



Université ABBES LAGHROUR Khenchela



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Industriel

جامعة عباس لغرور خنشلة

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم الهندسة الصناعية

N° Série :

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master2

Filière : Electrotechnique Spécialité : commande électrique

THEME

Etude et réalisation d' un système de commande photovoltaïque

Réalisé par :

- *KEZIZ Belkacem*

- *BOUSSALEM Rami*

Soutenu le / / 2023 *Devant le jury composé de:*

Madame. Aourag Salima

Président

Université Abbes Laghrou-Khenchela

Mr. Boumaaraf abdelaali

Encadreur

Université Abbes Laghrou-Khenchela

Madame.Bessam bessma

Examineur

Université Abbes Laghrou-Khenchela

Promotion 2022/2023

Remerciements :

Avant tout nous remercions « ♪ »

On dit souvent que le trajet est aussi important que la destination. Les dernières Trois années à l'université de abess laghrour kenchela nous ont permis de bien comprendre la signification de cette phrase toute simple.

Nous tenons à remercier énormément le bon dieu de nous avoir donné la force et le courage d'accomplir ce travail.

*On remercie notre promoteur Mr **Boumaaraf abdelali** pour son encadrement, sa compréhension et sa gentillesse durant toute la période de la préparation de notre mémoire.*

Nous tenons aussi à remercier tous nos enseignants et membre de l'administration de département électronique.

On remercie également les membres du jury d'avoir accepté de juger ce modeste travail.

En fin, nous remercions tous les membres de la section << électrotechnique >> ainsi les amis de toute la faculté.

Dédicace :

À mes chers parents pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs (Riham et Salma) pour leurs encouragements constants et leur soutien moral,

Je dédie ce travail à ma fiancée rima

A mes chers frères (Samir et Amer) pour leur soutien et leurs encouragements,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire, A mes amis (Allawa , AbdelHafid et tous les amis)

Que ce travail soit l'accomplissement de vos désirs tant attendus, et le fruit de votre soutien continu,

Keziz Belkacem

Dédicace

je dédie ce travail

A ma mère ,pour son amour,ses encouragements et ses sacrifices

*A mon père ,pour son soutien, son affection et la confiance qu'il me
accord*

*A mes très chère frères, chihab et souhaib et abd el moumen et mes
belle soeur sajida*

A tous les membres de ma famille A tous mes amis

ET tous ceux qui m'aiment.....

Rami Boussalem

Résumé :

Au cours des dernières décennies, la contribution des énergies renouvelables à l'approvisionnement électrique mondial a montré tout son potentiel, tant une structure écologique elle-même décentralisée.

Dans cette thèse, nous avons discuté des généralités sur le système photovoltaïque, de sorte que nous avons pu définir les types de panneaux solaires et leurs composants, puis nous nous sommes familiarisés avec les techniques de mppt et le rôle du pwm, après quoi nous avons approfondi le convertisseur DC/AC

Nous avons expliqué le moteur asynchrone, puis nous l'avons conclu en réalisant une simulation de notre système et en l'appliquant à la réalité.

Listes des tableaux :

Tableau N°	Titre du tableau	Page
Tableau . II.1	Paramètres de simulation de l'onduleur	37
Tableau . III. 1	Configuration du brochage de ir 2104	50

Listes des figures :

Figure N°	Titre de la figure	Page
Figure I.1	Mouvement de la terre.	2
Figure I.2	Le rayonnement solaire	3
Figure I.3	Système solaire photovoltaïque	4
Figure I.4	Module PV.	5
Figure I.5	Batteries / stockage de l'énergie solaire.	7
Figure I.6	Cellule photovoltaïque.	8
Figure I.7	Types de cellules photovoltaïques.	9
Figure I.8	Structure et diagramme de bande d'une cellule PV sous éclairement.	10
Figure I.1 a	Système photovoltaïque.	11
Figure I.1 b	Système photovoltaïque plus détaillé	11
Figure I.9	Schéma d'un système autonome (hors-réseau).	12
Figure I.10	schéma solaire photovoltaïque injection réseau.	12
Figure I.11	Constituants d'un générateur PV.	13
Figure I.12	Constituants d'un module photovoltaïque.	14
Figure I.13	Exemple de caractéristiques (I-V et P-V) d'un module.	14
Figure I.14	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.	15
Figure I.15	Courbe courant -tension d'une cellule photovoltaïque.	16
Figure II.1	Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.	20
Figure II.2	Principe de la commande MPPT	20
Figure II.3	Algorithme de la Tension Constante.	23
Figure II.4	Algorithme du courant constant	24
Figure II.5	Recherche du PPM par la méthode (P&O).	25
Figure II.6	l'algorithme de P&O classique.	26
Figure II.7	Divergence de la méthode P&O.	27
Figure II.8	structure de base de la commande floue	28
Figure II.9	a période du signal de la pwm	28
Figure II.10	rapport cyclique de la pwm	29
Figure II.11	filtrage de signal de pwm	30
Figure II.12	Onduleur de tension triphasé	31
Figure II.13	bras de commutation d'un onduleur triphasé	31
Figure II.14	Onduleur de tension triphasé à deux niveaux	32

Figure II.15 Schéma de simulation d'un onduleur triphasé	33
Figure II.16 principe de la MLIST	34
Figure II.17 Tension d'onduleur (phase (a), phase (b), phase (c))	35
Figure II.18 constitution de la machine asynchrone	36
Figure II.19 champ magnétique dans bobine	36
Figure II.20 le courant de bobine	37
Figure II.21 trois champs magnétique	37
Figure II.22 Les 3 enroulements statoriques	37
Figure II.23 Le rotor de moteur asynchrone	38
Figure II.24 La bobine de moteur asynchrone	39
Figure II.25 Le branchement des bobines	39
Figure II.26 Branchement de moteur asynchrone	40
Figure II.27 Plaques signalétiques	41
Figure II.28 les normes de moteur asynchrone	42
Figure II.29 Bilan des puissances	42
Figure II.30 Caractéristique du moteur asynchrone	43
Figure II.31 Liaison avec le réseau EDF	43
Figure III1 transistor mosfet irf740.	45
Figure III2 symbole électrique de transistor mosfet.	45
Figure III3 STRUCTURE DU MOSFET.	46
Figure III4 La Carte Arduino Uno	47
Figure III5 IR2104	49
Figure III6 Modèle de simulation de la chaine de conversion photovoltaïque	50
Figure III7 Le courant statorique (i_s) en fonction du temps.	51
Figure III8 Le courant rotorique (i_a) en fonction du temps	51
Figure III9 Le couple électromagnétique en fonction du temps	52
Figure III10 illustre la tension V_s après le filtre LC	52
Figure III11 illustre la tension V_i	52
Figure III12 La vitesse rotorique en fonction du temps	53
Figure III13 Résultat de simulation du signal du courant d'aimantation du moteur	53
Figure III14 le système de photovoltaïque sur le proteus 8	55
Figure III15 Le signal de la PWM dans proteus 8	56
Figure III16 Réalisation pratique de système photovoltaïque	57
Figure III17 Réalisation final pratique de système photovoltaïque	57
Figure III18 Signal de notre système	58
Figure III19 Signal final	58

Table des matières :

Introduction Générale	1
Chapitre I Généralités pour le système de photovoltaïque	
I. Introduction.....	2
I .1 L'énergie solaire.....	2
I .2. Rayonnement solaire	2
I .2.1 Le rayonnement direct.....	2
I .2.2 Le rayonnement diffus.....	3
I .2.3 Le rayonnement réfléchi.....	3
I .3. Energie solaire photovoltaïque.....	3
I .3.1. L'effet photovoltaïque.....	4
I .3.2 Historique : Découverte de l'effet photovoltaïque	4
I .3.3 Les éléments d'un système photovoltaïque	5
I .3.4.1 Les modules photovoltaïques	5
I .3.4.2 Stockage.....	6
I .3.4.3 Batterie	6
I .3.4.4 Régulateur	7
I .3.4.5 P rincipe de son fonctionnement	7
I .4. La cellule photovoltaïque	7
I .4.1 Les différents types de cellules	8
I .4.1.1 Les cellules à silicium monocristallin.....	8
I .4.1.2 Les cellules à silicium poly-cristallin	8
I .4.1.3 Les cellules amorphes.....	8
I .4.1.4 Les cellules multi-jonctions	9

I .4.1.5 Les cellules organiques	9
I .4.1.6 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	9
I .4.1.7 Fabrication des cellules photovoltaïques.....	10
I .5 Définition d'un système photovoltaïque (PV).....	10
I .6 Classification des systèmes PV.....	11
I .6.1. Systèmes autonomes.....	11
I.6.1.1. Définition.....	11
I .6.2 Systèmes PV à injection aux réseaux.....	12
I .6.2.1. Définition d'un système PV raccordé au réseau.....	12
I .7 Constitution des champs PV.....	13
I .7.1 Modules.....	13
I .7.1.1 Constituants.....	13
I.7.2 Caractéristiques d'un module.....	14
I.8 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	15
I .9. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	17
I .9.1 Avantages du photovoltaïque.....	17
I .9.2 Inconvénients du photovoltaïque.....	17
I .10 Conclusion	17

Chapitre II La commande de système photovoltaïque

II.1 Introduction.....	19
II.2 définition de régulateur MPPT.....	19
II.2.1 Commande pour la Recherche du Point de Puissance Maximale (MPPT).....	19
II.2.2 Principe De La Commande MPPT.....	19
II.3 Classification Des Commandes MPPT.....	20

II.3.1 Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée.....	20
II.3.2 Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche	21
II .4Les Algorithmes MPPT Les Algorithmes MPPT	22
II .4.1Les Algorithmes MPPT Approche de la Tension Constante (CV, Constant Voltage) ..	22
II .4.2Les Algorithmes MPPT Approche Du Courant Constant (Constant Curent)	23
II .4.3Les Algorithmes MPPT Perturbation Et Observation (P&O, Perturbe And Observe)...	24
II .4.4Les Algorithmes MPPT La Commande M Flou.....	27
II .5La PWM	28
II .5.1définition de régulateur PWM: II.8.1 définition de régulateur PWM.....	28
II .5.2INTÉRÊT.....	29
II .5.3FRÉQUENCE	29
II .5.4Remarques	30
II .5.5RAPPORT CYCLIQUE.....	30
II .6l'onduleur	31
II .6.1définition de l'onduleur	31
II .7Les fonctions de conversion	33
II .8Modulation de largeur d'impulsions	33
II .9Avantages de la commande MLI	35
II .10Le moteur asynchrone triphasé.....	35
II .10.1Définition de le moteur asynchrone triphasé.....	35
II .10.2Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone.....	36
II .10.3Le bobinage.....	38
II .10.3.1Branchement étoile ou triangle.....	40
II .11Plaques signalétiques.....	41

II. 2 Puissance et rendement.....	42
II .12.1 Bilan des puissances.....	42
II .13 Caractéristique du moteur asynchrone.....	43
II .14 Liaison avec le réseau EDF.....	43
II .15 Conclusion.....	44

Chapitre III Simulation et réalisation de système photovoltaïque

III .1 Introduction.....	45
III .2 les composants.....	45
III.2.1 Transistors MOSFET IRF740.....	45
III.2.2 STRUCTURE DU MOSFET.....	46
III.2.3 La carte Arduino Uno.....	46
III.2.3.1 Caractéristiques de la carte Arduino Uno R3.....	47
III.2.3.2 Les avantages de la carte Arduino Uno.....	48
III.2.4 IR2104.....	48
III.2.4.1 IR2104 Configuration du brochage.....	48
III.2.4.2 Caractéristiques et spécifications.....	48
III. 3 partie simulation.....	49
III.3.a Schéma complet du système sur MATLAB/Simulink.....	49
III.3.b . Résultats de simulation sous MATLAB/Simulink.....	51
III.3.c .Schéma complet du système sur proteus .8.....	54
III.3.d Résultats de simulation sous proteus.8.....	56
III.4 Partie pratique.....	56
III. .4.1 les résultats de partie pratique.....	58
III.5. Conclusion.....	59

Conclusion générale.....	60
Annexe	63
Références Bibliographies	65

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion du rayonnement solaire en énergie électrique directement utilisable. Cette conversion d'énergie est réalisée par la cellule dite photovoltaïque (PV) composée de matériaux semi-conducteurs, d'où le nom de cette conversion "effet photoélectrique". Le principal problème des applications photovoltaïques est de savoir comment contrôler et exploiter cette énergie, et c'est pourquoi dans la plupart des cas, nous recourons à des techniques telles que l'utilisation d'un régulateur PWM, ce qui facilite le processus de contrôle de l'énergie photovoltaïque de sorte qu'il nous oblige à l'exploiter comme autant que l'énergie

L'objectif principal de notre thèse est l'étude, la conception et la mise en œuvre pratique du Système photovoltaïque. Ce dernier intègre un régulateur PWM combiné à l'algorithme MPPT pour extraire le maximum de puissance disponible en sortie du générateur photovoltaïque.

Pour mener à bien ce projet, nous avons maintenant révisé cette thèse en trois chapitres :

Le premier chapitre : Couvre les généralités du système photovoltaïque, présentant les gammes de cellules et les modes de fonctionnement.

Le deuxième chapitre est consacré à présenter les composants de la cellule, définir les algorithmes MPPT et le régulateur PWM, connaître le moteur asynchrone, sans oublier le convertisseur DC-AC et expliquer son principe de fonctionnement.

Le troisième chapitre introduit la première partie, qui explique comment simuler sur les logiciels Proteus et Matlab SIMULINK pour arriver aux résultats, puis nous l'appliquons dans la deuxième partie, qui est la partie pratique, jusqu'à ce que nous terminions notre projet sur le terrain.

Enfin, nous tirons tous notre travail d'une conclusion générale. [1]

Chapitre I

*Généralités pour le
système de
photovoltaïque*

I. Introduction :

Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables : hydraulique, géothermique, éolienne, biomasse et photovoltaïque. A l'exception de la géothermie qui provient de la chaleur des profondeurs de la terre, ces sources d'énergie proviennent directement ou indirectement du soleil. Ils sont donc disponibles indéfiniment tant qu'ils s'allument. L'énergie photovoltaïque est la dernière des énergies renouvelables, elle est non polluante, flexible et fiable. A travers ce chapitre, nous espérons répondre aux questions fondamentales qui se posent pour comprendre ce qu'est l'énergie photovoltaïque, et son principe de fonctionnement ; L'élément de base utilisé dans cette conversion et ses types ; Dans cette section, nous aborderons les types de cellules photovoltaïques et leur principe de fonctionnement. [1]

I.1 L'énergie solaire :

Le soleil est une étoile située à 150 millions de km de la Terre. Le rayon du Soleil est de 1 399 000 km, il se trouve donc à plus de 100 fois de la Terre. Alors qu'il se compose d'hydrogène et d'hélium. Décrite comme la Terre tourne autour du Soleil dans un plan appelé "plan de l'écliptique", la Terre tourne sur elle-même, selon un axe incliné de 23,270 degrés par rapport au plan de l'écliptique. [1]

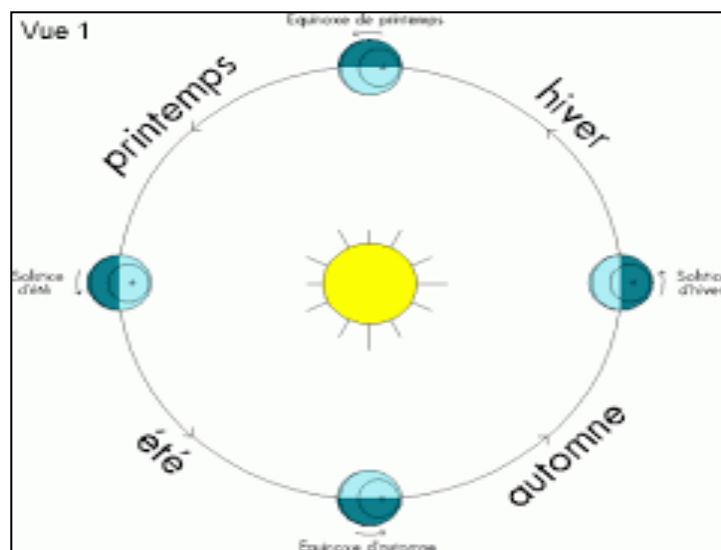


Figure I.1: Mouvement de la terre

I.2. Rayonnement solaire

Le soleil tire son énergie de réactions thermonucléaires se produisant dans son noyau. L'énergie émise par le soleil est sous forme d'ondes électromagnétiques dont l'ensemble forme le rayonnement solaire. En traversant l'atmosphère, le rayonnement va subir des transformations par absorption et par diffusion, on distingue pour cela.

I.2.1 Le rayonnement direct :

Les rayons du soleil atteignent le sol sans subir de la modification (sans diffusion par l'atmosphère).

Les rayons restent parallèles entre eux. I.2.2 Le rayonnement diffus :

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire rencontre des obstacles tels que les nuages, la poussière, etc. Ces obstacles ont pour effet de repartir un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux dans toutes les directions.

I.2.3 Le rayonnement réfléchi :

C'est le résultat de la réflexion des rayons lumineux sur une surface réfléchissante par exemple :

la neige ; cette réflexion dépend de l'albédo (pouvoir réfléchissant) de la surface concernée.

Le rayonnement global est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre la figure suivante :[2]

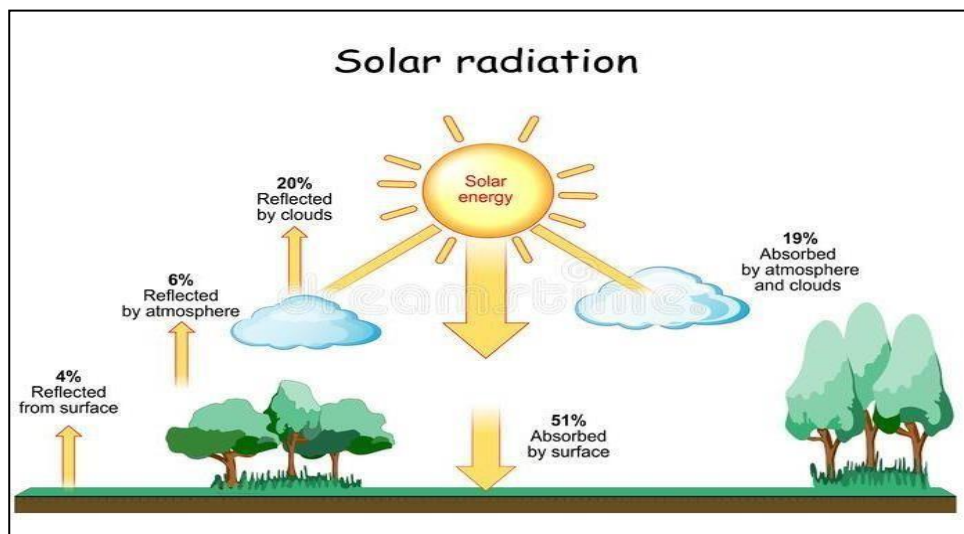


Figure I.2: Le rayonnement solaire.

I.3. Energie solaire photovoltaïque :

l'énergie solaire photovoltaïque a fait l'objet d'un grand intérêt ces dernières années.

Il est basé sur l'effet photoélectrique. Cela permet de créer un courant électrique continu à partir du rayonnement électromagnétique (Fig. I.2). Cette ressource présente donc l'avantage d'être inépuisable et utilisable en tout point de la région.

Les modules photovoltaïques sont à la base des cellules photovoltaïques à base de silicium sur la capacité à convertir les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans les semi-conducteurs. Ainsi l'énergie sous forme de courant continu est directement utilisable.

Dans un isolant électrique : Les électrons d'une substance ne sont pas des atomes et ne peuvent pas être remplacés.

Dans un conducteur électrique (par exemple un fil de cuivre), les électrons sont totalement dépourvus de circularité et permettent au courant de circuler.

Dans les semi-conducteurs : la situation est intermédiaire, les électrons dans le matériau ne peuvent être circulaires que s'ils sont alimentés en énergie pour les libérer de leurs atomes.

Lorsque la lumière pénètre dans ce dernier, ces photons fournissent une énergie qui permet aux électrons de se déplacer, il y a donc un courant électrique sous exposition à la lumière. [3]

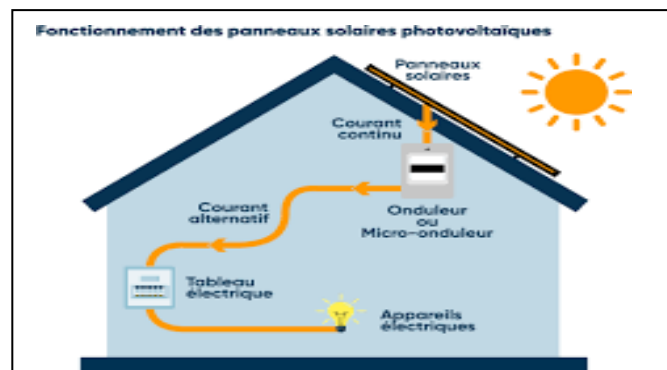


Figure I.3: Système solaire photovoltaïque

I.3.1. L'effet photovoltaïque :

Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par le sigle « PV », a été formé à partir des mots « photo » un mot grec signifiant lumière et « Volta » le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque est la conversion

directe de l'énergie solaire en électricité.

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 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 et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure.

I.3.2 Historique : Découverte de l'effet photovoltaïque :

Le mot photovoltaïque vient de mot grec "photo" qui signifie la lumière et voltaïque du physicien italien "Alessandro volta".

L'effet photovoltaïque a été découvert pour la première fois en 1939 par le savant Antoine Becquerel. Il a constaté que certains matériaux pouvaient produire de petites quantités d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière.

- * En 1873, l'ingénieur américain "Willoughby Smith" découvre les propriétés photosensibles du sélénium.
- * En 1877, "W.G.Adam" et "R.E.Day" expliquent l'effet photovoltaïque du sélénium
- * En 1883, "Charles Frits" construit la première cellule en sélénium et or. Elle atteint un rendement d'environ 1%.
- * En 1905, "Albert Einstein" publie sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière. Cet article lui vaudra le prix Nobel de physique en 1922.
- * En 1954, Les chercheurs américains "Gerald Pearson", "Derry Chaplin" et "Calvin Fuller" travaillent pour les laboratoires Bell mettent au point une cellule PV en silicium. Les premières applications ont eu lieu dans les années 60 aux équipements des satellites spatiaux (les américains lancent en 1954 le satellite Vaguer qui est alimenté par des piles photovoltaïque ayant un rendement 9%.

- * Puis à partir de 1970, l'utilisation terrestre est pratiquée sur des sites isolés.
- * Dans les années 1980, on assiste à la mise en place des premières centrales photovoltaïques.[3]

I.3.3 Les éléments d'un système photovoltaïque :

Afin de bien comprendre le fonctionnement d'un système photovoltaïque, il est utile d'analyser les principaux composants. Les éléments d'un système photovoltaïque dépendent de l'application considérée.

Il existe plusieurs composants d'un système photovoltaïque :

- Modules.
- Batteries.
- Régulateurs de charge.
- Convertisseurs.
- Générateurs.
- Stockage. [1]

I.3.4.1 Les modules photovoltaïques :

Un module photovoltaïque est un générateur électrique de courant continu lorsqu'il est exposé à la lumière. Le module photovoltaïque est constitué d'un cadre rigide le plus souvent en aluminium permettant la fixation et d'une vitre transparente en verre trempé sur le dessus.

A l'intérieur se trouve un ensemble de cellules photovoltaïques reliées électriquement entre elles. En effet ce sont elles qui génèrent le courant. Elles sont assemblées en série ou en parallèle à l'intérieur du module afin de cumuler leur puissance et de les rendre plus résistantes à l'environnement externe.[3]



Figure I.4: Module PV.

