

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière Électrotechnique
Spécialité Machines électriques

présenté par

L'BACHIR Abdelouahab

Etude et modélisation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique monophasé

Proposé par : KAHLANE Hamza

Année Universitaire 2019-2020

Remerciements

*Avant tout, nous remercions le dieu, le tout
puissant, de nous avoir
donné le courage et la volonté pour
accomplir ce travail.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde
gratitude à notre encadreur
Mr. Kahlan A.H pour sa disponibilité, ses
conseils précieux
pendant la période de la réalisation de ce
travail*

*Nos respectueux remerciements à
l'ensemble des membres du jury:
Mr. Belazzoug M et Mr. Hachelaf R
pour l'intérêt porté
sur notre travail.*

Dedicates

*Je dédie ce modeste travail à :
Mon cher père pour son soutien
inlassable et qui s'est sacrifié pour
moi.*

*Sans oublier mes deux chères tantes
et mon frère.*

L'. ABDELOUAHAB

مُلَخَّصٌ :

في هذا العمل ، فُمنَّا بإجراء دِرَاسَةٍ وَنَمْدَجَةٍ لِنِظَامِ كَهْرُوضَوْنِيٍّ مُتَّصِلٍ بِشَبَكَةِ الطَّاقَةِ أَحَادِيَّةِ الطُّورِ تَحْتَ شِدَّةِ ضَوْءٍ مُتَغَيِّرَةٍ بِاسْتِخْدَامِ بَرْنَامِجِ (Simulink) MATLAB.

الْهَدَفُ مِنْ هَذَا الْعَمَلِ هُوَ التَّحْكُمُ فِي تَنْظِيمِ الْجُهْدِ وَالتَّيَّارِ مَهْمَا كَانَتِ الْإِضَاءَةُ بِاسْتِخْدَامِ مُنْظِمٍ، ثُمَّ تَرْشِيحُ التَّيَّارِ وَمُعَالَجَةُ التَّوَاوُفِيَّاتِ غَيْرِ الْمَرْغُوبِ فِيهَا بِاسْتِخْدَامِ مَرْشِحٍ وَمُزَامِنَةٍ هَذَا التَّيَّارِ بِاسْتِخْدَامِ الْحَلْفَةِ الْأَقَائِلَةِ لِلطُّورِ، وَأَخِيرًا رُبُّطُ هَذَا النِّظَامِ بِشَبَكَةِ طَّاقَةِ أَحَادِيَّةِ الطُّورِ.

كَلِمَاتُ الْمَفَاتِيحِ : مَرْشِحٌ، قَاطِعٌ مُتَنَابِئٌ، عَاكِسٌ، كَهْرُوضَوْنِيَّةٌ، شَبَكَةٌ كَهْرَبَائِيَّةٌ.

Résumé :

Dans ce travail nous avons fait une étude et modélisation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique monophasé sous des intensités d'éclairément variable sous l'utilisation du logiciel MATLAB (Simulink).

L'objectif de ce travail est de faire une commande de régulation de tension et courant quelque soit l'éclairément à laide du régulateur PI, ensuite la filtration du courant et le traitement des harmoniques indésirables à laide d'un filtre LCL, et la synchronisation de ce courant à laide d'une boucle à verrouillage de phase PLL et enfin connecté ce système à un réseau électrique monophasé

Mots clés : Filtre LCL, Hacheur, Onduleur, Photovoltaïque, réseau électrique.

Abstract :

In this work we have made a study and modeling of a photovoltaic system connected to the single-phase power grid under varying light intensities using MATLAB software (Simulink). The objective of this work is to make a control of voltage and current regulation whatever the illumination using the PI regulator, then the filtration of the current and treatment of the unwanted harmonics using an LCL filter, and synchronization of this current using a PLL phase locked loop and finally connected this system to a single phase power grid

Keywords : LCL filter, Chopper, Inverter, Photovoltaic, electrical grid.

Listes des acronymes et abréviations

PV: Photovoltaïque.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

I_{cc} : Le courant de court circuit

V_{oc}: La tension de circuit ouvert

I_{cell} : Courant de sortie de la cellule

V_{cell} : Tension de sortie de la cellule

I_{sat} : est le courant de saturation

R_p : Résistance parallèle

R_s : Résistance série

V_t : le potentiel thermodynamique

K : la constante de Boltzmann

T : la température effective de la cellule en Kelvin

FF: Facteur de Forme.

η_s : Le rendement d'une cellule

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

DC : Courant Continu (Direct Current).

AC : Courant Alternatif (Alternative Current)

HF : Haute fréquence

BF : Base fréquence

Gr : L'éclairement de référence

P_{pv} : puissance de générateur Photovoltaïque

PWM: Pulse Width Modulation (MLI)

PPM : Point de Puissance Maximum

MLI : Modulation à Largeur d'Impulsion

PLL : Phase Lock Loop

THD : Taux Harmonique de Distorsion

Table des matières

Chapitre 1

1.1	Introduction	1
1.2	L'énergie solaire	1
1.3	Le rayonnement solaire et la masse d'aire	1
1.3.1	Le rayonnement direct	3
1.3.2	Le rayonnement diffus	3
1.3.3	Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol	3
1.3.4	Le rayonnement global	3
1.4	Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	4
1.4.1	Couche semi-conductrice de type p	5
1.4.2	Couche semi-conductrice de type n	6
1.4.3	Doigts de contact et contact métallique de la face arrière	6
1.4.4	Couche anti réflexion	6
1.4.5	Récupération des électrons trous	6
1.5	Les différents types de dopage	8
1.5.1	Le dopage chimique	8
1.5.2	Le dopage électrochimique	8
1.5.3	Le dopage par implantation ionique	8
1.6	Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque	8
1.7	Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque	10
1.8	Influence des différents paramètres sur la caractéristique I(V)	13
1.8.1	Influence de l'éclairement et de la température	13
a	Influence de l'éclairement	13
b	Influence de la température	13
1.8.2	Influence de la résistance série et la conductance shunt	14
a	Influence de la résistance série	15
b	Influence de la conductance shunt (parallèle)	15
1.8.3	Influence du courant de saturation et du facteur d'idéalité	16
a	Influence du courant de saturation (I_s)	16
b	Influence du facteur d'idéalité (n)	16
1.9	Panneau solaire (champ solaire)	17
1.9.1	Association en série	18
1.9.2	Association en parallèle	19
1.9.3	Aménagement du montage final. Ombrage et effet de Hot Spot	20

1.9.4	Les diodes by passes	20
1.10	Les systèmes photovoltaïque	21
1.10.1	Systèmes photovoltaïques autonomes	21
1.10.2	Systèmes photovoltaïques hybrides autonomes	22
1.10.3	Systèmes photovoltaïques connectés au réseau	22
1.11	Conclusion	22

Chapitre 2

2.1	Introduction	24
2.2	Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)	24
2.3	Type des convertisseurs DC-DC	24
2.3.1	Hacheur dévolteur (Buck - converter)	25
2.3.2	Hacheur survolteur (Boost-converter)	26
2.3.3	Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost)	27
2.4	L'onduleur	27
2.5	Types d'onduleurs	28
2.5.1	Onduleur autonome	28
2.5.2	Onduleur non autonome	28
2.6	Principe général de fonctionnement	28
2.7	Les applications des onduleurs	29
2.7.1	Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone	30
2.7.2	Alimentation de secours	30
2.7.3	Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes	31
2.8	Onduleur de tension	31
2.9	Onduleur de courant	32
2.10	Stratégies de commande	33
2.10.1	Commande 180°	33
2.10.2	Commande 120°	34
2.10.3	Commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI)	34
2.10.4	Modulation sinusoïdale (MLIS)	35
2.10.5	Modulation vectorielle (SVM)	35
2.11	PLL	36
2.12	Régulateur PI	37
2.11.1	Commande MPPT	37
2.11.2	Principe de la MPPT	37
2.11.3	Les différentes techniques d' MPPT	37
2.11.4	Méthode de perturbation et d'observation (P&O)	38
2.12	Les filtres	39
2.13	Topologie de filtre	40
2.13.1	Filtre L	40

2.13.2	Filtre LC	40
2.13.3	Filtre LCL	40
2.14	Conclusion	41

Chapitre 3

3.1	Introduction	42
3.2	Dimensionnement	42
3.3	Le panneau photovoltaïque	43
3.3.1	L'influence de l'éclairement sur la caractéristique ($I=f(V)$)	44
3.3.2	L'influence de l'éclairement sur la caractéristique ($P = f(V)$)	44
3.3.3	L'influence de la température sur la caractéristique ($I = f(V)$)	44
3.3.4	L'influence de la température sur la caractéristique ($P = f(V)$)	45
3.3.5	L'éclairement	45
3.4	Condensateur de découplage	46
3.5	Résultat de simulation du système photovoltaïque avec un hacheur survolteur (BOOST)	47
3.5.1	Dimensionnement de l'hacheur survolteur (boost)	47
a	Une phase d'accumulation d'énergie	48
b	Lorsque l'interrupteur est ouvert	48
3.6	Résultat de simulation du system PV avec onduleur	51
3.7	Le paramétrage du régulateur PI	52
3.8	Résultat de simulation du system PV avec inductance et condensateur	53
3.9	Résultat de simulation du system PV avec filtre LCL	54
3.9.1	Dimensionnement du filtre LCL	55
3.10	Résultat de simulation du system PV raccordé au réseau	59
3.11	Résultat de simulation du system PV avec la boucle à verrouillage de phase	61
3.12	Conclusion	63

Liste des figures

Figure I.1 : Chemin relatif du faisceau solaire a travers l'atmosphère	3
Figure I.2: l'intensité lumineuse en rapport avec la longueur d'onde et la masse d'air	3
Figure I.3: les différents types de rayonnements solaires	4
Figure I.4: Texturation de surface de cellule photovoltaïque pour diminuer l'effet de réflexion	5
Figure I.5 : Couche semi-conductrice de type p	6
Figure I.6: Couche semi-conductrice de type n	6
Figure I.7: Schéma de la matière cas sans et avec dopage	7
Figure I.8. Cellule photovoltaïque dans l'obscurité	9
Figure I.9. Schéma équivalent représenté par une diode et une source de courant	9
Figure 10. Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque	10
Figure I.11 Caractéristique courant-tension	10
Figure I.12 Le courant de court-circuit I_{cc}	11
Figure I.13 La tension en circuit ouvert U_{co}	11
Figure I.14 Caractéristiques courant-tension	12
Figure I.15 Caractéristiques puissance-tension	12
Figure I.16: Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire	14
Figure I.17: Influence de la température sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire éclairée	15
Figure I.18: influence de la résistance série sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire éclairé	16
Figure I.19: influence de la résistance shunt sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire éclairée	16
Figure I.20: influence du courant de saturation sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire éclairée	17
Figure I.21: influence du facteur d'idéalité sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire éclairée	18
Figure I.22: Evolution de construction des systèmes photovoltaïques	18
Figure I.23: Caractéristiques résultantes d'un groupement de ns cellules en série	19
Figure I.24: Caractéristiques résultant d'un groupement de np cellules en parallèle	20
Figure I.25: L'effet d'ombrage	21
Figure I.26: diodes by passe	21
Figure II.1: Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck	25
Figure II.2: Périodes fermeture et ouverture d'un interrupteur	25
Figure II.3: Schémas équivalents du hacheur dévolteur	26
Figure II.4: Schéma de principe d'un convertisseur Boost	26
Figure II.5 : Schémas équivalents du hacheur survolteur	26
Figure II.6: Convertisseur dévolteur-survolteur	27
Figure II.7: Schémas équivalents du hacheur dévolteur –survolteur	27

Figure II.8 : Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)	28
Figure II.9 : Principe de fonctionnement de l'onduleur autonome	29
Figure II.10 : K en position (1)	29
Figure II.11 : Tension avec K en position (1) et (2)	29
Figure II.12 : Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone	30
Figure II.13 : Alimentation de secours	30
Figure II.14 : Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes	31
Figure II.15 : Onduleur de tension en pont monophasé	31
Figure II.16 : Signaux de commande et forme d'onde des tensions de sortie	31
Figure II.17 : Onduleur de courant en pont monophasé	32
Figure II.18 : Signaux de commande et forme d'onde des courants	33
Figure II.19 : Commande 180°	34
Figure II.20 : Commande 120°	34
Figure II.21 : schéma fonctionnel du système bouclé	36
Figure II.22 : Schéma de principe du convertisseur MPPT	37
Figure II.23 : Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation (P&O)	38
Figure II.24 : Signe de P et V a différentes positions de la courbe caractéristique de puissance	39
Figure II.25 : Topologies des filtres	40
Figure III.1 : Schéma synoptique du générateur photovoltaïque passe par un hacheur puis un onduleur puis un filtre LCL et connecté au réseau monophasé	42
Figure III.2 : Description du panneau photovoltaïque dans Simulink	43
Figure III.3 : Panneaux photovoltaïque à différents éclairagements avec température de 25°C	44
Figure III.4 : Panneaux photovoltaïque à différents températures avec éclairagement de 1000 W/m^2	45
Figure III.5 : Bloc d'éclairément variable en fonction du temps	46
Figure III.6 : le system photovoltaïque connecté a un hacheur	47
Figure III.8 : le system photovoltaïque connecté a un hacheur	48
Figure III.9 : le system photovoltaïque connecté a un hacheur	48
Figure III.10 : L'éclairément variable	49
Figure III.11 : la tension continu du panneau photovoltaïque	49
Figure III.12 : la tension continue a la sortie du hacheur	50
Figure III.13 : le courant continu du panneau photovoltaïque	50
Figure III.14 : la puissance a la sortie du hacheur	50
Figure III.15 : le système photovoltaïque connecte a un onduleur monophasé	51
Figure III.16 : la tension a la sortie d'onduleur	51
Figure III.17 : zoom sur la tension a la sortie d'onduleur	52
Figure III.18 : le régulateur PI et son paramétrage	52
Figure III.19 : la tension alternative au bornes de la charge	53
Figure III.20 : le courant alternatif au bornes de la charge	53
Figure III.21 : zoom sur la tension alternative au bornes de la charge	54
Figure III.22 : zoom sur le courant alternatif au bornes de la charge	54
Figure III.23 : le système photovoltaïque avec un filtre LCL	55
Figure III.24 : Schéma de filtre LCL avec la résistance d'amortissement	55

Figure III.25: Fréquence de résonance du filtre en fonction de rapport de l'inductance	56
Figure III.26 : Modèle en quadripôle du filtre LC	57
Figure III.27: la tension alternatif a la sortie du filtre	58
Figure III.28: le courant alternatif a la sortie du filtre	59
Figure III.29: Régulateur du courant	59
Figure III.30: le système photovoltaïque raccordé au réseau monophasé	60
Figure III.31: la tension du réseau	60
Figure III.32: le courant du réseau	60
Figure III.33: zoom sur la tension du réseau sans PLL	61
Figure III.34: zoom sur le courant du réseau sans PLL	61
Figure III.35: zoom sur la tension du réseau avec PLL	62
Figure III.36: zoom sur le courant du réseau avec PLL	62
Figure III.37: Simulation de la Boucle à verrouillage de phase PLL	63
Figure III.38: analyse spectrale du courant de réseau	63

Introduction générale

L'énergie électrique est l'une des formes d'énergie la plus consommée partout dans le monde. C'est l'un des facteurs le plus important pour le développement d'un pays. Pour disposer de cette énergie qui est si importante, elle doit nécessairement être produite dans des centrales. Pour cela, on dispose des différents types de centrales de production de l'énergie électrique, parmi les quelles nous pouvons citer : les centrales hydrauliques, les centrales thermiques, les centrales éoliennes et les centrales nucléaires.

Presque toutes les énergies renouvelables sont des dérivées de l'énergie solaire : le vent, le rayonnement solaire, la force de l'eau sont des produits directs ou indirects de l'activité solaire. Seule la géothermie échappe à cet inventaire. Le Soleil envoie chaque année à la surface de la Terre à peu près 10 000 fois plus d'énergie que la planète en consomme. Il est donc légitime d'essayer d'en tirer profit.

Les énergies renouvelables ont tout pour s'imposer, tant aux niveaux environnemental, social, qu'économique. Les énergies renouvelables devraient être le fer de lance de toute politique de lutte contre le réchauffement climatique.

L'énergie solaire photovoltaïque, qui est la conversion directe de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires, représente une alternative intéressante et bien adaptée à des besoins limités. Malgré sa facilité de mise en œuvre, son faible impact environnemental et le peu d'entretien qu'il nécessite, un système photovoltaïque n'est plus concurrentiel lorsque la demande augmente. Ainsi une étude assez rigoureuse est nécessaire pour faire le meilleur choix et le plus performant avec le moindre coût possible.

Dans ce mémoire, on a analysé la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque adapté par une commande numérique (commande MPPT: perturbation et observation) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque sous éclairement variable.

L'objectif de ce travail est de présenter une meilleure compréhension des performances des convertisseurs DC-DC et DC-AC adapté par la commande et la régulation pour améliorer la tension de sortie afin d'obtenir une bonne forme du courant et tension qu'on peu utiliser et transféré a un réseau monophasé.

Chapitre 1 Les systèmes photovoltaïques

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons le principe du système photovoltaïque étudié .après avoir rappelé les différents types du rayonnement solaire et les influence des différents paramètres sur la courbe de la puissance d'une cellule photovoltaïque, nous terminons cette partie par les différents types du systèmes photovoltaïques.

1.2 L'énergie solaire

L'énergie solaire est l'énergie transmise par le Soleil sous forme de lumière et chaleur Cette énergie est virtuellement inépuisable à l'échelle des temps humains, ce qui lui vaut d'être classée parmi les énergies renouvelables.

Cette énergie lumineuse dite (extraterrestre) c'est-à-dire hors atmosphère a été évaluée avec précision par la NASA et vaut 1367 W/m^2 Il s'agit de l'irradiante reçue, ou rayonnement solaire instantané à un instant donné au-dessus de l'atmosphère terrestre en incidence normale (c'est-à-dire sur un plan perpendiculaire à la direction du Soleil). On appelle cette valeur « constante » solaire, mais elle ne l'est pas tout à fait à cause des légères variations de la distance Terre-Soleil Cette énergie qui descend en ligne droite vers notre planète ne peut pas nous parvenir sur la Terre en intégralité car elle va subir des transformations lorsqu'elle traverse l'atmosphère : par absorption et par diffusion.

En effet, l'atmosphère contient une majorité d'azote et d'oxygène (respectivement 78 et 21 %), mais aussi de l'argon, du CO₂ de la vapeur d'eau et la fameuse couche d'ozone de la stratosphère dont le rôle de filtrage des UV les plus durs est si important. Les poussières et les nuages (formés de minuscules gouttelettes d'eau, à ne pas confondre avec la vapeur d'eau sous forme d'un gaz) ont aussi leur importance dans la diffusion du rayonnement solaire.[1]

1.3 Le rayonnement solaire et la masse d'aire

Le rayonnement solaire est constitué d'ondes électromagnétiques composées de photons à des énergies différentes qui se déplacent avec une vitesse constante. L'énergie des photons (E) est donnée par l'équation suivante :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.4)$$

Avec

c : vitesse de la lumière ($c \approx 3 \times 10^8$ m/s.).

h : constant de Planck ($h = 6.625 \times 10^{-34}$ J.s).

λ : longueur d'onde.

Le spectre de la lumière solaire est représenté sur la Figure (I.2)

La densité de puissance en dehors de l'atmosphère de la terre est 1367 W/m^2 , ce qui est connu comme la constante solaire. La masse d'air (air masse « AM » en anglais) se réfère à la longueur du chemin relatif du faisceau solaire direct à travers l'atmosphère et représente donc l'influence atmosphérique sur le spectre de la lumière, et on peut l'approximer par l'équation suivante :

$$AM = 1 + \frac{1}{\cos \theta_Z} \quad (I.2)$$

Avec

θ_Z : est l'angle entre le soleil et le point directement vertical à la terre (zénith), comme montré sur la Figure (I.1)

La lumière du soleil a un spectre proche de celui de la lumière d'un corps noir à une température de 5762 K . La ligne pointillée Figure (I.1) indique le rayonnement du corps noir à cette température. Ceci est en bon accord avec la courbe de la masse d'air « AM0 » qui montre le spectre dehors de l'atmosphère sur un plan perpendiculaire au soleil à une distance moyenne terre-soleil.

Le chemin de la lumière à travers l'atmosphère est plus court lorsque le soleil est à son zénith ($\theta_Z=0$) et par conséquent la masse d'air égale à l'unité (AM1). Évidemment le soleil n'est pas toujours au zénith. Lorsque l'angle (θ_Z) entre soleil et zénith augmente, la masse d'air augmente de sorte que à un angle de $48,2^\circ$ la masse d'air est de 1,5 (AM1.5) et à un angle de 60° elle est de 2,0 (AM2) Figure (I.1). La masse d'air « AM1.5 » a été adoptée comme le spectre solaire standard pour les installations terrestres. Habituellement, la puissance de crête d'un générateur photovoltaïque est mesurée sous une irradiation solaire de 1000 W/m^2 avec un spectre AM1.5 et à une température de cellule de 25°C . C'est ce qu'on appelle la condition de test standard (STC) . [2]

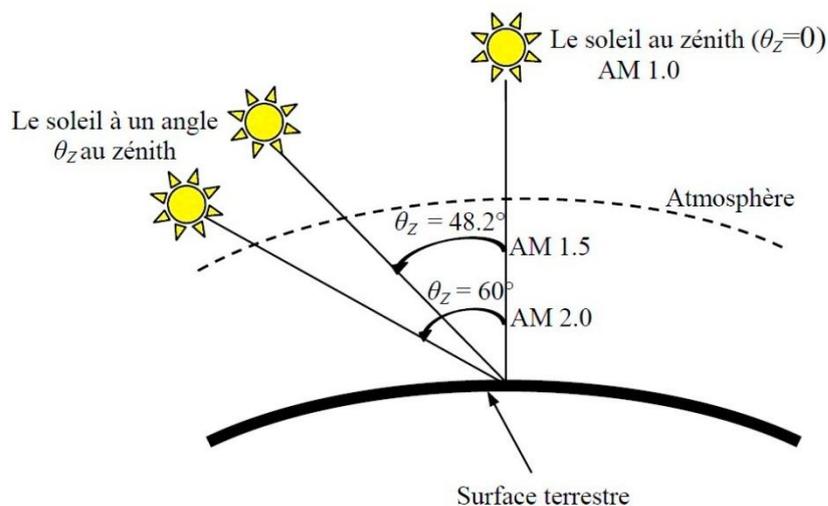


Figure I.1 : Chemin relatif du faisceau solaire a travers l'atmosphère

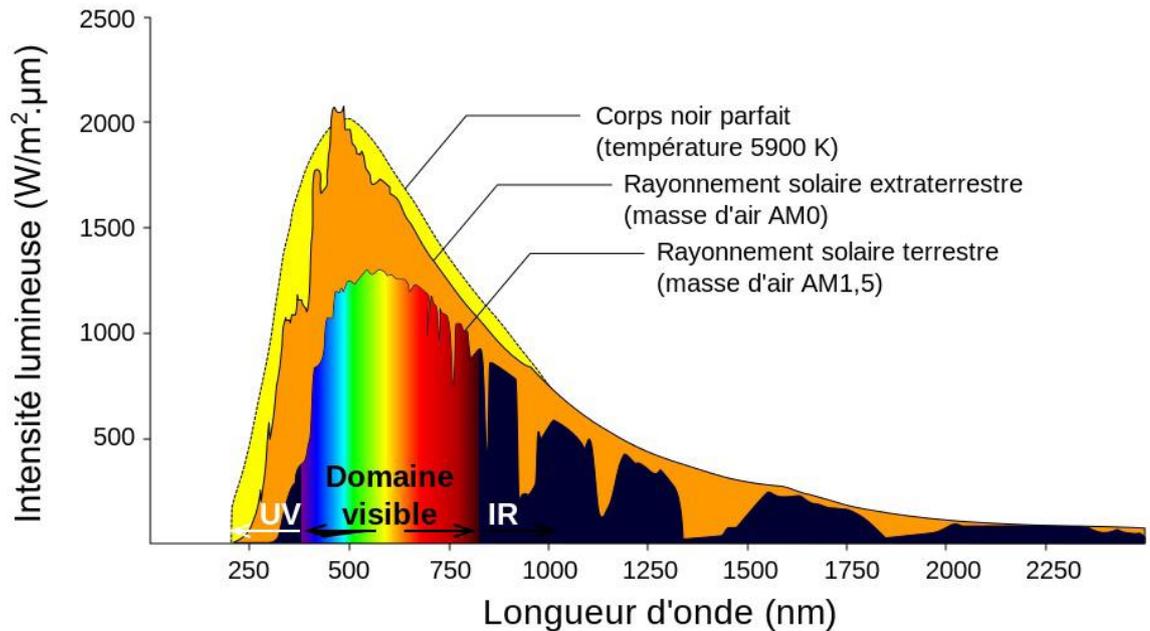


Figure I.2: l'intensité lumineuse en rapport avec la longueur d'onde et la masse d'air

Afin de quantifier l'énergie développée par le générateur photovoltaïque dans une application donnée, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu sur sol. En effet, quatre types de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature

1.3.1 Le rayonnement direct

La conversion du rayonnement direct est une question trigonométrique. Le rayonnement direct sur le plan horizontal est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus.

1.3.2 Le rayonnement diffus

Il est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols.

1.3.3 Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....).

