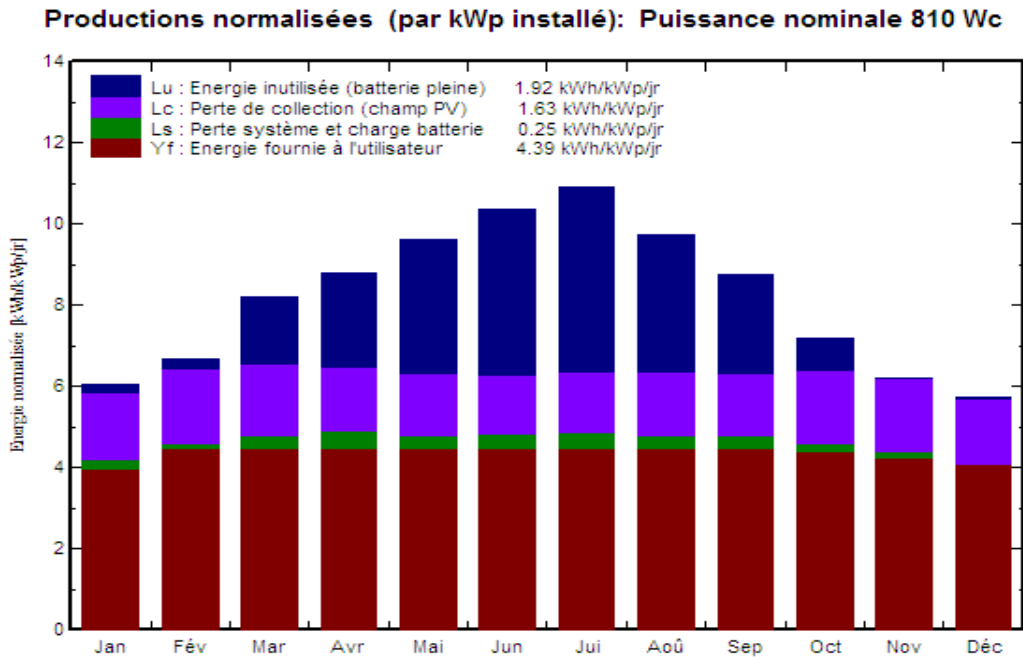


Figure V.16 : Système avec suiveur

c- Comparaison des résultats de simulation

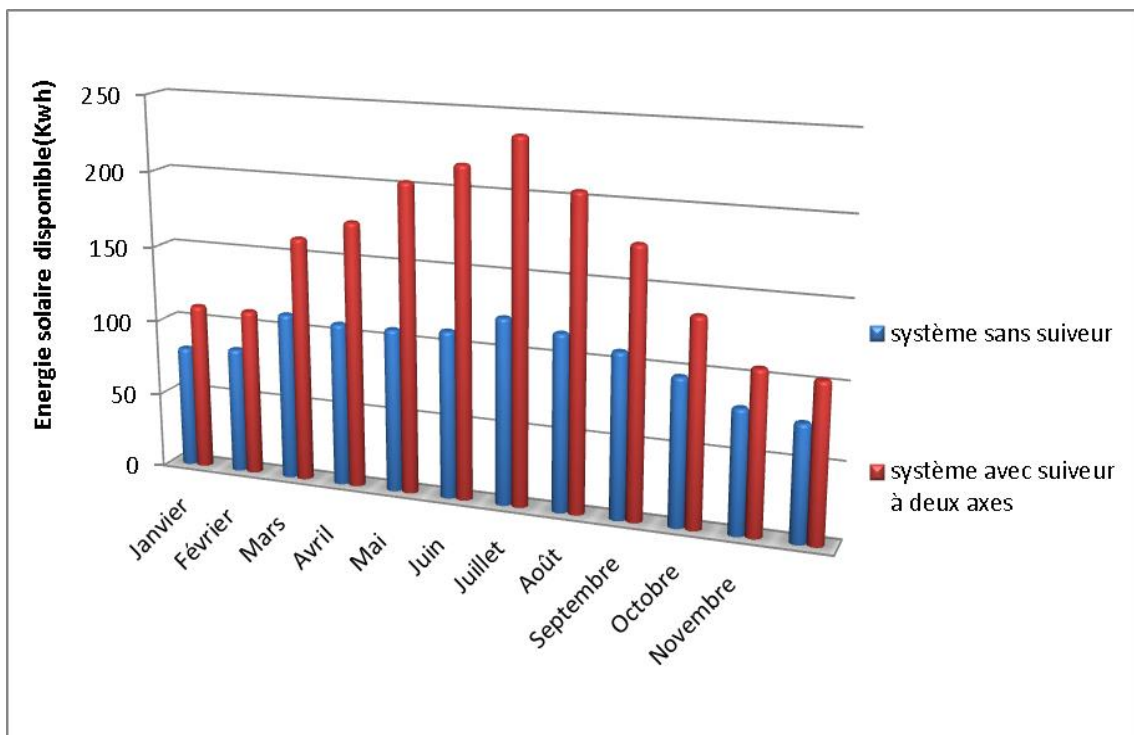


Figure V.17 : Comparaison entre plan fixe et plan avec suiveur

V.7. Caractérisation, essais et mesures du générateur PV

Les expériences se sont déroulées au laboratoire d'électrotechnique Intelligent control and Electrical Power Systems ICEPS de la faculté de technologie de l'université de Djilali Liabes de Sidi Bel Abbès. Figure V.18

V.7.1. Matériel utilisé pour les essais

- Six modules PV de 135W (figure V.18); 4 panneaux poly cristallins et 2 monocristallins, ayant les mêmes caractéristiques.
- Trois régulateurs de charge de batteries de 12V /20A; batterie solaire en électrolyte AGM de 12V/80 Ah ; un onduleur de tension 12V-750 W, 230V-50 Hz ;
- Appareils de mesures, ampèremètres, voltmètres, thermomètre, une boussole et un luxmètre (Tableau V.4).



Figure V.18: Site d'essai du générateur photovoltaïque développé, faculté de technologie UDL SBA

		
<p>Luxmètre: est un appareil de mesure de l'éclairement.</p>	<p>Thermomètre: pour mesurer la température et l'humidité</p>	<p>Multimètres: pour mesurer la tension et le courant.</p>

Tableau V.4 : Appareils de mesures

V.7.2. Essais à vide des panneaux orientés plein sud

Tableau V.5 : Mesures de 14h00 pour une journée ensoleillé avec $\alpha = 0$ et β variable

Angle β	E_c	V_1	V_2	V_3	I_{cc1}	I_{cc2}	I_{cc3}
20°	1140	19.9	19.9	20.3	12.3	12.3	13.3
22°	1145	20.2	20.2	20.7	12.5	12.5	13.6
25°	1150	20.8	20.8	21.1	12.7	12.7	14.3
27°	1180	21.3	21.3	21.6	12.8	12.8	14.4
30°	1237	22.4	22.4	22.8	13.5	13.5	15.2
32°	1230	22	22	22.4	13.4	13.4	14.8
35°	1224	21.3	21.3	21.7	13.1	13.1	14.9
37°	1218	21.2	21.2	21.5	13	13	14
40°	1196	21	21	21.3	12.8	12.8	14

Dans ces essais on mesure à chaque heure; les tensions, les courants, la température et l'éclairement pendant une journée de 9 heures à 17 heures.

a-Essai de détermination de l'angle d'inclinaison optimale

On fait une série de mesure entre 9h00 et 17h00 pour une journée ensoleillée. On relève la tension V_i le courant I_{cc_i} , l'éclairement E_c . On s'intéresse principalement aux valeurs de 14h00 (ensoleillement direct constant) pour orientation $\alpha = 0^\circ$ (plein sud) et une variation de l'inclinaison β de 20° à 40°.

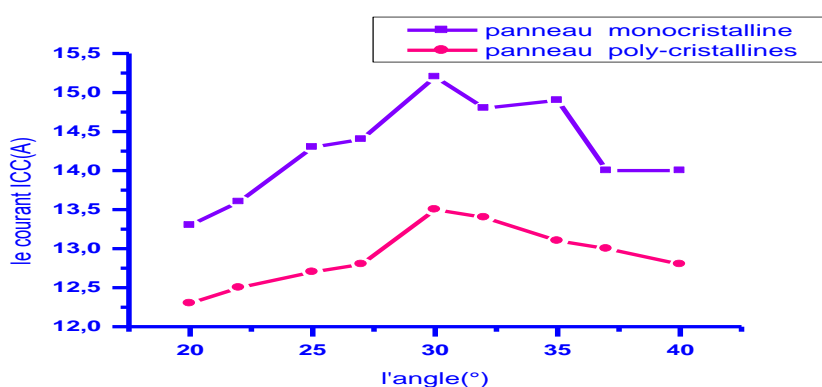


Figure V.19: Variation du courant en fonction de l'angle d'inclinaison à 14:00h pour une journée ensoleillé

Interprétation

Ces mesures ont montré que l'angle de l'inclinaison β a une influence sur le rendement du générateur (PV). On trouve un angle optimal de : $\beta = 30^\circ$.