I.3.4.2 Stockage :

Le stockage assure deux fonctions principales :

Il permet de satisfaire les besoins en énergie électrique malgré le caractère aléatoire et discontinu de l'énergie solaire (rythme jour/nuit, variation en fonction des heures du jour et des saisons).

Outre sa fonction de stockage d'énergie, il assure un rôle de tampon, entre la production et l'utilisation en fixant la tension du système. Celle-ci reste dans la zone de fonctionnement optimal (fonction d'adaptation d'impédance).

Le coût élevé de ce type d'accumulateurs (par rapport aux accumulateurs au plomb) en limite l'utilisation pour les mini et micro-puissances. Le stockage est représenté par des batteries, disposées en série dont le nombre définirait la tension de fonctionnement et la capacité de stockage désirées.

La durée de vie des accumulateurs dépend en général de leur condition d'utilisation, pour ces deux types des batteries la durée de vie est de 10 à 15 ans, mais à une condition essentielle, c'est de maintenir leur état de charge supérieur à 50 %.

I.3.4.3 Batterie :

Il existe trois grandes utilisations pour les accumulateurs :

- La batterie de démarrage.
- La batterie de traction.
- La batterie stationnaire.

Une batterie n'est pas seulement caractérisée par ses dimensions, son nombre d'éléments et sa capacité, mais doit répondre à différents critères :

- Durée de la décharge.
- Régime de décharge.
- Aptitude à la recharge.
- Température d'utilisation.
- Résistance mécanique.

–Fréquence des adjonctions d'eau distillée.

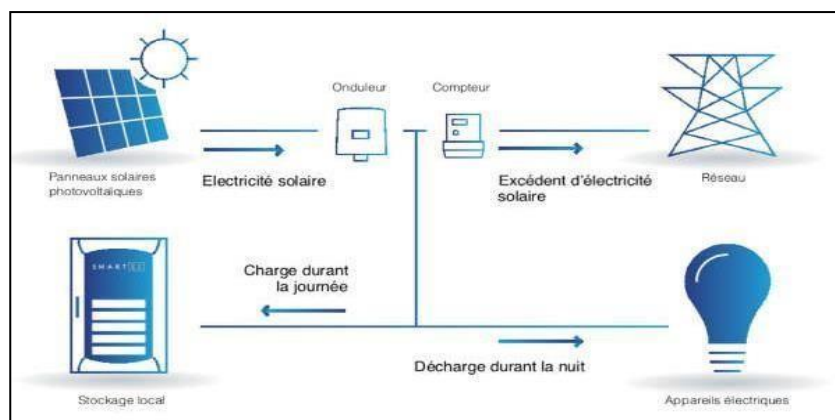
–Entretien.

–Durée de vie envisagée.

Il y a parfois contradiction dans les exigences, nécessitant alors un compromis ; c'est le cas de la batterie solaire à laquelle on demande des performances de batterie de traction et de batterie stationnaire :

Batterie de traction, parce qu'on lui demande un cycle journalier de décharge (pas toujours suivi d'une recharge).

Batterie stationnaire, parce qu'on lui demande de stocker une énergie et de la restituer en cas de coupure secteur, qui sera le non-enseillement.[3]



I .3.4.4 Régulateur : Figure I.5 : Batteries / stockage de l'énergie solaire.

- Le régulateur assure deux fonctions principales :
- La protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes.
- L'optimisation du transfert d'énergie du générateur PV à l'utilisation.

I.3.4.5 Principe de son fonctionnement :

La densité de l'électrolyte de la batterie est théoriquement un excellent indicateur d'état de charge, mais souvent cet indicateur ne prend sa valeur caractéristique que plusieurs jours après sa charge.[3]

I.4. La cellule photovoltaïque :

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 photovoltaïques sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs qui sont capables de conduire l'électricité ou de la transporter. Ils sont composés d'un matériau semi conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique (effet photovoltaïque).

Nous nous sommes donc intéressés au fonctionnement de ces cellules ainsi qu'à leur rendement afin de découvrir l'efficacité de ce système.[4]



Figure I.6 : Cellule photovoltaïque.

I.4.1 Les différents types de cellules :

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs: de sulfure de cadmium (CDs), de tellure de cadmium (CdTe), de Germanium (Ge), de sélénium (Se) ou d'arséniure de gallium (GaAs). Le silicium est actuellement le semi-conducteur le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature. En effet, il existe plusieurs types de cellules photovoltaïques dont les plus importants sont les suivantes :

I.4.1.1 Les cellules à silicium monocristallin :

Les cellules photovoltaïques en silicium monocristallin sont formées d'un seul cristal. Elles sont en général d'un bleu uniforme.

❖ **Avantage :**

–Elles permettent d'obtenir des rendements élevées (rendement entre 13 a 17%).

❖ **Inconvénients :**

–Leur cout est très élevé.

–Rendement faible sous un faible éclaircissement.

I.4.1.2 Les cellules à silicium poly-cristallin :

Elles sont constituées de plusieurs cristaux .la cellule a un aspect bleuté mosaïque (pas uniforme). Leur rendement est de 11 a 15%.

❖ **Avantage :**

–Un bon rendement, mais cependant moins bon que pour les cellules monocristallins.

–Elles offrent actuellement un bon rapport qualité/prix.

❖ **Inconvénients :**

–Rendement faible sous un faible éclaircissement.

I.4.1.3 Les cellules amorphes :

Le silicium est utilisé en couche mince, il n'est pas cristallisé. Il est déposé sur une plaque de verre. Ce type de cellule on le trouve le plus souvent dans les petits produits de0

consommation (montre, calculatrice)

❖ **Avantage :**

- Moins cher que les autres.
- Fonctionnement avec un éclairage faible.

❖ **Inconvénients :**

- Rendement faible.
- Performances qui diminuent avec le temps, durée de vie courte.

I.4.1.4 Les cellules multi-jonctions :

Les cellules multi jonctions sont constituées de différentes couches qui permettent d'absorber la majorité de spectre solaire. Mais ces cellules ne sont pas commercialisées.

I.4.1.5 Les cellules organiques :

Encore au stade de la recherche, cette nouvelle technologie permet à présent la production de cellules solaires organiques légères, flexibles sur une grande surface et moins chères à produire.

Les cellules PV organiques sont de trois types ; moléculaire, polymère et hybride.[1]

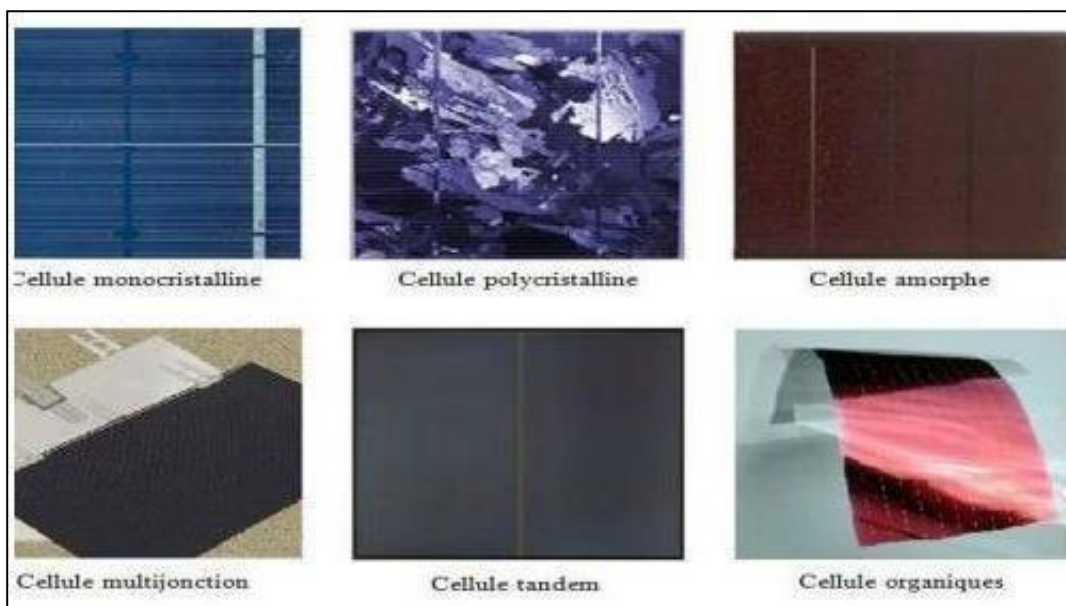


Figure I.7: Types de cellules photovoltaïques.

I.4.1.6 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs. La figure I.8 montre le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque avec les principales régions (Emetteur, Zone de Charge d'Espèce et Base) dans lesquelles les photons incidents peuvent créer des porteurs libres. Le comportement de ces porteurs libres diffère suivant la région de leur création. Dans les zones électriquement neutres (p) et (n), les porteurs minoritaires générés par les photons, diffusent ceux qui atteignent la zone de charge d'espace (ZCE) sont propulsés par le champ électrique E vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces porteurs de charges contribuent donc au courant de la cellule photovoltaïque par leurs diffusions, cette composante est appelée courant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons-trous créées par les photons sont dissociées par le champ électrique, l'électron est propulsé vers la région de type n et le trou vers la région de type p, donnant naissance à un courant de génération.

Il convient donc de noter que la conversion de l'énergie solaire en électricité est possible si et seulement si trois phénomènes physiques de base ont lieu quasi-simultanément :

- * L'absorption d'un maximum de photons possible.
- * La transformation de l'énergie ainsi absorbée en charges électrique.
- * La collecte sans perte de ces derniers vers un circuit électrique extérieur.[4]

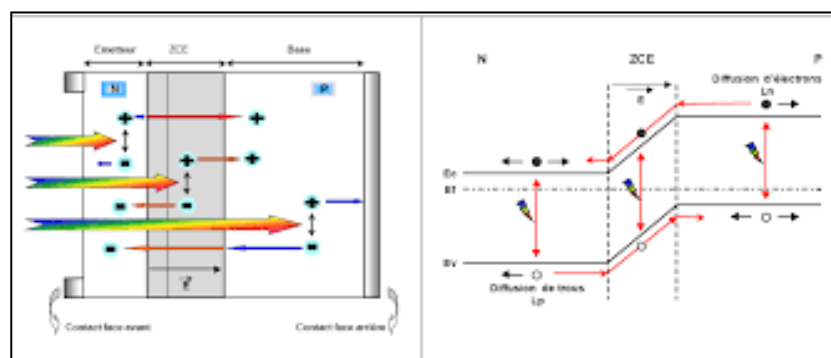


Figure I.8 : Structure et diagramme de bande d'une cellule PV sous éclairage.

I.4.1.7 Fabrication des cellules photovoltaïques :

Le silicium est actuellement le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. On l'obtient par réduction à partir de silice, composé le plus abondant dans la croûte terrestre et

notamment dans le sable ou le quartz. La première étape est la production de silicium dit métallurgique, pur à 98 % seulement, obtenu à partir de morceaux de quartz provenant de galets. Le silicium de qualité photovoltaïque doit être purifié jusqu'à plus de 99,999 %, ce qui s'obtient en transformant le silicium en un composé chimique qui sera distillé puis retransformé en silicium. Il est produit sous forme de barres nommées « lingots » de section ronde ou carrée. Ces lingots sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées wafers. Après un traitement pour enrichir en éléments dopants et ainsi obtenir du silicium semi-conducteur de type P ou N, les wafers sont métallisés : des rubans de métal sont incrustés en surface et reliés à des contacts électriques. Une fois métallisés les wafers sont devenus des cellules photovoltaïques.[1]

I.5 Définition d'un système photovoltaïque (PV) :

Un système (photovoltaïque) PV est un ensemble d'éléments (constituants) de production d'électricité, en utilisant une source solaire. Ces constituants sont essentiellement le champ PV, le conditionnement de puissance, le système de stockage (dans un certain cas), et la charge (voir figure I.1 a) . Le conditionnement de puissance peut comprendre: un régulateur seul, un régulateur avec un convertisseur (DC /DC ou/et DC/ AC) ou un convertisseur seul. Un exemple d'un système plus détaillé est montré sur la figure I.1.b .

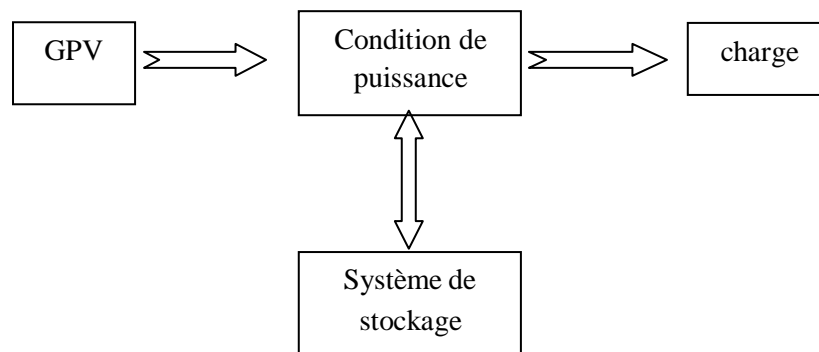


Figure I.1 a : Système photovoltaïque.

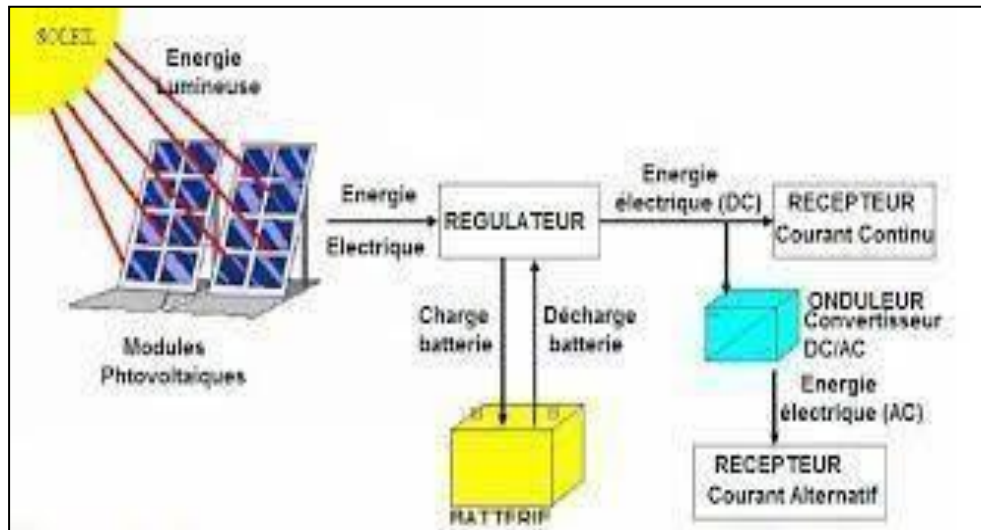


Figure I.1.b : Système photovoltaïque plus détaillé.

I.6 Classification des systèmes PV :

On distingue deux types de systèmes PV :

- Systèmes PV autonomes
- Système à injection au réseau.

I. 6.1. Systèmes autonomes :

I.6.1.1. Définition :

On dit qu'un système PV est autonome si la charge est passive (exemple : lampes, les moteurs ,etc.). Le système PV autonome est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autres sources d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique (Figure I.9). Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries ou autres moyens de stockage pour une utilisation durant les périodes de la non disponibilité de l'énergie solaire (par exemple les périodes nocturnes, les périodes non ensoleillées). Les systèmes PV autonomes servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, en îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et

le pompage de l'eau (dans certains cas). En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique. À l'heure actuelle, c'est dans les endroits isolés, loin d'un réseau électrique et où les besoins en énergie sont relativement faibles (généralement moins de 10 kWc) que l'énergie photovoltaïque est la plus concurrentielle. [7]

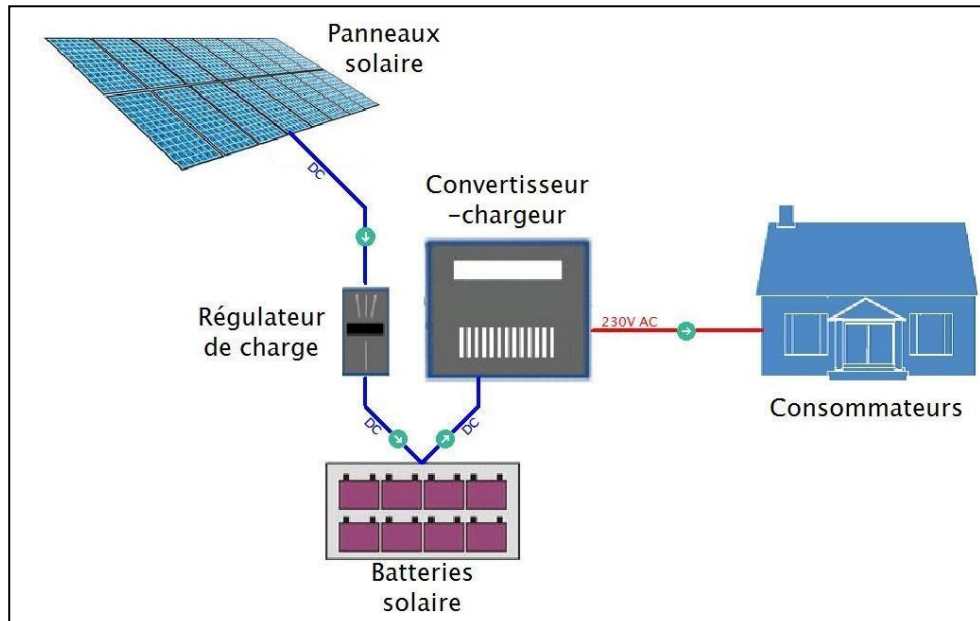


Figure I.9 : Schéma d'un système autonome (hors-réseau).

I.6.2 Systèmes PV à injection aux réseaux :

I.6.2.1. Définition d'un système PV raccordé au réseau :

Un système PV raccordé au réseau est un système dont la charge est partiellement ou totalement est le réseau électrique. Ç à d. le générateur PV injecte sa puissance à travers un onduleur dans le réseau électrique (Figure I.3).

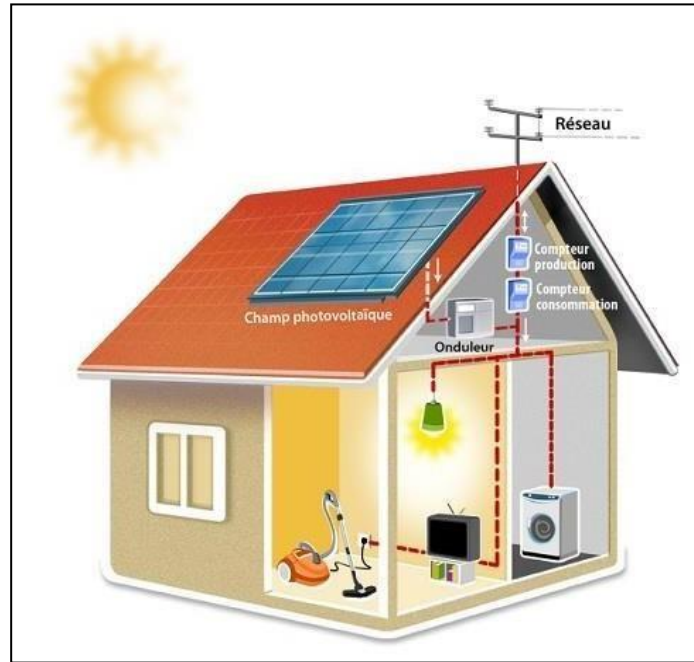


Figure I.10 : schéma solaire photovoltaïque injection réseau.

I.7 Constitution des champs PV :

Le champ PV est la source d'énergie électrique en courant continu. Il est constitué d'un ensemble de modules rangés sous forme de panneaux (voir Figure I.4). Le module est un ensemble de photopiles (cellules) assemblés pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière.

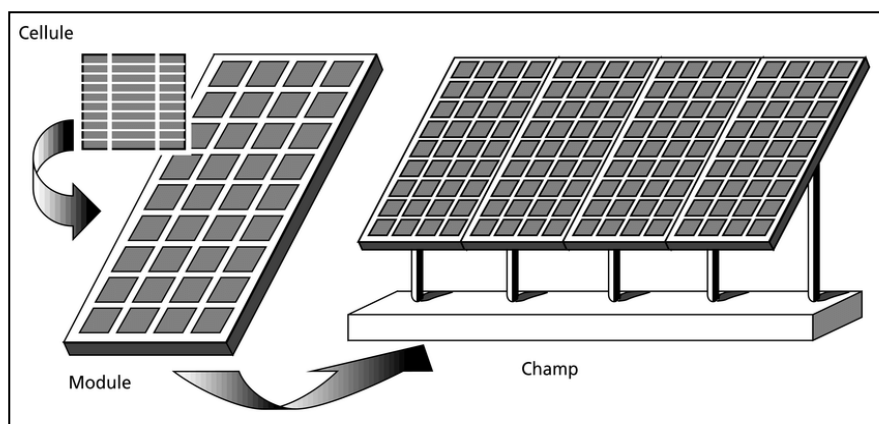


Figure I.11 : Constituants d'un générateur PV.

I.7.1 Modules

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module. Les connections 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.

I.7.1.1 Constituants

Afin de donner au module une certaine protection et rigidité, ses constituants doivent être bien choisis. Et pour un bon captage du rayonnement solaire, la réflexion des parties traversées par ce rayonnement soit bien minimisée. La structure est la suivante (figure I.5) :

- Cadre en aluminium

Le module est généralement entouré d'un cadre rigide en aluminium, comprenant des trous de fixation.

- Verre trempé

La surface avant est constituée d'un verre, trempé afin d'augmenter sa résistance aux chocs, d'une épaisseur de plusieurs millimètres. Il assure une stabilité mécanique tout en étant transparent pour la lumière incidente.

- Couches d'encapsulant avant et arrière

Le Silicium (cellules) est enrobé dans une résine EVA (éthylène-vinyle- acétate).

- Surface arrière

La couche arrière agit comme une barrière contre l'humidité et les autres contraintes. Selon le fabricant, il peut s'agir d'une autre plaque de verre ou d'une feuille de polymère composite. La combinaison de matériaux souvent utilisée est les PVF-polyster-PVF. Le PVF signifie poly fluorure de vinyle, il a une faible perméabilité aux vapeurs et est très résistant aux intempéries. Il est souvent connu sous son nom de marque Tedlar.

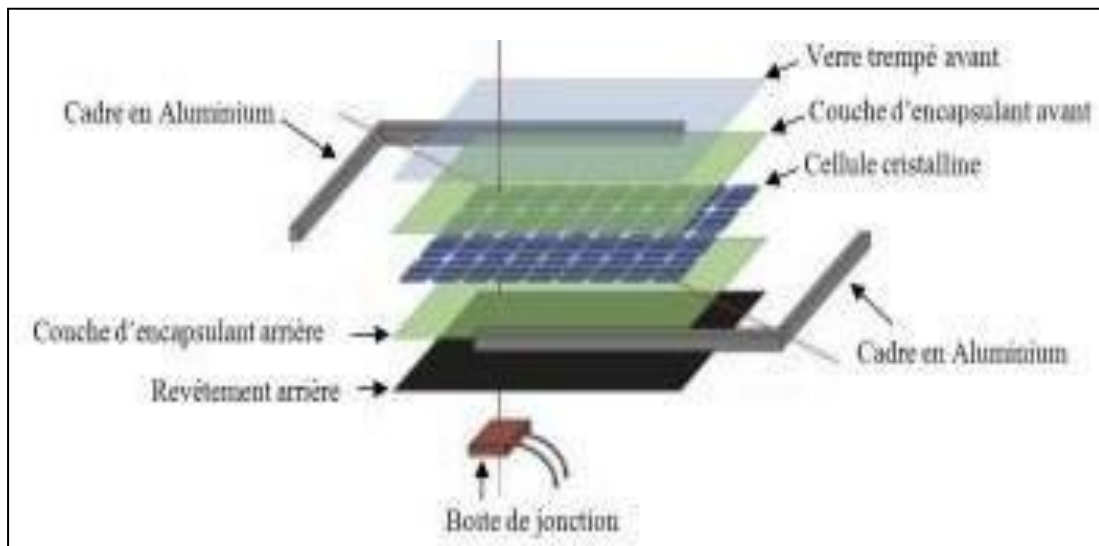


Figure I.12 : Constituants d'un module photovoltaïque.