1.3.4 Le rayonnement global

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol. Dans la figure ci-dessous Figure (1.3) est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçu sur une surface terrestre. [3]

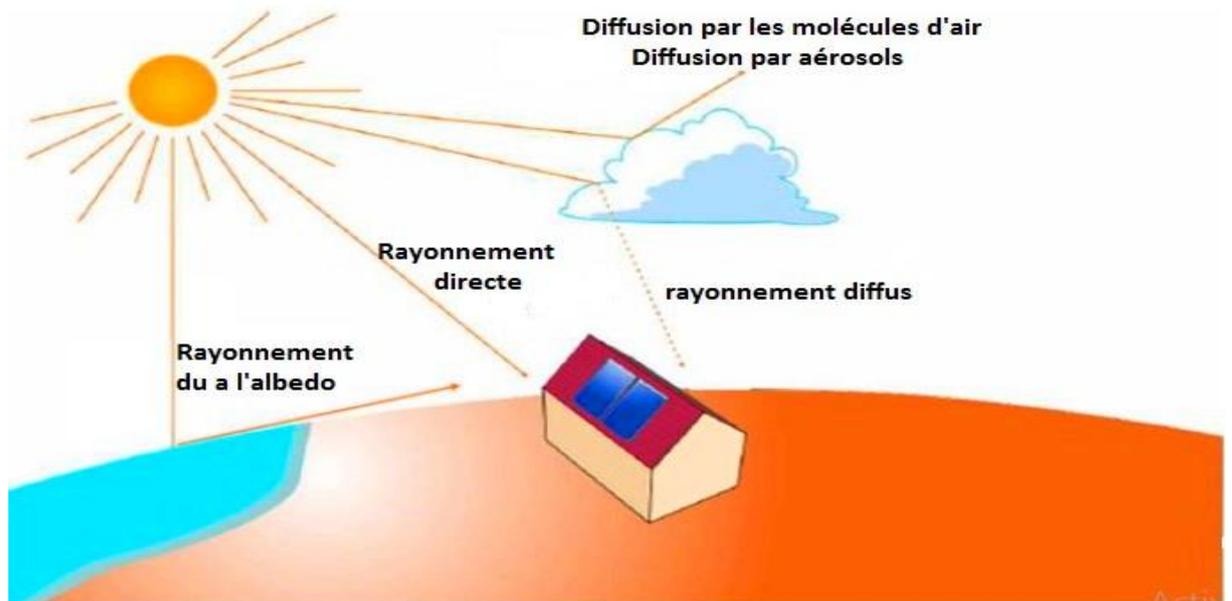


Figure I.3: les différents types de rayonnements solaires

1.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques exploitent l'effet photoélectrique pour produire du courant continu par absorption du rayonnement solaire. Cet effet permet aux cellules de convertir directement l'énergie lumineuse des photons en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques. [4]

La conversion photovoltaïque aujourd'hui est largement utilisée et peut être simplement définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière.

Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein de la matière se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique.

Généralement la paire électron-trou revient rapidement à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique. [5]

Même si le phénomène électrique est secondaire devant le phénomène thermique (incluant la chauffe du matériau par les rayons solaires), récupérer tout ou partie de l'énergie électrique est le premier objectif des capteurs photovoltaïques sous forme de cellules ou de générateurs.

Cela est possible grâce par exemple à des cellules solaires réalisées en associant un matériau semi-conducteur dopé N à un autre semi-conducteur dopé P.

L'énergie produite par l'absorption d'un photon dans un matériau se traduit du point de vue électrique par la création d'une paire électron-trou. Cette réaction entraîne une

différence de répartition des charges créant ainsi une différence de potentiel électrique, c'est l'effet photovoltaïque. [6]

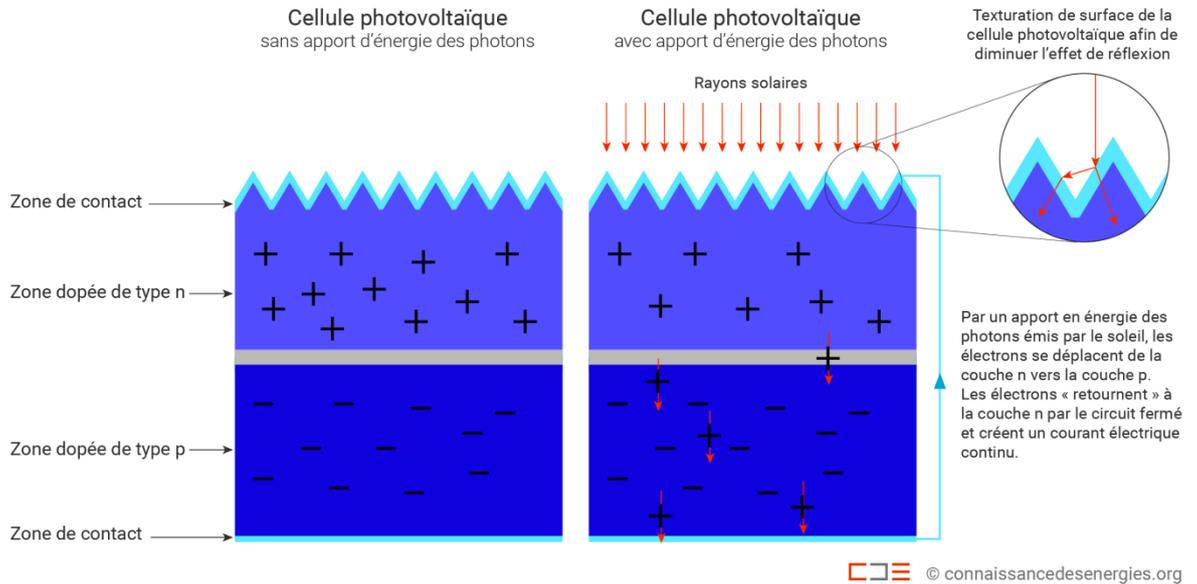


Figure I.4:Texturation de surface de cellule photovoltaïque pour diminuer l'effet de réflexion

1.4.1 Couche semi-conductrice de type p

Le matériau semi-conducteur contient des atomes externes qui possèdent une quantité inférieure d'électrons libres. On obtient ainsi un excédent positif de porteurs de charge (trous d'électrons) dans le matériau semi-conducteur. Ces couches sont appelées des couches semi-conductrices à conduction de type p. [6]

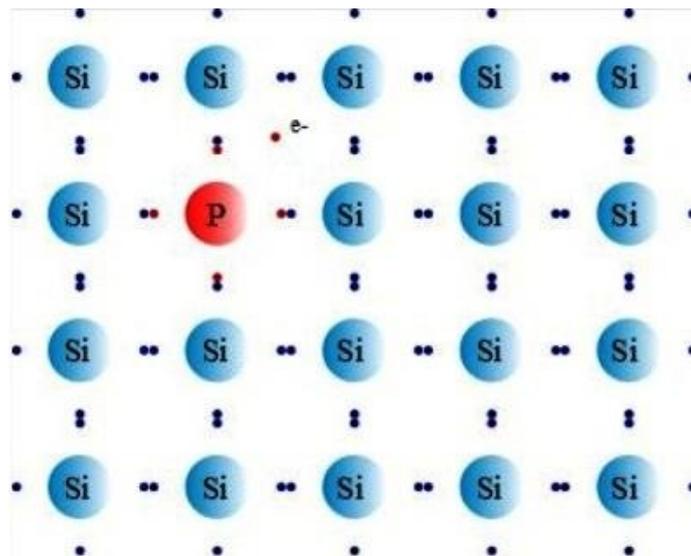


Figure I.5 : Couche semi-conductrice de type p

1.4.2 Couche semi-conductrice de type n

Le matériau semi-conducteur contient des atomes externes qui possèdent une quantité supérieure d'électrons libres. On obtient ainsi un excédent négatif de porteurs de charge (électrons) dans le matériau semi-conducteur. Ces couches sont appelées des couches semi-conductrices à conduction de type n. [6]

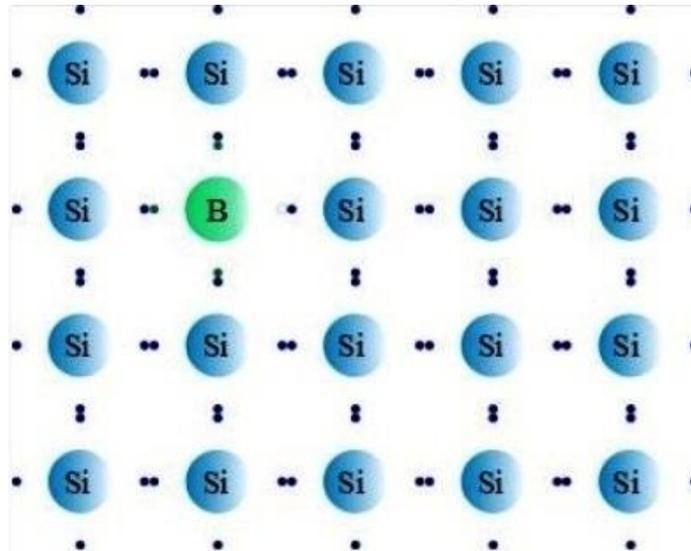


Figure 1.6: Couche semi-conductrice de type n

1.4.3 Doigts de contact et contact métallique de la face arrière

Avec le contact métallique arrière, les doigts de contact constituent les connexions permettant de brancher par exemple un consommateur. [6]

1.4.4 Couche anti réflexion

La couche anti réflexion a pour but de protéger la cellule PV et de réduire les pertes de réflexion à la surface de la cellule. [6]

1.4.5 Récupération des électrons trous

En règle générale, les cellules solaires sont fabriquées en silicium, deuxième élément le plus fréquent de la croûte terrestre. Un atome de silicium possède quatre électrons de valence. Dans un cristal de silicium deux électrons d'atomes adjacents forment une paire d'électrons. Dans cet état le cristal de silicium n'est pas un conducteur électrique car il ne dispose d'aucun électron libre pour transporter la charge.

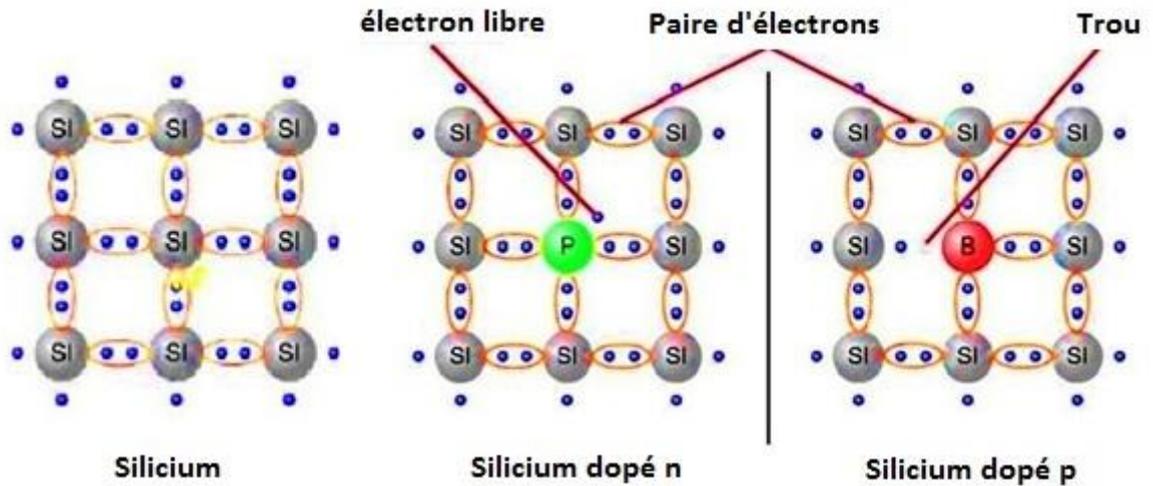


Figure 1.7: Schéma de la matière sans et avec dopage

Un champ électrique permet de séparer les électrons des trous. Dans les semi-conducteurs, l'apport d'atomes perturbateurs permet de générer un champ électrique. À cet effet, des atomes à cinq électrons sont placés dans une région. Cette région est un semi-conducteur n ou dopé n, car comparée au réseau de cristal de silicium pur elle présente une charge légèrement négative.

Des atomes à trois électrons sont placés dans une autre région. Cette région est un semi-conducteur p ou dopé p, car comparée au réseau de cristal de silicium pur elle présente une charge légèrement positive. Si les semi-conducteurs n et p sont adjacents, il se forme à leur limite la jonction p-n dont provient un champ électrique. On obtient une jonction p-n en associant des couches semi-conductrices p et n. À la limite entre les deux couches, les électrons se déplacent de la couche n vers la couche p et s'y recombine avec les trous.[6]

Les charges qui transiteront au sein du matériau peuvent avoir plusieurs origines.

Le dopage des polymères conducteurs relève d'un processus différent de celui des semi-conducteurs inorganiques. En effet, les impuretés dopantes, appelées dopants ou contre ions, sont introduites à proximité des chaînes de polymères et non insérées dans le réseau cristallin comme pour les semi-conducteurs classiques. Les valeurs de dopage équivalent des polymères conducteurs peuvent être très élevées et atteindre jusqu'à une impureté dopante pour trois unités monomères. Le dopage peut ainsi permettre d'augmenter considérablement la conductivité pour atteindre des valeurs comparables à celles des métaux. L'augmentation du taux de dopage aboutit à une transition métal isolant. Outre l'augmentation de la conductivité, le dopage peut avoir un rôle important dans la mise en solution polymère. [7]

1.5 Les différents types de dopage

Il existe différentes méthodes de dopage : le dopage chimique, le dopage électrochimique ou encore le dopage par implantation ionique.

1.5.1 Le dopage chimique

Il peut se faire en phase gazeuse. Les agents dopants et le polymère sont alors introduits dans une enceinte sous vide primaire. Ce type de dopage est difficilement contrôlable. Il peut aussi être réalisé en phase liquide, en mélangeant en solution le polymère conducteur et les agents dopants. Il peut aussi se faire par trempage d'un dépôt de polymère dans une solution de dopants, comme c'est le cas pour le poly (3-Octyl) thiophène. [8]

1.5.2 Le dopage électrochimique

Le polymère à doper est placé sur une électrode métallique et plongé dans une solution organique. L'application d'une tension entre cette électrode et l'électrode de référence (Li,Pt), entraîne par passage du courant, l'ionisation du polymère et par conséquent, son dopage. Ce type de dopage est plus homogène et plus facilement contrôlable, que le dopage chimique. De plus, il peut permettre le dépôt d'un film mince de polymère dopé ou non sur une électrode métallique. [9]

1.5.3 Le dopage par implantation ionique

Il s'agit de bombarder les films de polymères par des ions alcalins (Na^+ , Cs^+ ...) et de générer ainsi des défauts par rupture des liaisons chimiques. Cette technique, peu utilisée car elle est couteuse et destructive, a permis de doper le poly parphénylène [10, 11].

1.6 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque dans l'obscurité est une diode. Dans le cas idéal, le courant circulant dans une cellule est donc donné par la relation de Shokley [10]

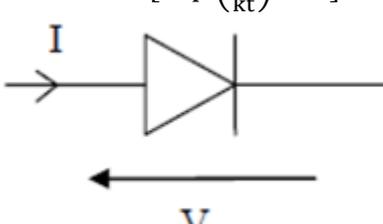
$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{kt}\right) - 1 \right] \quad (1.3)$$


Figure 1.8. Cellule photovoltaïque dans l'obscurité.

Lorsque la cellule est éclairée, le courant qui circule dans celle-ci devient

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{kt}\right) - 1 \right] - I_{ph} \quad (1.4)$$

Le schéma équivalent est représenté par une diode idéale montée en parallèle avec une source de courant.

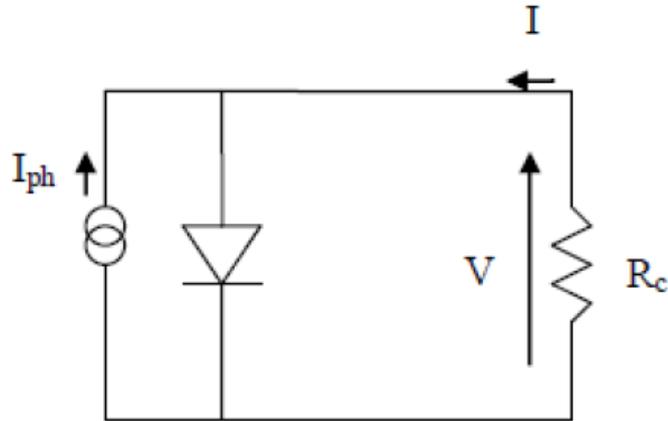


Figure 1.9. Schéma équivalent représenté par une diode et une source de courant.

Dans la réalité, on doit ajouter une résistance série R_s pour tenir des résistances des électrodes et de celles induites par les interfaces électrode semi-conducteur. On doit également ajouter une résistance parallèle R_p (appelée shunt en anglais) qui prend en compte les courts-circuits dans la cellule. Ces derniers sont dus à l'organisation des matériaux, par exemple à la présence d'aluminium dans la couche active et aux charges au voisinage des interfaces de séparation des excitons qui ont tendances à recombiner les charges séparées. Le courant est alors donné par la relation :

$$I = 1 + \frac{R_p}{R_s + R_p} I_s \left[\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] + \frac{V}{R_p} \quad (1.5)$$

n : est le facteur d'idéalité de la diode.

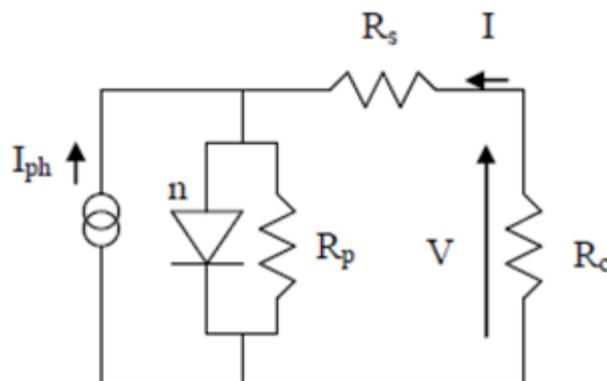


Figure 10. Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

1.7 Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque

La puissance électrique délivrée par une cellule photovoltaïque est le produit de la tension par le courant qu'elle génère. Ces deux grandeurs, courant et tension, dépendent à la fois des propriétés électriques de la cellule mais aussi de la charge électrique à ses bornes.

Les propriétés électriques de la cellule sont synthétisées dans un graphe qu'on appelle caractéristique courant-tension. Tout dipôle électrique est entièrement défini par sa caractéristique courant-tension qui lui est propre.

Une cellule photovoltaïque, en tant que dipôle électrique, dispose de sa propre caractéristique courant-tension, ainsi qu'illustré ci-dessous :

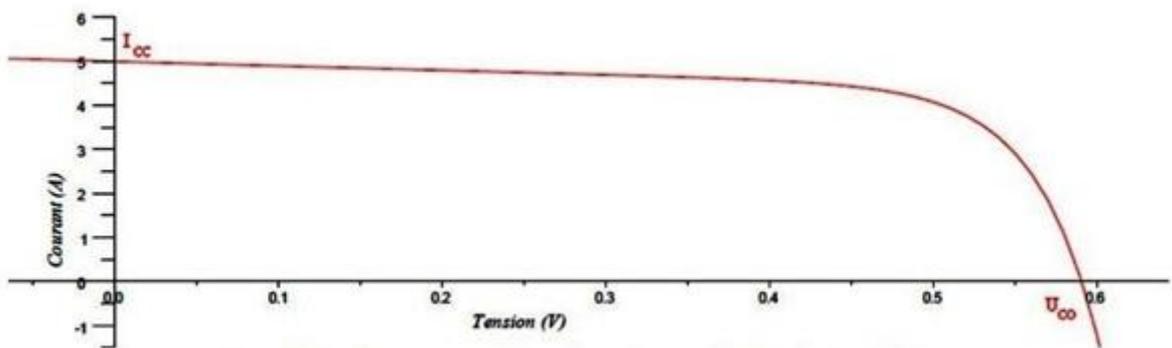


Figure I.11 Caractéristique courant-tension

Cette caractéristique courant-tension est une relation entre la tension et le courant délivrés par la cellule photovoltaïque. [18]

Deux données importantes sont à relever :

Le courant de court-circuit noté I_{cc}

Il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est court-circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle + est relié au pôle - (la tension à ses bornes est alors nulle). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule $P = U \times I$ est nulle. [18]

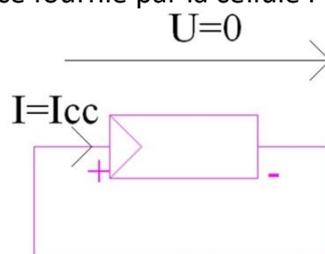


Figure I.12 Le courant de court-circuit I_{cc}

La tension en circuit ouvert notée U_{co}

Il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque le pôle + et le pôle - sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule $P = U \times I$ est nulle. [18]

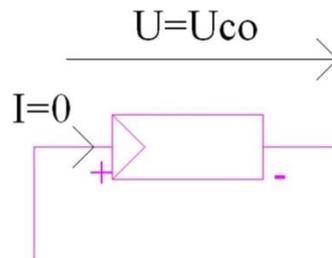


Figure I.13 La tension en circuit ouvert U_{co}

La puissance fournie par la cellule est tout simplement le produit du courant et de la tension. A partir de la caractéristique courant-tension, il est intéressant de dessiner le graphe de la puissance ($P = U \times I$) en fonction de la tension U qu'on appelle aussi caractéristique puissance-tension (courbe verte) :

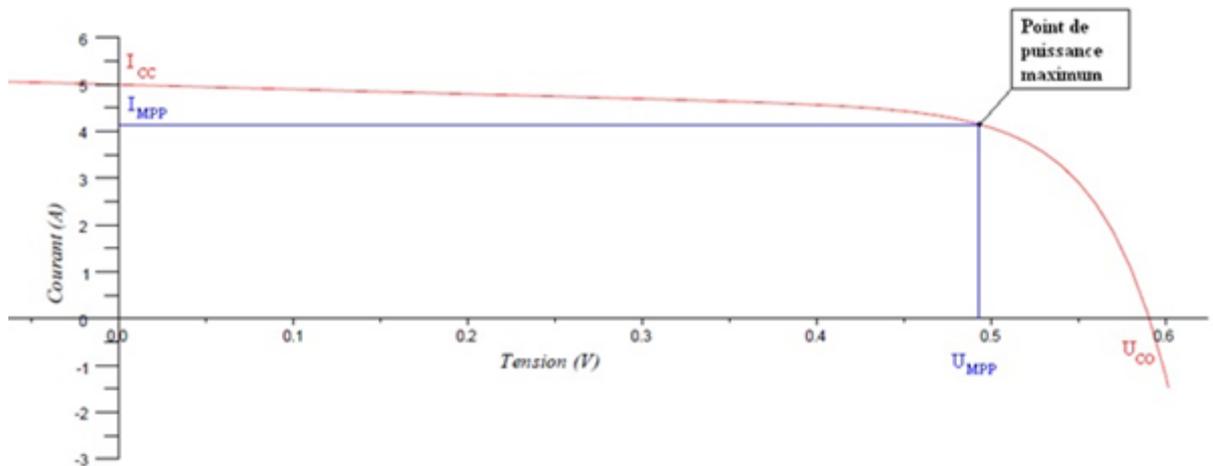


Figure I.14 Caractéristiques courant-tension

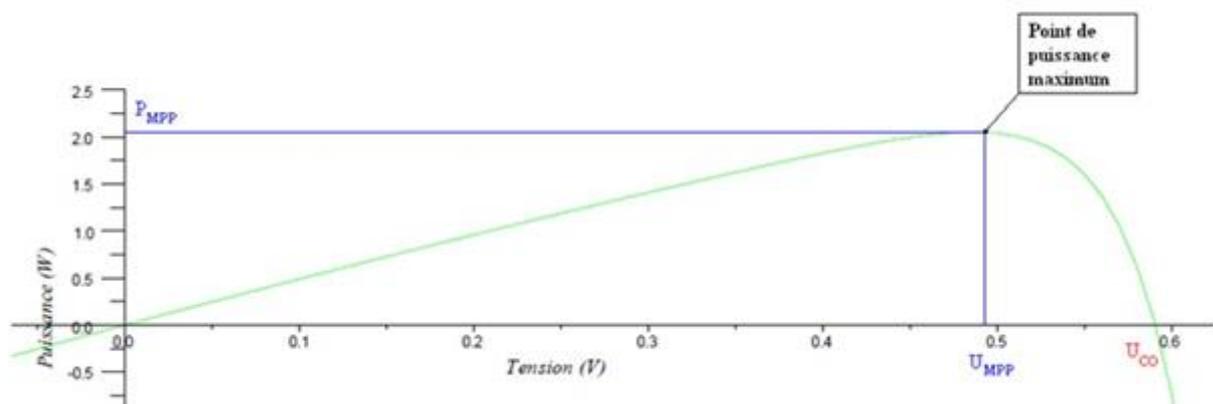


Figure I.15 Caractéristiques puissance-tension

On retrouve bien les deux cas énoncés précédemment (cellule en court-circuit et cellule en circuit ouvert) pour lesquels la puissance fournie est nulle.

Par ailleurs, la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque met en évidence un point de puissance maximum P_{MPP} (MPP signifie en anglais Maximal Power Point, soit Point de Puissance Maximum). Ce point de puissance maximum est le produit d'un courant et d'une tension donnés. On appelle respectivement I_{MPP} et U_{MPP} le courant et la tension correspondant au point de puissance maximum, c'est-à-dire tel que $I_{MPP} \times U_{MPP} = P_{MPP}$.