Aussi on remarque que les valeurs du courant et de tension délivrés par les panneaux monocristallins sont supérieures à celles délivrées par des panneaux polycristallins.

b. Essais de comparaison entre un jour nuageux et ensoleillé (système fixe)

Jour ensoleillé du 03 /03/2016 : $\alpha = 0^\circ$, inclinaison $\beta = 30^\circ$

Tableau V.6 : Valeurs mesurées du GPV à vide pendant une journée ensoleillée.

Heures(h)	E (cd)	T (°c)	V _{co1} (V)	V _{co2} (V)	V _{co3} (V)	I _{cc1} (A)	I _{cc2} (A)	I _{cc3} (A)
9 :00	332	17	20,3	20,3	20.5	5.1	5.1	5.1
10 :00	523	18.6	20.5	20.5	20.7	7.4	7.4	7.4
11 :00	793	22	20.7	20.7	20.8	10.7	10.7	10.7
12 :00	934	23	20.6	20.6	20.9	12.8	12.8	12.8
13 :00	1116	25	20.9	20.9	21	13.8	13.8	13.8
14 :00	1200	30	20.6	20.1	20.4	16.1	16.1	16.1
15 :00	1164	25	20.8	20	20.5	15.2	15.2	15.21
16 :00	997	24	20.4	20.4	20.7	13.7	13.7	13.7
17 :00	750	21	20.4	20.4	20.7	11.2	11.2	11.2

Jour nuageux du 08 /03/2016 : $\alpha = 0^\circ$, inclinaison $\beta = 30^\circ$

Tableau V.7 : Valeurs mesurées du GPV à vide pendant une journée nuageuse

Heures(h)	E(lux)	T (°c)	V _{co1} (V)	V _{co2} (V)	V _{co3} (V)	I _{cc1} (A)	I _{cc2} (A)	I _{cc3} (A)
9 :00	13	10	20.8	20.8	20.9	1.5	1.5	1.7
10 :00	127	9.4	20.6	20.6	20.9	1.8	1.8	1.9
11 :00	210	9	21	21	21.3	2.9	2.9	3.1
12 :00	232	11	20.7	20.7	21.1	3.2	3.2	3.4
13 :00	250	20.8	21.3	21.3	21.6	3.5	3.5	3.6
14 :00	270	12.2	20.6	20.6	21	3.8	3.8	3.9
15 :00	207	12.3	20.6	20.6	21	2.8	2.8	3
16 :00	355	15.2	20.8	20.8	21.1	4.9	4.9	5.2
17 :00	400	17	20.7	20.7	21	5.4	5.4	5.9

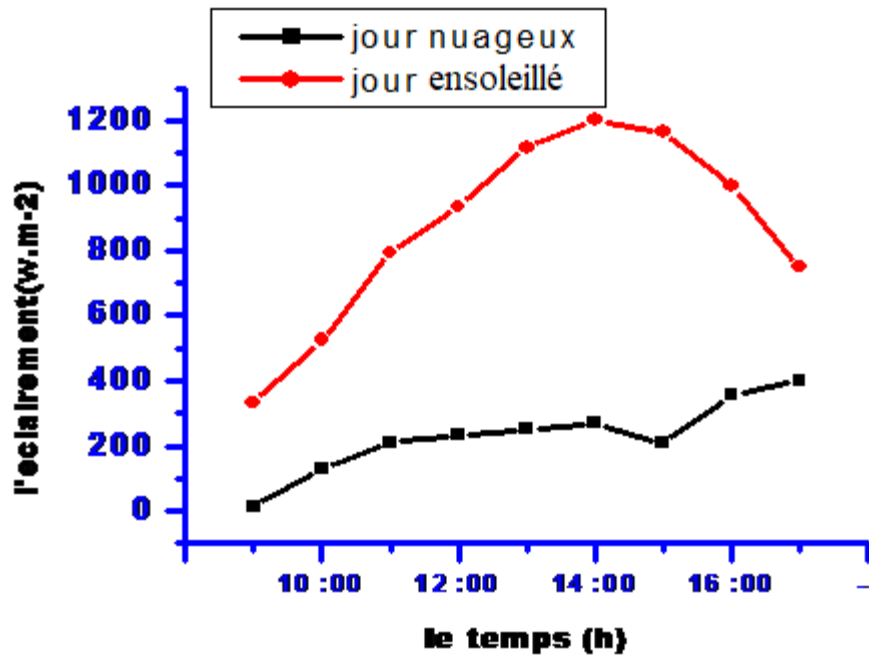


Figure V.20 : Comparaison de l'éclairement entre un jour nuageux et ensoleillé.

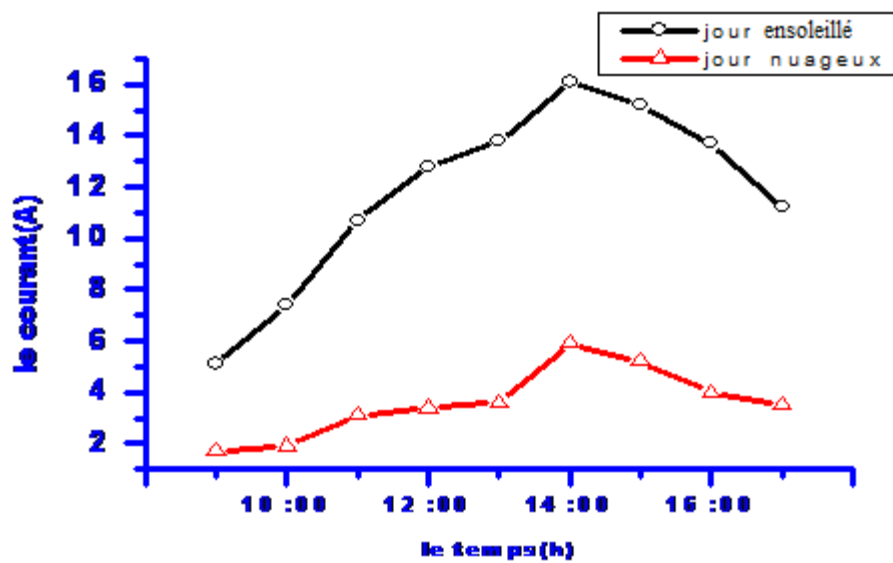


Figure V.21 : Comparaison du courant entre un jour nuageux et ensoleillé.

Interprétation

Des essais, on déduit qu'il y a deux facteurs essentiels qui influent sur le fonctionnement du panneau photovoltaïque :

Le premier facteur c'est l'éclairement autrement dit la luminosité qui a un rapport avec le courant : plus l'éclairement augmente, plus le courant augmente.

Le deuxième facteur est la température de la cellule, plus la température augmente plus la tension diminue.

On remarque ainsi que :

L'éclairement et le courant de la journée ensoleillée sont supérieurs à l'éclairement et le courant de la journée nuageuse.

V.7.3. Essais avec panneaux orientés $\beta=30$, α varie:

V.7.3.a. à vide :

Dans ces essais on mesure les tensions, les courants, la température et l'éclairement chaque heure pendant une journée de 9 heures à 17 heures.

On varie l'angle d'orientation α de l'est en ouest, en gardant l'angle d'inclinaison optimale $\beta = 30^\circ$

- Jour ensoleillé du 10/03/2016 : α varie, inclinaison $\beta = 30^\circ$

Tableau V.8 : Valeurs mesurées à vide du GPV pendant une journée avec une inclinaison de 30°

Heures(h)	α	T (°c)	E(cd)	V _{co1} (V)	V _{co2} (V)	V _{co3} (V)	I _{cc1} (A)	I _{cc2} (A)	I _{cc3} (A)
9 :00	-60°	14.7	930	21	21	21.3	13.9	13.9	13.9
10 :00	-45°	15	1013	20.4	20.4	21	14	14	14
11 :00	-30°	22	1145	20.3	20.3	20.7	14.7	14.7	16.4
12 :00	-15°	18	1200	20.1	20.1	20.4	14.7	14.7	16.1
13 :00	0°	22	1310	20.4	20.4	20.6	15.1	15.1	17
14 :00	15°	23	1387	21.1	21.1	20.7	17.5	17.5	18.8
15 :00	30°	21	1205	20.3	20.3	20.5	15.1	15.1	16.3
16 :00	45°	20.5	1125	20.3	20.3	20.5	14.6	14.6	15.5
17 :00	60°	20	1015	20.3	20.3	20.5	13.9	13.9	14.8

Ec : l'éclairement, T : température, α : L'angle de rotation, β : L'angle d'inclinaison