Fonction :

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.7.2 Caractéristiques d'un module :

La (figure I .13)montre un exemple de caractéristiques d'un module (I-V et P-V) pour une variation d'éclairement de $200\text{W}/\text{m}^2$ à $1000\text{W}/\text{m}^2$ avec une température constante. De cette figure, on remarque que la puissance et le courant du module augmentent avec la croissance de l'éclairement alors que l'augmentation de la tension est relativement faible. [7]

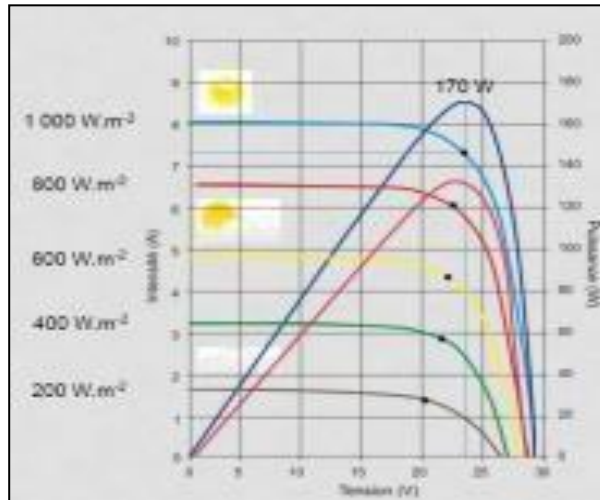


Figure I .13 : Exemple de caractéristiques (I-V et P-V) d'un module.

I.8 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque :

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN. Mais le schéma équivalent réel tient compte de l'effet résistifs parasites dus à la fabrication, il est représenté sur le schéma équivalent par deux résistances.

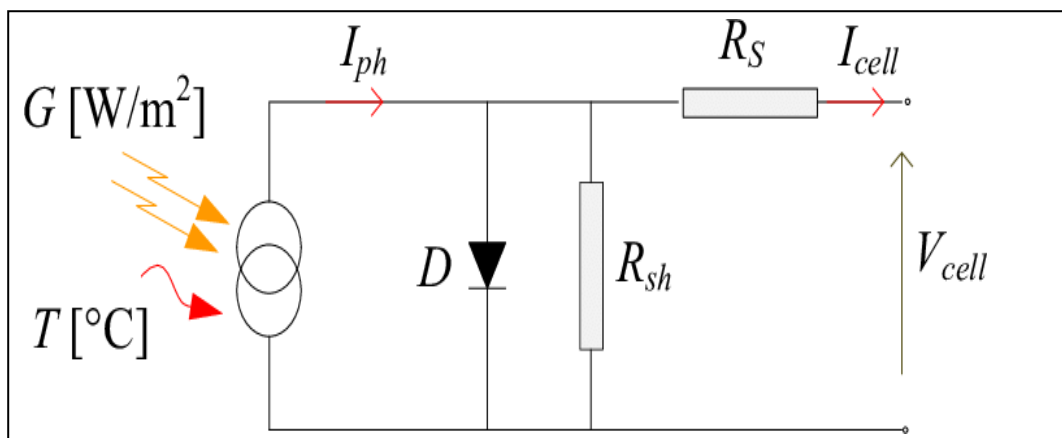


Figure I .14 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Avec :

Gi : Source de courant parfaite.

Rsh : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule.

Rse : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contact)

D : Diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un seul sens.

Rch : Résistance qui impose le point de fonctionnement sur la cellule en fonction de sa caractéristique courant-tension à l'éclairement considéré.

Une cellule solaire est caractérisée par les paramètres fondamentaux suivants:

.Courant de court circuit (Isc) : C'est la plus grande valeur du courant générée par une cellule pour une tension nulle ($V_{pv}=0$).

.Tension en circuit ouvert (Voc) : Représente la tension aux bornes de la diode quand elle est traversée par le photo-courant I_{ph} ($I_d = I_{ph}$) quand ($I_{pv}=0$). Elle reflète la tension de la cellule en absence de lumière, elle est exprimée mathématiquement par :

$$VOC = \frac{mkTc}{e} \ln(I_{ph}/I_0) = V_t \ln(I_{ph}/I_0)$$

Avec :

Vt : La tension thermique.

Tc : La température absolue.

m : Facteur idéal de la jonction.

K : Constante de Boltzmann ($K = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/k)

e : Charge de l'électron ($e = 1.6 \cdot 10^{-19}$).

• **Point de puissance maximale (P_{max})**: est le point M (V_{opt} , I_{opt}) de la figure (II.8) où la puissance dissipée dans la charge est maximale

$$P_{max} = V_{OPT} \cdot I_{opt}$$

Avec :

V_{opt} : La tension optimale.

I_{opt} : Le courant optimale.

• **Rendement maximum** : est le rapport entre la puissance maximale et la puissance à l'entrée de la cellule solaire.

$$\eta = P_{max}/P_{in} = V_{OPT}.I_{opt} / A_{pv}.G$$

Où :

G : l'irradiation qui représente la puissance lumineuse reçue par unité de surface (W/m^2).

A_{pv} : Surface effective des cellules.

Les conditions normalisées de test des panneaux solaires sont caractérisées par un rayonnement instantané de $1000W/m^2$ d'une température ambiante de $25^{\circ}C$ et d'un spectre AM de 1.5. AM représente l'Air Masse qui est l'épaisseur de l'atmosphère que la lumière doit pénétrer. Ces conditions sont appelées STC (Standard Test Conditions) cela correspond à un ensoleillement assez fort.

La figure (I.15) présente la courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque avec les points importants qui la caractérise.[8]

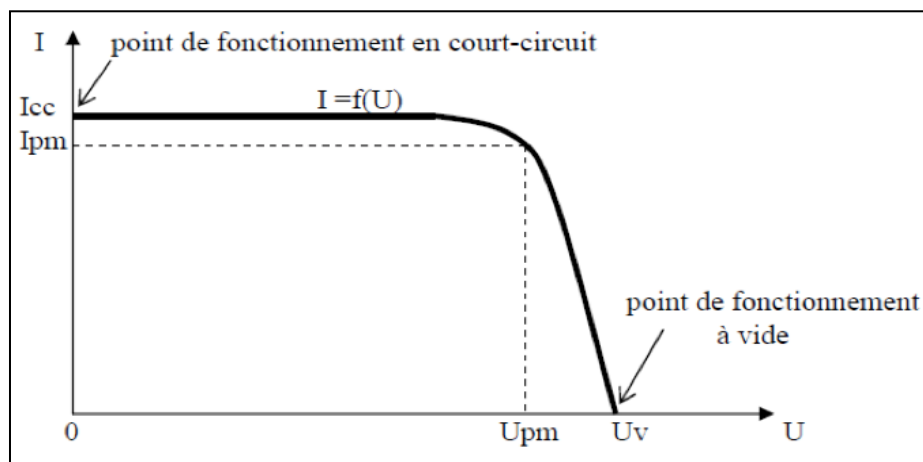


Figure I.15 Courbe courant -tension d'une cellule photovoltaïque.

I.9 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

I.9.1 Avantages du photovoltaïque :

Les systèmes photovoltaïques ont plusieurs avantages :

- Ils sont non polluants sans émissions ou odeurs discernables.
- Ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes.
- Ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant.
- Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.
- Ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.
 - Ils ne consomment aucun combustible fossile et leur carburant est abondant et libre.
- Une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées, d'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le système modulaire de panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des besoins énergétiques variés ; les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications allant du milliwatt au mégawatt.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car elle est non polluante, silencieuse, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
 - Ils ont une longue durée de vie.
 - Les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés.

I.9.2 Inconvénients du photovoltaïque :

- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
- Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevée.
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement.[5]

I.10 Conclusion :

Le panneau solaire photovoltaïque est une nouvelle technologie qui utilise une énergie renouvelable, elle est verte et gratuite. La demande mondiale d'électricité augmente depuis ces 13 dernières années, donc entraîne une augmentation de la production d'électricité. Cela a

un impact sur l'environnement plus ou moins important. Le panneau a été conçu pour permettre à son utilisateur de pouvoir consommer de l'électricité tout en abaissant sa facture. C'est une technologie qui à de l'avenir dans le domaine de l'écologie. Certes cette technologie n'est pas encore au point mais elle est en pleine croissance puisque des chercheurs essaient d'améliorer la rentabilité d'un panneau ou encore de pouvoir réussir à recycler les matériaux utilisés à sa production. Elle connaît la plus forte dynamique en termes de recherche, innovation et développement.[6]

Chapitre II

*Convertisseur de
l'électronique de
puissance pour les
systèmes*

II.1 Introduction :

Les panneaux solaires ne sont que des convertisseurs d'énergie et non des réservoirs d'énergie, ils transforment l'énergie mais ne la stockent pas. Si l'application demande de l'énergie en dehors des périodes de production, c'est-à-dire dans l'obscurité, il faudra nécessairement récupérer cette énergie dans un stockage (batterie, accumulateur) et elle sera employée pour fournir de l'électricité dans l'obscurité et également lorsque le courant demandé est supérieur au courant fourni par les panneaux (démarrage d'un moteur par exemple).

L'utilisation des batteries est très importante dans une installation PV autonome. Étant donné que les panneaux solaires ont encore l'efficacité de conversion relativement faible, le coût de l'ensemble du système peut être réduit en utilisant un régulateur de charge solaire qui peut extraire la puissance maximale possible du panneau.

Nous allons aborder dans ce chapitre les différents types de régulateur de charge photovoltaïque, les étapes de charge d'une batterie solaire MPPT. Ensuite, en présentant la connexion directe entre le GPV et la charge, et le point maximal de la puissance pour chaque variation de l'éclairement. Comme le régulateur est un convertisseur DC/AC . Enfin nous exposeront les définitions de quelques algorithmes de MPPT qui ont été proposés dans la littérature.

II .2 définition de régulateur MPPT:

Un régulateur MPPT OU recherche du point de puissance maximum : est un convertisseur électronique DC/DC (courant continu vers courant continu) qui optimise en permanence les paramètres électriques de fonctionnement entre les 3 systèmes suivants :

- Le système photovoltaïque (constitué de un ou plusieurs panneaux solaires).
- Le dispositif batterie (composé de une ou plusieurs batteries).
- Les applications utilisant l'énergie (moteur, pompe, éclairage, réfrigérateur, etc.).

Ces régulateurs peuvent aussi être appelés "Power Trackers", appellation à ne pas confondre avec le terme « Panel Trackers » qui désigne un système mécanique mobile destiné à recevoir des panneaux solaires et capable de suivre la course du soleil (principe du tournesol).

II .2.1 Commande pour la Recherche du Point de Puissance Maximale (MPPT) :

En résumé, la connexion entre une source et une charge peut être optimisée en ajustant le

rapport cyclique α de la CS au but de maximiser la puissance délivrée à la charge plusieurs étaient appliqués. Parmi ces techniques, on trouve la technique de la Poursuite du Point de Puissance Maximale MPPT. Cette partie fera l'objet suivant.

II .2.2 Principe De La Commande MPPT :

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (VPPM et IPPM).

La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT . Il peut être représenté par le schéma de la (Figure II.10).

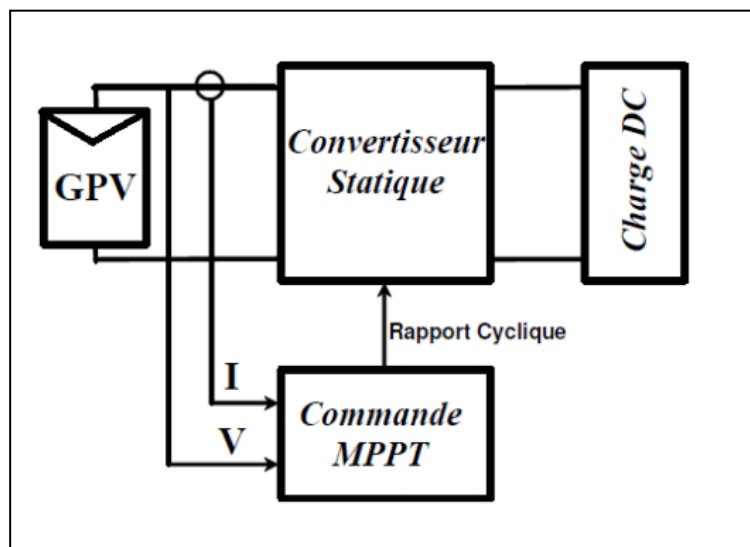


Figure II.1 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.

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 GPV 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.

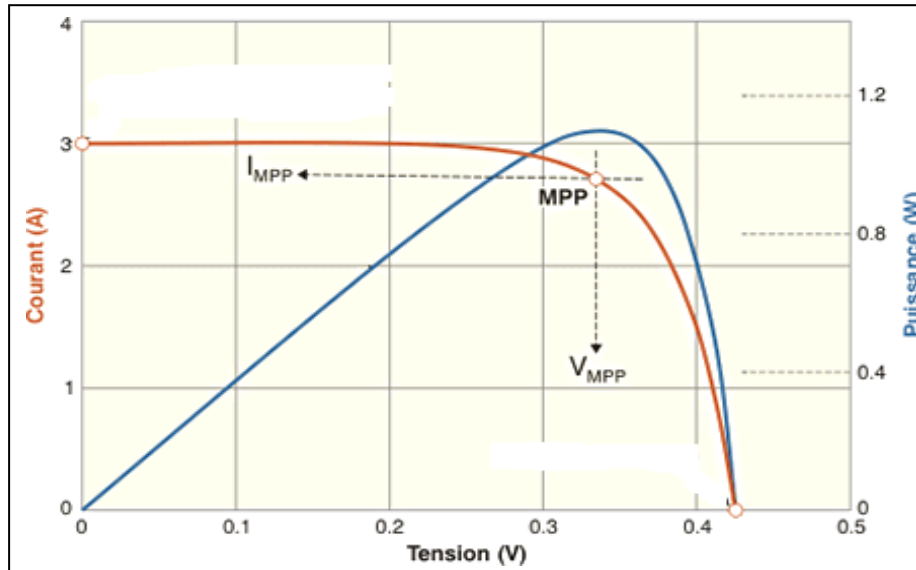


Figure II.2 Principe de la commande MPPT.

II .3 Classification Des Commandes MPPT :

Nous pouvons classer d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT. [9]

II .3.1 Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée :

A. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS :

Il y a un certain nombre de commandes MPPT qui effectue une recherche du PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Comme la méthode de Perturb&Observe, les algorithmes d'incrément de conductance qui utilisent la valeur de la puissance fournie par le GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM ou bien Les commandes qui sont basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (V_{OPT} et I_{OPT}) et les paramètres caractéristiques du module PV (V_{OC} et I_{CC}). Notamment, les MPPT inspirées des réseaux de neurones. Dans ces commandes, soit on fait appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant stocké tous les cas possibles, soit les commandes sont encore une fois de plus approximatives. Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité de réaction.

B. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur :

Dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des CS. Par exemple Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie qui sont principalement utilisées quand la charge est une batterie. Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de P_{max} est faite à travers le rendement du convertisseur. En somme, plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, en général, tous les systèmes avec un seul capteur sont par essence, non précis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial.

II .3.2 Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche :**A. MPPT Indirect :**

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{sc} ou V_{oc}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques.

B. MPPT Direct :

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces

erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction.

II .4 Les Algorithmes MPPT :

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse des principaux modes de recherche du PPM existants dans ce chapitre nous a permis de bien identifier l'existant et les points qu'il restait à améliorer.

II.4.1 Approche de la Tension Constante (CV, Constant Voltage) :

La méthode de tension constante également appelée la méthode de circuit ouvert (open circuit voltage) est basée sur la mesure en temps réel de la tension de circuit ouvert VOC et la relation linéaire approximative liant cette tension avec la tension de point maximal VMPP du GPV

$$VMPP = K1 * VOC$$

Où k1 est une constante de proportionnalité. il est généralement compris entre 0.71 et 0.86.

Une fois que k1 est déterminé, le VMPP peut être calculé à l'aide de l'expression précédant (avec VOC mesurée périodiquement en ouvrant momentanément le convertisseur de puissance (circuit ouvert). La tension VMPP est alors prise comme tension de référence. Le principe de cette méthode est basé sur la comparaison entre la tension du panneau photovoltaïque réelle VPV et la tension de référence Vref (VMPP). Le signal d'erreur est traité pour rendre $V = Vref$. (Figure II.3)

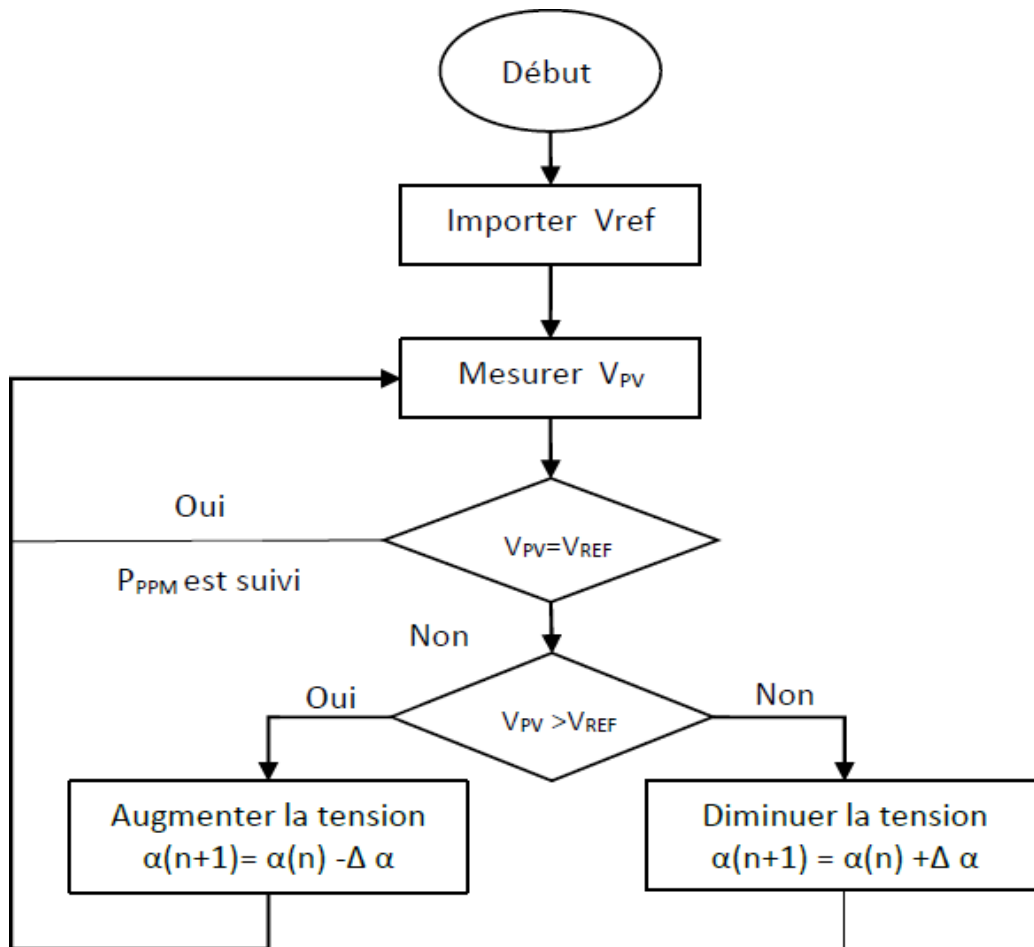


Figure II.3 Algorithme de la Tension Constante.

Cette méthode présente deux avantages : la rapidité de la réponse aux fluctuations et l'absence de variations (même infimes) en état stationnaire . Cependant, ces points forts ne peuvent cacher leurs défauts, à cause de la dépendance de la tension du panneau avec l'ensoleillement et la température, la tension de puissance maximale est déviée, alors la tension de référence doit être corrigée pour différents ensoleillements et températures au long des périodes de l'année Aussi, le MPP n'est pas toujours entre 71% et 78% de la tension Voc. et n'oublier pas la perte de la puissance disponible lors de la déconnection de la charge du GPV. [9]

II .4.2 Approche Du Courant Constant (Constant Curent) :

La méthode du Courant constant également appelée la méthode de court-circuit est basée sur la mesure en temps réel du courant de court-circuit I_{sc} (short-circuit current) et la relation linéaire approximative liant cette courant avec le courant de point maximal I_{MPP} du GPV :

$$I_{MPP} = k_2 * I_{sc}$$

Avec k_2 constante de proportionnalité. Comme pour la méthode CV, k_2 est déterminée pour le GPV utilisé. La constante k_2 est généralement comprise entre 0.78 et 0.92 .

La mesure du courant ISC durant le fonctionnement est problématique. Un commutateur est généralement ajouté au convertisseur de puissance pour court-circuiter le panneau et mesurer le courant ISC à l'aide d'un capteur de courant.

Pour cette valeur constante du courant, la puissance est calculée pour des tensions différentes. Si la différence entre la puissance calculée et la puissance de crête est supérieure à la valeur de tolérance, alors la valeur de la tension est soit incrémenté ou décrétementé en fonction de la puissance obtenue. Pour que la tension et le courant MPP (I_{MPP}) correspondant, ce procédé est répété jusqu'à ce que la différence se situe dans la plage de tolérance . (Figure II.13)

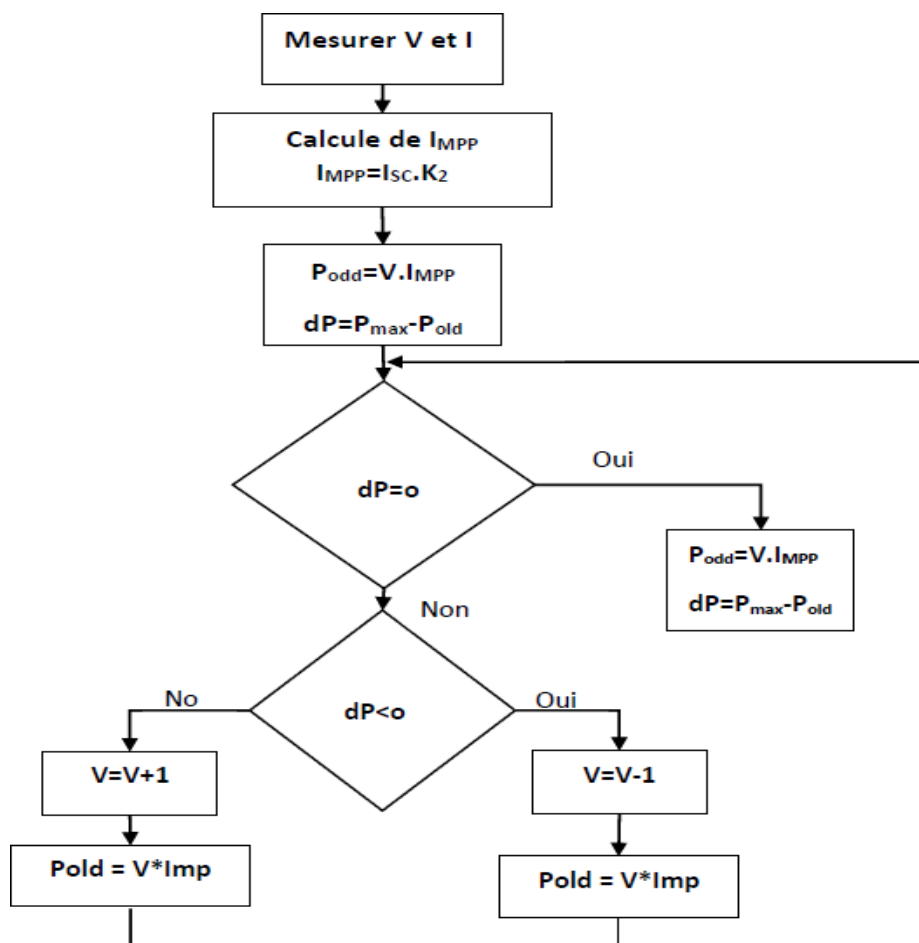


Figure II.4 : Algorithme du constant courant.

