

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieure et de la recherche Scientifique



L'université Echahid Hamma Lakhdar d'El-oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER ACADEMIQUE

Réseaux électriques

Thème

Contribution à l'étude Du système Photovoltaïque
Connecté au Réseau Electrique

Présenté par :

- **CHERRAHI MESSAOUD**
- **BEN AMARA MED REDHA**
- **NECIB OUALID**

Encadreur :

Dr.MIDA DRIS

Année universitaire : 2019/2020

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieure et de la recherche Scientifique



L'université Echahid Hamma Lakhdar d'El-oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER ACADEMIQUE

Réseaux électriques

Thème

Contribution à l'étude Du système Photovoltaïque
Connecté au Réseau Electrique

Présenté par :

- **CHERRAHI MESSAOUD**
- **BEN AMARA MED REDHA**
- **NECIB OUALID**

Encadreur :

Dr.MIDA DRIS

Année universitaire : 2019/2020

Remerciement

Nous remercions amplement tous qui ont contribué à la réalisation de ce modeste travail, en citant en premier lien :

L'encadreur : **Dr.MIDA Dris**

Et aussi :

- Tous les professeurs de notre promo.
- DJEDID KHALED : Ingénieur électrotechnique et cadre supérieur direction SONELGAZ EL-OUED.
- DERKI LAMINE : Ingénieur Chef district SONELGAZ DEBILA.
- AZEB CHEIKH TAHER : Ingénieur électrotechnique et cadre supérieur direction SONELGAZ EL-OUED.
- BACI DJAMEL : Cadre supérieur C.F.P.A DEBILA.

Dédicace

CHERRAHI MESSAOUD

Je dédie ce modeste travail à l'âme de mon père EL-HADI et ma mère OUM-ELHANA qui ont contribué à mes soins depuis ma naissance, en ajoutant ma femme et mes enfants et tous qui m'ont enseigné à partir du primaire.

BEN AMARA MED REDHA

Je dédie ce modeste travail à l'âme de mon père et ma mère qui ont contribué à mes soins depuis ma naissance, en ajoutant ma femme et mes enfants et tous mes amis du travail et tous qui m'ont offert leurs efforts pour moi.

NECIB OUALID

Je dédie ce fruit de travail: A ma très chère maman, pour sa tendresse, sa bienveillance, son encouragement, pour ce qu'elle a fait depuis mon enfance jusqu' à ce jour. A mon cher père pour sa générosité, sa bonté, je te remercie. A mes frères et mes chères sœurs Et à tous les membres de ma grande famille. En fin à tout ce qui nous aime et qu'on aime Necib oualid

الخلاصة

ان الطلب العالمي على الطاقة في تزايد مستمر وفي نفس الوقت زيادة التلوث البيئي بموضع موازي لهذا الطلب بسبب الوقود الأحفوري. وللقضاء على التلوث البيئي يتطلب الاهتمام بتطوير الطاقات المتجددة، من بين هذه الطاقات، الطاقة الشمسية، مزاياها وعيوبها معروفة اليوم، لكنها لا تزال تبشر بخير على الرغم من التكلفة العالية.

ان انطلاق مشاريع إنتاج الطاقة الكهروضوئية من النطاق المنزلي (بضع واط إلى بضعة كيلو واط) حتى الوصول الى تشغيل محطات الطاقة بعشرات الميجاواط يتطلب هذا الواقع إجراء دراسات محددة لضمان جودة الشبكات الكهربائية مع ضمان موثوقية وربحية التركيبات الجديدة في سياق يتطور باستمرار.

العمل المقدم في هذا التقرير هو مساهمة ووضع نموذج لمثل هذا النظام وعلى وجه الخصوص المكونات العديدة لمحطة الطاقة الكهروضوئية المتصلة بشبكة توزيع كهربائية. العناصر الرئيسية لمحطة توليد الكهرباء الكهروضوئية لهذه الأخيرة تم تصميمها ومحاكاتها تحت Matlab / Simulink. حيث تتكون من المولد الكهروضوئي، المحول DC / DC (Booster) والمحول DC / AC (عاكس التوتر) ممثلة في نماذج موضوعة بهدف محاكاة سلوك هذا المشروع.

الكلمات المفتاحية: النمذجة، النظام الكهروضوئي المتصل بالشبكة، Matlab / Simulink.

Résumé

Le besoin énergétique mondial en constant accroissement et le caractère polluant des énergies fossiles ont augmenté l'intérêt du développement des énergies renouvelables. Parmi elles, l'énergie solaire dont les avantages et inconvénients sont aujourd'hui connus mais qui s'avère toujours très prometteuse malgré un coût élevé. Des projets de production d'électricité photovoltaïque depuis l'échelle des particuliers (quelques watts à quelques kilo Watts) jusqu'aux centrales de plusieurs dizaines de mégawatts sont finalisés ou en cours de par le monde. Cette réalité appelle des études spécifiques pour assurer la qualité des réseaux électriques tout en garantissant technologiquement la fiabilité et la rentabilité des nouvelles installations dans un contexte en évolution permanente.

Le travail présenté dans ce mémoire est une contribution à une bonne modélisation d'un tel système et plus particulièrement des différents composants d'une centrale

photovoltaïque connecté à un réseau public de distribution électrique. Les principaux éléments constitutifs d'une centrale PV connectée sont modélisés et simulés sous Matlab/Simulink. Le générateur photovoltaïque, le convertisseur DC/DC (hacheur survolteur) et le Convertisseur DC/AC (onduleur de tension) sont ainsi représentés par des modèles élaborés en vue d'une simulation de comportement de l'ensemble du réseau.

Mots clés : Modélisation, système photovoltaïque connecté au réseau, **Matlab/Simulink**.



Abstract

The world energy need in constant increase and the character polluting fossil fuels increased the interest of the development of the renewable energies. Among them, the solar energy among which the advantages and the inconveniences are known today but which always turns out very promising in spite of a high cost. Projects of photovoltaic electricity production since the scales of the private individuals (some watts in some kilo Watts) up to the power plants of several tens of megawatts is finalized or in the course of by the world. This reality calls specific studies to insure the quality of electricity networks while guaranteeing technologically the reliability and the profitability of the new installations in a context in permanent evolution.

The work presented in this report is a contribution to a model of such a system and more particularly various components of a photovoltaic power plant connected to a public network of electric distribution (casing). The main constituent elements of a power plant connected PV are modeled and feigned under Matlab / Simulink. The photovoltaic generator, the converter DC / DC (Booster) and the Converter DC / AC (inverter of tension) are so represented by models elaborated with the aim of a simulation of behavior of the whole network.

Keywords: modeling, photovoltaic system connected to the network, **Matlab / Simulink**.

Liste de figure

Figure N° :	L'intitulé	Page
Figure (I. 1)	Cellule photovoltaïque	07
Figure (I. 2)	Cellule photovoltaïque 3D	07
Figure (I. 3)	Connection entre les cellules (série/parallèle)	09
Figure (I. 4)	Cellule photovoltaïque multifonction	09
Figure (I. 5)	Cellule photovoltaïque monocristalline	09
Figure (I. 6)	Cellule photovoltaïque polycristalin	10
Figure (I. 7)	Cellule photovoltaïque de type cuivre - indium - sélénium (CIS)	10
Figure (I. 8)	Cellule photovoltaïque amorphe	10
Figure (I. 9)	Cellules CZTS	11
Figure (I.10)	Des cellules au champ photovoltaïque	12
Figure (I.11)	Schéma indiquant le nombre d'air masse AMx en fonction de la position Géographique.	13
Figure (I.12)	Irradiation globale (W/m^2) au sol à Toulouse du 11 juin au 14 juin 2009 (date proche du solstice d'été).	14
Figure (I.13)	Rayonnement solaire transmis à la terre	15
Figure (I.14)	Les ressources énergétiques solaires mondiales	16
Figure (I.15)	Représentation des surfaces qu'occuperait des centrales thermo solaires pour produire satisfaire la demande mondiale en électricité DLR Allemand 2007.	16
Figure (I.16)	Les ressources énergétiques solaires en Algérie	17
Figure (II.1)	Système d'un système PV connecté au réseau	21
Figure (II.2)	Schéma électrique idéal d'un module photovoltaïque	22
Figure (II.3)	Schéma photovoltaïque d'un module à une diode	23
Figure (II.4)	Modèle électrique à deux diodes avec résistance shunt de la cellule PV.	25
Figure (II.5)	Modèle électrique à une diode sans résistance shunt	26
Figure (II.6)	A température et éclairement fixés, courbe courant / tension d'une cellule	28
Figure (II.7)	A température et éclairement fixés, courbe puissance/tension d'une cellule	28
Figure (II.8)	courbe courant / tension d'une cellule pour 2 valeurs irradiantes	29