Ainsi, pour résumer, 4 paramètres majeurs permettent de caractériser une cellule photovoltaïque :

- Le courant de court-circuit noté I_c
- La tension à vide notée U_{CO}
- Le courant de puissance maximale noté I_{MPP}
- La tension de puissance maximale notée U_{MPP}

La valeur des 4 paramètres ci-dessus varie plus ou moins en fonction d'un certain nombre de paramètres extérieurs dont :

- Le niveau d'éclairement de la cellule,
- La température de la cellule.[18]

Effet de la température De même, toute l'énergie des photons n'arrivant pas à se transformer en électricité est absorbée par le matériau sous forme thermique. Le matériau constituant les capteurs PV a alors sa température interne qui augmente proportionnellement à l'énergie solaire reçue. Le taux de conversion photon-électron est faible car un certain nombre de conditions doivent être réunies pour que ce phénomène se produise. L'effet thermique est donc majoritaire sur la plupart des capteurs, détériorant d'autant plus les performances de ces derniers. C'est pourquoi la température d'une cellule est toujours plus élevée que la température ambiante. Pour estimer la température de cellule T_c à partir de la température ambiante T_a , on peut utiliser la formule de correction suivante :[6]

$$T_c = T_a - \left(\frac{E_s}{800}\right) (T_{uc} - 20) \quad (1.6)$$

1.8 Influence des différents paramètres sur la caractéristique I(V)

1.8.1 Influence de l'éclairement et de la température

L'éclairement et la température modifient la caractéristique I-V de la cellule solaire, pas dans sa forme générale mais pour les valeurs I_{cc} , V_{co} , I_m et V_m :

a Influence de l'éclairement

La Figure (I.16) présente les caractéristiques courant-tension d'une cellule monocristalline typique de (10×10) cm² pour plusieurs intensités du rayonnement solaire. On remarque que le courant du court circuit I_{cc} est directement proportionnel à l'intensité lumineuse incidente, la variation de I_{cc} avec l'éclairement est donnée sous la forme suivante :

$$I_{cc} \approx I_{ph} = \alpha(T) \times E \times S \quad (I.7)$$

Où

E : est l'éclairement en W/m².

S : est la surface de la cellule en m².

$\alpha(T)$: coefficient dépendant faiblement de la température, il est exprimé en A/W.

D'autre part, l'accroissement de l'éclairement provoque une légère augmentation de la tension de circuit ouvert V_{co} . [19]

b Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires puisqu'elles sont exposées au rayonnement solaire. La figure (I.17) montre l'influence de la température, sur la caractéristique I (V) de la cellule solaire lorsque la température varie. On observe que l'augmentation de la température provoque une augmentation du courant du court circuit (I_{cc}), en même temps on assiste à une diminution nette de la tension en circuit ouvert (V_{co}). L'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension (V_m) et un léger accroissement du courant (I_m) et par la suite une baisse relative de la puissance maximale (P_m). [19]

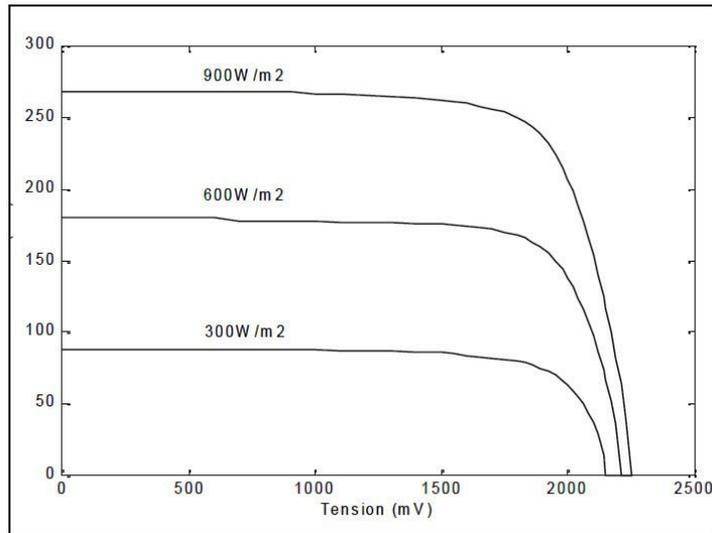


Figure I.16: Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire

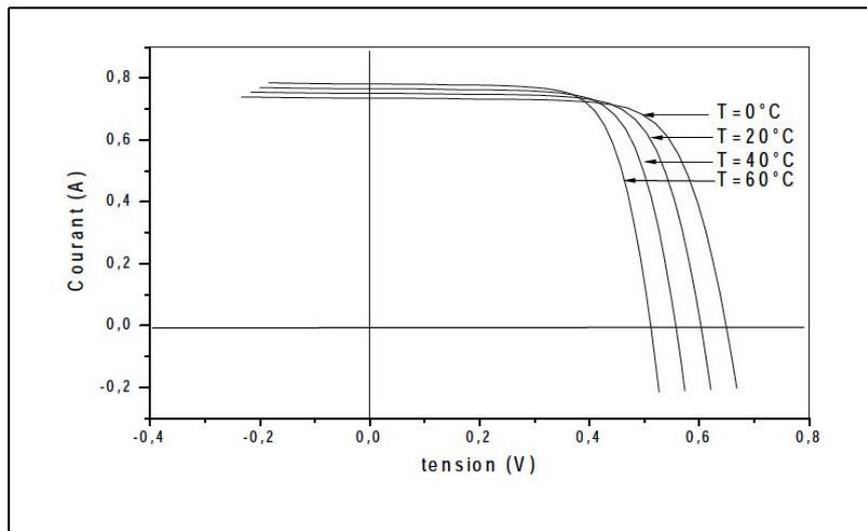


Figure I.17: Influence de la température sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire éclairée

1.8.2 Influence de la résistance série et la conductance shunt

Les deux résistances parasites R_s et R_{sh} vont modifier la caractéristique I-V de la cellule solaire en particulier sous éclairement :

a Influence de la résistance série

L'effet de la résistance série R_s sur la caractéristique I-V de la cellule solaire sous éclairement est illustré sur la figure (I.18) ci-dessous.

On remarque que la tension de circuit ouvert (V_{co}) et le courant du court circuit (I_{cc}) ne sont pas modifiés, mais la caractéristique se déforme très rapidement sous l'effet de R_s . Cette influence se traduit par une diminution de la pente de la caractéristique I-V dans la zone où la cellule fonctionne comme une source de tension¹ lorsque R_s augmente. L'augmentation de la résistance série a un effet réductif considérable sur le point de fonctionnement et le facteur de forme (FF) de la cellule.[19]

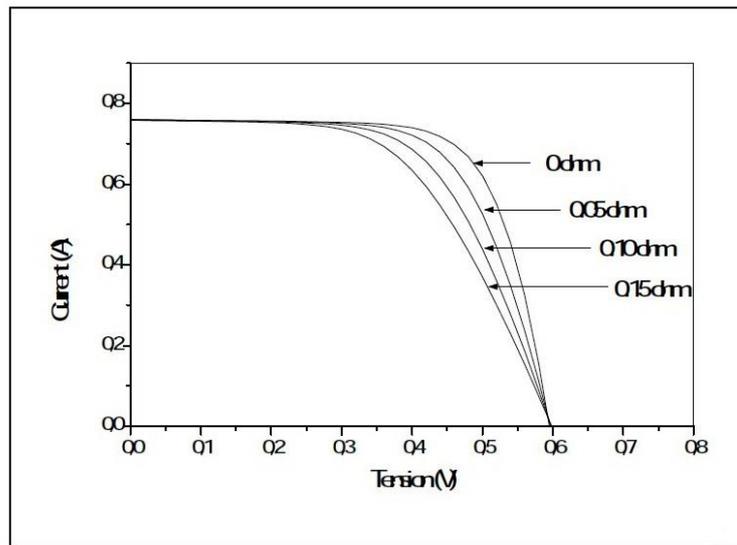


Figure I.18: influence de la résistance série sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire éclairé

b Influence de la conductance shunt (parallèle)

La Figure (I.19) ci-dessous illustre l'effet de la résistance parallèle R_p sur la caractéristique I-V de la cellule solaire sous éclairement. On remarque que la tension de circuit ouvert (V_{co}) et le courant du court circuit (I_{cc}) ne sont pas modifiés mais la caractéristique se déforme très rapidement, cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la caractéristique I-V de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme une source de courant (basse tension).[19]

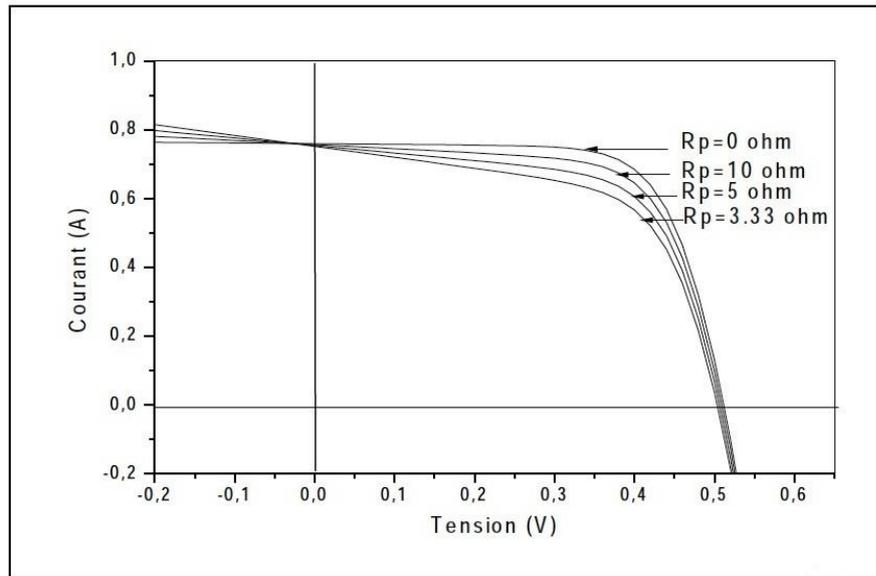


Figure I.19: influence de la résistance shunt sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire éclairée

1.8.3 Influence du courant de saturation et du facteur d'idéalité

Nous avons porté les courbes de la caractéristique I-V données par des différentes valeurs du courant de saturation et du facteur d'idéalité:

a Influence du courant de saturation (I_s)

La Figure (I.20) ci-dessous illustre l'effet du courant de saturation I_s sur la caractéristique I-V de la cellule solaire sous éclairage, On constate que l'augmentation du courant de saturation (I_s) de la diode provoque une réduction de la tension de circuit ouvert (V_{co}) par contre le courant de court circuit (I_{cc}) reste constant.

b Influence du facteur d'idéalité (n)

La Figure (I.21) ci-dessous illustre l'effet du facteur d'idéalité n sur la caractéristique I-V de la cellule solaire sous éclairage On constate que la diminution du facteur d'idéalité (n) provoque une réduction de la tension de circuit ouvert (V_{co}) par contre le courant de court circuit (I_{cc}) reste constant.[19]

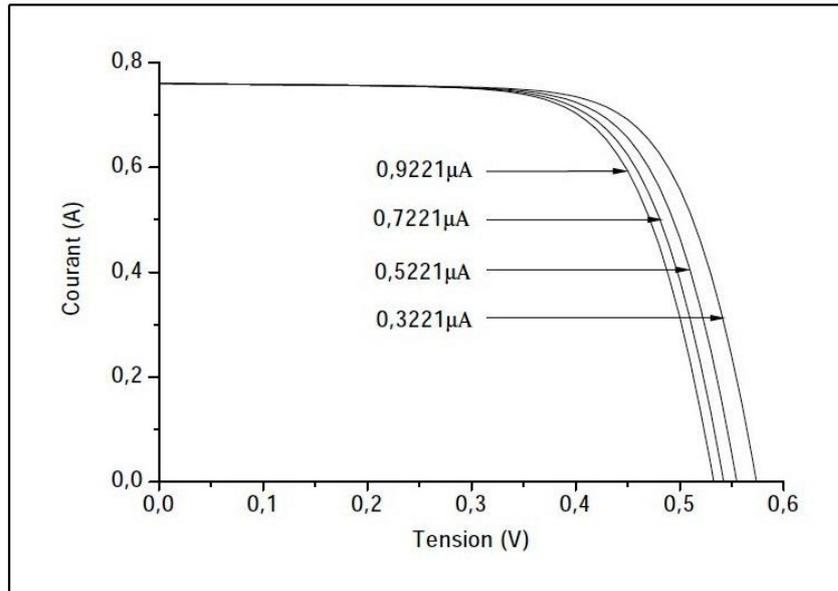


Figure I.20: influence du courant de saturation sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire éclairée.

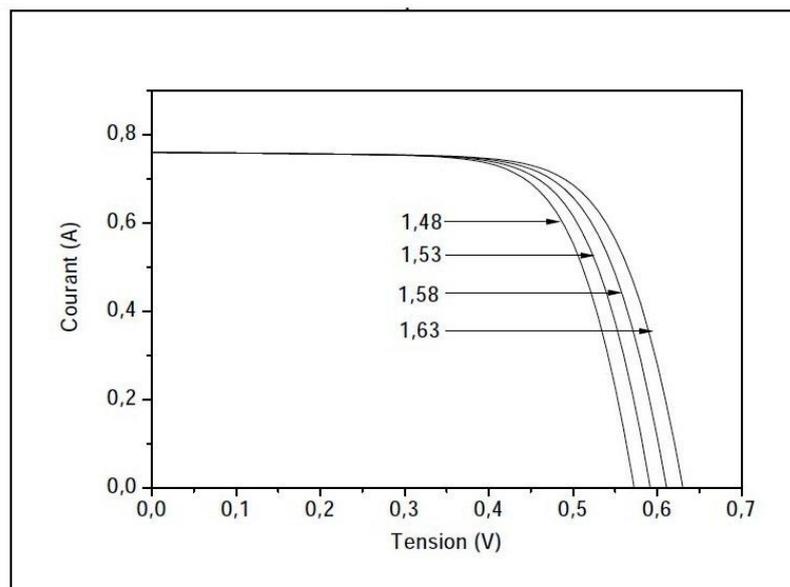


Figure I.21: influence du facteur d'idéalité sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire éclairée.

1.9 Panneau solaire (champ solaire)

Se compose des modules PV interconnectés en série ou en parallèle pour produire la puissance électrique. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire, avec un degré d'inclinaison spécifique. Les modules

peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation [15]

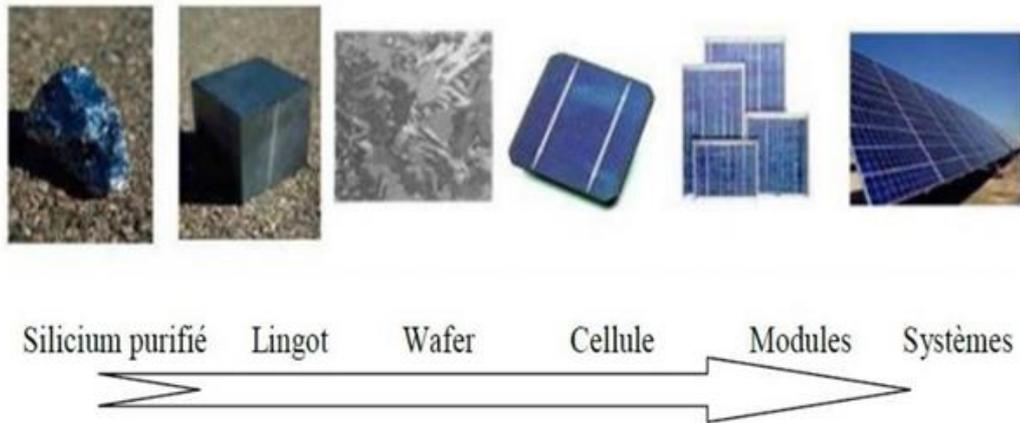


Figure I.22: Evolution de construction des systèmes photovoltaïques

1.9.1 Association en série

Une association de n_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition de tensions élémentaires de chaque cellule.

$$V_{cons} = n_s * V_{co} \quad \text{avec} \quad I_{cc} = I_{ccn_s}$$

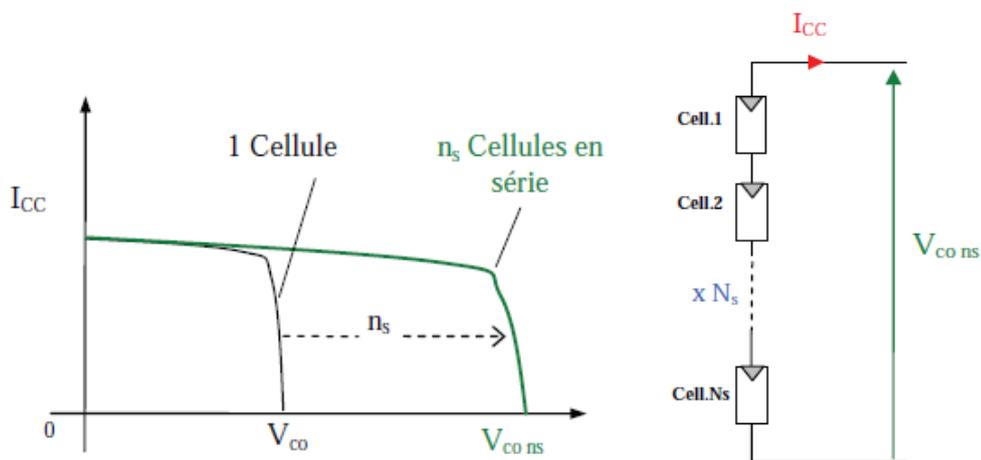


Figure I.23: Caractéristiques résultantes d'un groupement de n_s cellules en série.

photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et

à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible. L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble. Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série ($V_{cons}=0.6V*36=21.6V$) afin d'obtenir une tension optimale du panneau V_{opt} proche de celle d'une tension de batterie de 12V (à puissance maximale).

Les modules en série sont souvent appelés des strings. Malheureusement, les cellules ou modules ne sont pas tous absolument identiques. Le courant total s'oriente alors à la cellule ou au module le plus faible. Ce phénomène est appelé mismatching.[6]

1.9.2 Association en parallèle

D'autre part, une association parallèle de n_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants.

$$I_{CCnp} = n_p * I_{CC} \text{ avec } V_{CO np} = V_{CO}$$

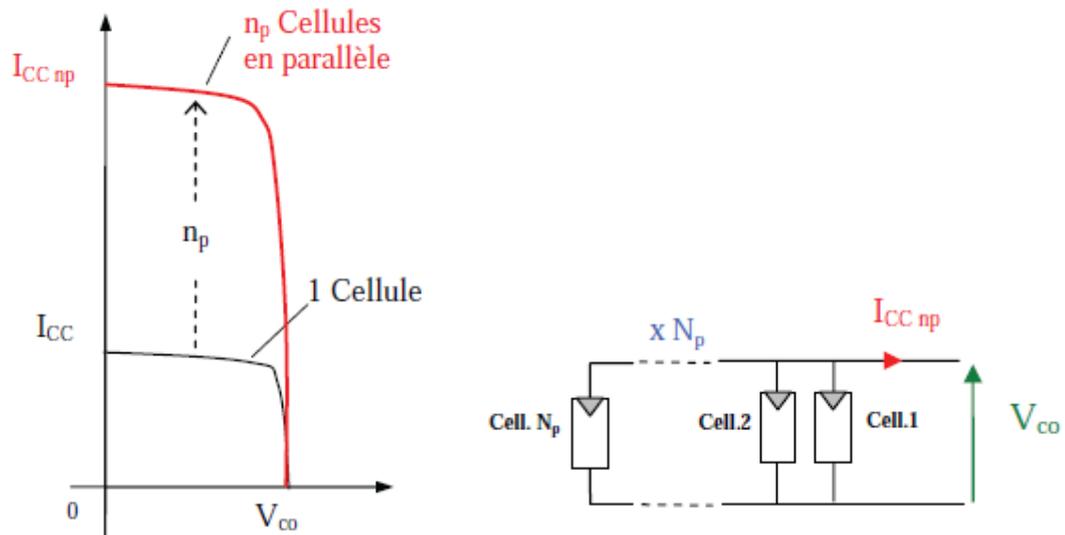


Figure I.24: Caractéristiques résultant d'un groupement de n_p cellules en parallèle.

La caractéristique $I(V)$ d'un générateur solaire peut être considérée comme le fruit d'une association d'un réseau de n_s*n_p cellules en série/parallèle.

Le montage en parallèle de cellules/modules permet d'obtenir des courants plus importants. Dans ce cas, les différents courants s'additionnent. Seuls ont le droit d'être montés en parallèle des cellules ou des modules de même type. Si les modules sont différents, des courants compensateurs risquent de détruire les modules.[6]

1.9.3 Aménagement du montage final. Ombrage et effet de Hot Spot

La caractéristique globale peut en outre varier en fonction de l'éclairement, la température, vieillissement des cellules et les effets d'ombrage ou d'inhomogénéité de l'éclairement. De plus, il suffit d'une occultation ou d'une dégradation d'une des cellules mises en série pour provoquer une forte diminution du courant solaire produit par le module photovoltaïque. Un ombrage uniforme de toute la surface d'un module PV réduit uniquement la puissance du module, mais ne lui nuit pas. Il n'en est pas de même en cas d'ombrage partiel, par exemple lorsqu'une seule cellule PV du module est ombragée.

Lorsque le courant débité est supérieur au courant produit par la cellule faiblement éclairée, la tension de celle-ci devient négative et devient un élément récepteur. Si plusieurs cellules PV sont montées en série, ce qui est généralement le cas, la diode de la cellule PV ombragée se trouve dans le sens de blocage. Par conséquent, toute la tension du module peut chuter via la diode. Si cette tension dépassait la tension de blocage de la diode, elle détruirait cette dernière. Si la tension est inférieure à la tension de blocage, la diode forme une puissance dissipée qui a pour conséquence de réchauffer la cellule, risquant ainsi d'endommager le module.

C'est le phénomène dit de hot spot ou « point chaud ». Pour remédier à ce phénomène, on équipe donc les panneaux photovoltaïques de diodes by-pass qui ont pour rôle de protéger les cellules qui deviennent passives [6]

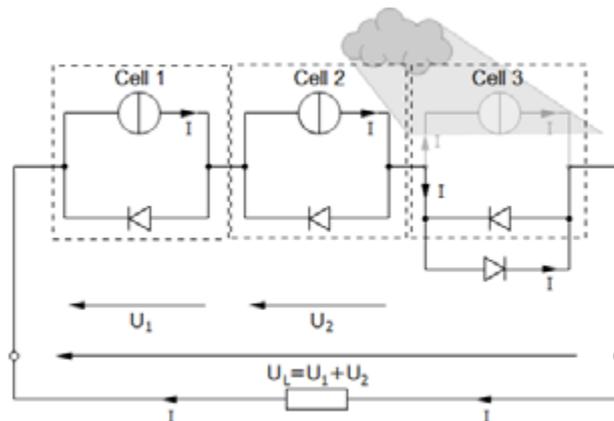


Figure I.25: L'effet d'ombrage

1.9.4 Les diodes by passes

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

Sous certaines conditions, la cellule la plus faible peut alors se comporter comme une cellule réceptrice dissipant la puissance générée par la cellule la plus forte. Celle-ci peut même être détruite si la contrainte ou la température devient trop importante.

Pour éviter ce phénomène, on place des diodes de by-pass (empêchant tout courant ou tension inverses). Celles-ci sont placées en série lorsque les cellules sont connectées en parallèle et en parallèle lorsque les cellules sont connectées en série. Les modules aujourd'hui commercialisés comprennent généralement des diodes de protection situées en parallèle des différents strings qui le composent.[20]

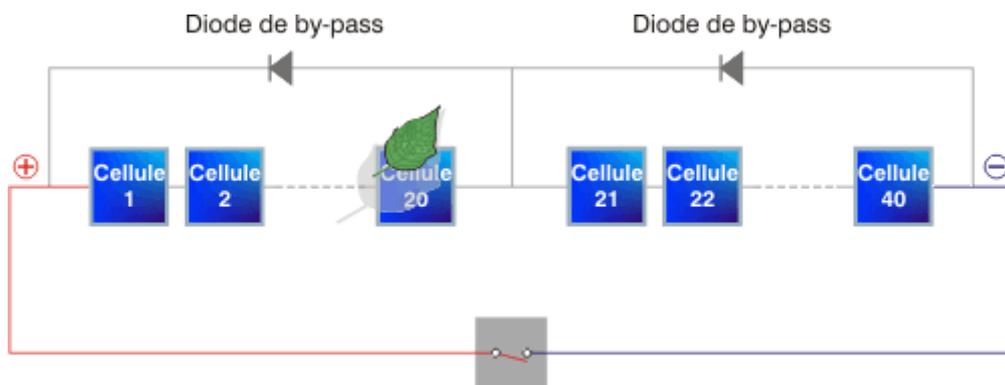


Figure I.26: diodes by passes

1.10 Les systèmes photovoltaïque

1.10.1 Systèmes photovoltaïques autonomes

Les systèmes autonomes dépendent uniquement de l'énergie solaire pour répondre à la demande d'électricité. L'énergie produite par les modules photovoltaïques au cours de la journée peut être utilisée immédiatement ou emmagasinée dans les accumulateurs, servant la nuit ou pendant des périodes à ciel couvert où dans le cas insuffisance d'énergie solaire, ciel partiellement couvert, permettant la couverture des besoins énergétiques de la charge. Dans ces systèmes, la puissance électrique du champ de modules et la capacité des accumulateurs sont soigneusement déterminés afin d'obtenir un rendement optimal. Certaines applications des systèmes autonomes tel le pompage de l'eau, peuvent être adapté sans accumulateurs. L'eau est pompée lorsque le soleil brille et est emmagasinée directement dans un réservoir au-dessus du point d'utilisation, ce qui rend l'eau accessible par simple effet de gravité.[16]

1.10.2 Systèmes photovoltaïques hybrides autonomes

Les systèmes hybrides, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité sont composés d'un générateur photovoltaïque combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible ou aux deux à la fois. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée, lorsqu'il n'y a pas assez de lumière solaire à certains moments de l'année, ou si on désire diminuer votre investissement dans les champs de modules photovoltaïques et les batteries d'accumulateurs.[16]

1.10.3 Systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Un système photovoltaïque raccordé au réseau est un système d'alimentation et de production d'énergie photovoltaïque solaire qui est connecté au réseau de distribution. Une installation photovoltaïque connectée au réseau se compose de panneaux solaires, d'un ou plusieurs onduleurs, d'une unité de conditionnement de l'alimentation et d'un équipement de raccordement au réseau. Ils vont des petits systèmes de toit résidentiels et commerciaux aux grandes centrales solaires à grande échelle. Contrairement aux systèmes d'alimentation autonomes, un système connecté au réseau inclut rarement une solution de batterie intégrée car ils restent très coûteux. Lorsque les conditions le permettent, le système PV raccordé au réseau fournit la puissance excédentaire, au-delà de la consommation de la charge connectée au réseau de distribution.