II .4.3 Perturbation Et Observation (P&O, Perturbe And Observe) :

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension V_{ref} , ou du courant I_{ref} , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ($P=VI$). Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV

Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension V_{PV} , ce qui engendre une variation de la puissance. (Figure II.5) montre qu'on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P(V)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

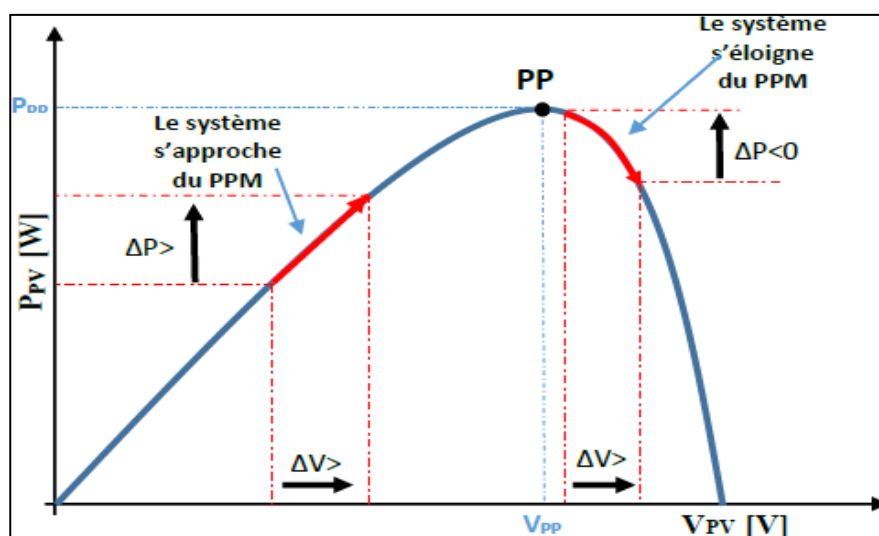


Figure II.5 Recherche du PPM par la méthode (P&O).

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $p(v)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant. L'utilisation d'un microprocesseur est plus appropriée pour la réalisation de la méthode P&O, même si des circuits analogiques peuvent être utilisés. La Figure II.6 représente l'algorithme classique d'une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

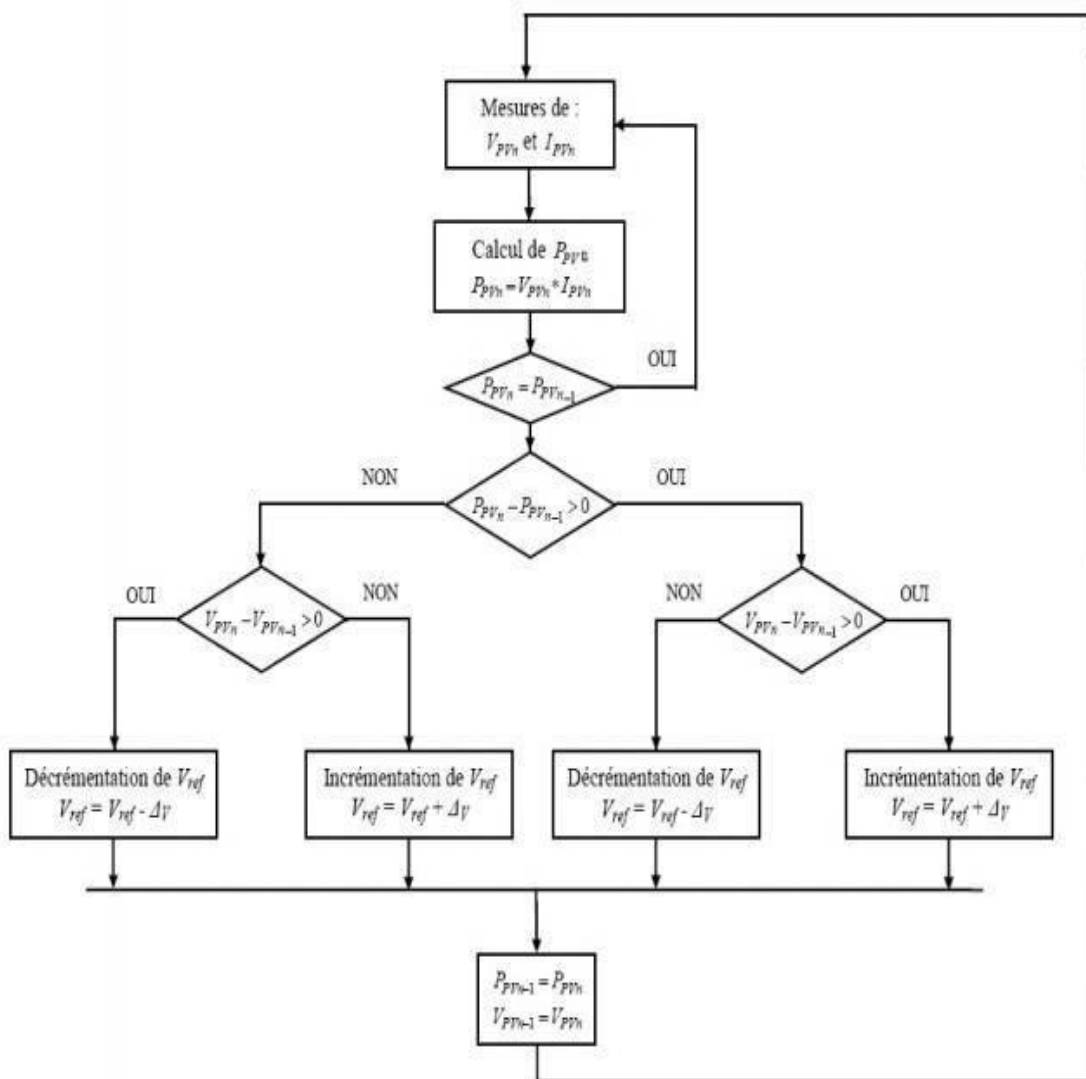


Figure II.6 l'algorithme de P&O classique.

La méthode P&O est largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations dépendent de la largeur du pas de la perturbation :

- Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes.
- Si la largeur du pas est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

Il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser. Un autre inconvénient de la méthode P&O lors d'un changement rapide des conditions atmosphériques. (Figure II.7) Commencant par un point de fonctionnement A, si les conditions climatiques restent constantes, une perturbation ΔV dans la tension V amènera le point de fonctionnement au point B, et le sens de la perturbation sera inversé à cause de la diminution de la puissance. Par contre, si par exemple l'éclairement augmente et déplace la courbe de puissance de P1 à P2, sur un cycle du MPPT, le point de fonctionnement sera déplacé de A vers C. Cela représente une augmentation de la puissance, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qu'il éloigne du vrai point de puissance maximale. Ce processus continu jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement où il revient au vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance.[9]

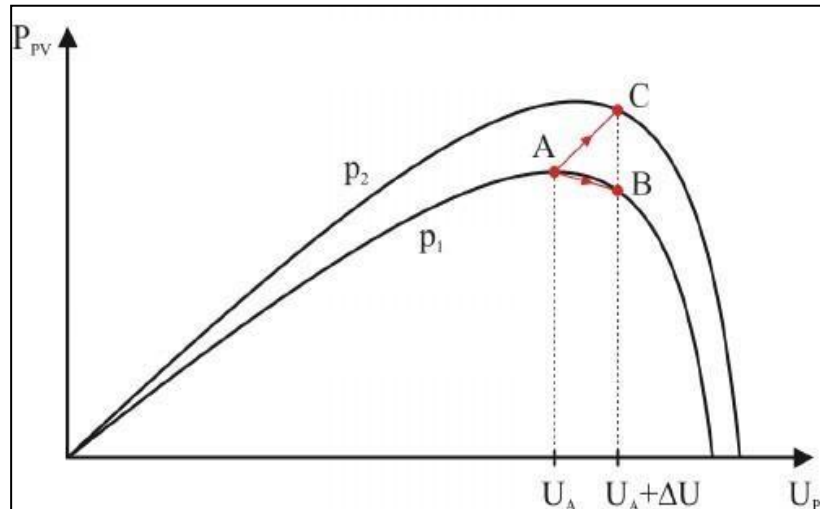


Figure II.7 Divergence de la méthode P&O.

II .4.4 La Commande M Flou

La commande basée sur la logique floue (dans la littérature anglo-saxonne Fuzzy Logic Control) est de plus en plus populaire grâce à l'évolution des microcontrôleurs. L'avantage de cette technique est qu'elle peut fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elle n'a pas besoin de modèle mathématique de grande précision. De plus, elle peut traiter des non linéarités. Le principe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur E et le

changement d'erreur ΔE et une variable de sortie $\Delta \alpha$ (variation du rapport cyclique). La valeur de la variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM, est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée.

En général, la commande logique floue comprend donc trois étapes communément nommées dans la littérature :

- la fuzzification,
- la lecture de la table de vérité,
- la défuzzification.

Durant la fuzzification, les variables d'entrées numériques sont converties en variable linguistique pouvant prendre les cinq valeurs suivantes :

- NB : Negative Big,

–NS : *Negative Small*,

–ZE : *Zero*,

–PS : *Positive Small*,

–PB : *Positive Big*.

Comme le montre la structure de base de la commande logique floue illustrée en Figure II.8

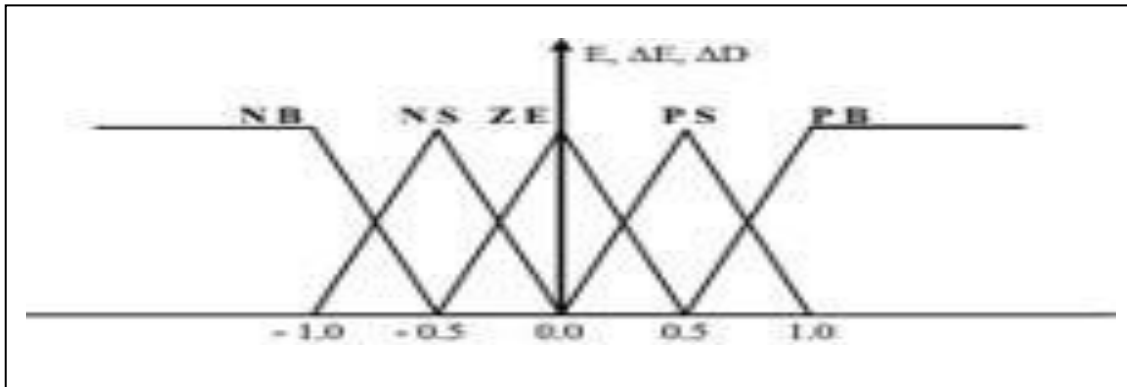


Figure II.8 structure de base de la commande floue [9]

II .5 La PWM

II .5.1 définition de régulateur PWM:

Le PWM est un signal numérique, donc la tension peut prendre deux valeurs seulement.

Dans certains cas très spécifiques (onduleurs à MLI par exemple) on fabrique un troisième niveau en inversant la tension du niveau haut.

Le signal est carré. Le niveau bas correspond généralement à 0 Volt. La période est notée T ; la durée de l'impulsion (pour laquelle la tension est celle de l'état haut) est appelée t_h .

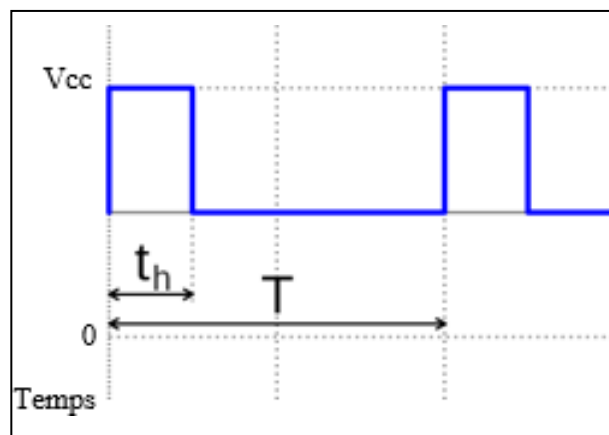


Figure II.9 la période du signal de la pwm

Si la période change, le signal n'est plus vraiment périodique au sens strict. On appelle alors T la pseudo période.

II.5.2 INTÉRÊT:

Le principal intérêt de la technique PWM est de limiter la chauffe des composants électroniques. Par exemple : une lampe de 20 Watts allumée au maximum consomme 20 W. Si par une commande de gradation elle est allumée au quart de sa puissance, elle consomme 5 W. Le composant analogique devrait alors dissiper 15 W, ce qui implique un énorme radiateur. En PWM, la puissance fournie est soit maximale, soit nulle. Lorsqu'elle est maximale, pendant un quart du temps par exemple, il n'y a pas besoin de dissiper de puissance résiduelle. Lorsqu'elle est

nulle, il n'y a pas besoin de dissiper non plus de puissance, car elle n'est pas fournie du tout.

Un autre intérêt du PWM est que la tension appliquée au moteur pendant t_h est V_{cc} . Celle-ci

est suffisante pour vaincre les frottements et faire tourner le moteur. La tension moyenne appliquée au moteur est proportionnelle au rapport cyclique, ce qui permet d'avoir des consignes

de vitesse faibles :

$$V_{moy} = th * v_{cc} /$$

II .5.3 FRÉQUENCE:

La commande d'actionneurs de puissance par PWM est très liée à la notion de fréquence. Pour que l'impression d'une valeur moyenne constante d'allumage apparaisse, il faut que l'alternance d'allumage/extinction soit suffisamment rapide pour qu'elle ne se remarque pas.

Selon les utilisations la fréquence du PWM va de 100 Hz (100 cycles par seconde) à 200 kHz.

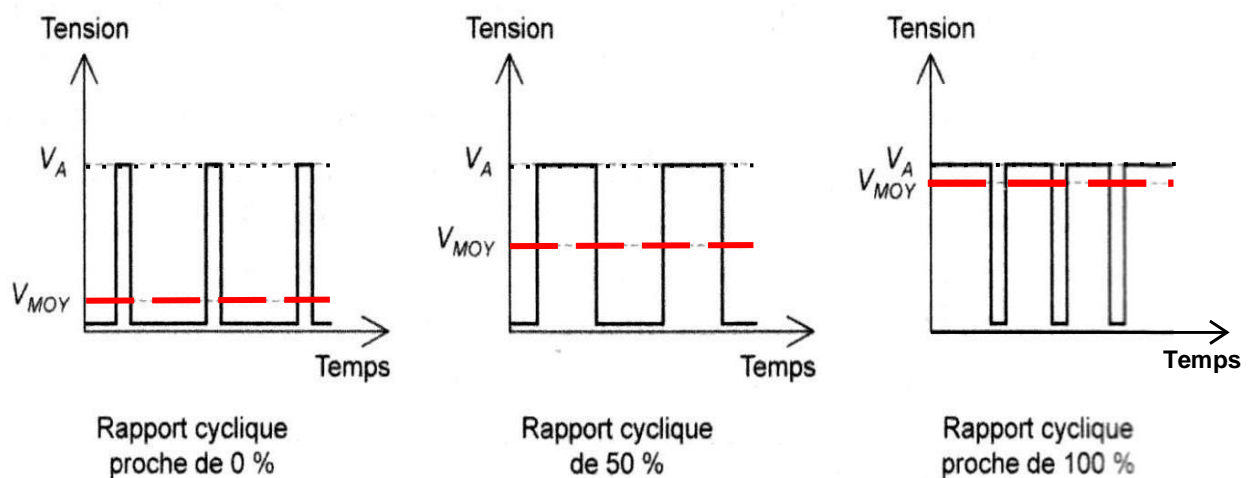


Figure II.10 rapport cyclique de la pwm

II .5.4 Remarques:

Même si le signal n'est nullement une tension analogique, il peut le devenir si on lui fait subir un filtrage de type passe-bas.

Filtrer ce signal carré permet d'obtenir la tension moyenne. La fréquence de coupure du filtre doit être plus faible que la fréquence du signal carré. Autrement dit la fréquence porteuse doit être significativement supérieure à la fréquence de coupure du filtre, pour que l'ondulation résiduelle soit faible.

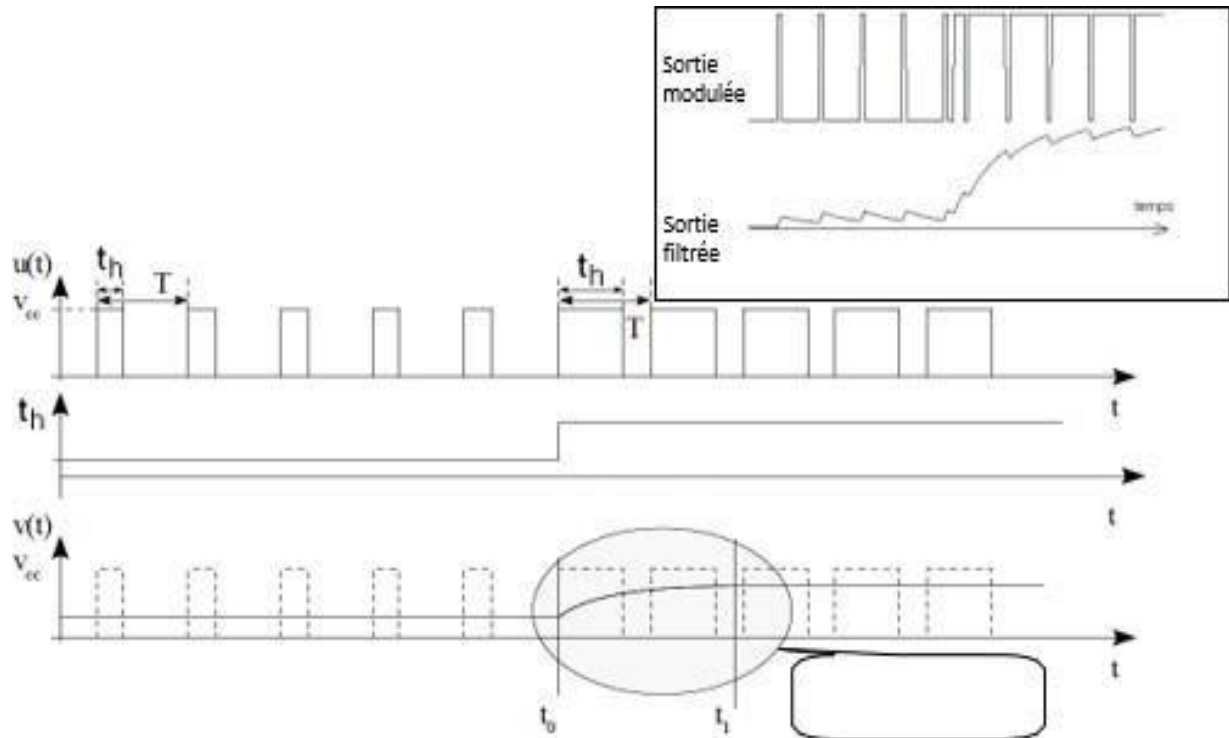


Figure II.11 : filtrage de signal de pwm

II .5.5RAPPORT CYCLIQUE :

On appelle rapport cyclique le rapport :

$\square = 100 * t_h / T$ exprimé en pourcentage. Si $t_h = 0$ alors $\square = 0\%$ et la tension moyenne de sortie est nulle.

Si $t_h = T$ alors $\square = 100\%$ et la tension moyenne de sortie est égale à V_{cc} . [10]

II .6.1 définition de l'onduleur :

L'onduleur de tension triphasée est constitué de trois bras bidirectionnels en courant dont chacun est constitué de deux interrupteurs en série. Chaque interrupteur est constitué d'un transistor et d'une diode assemblés en antiparallèle (voir la figure (II.12)). Les deux interrupteurs qui sont sur la même cellule sont commandés d'une façon complémentaire []

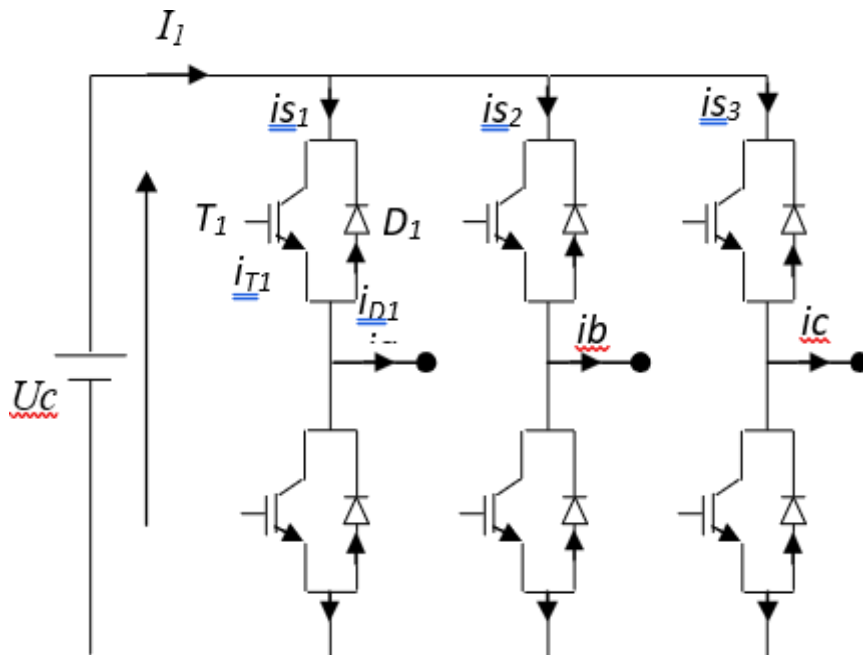


Figure II.12 : Onduleur de tension triphasé

La figure (II.13) représente un bras de l'onduleur triphasé de tension

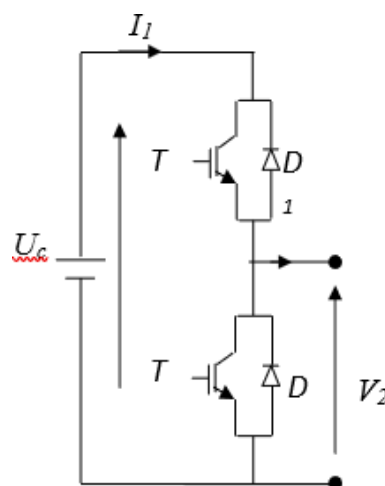


Figure II.13: bras de commutation d'un onduleur triphasé

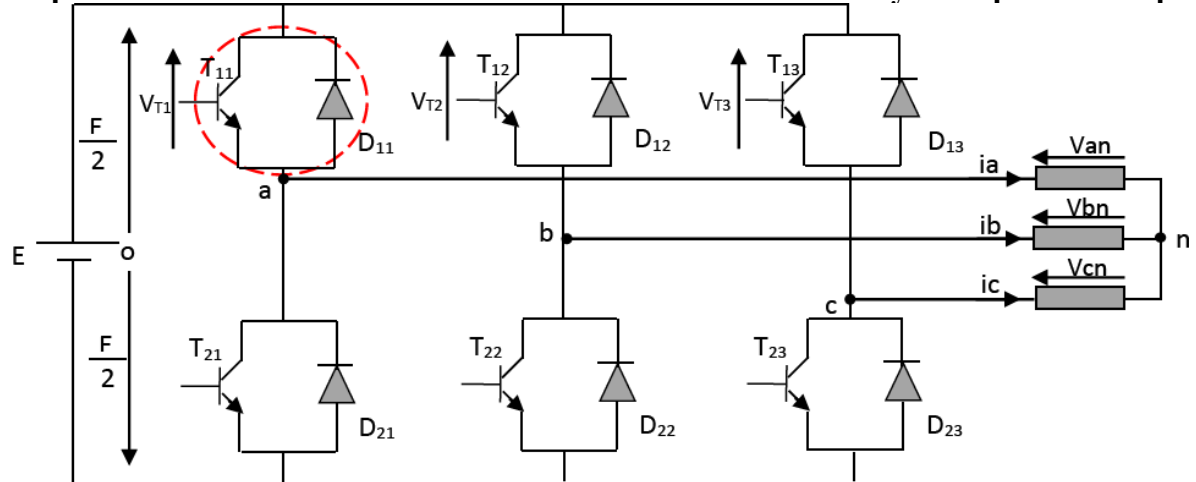


Figure II.14: Onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

Pour simplifier l'étude et la complexité de la structure de l'onduleur, on supposera que :

- * La commutation des interrupteurs est instantanée.
- * La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- * La charge triphasée, est équilibrée, couplée en étoile.