Figure(II.9)	courbe puissance / tension d'une cellule pour 2 valeurs irradiantes	29
Figure (II.10)	Symbole d'un convertisseur DC-DC	30
Figure (II.11)	Schéma électrique d'un hacheur Buck	31
Figure (II.12)	Schéma électrique d'un hacheur Buck fermé	32
Figure (II.13)	Schéma électrique d'un hacheur Buck ouvert	32
Figure (II.14)	Schéma électrique d'un hacheur boost	33
Figure (II.15)	Schéma électrique d'un hacheur boost fermé	33
Figure (II.16)	Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert	34
Figure (II.17)	Symboles du convertisseur DC-AC monophasé et triphasé	34
Figure (II. 18)	Représentation du filtre RL	36
Figure (III.1)	Chaine de conversion photovoltaïque avec convertisseur DC/DC	40
Figure (III.2)	Algorithme d'incrément de conductance	43
Figure (III. 3)	Caractéristique P_{pv} (V_{pv}) d'un panneau solaire	44
Figure (III.4)	Organigramme de l'algorithme perturbation et observation	45
Figure(III.5)	Schéma de structure d'un onduleur de tension triphasé connecté au réseau	46
Figure(III.6)	Contrôle du courant par hystérésis classique	47
Figure (III. 7)	Contrôle des courants de l'onduleur par hystérésis modulée	48
Figure (III.8)	Représentation du bus continu	49
Figure (III.9)	Boucle de régulation de la tension du bus continu	50
Figure (III.10)	Schéma synoptique de la connexion de l'onduleur au réseau électrique	51
Figure (III.11)	Principe de la PLL	52
Figure (IV.1)	Schéma global du système photovoltaïque connecté au réseau électrique	55
Figure (IV.2)	Caractéristique de la puissance maximale de la source photovoltaïque	57
Figure (IV.3)	Variation de l'éclairement	58
Figure (IV.4)	Allure de la puissance photovoltaïque P_{pv}	58
Figure (IV.5)	Allure de la tension photovoltaïque V_{pv}	59
Figure (IV.6)	Allure du courant photovoltaïque I_{pv}	59

Figure (IV.7)	Allure de la puissance photovoltaïque en fonction de la tension photovoltaïque $P_{pv}(V_{pv})$	59
Figure (IV.8)	L'allure de V_{dc}	60
Figure (IV.9)	Modèle en série d'une ligne de transmission courte	62
Figure (IV.10)	Allure de la tension basse tension	64
Figure (IV.11)	Réseau électrique	64
Figure (IV.12)	Allure de la tension HTA	65
Figure (IV.13)	La puissance délivrée selon l'irradiation	65
Figure (IV.14)	Allure de la tension HTA et le courant	66
Figure (IV.15)	Simulation système par Matlab Simulink	67

Liste des symboles

E : Eclairement (W/m^2).
 R_p : Résistance parallèle shunt (Ω).
 R_s : Résistance série (Ω).
 I_{ph} : Le photo-courant (A).
 I_{sat} : Courant de saturation (A).
 T_c : Température de jonction ($^{\circ}\text{K}$).
 G : L'éclairement de référence (1000 W/m^2).
 a : Le coefficient de courant en fonction de température ($\text{A}/^{\circ}\text{C}$).
 T_{ref} : La température de référence ($298 \text{ }^{\circ}\text{K}$).
 n : Facture de non idéalité de la jonction.
 I_{cc} : Le courant de court-circuit (A).
 V_{co} : La tension de circuit ouvert (V).
 N_s : Nombre de modules dans le panneau en série.
 N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.
 P_{max} : La puissance maximale produite PV (W).
 V_{max} : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).
 I_{max} : Courant qui correspond à la puissance maximale (A).
 V_{opt} : (V_{mpp}) Tension optimale (V).
 I_{opt} : (I_{mpp}) Courant optimum (A).
 V_{co} : Tension à circuit ouvert (V).
 I_{cc} : Courant de court-circuit (A)
 K : coefficient de Boltzmann ($1.38.10^{-23} \text{ J / K}$)
 T_c : Température de la cellule ($^{\circ}\text{C}$).
 E_{ref} : Irradiation ou ensoleillement de référence 1000 W/m^2
 T_{ref} : Température de référence $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
 E_g : Tension de seuil de la diode (1.12 eV).
HTA : Moyenne tension
BT : Basse Tension
GPV : Générateur photovoltaïque
PV : Photovoltaïque
MPPT : Maximum Power Point Tracking
PPM : Point de Puissance maximale

Sommaire

INRODUCTION.....	02
<u>CHAPITRE N°:01 Etat de l'art</u>	
I.1. Introduction	05
I.2. Histoire de l'énergie solaire	05
I.3. Histoire de l'énergie solaire photovoltaïque. Premières cellules Photovoltaïques	05
I.4. L'essor du photovoltaïque.....	06
I.5. Cellule photovoltaïque.....	06
I.6. Description de la cellule photovoltaïque.....	07
I.7. Efficacité des cellules photovoltaïques.....	08
I.7.1. Les différents types de cellules photovoltaïques.....	08
I.7.2. Principe de fonctionnement.....	08
I.7.3. Les principaux types de cellules photovoltaïques.....	09
I.7.3.1. Cellule multifonction.....	09
I.7.3.2. Cellule en silicium monocristallin.....	09
I.7.3.3. Cellule en silicium polycristalin.....	10
I.7.3.4. Cellule sans silicium en couche mince cis.....	10
I.7.3.5. Cellule silicium amorphe en couche mince	10
I.7.3.6. Cellule CZTS (cuivre zinc etain soufre).....	11
I.8. Panneau photovoltaïque.....	11
I.9. Applications de cellules photoélectriques.....	12
I.10. Le gisement solaire.....	13
I.11. Le spectre solaire.....	13
I.12. Le gisement solaire au sol.....	14
I.13. Le rayonnement solaire.....	14
I.14. Le potentiel solaire mondial.....	15
I.15. Le potentiel solaire en Algérie.....	16
I.16. Centrale solaire photovoltaïque.....	17
I.16.1. Histoire.....	17
I.16.2. Emplacement et utilisation des terres.....	17
I.17. Technologie.....	18
I.17.1. Arrangements des panneaux solaires.....	18
I.17.2. Conversion d'énergie.....	18
I.17.3. Transformateurs.....	18
I.18. Centrale photovoltaïque raccordée au réseau.....	19

I.19. Conclusion	19
-------------------------------	-----------

CHAPITRE N° :02 Modélisation du système

II.1. Introduction	21
II.2. Modélisation du panneau photovoltaïque.....	22
II.2.1. Model idéal.....	22
II.2.2. Modèle d'un panneau à une diode avec résistance shunt.....	23
II.2.3. Modèle à deux diodes (à deux exponentielles).....	25
II.2.4. Modèle à une diode (implicite).....	25
II.2.5. Caractéristiques courant / tension d'un panneau	27
II.2.6. Caractéristiques puissance / tension d'un panneau.....	28
II.2.7. Influence de l'éclairement et de la température.....	29
II.2.8. Regroupement série ou parallèle de panneaux ou cellules.....	30
II.3. Electronique de puissance et la conversion électrique.....	30
II.3.1. Les hachure.....	30
II.3.1.1. Hacheur abaisseur.....	31
II.3.1.2. Hacheur élévateur.....	33
II.4. Modélisation du convertisseur DC/AC.....	34
II.5. Modélisation du filtre RL associé au convertisseur.....	36
II.6. Modélisation du réseau électrique	37
II.7. Poursuite du point de puissance maximal (PPM).....	38
II.8. Conclusion.....	38