- Comparaison entre panneau fixe et panneau orienté pour $\beta=30^\circ$

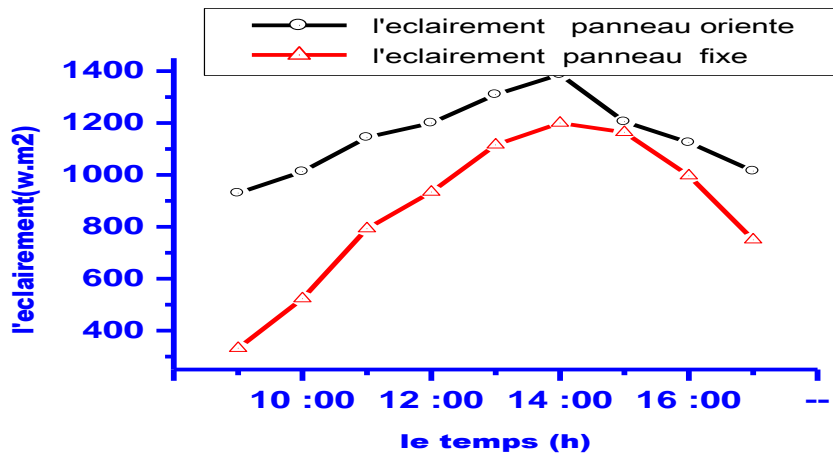


Figure V.22 : Eclaircement journalier pour un générateur fixe et orienté

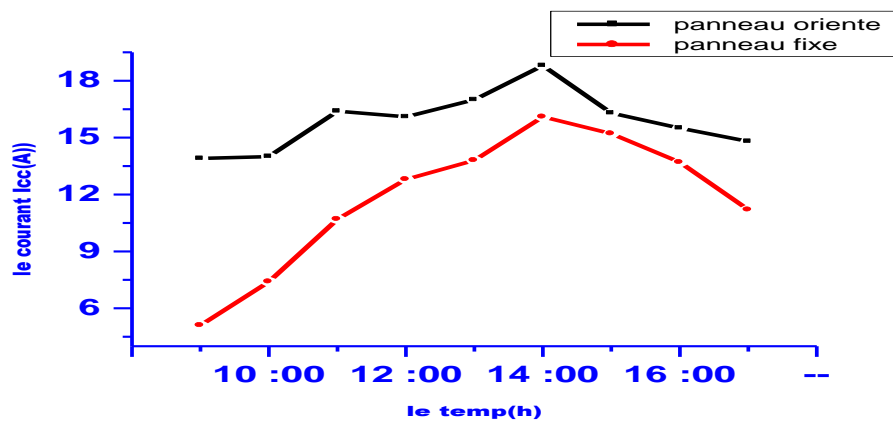


Figure V.23 : Courant délivré par un générateur fixe et orienté

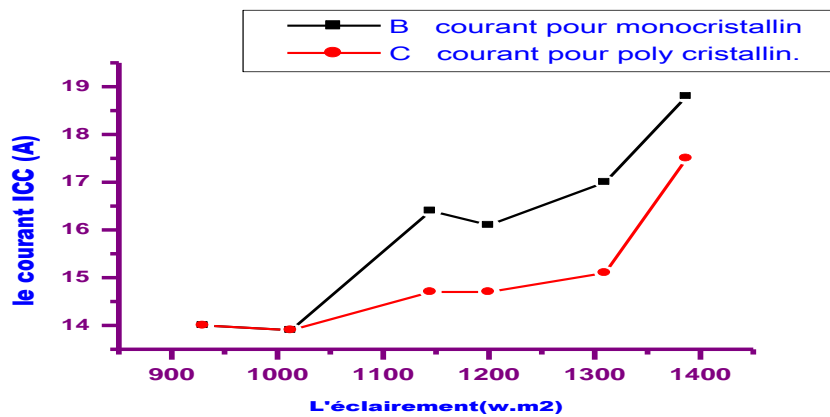


Figure V.24 : Courant délivré par un panneau orienté pour des cellules mono et poly-cristallines

Interprétation

Nous remarquons que le courant I_{co} produit par les panneaux fixes plein sud est plus faible que celui délivré par des panneaux orientés.

Le courant produit par les modules mono cristallins est supérieur au courant des modules poly cristallins.

V.7.3.b. Essais en charge

Dans ces essais on mesure les courants, la température, l'éclairement et le courant de charge (lampes de 75W) pendant une journée avec un angle d'inclinaison fixé à 30°

- **Exemple1 :** 10 :00 h $E_c=1100W/m^2$ $T=21.8\text{ C}^\circ$ $\alpha=-45^\circ$ $\beta=30^\circ$

Tableau V.9 : Valeurs mesurées en charge sans suiveur pour $\alpha = -45^\circ$

lamp	0	1	2	3	4	5	6	7
V_{chrg}	229	228	228	228	228	228	228	228
$I_{\text{chrg}}(\text{A})$	0	0.35	0.68	1.01	1.33	1.7	2.06	2.52
$I_{\text{sc1}}(\text{A})$	14.4	15.2	15.2	16	15.7	15.7	16.5	17.1
$I_{\text{sc2}}(\text{A})$	14.4	15.2	15.2	16	15.7	15.7	16.5	17.1
$I_{\text{sc3}}(\text{A})$	15.4	16.5	16.8	16.4	16.8	17.5	17.8	18.4

NB : la charge est variée de 0 à 7 lampes de 75 W

- Mesures avec une charge de 7 lampes 525W pour $\beta= 30^\circ$ et une orientation α variable de -45° à $+60^\circ$.

Tableau V.10 : Mesures en charge sans suiveur pour $\alpha= [-45^\circ ; +60^\circ]$

Heures (h)	α	T(c°)	E (lux)	Icc1 (A)	Icc2 (A)	Icc3 (A)	I _{Charge} (A)	V _{Charge} (A)	P _{charges} (w)
10 :00	-45°	21.8	1100	17.1	17.1	18.4	2.52	228	574.56
11 :00	-30°	22.5	900	15	15	15.8	2.52	228	574.56
12 :00	-15°	18	330	4.6	4.6	4.8	1.71	228	389.88
13 :00	0°	17.8	1300	15.2	15.2	16.2	2.5	228	684.4
14 :00	15°	17.8	375	5.5	5.5	5.7	1.7	226	384.2
15 :00	30°	17.8	375	5.4	5.4	5.7	1.7	228	574.56
16 :00	45°	19.8	1100	16.4	16.4	17.3	2.52	227	572.04
17 :00	60°	20.5	970	14.4	14.4	15.4	2.52	227	572.04

Ec : l'éclairement.

T : température.

α : L'angle de rotation.

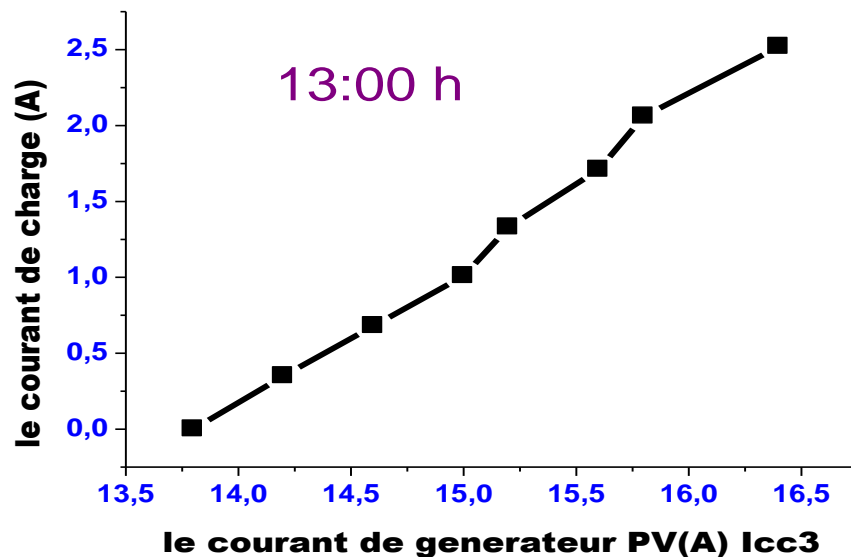


Figure V.25 : Courant de charge en fonction du courant de module.