Sachant que dans un régime équilibré $v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0$, nous pouvons écrire, figure :

$$\begin{cases} v_{an} = v_{a0} + v_{on} \\ v_{bn} = v_{b0} + v_{on} \\ v_{cn} = v_{c0} + v_{on} \end{cases}$$

En faisant la somme des équations du système, on obtient :

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = v_{a0} + v_{b0} + v_{c0} + 3v_{on} = 0$$

D'où :

$$v_{a0} + v_{b0} + v_{c0} = -3v_{on}$$

Donc :

$$v_{on} = -1/3(v_{a0} + v_{b0} + v_{c0})$$

En substituant l'équation (III.18) dans le système, il vient alors :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{a0} \\ v_{b0} \\ v_{c0} \end{bmatrix}$$

Après simplification, le modèle mathématique de l'onduleur à deux niveaux de tensions est donné par l'équation

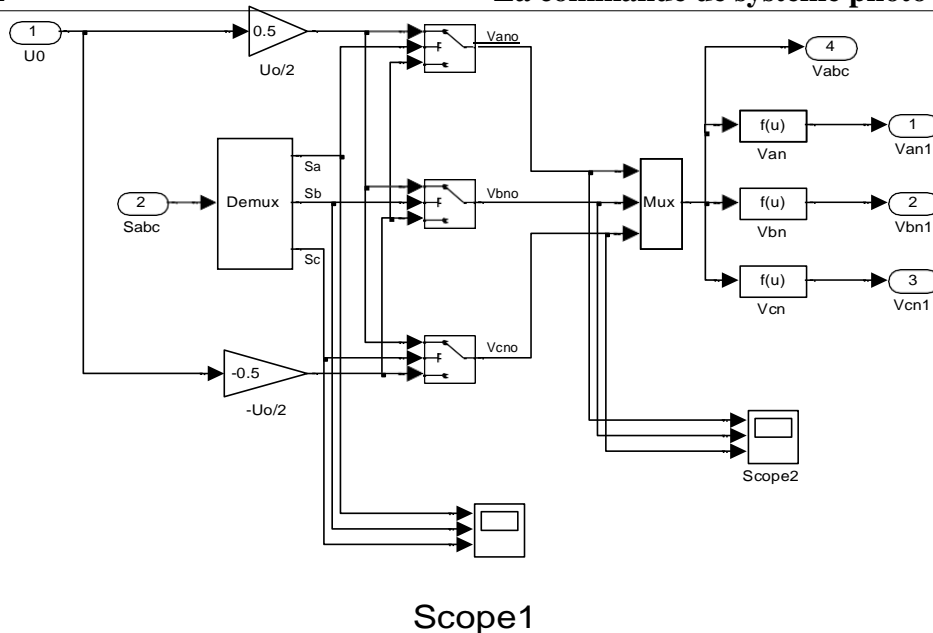


Figure II.15: Schéma de simulation d'un onduleur triphasé

II .7 Les fonctions de conversion:

Un convertisseur statique est un procédé de traitement électronique de l'énergie électrique, il n'est rien d'autre qu'un modulateur de la puissance transitant par un assemblage d'interrupteurs disposés entre deux sources polyphasées. Cette modulation résulte à la fois d'une fonction spatiale des connexions réalisées par les semi-conducteurs et d'une fonction temporelle de leurs états imposés par la commande. Il en découle une ou plusieurs fonctions de conversion globales qui apparaissent comme étant les grandeurs de réglage du transfert énergétique.

Nous présentons les fonctions de conversion sous forme de structures matricielles, puisque dans le cas général, on envisage un réglage de la puissance échangée entre deux sources polyphasées.

II .8 Modulation de largeur d'impulsions :

L'onduleur de tension à MLI est habituellement choisi pour sa réponse très rapide et ses performances élevées, il permet d'imposer à la machine des ondes de tension à amplitude et fréquence variables. [16]

A partir d'un réseau d'alimentation standard (220/380V, 50HZ) après redressement et filtrage, la tension U_c (étage continu) est appliquée à l'onduleur. Plusieurs types de MLI se présentent pratiquement, parmi lesquelles on peut citer :

- Les modulations *sinus-triangle* effectuant la comparaison d'un signal de référence sinusoïdal à une porteuse généralement triangulaire.
- Les modulations *précalculées* pour lesquelles les angles de commutation sont calculés hors ligne pour annuler certaines composantes du spectre de la tension, et donner une certaine onde

- Les modulations *post calculées* appelées encore MLI régulières symétriques ou MLI vectorielles dans lesquelles les angles de commutation sont calculés en ligne.

On présentera dans ce qui suit la première stratégie qui est la plus utilisée, et la deuxième technique à laquelle on s'intéresse pour l'onduleur ci-dessus. [11]

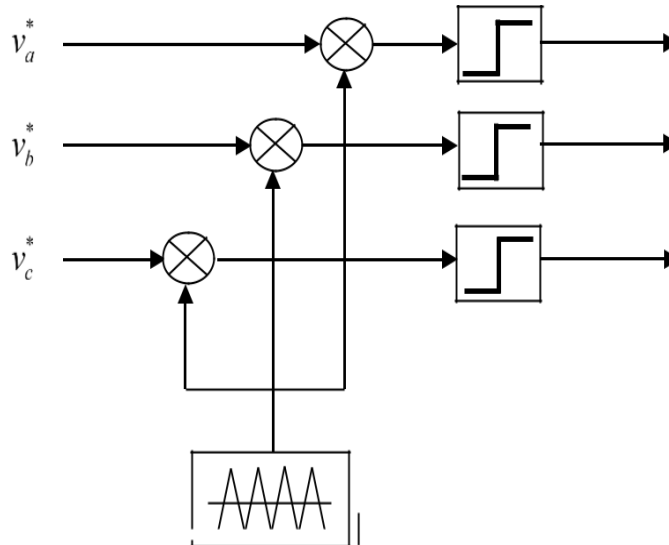


Figure II.16 : principe de la MLI

Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

$$\begin{cases} V_a = V_m \sin(\omega t) \\ V_b = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_c = V_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases}$$

L'équation de la porteuse triangulaire est exprimée par :

$$V(t) = \begin{cases} V_{pm} [4.(\frac{t}{Tp}) - 1] & \text{si } 0 \leq t \leq \frac{Tp}{2} \\ V_{pm} [-4.(\frac{t}{Tp}) + 1] & \text{si } \frac{Tp}{2} \leq t \leq Tp \end{cases}$$

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

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

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants :

1. L'indice de modulation « m » égal au rapport de la fréquence de modulation

$$(f_p) \text{ sur la fréquence de référence } (f_r), m = \frac{f_p}{f_r}$$

2. Le taux de modulation r est égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_r)

$$\text{à la valeur crête de l'onde de modulation } (V_p), r = \frac{V_r}{V_p}$$

Les paramètres de la simulation sont inscrits dans le tableau suivant :

Paramètres	Valeurs numériques
F_p	10^3
A_p	0.7675
F_r	50
A_r	0.85
Tesion(U_0)	904

Tableau II.1 : Paramètres de simulation de l'onduleur.

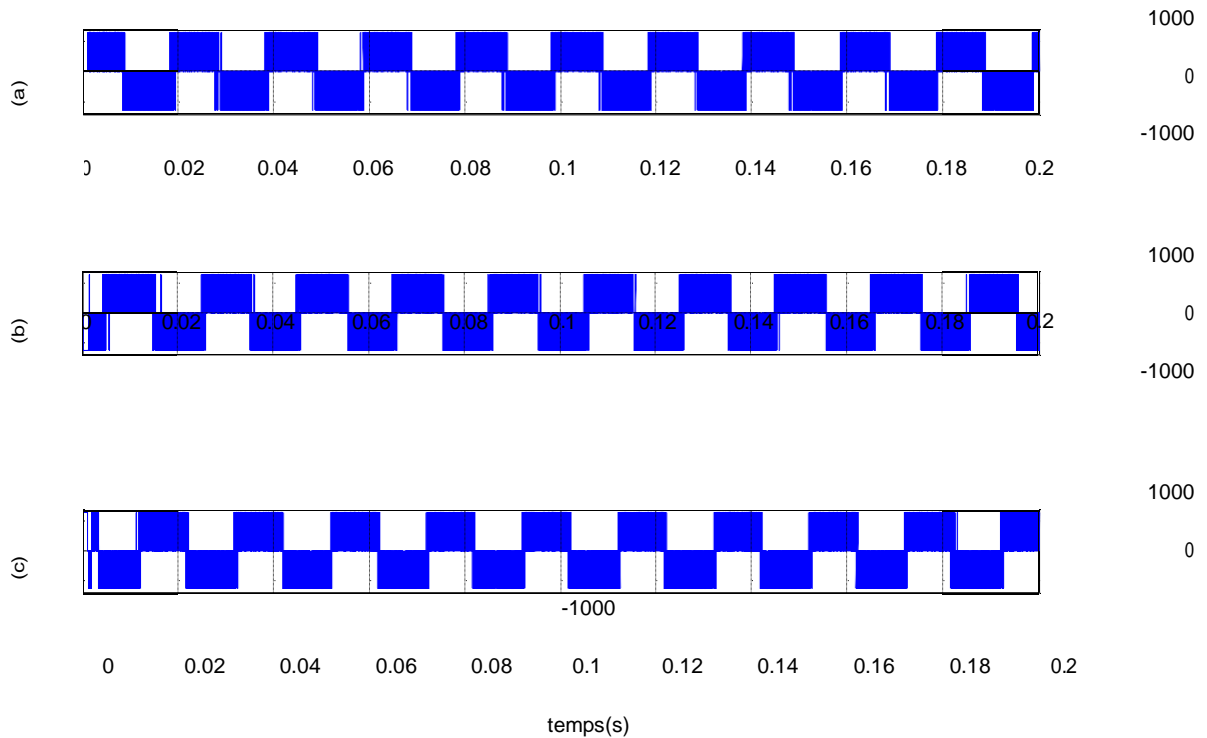


Figure II.17: Tension d'onduleur (phase (a), phase (b), phase (c)).

II .9 Avantages de la commande MLI :

Comme la sortie de l'onduleur de tension n'est pas purement sinusoïdale, l'intensité de courant ne l'est pas aussi, donc elle comporte des harmoniques, seuls responsables des parasites (pulsation de couple électromagnétique) ce qui engendre des pertes supplémentaires. Cette –MLI sert à remédier ces problèmes et elle a comme avantages :

- Variation de la fréquence de la tension de sortie.
 - Elle repousse les harmoniques vers des fréquences plus élevées. D'autre part les conséquences de ces deux avantages sont :
- Minimisation de la distorsion du courant.
- Faible coût du filtre de sortie. [17]

II .10 Le moteur asynchrone triphasé :

II .10.1 Définition de le moteur asynchrone triphasé :

La machine asynchrone est composée d'une partie fixe appelée stator et d'une partie tournante appelée rotor (figure II.18). Contrairement aux machines synchrones et à courant continu, seuls les enroulements statoriques sont couplés à un réseau d'alimentation dont les tensions (amplitude et fréquence) définissent l'état magnétique de l'entrefer. Les enroulements du rotor sont raccordés sur eux-mêmes. Le moteur asynchrone ne possède donc ni enroulement d'excitation ni aimants permanents. Pour ce qui est du flux rotorique nécessaire pour la formation du couple électromagnétique, il est produit à partir de l'induction. La figure (II.22) représente la machine asynchrone. Du point de vue mécanique, la machine asynchrone est subdivisée en trois parties distinctes : [12]

- ❖ **Le stator** : partie immobile est la partie où est connectée l'alimentation électrique
- ❖ **Le rotor** : partie tournante, elle permet de mettre en rotation la charge magnétique
- ❖ **Les paliers** : organes de support, ces derniers constituent la partie mécanique permettant ainsi la mise en rotation de l'arbre moteur.
- ❖ **L'entrefer** : Cette partie est amagnétique (c'est le vide entre le rotor et le stator)

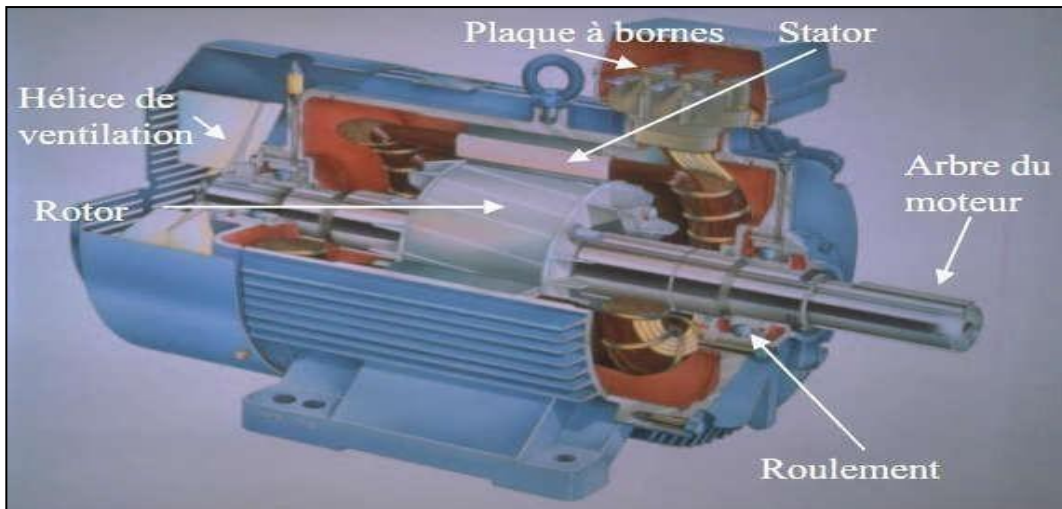


Figure II.18 : constitution de la machine asynchrone [12]

II .10.2 Principe de fonctionnement

Le principe des moteurs à courants alternatifs réside dans l'utilisation d'un champ magnétique tournant produit par des tensions alternatives

La circulation d'un courant dans une bobine crée un champ magnétique \mathbf{B} . Ce champ est dans l'axe de la bobine, sa direction et son intensité sont fonction du courant I . C'est une grandeur vectorielle.



Figure II.19 champ magnétique dans bobine.

Si le courant est alternatif, le champ magnétique varie en sens et en direction à la même fréquence que le courant.

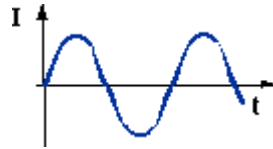


Figure II.20 : le courant de bobine

Si deux bobines sont placées à proximité l'une de l'autre, le champ magnétique résultant est la somme vectorielle des deux autres. Dans le cas du moteur triphasé, les trois bobines sont disposées dans le stator à 120° les unes des autres, trois champs magnétiques sont ainsi créés

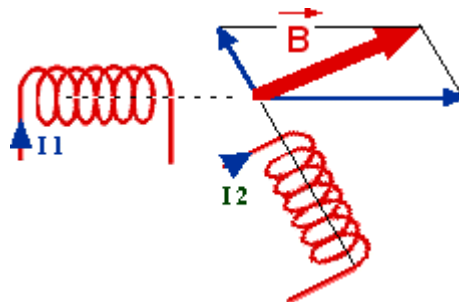


Figure II.21 trois champs magnétique.

Compte-tenu de la nature du courant sur le réseau triphasé, les trois champs sont déphasés (chacun à son tour passe par un maximum). Le champ magnétique résultant tourne à la même fréquence que le courant soit $50 \text{ tr/s} = 50 \text{ Tr/s} = 3000 \text{ tr/mn}$.

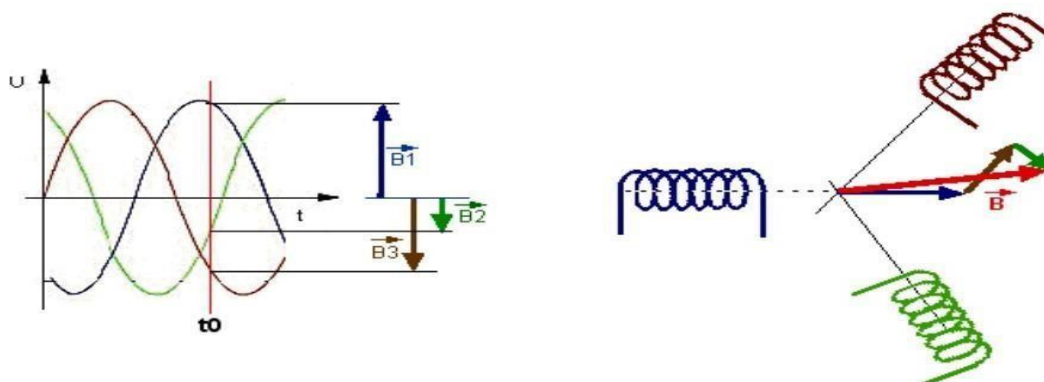


Figure II.22 Les 3 enroulements statoriques.

Les 3 enroulements statoriques créent donc un champ magnétique tournant, sa fréquence de rotation est nommée fréquence de synchronisme. Si on place une boussole au centre, elle va tourner à cette vitesse de synchronisme.

Le rotor est constitué de barres d'aluminium noyées dans un circuit magnétique. Ces barres sont reliées à leur extrémité par deux anneaux conducteurs et constituent une "cage d'écureuil". Cette cage est en fait un bobinage à grosse section et très faible résistance.

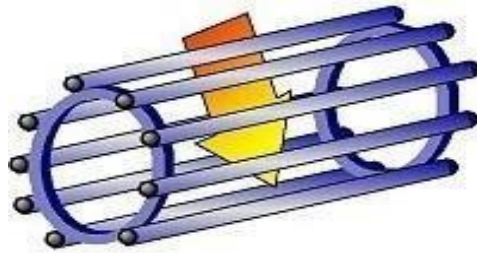


Figure II.23 Le rotor de moteur asynchrone.

Cette cage est balayée par le champ magnétique tournant. Les conducteurs sont alors traversés par des courants de Foucault induits. Des courants circulent dans les anneaux formés par la cage, les forces de Laplace qui en résultent exercent un couple sur le rotor. D'après la loi de Lenz les courants induits s'opposent par leurs effets à la cause qui leur a donné naissance. Le rotor tourne alors dans le même sens que le champ mais avec une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme de ce dernier.

Le rotor ne peut pas tourner à la même vitesse que le champ magnétique, sinon la cage ne serait plus balayée par le champ tournant et il y aurait disparition des courants induits et donc des forces de Laplace et du couple moteur. Les deux fréquences de rotation ne peuvent donc pas être synchrones d'où le nom de **moteur asynchrone**.

Prenons l'exemple d'un moteur dont la fréquence de rotation nominale relevée sur la plaque signalétique est de 2840 tr/mn, ce moteur étant alimenté en courant de 50Hz, la fréquence de rotation du champ magnétique est donc de 50 tr/s soit 3000 Tr/mn. Le rotor est donc balayé par un champ magnétique qui tourne à une fréquence de rotation relative de $3000 - 2840 = 160$ tr/mn.

II .10.3 Le bobinage

Les bobines sont logées dans les encoches du stator. S'il y a une paire de pôles magnétique pour chacune des trois phases, la fréquence de synchronisme est alors de 3000 tr/mn. si on augmente le nombre de paires de pôles, il est possible d'obtenir des moteurs avec des fréquences de rotation différentes.

1 paire de pôles => 3000 tr/mn 2 paires de pôles => 1500 tr/m



Figure II.24 La bobine de moteur asynchrone.

Le branchement des bobines sur le réseau se fait au niveau de la plaque à borne située sur le dessus du moteur. On dispose ainsi de 6 connexions, une pour chacune des extrémités des trois bobines. Les bornes sont reliées aux bobines selon le schéma ci-contre.

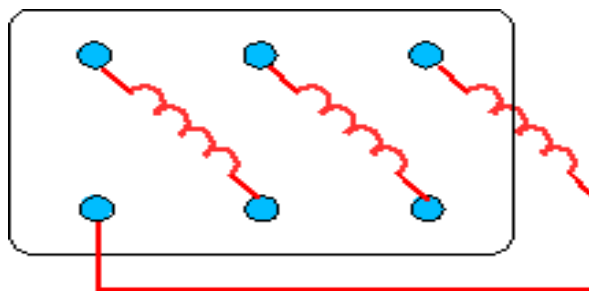


Figure II.25 Le branchement des bobines.

II .10.3.1 Branchement étoile ou triangle

Il y a deux possibilités de branchement du moteur au réseau électrique triphasé. Le montage en étoile et le montage en triangle. Avec un branchement en étoile, la tension aux bornes de chacune des bobines est d'environ 230V. Dans le montage en triangle, chacune des bobines

est alimentée avec la tension nominale du réseau (400V). On utilise le montage étoile si un moteur de 230V doit être relié sur un réseau 400V ou pour démarrer un moteur à puissance réduite dans le cas d'une charge avec une forte inertie mécanique.