CHAPITRE N° :03 Contrôle du système

III.1. Introduction.....	40
III.2. Recherche le point de puissance maximum (MPP).....	40
III.2.1. Méthode de courbe d'ajustage.....	41
III.2.2. Méthode de la table de consultation.....	41
III.2.3. Méthode de tension en circuit ouvert du générateur photovoltaïque.....	41
III.2.4. Méthode de courant de court-circuit du générateur PV.....	42
III.2.5. Méthode de la conductance incrémentielle	42
III.2.5.1. Algorithme d'incrément de conductance.....	43
III.2.6. Méthode de perturbation observation (P&O).....	44
III.2.6.1. Algorithme de perturbation et observation.....	45
III.3. Contrôle de la liaison Onduleur-réseau électrique.....	46
III.4. Présentation de la structure du système côté Onduleur- réseau.....	46
III.5. Etude de la partie contrôle de la structure proposée.....	46
III.5.1. Onduleur de tension.....	46
III.5.2. Différentes commandes de l'onduleur.....	47

III.5.2.1. Contrôle des courants par hystérésis classique.....	47
III.5.2.2. Contrôle des courants par hystérésis modulée.....	48
III.5.3. Contrôle de la tension du bus continu.....	49
III.5.4. Contrôle des puissances active et réactive (P et Q).....	50
III.6. Etude de la synchronisation du convertisseur sur le réseau.....	52
III.6.1. PLL triphasée dans le domaine de Park.....	52
III.7. Conclusion.....	53
<u>CHAPITRE N° :04 Simulation du système</u>	
IV.1. Introduction.....	55
IV.2. Simulation numérique.....	55
IV.3. Résultat de simulation numérique.....	55
IV.3.1. Simulation à ensoleillement variable et température constante.....	58
IV.3.2. Contrôleur MPPT.....	60
IV.3.3. Convertisseur VSC.....	60
IV.4. Réseau HTA.....	62
IV.4.1. Modèles d'un réseau électrique.....	62
IV.4.2. Ligne de transmission courte.....	62
IV.5. Système PV connecté à un réseau électrique.....	63
IV.5.1. Modèle de boucle de régulation de l'ensemble du système PV.....	63
IV.5.1. Commande coté réseau.....	63
IV.6. Résultats de simulation.....	63
IV.7. Conclusion.....	68
IV.8. Conclusion générale.....	69

INTRODUCTION

INTRODUCTION :

La production d'énergie est un défi majeur pour les années futures étant donné que les besoins énergétiques mondiaux ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour soutenir leur économie. De nos jours, une grande partie de la production et de la consommation mondiale d'énergie engendre des effets polluants ou des dérèglements climatiques. La consommation des ressources naturelles (fossile ou fissile) réduit inéluctablement les réserves et compromet leur disponibilité pour les générations futures.

Aujourd'hui, le défi mondial est tourné vers les énergies renouvelables, notamment le solaire, l'éolien, l'hydraulique, la géothermie, la biomasse... A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies liées aux cycles du soleil et de la terre. L'exploitation de l'énergie solaire photovoltaïque fait l'objet de notre étude. Nous traiterons de la problématique et des solutions technologiques pour le raccordement d'un générateur photovoltaïque à un réseau public de distribution.

La production d'électricité par voie solaire photovoltaïque (PV) a explosé ces dernières années dans le monde. Les nouvelles installations solaires photovoltaïques ont représenté dans le monde, une puissance plus de 14 000 MW, portant la totalité des installations mondiales à plus de 35 000 MW. Les installations connectées aux réseaux représentent la grosse majorité des nouvelles installations. Ce mode d'exploitation séduit de plus en plus les pays en voie de développement qui disposent d'un gisement exploitable.

Beaucoup de projets solaire PV de grande capacité avec injection sur les réseaux publics ont été réalisés (exemple de la centrale de 5MW, 20MW, ...) ou sont en cours d'élaboration et/ou de réalisation. L'enjeu de ces injections sur les réseaux publics réside non seulement dans la gestion optimisée de ceux-ci mais surtout de leur impact en termes de perturbation de ces réseaux.

Le but de notre mémoire est de développer des modèles permettant d'avoir une approche globale du comportement de ces systèmes fort complexes.

A cet effet nous nous intéressons aux modèles des composants, de la chaîne énergétique, c'est à dire le champ photovoltaïque, le dispositif de conversion et d'adaptation (hacheurs, onduleur, transformateurs) et le réseau public de distribution.

Le but poursuivi dans le cadre de ce mémoire est de chercher des modèles mathématiques les plus représentatifs afin d'obtenir une injection optimale des puissances du système PV /réseau (Grid connected).

Ce présent travail est par conséquent réalisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre décrit l'histoire de la découverte de la cellule photovoltaïque et son évolution dans le temps, ainsi que des centrales à énergies renouvelables. Description du rayonnement solaire et le potentiel solaire mondial.

Le second chapitre présente la modélisation des GPV, des convertisseurs statiques et la stratégie de leur commande permettant le raccordement au réseau.

Le troisième chapitre consiste à proposer la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) (The maximum power point tracker) pour extraire le maximum de puissance du module PV. Il existe de nombreuses techniques afin d'atteindre le point de puissance maximale et cela dans différentes conditions météorologiques.

Le quatrième chapitre, nous terminerons notre mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et résultats de simulation.

Chapitre : 01



Etat de l'art

I.1. Introduction :

Dans le contexte de changement climatique où la limitation des gaz à effet de serre est primordiale, et devant la menace d'épuisement des combustibles fossiles, le défi actuellement est de trouver des sources d'énergie pour répondre à un besoin toujours plus important. Les énergies renouvelables peuvent être des solutions en raison de leur abondance. Parmi ces énergies, on peut citer l'énergie solaire photovoltaïque.

L'énergie solaire peut être utilisée par divers procédés. On peut citer, le procédé de conversion photovoltaïque pour produire de l'électricité, les techniques de l'habitat solaire permettant de chauffer les habitations par le rayonnement solaire, les procédés utilisant les réactions thermochimiques et la conversion thermodynamique en collectant l'énergie solaire concentrée par un récepteur solaire et puis sa conversion en électricité.

Dans ce manuscrite on va citer les différentes technologies solaires à concentration et leur développement avec le temps.

I.2.Histoire de l'énergie solaire :

Dans l'histoire de l'énergie solaire, sous une forme ou une autre, l'énergie solaire a toujours été présente dans la vie de la planète, étant si imprévisible pour le développement de la vie. Cependant, la manière dont la civilisation humaine l'a exploitée a inventé de nouvelles stratégies et de nouveaux outils a connu une longue évolution.

Le soleil est indispensable à l'existence de la vie sur la planète : il est responsable du cycle de l'eau, de la photosynthèse, etc. Les premières civilisations l'ont déjà compris et, à mesure que les civilisations ont évolué, elles ont également développé des techniques pour exploiter leur énergie. Au début, il s'agissait de techniques permettant de tirer parti de l'énergie solaire passive. Des techniques ultérieures ont été développées pour tirer parti de l'énergie thermique solaire, et plus tard l'énergie solaire photovoltaïque a été ajoutée.

I.3.Histoire de l'énergie solaire photovoltaïque :

En 1838, l'énergie solaire photovoltaïque apparaît dans l'histoire de l'énergie solaire. En 1838, le français Alexandre Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque pour la première fois. Bequerel expérimentait une batterie électrolytique avec des électrodes de platine et réalisait que, lorsqu'il était exposé au soleil, le courant augmentait. C'était le début de l'énergie solaire photovoltaïque.

L'étape suivante a été franchie en 1873 lorsque l'ingénieur électricien anglais Willoughby Smith a découvert l'effet photovoltaïque dans les solides. Dans ce cas à propos de sélénium.

Quelques années plus tard, en 1877, l'Anglais William Grylls Adams, professeur de philosophie naturelle au King's College de Londres et son élève Richard Evans Day, ont découvert qu'ils exposaient le sélénium à la lumière pour produire de l'électricité. Ils ont ainsi créé la première cellule photovoltaïque au sélénium.

En 1953, Calvin Fuller, Gerald Pearson et Daryl Chapin ont découvert la cellule solaire en silicium. Cette cellule produisait suffisamment d'électricité et était suffisamment efficace pour faire fonctionner de petits appareils électriques. Ces cellules photovoltaïques avaient une grande importance dans l'avenir de l'histoire de l'énergie solaire.

Les premières cellules solaires disponibles dans le commerce ne sont apparues qu'en 1956, même si le coût était encore très élevé pour la plupart des gens jusqu'en 1970 environ, lorsque le prix des cellules solaires a chuté d'environ 80%.

Les cellules solaires ont été utilisées dans les satellites américains et soviétiques lancés depuis la fin des années 1950.