1.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué le principe du fonctionnement d'un système photovoltaïque ainsi on a basé sur la nature de production d'énergie électrique et les principales caractéristiques de l'énergie solaire plus un rappelle sur le rayonnement solaire.

Chapitre 2 Convertisseurs et filtres

2.1 Introduction

Dans ce chapitre nous reprenons les différents types des convertisseurs DC-DC et DC-AC et leurs principes de fonctionnements .puis on interprète les différentes topologies des filtres passifs ensuite l'intégration de la commande MPPT qui assure la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque.

2.2 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs. La technique du découpage apparue environ dans les années soixante a apporté une solution au problème du mauvais rendement et de l'encombrement des alimentations séries. [20]

2.3 Type des convertisseurs DC-DC

Il y a un plusieurs topologies des convertisseurs DC-DC. Ils sont classés par catégorie selon que la topologie isolée ou non isolée. Les topologies isolées emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence, elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage. Les topologies les plus connues dans la majorité des applications sont le Fly back, en demi-point et en pont complet. Dans les applications photovoltaïques (PV), les systèmes de couplage avec le réseau électrique emploient souvent ces types de topologies quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sûreté. Les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entraînement des moteurs à courant continu. Ces topologies sont encore classées en trois catégories

- Abaisseurs (Buck)
- Élévateurs (Boost)
- Élévateurs - Abaisseurs (Buck-Boost).

La topologie Buck est employée pour les faibles tensions. Dans les applications PV le convertisseur Buck est habituellement employé comme chargeur de batteries et dans des systèmes de pompage de l'eau.

La topologie Boost est employée pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur Boost pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur. Puis, il y a des topologies capables d'augmenter et de diminuer la tension telles que le Buck-Boost.[26]

2.3.1 Hacheur dévolteur (Buck - convertier)

Un convertisseur Buck ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. Savoir le comportement réel de ce convertisseur nécessite de connaître en détail son modèle mathématique. Pour cela nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie.[27]

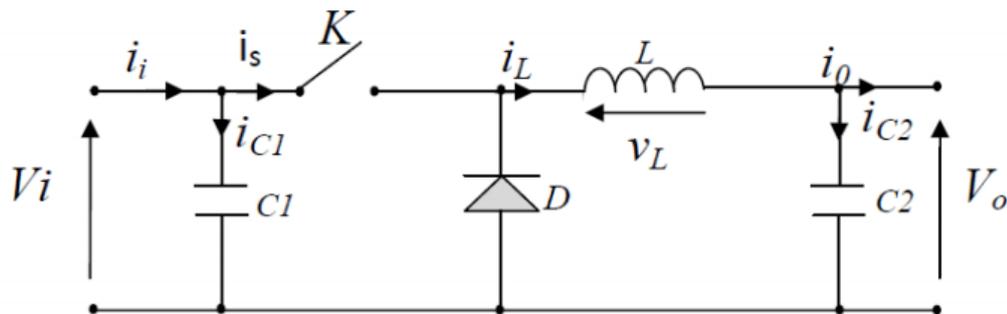


Figure II.1: Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck

La figure (II.1) montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur dévolteur dans les deux cas : l'interrupteur K fermé pendant dTs et ouvert pendant $(1-d)Ts$. Où :

- Ts est la période de commutation.
- d est le rapport cyclique du commutateur ($d \in [0, 1]$).

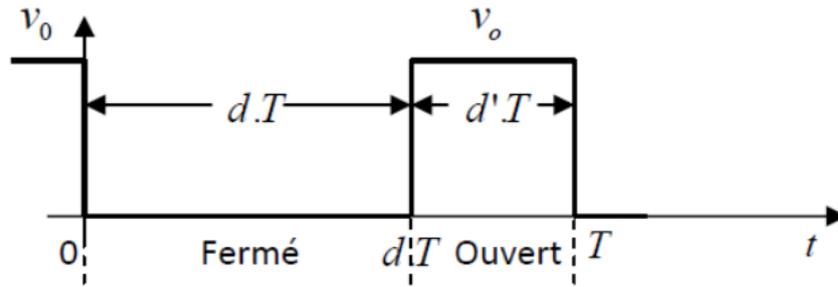


Figure II.2: Périodes fermeture et ouverture d'un interrupteur.

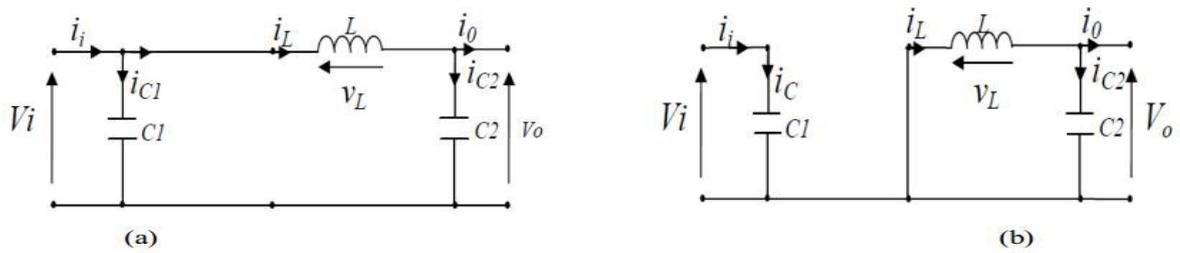


Figure II.3: Schémas équivalents du hacheur dévolteur
(a) : K fermé , (b) : K ouvert

2.3.2 Hacheur survolteur (Boost-converter)

Connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle , son schéma de principe de base est celui de la figure (II.4). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure.[27]

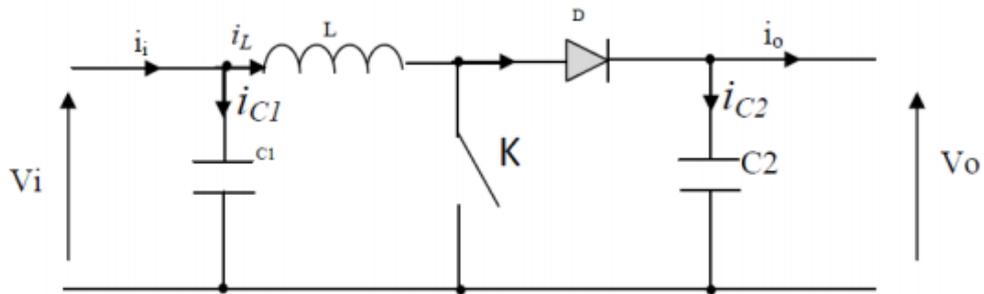


Figure II.4: Schéma de principe d'un convertisseur Boost

Comme pour le convertisseur dévolteur, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (voir figure II.5) des deux phases de fonctionnement

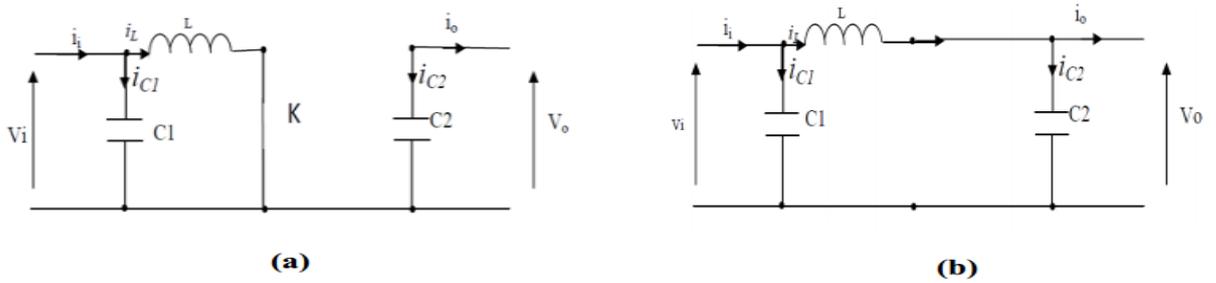


Figure II.5 : Schémas équivalents du hacheur survolteur
 (a) : K fermé, (b) : K ouvert.

2.3.3 Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost)

La troisième topologie de base de ce convertisseur est donnée par la figure (II.6). Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, la tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée. Tandis que, lorsque le transistor est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente et l'énergie est stockée, et quand le commutateur tourne sur la position (off) la tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode. [27]

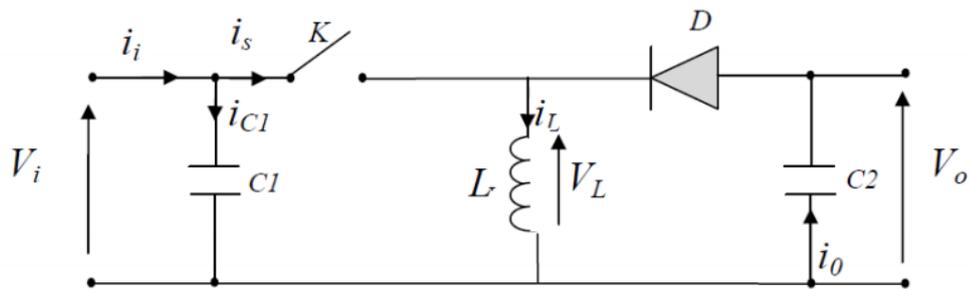


Figure II.6: Convertisseur dévolteur-survolteur

La figure (II.7) montre les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur survolteur pour les deux cycles de fonctionnement.

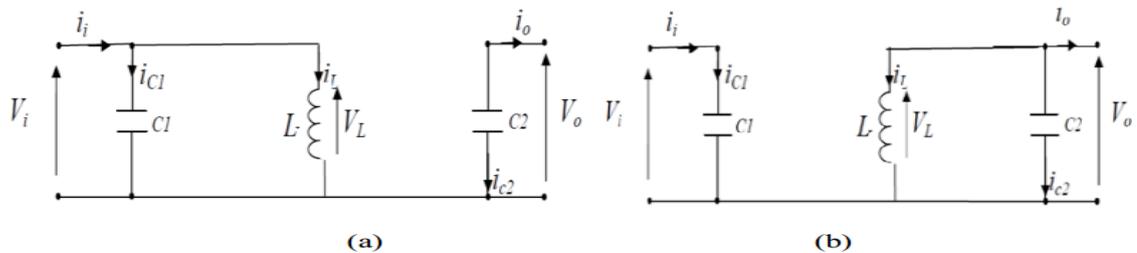


Figure II.7: Schémas équivalents du hacheur dévolteur –survolteur
 (a): K ouvert, (b): K fermé

2.4 L'onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande. Figure(II.8) représente schéma de principe de l'onduleur.[28]

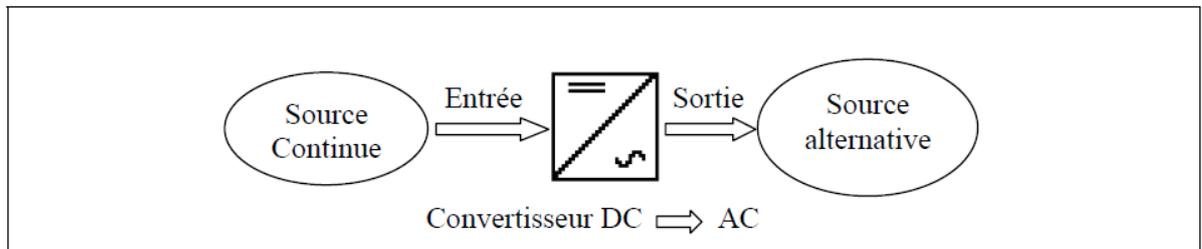


Figure II.8 : Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)

2.5 Types d'onduleurs

Les onduleurs sont classés en deux grandes catégories :

2.5.1 Onduleur autonome

Un onduleur est dit autonome s'il utilise l'énergie d'un circuit auxiliaire propre à lui pour la commutation des thyristors ou l'autre semi conducteurs dans ce cas nous commandons la fréquence la forme d'onde de la tension de sortie. On distingue deux types d'onduleurs autonomes [28] :

- Les onduleurs de tension alimentée par une source de tension continue.
- Les onduleurs de courant alimentés par une source de courant continu.

2.5.2 Onduleur non autonome

C'est le nom donné au montage redresseur tous les thyristors (pont de Graëtz) qui, en commutation naturelle assistée par le réseau auquel il est raccordé, permet un fonctionnement en onduleur (par exemple par récupération de l'énergie lors des périodes de freinage dans les entraînements à moteurs électriques). À la base du développement des entraînements statiques à vitesse variable pour moteurs à courant continu et alternatif, cycloconvertisseurs, onduleurs de courant pour machines synchrones et asynchrones, jusqu'à des puissances de plusieurs MW, ce type de montage est progressivement supplanté au profit de convertisseurs à IGBT . [28]

2.6 Principe général de fonctionnement

Pour réaliser un onduleur autonome il suffit de disposer d'un interrupteur inverseur **K** et d'une source de tension continue **E** comme le montre la Figure (II.9) :

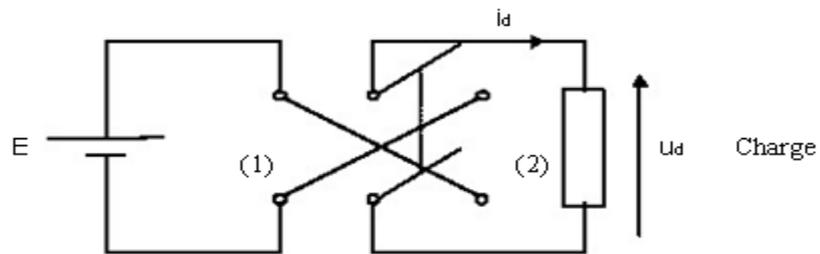


Figure II.9 : Principe de fonctionnement de l'onduleur autonome

Lorsque **K** est en position (1), on obtient le montage de la Figure (II.10) :

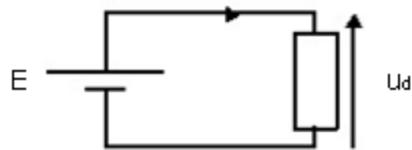


Figure II.10: K en position (1)

Soit : $U(t) = E$

Lorsque **K** est en position (2), on obtient: $U = -E$.

La Figure (II.11) donne la forme de $U(t)$ sur une période complète de fonctionnement.

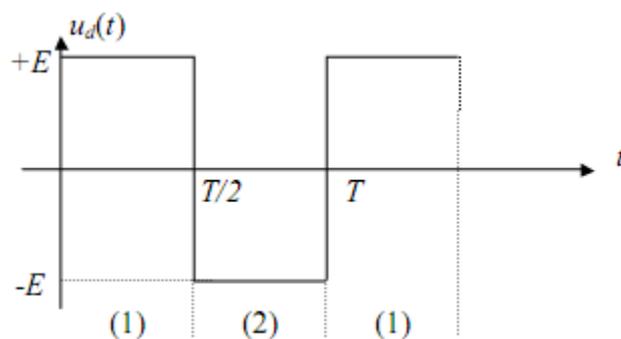


Figure II.11: Tension avec K en position (1) et (2).

2.7 Les applications des onduleurs

Parmi les nombreux domaines d'emploi des onduleurs autonomes, on trouve principalement Les onduleurs à fréquence fixe a commutation forcée : Alimentés le plus souvent par une batterie d'accumulateur, ils jouent d'ordinaire le rôle d'alimentation de sécurité, ils constituent à ce titre, le principe déboucle actuel des onduleurs autonomes.

Les onduleurs à fréquence variable à commutation forces : Alimentés à partir du réseau industriel par l'intermédiaire d'un montage redresseur, ils délivrent une tension de fréquence et de valeur efficace nécessaires pour faire tourner à vitesse variable un moteur à courant alternatif.[28]

2.7.1 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone

La vitesse d'un moteur synchrone est fixée par la pulsation des courants statiques. Pour changer de vitesse il faut donc changer la fréquence des tensions d'alimentation. Il faut donc redresser la tension du réseau puis l'onduler à la fréquence désirée.[28]

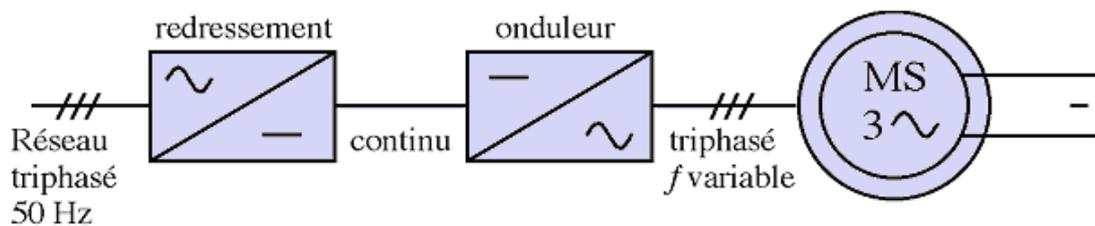
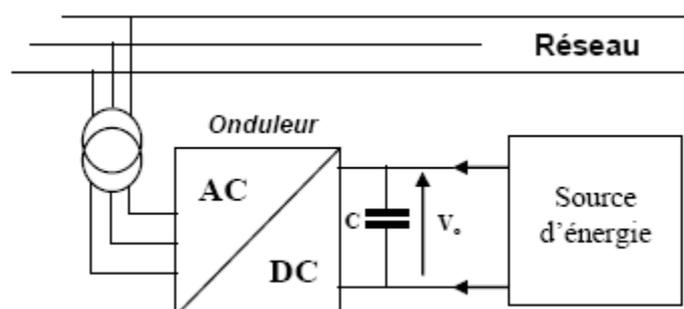


Figure II.12: Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone

2.7.2 Alimentation de secours

Lors d'une panne d'électricité, un onduleur assure la continuité de l'alimentation des machines à partir de batteries. En informatique professionnelle, un onduleur est indispensable pour éviter la perte d'informations en cas de panne du secteur [28].



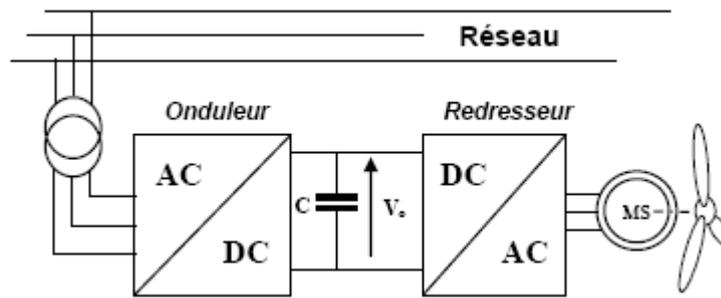


Figure II.13: Alimentation de secours

2.7.3 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes

La France fournit de l'énergie électrique à la Grande-Bretagne, mais la fréquence du réseau anglais est 60 Hz. Il faut donc adapter la fréquence.

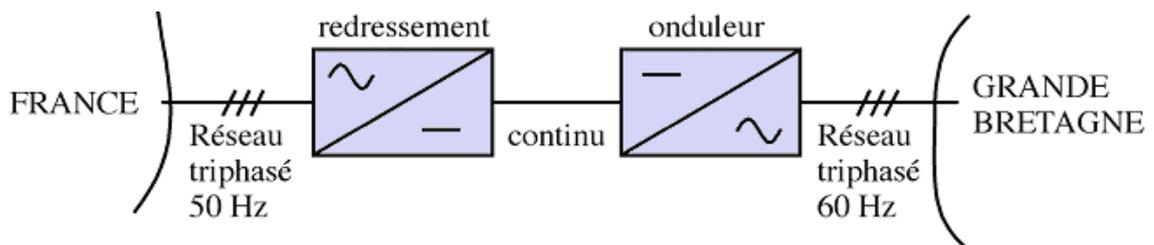


Figure II.14: Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes

2.8 Onduleur de tension

On appelle onduleur de tension, un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue. Nous présentons le principe des onduleurs de tension dans le cas où la sortie est monophasée et utilisons l'onduleur en pont à quatre interrupteurs : **K1**, **K2**, **K1'** et **K2'**.

La Figure (II.15) représente le circuit de puissance d'un tel onduleur (pont monophasée) et la Figure (II.16): représente les signaux de commande et les formes d'ondes des tensions :

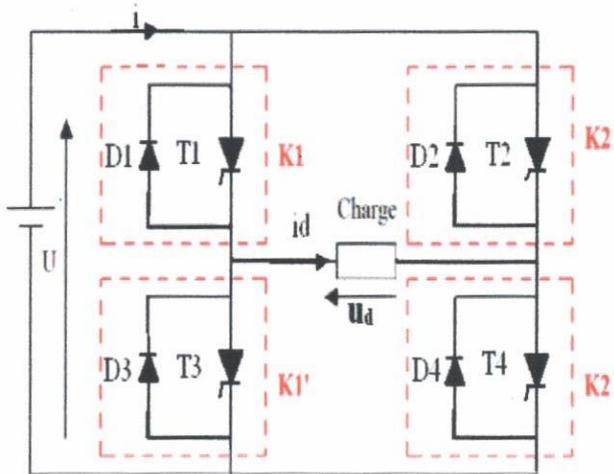


Figure II.15: Onduleur de tension en pont Monophasé.

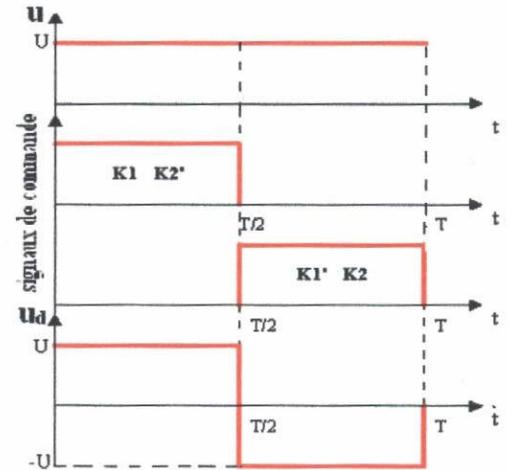


Figure II.16 : Signaux de commande et forme d'onde des tensions de sortie.

Les états des interrupteurs commandés nous permettent de donner l'expression de $U_d(t)$ comme suit: Si la tension d'entrée de l'onduleur est constant et égal à U , quelque soit I on a :

- Pour $0 < t < T/2$: les interrupteurs, $K1, K2'$ sont fermés, et $K2, K1'$ sont ouverts.

D'où: $U_d = +U$

- Pour $T/2 < t < T$: les interrupteurs, $K2, K1'$ sont fermés, et $K1, K2'$ sont ouverts.

D'où: $U_d = -U$

Le courant de la sortie est donc le courant I à l'entrée, il dépend de la charge placée du côté alternative.

Notant que les interrupteurs K_i de l'onduleur Figure (II.15): sont formés par la mise en parallèle d'un semi-conducteur T_i commandé à l'ouverture et à la fermeture et d'une diode D_i . Cette dernière assure la continuité de courant permettant ainsi la conduction d'un courant négatif dans le cas où le courant est déphasé par rapport à la tension de sortie [28].

2.9 Onduleur de courant

On appelle onduleur de courant, un onduleur qui est alimenté par une source de courant continue. Comme exemple on prend le montage de la figure ci-dessous illustrant le modèle d'un onduleur de courant monophasé, qui se compose de quatre interrupteurs de puissance $K1, K2, K1'$ et $K2'$, sur La Figure (II.17): sont représentés les signaux de commande et les formes d'ondes des courants correspondants [28].

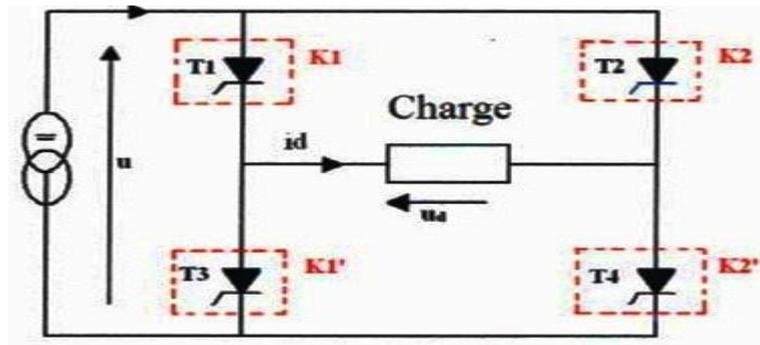


Figure II.17: Onduleur de courant en pont monophasé

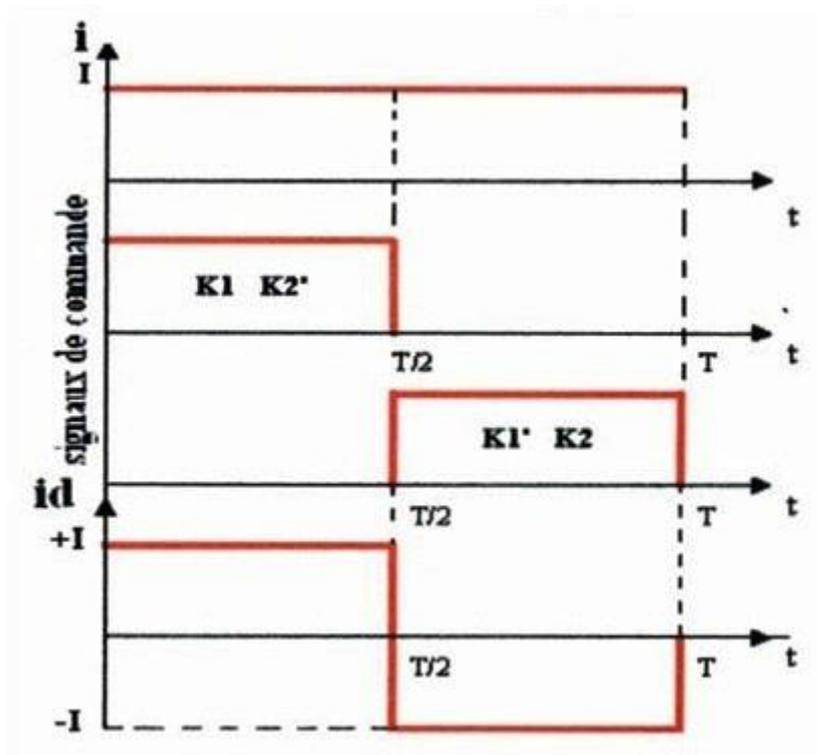


Figure II.18: Signaux de commande et forme d'onde des courants

De même, pour l'onduleur de courant, les états des interrupteurs commandés nous permettent de donner l'expression de $i_d(t)$. Si le courant d'entrée de l'onduleur est constant et égal à I , quelque soit U :

- Pour $0 < t < T/2$: les interrupteurs, **K1, K2'** sont fermés, et **K2, K1'** sont ouverts :
D'où: $i_d = +I$
- Pour $T/2 < t < T$: les interrupteurs, **K2, K1'** sont fermés, et **K1, K2'** sont ouverts :
D'où $i_d = -I$

La tension $U_d(t)$ de la sortie est donc la tension U à l'entrée, elle dépend de la charge placée dans le coté alternatif. Dans ce cas l'interrupteur est formé d'un semi conducteur commandé à l'ouverture et la fermeture, il n'a pas à être réversible en courant, alors on n'a pas besoin de diode mise en parallèle, [28].