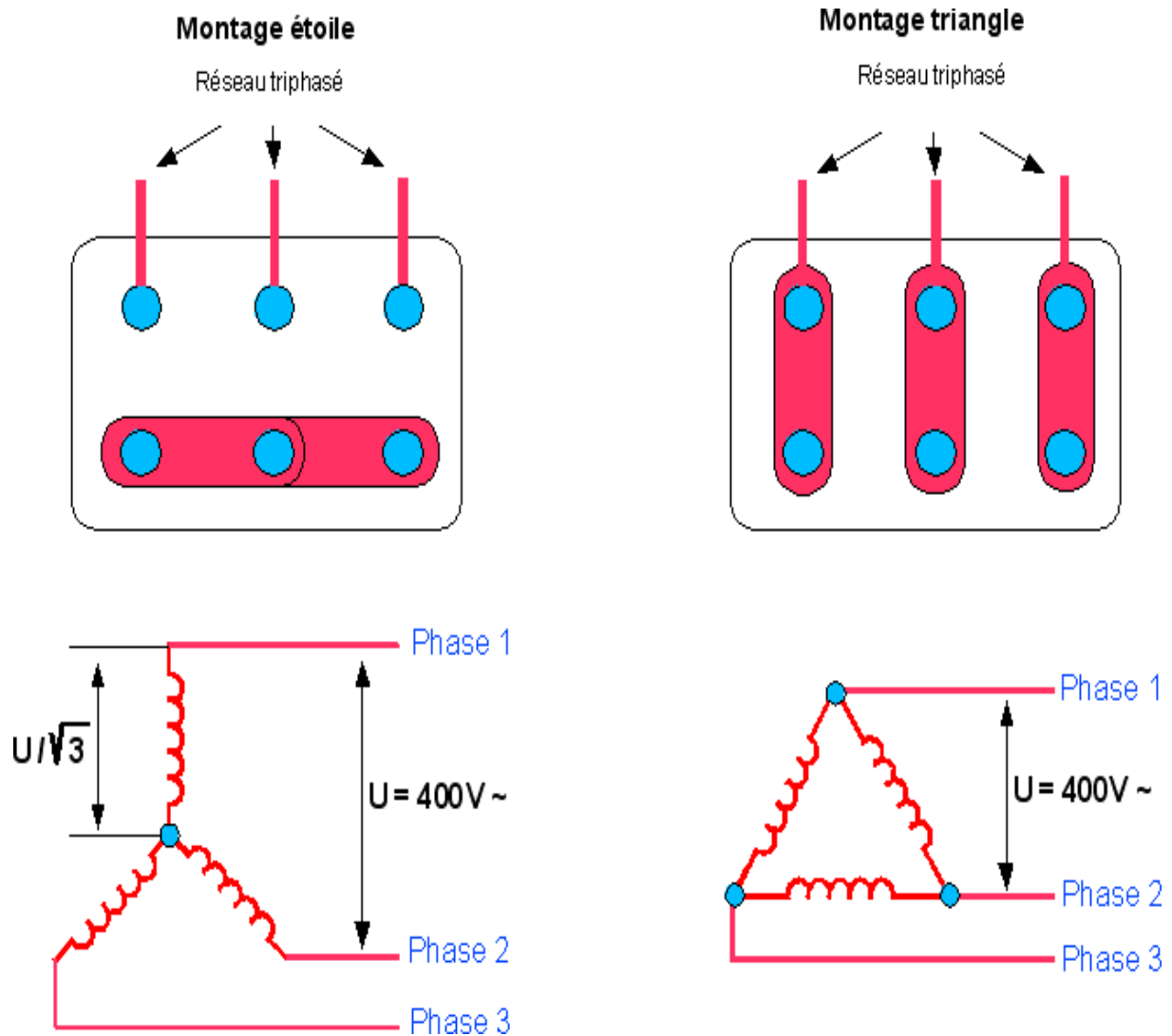


Figure II.26 Branchement de moteur asynchrone.

II .11 Plaques signalétiques :

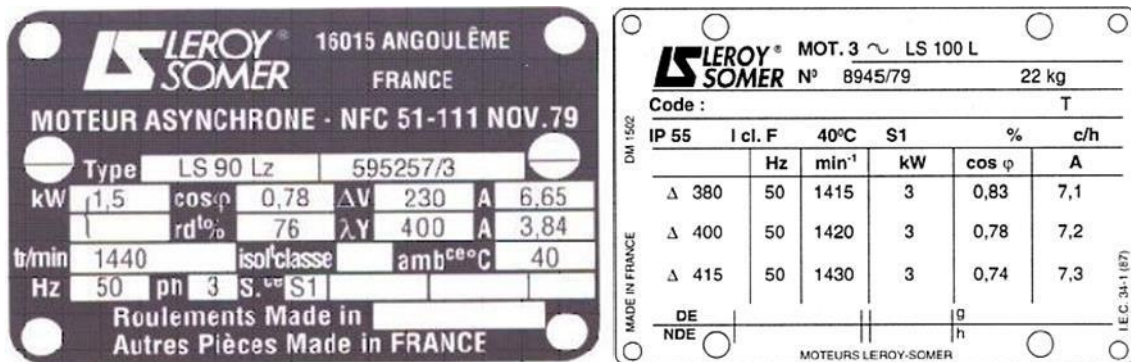


Figure II.27 Plaques signalétiques.

.Type :(LS90Lz) référence propre au constructeur

- **Puissance** :(1,5Kw) puissance utile délivrée sur l'arbre du moteur.
- **Facteur de puissance ou cos phi**:(0,78) permet le calcul de la puissance réactive consommée .
- **rendement**(76%) : permet de connaître la puissance électrique consommée ou absorbée
- **Tensions** : (230v/400v) la première indique la valeur nominale de la tension aux bornes d'un enroulement. Elle détermine le [couplage \(étoile ou triangle\)](#) à effectuer en fonction de la tension du réseau d'alimentation.
- **Intensités** :(6,65A/3,84A) Elles représentent l'intensité en ligne (dans chaque phase) pour chacun des couplages .
- **vitesse** :(1440 Tr/min) Indique la vitesse nominale du rotor. On dit aussi vitesse réelle. On connaît alors La vitesse de synchronisme **ns** du moteur (ici 1500 tr/min)
- **classe d'isolement** :(non indiquée) .
- **Température ambiante** :(40°C) utilisation recommandée maximum
- **Fréquence** :(50Hz) fréquence du réseau d'alimentation.
- **Nombre de phases** :(Ph 3) moteur triphasé

- **service** : (S1) utilisation en marche continue, intermittente...
 - **Indice de protection IP** : (non indiquée) défini par trois chiffres le degré de protection dumoteur à la poussière, à l'eau et aux chocs mécaniques.

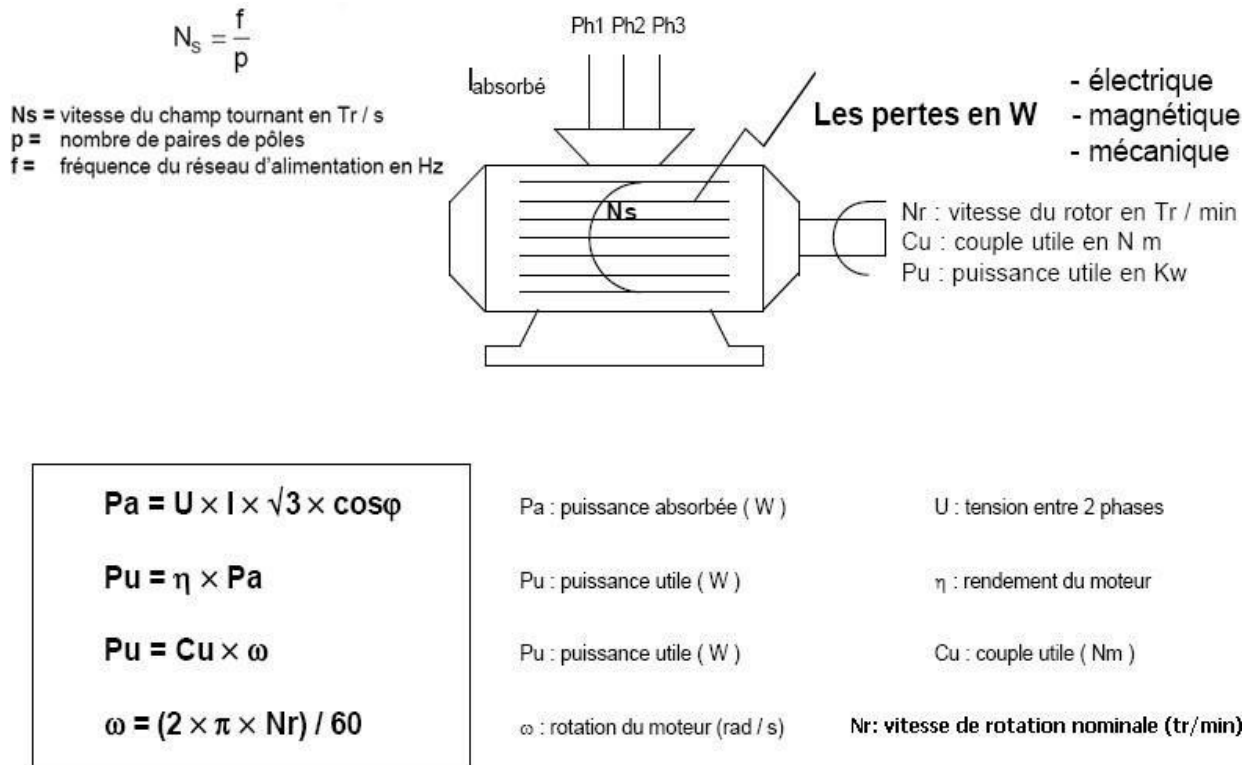


Figure II.28 les normes de moteur asynchrone.

II .12Puissance et rendement

II .12.1Bilan des puissances

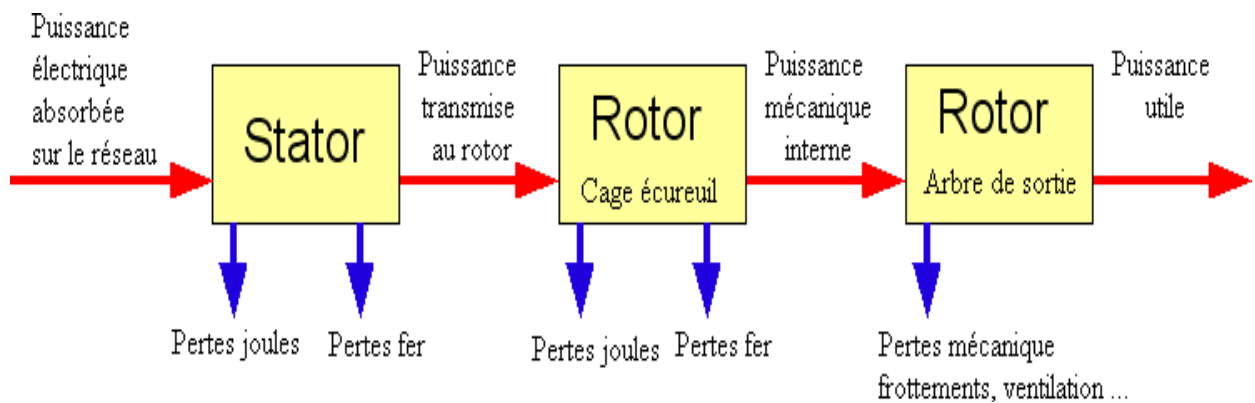


Figure II.29 Bilan des puissances.

II .13 Caractéristique du moteur asynchrone

Le couple (N.m) varie avec la fréquence de rotation (tr/min) du moteur accouplé à la charge entraînée (supposée fixe) . Les caractéristiques du moteur et de la charge se croisent au point de fonctionnement pour lequel les couples moteur et résistant sont identiques.

D'une manière générale, le point de fonctionnement en moteur doit être choisi pour $N < N_s$ et doit être placé dans la partie verticale de la courbe, au plus près de la vitesse de rotation nominale N_r (appelée aussi N_n).

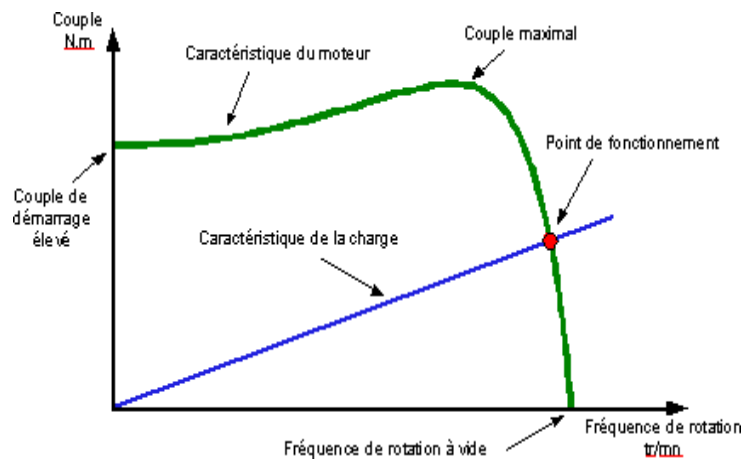


Figure II.30 Caractéristique du moteur asynchrone.

II .14 Liaison avec le réseau EDF

Le moteur est relié au réseau par un certain nombre de dispositifs de sécurité et commande.

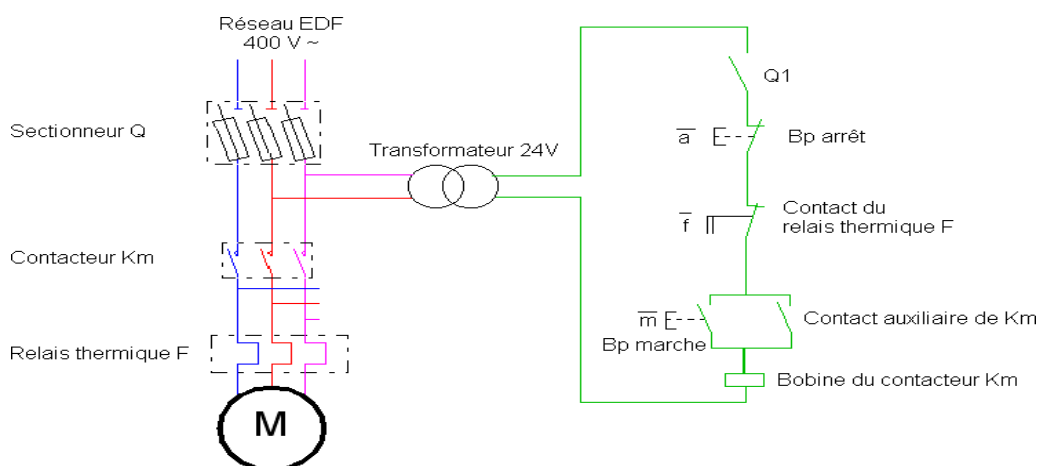


Figure II.31 Liaison avec le réseau EDF.

- Le sectionneur d'isolement avec fusibles permet de déconnecter le moteur du réseau pour des opérations de maintenance par exemple. Il protège également le dispositif en aval contre les risques de court circuit grâce aux fusibles.
- Le contacteur permet d'alimenter le moteur avec une commande manuelle ou automatique avec un automate programmable.
- Le relais thermique protège le moteur contre les surcharges de courant, l'intensité maximale admissible est réglable. Son action différentielle permet de détecter une différence de courants entre les phases en cas de coupure d'une liaison par exemple.
- Le transformateur abaisse la tension secteur à une valeur de 24V pour garantir la sécurité des utilisateurs sur la partie commande.

II .15 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons parlé du système photovoltaïque, de ses avantages et des technologies de pointe qui nous permettent d'obtenir un courant et une tension de haute qualité qui nous servent en permanence jour et nuit, telles que les régulateur mppt, pwm et convertisseur l'onduleur..

Où nous avons conclu qu'ils se complètent pour répondre à nos besoins quotidiens.

Chapitre III

*Simulation et réalisation de
système photovoltaïque*

III.1 Introduction :

Ce dernier chapitre sera consacré à la réalisation du système photovoltaïque. nous Étudions d'abord la simulation dans le programme Proteus 8, puis complétons notre projet sur la réalité en installant les composants de ce système et en comparant la simulation avec notre projet sur la réalité, et au final nous aurons terminé notre projet lié au système photovoltaïque.

III .2 les composants :

III .2.1 Transistors MOSFET IRF740 :

Il existe des transistors *MOSFET* de petite puissance et de forte puissance. Ceux de forte puissance sont capables de supporter des courants de *plusieurs ampères à plusieurs centaines d'ampères*, ce qui bien entendu impose une résistance ohmique à l'état passant trèsfaible. On ne peut en effet envisager d'utiliser un transistor dont la résistance est de 1 ohm pour faire passer 50 ampères. C'est pourquoi il n'est pas rare de trouver des transistorsde cette catégorie qui affichent une résistance passante de quelques *milli-ohms* ou quelques *dizaines de milli-ohms*. par comparaison aux transistors bipolaires, on arrive à commuter des puissances importantes avec moins de pertes et moins *d'échauffement*. Ce typede transistor est souvent préféré pour la commande de charges importantes ou pour limiter la taille - ou même supprimer complètement - les encombrants dissipateurs thermiques.



Figure III.1: transistor mosfet irf740

Symbole :

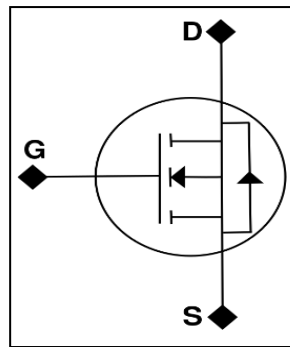


Figure III.2 : symbole électrique de transistor mosfet.

III .2.2 STRUCTURE DU MOSFET :

La Figure (III.3) montre la structure physique d'un transistor MOS de type canal N. Sur un substrat en silicium de type P, on a diffusé deux zones de type N fortement dopées, appelées SOURCE et DRAIN. Une très fine couche ($0,1\mu\text{m}$) d'oxyde SiO_2 , qui est un excellent isolant électrique, est créée à la surface du substrat de manière à recouvrir la zone qui s'étend entre le Drain et la Source. Sur cette couche isolante, on dépose une couche d'aluminium pour former l'électrode de grille (GATE). Des contacts métalliques sont également prévus au niveau de la Source, du Drain et du substrat (BODY). On obtient donc un dispositif à 4 électrodes : Source, Drain, Gate, Body. On remarque que le substrat de type P forme avec le Drain et la Source des jonctions PN qui seront maintenues polarisées en inverse durant le fonctionnement normal.

Pour ce faire, on relie généralement la Source au Substrat, le Drain étant toujours soumis à une tension positive par rapport à la Source. Lorsqu'une tension positive par rapport à la Source est appliquée à la GATE, un courant circule latéralement du DRAIN vers la SOURCE, à travers une région appelée CANAL de longueur L (de $0,5$ à $10\mu\text{m}$) et de largeur W (1 à $500\mu\text{m}$).

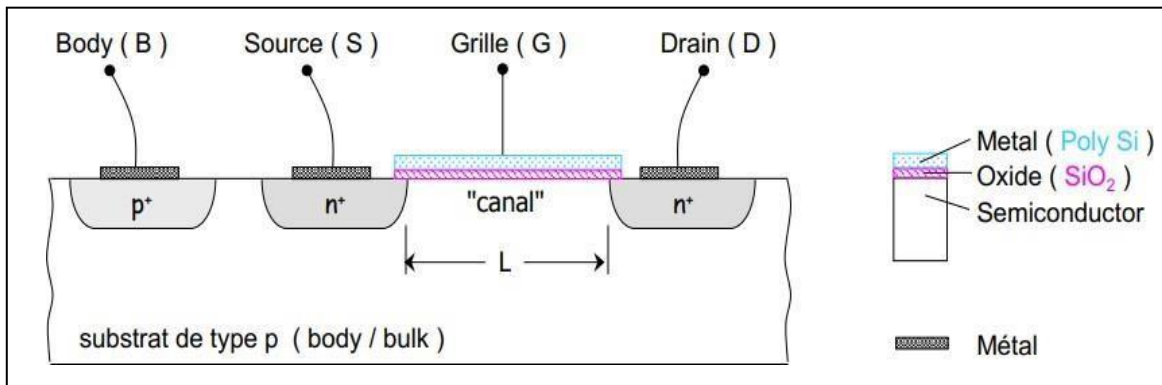


Figure III.3 : STRUCTURE DU MOSFET.

III .2.3 La carte Arduino Uno :

L'Arduino est une carte électronique en Matériel Libre pour la création artistique interactive.

Elle peut servir:

1/ pour des dispositifs interactifs autonomes simples.

2/ comme interface entre capteurs/actionneurs et ordinateur. 3/ comme programmeur de certains microcontrôleurs.

La carte Arduino qu'on l'a utilisé c'est bien « Arduino Uno » (voir figure III.4), C'est la première version stable des cartes Arduino. Elle possède toutes les fonctionnalités d'un microcontrôleur classique en plus de sa simplicité d'utilisation. Elle utilise une puce ATmega328 . [14]

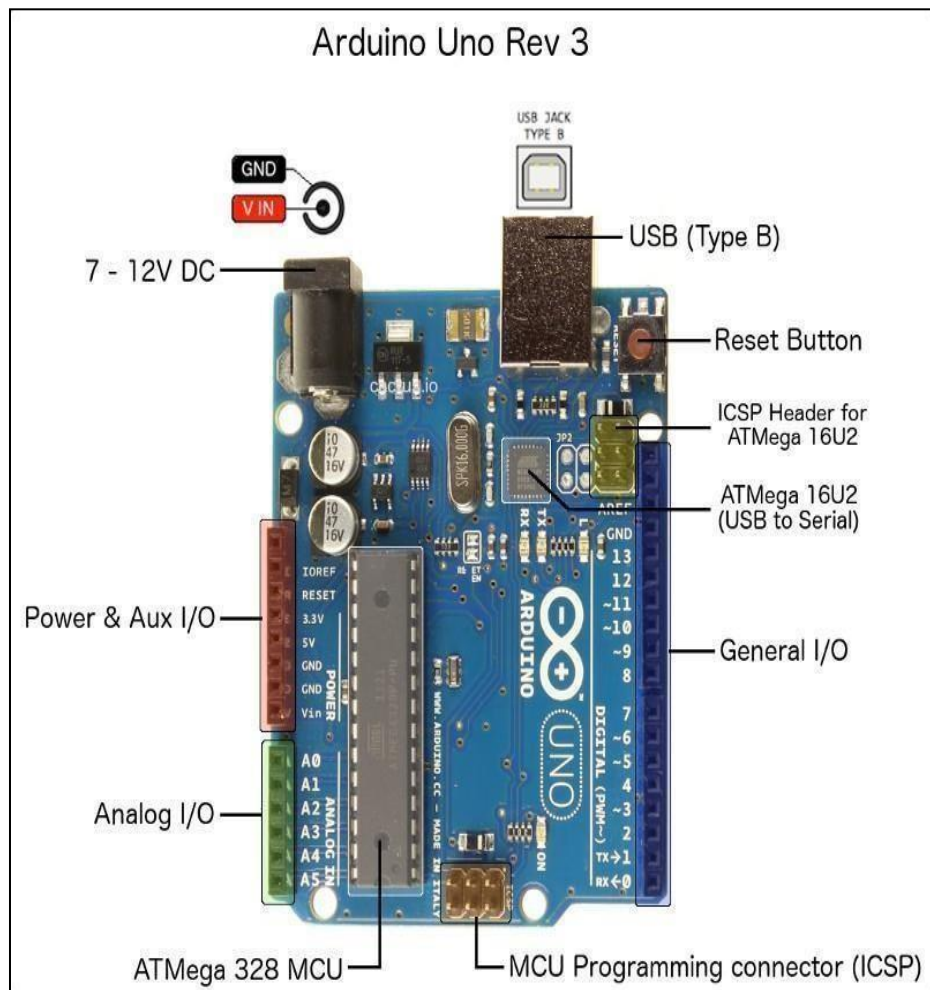


Figure III.4 La Carte Arduino Uno

III .2.3.1 Caractéristiques de la carte Arduino Uno R3 :

- Microcontrôleur : ATmega328 (ATMEL de la famille AVR 8bits).
- Tension de fonctionnement : 5V
- Tension d'alimentation (recommandée) : 7-12V Tension d'alimentation (limites) : 6-20V
- Broches E/S numériques : 14 (dont 6 disposent d'une sortie PWM)
- Broches d'entrées analogiques : 6 (utilisables en broches E/S numériques)
- Intensité maxi disponible par broche E/S (5V) : 40 mA (200mA cumulé pour l'ensemble des broches E/S)
- Intensité maxi disponible pour la sortie 3.3V 50 Ma

- Intensité maxi disponible pour la sortie 5V
- Fonction de l'alimentation utilisée –500 mAmax si port USB utilisé seul
- Mémoire Programme Flash : 32 KB (ATmega328) dont 0.5 KB sont utilisés par le bootloader
- Mémoire SRAM (mémoire volatile) : 2 KB (ATmega328) Mémoire EEPROM (mémoire non volatile) : 1 KB (ATmega328) Vitesse d'horloge : 16 MHz

III .2.3.2 Les avantages de la carte Arduino Uno :

- Pas cher.
- Environnement de programmation clair et simple.
- Multiplateforme : tourne sous Windows, Macintosh et Linux.
- Nombreuses bibliothèques disponibles avec diverses fonctions implémentées.
- Logiciel et matériel open source et extensible.