I.4.L'essor du photovoltaïque :

La filière photovoltaïque a finalement pris son envol grâce à la recherche spatiale et aux explorations menées pour améliorer l'approvisionnement en énergie des satellites. Les premières cellules ont été envoyées dans l'espace en 1958, fixées à l'extérieur du satellite Vanguard 1. Elles affichaient un rendement de 9 %, étaient composées de silicium et ont alimenté l'un des deux émetteurs radioélectriques embarqués à bord durant huit ans. Quant aux premiers panneaux solaires, ils ont été lancés dans l'espace en 1959. Ils étaient attachés sur le satellite Explorer 6.

L'usage des cellules photovoltaïques et des panneaux solaires qui leur sont associés s'est démocratisé à partir des années 1970 grâce à une diminution progressive de leur coût, ce qui a permis le développement d'installations domestiques. Pour ne citer qu'un chiffre, la production d'électricité à partir de l'énergie solaire a progressé de 15 % par an entre 1984 et 1996. Cette valeur a depuis fortement augmenté...

I.5.Cellule photovoltaïque :

En électronique, une cellule photoélectrique ou photovoltaïque est un dispositif électrique / électronique qui convertit l'énergie incidente du rayonnement solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque.

Les composés d'un matériau à effet photoélectrique absorbent les photons de lumière et émettent des électrons. Lorsque ces électrons libres sont capturés, il en résulte un courant électrique pouvant être utilisé comme électricité. Un panneau photovoltaïque est constitué d'un groupe de cellules photoélectriques en formation. Ce groupe de cellules photovoltaïques forme un réseau de cellules solaires connectées en série pour augmenter la tension de sortie tout en connectant plusieurs réseaux en parallèle pour augmenter le courant électrique que le dispositif est capable de fournir. Le type de courant électrique fourni est le courant continu.



Figure (I. 1) Cellule photovoltaïque.

Le rendement moyen de conversion obtenu par les cellules photovoltaïques disponibles dans le commerce en silicium monocristallin est inférieur à celui de cellules multicouches, généralement de l'arséniure de gallium. Actuellement, il existe également de nouvelles technologies dans la production de panneaux solaires sans silicium.

I.6.Description de la cellule photovoltaïque :

La cellule solaire photovoltaïque la plus courante est une feuille de silicium cristallin d'une épaisseur approximative de 0,3 mm. Le processus de fabrication est d'un niveau sophistiqué et délicat afin d'obtenir une homogénéité du matériau.

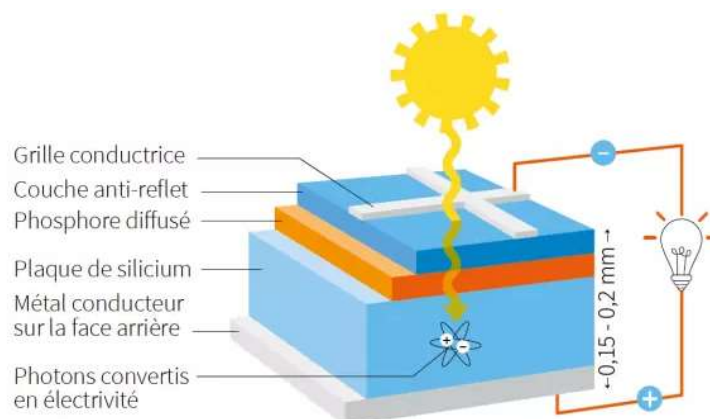


Figure (I. 2) cellule photovoltaïque 3D

Le champ électrique est généré par la polarisation différente de deux zones de la cellule photovoltaïque. Généralement, la partie supérieure a un caractère négatif et le reste positif pour créer la jonction **PN**.

En raison de cette différence de charge électrique dans le matériau, le champ électrique chargé de pousser les électrons hors de la cellule à travers la surface de la couche **N** est produit, ce qui implique l'établissement d'un courant électrique.

La cellule solaire est équipée de contacts électriques pour canaliser l'énergie qu'elle produit lorsqu'elle est éclairée. Ces contacts sont conçus de manière ramifiée (sur la face ensoleillée). Il y en a deux des principaux et, en plus, il y a des ramifications qui les unissent pour mieux collecter les électrons sur toute la surface de la cellule. L'objectif est de combiner un bon contact électrique, une faible résistivité et de créer une ombre minimale de sorte que les photons atteignent le matériau actif de la cellule.

Sur le côté arrière, les contacts forment généralement une trame serrée ou même une feuille continue qui permet la réduction de la valeur de la résistance interne.

I.7.Efficacité des cellules photovoltaïques :

I.7.1.Les différents types de cellules photovoltaïques :

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique.

La production des cellules photovoltaïques nécessite de l'énergie, et on estime qu'une cellule photovoltaïque doit fonctionner environ 2 à 3 ans suivant sa technologie pour produire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication.

I.7.2.Principe de fonctionnement :

Une cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau).

Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Le courant de sortie, et donc la puissance, sera proportionnelle à la surface du module.

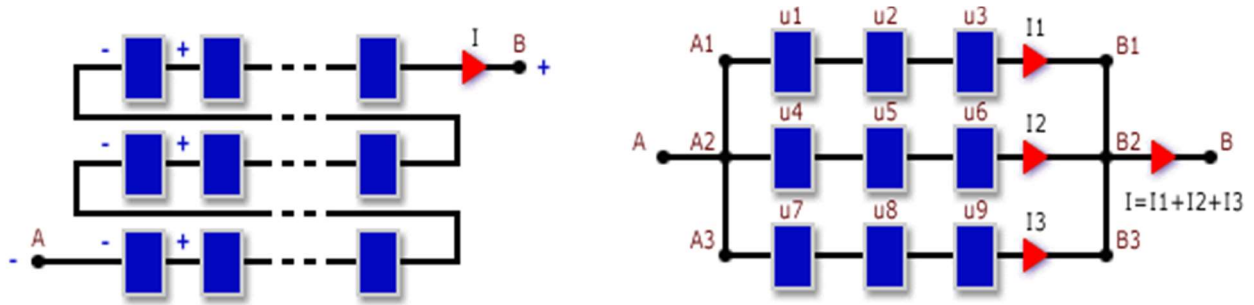


Figure (I. 3) Connection entre les cellules (série/parallèle)

I.7.3. Les principaux types de cellules photovoltaïques :

I.7.3.1. Cellule multifonction :

Les cellules multi-jonction sont composées de différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire et ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de conversion.



Figure (I. 4) Cellule photovoltaïque multifonction

I.7.3.2. Cellule en silicium monocristallin :

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.



Figure (I. 5) Cellule photovoltaïque monocristalline

I.7.3.3.Cellule en silicium polycristalin :

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

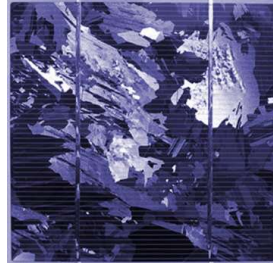


Figure (I. 6) Cellule photovoltaïque polycristalin

I.7.3.4.Cellule sans silicium en couche mince cis :

Les cellules CIS représentent la nouvelle génération de cellules solaires sous forme de films minces, de type cuivre-indium-sélénium (CIS). Les matières premières nécessaires à la fabrication des cellules CIS sont plus faciles à se procurer que le silicium utilisé dans les cellules photovoltaïques classiques. De plus, leur efficacité de conversion énergétique est la plus élevée à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couche mince.

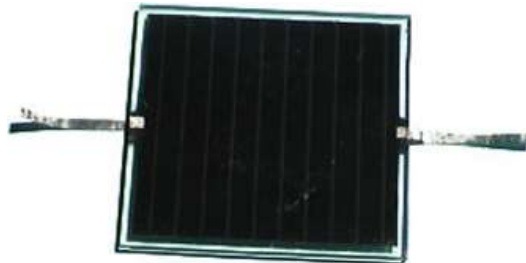


Figure (I. 7) Cellule photovoltaïque de type cuivre - indium - sélénium (CIS)

I.7.3.5.Cellule silicium amorphe en couche mince :

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé ou marron. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires".

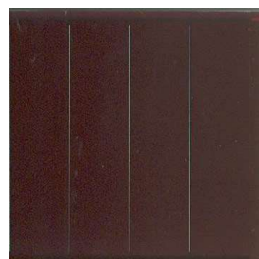


Figure (I. 8) Cellule photovoltaïque amorphe

I.7.3.6. Cellule CZTS (cuivre zinc etain soufre) : innovation (2016)

Toujours en phase de développement et donc pas encore commercialisées, les cellules CZTS, fabriquées à partir de minerais non toxiques - contrairement au silicium ont l'avantage d'être fines, et peuvent donc s'appliquer sur des supports souples.