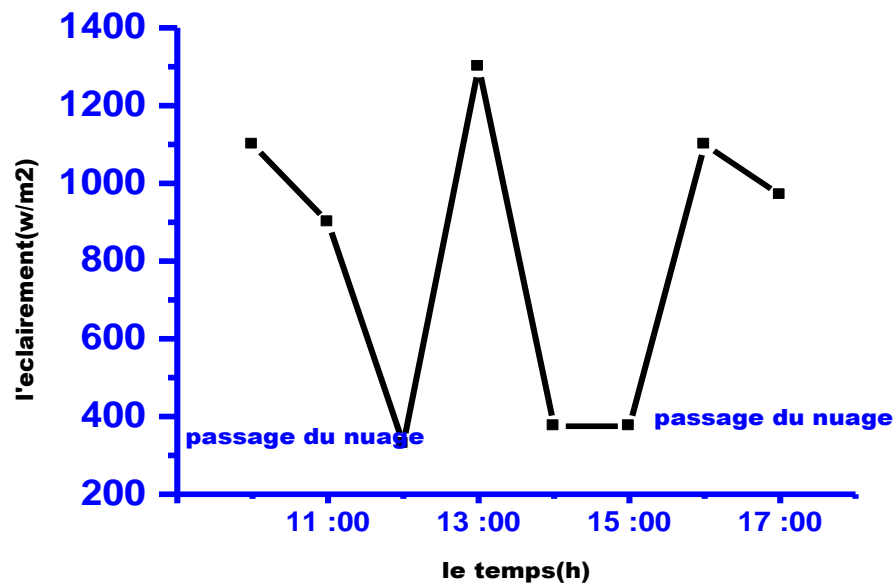


Figure V.26 : Eclairage en fonction du temps

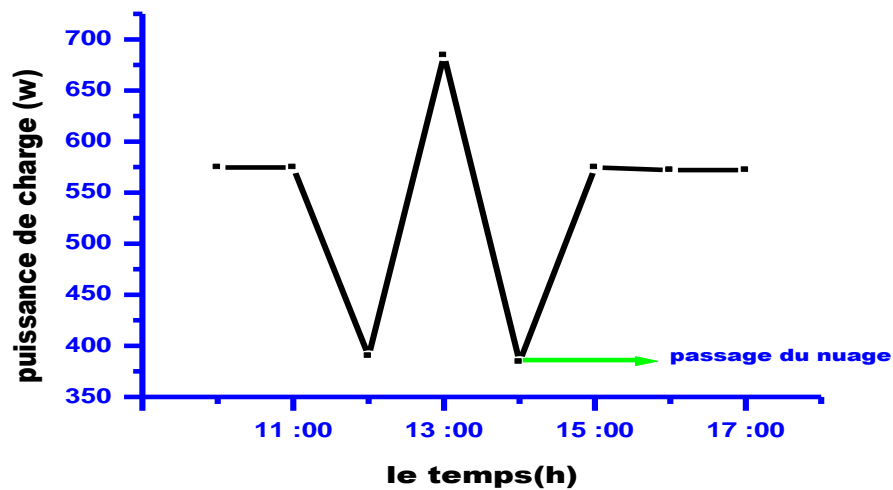


Figure V.27: Variation de la puissance en fonction du temps

Interprétation

On remarque une augmentation de la puissance avec une augmentation de l'éclairage.

V.7.4. Essais avec suiveur, l'inclinaison $\beta=30^\circ$, et le GPV est orienté par le suiveur

V.7.4.a. à vide

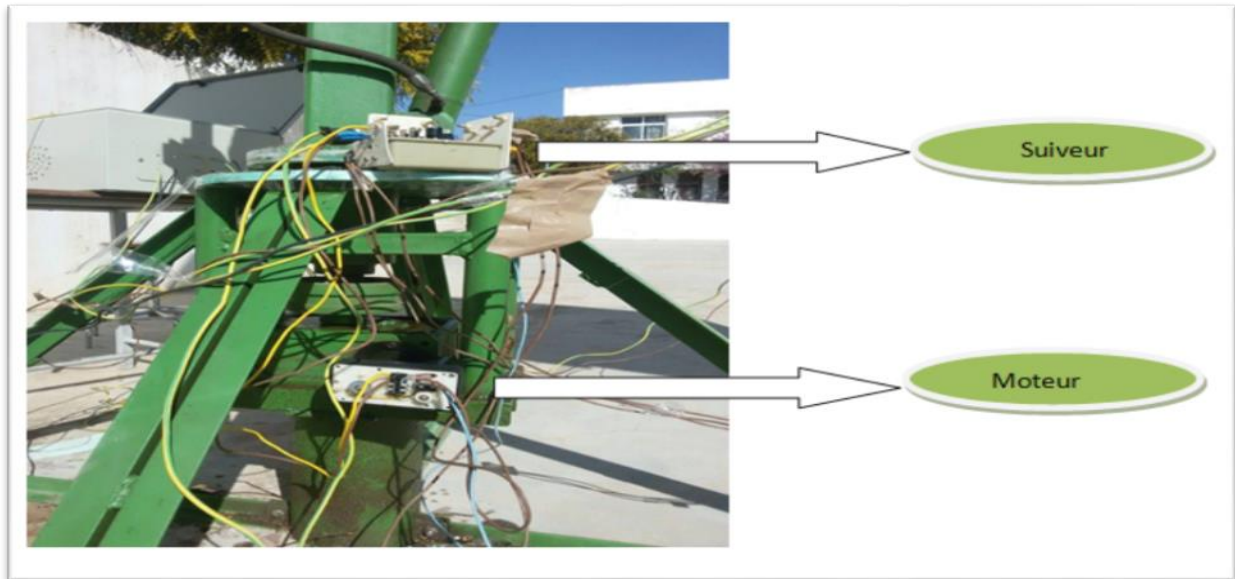


Figure V.28: Emplacement du moteur et du suiveur sur le GPV

- Jour ensoleillé le 13/04/2016 $\beta = 30^\circ$

Tableau V.11 : Mesures du GPV à vide avec suiveur pour une inclinaison de 30°

Heures(h)	T(°c)	E (cd)	V _{co1} (V)	V _{co2} (V)	V _{co3} (V)	I _{cc1} (A)	I _{cc2} (A)	I _{cc3} (A)
09 :00	19	1020	20.7	20.7	21.3	14	14	14.1
10 :00	20	1116	19.8	19.8	20.1	14.2	14.2	14.4
11 :00	21.6	1150	19.7	19.7	20	14.3	14.3	16.6
12 :00	25	1200	19.4	19.4	19.7	14.8	14.8	16.4
13 :00	25	1334	19.4	19.4	19.7	16.6	16.6	18
14 :00	29	1400	19.6	19.6	19.8	18	18	19.2
15 :00	29	1290	19.3	19.3	19.6	15.4	15.4	17
16 :00	28	1190	19.9	19.9	20.7	15	15	16.5
17 :00	26	1080	20	20	20.7	14.1	14.1	15.2

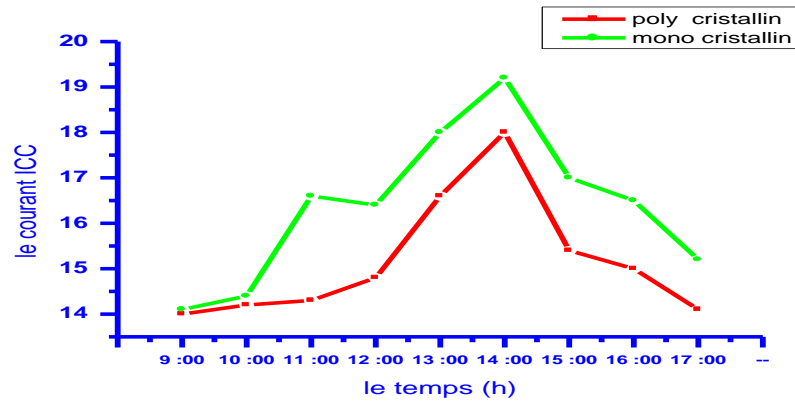


Figure V.29: Courant généré par le GPV à vide avec suiveur

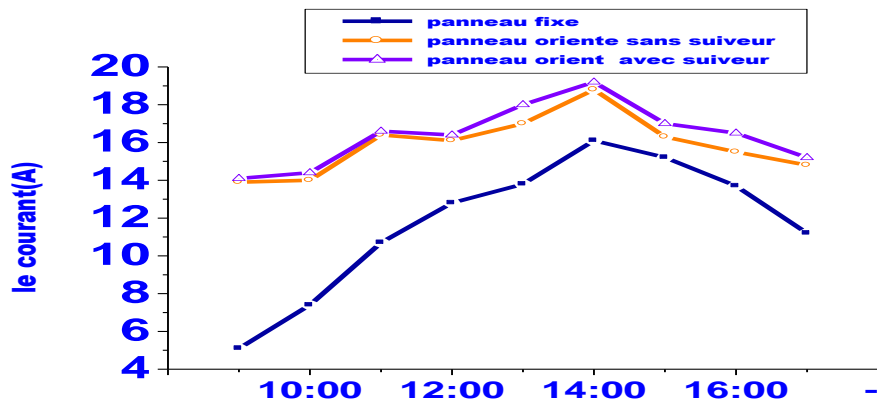


Figure V.30: Comparaison entre courant généré par panneau fixe, orienté et avec suiveur

• **Interprétation**

Le courant produit par les modules photovoltaïques avec suiveur est supérieur au courant sans suiveur. Le suiveur augmente le rendement de presque 30% par rapport à un système fixe.

V.7.4.b. En charge

Les séries de mesures suivantes sont prise sur le GPV orienté par le suiveur solaire et avec une inclinaison fixée à 30° en alimentant une charge variable de 0 à 7 lampes de 75 W.