III .2.4 IR2104

L'IR2104 est une puce de pilote de porte demi-point haute vitesse qui accepte une entrée à faible puissance pour produire des pilotes de courant à haute puissance. Il peut être utilisé pour piloter des dispositifs de commutation haute puissance tels que les MOSFET et les IGBT et peut piloter des MOSFET côté haut et côté bas. L'IR2104 a un courant de source typique de 0,21 A et un courant de dissipation de 0,36 A. L'entrée logique est compatible avec la sortie standard CMOS ou LSTTL, jusqu'à 3,3 V logique.

III .2.4.1 IR2104 Configuration du brochage

Code PIN	nom de la broche	Description
1	VCC	Tension d'alimentation de la logique et de la commande de grille interne
2	IN	Input Pin
3	SD	Broche d'arrêt (actif bas)
4	COM	Alimentation de la puce et masse du signal
5	LO	Sortie de pilote de porte côté bas
6	VS	Retour d'alimentation flottant côté haut
7	HO	Sortie de pilote de porte latérale élevée
8	VB	Alimentation flottante du pilote de porte côté haut

Tableau III.1 : Configuration du brochage de ir 2104

III .2.4.2 Caractéristiques et spécifications

- Canal flottant conçu pour un fonctionnement Bootstrap
- Entièrement opérationnel à +600V
- Tolérant aux tensions transitoires négatives
- immunité dV/dt
- Plage d'alimentation de l'entraînement du portail de 10 à 20 V
- Verrouillage de sous-tension
- Compatible logique d'entrée 3,3 V, 5 V et 15 V
- Logique de prévention de la conduction croisée
- Temps mort défini en interne
- Sortie côté haut en phase avec l'entrée
- L'entrée d'arrêt éteint les deux canaux [15]

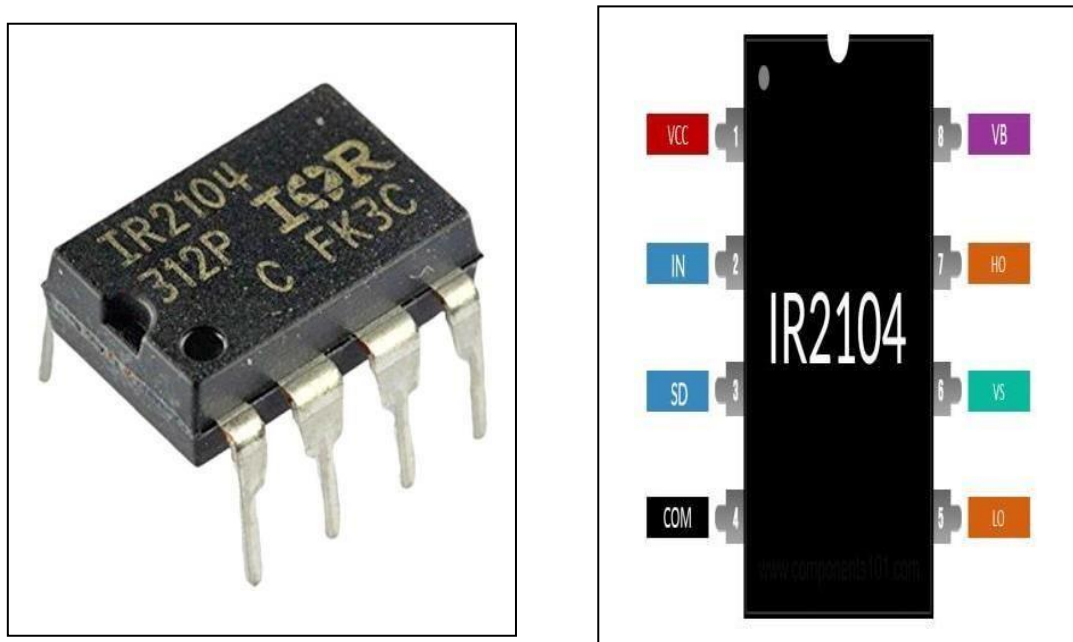


Figure III.5 : IR2104

III.3. Partie simulation

III.3.a. Schéma complet du système sur MATLAB/Simulink

Dans la figure suivante nous présentons notre système de conversion proposé et implanter avec le logiciel de simulation SIMULINK /MATLAB, notre système comporte un GPV, Hacheur booste, onduleur filtre et moteur asynchrone associe à des commande MPPT, MLI, PLL et régulateur PID. Figure III.

III.3.b . Résultats de simulation sous MATLAB/Simulink

Les tensions composées de l'onduleur dans les trois phases avant le filtre sont présentés dans la figure suivante :

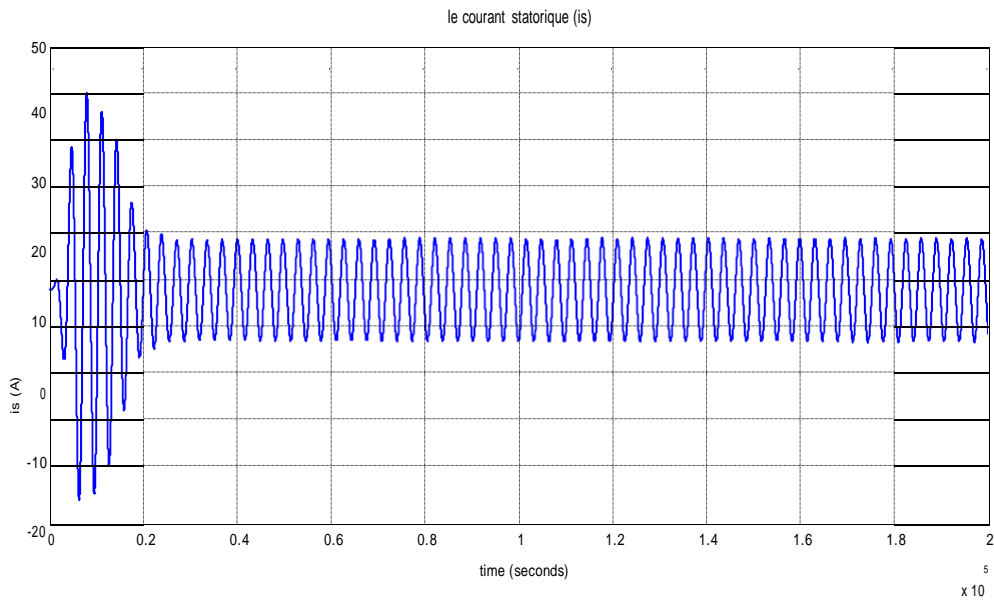


Figure III.7: Le courant statorique (i_s) en fonction du temps.

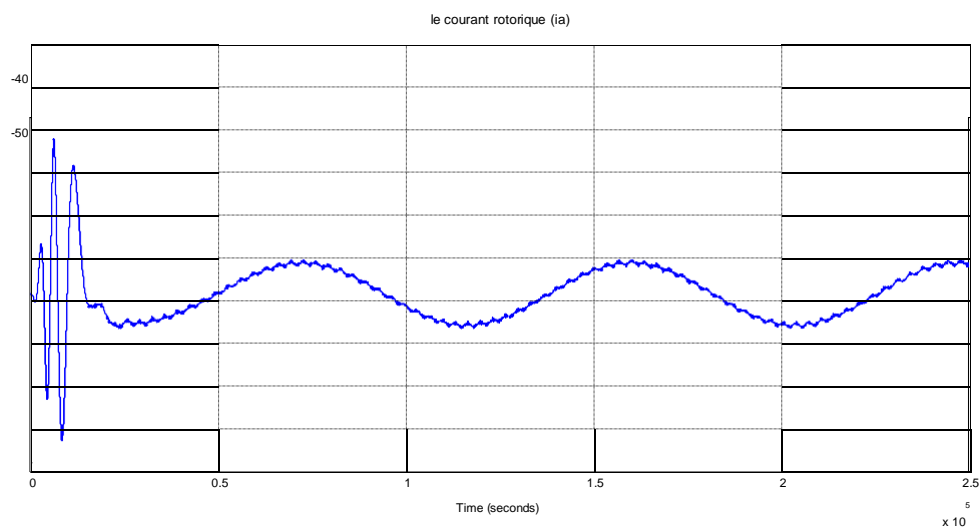


Figure III.8: Le courant rotorique (i_a) en fonction du temps.

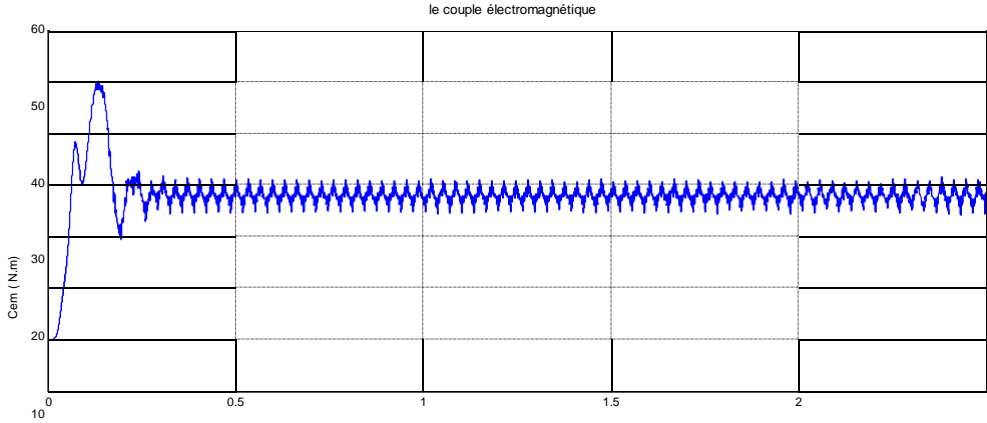


Figure III.9: Le couple électromagnétique en fonction du temps.

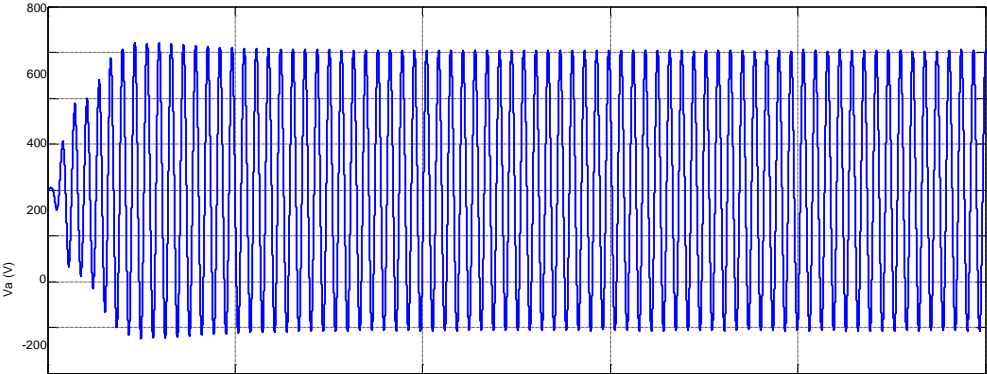


Figure III.10: illustre la tension Vs après le filtre LC.

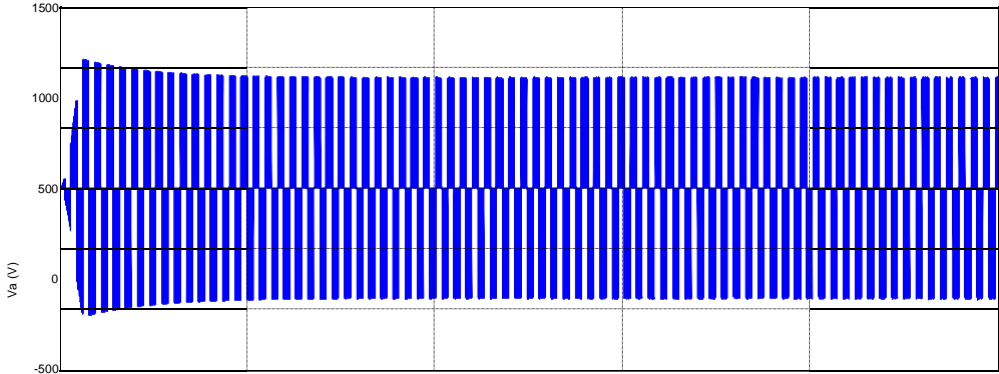


Figure III .11: illustre la tension Vi.

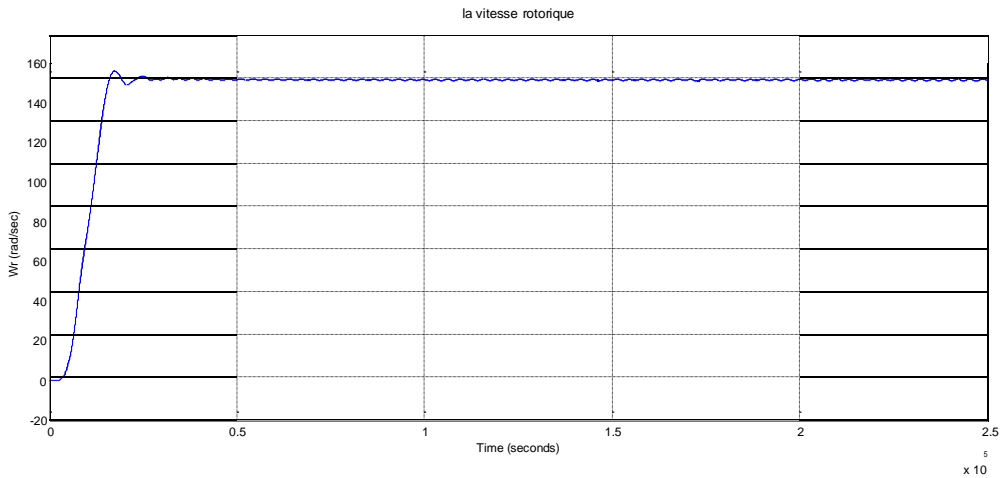


Figure III.12: La vitesse rotorique en fonction du temps.

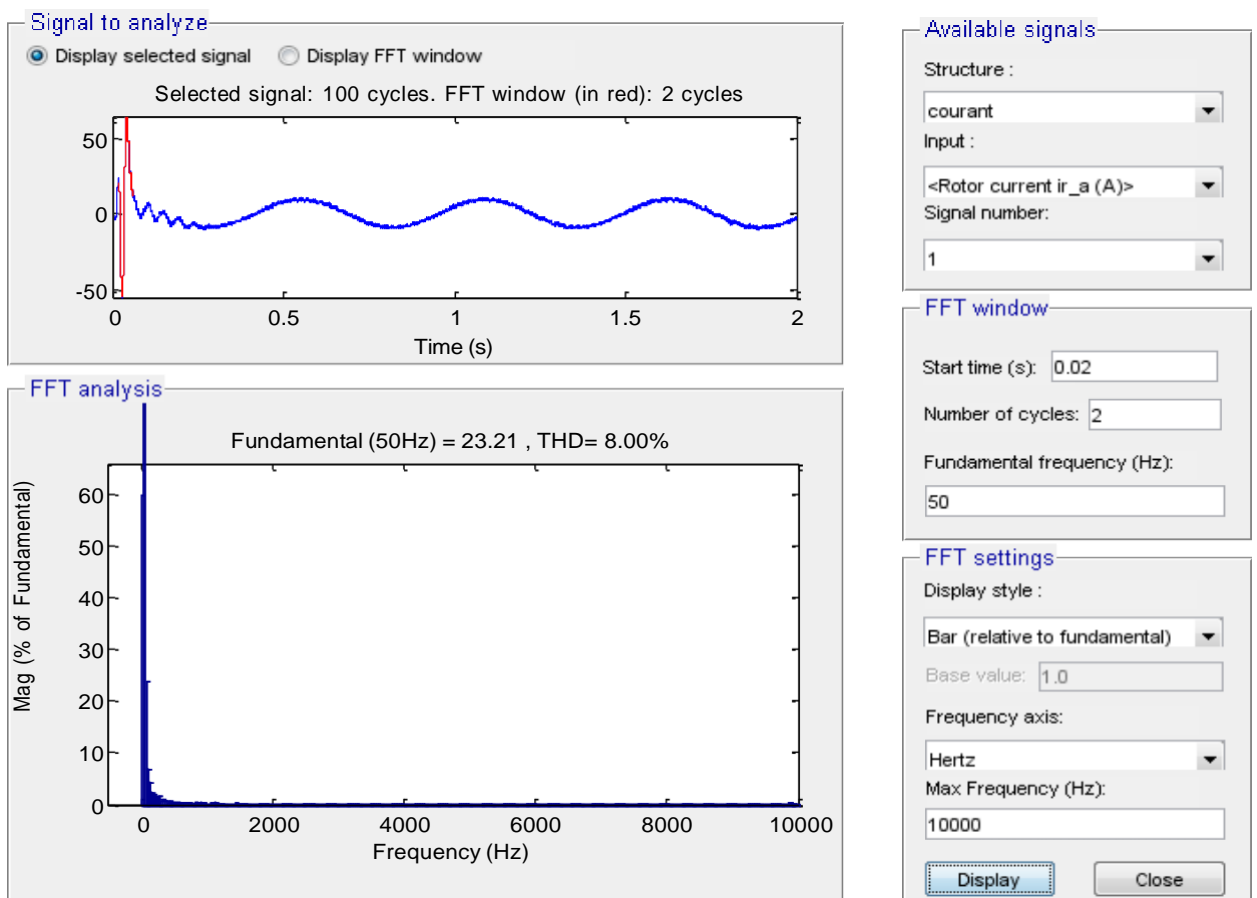


Figure III.13: Résultat de simulation du signal du courant d’aimantation du moteur.

Les résultats de simulation montrent que :

- La tension et le courant qui alimente le moteur asynchrone présente une forme purement sinusoïdale avec un déphasage égale acceptable du à la self du filtre.
- La fréquence de la tension est très proche de la fréquence du réseau ($f_{res}=50.09\text{HZ}$) respectant la caractéristique de commande du moteur asynchrone $u/f=4.4$
- Les taux de distorsion harmonique après le filtrage ($\text{THD}_{\text{filtre}}=8\%$.) très performant

Le hacheur Boost donne une tension continue stable avec un pic au début à cause de la recherche du point maximale de fonctionnement.

Malgré l'utilisation de la modulation de largeur d'impulsion sinus triangle, on a obtenu à la sortie de l'onduleur des tensions de ligne ne sont pas purement sinusoïdales, à cause des harmoniques qui engendrent des pertes et des échauffements au système PV surtout lors du raccordement de l'onduleur avec le MAS.

Après la simulation du MAS, on a remarqué que la vitesse de rotation du moteur asynchrone va évaluer avec le temps et atteigne sa vitesse nominale (149,6 rad/s) et tourne avec un flux constat dans un temps lent (dépasse 0.4 sec), avec une tendance à osciller à cause de l'inertie des masses tournantes et du coefficient d'amortissement du aux faibles valeurs des flux.

L'évolution du couple dans l'intervalle de temps 0 et 0.25 sec est une allure caractéristique type de tous les moteurs asynchrone. Celui-ci présente aux premiers instants des pulsations très importantes. Pendant le régime transitoire, le couple est fortement pulsatoire, puis se stab

III.3.c.Schéma complet du système sur proteus .8

Pour étudier le système photovoltaïque et comment le contrôler, nous avons simulé notre système composé d'un panneau solaire, IR 2014, régulateur MPPT et régulateur pwm...

dans le programme Protéase comme indiqué dans la figure correspondante(Figure III.14) ilise en fin du régime (Figure III.10).

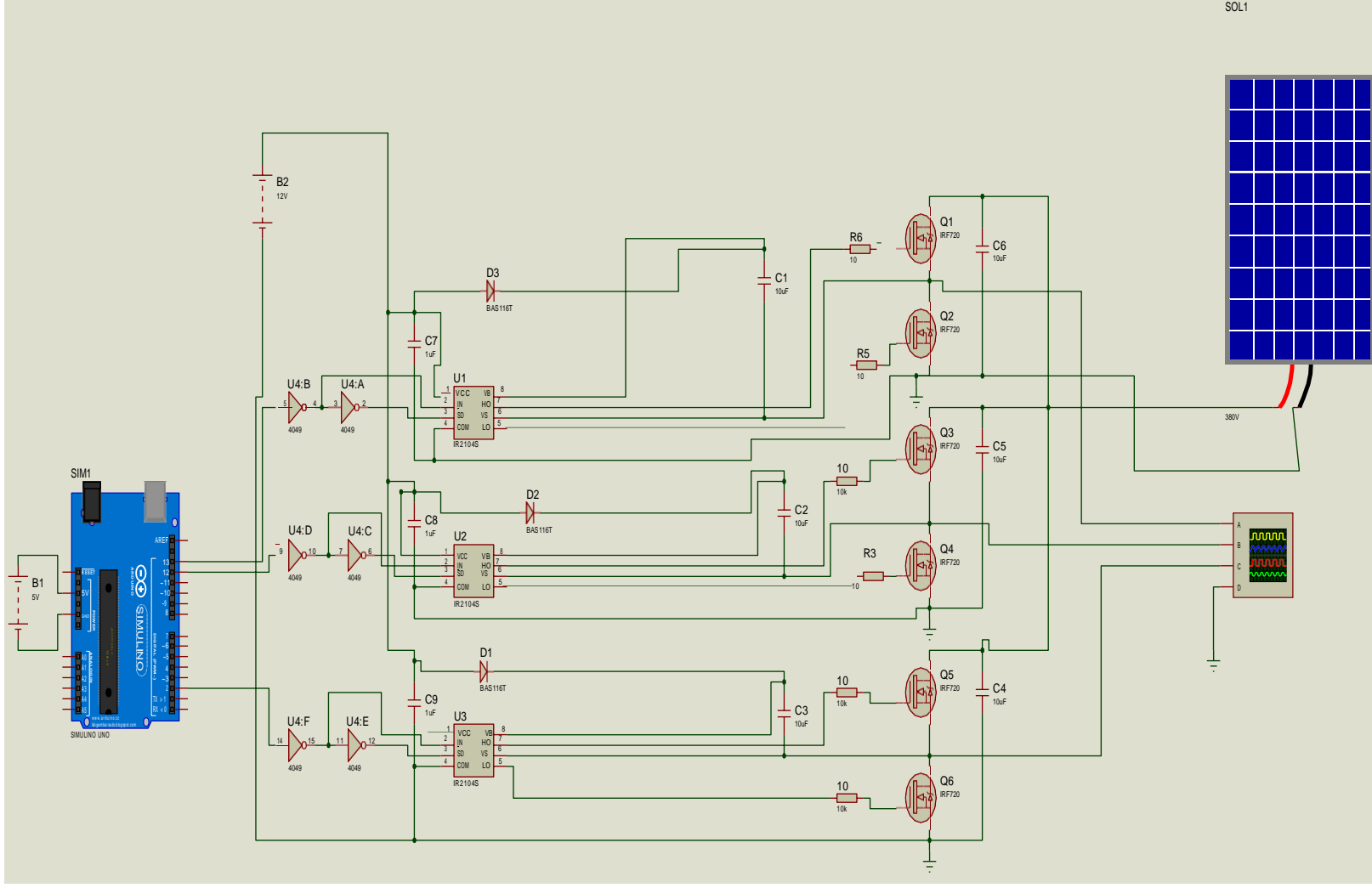


Figure III.14 : le système de photovoltaïque sur le proteus 8

III.3.d. Résultats de simulation sous Proteus.8 :

Dans l'environnement Proteus, nous ferons des tests pour prouver que le chargeur est capable d'ajuster la valeur du rapport cyclique en cas de changement de tension ou de courant.