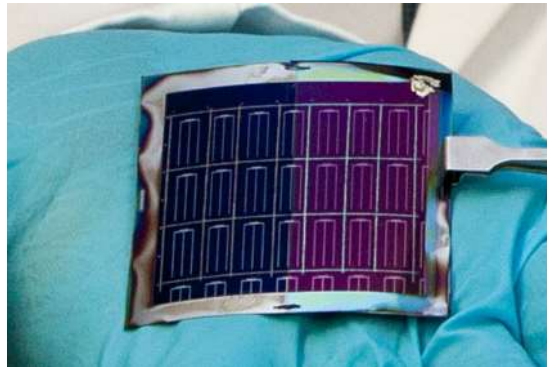


Figure (I. 9) cellules CZTS

Les cellules **CZTS** font partie de la catégorie des cellules solaires « en pellicule fine », qui constituent la nouvelle génération de la technologie solaire. Ces cellules solaires aussi minces qu'une pellicule de film sont fabriquées en apposant une mince couche de matériau absorbant l'énergie solaire sur un support comme le verre ou le plastique, qui a l'avantage d'être flexible.

L'équipe du Dr Xiaojing Hao de l'Australian Centre for Advanced Photovoltaics a réussi à obtenir en avril 2016 un rendement record de 7,6 % pour des cellules d'un cm². Ces résultats sont en constante amélioration. L'équipe obtenait un rendement de 5,5% en 2013, et de 6,6 % en 2015. L'objectif est d'atteindre les 20%, ce qui permettrait la mise sur le marché de cette technologie.

Les **CZTS** présentent de nombreux avantages. Elles sont fines, et mesurent à peine 1 à 5 μm d'épaisseur, alors que les cellules au silicium en font 200 à 350 μm . Actuellement, près de 90% des panneaux installés sont composés de cellules au silicium, ayant un rendement moyen de 21%. Les cellules fines CZTS peuvent être utilisées sur tous types de supports, contrairement aux cellules au silicium, ce qui permet de concevoir des surfaces incurvées, transparentes, ou en superposition d'autres matériaux, l'inconvénient inscrit sur ce dernier peu toxique (utilisation spéciale).

I.8. Panneau photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques sont les composants de base des modules photovoltaïques, qui sont des panneaux solaires capables de générer de l'énergie électrique à partir du rayonnement solaire. C'est donc l'élément de base essentiel de ce type d'énergie renouvelable.

Un panneau solaire photovoltaïque est constitué d'un réseau de cellules solaires connectées en série pour augmenter la tension de sortie. Dans le même temps, plusieurs réseaux sont connectés en parallèle pour augmenter le courant électrique que l'appareil est capable de fournir.

Le type de courant électrique fourni par un panneau photovoltaïque est un courant continu.

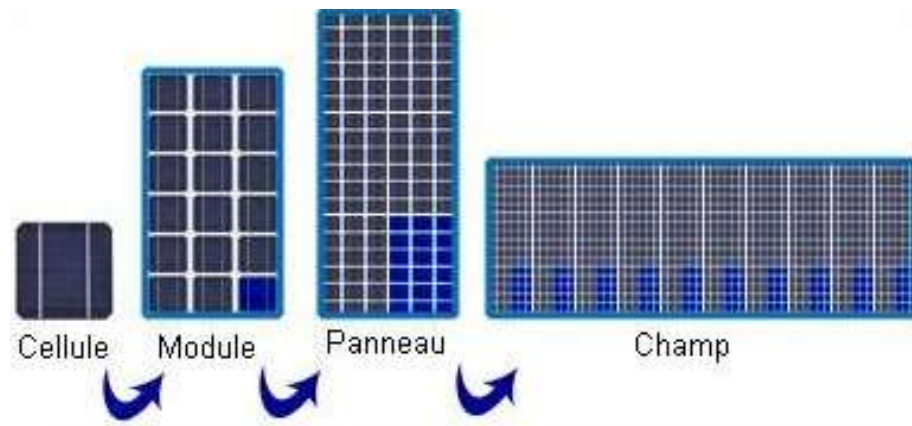


Figure (I.10) Des cellules au champ photovoltaïque

I.9.Applications de cellules photoélectriques :

Les cellules photovoltaïques sont parfois utilisées seules (éclairage de jardin, calculatrices, ...) ou regroupées dans des panneaux solaires photovoltaïques. De cette façon, l'électricité est générée par cette source d'énergie renouvelable.

Les cellules photoélectriques sont également utilisées pour remplacer les batteries (l'énergie est de loin la plus chère pour l'utilisateur). Les cellules ont envahi les calculatrices, les horloges, les appareils pouvant fonctionner à l'énergie solaire.

Il est possible d'augmenter son domaine d'utilisation en le stockant au moyen d'un (condensateur ou batterie électrique). Lorsqu'elle est utilisée avec un dispositif de stockage d'énergie, une diode doit être placée en série pour empêcher la décharge du système pendant la nuit.

Ils sont utilisés pour produire de l'électricité pour de nombreuses applications (satellites, parcmètres, ...), ainsi que pour l'électricité domestique ou dans un réseau public dans le cas d'une centrale solaire photovoltaïque.

I.10. Le gisement solaire :

Comme pour toutes les applications de l'énergie solaire, une bonne connaissance du gisement solaire est nécessaire à l'étude des systèmes photovoltaïques et thermiques. Par gisement solaire, on entend ici les différentes caractéristiques du rayonnement solaire, susceptibles d'influencer les performances d'un système en un lieu donné. Dans un premier temps, on rappellera quelques données de base concernant le spectre du rayonnement solaire.

I.11. Le spectre solaire :

Les conditions climatiques ainsi que la présence de particules influencent également la valeur réelle du spectre. Pour tenir compte de ces différences, comparer les performances des cellules solaires et qualifier les différents spectres solaires utilisés, l'expression est :

$$AM_x = \frac{1}{\sin(\theta)} \quad (I.1)$$

Où θ est l'angle que fait le soleil avec son zénith

L'intégration de l'irradiante sur la totalité du spectre permet d'obtenir la puissance P (en $W.m^{-2}$) fournie par le rayonnement. Pour simplifier on utilise les notions suivantes :

AM0 : Hors atmosphère (application spatiale) est à 48.19° . $P=1.36KW.m^{-2}$.

AM1 : Le soleil est au zénith du lieu d'observation (à l'équateur).

AM1.5G : Spectre standard, le soleil est à 45° . $P = 1KW.m^{-2}$.

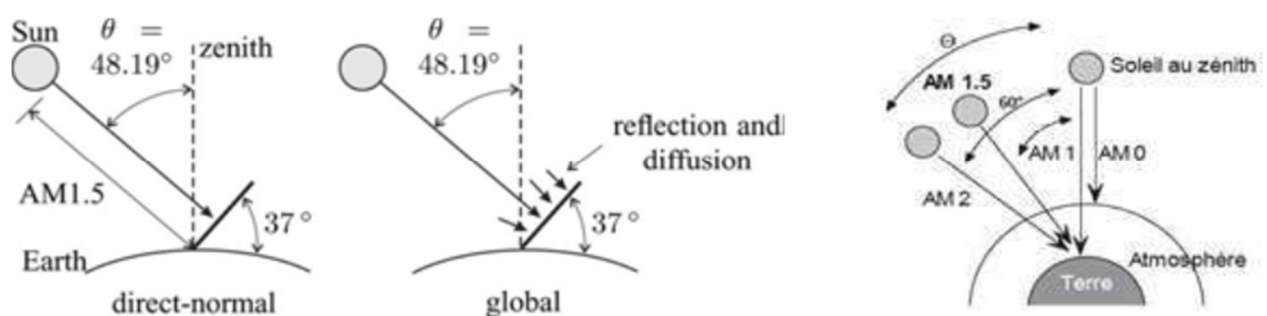
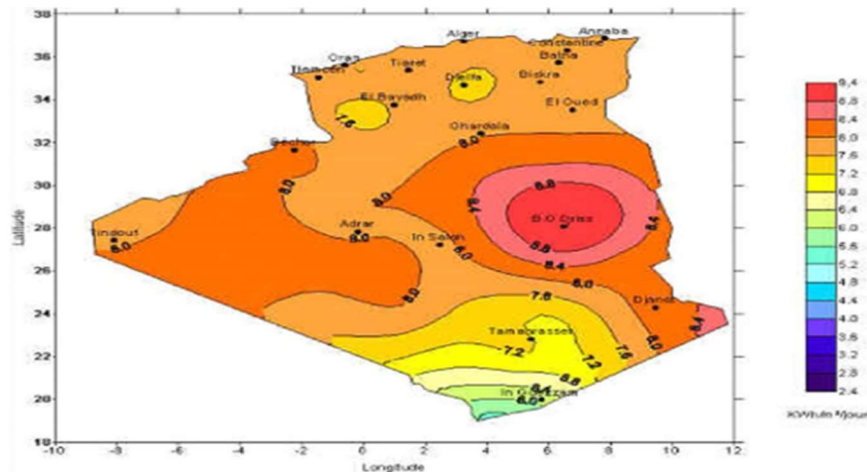


Figure (I.11) Schéma indiquant le nombre d'air masse AM_x en fonction de la position Géographique.