2.10 Stratégies de commande

2.10.1 Commande 180°

Lorsque la séquence de commande de fermeture d'un interrupteur coïncide avec la commutation d'ouverture de l'interrupteur situé sur le même bras, on parle dans ce cas d'un onduleur de type 180°, Figure (II.19):

Pour le premier bras de l'onduleur, l'interrupteur **K1** est fermé pendant une demi-période (180°) et **K'1** est fermé pendant l'autre demi de la période. Pour les deux autres bras de l'onduleur on applique la même procédure mais avec un décalage de $2\pi/3$ et $4\pi/3$ par rapport au premier bras [28].

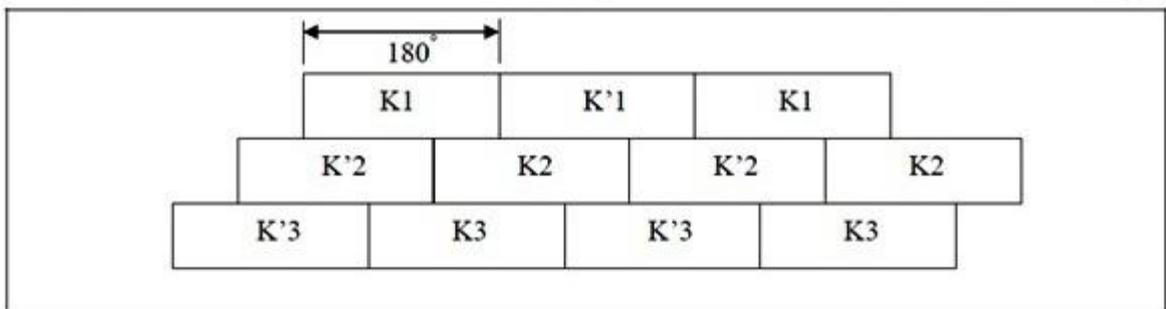


Figure II.19: Commande 180°

En appliquant ce type de commande pour l'onduleur on obtient un système de tensions alternatives triphasées caractérisées par l'absence des harmoniques de rangs multiples de trois.

2.10.2 Commande 120°

Dans ce cas la Figure (II.19), la commande de fermeture d'un interrupteur ne coïncide plus avec la commande d'ouverture de l'interrupteur placé sur le même bras, on parle dans ce cas d'un onduleur de type 120°.

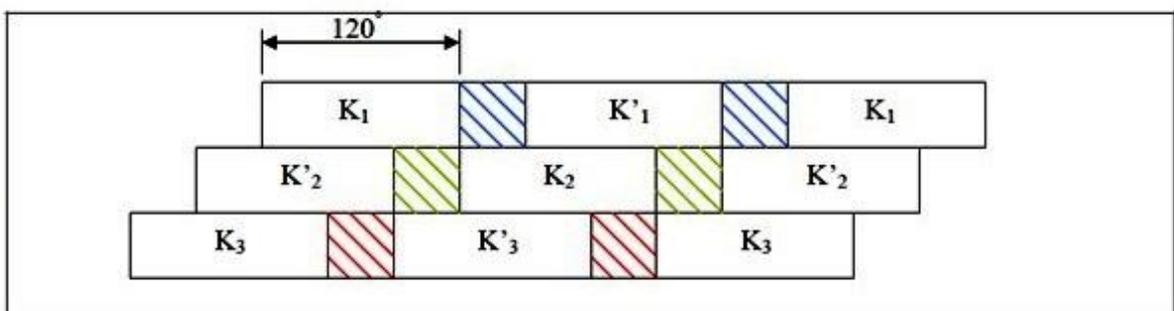


Figure II.20: Commande 120°

Avec cette technique de commande Chaque interrupteur fonctionne pendant 120° , telle que la séquence est **K1**, **K2** puis **K3** successivement. De même pour les interrupteurs **K'1**, **K'2** et **K'3** avec un décalage de 60° par rapport à **K1**, **K2**, **K3**.

2.10.3 Commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Les tensions obtenues aux bornes du récepteur (la charge) pour les onduleurs triphasés conventionnels présentent plusieurs harmoniques, il est donc nécessaire de chercher à se rapprocher d'une forme d'onde sinusoïdale. Pour ce la on fait appel à la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI). Dans ce contexte, nous savons bien qu'avec la possibilité d'avoir des transistors de puissance à un coût moindre il est devenu possible d'utiliser la technique MLI pour améliorer la forme d'onde du courant du moteur et par la conséquence, la minimisation des harmoniques provoquant l'échauffement de la machine et les ondulations du couple [28].

En fait l'onduleur de tension à MLI est toujours choisi pour avoir une réponse rapide et des performances élevées. Dans ce type d'onduleur, la tension redressée alimentant l'onduleur peut être fixée par l'utilisation d'un redresseur à diodes. Dans ce cas la tension et la fréquence de sortie sont contrôlées par l'onduleur en utilisant la technique MLI. Elle consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et à former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables. La manipulation de nombre des impulsions formant chacune des alternances d'une tension de sortie d'un onduleur à MLI présente deux avantages importantes à s'avoir :

- Repousser vers des fréquences élevées les harmoniques d'ordres inférieurs de la tension de sortie, ce que facilite le filtrage au niveau de la charge.
- Elle permet de faire varier la valeur fondamentale de la tension désirée.

En effet, les deux stratégies de modulation les plus utilisées en boucle ouverte pour un onduleur de tension triphasé sont la modulation sinusoïdale et la modulation vectorielle :

2.10.4 Modulation sinusoïdale (MLIS)

Cette stratégie est héritée des techniques analogiques. Elle consiste à calculer la largeur d'une impulsion de manière à obtenir la tension de référence en moyenne sur une période de commutation. Elle repose sur la génération des signaux de commande en comparant deux ondes la première triangulaire d'amplitude fixe et de fréquence très élevée appelée porteuse ou onde de modulation. La deuxième sinusoïdale d'amplitude variable et de fréquence f qui détermine la fréquence de la tension de sortie appelée référence. Les instants de commutation sont déterminés par l'intersection de ces deux signaux. Le réglage en amplitude et en fréquence de la tension de sortie de l'onduleur est défini par le coefficient de réglage en tension (représentant le rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de la porteuse), et l'indice de modulation (donnant le rapport des fréquences de la porteuse et de la référence) [21].

2.10.5 Modulation vectorielle (SVM)

L'utilisation des technologies numériques permet le recours à des stratégies de modulation triphasée spécifiques non déduites des techniques analogiques initialement conçues en monophasé. Parmi ces technologies numériques on trouve la modulation vectorielle (Space Vector Modulation). Qui représente la méthode de modulation ou de commande la plus adoptée au contrôle des machines à courant alternatif beaucoup plus les machines asynchrones. En effet, contrairement à la modulation sinusoïdale, la MLI vectorielle ne s'appuie pas sur des calculs séparés des modulations pour chacun des bras de l'onduleur. Mais elle traite les signaux directement dans le plan diphasé de la transformée de Concordia. Donc le principe de base de cette modulation consiste à reconstruire le vecteur de tension de sortie de l'onduleur à partir des huit vecteurs de tension correspondant aux huit états possibles de l'onduleur de tension [22].

2.11 PLL

Une boucle à verrouillage de phase est un système bouclé dans lequel la grandeur asservie est la phase d'un signal alternatif. La Figure (II.20) représente le schéma fonctionnel d'une PLL.

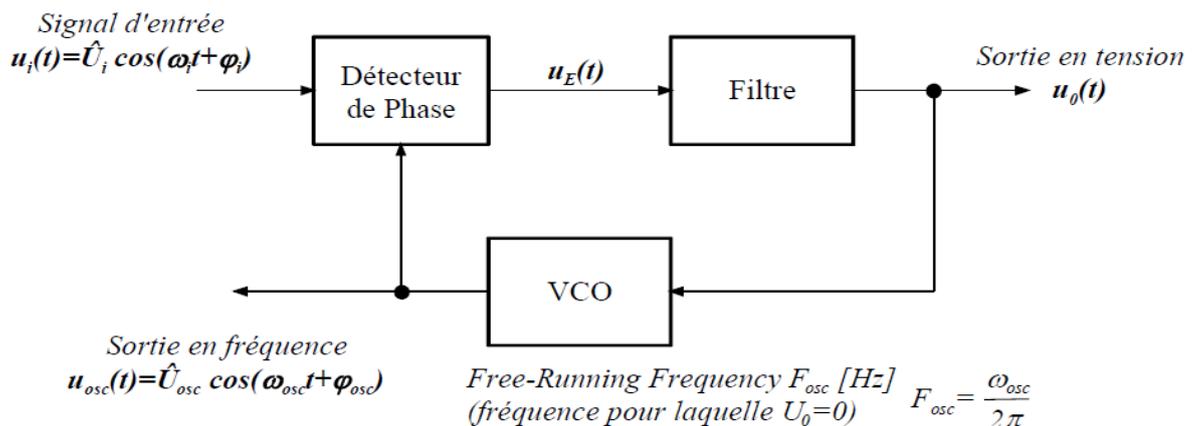


Figure II.21 : schéma fonctionnel du système bouclé

Le rôle de la boucle est d'asservir la pulsation de l'oscillateur sur celle du signal d'entrée, l'oscillateur délivrant un signal de la forme

$$u_{osc}(t) = \hat{U}_{osc} \cos(\omega_{osc} t + \varphi_{osc}) . \quad (II.1)$$

Le principe de l'asservissement est alors le suivant (On suppose ici que la pulsation du signal de l'oscillateur est égale à celle du signal d'entrée).

Le comparateur de phase compare en permanence la phase du signal délivré par l'oscillateur φ_{osc} à celle du signal d'entrée φ_i et délivre une tension $u_E(t)$ liée directement à l'écart de phase correspondant $\varphi_E = \varphi_i - \varphi_{osc}$. Cette tension $u_E(t)$ est appliquée à l'entrée du filtre de boucle de type passe-bas dont le rôle sera précisé plus

loin. La tension $u_0(t)$ en sortie du filtre commande la fréquence de l'oscillateur dans un sens tel que la pulsation de sortie soit égale en permanence à celle du signal d'entrée. Ainsi le rôle de la boucle à verrouillage de phase est de faire en sorte que les fréquences des signaux appliqués sur les deux entrées du comparateur de phase soient identiques, les phases de ces deux signaux pouvant être différentes.[23]

2.12 Régulateur PI

L'intérêt de la correction de type intégrale est de permettre une erreur statique nulle. En effet, si le système comporte un intégrateur et se stabilise à un point d'équilibre, tous les signaux sont constants. pour que la sortie d'un intégrateur soit constante, il est nécessaire que son entrée soit nulle. Si l'entrée de l'intégrateur est reliée à l'erreur de régulation, l'effet du terme intégral sera bien d'annuler cette erreur. Notons que l'erreur est annulée même en présence d'une perturbation. Annuler l'erreur en régime permanent est une chose, mais le faire rapidement en est une autre. Il convient donc d'être capable de régler le correcteur de manière adéquate.

2.11.1 Commande MPPT

La poursuite de point de puissance maximale (MPPT) (The maximum power point tracker) est nécessaire pour extraire le maximum de puissance du module PV. En général, un convertisseur DC/DC est place entre la PV et la charge, et en faisant varier le rapport cyclique du point de fonctionnement [24].

2.11.2 Principe de la MPPT

L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher du maximum de puissance MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du convertisseur statique(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. La figure suivante montre le schéma de principe du convertisseur MPPT reliée a un panneau photovoltaïque coté source.[29]

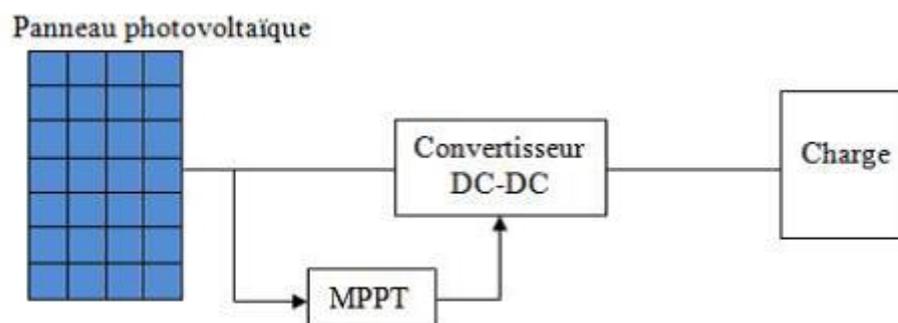


Figure II.22: Schéma de principe du convertisseur MPPT

2.11.3 Les différentes techniques d' MPPT

Dans la littérature, il existe différents types d'algorithmes effectuant la recherche du point de puissance maximale (PPM) :

- Perturbation et observation. (P&O).

- La méthode incrémentation de la conductance.

- Méthode de capacité parasite.

Dans notre travail, on se limite à la méthode de Perturbation et observation (P&O), qui est très simple à implanter, et de bon rendement.[25]

2.11.4 Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche largement répandue dans la recherche de MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque VPV et IPV respectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température .

L'avantage de cette méthode c'est qu'elle a la particularité d'avoir une structure de régulation simple, et peu de paramètre de mesure. Elle peut déduire le point de puissance maximale même lors des variations de l'éclairement et la température, pour toutes ces raisons, la méthode P&O est devenue une approche largement répandue dans la recherche du MPPT .

La figure (II.22) montre l'organigramme de l'algorithme de P&O. Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension V_{pv} et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du panneau photovoltaïque.[25].

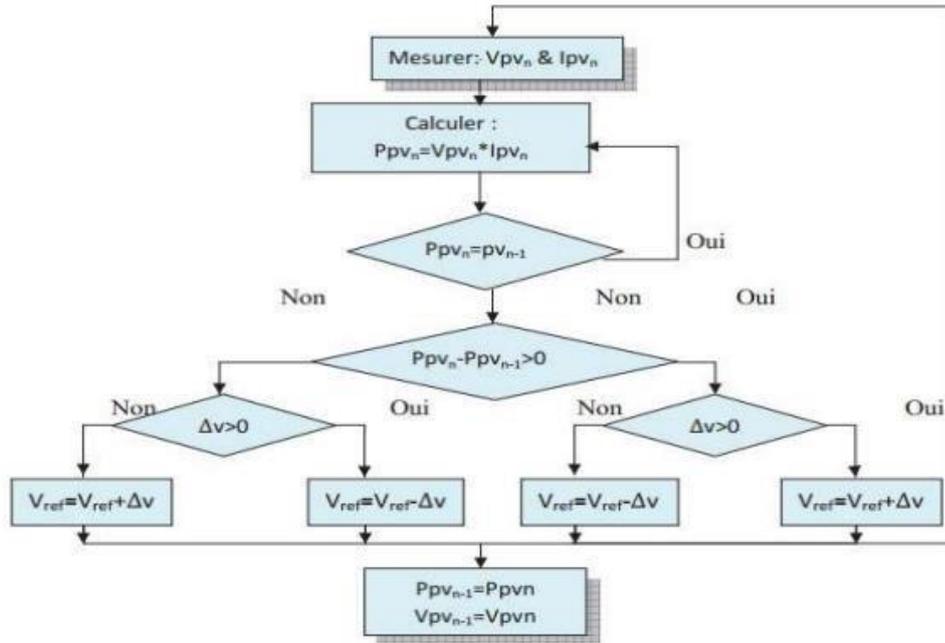


Figure II.23: Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation (P&O).

Sur la figure (II.23), on voit que si la tension de fonctionnement varie dans une direction donnée ce qui implique que la puissance augmente ($\Delta P > 0$), la variation doit alors se déplacer vers le point de fonctionnement (PPM). L'algorithme P&O continuera à observer la variation de la tension dans la même direction. Par contre, si la puissance diminue ($\Delta P < 0$), alors la variation est éloignée du point de fonctionnement du PPM.

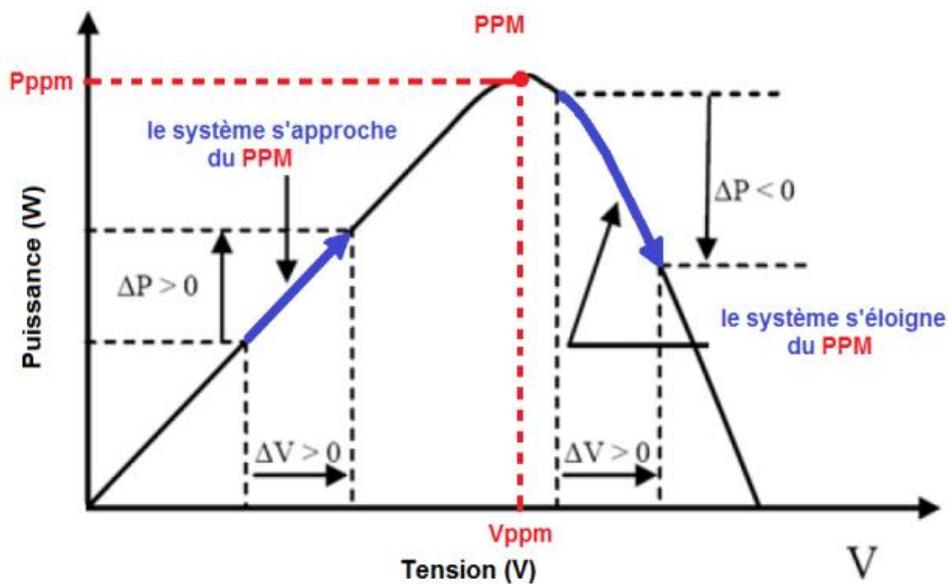


Figure II.24: Signe de P et V à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance

2.12 Les filtres

Les onduleurs en tant qu'appareils de commutation ne peuvent pas être directement connectés au réseau. C'est parce que le l'onduleur produit des harmoniques qui dégradent la qualité de l'énergie. Il existe différentes normes place qui limitent les harmoniques pouvant être injectées dans le réseau. Un transformateur peut être utilisé pour connecter le système au réseau [25]. Les enroulements du transformateur servent d'inductance qui réduit les harmoniques présentes dans l'onde de courant. Les transformateurs sont cher et encombrant, ce qui rend le système coûteux. Par conséquent un sans transformateur la topologie pour connecter l'onduleur au réseau a vu le jour, et c'est en utilisant un circuit de filtrage comme interface. Il existe trois types de filtres passifs qui sont généralement utilisés, ils sont L, LC et LCL. Ces filtres sont illustrés à la figure (II.24).

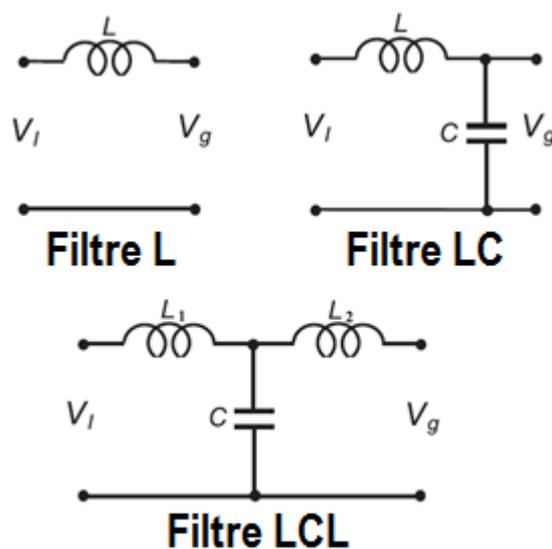


Figure II.25: Topologies des filtres.

II.13 Topologie de filtre

Le filtre de sortie de l'onduleur réduit les harmoniques, Il existe plusieurs types de filtres. La topologie la plus simple c'est le filtre inductif (Filtre L) connecté à la sortie de l'onduleur. Il y a des autres topologies comme le LC ou LCL peuvent être utilisées [30]

2.13.1 Filtre L

Le filtre L est le filtre de premier ordre avec une atténuation de 20 dB/décade sur toute la gamme de fréquences. Par conséquent, l'application de ce type de filtre convient aux convertisseurs à fréquence de commutation élevée, où l'atténuation est succincte. De l'autre côté, l'inductance diminue considérablement la dynamique de l'ensemble du convertisseur filtre du système.

2.13.2 Filtre LC

Le filtre LC C'est deuxième ordre filtre et il a de meilleurs comportements d'amortissement que L-filtre. Cela configuration simple est facile à concevoir et fonctionne sans problème. Le filtre de second ordre fournit 12 dB par oct avec d'atténuation après la fréquence de coupure, il n'a aucun gain avant la fréquence de coupure, mais elle présente un pic à la résonance la fréquence. La fonction de transfert du filtre LC est:

2.13.3 Filtre LCL

Le filtre LCL est un de filtre passe-bas qui garantit le couplage entre les différentes sources et une bonne atténuation pour les fréquences supérieures à la fréquence de coupure pour cela il est le choix d'équation pour notre système. L'atténuation du filtre LCL Chapitre II : Les convertisseurs photovoltaïque et filtre 28 est 60 dB/décade pour les fréquences supérieures à la fréquence de coupure pour cela une fréquence de commutation de valeur inférieur peut être appliquée. Il garantit aussi un meilleur découplage entre l'impédance du réseau et les perturbations du courant à travers l'inductance du réseau. Donc c'est le filtre convenable pour notre application.[31]

2.14 Conclusion

Le but de ce chapitre est de traite la commande des différents types d'onduleurs et les filtres qu'on peut utiliser pour améliorer la forme du courant et tension, et la recherche du point de puissance maximale du convertisseur DC- DC.

Chapitre 3 Dimensionnement et simulation

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons aborder la simulation du modèle du système photovoltaïque établis dans les chapitres 1 et 2 .la simulation est effectuée sous l'environnement Matlab/Simulink qui offre la possibilité d'analyser le comportement du système sous différentes conditions.

3.2 Dimensionnement

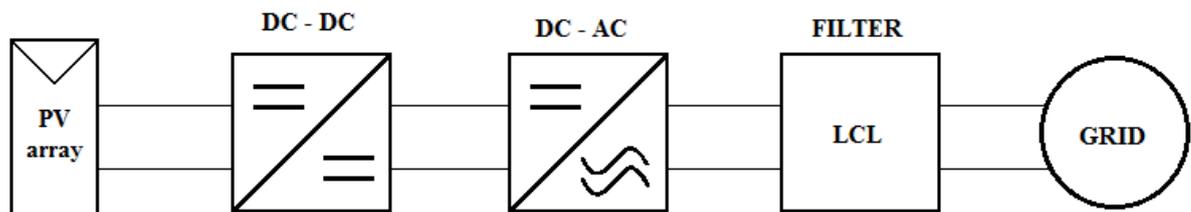


Figure III.1: Schéma synoptique du générateur photovoltaïque passe par un hacheur puis un onduleur puis un filtre LCL et connecté au réseau monophasé.

3.3 Le panneau photovoltaïque

Le bloc photovoltaïque disponible dans Simulink a été initialisé comme indiqué dans la figure suivante :

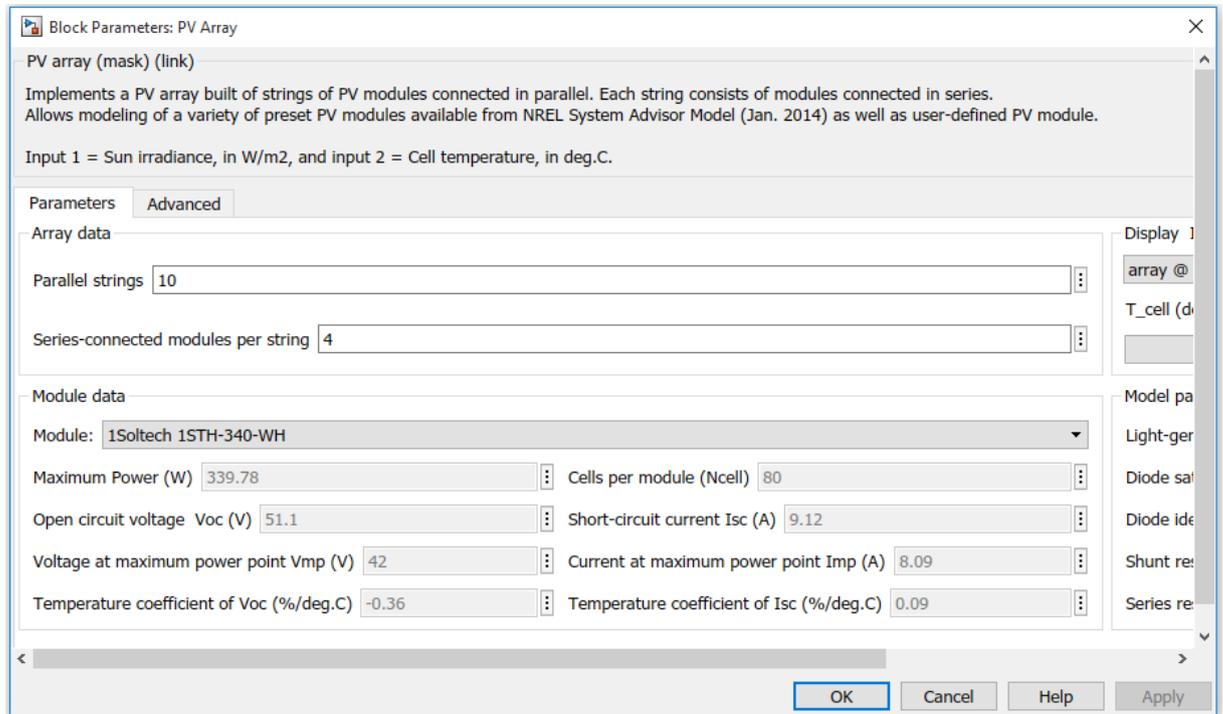


Figure III.2: Description du panneau photovoltaïque dans Simulink.