Mesure 1 : 10 :00 h $E_c=1130W/m^2$ $T=19.9C^\circ$ $\beta=30^\circ$

lampe	0	1	2	3	4	5	6	7
V_{chrg}	229	229	229	229	229	229	229	229
$I_{\text{chrg}}(A)$	0	0.35	0.68	1.01	1.33	1.7	2.06	2.52
$I_{\text{sc}1}(A)$	13	13.3	13.3	13.5	13.9	16	16.7	17
$I_{\text{sc}2}(A)$	13	13.3	13.3	13.5	13.9	16	16.7	17
$I_{\text{sc}3}(A)$	14.8	14.9	15.3	15.8	16.5	17.5	17.9	18

Mesure 2 : 11 :00 h $E_c=1090W/m^2$ $T=22.8C^\circ$ $\beta=30^\circ$

lampe	0	1	2	3	4	5	6	7
V_{chrg}	230	230	230	230	230	230	230	230
$I_{\text{chrg}}(A)$	0	0.35	0.68	1.01	1.33	1.7	2.06	2.52
$I_{\text{sc}1}(A)$	14.8	15.4	15.8	16.2	16.2	16.6	17	17.4
$I_{\text{sc}2}(A)$	14.8	15.4	15.8	16.2	16.2	16.6	17	17.4
$I_{\text{sc}3}(A)$	16	16.7	16.7	16.9	17.3	17.8	18	18.5

Mesure 3 : 12 :00 h $E_c=1120W/m^2$ $T=28C^\circ$ $\beta=30^\circ$

lampe	0	1	2	3	4	5	6	7
V_{chrg}	230	230	230	230	230	230	230	230
$I_{\text{chrg}}(A)$	0	0.35	0.68	1.01	1.33	1.7	2.06	2.52
$I_{\text{sc}1}(A)$	13.4	13.6	14.1	14.6	14.5	15.2	16.1	16.7
$I_{\text{sc}2}(A)$	13.4	13.6	14.1	14.6	14.5	15.2	16.1	16.7
$I_{\text{sc}3}(A)$	15.3	15.7	15.7	16.2	16.4	17.1	17.8	18.2

Mesure 4 : 13 :00 h $E_c=1120W/m^2$ $T=28C^\circ$ $\beta=30^\circ$

lampe	0	1	2	3	4	5	6	7
V_{chrg}	230	230	230	230	230	230	230	230
$I_{\text{chrg}}(A)$	0	0.35	0.68	1.01	1.33	1.71	2.06	2.52
$I_{\text{sc}1}(A)$	12.4	12.9	13.5	13.8	13.9	14.6	15.4	16
$I_{\text{sc}2}(A)$	12.4	12.9	13.5	13.8	13.9	14.6	15.4	16
$I_{\text{sc}3}(A)$	14.2	14.3	14.6	15.4	16	16.9	17.4	17.9

Mesure 5 : 14:00 h $E_c=1240 \text{ W/m}^2$ $T=27.3\text{C}^\circ$ $\beta=30^\circ$

lampe	0	1	2	3	4	5	6	7
V_{chrg}	230	230	230	230	230	230	230	228
$I_{\text{chrg}}(\text{A})$	0	0.35	0.68	1.01	1.33	1.7	2.06	2.52
$I_{\text{sc}1}(\text{A})$	14.7	15.3	15.6	16.2	16.2	16.4	16.8	17.3
$I_{\text{sc}2}(\text{A})$	14.7	15.3	15.6	16.2	16.2	16.4	16.8	17.3
$I_{\text{sc}3}(\text{A})$	15.8	16.7	16.8	16.8	17.4	17.8	18	18.8

Mesure 6 : 15 :00 h $E_c=1165 \text{ W/m}^2$ $T=28.5\text{C}^\circ$ $\beta=30^\circ$

lampe	0	1	2	3	4	5	6	7
V_{chrg}	229	228	228	228	228	228	228	228
I_{chrg}	0	0.35	0.68	1.01	1.33	1.7	2.06	2.52
$I_{\text{sc}1}$	13	13.3	13.9	14.1	14.2	14.5	15.4	15.7
$I_{\text{sc}2}$	13	13.3	13.9	14.1	14.2	14.5	15.4	15.7
$I_{\text{sc}3}$	13.7	13.8	14.2	14.6	14.9	15.6	16.2	16.6

Mesure 7 : 16:00 h $E_c=1130 \text{ W/m}^2$ $T=25\text{C}^\circ$ $\beta=30^\circ$

lampe	0	1	2	3	4	5	6	7
V_{chrg}	229	229	229	229	229	229	229	229
I_{chrg}	0	0.35	0.68	1.01	1.34	1.7	2.06	2.52
$I_{\text{sc}1}$	15.4	15.6	15.9	15.9	16.1	16.3	16.6	16.7
$I_{\text{sc}2}$	15.4	15.6	15.9	15.9	16.1	16.3	16.6	16.7
$I_{\text{sc}3}$	15.6	15.8	16.1	16.4	16.9	17	17.6	17.9

Mesure 8 : 17 :00 h $E_c=1020 \text{ W/m}^2$ $T=23 \text{ C}^\circ$ $\beta=30^\circ$

lampe	0	1	2	3	4	5	6	7
V_{chrg}	230	230	230	230	230	230	230	229
I_{chrg}	0	0.35	0.68	1.01	1.34	1.7	2.06	2.52
$I_{\text{sc}1}$	14	14.4	14.8	15	15.3	15.6	15.9	16.2
$I_{\text{sc}2}$	14	14.4	14.8	15	15.3	15.6	15.9	16.2
$I_{\text{sc}3}$	14.4	14.8	15.4	15.7	15.9	16.1	16.6	17

Tableau V.12 : Mesures en charge du GPV pendant une journée avec suiveur.



Figure V.31: Courant de charge en fonction du courant du module.

- Interprétation

Le courant de charge est proportionnel au courant produit par le générateur photovoltaïque.

Si la demande de charge est élevée, on utilise la batterie pour augmenter le courant de charge.

Tableau V.13 : Tableau récapitulatif

Heures	α	E (lux)	Icc1 (A)	Icc2 (A)	Icc3 (A)	I _{Charge} (A)	V _{Charge} (A)	Pmax Charge(w)
10 :00	-45°	1130	17	17	18.4	2.52	230	579.6
11 :00	-30°	1090	17.4	17.4	15.8	2.52	230	579.6
12 :00	-15°	1120	16.7	16.7	4.8	2.52	227	572.04
13 :00	0°	1120	16	16	15.8	2.52	230	579.6
14 :00	15°	1240	17.3	17.3	5.7	2.52	228	574.56
15 :00	30°	1165	15.7	15.7	5.7	2.52	228	574.56
16 :00	45°	1130	16.7	16.7	17.3	2.52	229	577.08
17 :00	60°	1020	16.2	16.2	15.4	2.52	229	577.08

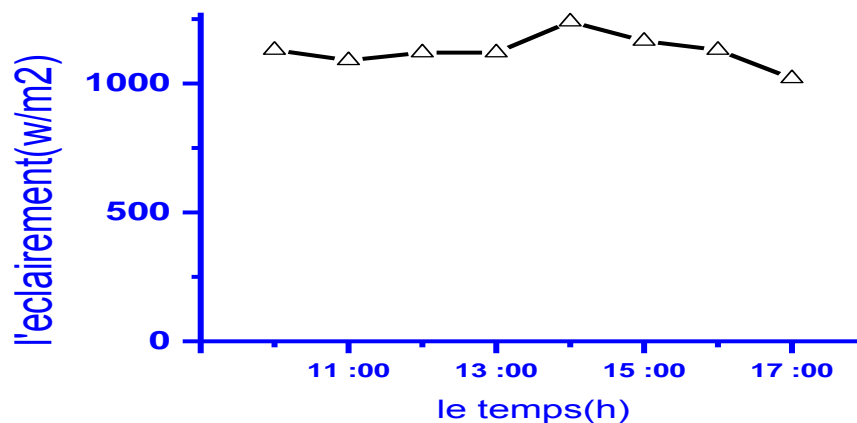


Figure V.32: Eclairement en fonction du temps pendant une journée avec suiveur.

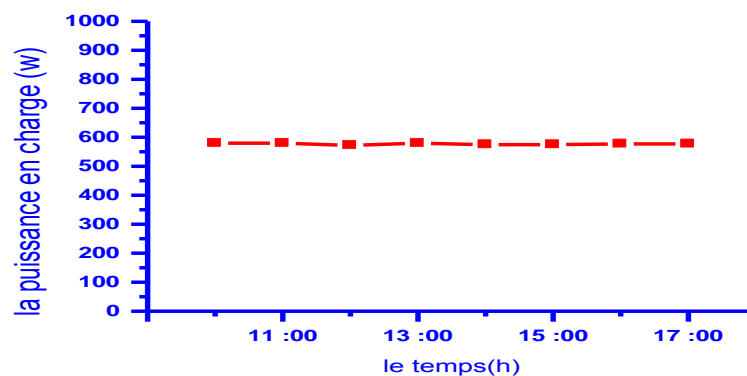


Figure V.33: Puissance en fonction de temps pendant une journée avec suiveur

Interprétation

La puissance de charge est stable car le suiveur joue un rôle très important pour capter l'énergie de la lumière d'une manière optimale.

V.8. Conclusion

La série de mesures à vide et en charge faite durant différents jours (nuageux, partiellement nuageux, jour ensoleillé) nous a permis de relever les caractéristiques de sortie et d'observer leurs évolutions en fonction des paramètres extérieurs (éclairement, température...).

Pour cela on peut confirmer ce qui suit:

Le courant dépend fortement de l'éclairement: si l'éclairement augmente le courant augmente.

La tension dépend de la température : pour une température de 25° on obtient la tension de circuit ouvert marquée sur le panneau, en revanche si la température augmente la tension commence à diminuer.

La puissance délivrée par les panneaux monocristallins est plus importante que celle générée par des panneaux poly-cristallins.

L'angle d'orientation Est-Ouest influe grandement sur le courant et la puissance.

L'angle d'inclinaison Nord-sud influe beaucoup moins que l'angle d'orientation sur le courant et la puissance.

Un générateur suiveur du soleil a un rendement beaucoup plus important qu'un générateur fixe. Dans certaines conditions la différence peut atteindre 30 à 40%.

Conclusion générale

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches ont conduit à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande du monde jusqu'à maintenant, est l'énergie solaire, qui est libre et abondante dans la plupart des régions du monde, et est avérée une source économique.