I.12. Le gisement solaire au sol :

Le gisement solaire au sol est très variable comme présenté sur la Figure (I.12). Nous constatons une variabilité importante les jours nuageux par rapport aux jours avec éclaircies et les jours de soleil. L'irradiation du soleil les jours nuageux est environ 200 W/m^2 alors qu'elle est de 1000 W/m^2 pour les jours ensoleillés. La présence de nuages modifie sensiblement l'importance des rayonnements du soleil, les nuages jouant un rôle de milieu diffusant.



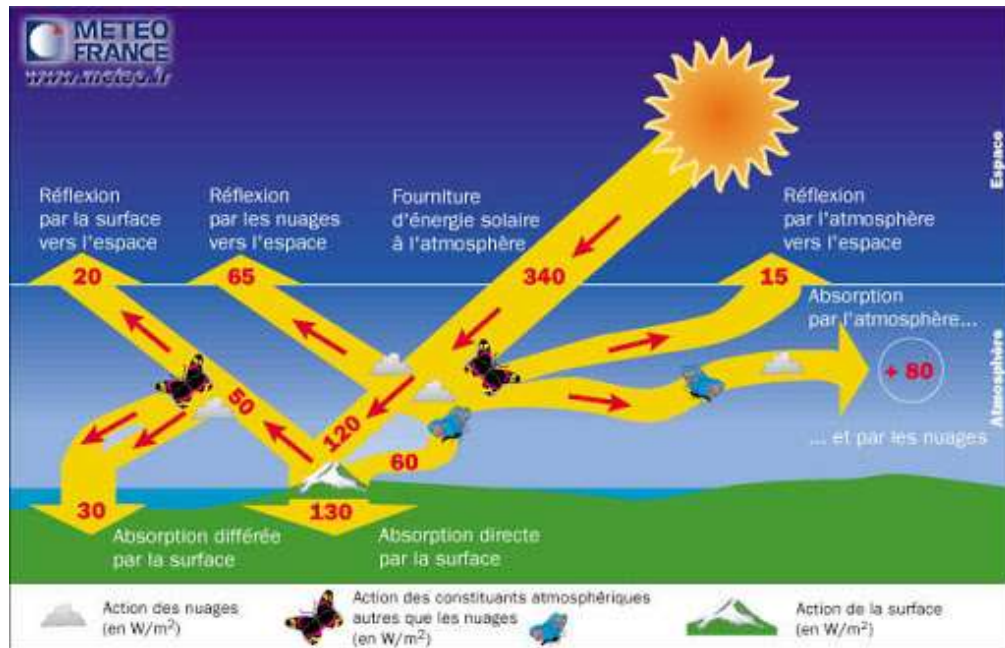


Figure (I.13) Rayonnement solaire transmis à la terre

I.14. Le potentiel solaire mondial :

La hausse brutale du prix du pétrole brut en 1974 avait lancé une course aux énergies alternatives dans les pays industriels, dans cette effervescence plusieurs plateformes d'expérimentations des technologies solaires ont vu le jour aux Etats Unis (Bastrow, Californie), en Espagne (Almeria), en France (Thémis), qui ont posés les bases de développement de la production d'électricité par concentration solaire.

Depuis les années 2000, la prise de conscience générale de la problématique environnementale et climatique, concrétisée par les accords de Kyoto en 1997, a relancé les efforts pour élargir la diversité énergétique avec regain d'intérêt notoire pour l'énergie solaire.

Il est aujourd'hui reconnu que la plus grande ressource d'énergie techniquement accessible sur la planète est disponible dans les régions désertiques autour de l'équateur, d'une manière générale que l'énergie solaire est la seule ressource énergétique (renouvelable et fossile compris) capable de pourvoir à la totalité de la demande énergétique mondiale sur le très long terme.

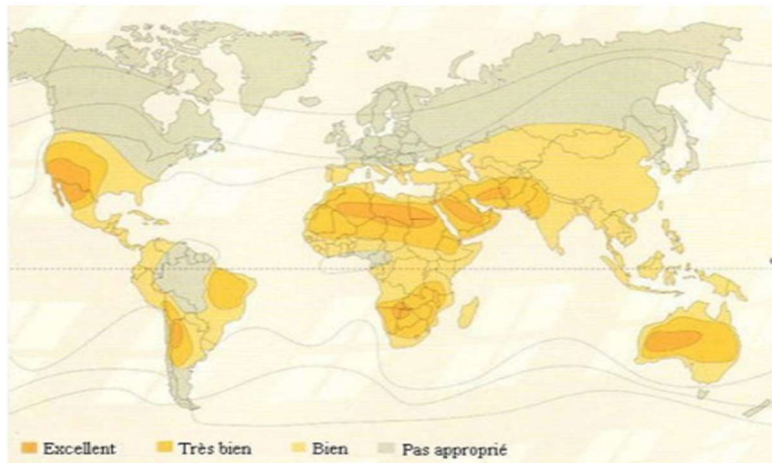


Figure (I.14) Les ressources énergétiques solaires mondiales

Il est estimé que 1% de la surface des régions arides et semi arides de la ceinture solaire terrestre (figure (I.14)), couverte de centrales solaires thermiques à concentration en considérant 10 à 15% de pertes en ligne ,serait théoriquement suffisant pour fournir la demande mondiale en électricité .

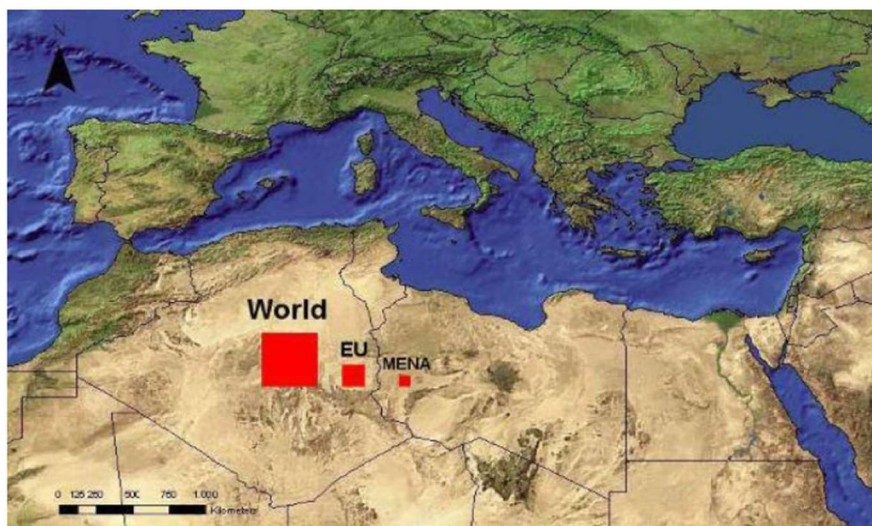


Figure (I.15) Représentation des surfaces qu'occuperait des centrales thermo solaires pour produire satisfaire la demande mondiale en électricité DLR Allemand 2007.

I.15.Le potentiel solaire en Algérie:

Avec 2 381741 km² de surface, l'Algérie est le pays le plus vaste de la zone méditerranéenne. Selon une étude de l'agence aérospatiale allemande DLR, l'Algérie offre les possibilités les plus intéressantes à long terme, pour investir dans les centrales thermiques solaires. En effet, l'Algérie est l'un des pays de la méditerranée qui dispose d'un potentiel solaire énorme Figure (I.16) et selon les données d'ensoleillement l'Algérie est comptée parmi les meilleurs pays ensoleillé dans le monde. Le potentiel des ressources solaires de notre pays est optimal pour l'exécution des projets des concentrateurs solaires.