Le modèle de ce panneau solaire est SOLTECH 1STH-340-WH ce champ contient 10 branches parallèles, chaque branche contient 4 modules connecté en série, chacun produit une puissance de 339.78 W et une tension max de 42 V ainsi qu'un courant max de 8.09 A.

Pour observer l'influence des conditions externes, de l'éclairement et de la température (G , T) sur les caractéristiques ($I = f(V)$) et ($P = f(V)$) nous avons adopté la méthode suivante :

- Pour la visualisation de l'influence et de l'éclairement on fixe la température ambiante (25°C) et on fait varier l'éclairement dans une gamme suffisante.
- Pour un éclairement constant ($G=1000\text{w}/\text{m}^2$) nous ferons varier la température afin de voir l'influence de celle-ci sur caractéristiques du générateur photovoltaïque.

3.3.1 L'influence de l'éclairement sur la caractéristique ($I=f(V)$)

En faisant varier l'éclairement (G) entre ($G=100 \text{ w/m}^2$ et $G=1000 \text{ w/m}^2$) , la caractéristique ($I=f(V)$) est donnée par la figure (III.3) avec une température ($T=25^\circ\text{C}$).

D'après la figure (III.3) on remarque une forte augmentation du courant de court-circuit et une faible augmentation de la tension du circuit ouvert avec la diminution de l'éclairement (G). Ce qui montre que le courant de court circuit de la cellule dépend de l'éclairement.

3.3.2 L'influence de l'éclairement sur la caractéristique ($P = f(V)$)

En faisant varier l'éclairement (G) entre ($G=100\text{w/m}^2$ et $G=1000\text{w/m}^2$) , la caractéristique ($P = f(V)$) est donnée par la figure (III.3), avec une température ($T=25^\circ\text{C}$). On remarque d'après la figure (III.3) que la variation de l'éclairement influe sur la puissance du générateur photovoltaïque, plus l'éclairement augmente plus la puissance augmente.

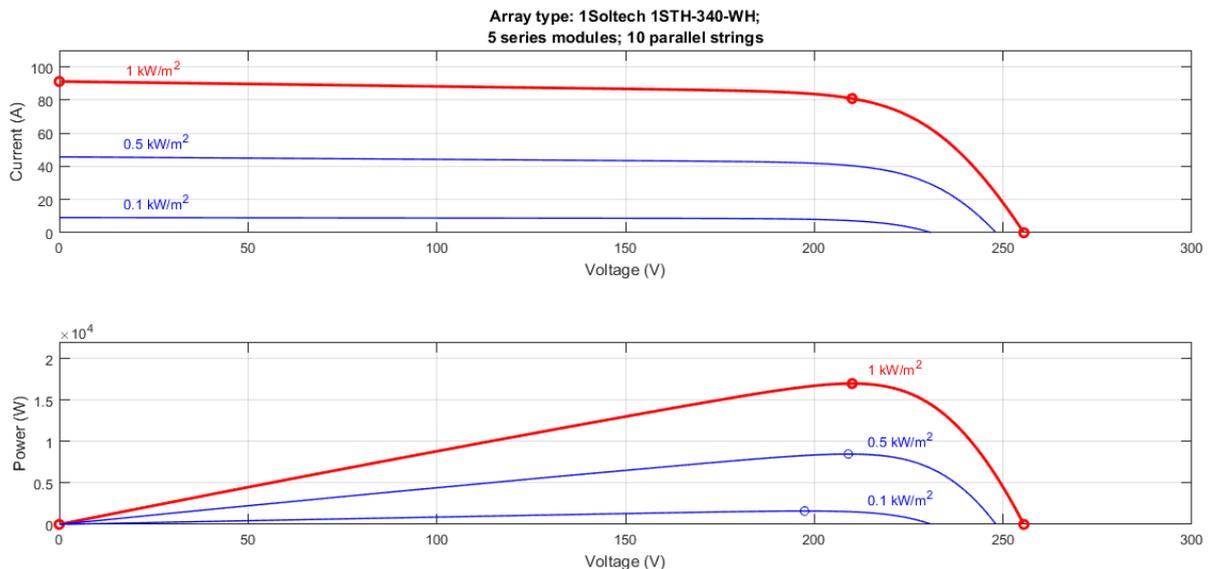


Figure III.3: Panneaux photovoltaïque à différents éclairements avec température de 25 °C.

3.3.3 L'influence de la température sur la caractéristique ($I = f(V)$)

En faisant varier la température (T) entre (25°C , 45°C) , l'influence de celle-ci sur la caractéristique ($I=f(V)$) est donnée par la figure (III.4) pour un éclairement ($G=1000\text{w/m}^2$). On constate d'après la figure (III.4) que la tension à vide d'un module photovoltaïque diminue avec l'augmentation de la température du module PV. Le courant de court-circuit par contre augmente légèrement avec la température du module PV.

3.3.4 L'influence de la température sur la caractéristique ($P = f(V)$)

En faisant varier la température (T) entre (25°C , 45°C) avec un pas de (25°C), l'influence de celle-ci sur la caractéristique la caractéristique ($PP_v = f(V_{P_v})$) est donnée par la figure (III.4) pour un éclairement ($G=1000\text{w}/\text{m}^2$).

On peut remarquer sur la figure (III.4) que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.

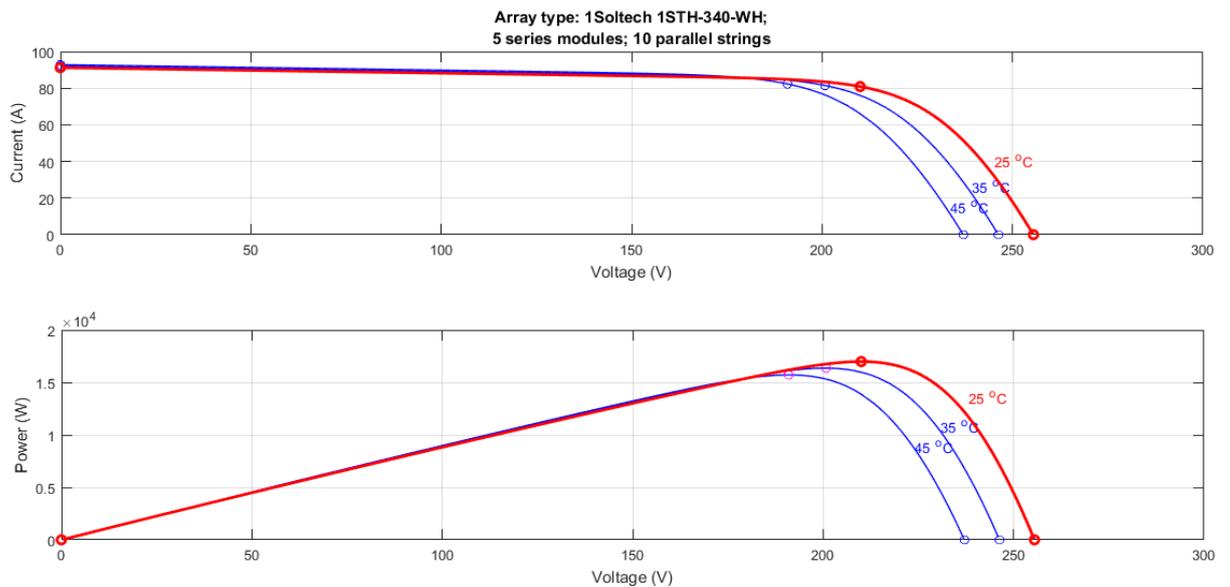


Figure III.4: Panneaux photovoltaïques à différentes températures avec éclairement de $1000\text{ W}/\text{m}^2$.

3.3.5 L'éclairement

Dans cette expérience on va utiliser un éclairement variable pour simuler le cas réelle de l'effet d'éclairement sur la variation du courant et la tension de sortie, et pour cette raison on a choisit un bloc d'éclairement où on peut modifier l'éclairement en fonction du temps.

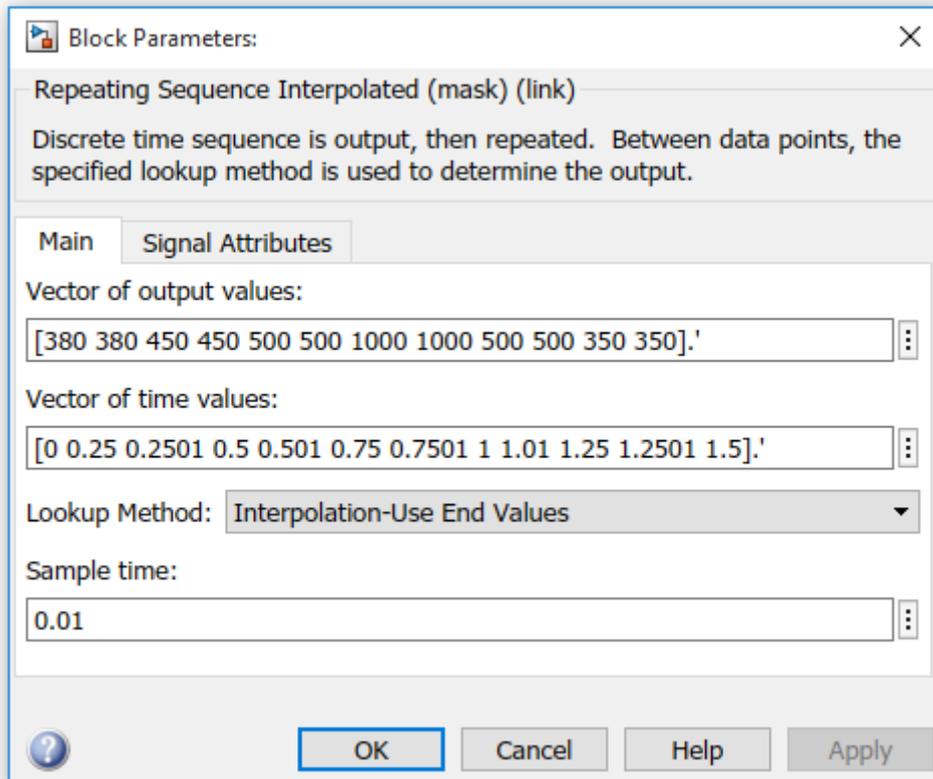


Figure III.5: Bloc d'éclairéement variable en fonction du temps.

Le paramétrage de ce block est comme suite :

- De **0s** jusqu'à **0.25s** la valeur d'éclairéement est de **380 W/m²**.
- De **0.25s** jusqu'à **0.5s** la valeur d'éclairéement est de **450 W/m²**.
- De **0.5s** jusqu'à **0.75s** la valeur d'éclairéement est de **500 W/m²**.
- De **0.75s** jusqu'à **1s** la valeur d'éclairéement est de **1000 W/m²**.
- De **1s** jusqu'à **1.25s** la valeur d'éclairéement est de **500 W/m²**.
- De **1.25s** jusqu'à **1.5s** la valeur d'éclairéement est de **380 W/m²**.

3.4 Condensateur de découplage

Le découplage concerne les alimentations à laide d'un condensateur on les branche à leurs bornes pour diminuer l'impédance interne des sources. très souvent, ils sont doublés (un chimique et un non chimique), pour couvrir une large bande d'effet du découplage.

3.5 Résultat de simulation du système photovoltaïque avec un hacheur survolteur (BOOST)

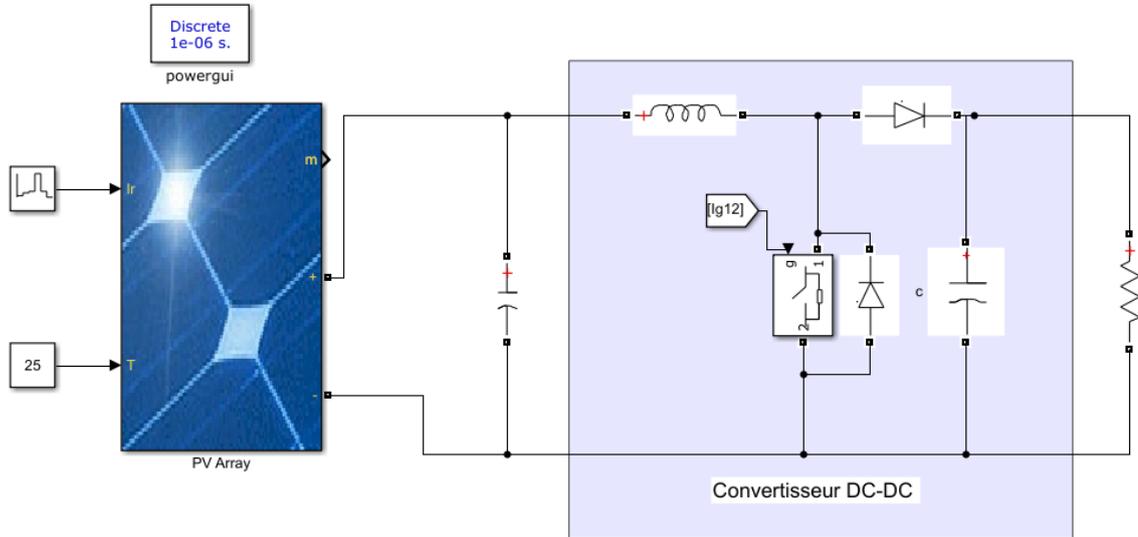


Figure III.6: le system photovoltaïque connecté a un hacheur.

3.5.1 Dimensionnement de l'hacheur survolteur (boost)

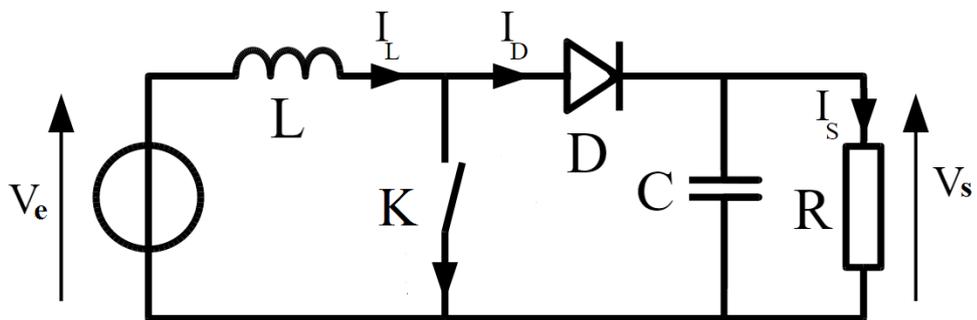


Figure III.7: hacheur survolteur .

Le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur K (voir figure III.7)

a Une phase d'accumulation d'énergie

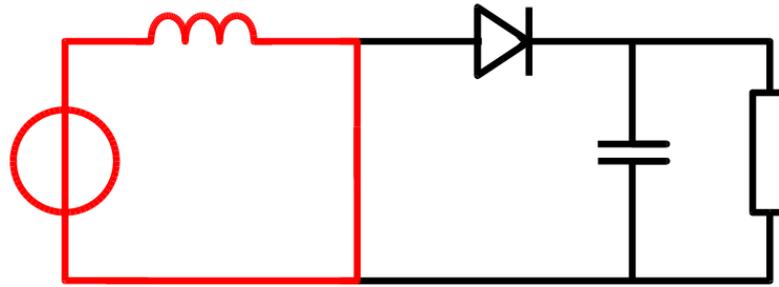


Figure III.8: hacheur survolteur dans la phase d'accumulation d'énergie.

Lorsque l'interrupteur K (voir figure III.8) est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation.

b Lorsque l'interrupteur est ouvert

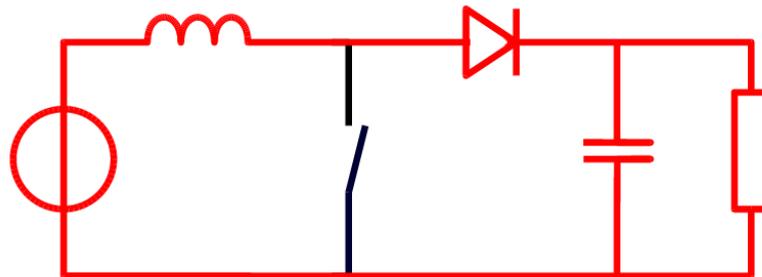


Figure III.9: hacheur survolteur dans la phase d'ouverture de l'interrupteur.

L'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.e.m s'additionne à celle du générateur (effet survolteur) figure III.9. Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode D, le condensateur C et la charge R. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité.

La valeur du rapport cyclique :

$$\alpha = 1 - \frac{Vs}{Ve} = 1 - \frac{200}{400} = 0.5 \quad \alpha = 0,5 \quad (\text{III.1})$$

La valeur d'inductance :

$$L = \frac{\alpha \times Ve}{F \times \Delta I} = \frac{0.5 \times 200}{10000 \times 20} = 5 \cdot 10^{-4} = 50\text{mH} \quad (\text{III.2})$$

avec F : fréquence de commutation

La valeur du condensateur :

$$C = 1 + \frac{Is \times \alpha T}{\Delta Vs} = \frac{14 \times 0,5 \times 1 \cdot 10^{-4}}{0,14} = 5 \cdot 10^{-3} = 5\text{mF} \quad (\text{III.3})$$

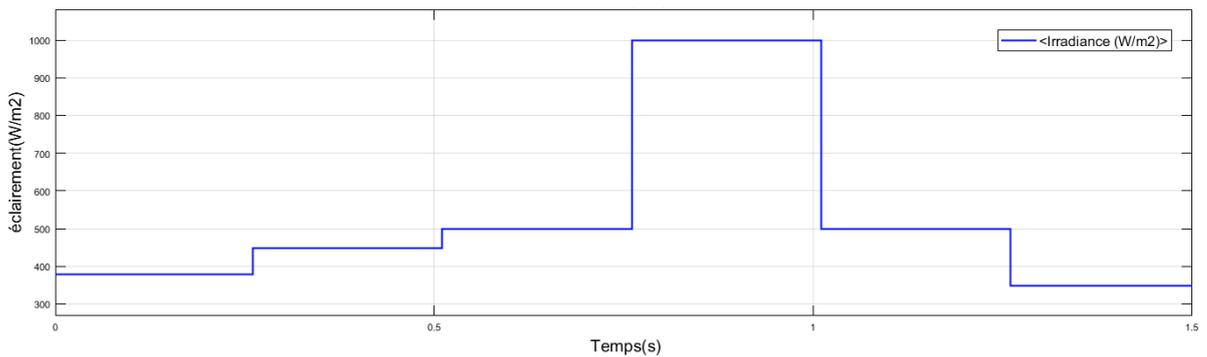


Figure III.10: L'éclairement variable.

Selon la figure (III.10) l'intensité d'éclairement est variable entre 380W/m² et 1000W/m² .

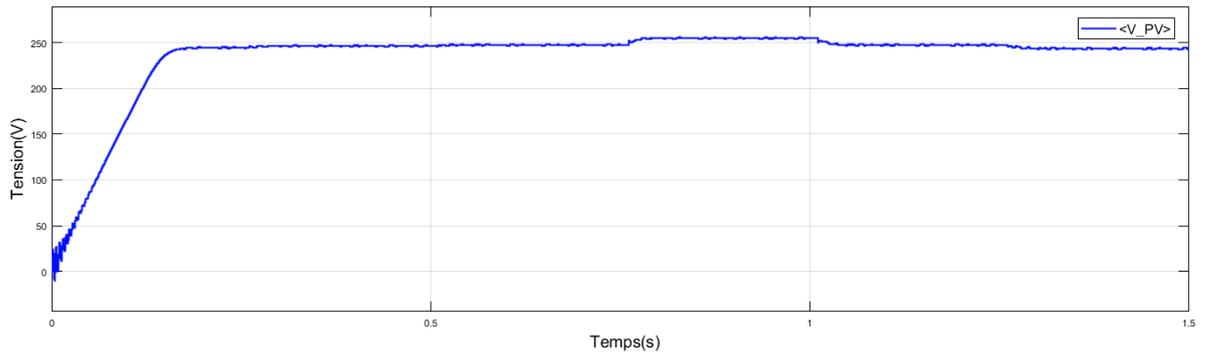


Figure III.11: la tension continu du panneau photovoltaïque.

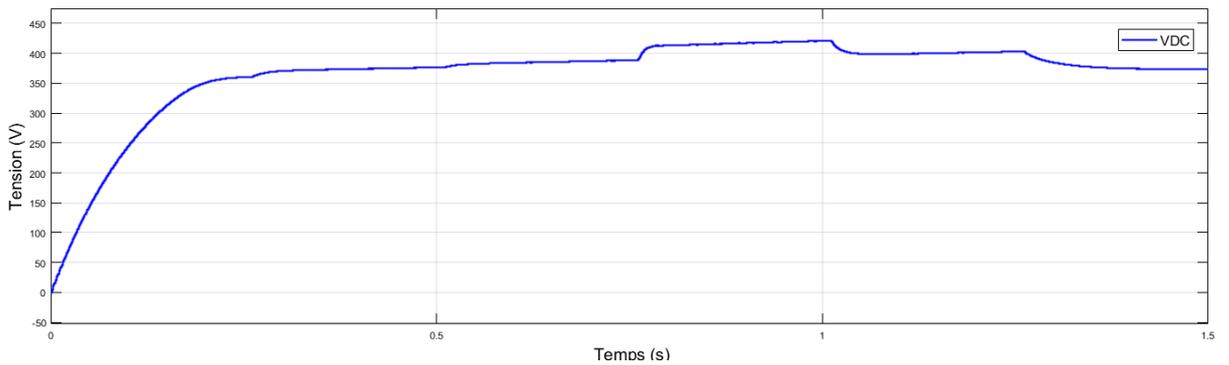


Figure III.12: la tension continue a la sortie du hacheur.

D'après la figure (III.11) et (III.12) on remarque que la tension de sortie du générateur photovoltaïque est plus faible par-rapport à la tension de sortie du hacheur. On remarque aussi que la tension du panneau photovoltaïque augmente jusqu'à elle prend la valeur **200V** et elle reste stable a cette valeur, le hacheur à augmenté cette tension jusqu'à **400V**.

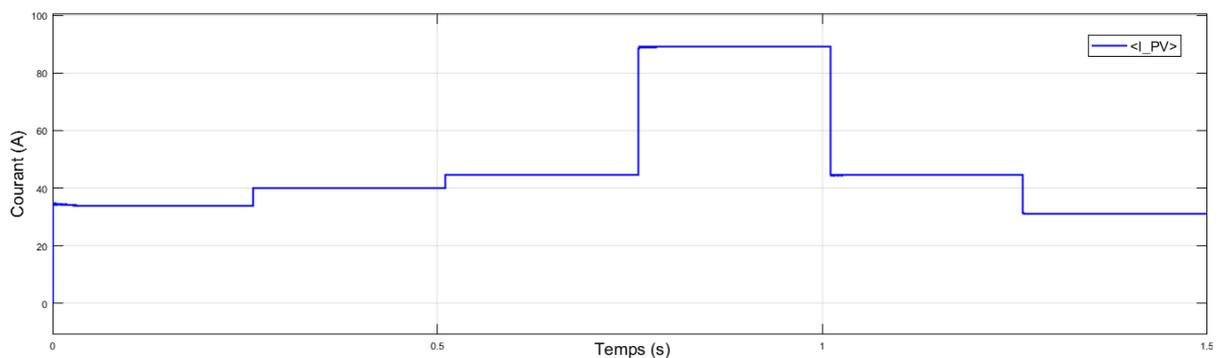


Figure III.13: le courant continu du panneau photovoltaïque.

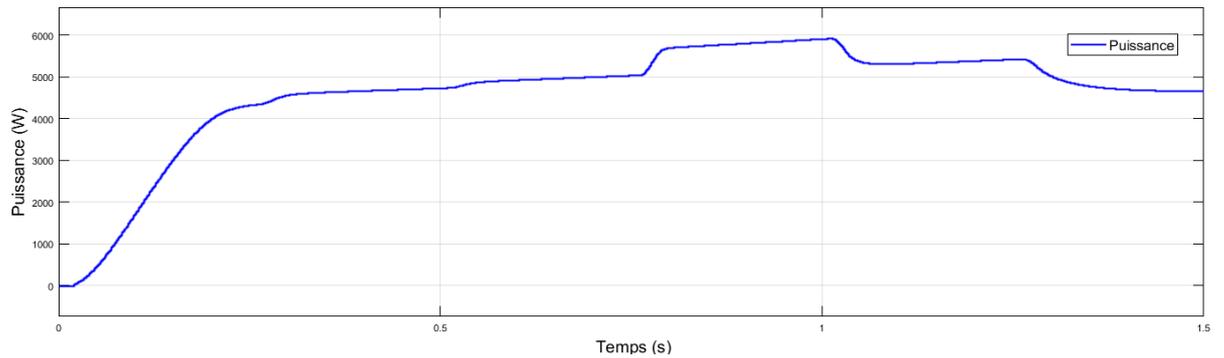


Figure III.14: la puissance a la sortie du hacheur.