La figure (III.15) montre un signal PWM avec une fréquence fixe de 50 kHz et un rapport cyclique variable après quoi ce signal attaque l'entrée du pilote Mosfet.740

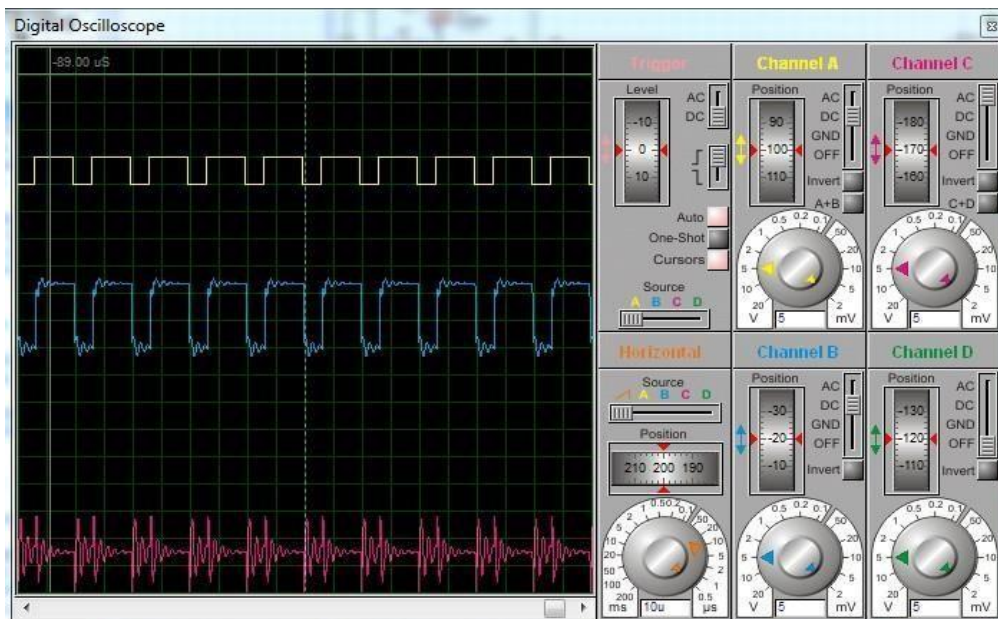


Figure III.15 : Le signal de la PWM dans proteus 8

III.4 Partie pratique

Enfin, notre système photovoltaïque a été achevé dans le laboratoire électrique de l'Université Khenchela Abbas Lagharour, de sorte que notre objectif a été atteint et nous avons obtenu les résultats souhaités comme le montre la figure suivante (Figure III.16)



Figure III.16 : Réalisation pratique de système photovoltaïque

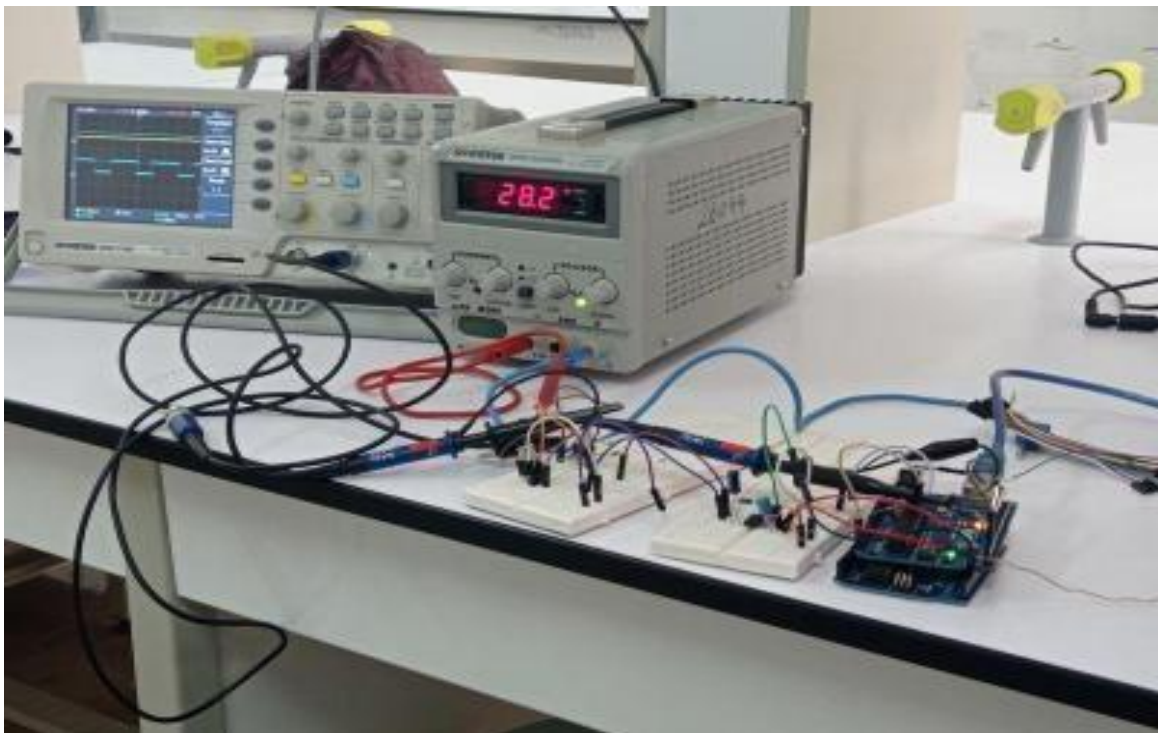


Figure III.17: Réalisation final pratique de système photovoltaïque

III. .4.1 les résultats de partie pratique :

le figure qui nous correspond est le signal du régulateur pwm, de sorte que ce signal actionne les entrées du pilote Mosfet IRF740, de sorte que nous obtenons le chiffre correspondant.

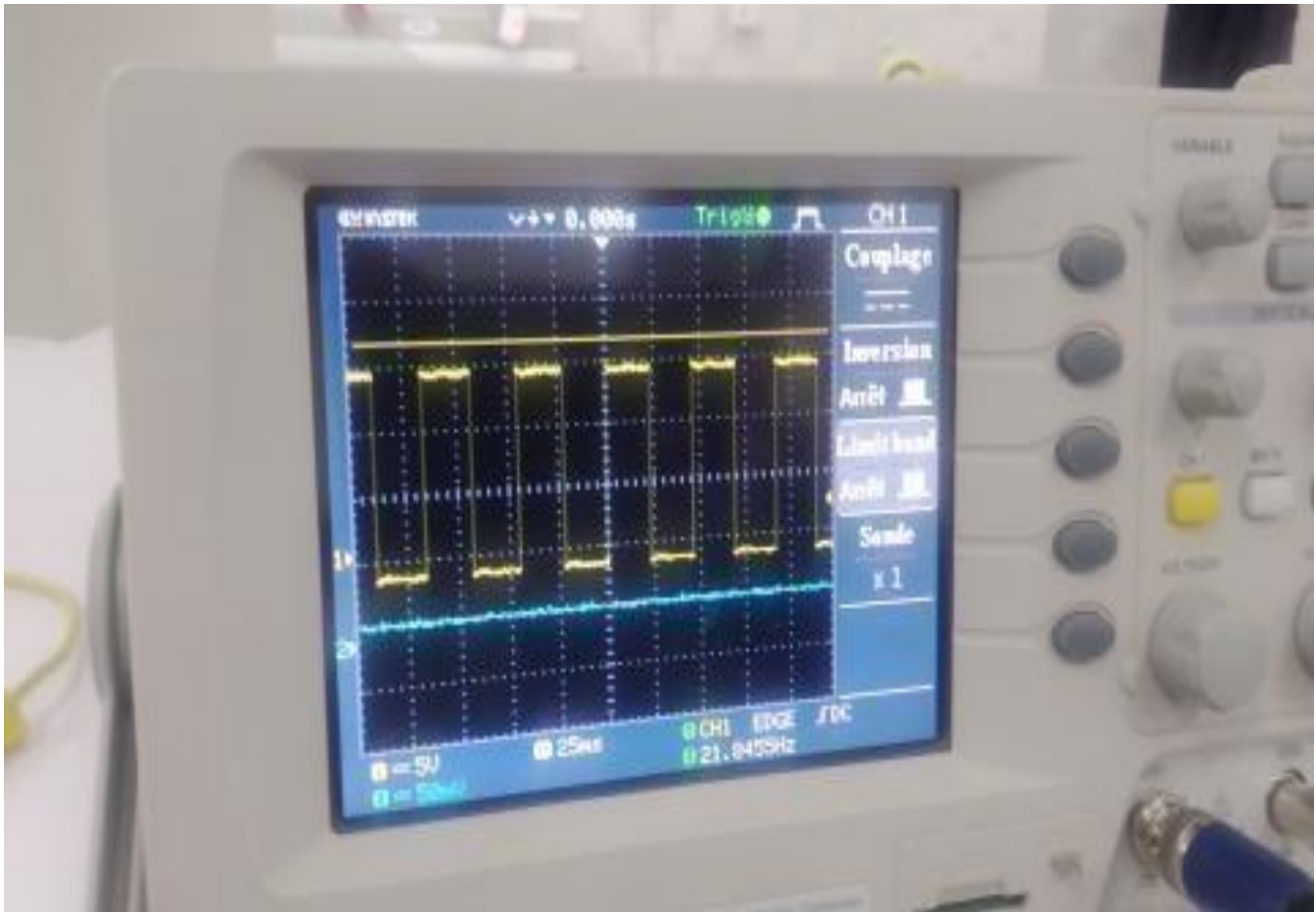


Figure III.18 : Signal de notre système

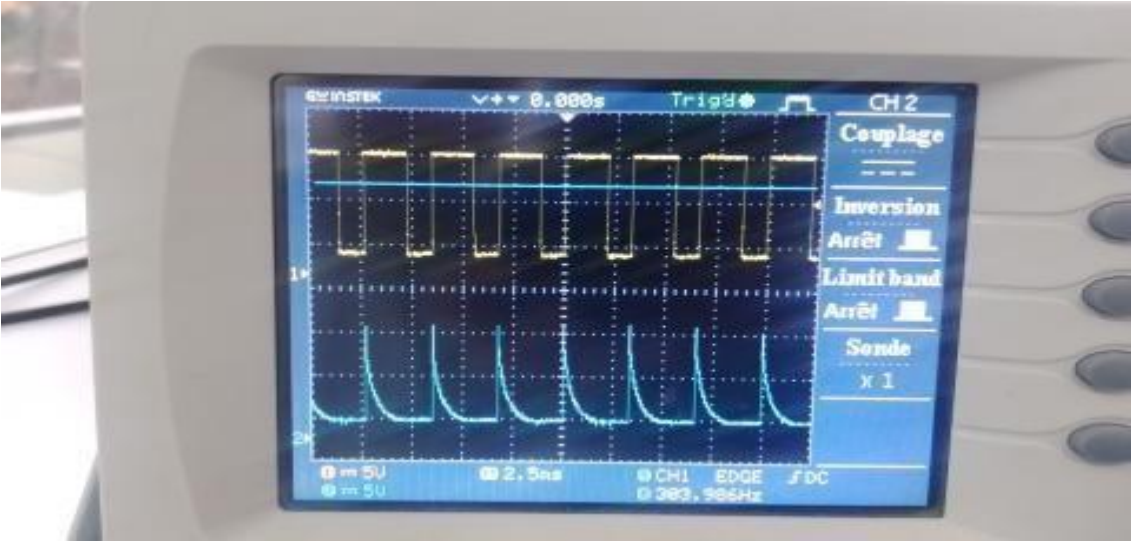


Figure III.19 : Signal final

Remarque :

En pratique, les tests ont été réalisés en utilisant un générateur de tension au lieu de panneaux solaires dans le but de travailler avec une source variable.

III.5. Conclusion :

Après avoir travaillé sur différents programmes, tels que Proteus et Matalab, nous avons essayé d'obtenir les résultats que nous pouvions réellement obtenir en faisant fonctionner des générateurs électriques au lieu de panneaux solaires et en régulant les impulsions de l'onduleur qui est la conversion du courant continu en courant alternatif afin que Le résultat final de notre deuxième partie est de modifier le cycle de service en jugeant le temps de démarrage de l'onduleur via la technologie PWM qui nous a permis d'obtenir les résultats ci-dessus.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Le but de ce modeste travail est de concevoir un système photovoltaïque qui vise à exploiter le maximum d'énergie. C'est grâce aux régulateurs **pwm** et aux algorithmes mppt qui nous permettent d'exploiter suffisamment de puissance pour répondre à nos besoins.

Nous avons commencé par un aperçu des concepts de base liés à l'effet photoélectrique, au principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques, ainsi qu'à la modélisation et à la conception des installations photovoltaïques. . Ensuite, nous expliquons les différents algorithmes mppt et expliquons le fonctionnement des impulsions pwm et leur effet sur le convertisseur **DC-AC**, l'onduleur, où nous nous sommes séparés dans notre conversation sur le convertisseur **DC-AC**, l'onduleur et ses composants, l'irf740 et le principe de son travail, comme nous avons parlé de l'ir2104.

Après cela, nous nous sommes occupés de la partie contrôle, afin que nous incarnions notre système sur le programme Proteus et Matlab pour la simulation et obtenions les résultats souhaités, puis nous sommes passés à la partie pratique afin que nous incarnions notre modeste travail sur la réalité avec les possibilités signifie et nous avons obtenu des résultats identiques au programme de simulation comme indiqué précédemment afin que nous ayons obtenu la plus grande quantité d'énergie souhaitée.

Selon les résultats obtenus, nous pouvons conclure que le régulateur **pwm** et le régulateur **mppt** nous ont beaucoup profité dans le système photovoltaïque car ils ont contribué à la conversion du courant en courant alternatif et nous avons obtenu la quantité nécessaire pour déplacer le moteur à sa convenance.

Annexe :

sketch_maycc

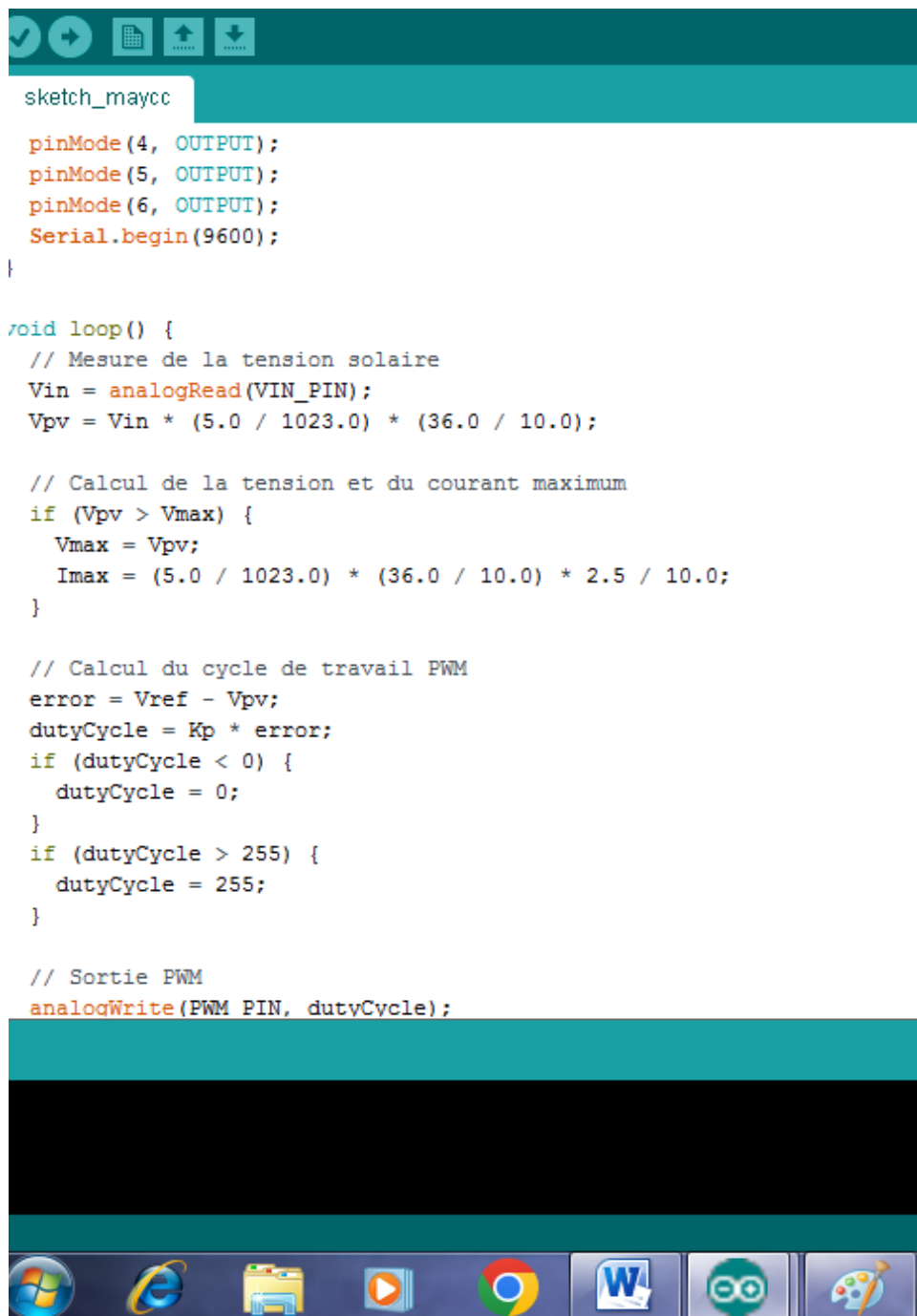
```
// Définition des broches d'entrée/sortie
#define VIN_PIN A0 // Entrée de tension solaire
#define PWM_PIN 9 // Broche de sortie PWM
#define INV_PIN_1 3 // Broche de sortie pour la phase 1 de l'onduleur triphasé
#define INV_PIN_2 5 // Broche de sortie pour la phase 2 de l'onduleur triphasé
#define INV_PIN_3 6 // Broche de sortie pour la phase 3 de l'onduleur triphasé
#define INV_PIN_4 1 // Broche de sortie pour la phase 1 de l'onduleur triphasé
#define INV_PIN_5 2 // Broche de sortie pour la phase 2 de l'onduleur triphasé
#define INV_PIN_6 3 // Broche de sortie pour la phase 3 de l'onduleur triphasé

// Déclaration des variables
int Vin = 0; // Tension solaire
int dutyCycle = 0; // Cycle de travail PWM
float Vpv = 0; // Tension aux bornes du panneau solaire
float Vmax = 0; // Tension maximum du panneau solaire
float Imax = 0; // Courant maximum du panneau solaire
float Vref = 12; // Tension de référence pour le régulateur PWM
float error = 0; // Erreur entre la tension de référence et la tension de sortie PWM
float Kp = 1.2; // Constante proportionnelle pour le régulateur PWM

void setup()
{

  pinMode(1, OUTPUT);
  pinMode(2, OUTPUT);
  pinMode(3, OUTPUT);
  pinMode(4, OUTPUT);
  pinMode(5, OUTPUT);
```





```
sketch_maycc

pinMode(4, OUTPUT);
pinMode(5, OUTPUT);
pinMode(6, OUTPUT);
Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  // Mesure de la tension solaire
  Vin = analogRead(VIN_PIN);
  Vpv = Vin * (5.0 / 1023.0) * (36.0 / 10.0);

  // Calcul de la tension et du courant maximum
  if (Vpv > Vmax) {
    Vmax = Vpv;
    Imax = (5.0 / 1023.0) * (36.0 / 10.0) * 2.5 / 10.0;
  }

  // Calcul du cycle de travail PWM
  error = Vref - Vpv;
  dutyCycle = Kp * error;
  if (dutyCycle < 0) {
    dutyCycle = 0;
  }
  if (dutyCycle > 255) {
    dutyCycle = 255;
  }

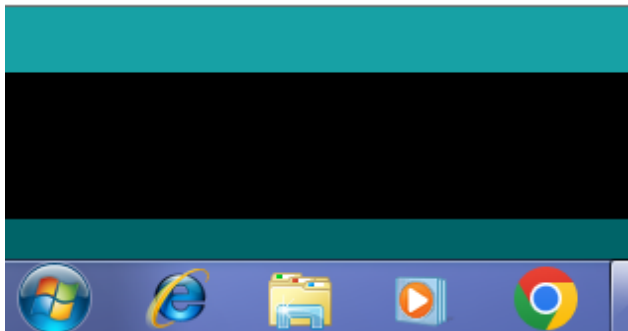
  // Sortie PWM
  analogWrite(PWM_PIN, dutyCycle);
}
```



```
// Sortie PWM
analogWrite(PWM_PIN, dutyCycle);
```

```
// Sortie triphasée
digitalWrite(1, LOW);
digitalWrite(2, HIGH);
digitalWrite(3, HIGH);
digitalWrite(4, LOW);
digitalWrite(5, HIGH);
digitalWrite(6, LOW);
delayMicroseconds(1000);
digitalWrite(1, HIGH);
digitalWrite(2, LOW);
digitalWrite(3, HIGH);
digitalWrite(4, LOW);
digitalWrite(5, HIGH);
digitalWrite(6, LOW);
delayMicroseconds(1000);
digitalWrite(1, LOW);
digitalWrite(2, HIGH);
digitalWrite(3, LOW);
digitalWrite(4, HIGH);
digitalWrite(5, HIGH);
digitalWrite(6, LOW);
delayMicroseconds(1000);
```

```
}
```



Références Bibliographiques :

- [1] Jean jacques, Bazaine (18 Nov.2012) – L'énergie solaire.
- [2] Alain Cheron – Le rayonnement solaire dans l'environnement terrestre, 2014.
- [3] Anne LABOURET et Michel Villos – Energie solaire photovoltaïque, 4e édition, 2012.
- [4] Revue Systèmes Solaires, Journal des Énergies Renouvelables –
http://www.energies-renouvelables.org/accueil_systemes_solaires.
- [5] Serge Poignant – L'énergie photovoltaïque, Rapport D'information, 2009,
Assemblée Nationale Constitution du 4 Octobre 1958 Treizième Législature.
- [6] https://sites.google.com/site/panneauxphotovoltaieques64/home/v-conclusion.*
- [7] http://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/azzoui_boubaker/files/chapitre2_systeme_photovoltaique_-_partie2.pdf
- [8] http://univ.ency-education.com/uploads/1/3/1/0/13102001/st06_lessons_ge-energie_solaire.pdf
- [9] <https://dspace.univ-adrar.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/2158/1/Commande%20MPPT%20et%20contr%C3%B4le%20d%E2%80%99un%20systemephotovoltaique%203KW%20par%20la%20logique%20floue.pdf>
- [10] <http://robert.cireddu.free.fr> > PWM-MLI
- [11] : J.P.Hautier, J.P.Caron, « Convertisseurs statiques, méthodologie causale de modélisation et de commande », Edition Technip, 1999.
- [12] Cherier.F, Amade. G, « Modélisation en vue du diagnostic des défauts dans unemachine asynchrone » mémoire d'Ingénieur d'Etat, Université M'hamed Bougara- Boumerdès,2009.
- [13] Hakima Cherif, « détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes » mémoire de magister,
Université mohamed khider biskra, 2014
- [14] RAHAB BADREDDINE . DJAMEL A «Commande d'un moteur DC» mémoire de lalicense, Université ABBES LAGHROUR Khenchela 2020/2021
- [15] <https://components101.com/mosfets/ir2104-half-bridge-mosfet-driver-ic>
- [16] D. CHERIFI, "Estimation de la vitesse et de la résistance rotorique pour la commande par orientation du flux rotorique d'un moteur asynchrone sans capteur mécanique,"
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2014.
- [17] A. Nadia and B. Wahiba, "Modélisation et commande d'un onduleur MLI," Universitaire Larbi Ben M'hidi Oum El-Bouaghi, 2009