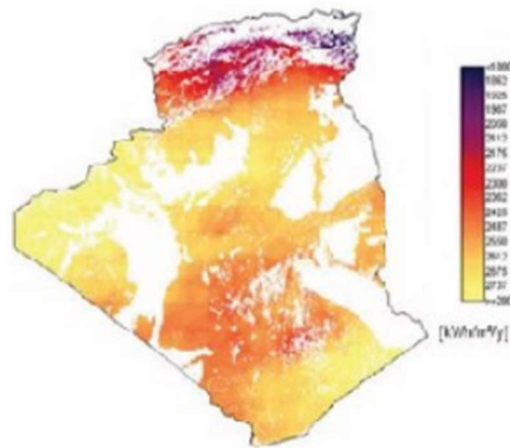


Figure (I.16) Les ressources énergétiques solaires en Algérie

I.16.Centrale solaire photovoltaïque :

I.16.1.Histoire :

Le premier parc solaire a été construit fin 1982 par Arco Solar à Lugo près d'Hesperia, en Californie, suivi en 1984 par une installation de 5,2 MWc dans la Plaine de Carrizo. Elles ont depuis été désaffectées, bien que la Plaine de Carrizo soit le site de plusieurs usines en cours de construction.

L'étape suivante a suivi les révisions de 2004 aux tarifs de rachat en Allemagne quand un volume substantiel de parcs solaires a été construit.

Plusieurs centaines d'installations de plus de 1 MWc ont depuis été installées en Allemagne, dont plus de 50 ont plus de 10 MWc. Avec l'introduction des tarifs de rachat en 2008, l'Espagne est devenue brièvement le plus grand marché, avec quelque 60 parcs solaires de plus de 10 MWc. Les États-Unis, la Chine, l'Inde, la France, le Canada, et l'Italie sont notamment devenus des marchés importants, comme le montre la liste des centrales photovoltaïques.

Les plus grands sites en construction ont des capacités de centaines de MWc et des projets à une échelle de 1 GWc sont prévus.

I.16.2.Emplacement et utilisation des terres :

La superficie requise pour une puissance de sortie souhaitée varie en fonction de l'emplacement, de l'efficacité des modules solaires, de la pente du site et du type de montage utilisé. Les panneaux solaires à inclinaison fixe utilisant des modules typiques d'environ 15 % d'efficacité sur des sites horizontaux nécessitent environ 1 hectare par MWc dans les tropiques et ce chiffre s'élève à plus de 2 hectares dans le nord de l'Europe.

I.17.Technologie :

La plupart des parcs solaires sont des systèmes PV montés au sol, également connus sous le nom de centrales solaires à champ libre¹⁶. Ils peuvent soit être inclinés fixes, soit utiliser un seul axe ou un tracker solaire à double axe. Bien que le tracker améliore les performances globales, il augmente également les coûts d'installation et de maintenance. Un onduleur solaire convertit la puissance de sortie du tableau de courant continu (CC) en courant alternatif (CA), et la connexion au réseau électrique est faite par un transformateur à haute tension, triphasé d'intensité de 10 kV ou plus.

I.17.1.Arrangements des panneaux solaires :

Les panneaux solaires sont les sous-systèmes qui convertissent le rayonnement solaire incident en énergie électrique. Ils comprennent une multitude de modules solaires, montés sur des structures de support et interconnectés pour fournir une sortie de puissance aux sous-systèmes électroniques de conditionnement de puissance.

Une minorité de parcs solaires à grande échelle sont configurés sur des bâtiments et utilisent donc des panneaux solaires intégrés aux bâtiments. La majorité est des systèmes « à champ libre » utilisant des structures montées au sol, habituellement de l'un des types qui suivent.

I.17.2.Conversion d'énergie :

Les panneaux solaires produisent de l'électricité en courant continu (CC), les parcs solaires ont donc besoin d'équipements de conversion pour les transformer en courant alternatif (CA), qui est la forme transmise par le réseau électrique. Cette conversion est effectuée par onduleurs. Pour maximiser leur efficacité, les centrales solaires intègrent également des Maximum Power Point Tracking, soit dans les onduleurs, soit en unités séparées. Ces dispositifs maintiennent chaque chaîne de panneau solaire proche de son point de puissance de crête.

Il existe deux principales possibilités pour configurer cet équipement de conversion, bien que dans certains cas individuels, ou des micro-onduleurs soient utilisés. Un seul onduleur permet d'optimiser la sortie de chaque panneau et de multiples onduleurs augmentent la fiabilité en limitant la perte de sortie lorsqu'un onduleur échoue.

I.17.3.Transformateurs :

Les onduleurs fournissent typiquement une sortie de puissance à des tensions de l'ordre de 480 V AC. Les réseaux d'électricité fonctionnent à des tensions beaucoup plus élevées de l'ordre de dizaines ou de centaines de milliers de volts, les transformateurs sont donc incorporés pour délivrer la puissance nécessaire au réseau.

Les transformateurs ont généralement une durée de vie de 25 à 75 ans et ne nécessitent normalement pas de remplacement pendant la vie d'une centrale photovoltaïque.

I.18.Centrale photovoltaïque raccordée au réseau :

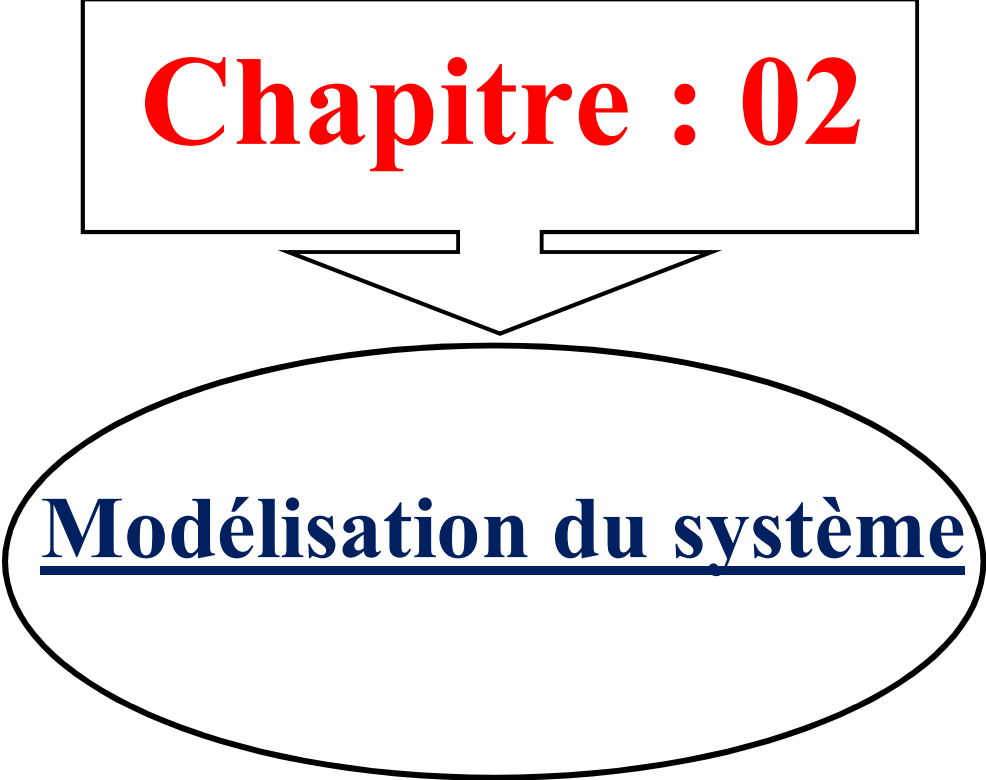
Le photovoltaïque raccordé au réseau fournit du courant électrique continu, de tension variable, via des panneaux solaires photovoltaïques. Ce courant est transformé par un onduleur en courant alternatif de fréquence, tension et phase adaptées aux caractéristiques du réseau. Il est ensuite injecté dans le réseau de distribution électrique et peut ainsi être consommé immédiatement ; cette énergie photovoltaïque peut donc être consommée par des utilisateurs proches, avec peu de pertes réseaux, comme dans le cas d'une centrale électrique traditionnelle, mais avec une production cyclique et variant en fonction de l'intensité solaire et donc de l'heure du jour et de la saison, ce qui nécessite des dispositifs de stockage (batteries).