L'énergie photovoltaïque connaît actuellement un fort développement dans le monde. En Algérie, il est prévu l'installation de 13575 MW à l'horizon 2030. Ce développement est dopé par les politiques internationales et nationales qui visent la diminution de l'utilisation des énergies fossiles selon les objectifs du protocole de Kyoto et la COP 21 de Paris 2015.

Afin d'exploiter au mieux et de permettre une adaptation optimale des générateurs photovoltaïques, il est nécessaire de faire une étude de la caractéristique de cellules, de modules et de panneaux solaires. Nous avons présenté les principales caractéristiques et les technologies des éléments constitutifs d'un générateur PV. Nous avons montré comment augmenter le courant ou la tension d'un générateur photovoltaïque.

En utilisant le logiciel PV System, par simulation, nous avons présenté le principe et les étapes de dimensionnement des installations photovoltaïques autonomes optimisées.

Les résultats obtenus confirment l'importance d'un suiveur solaire à deux axes par rapport à un plan fixe, en termes de production annuelle d'énergie électrique. Pour une même installation donnée la présence du suiveur solaire permet une augmentation de 38% d'énergie électrique.

Les travaux présentés dans ce projet ont porté sur la simulation et la réalisation d'un générateur PV muni d'un suiveur de soleil réalisé à l'aide de composants électroniques programmable, en utilisant un processeur très répandu dans l'industrie : un microcontrôleur de la famille PIC.

Le but de ce travail réside dans la mise en œuvre d'une solution technique permettant de transformer un panneau photovoltaïque fixe en un panneau mobile afin d'améliorer son rendement.

On a développé un suiveur à un axe vu que l'angle d'inclinaison pour le site d'utilisation a été optimisé à 30°.

D'après les mesures effectuées sur le générateur de 810 Wc nous pouvons dire ce qui suit :

La tension de circuit ouvert V_{oc} baisse avec la hausse de température. Cette baisse est aux alentours de 0.4% .La puissance chute de 0.5%

Le courant de court-circuit est directement proportionnel au rayonnement incident.

Selon les résultats obtenus, la puissance et le courant pour les panneaux monocristallins sont supérieurs à la puissance et le courant de panneaux poly cristallins. Aussi le flux solaire reçu sur le plan vertical est le plus faible (sans suiveur), par rapport un plan incliné (avec suiveur). La meilleure inclinaison est de 30° pour les deux.

L'angle de l'inclinaison β a aussi une influence sur le rendement du générateur (PV), Dans cette étude on a déterminé l'angle optimale de l'inclinaison qui est $\beta = 30^\circ$.

Les différents types des régulateurs DC/DC développés au laboratoire ICEPS ont été présentés

Le régulateur série (Buck converter) qui diminue la tension du générateur photovoltaïque.

Le régulateur parallèle (Boost) qui augmente la tension de générateur photovoltaïque.

Le régulateur série/parallèle(SEPIC) qui convertit une tension continue en une autre de plus faible ou plus grande valeur selon le besoin.

La plupart des charges sont en courant alternatif tandis que la tension délivrée par le générateur PV est de type continu. Alors il est nécessaire d'introduire un onduleur. Les différents types d'onduleurs développés au laboratoire ICEPS ont été présentés

Onduleur à commande symétrique qui présente comme inconvénient : l'onde de courant n'est pas quasi sinusoïdale et le taux d'harmonique est élevé.

Onduleur à commande décalée qui améliore l'onde de courant par rapport à la commande symétrique.

Onduleur à commande MLI qui améliore considérablement l'onde de courant et diminue également le taux d'harmonique.

Le suiveur développé dans cette étude a bien fonctionné aussi bien le circuit de puissance qui a entraîné le moteur qui lui a été dédié ainsi que le circuit de commande où les LDR ont suivi parfaitement l'éclairement.

A titre de perspectives nous proposons ce qui suit :

La construction d'un générateur de puissance beaucoup plus grande exemple quelques kilowatts afin de mieux caractériser et mieux charger la centrale solaire.

Le montage de deux suiveurs solaires aussi bien en orientation qu'en inclinaison pour mieux caractériser le rendement des centrales avec suiveur.

Introduire des onduleurs et régulateurs avec MPPT afin de capter le maximum de puissance et augmenter l'autonomie du générateur même pour plusieurs jours nuageux.

Développement d'un suiveur commandé par carte arduino, cela nécessite un programme compilé par le logiciel de la carte arduino envoyé directement par un microordinateur.

Développement d'un suiveur capable de reconnaître la situation géographique (latitude et longitude) de lieu de son implantation éventuelle sur un générateur PV.

Références bibliographiques

- [1] Bertrand Nogarède. Électrodynamique appliquée Bases et principes physiques de l'électrotechnique *Collection : Sciences Sup, Dunod* Parution : mai 2005
- [2] Besson, Pierre. Compréhension des comportements électrique et optique des modules photovoltaïques à haute concentration, et développement d'outils de caractérisations adaptés. Thèse de doctorat, Université de Lyon, 2016.
- [3] Bandou, Farida. Contribution à l'analyse des performances électriques et thermiques des modules photovoltaïques de différentes technologies. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri, 2016.
- [4] Bouakra, Abdellah. Impact et régulation de la tension à la suite d'insertion d'énergie renouvelable dans les réseaux de distribution électrique. Thèse de doctorat. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2016.
- [5] CARON, Jean-Michel et ALAIN GAUTHIER, Géologue. *Planete terre*. Editions OPHRYS, 2007.
- [6] Grau, Donatien. Néron en Occident. Une figure de l'histoire. Editions Gallimard, 2015
- [7] Vigouroux, Anne. Étude de la variabilité solaire à long terme. Thèse de doctorat, Université de Nice 1996.
- [8] Benattar, Jean-Jacques, et al. "Les rencontres nationales physique-entreprise-recherche." (2016).
- [9] Salaheddine, M. A. N. S. O. U. R. Etude de Dimensionnement optimal d'une station solaire autonome en site isolé. Mémoire de Master. Université Aboubekr Belkaid Tlemcen 2014.
- [10] Aisa, Emma Llor. Génération de très hautes pressions d'ablation laser et de chocs forts pour l'allumage des réactions de fusion nucléaire. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux, 2017.
- [11] Meftah, Mustapha. Nouveau regard sur quelques caractéristiques physiques du Soleil. LATMOS - Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales. Thèse de doctorat. Paris Saclay, 2017.
- [12] Spagnou, Pierre. Les mystères du temps. De Galilée à Einstein. CNRS, 2017.
- [13] SALMI, Mohamed. Contribution à la quantification de l'irradiation solaire globale en Algérie et applications aux générateurs photovoltaïques. Thèse de doctorat. Université Ferhat Abbas de Sétif 2014.
- [14] Flammarion, Camille. Astronomie populaire. Cambridge University Press, 2014.
- [15] Comins, Neil. À la découverte de l'Univers: Les bases de l'astronomie et de l'astrophysique. De Boeck supérieur, 2016.
- [16] BENSON, Donald. *Le ballet des planètes: De l'élégance mathématique des orbites planétaires*. De Boeck Supérieur, 2014.
- [17] Benharra, Houda. Impact de l'orientation sur la consommation énergétique dans le bâtiment.-Cas des zones arides et chaudes-. Mémoire de magister. Université Mohamed Kheider, Biskra, 2016.
- [18] PIERRARD, Viviane. *L'environnement spatial de la Terre*. Presses université. de Louvain, 2010.

- [19] Lernould, Alain. Le visage qui apparaît dans le disque de la lune: De facie quae in orbe lunae apparet. Presses Universitaires du Septentrion, 2016.
- [20] Hamada, Joël. Effet de la variabilité intra et interspécifique du bois sur les procédés de traitement thermique. Thèse de doctorat. Université de Lorraine, 2016.
- [21] Merlin, Jean-Claude. Comment va la Terre? Climat et réchauffement. Société des Ecrivains, 2013.
- [22] CHABANE, HOUDA. *Etude D'une Cellule Solaire A Base De Structure Pin*. Mémoire de magister. Université de Batna 2, 2017.
- [23] FELLOUS, Jean-Louis et GAUTIER, Catherine. *Comprendre le changement climatique*. Odile Jacob, 2007.
- [24] AZIZ, Abdelhak. Propriétés électriques des composants électroniques minéraux et organiques. Conception et modélisation d'une chaîne photovoltaïque pour une meilleure exploitation de l'énergie solaire. 2006. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier-Toulouse III.
- [25] Borni, Abdelhalim. "Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire." Mémoire de magister, Université de Constantine 2009.
- [26] Benchikh Elhoucine Hanane, ' Simulation numérique de modèle de collecteur Hybride Photovoltaïque/Photothermique', Mémoire de magister, Université de Constantine, Algérie, 2009.
- [27] Samia Harrouni, « Énergie Solaire Photovoltaïque », cours SONELGAZ, Ecole technique de Blida, 2011.
- [28] Zouhair EL JOUAD Regragui, Mohammed, et al. "Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques." Thèse de doctorat de l'Université d'Angers Sous le sceau de l'Université Bretagne Loire 2017
- [29] BELLALA, Djamel. Contribution à l'Optimisation des Systèmes de Conversion d'Energie. Application aux Systèmes Photovoltaïques. Mémoire de magister. Université de Batna 2, 2009.
- [30] Degoulange, Julien. Purification et caractérisations physico-chimiques et électriques de silicium d'origine métallurgique destiné à la conversion photovoltaïque. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2008.
- [31] Gallien, Benjamin. Contraintes thermomécaniques et dislocations dans les lingots de silicium pour applications photovoltaïques. Thèse de doctorat. Université Grenoble Alpes, 2014.
- [32] Champory, Romain. Cellules solaires silicium ultra-minces nanostructurées: conception électro-optique et développement technologique. Thèse de doctorat Université de Lyon, 2016.
- [33] Miquel, Cécile, and Bruno Gaiddon. "Systèmes photovoltaïques: fabrication et impact environnemental." Hespul, Énergie Renouvelables et Efficacité énergétique, Publications Photovoltaïques 27 (2009): 2011.
- [34] BALLIF, Christophe. Cellules solaires en silicium à haut rendement. *Electrosuisse*, 2011, vol. 3, pp. 12-14.
- [35] Skender, Ayoub. Etude et simulation des cellules solaires à triples-jonctions à concentration à base des semi-conducteurs III-V. Mémoire de magister. Université Mouloud Mammeri, 2016.
- [36] Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement le photovoltaïque - module 3 - fonctionnement et technologies Edition novembre 2010