Dans la figure (III.14) on remarque que le générateur photovoltaïque fonctionne en puissance maximale, sa valeur est de **5000** jusqu'à **6000W**.

3.6 Résultat de simulation du system PV avec onduleur :

On effectue la simulation du système PV connecté directement à une charge sans l'intervention du filtre et sans régulateur.

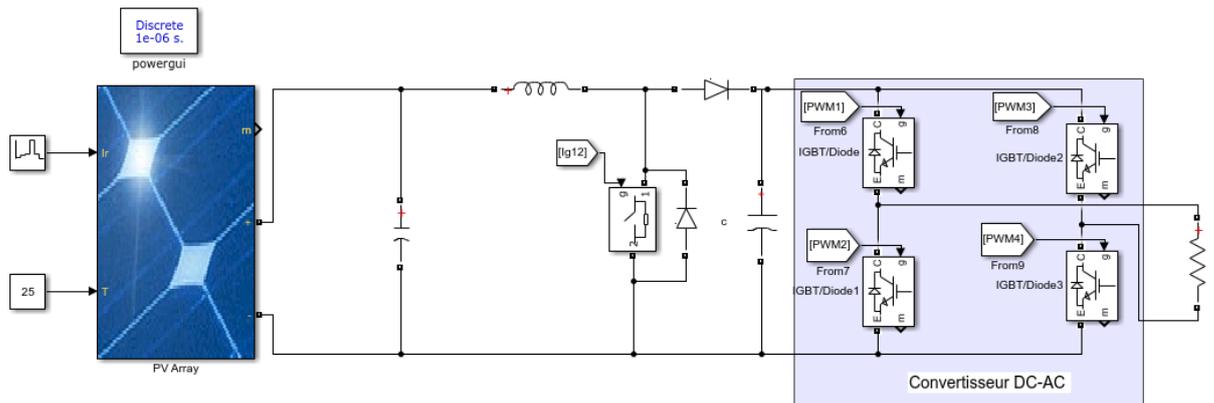


Figure III.15: le système photovoltaïque connecté à un onduleur monophasé.

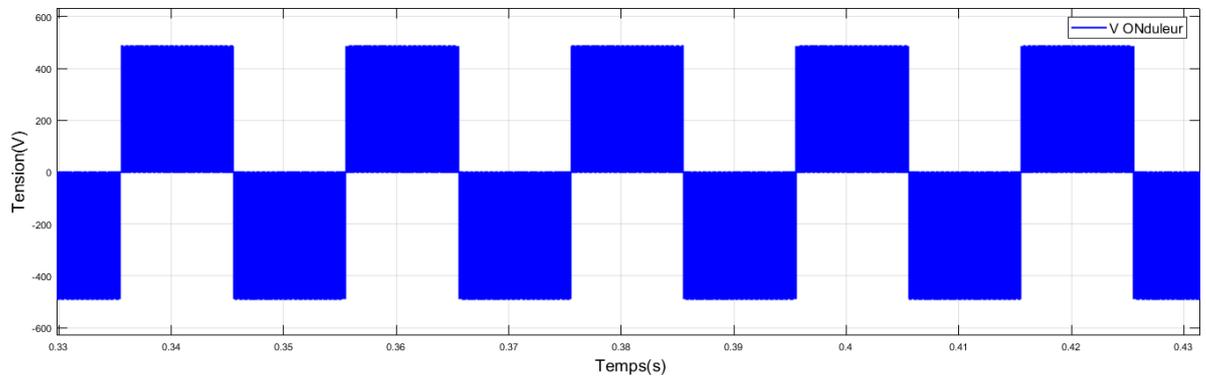


Figure III.16: la tension à la sortie d'onduleur.

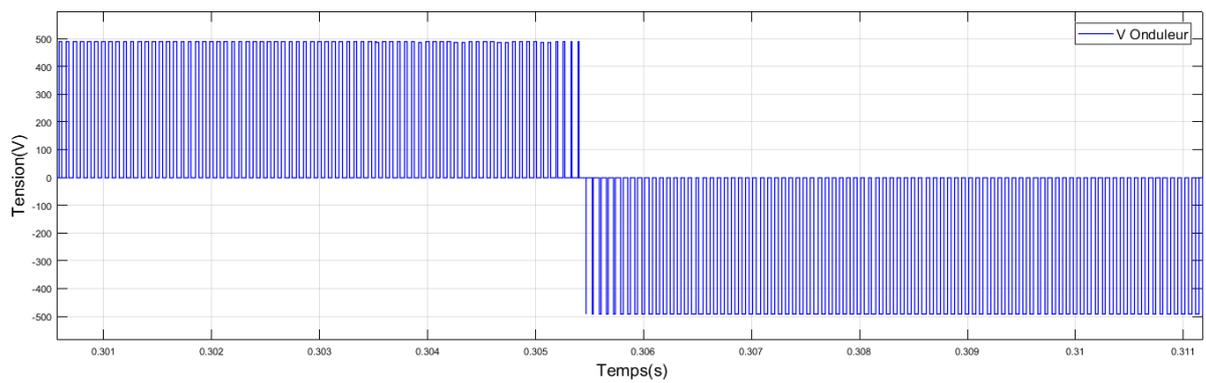


Figure III.17: zoom sur la tension à la sortie d'onduleur.

D'après les figures **(III.16)** et **(III.17)**, on remarque que la tension de sortie d'onduleur est alternatif carré, on doit ajouter une inductance et un condensateur pour que la tension prenne la forme sinusoïdale.

3.7 Le paramétrage du régulateur PI

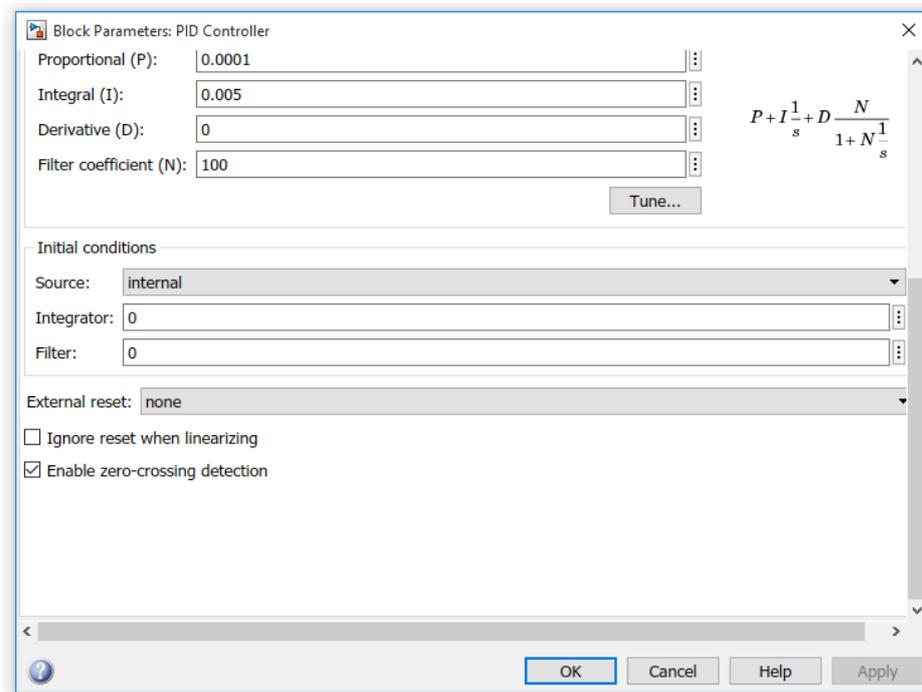
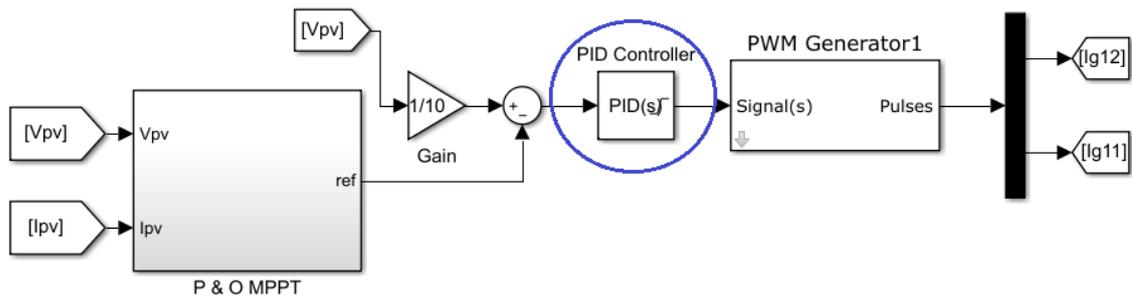


Figure III.18: le régulateur PI et son paramétrage.

La fonction de transfert de ce régulateur est :

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Le choix des valeurs K_p et K_i sont faites d'une façon automatique à l'aide de la fonction de réglage Tune .

3.8 Résultat de simulation du system PV avec inductance et condensateur

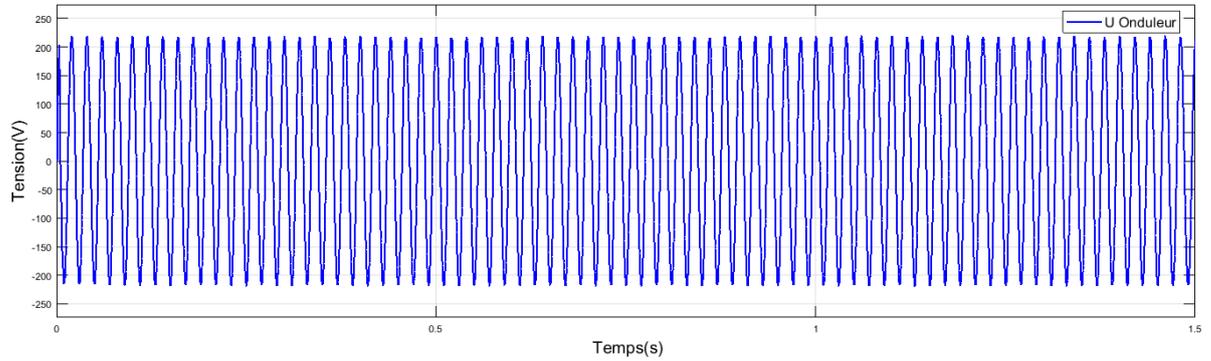


Figure III.19: la tension alternative aux bornes de la charge.

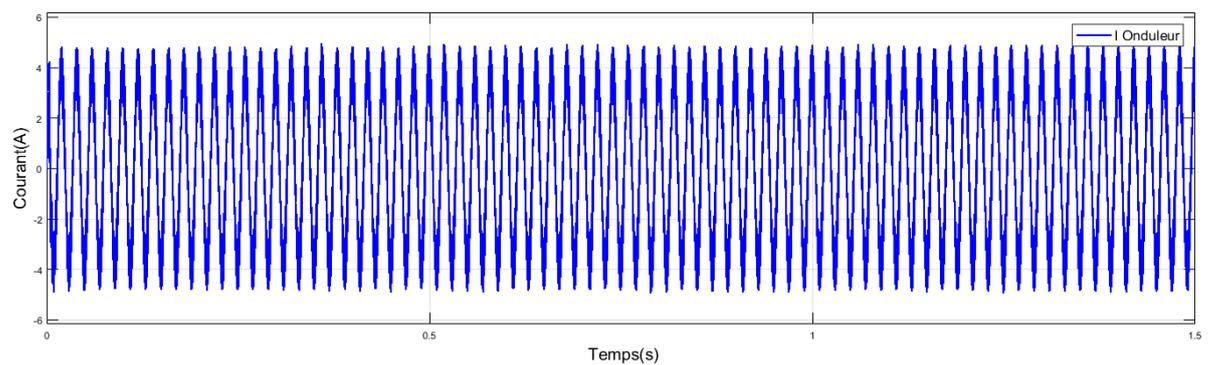


Figure III.20: le courant alternatif aux bornes de la charge.

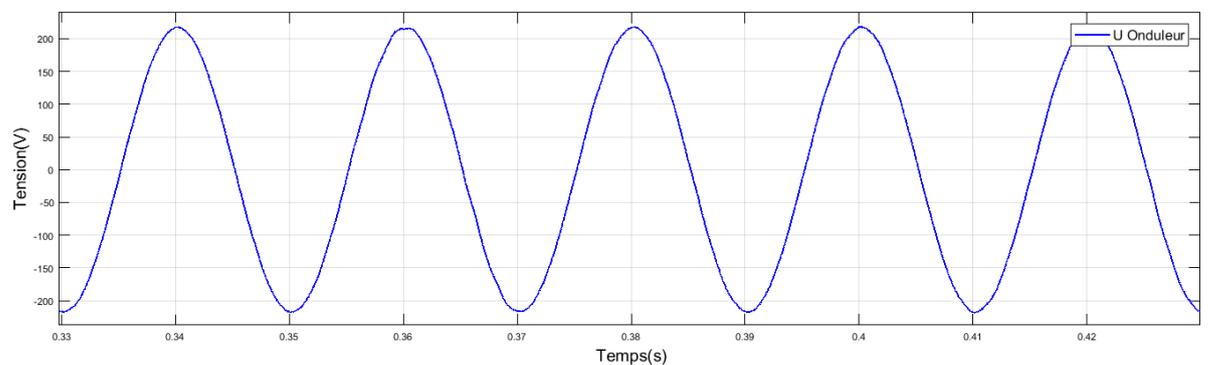


Figure III.21: zoom sur la tension alternative aux bornes de la charge.

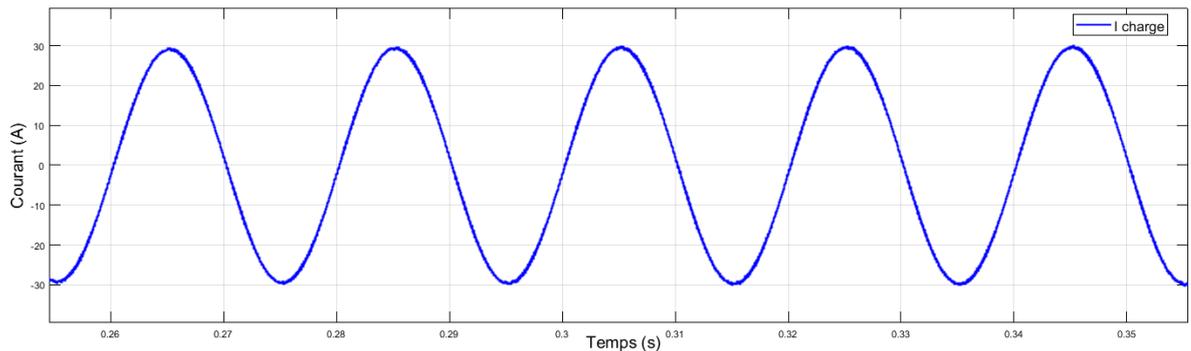


Figure III.22: zoom sur le courant alternatif au bornes de la charge.

D'après la figure (III.19), on remarque que la tension de sortie d'onduleur aux bornes de la charge est alternatif et fixe a laide du régulateur PI, cette tension prend la valeur de **220V** au cours du temps quelque soit l'éclairement.

D'après la figure (III.20), on remarque que le courant de sortie d'onduleur aux bornes de la charge est alternatif et fixe a laide du régulateur PI, ce courant prend la valeur de **5A** au cours du temps quelque soit l'éclairement.

D'après la figure (III.21), on remarque que la tension de sortie d'onduleur aux bornes de la charge est de forme sinusoïdale sans harmoniques et sans perturbation.

D'après la figure (III.22), on remarque que le courant de sortie d'onduleur aux bornes de la charge est de forme sinusoïdale mais il contient des harmoniques indésirables.

3.9 Résultat de simulation du system PV avec filtre LCL :

Le filtre LCL est un filtre individuel pour les convertisseurs, il est utilisé dans cette simulation pour réduire le niveau des harmoniques produit par l'onduleur à cause des composants de commutation qui peut générer des perturbations d'harmonique importantes avec tendance a réduire la qualité d'énergie.

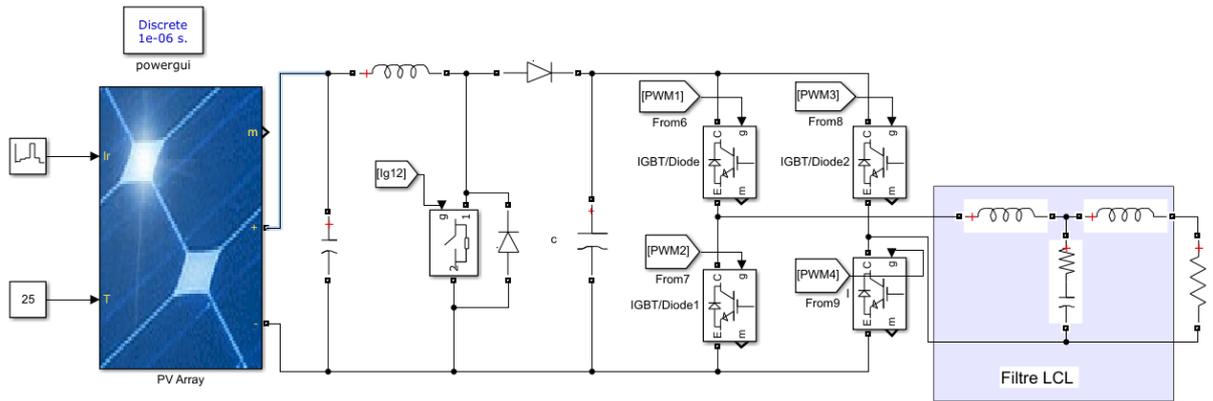


Figure III.23: le système photovoltaïque avec un filtre LCL.

3.9.1 Dimensionnement du filtre LCL

Le filtre LCL est utilisé pour interconnecter l'onduleur au réseau. Comme l'onduleur est basé sur des composants de commutations et des signaux de déclenchement sous forme d'impulsions, Le courant de sortie peut contenir des perturbations d'harmoniques importantes avec tendance à réduire la qualité de l'énergie.

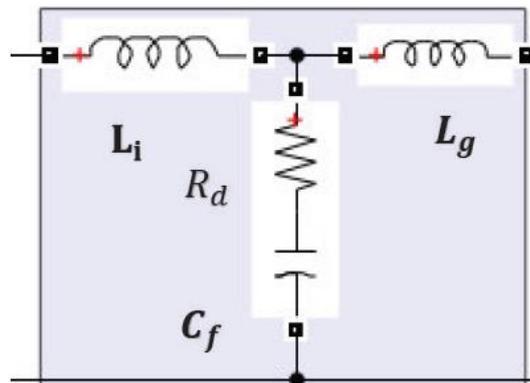


Figure III.24 : Schéma de filtre LCL avec la résistance d'amortissement.

La première étape du calcul des composants du filtre est la conception de l'inductance côté onduleur L_i , qui peut limiter l'ondulation du courant de sortie jusqu'à 10% de l'amplitude nominale :

$$L_i = \frac{V_{dc}}{8 \Delta I_{max} f_s} \quad (III.4)$$

ou ΔI_{max} est l'ondulation actuelle de 10% spécifiée.

$$\Delta I_{max} = 0.1 \frac{\sqrt{2} P_n}{V_r} \quad (III.5)$$

L'inductance du côté réseau L_g , est déterminée par la valeur acceptable d'ondulation de commutation dans le réseau [29] :

$$r = \frac{L_i}{L_g} \quad (III.6)$$

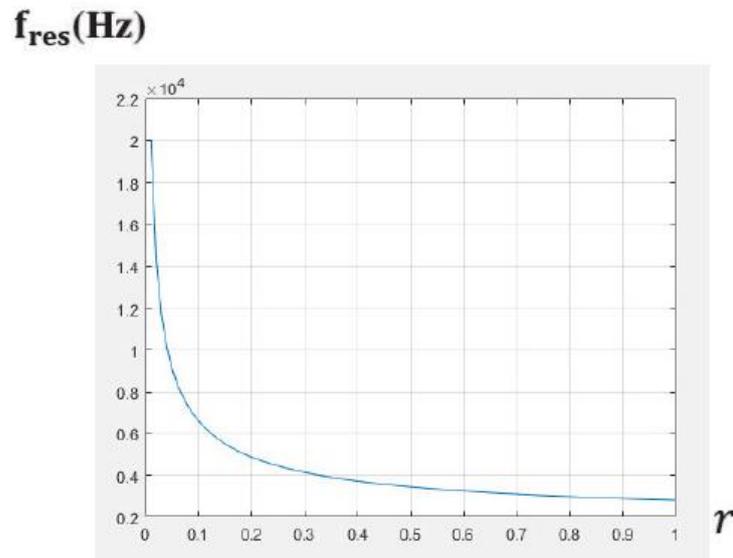


Figure III.25 : Fréquence de résonance du filtre en fonction de rapport de l'inductance.

La conception de la capacité de filtrage découle du fait que la variation maximale du facteur de puissance acceptable par le réseau est de 5%. La capacité du filtre peut donc être calculée comme une multiplication de la capacité de base du système C_b

$$C_f = 0.05 \times C_b \quad (III.7)$$

La capacité de base C_b se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$C_b = \frac{P_n}{\omega_n V r^2} \quad (III.8)$$

La dernière étape de la conception est le contrôle de la fréquence de résonance du filtre.

La fréquence de résonance doit être éloignée de la fréquence du réseau et doit être au minimum égal à la moitié de la fréquence de commutation, car le filtre doit avoir une atténuation suffisante de la fréquence de découpage du convertisseur.

La fréquence de résonance du filtre LCL peut être calculée comme suit :

$$f_{res} = \sqrt{\frac{L_i + L_g}{L_i L_g C_f}} \quad (III.9)$$

La plage de fréquences de résonance du filtre LCL doit satisfaire à la condition de l'équation (III.8)

$$10f_r \leq f_{res} \leq f_s \quad (III.10)$$

Afin de réduire les oscillations et les états instables du filtre, il convient d'ajouter le condensateur avec une résistance connectée en série. Cette solution est parfois appelée « amortissement passif ». C'est simple et fiable, mais l'inconvénient c'est elle va augmenter les pertes de chaleur dans le système et cela diminue considérablement l'efficacité du filtre.

La valeur de la résistance d'amortissement peut être calculée comme suit :

$$R_d = 0.1 \frac{1}{3W_{res} C_f} \quad (III.11)$$

Avec :

P_n la puissance nominale (la puissance de sortie de l'onduleur) 6 KW

V_r la tension efficace monophasée du réseau 220V

f_s la fréquence de commutation du l'onduleur 40 KHz

f_r la fréquence de réseau 50Hz

ω_n la Pulsation de réseau 314.2 rad/s

V_{dc} la source de tension continue (la tension d'entrée de l'onduleur) 400 V

Après les calculs nous obtenons les résultats suivants:

$\Delta I_{max}=1.5072$ A $L_i=0.85$ Mh $C_b=394.5\mu F$ $C_f=19.71\mu F$ $L_g=0.265$ mH $f_{res}=4.04$ KHz

$R_d=0.42$ Ω

3.9.2 Réponse fréquentielle du filtre LCL

L'expression de la fonction de transfert du Filtre LCL est donnée par la relation :

$$H_{lcl} = \frac{I_r}{V_i} \quad (III.12)$$

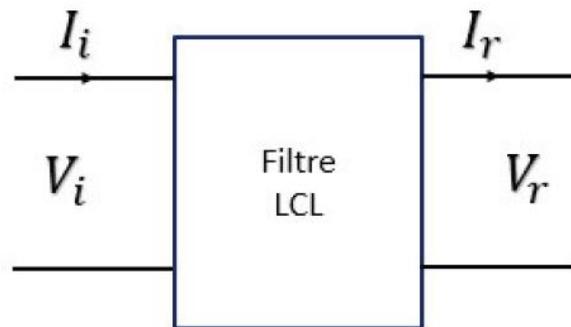


Figure III.26 : Modèle en quadripôle du filtre LC

Avec : V_i est la tension de sortie de l'onduleur.

I_r : Le courant de réseau.

Où la tension de réseau est supposée être une tension idéale source capable de décharger toutes les fréquences harmoniques. Si on définit $V_r = 0$. Conditions pour les onduleurs à commande de courant, La fonction de transfert du filtre LCL (en négligeant la résistance d'amortissement) est :

$$H_{lcl}(S) = \frac{1}{Li Lg Cf S^3 + (Li+Lg)S} \quad (III.13)$$

Et avec quelques manipulations algébriques simples, la fonction de transfert avec la résistance d'amortissement devient [26]:

$$H_{lcl}(S) = \frac{Cf RdS+1}{Li Lg Cf S^3 + Cf(Li+Lg)RdS^2 + (Li+Lg)S} \quad (III.14)$$

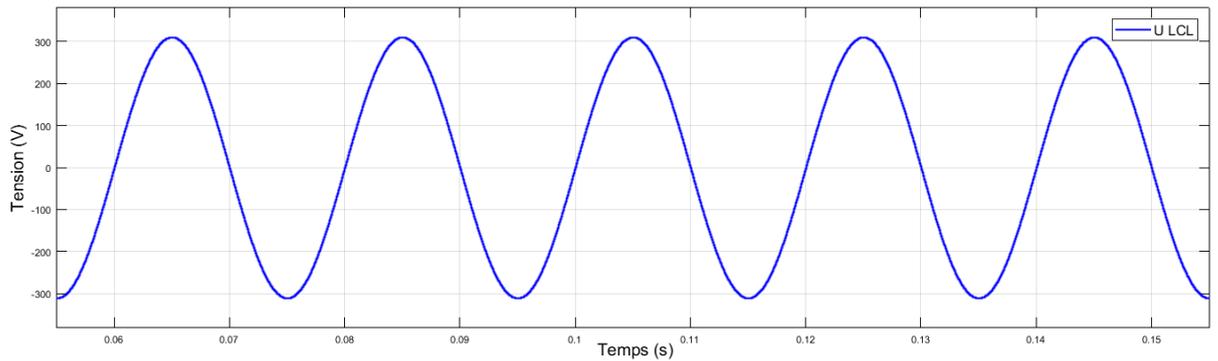


Figure III.27: la tension alternatif à la sortie du filtre.

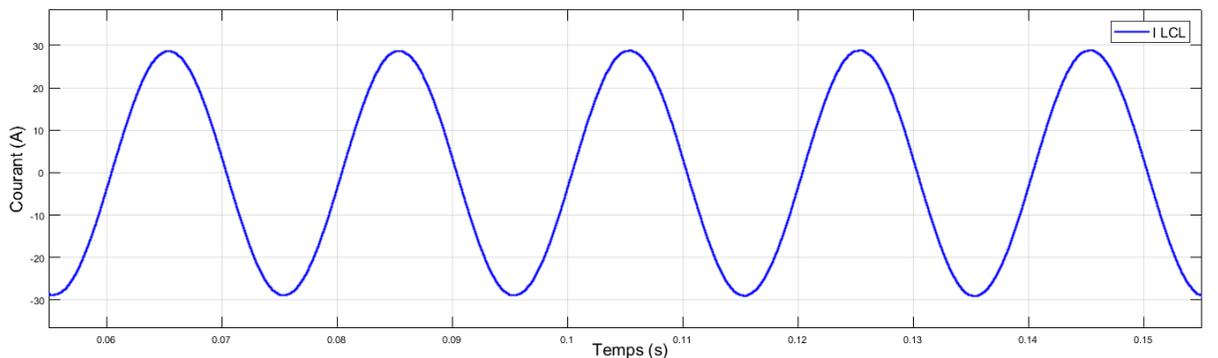


Figure III.28: le courant alternatif à la sortie du filtre.

D'après la figure (III.27), on remarque que la tension de sortie du filtre est alternatif et fixe sans harmoniques a laide du filtre LCL qu'on a ajouté.

D'après la figure (III.28), on remarque que le courant de sortie du filtre est alternatif et fixe sans harmoniques et sans perturbation il prend la valeur de consigne 30A l'aide du régulateur du courant qu'on à ajouté figure (III.26).

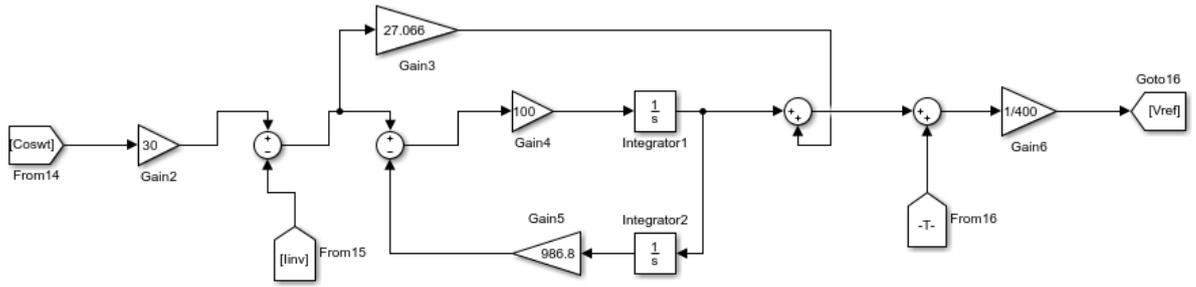


Figure III.29: Régulateur du courant.

3.10 Résultat de simulation du system PV raccordé au réseau

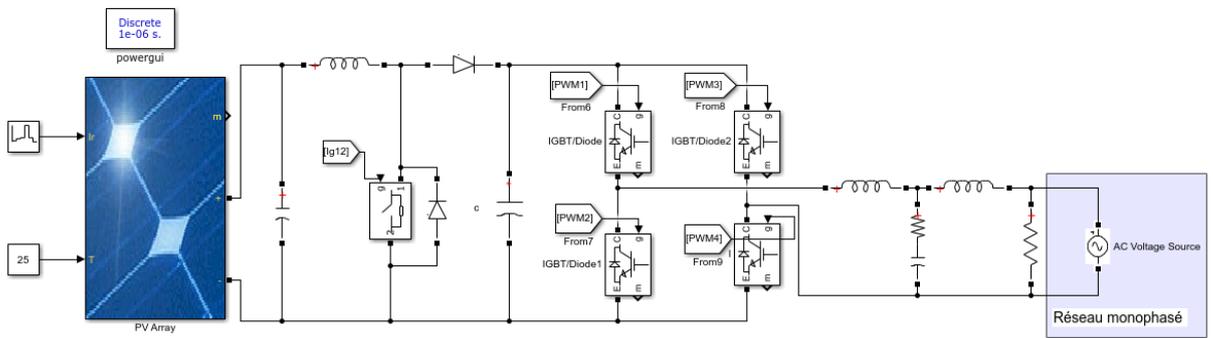


Figure III.30: le système photovoltaïque raccordé au réseau monophasé.

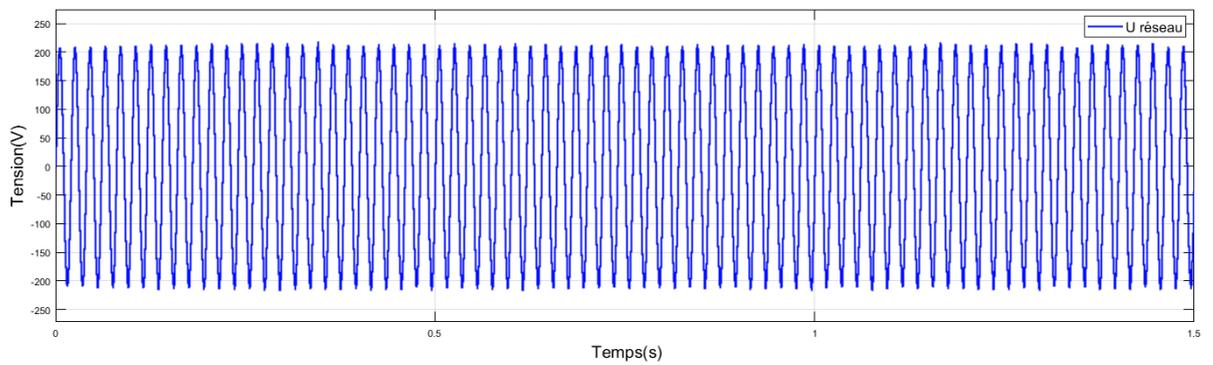


Figure III.31: la tension du réseau.

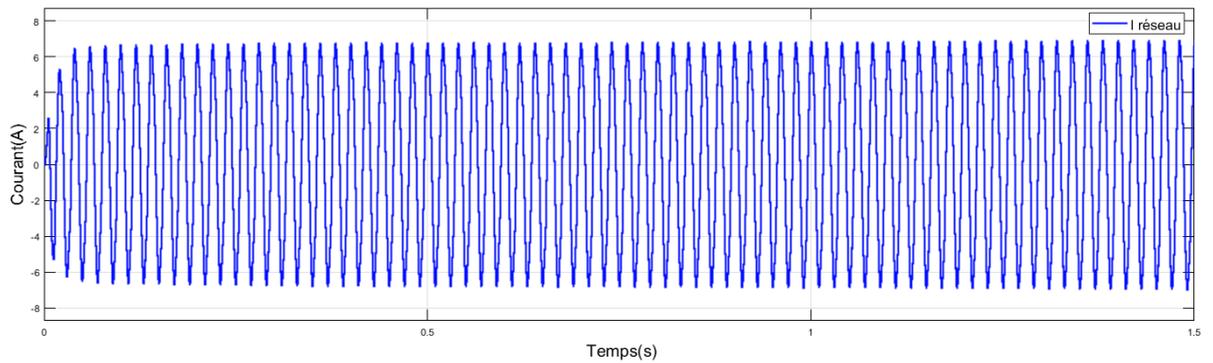


Figure III.32: le courant du réseau.

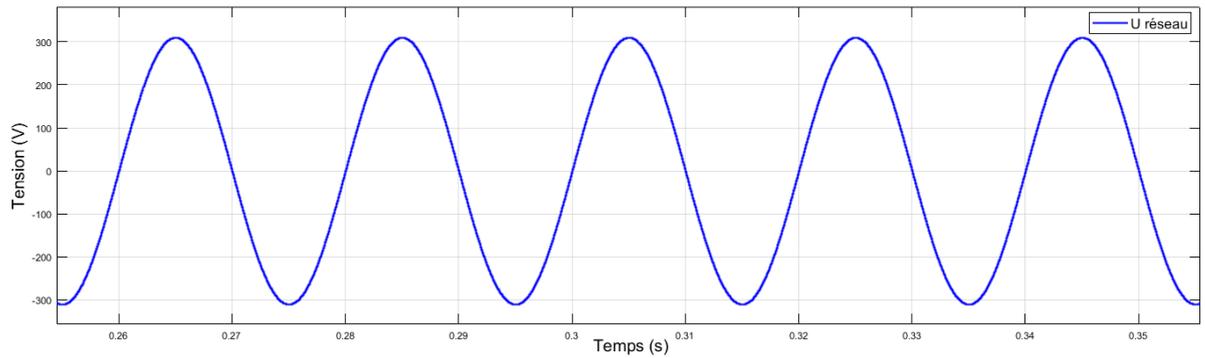


Figure III.33: zoom sur la tension du réseau sans PLL.

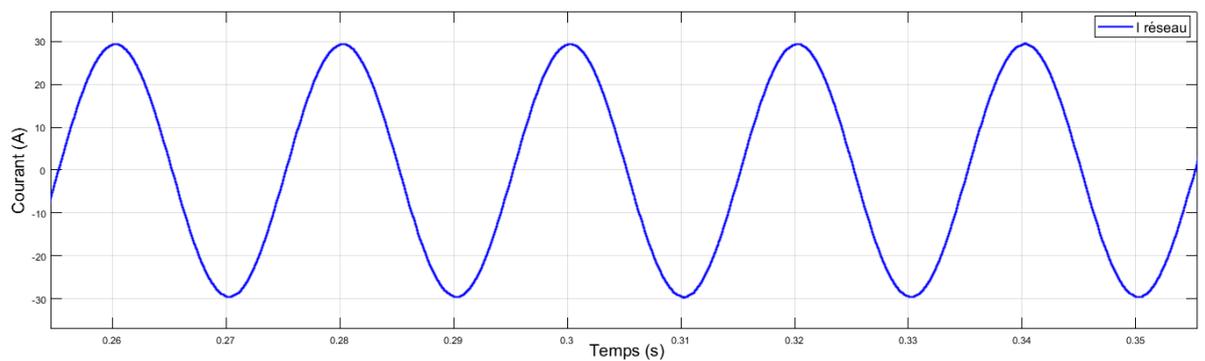


Figure III.34: zoom sur le courant du réseau sans PLL.

D'après la figure (III.31) et la figure (III.32), on remarque que la tension et le courant du réseau sont fixe et d'une forme sinusoïdale sans harmoniques.

D'après la figure (III.33) et la figure (III.34), on remarque que le courant du réseau n'est pas synchroniser avec la tension, quand l'amplitude de la tension est positive l'amplitude du courant est négative, et vis versa.

3.11 Résultat de simulation du system PV avec la boucle à verrouillage de phase PLL :

On utilise la boucle a verrouillage électrique pour synchroniser la tension et le courant du réseau électrique

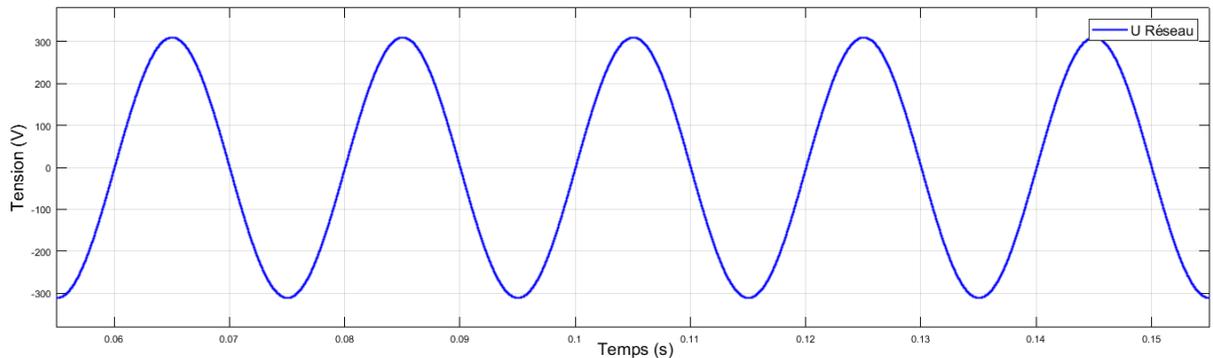


Figure III.35: zoom sur la tension du réseau avec PLL.

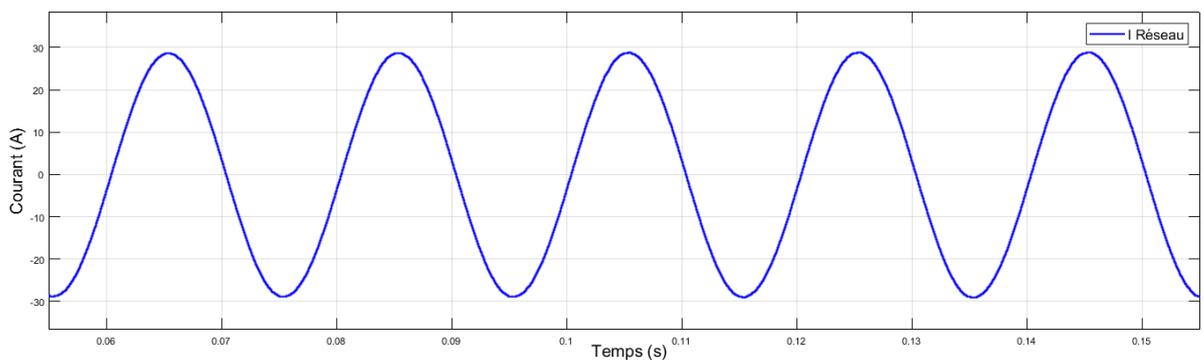


Figure III.36: zoom sur le courant du réseau avec PLL.

D'après la figure (III.35) et la figure (III.36), on remarque que la tension et le courant du réseau sont fixe et d'une forme sinusoïdale sans harmoniques tel que la valeur de la tension est **310V** et la valeur du courant est **30A**.

D'après la figure (III.37) , on remarque que la tension et le courant du réseau sont synchronisée a laide du PLL avec une fréquence de **50Hz**.

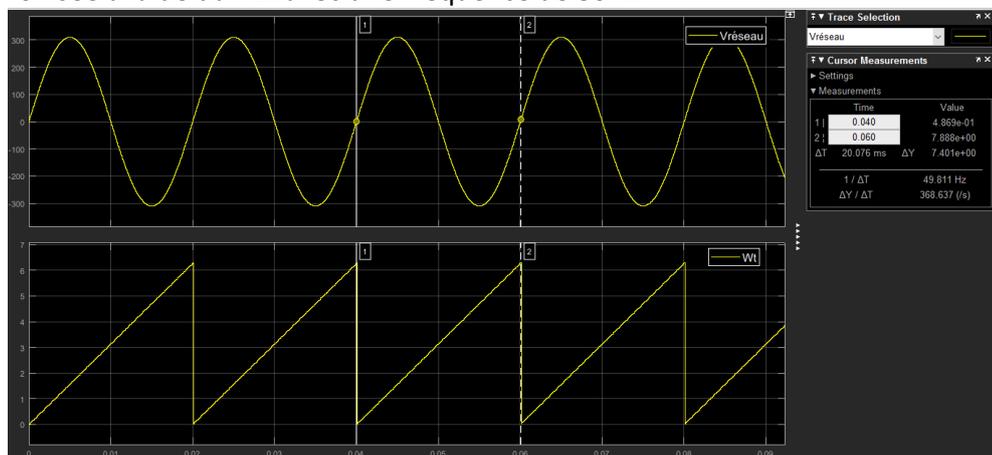


Figure III.37: Simulation de la Boucle à verrouillage de phase PLL.

D'après cette figure on remarque que la tension de l'onduleur + filtre est bien synchronisé avec la tension de réseau.

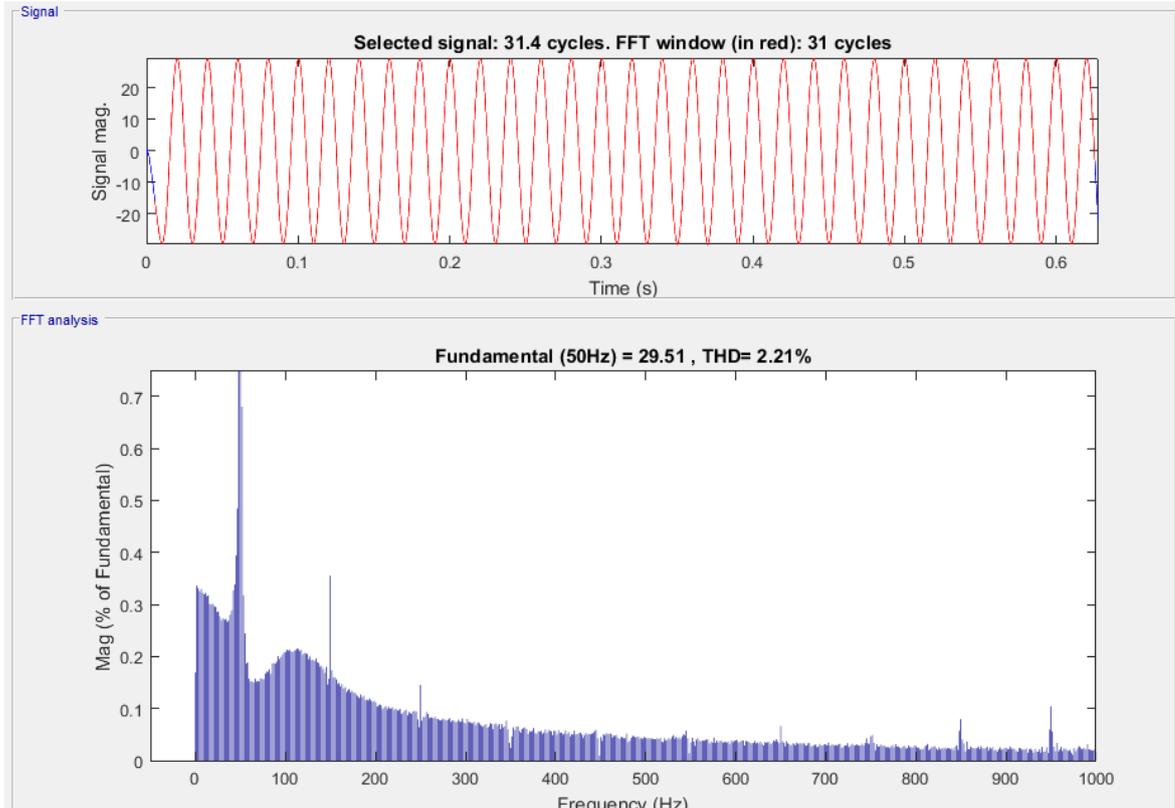


Figure III.38: analyse spectrale du courant de réseau.

On remarque d'après la figure (III.36) l'influence du filtre sur l'amélioration de la tension et du courant injectés au réseau. Le THD est bien amélioré pour le courant **2.21%**.

On remarque que l'ajout du filtre améliore bien la forme du courant et de la tension fourni au réseau et sont de formes sinusoïdaux et équilibrées et c'est le but désiré dans cette étude.

3.12 Conclusion

Le dernier chapitre nous avons validé par simulation le fonctionnement d'un système photovoltaïque grâce à la modélisation et à la simulation de la commande de la connexion d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique monophasé via un hacheur puis un onduleur suite a un filtre LCL et une boucle a verrouillage de phase.

Conclusion générale

Le travail qu'on a réalisé présente une étude et modélisation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique monophasé sous l'utilisation du logiciel MATLAB (Simulink).

Dans la première étape on a donné des généralités sur l'énergie solaire et les systèmes photovoltaïques, principe de l'effet photovoltaïques, cellule photovoltaïques. Ainsi le générateur photovoltaïque et leurs performances.

Dans la deuxième étape on a démontré quelques types des convertisseurs statiques utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme le hacheur dévolteur, le hacheur survolteur, le hacheur mixte (dévolteur-survolteur) et l'onduleur photovoltaïque connecté au réseau. Qui est commandé par MLI. Ainsi, on a décrit d'autres méthodes de contrôle comme Commande par hystérésis, La commande vectorielle.

Dans la troisième étape on a interprété les résultat et on a fait la démonstration de chaque paramètre, un hacheur survolteur qui augmente la tension continue du panneau photovoltaïque ensuite un convertisseur DC-AC (l'onduleur) commandé par la MLI, pour transformer la tension continue délivré par le panneau photovoltaïque à une tension alternative sinusoïdale puis filtrée par l'intermédiaire d'un filtre LCL, ce système sert à injecter de la puissance au réseau de distribution ensuite a laide de la boucle a verrouillage de phase qui synchronise le courant avec la tension du réseau. D'après les résultats de simulation on a les courbes de la tension injectée au réseau dans le cas du système sans filtre et avec filtre aussi sans et avec PLL et on a analysé les résultats, Les résultats de simulation étaient satisfaisants et nous avons montré l'intérêt de cette étude.

Bibliographie

- [1] A. Labouret, M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque, 3ème édition, DUNOD, Paris, 2006.
- [2] SLAHEDDINE Bensalem, thèse de doctorat Université Ferhat ABBAS Une nouvelle approche de modélisation et de commande des systèmes photovoltaïques autonomes — SETIF 1 UFAS (ALGERIE) ,2017
- [3] BOUZIANE Afaf, Évaluation du rayonnement solaire en Algérie pour des applications, mémoire master, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2017/2018.
- [4] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaïque>
- [5]. T. Tafticht, "Analyse et commande d'un système hybride photovoltaïque éolien," Thèse de Doctorat,
- [6] Master Energétique et Environnement : Travaux Pratiques TP Energie Solaire UPMC Université Pierre et Marie Curie.
- [7] A. G. MacDiarmid, A. J. Epstein, Synth. Met., 69 (1995), 85
- [8] J.-L. Ciprelli, C. Clarisse, D. Delabouglise, Synth. Met., 217-222, (1995)
- [9] N. Embale, Thèse de Doctorat de 3ème cycle, "Poly(N-alkyl 3,6 carbazolène): Electrosynthèse, caractérisation et propriétés à l'état neutre et à l'état dopé », Université Paris-Nord (1992).
- [10] J.C. Bernède. *Organic photovoltaic cells : history, principle and techniques*. J. Chil. Chem. Soc., 53, n°3, 2008.
- [11] M. Abdlhak, "Etude et Identification paramétrique d'une cellule photovoltaïque organique," thèse de magister, 2011.
- [12] http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/8110/3/Chapitre_1_final.pdf.
- [13] W. Schröder et al, "Silicon Grown by the Floating Zone Technique" Encyclopedia of Materials : Science and Technology, (1994)
- [14] M. Sablier, "Spectrométrie de masse - Principe Électricité photovoltaïque marchés et appareillage Par : Électricité photovoltaïque Matériaux et marchés," *Renewable Energy*, 2015.
- [15] HAMDANI Abderrahmane, KACEM Ibrahim, étude et simulation de connexion d'une centrale photovoltaïque au réseau électrique triphasé mémoire master université Adrar 2018
- [16] BOUMALI Mounir, thèse de doctorat Université ABOU-BEKR BELKAID TLEMCEM Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension — Tlemcen 2017
- [17] HALIM Sofiane, thèse de doctorat Université ABOU-BEKR BELKAÏD Etude, Modélisation, Simulation de cellule solaire organique. — Tlemcen .
- [18] photovoltaïque.guidenr.frcours-photovoltaïque-autonome-caracteristique-courant-tension-cellule-photovoltaïque.

- [19] BENTAIBA Kamel, thèse de magister Université Ferhat ABBAS Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires— SETIF 1 UFAS (ALGERIE) ,2011
- [20] : DJELLAB Badreddine , les systèmes photovoltaïques, mémoire master , UNIVERSITE BISKRA 2012/2013
- [21] *Commande numérique, régimes intermédiaires et transitoires*, Techniques d'ingénieur, traité de génie électrique D.3643-3.
- [22] C. Canudas de Wit, Modélisation, Contrôle vectoriel et DTC. Commande des moteurs asynchrones 1 Editions Hermès.
- [23] institut d'automatisation industrielle , chapitre 13 boucle a verrouillage de phase , phase locked-loop (PLL)
- [24] . Jordana Bratt, "grid connected pv inverters : modeling and simulation", M_emoire de Master, Université de San Diego State,2011.
- [25] . S. Issaadi, Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones , Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2006.
- [26]https://www.academia.edu/31800283/Chapitre_II_Dimensionnement_et_conception_des_hacheurs_Buck_Boost_and_%C3%87uk_II_1_Introduction.
- [27]<https://dl.ummtto.dz/bitstream/handle/ummtto/654/Abbassen%20Lyes.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [28] YAHYAOUI Amine, thèse de magister Université FERHAT ABBAS DE SETIF Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche BondGraph — Setif
- [29]<http://energie28.blogspot.com/2016/11/definition-et-explications-sur-le-mppt.html>
- [30]. KAHLANE. A.E.W.H, HASSAINE. Linda, LARBES. Cherif, « LCL Filter Design with Passive Damping for Photovoltaic Grid Connected Systems ». IREC2015 The Sixth International Renewable Energy Congress, 21 May 2015
- [31]. NOUIKES. Sofiane, TAYEBI. Abdelghani, « Conception et commande d'un système de production décentralisée ». Mémoire de Master, l'université de M'sila, Juin 2018