- [37] El Khadimi, A., L. Bachir, and A. Zeroual. "Dimensionnement et Optimisation Technico-Economique d'un Système d'Energie Hybride Photovoltaïque-Eolien avec Système de Stockage'." *Energies Renouvelable* 7 (2004): 73-83.
- [38] B. FLECHE, D. DELAGNES, « Energie solaire photovoltaïque », STI ELT Approche générale, Juin 2007
- [39] Mohammedi, mohammed. Etude et simulation de cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités sous environnement Silvaco. Mémoire de magister. Université de Tlemcen 2012.
- [40] Cédric CABAL, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque", Thèse de doctorat Université Paul Sabatier Toulouse 2008.
- [41] Belhadj Mohammed, Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome, mémoire de magister, Centre Universitaire De Bechar, 2007-2008.
- [42] C. Bernard, J.Chauvin, D. Lebrun, J.F Muraz, P. Stassi « Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection à l'Observatoire Pierre Auger » ,2006.
- [43] Durand-Estèbe, Paul. Systèmes de récupération d'énergie pour l'alimentation de capteurs autonomes pour l'aéronautique. Thèse de doctorat. INSA de Toulouse, 2016.
- [44] A.Menadi Commande Par Les Techniques Intelligentes D'un Système Photovoltaïque Connecté Au Réseau. Thèse de doctorat Université Mohamed Kheider Biskra. 2016.
- [45] MEDJDOUB, Sarra. Etude structurelle des cellules solaires deuxième et troisième génération. Mémoire de master, Université de Tlemcen 2016
- [46] Zaoui, Fares. Utilisation des énergies renouvelables influence de la température sur les performances du module PV. Thèse de doctorat LMD. Université Mohamed Kheider-Biskra, 2016.
- [47] Bakhta, Naama. "La production décentralisée." note de cours USTO MB 2017.
- [48] QUENTIN, Nicolas. Alimentation à découpage hautes performances pour l'aéronautique. 2016. Thèse de doctorat. Université de Lyon.
- [49] KHALEM, Sofiane et GHERBI, Azzedine. Technique MLI aléatoire en Vue de la réduction des perturbations conduites dans les convertisseurs continus-continus et continus-alternatifs. 2016. Mémoire de master Université de Boumerdes
- [50] ITANI, Khaled. Récupération d'énergie pour système intégré moteur roue, application au véhicule électrique. 2017. Thèse de doctorat. Université Paris-Saclay.
- [51] A.Luque, S.Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons Ltd, Canada 2003
- [52] A. Rufer P, Énergie et convertisseurs d'énergie : Hacheurs, Notes de cours Licence EEA. Université de Savoie, 2009
- [53] MAHAMAT, Hassan Bechir. Modélisation des inductances planaires intégrées. 2014. Thèse de doctorat. Université de Saint Etienne.
- [54] Debili, Narimene. "Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompe Photovoltaïque." (2015). Université Frères Mentouri Constantine.

- [55] BOUKLI-HACENE, Omar. Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour meilleure gestion énergétique. 2011. Mémoire de magister. Université de Tlemcen
- [56] MARZOUK, Mounir. Développement de chargeurs intégrés pour véhicules hybrides plug-in. 2015. Thèse de doctorat. Université Grenoble Alpes.
- [57] **O.Yekhlif**, Etude et réalisation d'un hacheur pour système photovoltaïque», mémoire de master, Université Djillali Liabes, Sidi-Bel-Abbès, 2013
- [58] **M.SEBHI, M.NEHARI**, Etude et réalisation d'une commande MPPT pour systèmes photovoltaïques, Mémoire de master, Université Djillali Liabes, Sidi-Bel-Abbès, 2013
- [59] Meekhun, Dariga. Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonome pour l'application aéronautique. Thèse de doctorat. INSA de Toulouse, 2010.
- [60] TEGANI, Ilyes. Optimisation et contrôle d'un micro smart grid utilisant une pile à combustible, des supercondensateurs, des batteries, une éolienne et une source photovoltaïque. 2016. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.
- [61] PILLONNET, Gael. Structures et contrôle d'amplificateurs de puissance et de convertisseurs statiques d'énergie électrique en vue de leur enfouissement. 2016. Thèse de doctorat. INSA Lyon.
- [62] **R.SAYAH**. Etude et dimensionnement d'un système de recharge d'une batterie avec un convertisseur DC/DC pour un générateur photovoltaïque, mémoire de magister, Université Djilali Liabes, Sidi-Bel-Abbès, 2014
- [63] **M.Jbilou, IS.Bousmaha, Z.Dey, L.Nehari, M.Brahami** Simulation and realization of DC-DC boost converter controlled by microcontroller. International Conference on Materials & Energy May 19–22, 2015, Tétouan, Morocco
- [64] Mondiale de la Santé, Organisation, and UNICEF. "Introduction aux systèmes de réfrigération et de congélation à énergie solaire pour les vaccins: guide à l'intention des responsables des programmes nationaux de vaccination." (2016).
- [65] Kininger, Franz, and R. Energiewandlung. "Photovoltaic systems technology." Kassel, Germany: Universität Kassel, Institut für Rationelle Energiewandlung (2003).
- [66] CHERMITTI, Ali, BOUKLI-HACENE, Omar, MEGHEBBAR, A., et al. Design of a library of components for autonomous photovoltaic system under Matlab/Simulink. Physics Procedia, 2014, vol. 55, p. 199-206.
- [67] D.Linden, T.B. Reddy, "Handbook of Batteries, 3rd Edition". Edition McGraw-Hill, INC New-York 2002.
- [68] BENDJAMAA, Ibrahim. Modélisation et commande d'un système De stockage photovoltaïque. 2012. Thèse de doctorat. Université Tlemcen
- [69] GERGAUD, Olivier. Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur. 2002. Thèse de doctorat. École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan.
- [70] Ressources – batterie – solaire Version N°: V.2 / Date de version: Mars 2011, YUASA BATTERIES France Zac des Chesnes Ouest 13 rue du Morellon 38070 Saint-Quentin Fallavier

- [71] Abdelkader Gourbi **Imen Souhila Bousmaha**, Mostefa Brahami, Amar Tilmatine Numerical Study of a Hybrid Photovoltaic Power Supply System. Journal of Power Technologies, volume 96 N° (2) (2016) pp 137-144 ISSN 2083-4187 <http://papers.itc.pw.edu.pl/index.php/JPT/article/view/841/715>
- [72] AOUF, Anouar Essadate. Modélisation et simulation du Nano-transistor de puissance. Thèse de doctorat. Université de Batna 2, 2009.
- [73] FORGEZ, Christophe. "Contribution à la modélisation et à l'identification temps réel pour les systèmes à énergie électrique embarquée." Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université de Technologie de Compiègne (2009).
- [74] Ndoye, Souleymane, et al. "Modélisation et simulation sous Matlab/Simulink de la chaîne d'alimentation d'une station relais de télécommunications en énergie solaire photovoltaïque dans une zone isolée du réseau électrique." Journal des Sciences 9.2 (2009): 45-55.
- [75] SELLAMNA, Hemza. Etude et Réalisation d'un Système de Pompage Solaire à Base d'un Moteur Monophasé, Gouverné par un Microcontrôleur Pic, pour Utilisation Domestique. 2015. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.
- [76] HASSAD, Mohamed Amine. Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques. 2016. Thèse de doctorat. Université de Sétif <http://dspace.univ-setif.dz:8888/jspui/handle/123456789/988>
- [77] Chauchat, Bertrand. Chargeur de batteries intégré pour véhicule électrique. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 1997.
- [78] Bühler, Hansruedi. Electronique de puissance. Vol. 15. PPUR Presses polytechniques, 1993.
- [79] Bendaha, Yesma. "Polycopié de Travaux Pratiques Electronique de Puissance Avec PowerSim." (2016). USTO MB
- [80] YAHYA, A. Ould Mohamed, MAHMOUD, A. Ould, et YOUM, I. Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque. Revue des Energies Renouvelables, 2008, vol. 11, no 3, p. 473-483.
- [81] Camara, Mohamed Ansoumane. Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs. Thèse de doctorat. Université Paris-Est, 2011.
- [82] GATEAU, Guillaume. Contribution à la commande des convertisseurs statiques multicellulaires série: commande non linéaire et commande floue. 1997. Thèse de doctorat. Toulouse, INPT.
- [83] MNIF, Faïcal. Étude et réalisation des lois de commande par mode de glissement et par approche géométrique: application à un onduleur de tension monophasé. 1991. Thèse de doctorat. Université du Québec à Trois-Rivières.
- [84] ZAROOUR, Laid. « Etude Technique D'un Système D'énergie Hybride Photovoltaïque-Eolien Hors Réseau ». Thèse de doctorat. Université de Constantine. 2010.
- [85] L.Nehari, MN.Brahami, **I.S.Bousmaha**, M.Brahami. Study and realization of a single-phase inverter based micro controller for photovoltaic system. 2nd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC'14). October 17-19, 2014 Ouarzazate, Morocco
- [86] S.Bechekir **IS.Bousmaha**, M.Brahami, Djaffar Ould Abdeslam Realization of an inverter with PWM command for photovoltaic system The 5th International Conference on Electrical Engineering- ICEE'17 October 29th to 31st, 2017, Boumerdes, Algeria

- [87]. Violaine Didier, Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques, Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des Performances. Rapport, HESPUL, avril 2007
- [88] Zerhouni, F. Z., et al. "Recherche du maximum de puissance d'un générateur photovoltaïque." ACTA ELECTROTEHNICA 53.12 (2012): 130-133.
- [89] LEARRETA, Alain Bilbao, ALONSO, Corinne, et CABAL, Cedric. Réalisation de commandes MPPT numériques. PFE CNRS 2006
- [90] BOUCHARD, Sébastien. « Conception d'un nouveau type de concentrateur solaire réduisant le besoin de suivi du soleil ». 2016. Thèse de doctorat. Université Laval.
- [91] SAHNOUN, Mohamed Aymen. Contribution à la modélisation et au contrôle de trajectoire de Trackers photovoltaïques à haute concentration (HCPV). 2015. Thèse de doctorat. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM.
- [92] TOURASSE, Guillaume. Mesure et Analyse Statistique Tout Temps du Spectre du Rayonnement Solaire. 2016. Thèse de doctorat. Université de Lyon.
- [93] BENAMRA, Mostefa Lamine. Intégration des systèmes solaires photovoltaïques dans le bâtiment: Approche architecturale. 2013. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider Biskra.
- [94] BOUSHABA, Pr Abdellah. GEODYNAMIQUE EXTERNE (M10) Sciences de la Terre et de l'Univers.
- [95] BENOÎT, ROBYNS, ARNAUD, DAVIGNY, BRUNO, FRANÇOIS, et al. Production d'énergie électrique à partir des sources renouvelables (Coll. Sciences et technologies de l'énergie électrique). Lavoisier, 2012.
- [96] BENZAHIA, Ayoub. Réalisation d'un prototype d'un système de poursuite solaire. Thèse de maîtrise.
- [97] BENCHERIF, Mohamed. Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension. 2014. Thèse de doctorat.
- [98] ABBEZZOT, Cédric. Système inertiel de stockage d'énergie couplé au générateur photovoltaïque et piloté par un simulateur temps réel. 2014. Thèse de doctorat. Université de Corse.
- [99] ABDELAZIZ, Hamzaoui, et al. Optimisation de la production de l'électricité renouvelable pour un site isolé. 2013. Thèse de doctorat. Reims.
- [100] FELLAH, Boumediene. Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah. 2012.
- [101] AMIR, FATAH. Etude du fonctionnement des centres de production dans un système de marché libre de l'énergie électrique. 2012. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.
- [102] BENJEMAA, Abdelhak. Coopération méta heuristique et logique floue pour le dimensionnement d'une installation hybride. 2015. Thèse de doctorat. Reims.
- [103] DJEDDOU, BOUTHAINA. L'impact de la configuration urbaine sur l'exploitation du gisement solaire. Cas de la ville de Biskra. 2016. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.
- [104] MAGAUD, Marc et OCHOA, Daniel. La relance de la production d'électricité «verte» aux États-Unis: une rencontre entre Prométhée... et Keynes. In : Annales des Mines-Réalités industrielles. Eska, 2009. pp. 96-103.

- [105] MOKEDDEM Ali & TAMALI Mohammed Etude et dimensionnement d'un suiveur solaire pour la génération D'énergie PV, International conference on electrical Engineering 17-19 novembre 2013 Bechar University
- [106] L.Nehari Encadreur M.Brahami Etude et réalisation d'un système de guidage automatique pour système photovoltaïque PFE master UDL SBA 2012
- [107] **Aggab.K, Khatir.M, Brahami.M** Realisation of solar tracker prototype intended for a photovoltaic generator. 3ed International renewable and sustainable energie conference, IRSEC'15. 10-13 december Marrakech and Ouarzazate, Morocco
- [108] **FZ Boudjella, S.Louhadj**, Réalisation d'un suiveur solaire PFE Master UDL SBA 2017
- [109] MN.Brahami, S.Hadjeri, S.Nemmiche, M.Brahami, A.Tilmatine. Experimental investigation of a PV solar generator for supplying water treatment process. International journal of environment studies. Vol 71, N° 1 pp 207-221 2015 ISSN 0020-7233 ISI THOMSON <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207233.2014.973667>
- [110] **IS.Brahami** M.Brahami A.Tilmatine MA.Senoussaoui Optimization of a Photovoltaic Generator with a New Solar Tracker, Journal of Electrical Engineering: Volume 17 / 2017 - Edition 3: pp 1-7 ISSN 1582-4594 <http://www.jee.ro/covers/art.php?issue=WK1477256878W580d26ae746c3>
- [111] S.Zeghoudi M.Bourahla, Mesures et expérimentation d'un générateur photovoltaïque de 810 watts PFE Master TDEE, UDL SBA, 2016
- [112] PVSYST V 5.05 logiciel de dimensionnement des panneaux solaires.

Résumé

L'énergie fournie par le panneau PV dépend fortement de la quantité d'éclairement solaire reçue par ce dernier. Cette quantité dépend de l'orientation du panneau par rapport au soleil "Les rayons solaires doivent être perpendiculaire au panneau PV".

L'étude de la variation journalière de la position du soleil par rapport à un point fixe sur la terre est importante pour entamer l'étude et la réalisation du système mécanique de poursuite solaire et de son circuit électrique de commande et de contrôle.

L'objectif de cette thèse est la réalisation d'un générateur solaire muni d'un suiveur solaire à un seul axe afin d'optimiser l'énergie fournie par les panneaux photovoltaïques dans le but de maximiser la quantité d'éclairement absorbée en suivant le mouvement du soleil pendant la journée.

Après réalisation du suiveur (de faible puissance) on le monte sur le générateur PV à travers un multiplicateur d'effort. Ceci permet un gain considérable d'énergie.

Les mesures réalisées sur le générateur PV montrent que la quantité d'énergie fournie par un générateur photovoltaïque en mode suiveur de soleil est de 30% à 40% supérieure à celle qui est fixe (orientée plein sud et inclinée d'un angle égal à la latitude du site).

Mots clés: Générateur Photovoltaïque, Puissance, Température, Eclairement, Inclinaison, Orientation, Suiveur solaire, Rendement, Régulateur, Onduleur.

ملخص

تعتمد الطاقة المولدة من اللوحة الشمسية الكهروضوئية بقوة على كمية الإشعاعية التي تستقبلها هذه الأخيرة. كما أن هذه الكمية مرتبطة بمدى توجيه اللوحة نحو الشمس "الإشعاع الشمسية يجب أن تكون شاقولية على اللوحة الكهروضوئية".

دراسة التغير اليومي لوضعية الشمس بالنسبة لنقطة ثابتة على الأرض مهم للبدأ في دراسة وتحقيق النظام الميكانيكي لتتبع الشمس ودارة التحكم الكهربية الخاصة به.

الهدف من هذه الأطروحة هو تحقيق مولد كهروضوئي مزود بجهاز تتبع لإشعاع الشمس ذو محور واحد من أجل ترشيد الطاقة المنتجة من طرف اللوحة الكهروضوئية وتحقيق أقصى كمية من الإشعاع الساقط وذلك بتعقب حركة الشمس خلال اليوم.

بعد انشاء المتتبع (ذو القدرة المنخفضة) نقوم بتركيبه على المولد الشمسي من خلال مضاعف قوة. هذا يسمح بتوفير معتبر للطاقة.

نتائج القياسات التي أجريت على المولد الكهروضوئي أظهرت أن كمية الطاقة المنتجة من طرف المولد في وضع متتبع شمسي أكبر ب30% حتى 40% منه وهو ثابت (موجه بالكامل نحو الجنوب ومائل بزاوية مساوية لخط عرض الموقع).

الكلمات المفتاحية:

مولد كهروضوئي، القدرة الإشعاعية، درجة الحرارة، الإشعاع الشمسي، ميل الوحدات الشمسية، الاتجاه، المتتبع الشمسي، المردود، منظم، العاكس.