I.19.Conclusion :

Durant plusieurs années, les installations de panneaux photovoltaïques ont été accélérées par des programmes nationaux d'incitations financières telles que des tarifs de rachats bonifiés de l'électricité produite pour le réseau public. Les États jouent donc un rôle clé dans le développement de la filière.

Le marché mondial de cellules et de panneaux photovoltaïques est dominé par une poignée de pays (Chine, Taïwan, Japon, Malaisie, Allemagne, États-Unis). La société chinoise **Suntech Power** est devenue en 2009 le premier producteur mondial de panneaux photovoltaïques. **Sharp** (Japon), **JA Solar** (Chine) et **First Solar** (Malaisie) sont d'autres grands noms de ce secteur (auquel il convenait notamment d'ajouter, jusqu'à 2012, l'entreprise allemande **Q-Cells** qui a déposé le bilan cette année-là).

Chapitre : 02



Modélisation du système

II.1. Introduction :

La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié. On doit connaître alors les critères d'entrées (donnée de base) c'est-à-dire les données météorologiques au site, les données relatives aux utilisateurs, et les données relatives aux équipements.

Dans ce chapitre, nous étudions la modélisation et la commande de la connexion d'un système photovoltaïque au réseau électrique. L'ensemble du système est constitué d'un générateur photovoltaïque, des convertisseurs (DC-DC) et des onduleurs de tension, d'un filtre et la commande à MLI (sinus triangle). La connexion de l'onduleur au réseau électrique est assurée par un filtre inductif de type (R_r , L_r). Une régulation et une commande du convertisseur (DC-DC) est établit dans le but d'extraire le maximum de puissance d'un générateur photovoltaïque et de l'injecté au réseau.

L'objectif de cette étude consiste à modéliser la cellule photovoltaïque ainsi que les convertisseurs statiques constituant notre système

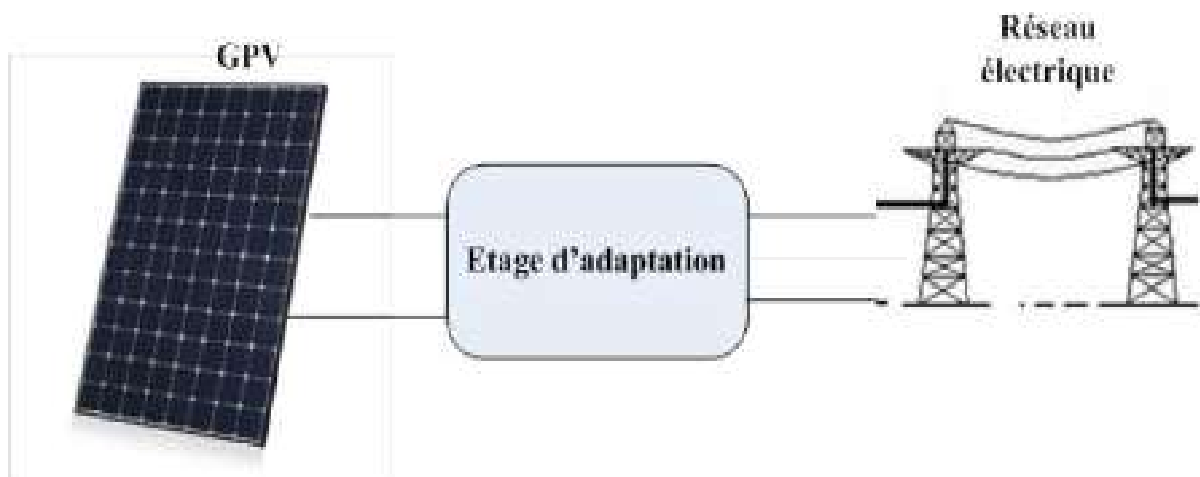


Figure (II.1) .Système d'un système PV connecté au réseau.

II.2.Modélisation du panneau photovoltaïque :

Il existe plusieurs modèles mathématiques du panneau photovoltaïque, dans ce chapitre on va présenter quelques-uns.

II.2.1.Model idéal [KEC 12]

Le panneau photovoltaïque peut être représenté par le circuit électrique équivalent donné par la figure (II.2) il se compose d'un générateur de courant et d'une diode parallèle.

Le courant I_{pv} généré par la cellule s'écrit alors.

Après la loi des nœuds on obtient alors :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (II.1)$$

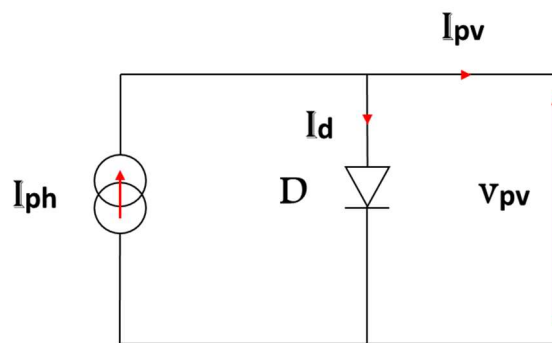


Figure (II.2) : Schéma électrique idéal d'un module photovoltaïque.

$$V_{pv} = V_d \quad (II.2)$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation suivante :

$$I_d = I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot V_{pv}}{AKT}} - 1 \right) \quad (II.3)$$

I_0 : Courant de saturation de la diode, qui est exprimé comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_0 = I_0(T_1) \times \left(\frac{T}{T_1} \right)^{\frac{3}{n}} \times e^{-q \times E_g / A \times k \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} \end{array} \right. \quad (II.4)$$

$$I_0(T_1) = \frac{I_{sc}(T_1)}{e^{\frac{q \times V_{oc}(T_1)}{A \times k \times T_1}} - 1} \quad (II.5)$$

Avec :

E_g : Tension de seuil de la diode (1.12 V).

I_{sc} : Courant de court-circuit.

V_{oc} : Tension de circuit ouvert.

q : Charge électrique qui est égale à 1.6×10^{-19} C.

K : Constante de Boltzmann ($K = 1.3854 \times 10^{-23}$ J/K).

A : Facteur de qualité de la diode.

(KT/q) : Représente le potentiel thermique.

T1 : Température à l'instant T1.

T2 : Température à l'instant T2.

I_{ph} : Courant photonique de la diode qui est donné par la relation suivante :

$$\text{Avec : } \begin{cases} I_{ph} = I_{ph}(T_1) \times [1 + k_0 \times (T_2 - T_1)] & (II.6) \\ K_0 = \frac{I_{sc}(T_2)I_{sc} - I_{sc}(T_1)}{T_2 - T_1} & (II.7) \end{cases}$$

D'après les relations (II.1) et (II.3) on obtient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \times [e^{q \times \frac{(V_{pv})}{AKT}} - 1] \quad (II.8)$$

$$I_{pv} = I_{ph}(T_1) \times [1 + K_0 \times (T_2 - T_1)] - I_0 \times [\frac{q \times (V_{pv})}{AKT} - 1] \quad (II.9)$$

II.2.2.Modèle d'un panneau à une diode avec résistance shunt [SAL 11]

Le schéma équivalent du module photovoltaïque réel tient compte d'effets résistifs ce schéma équivalent est constitué d'une diode (D), une source de courant (I_{ph}) caractérisant le photo-courant, une résistance série (R_s) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte (R_{sh}) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (R_s).

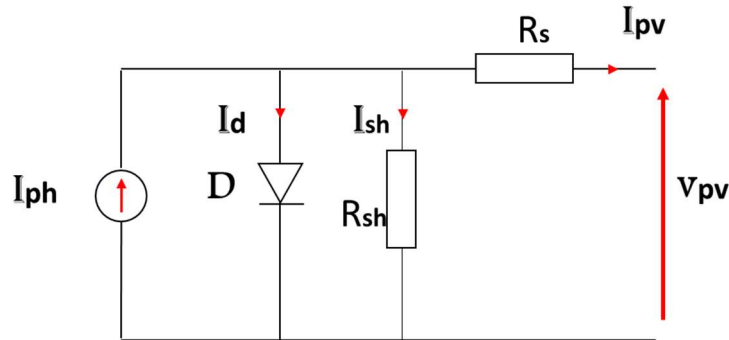


Figure (II.3) : Schéma photovoltaïque d'un module à une diode.

Le courant de sortie du module photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (II.10)$$

Le courant I_{ph} est directement dépendant du rayonnement solaire E et de la température de la cellule T_j , est donné par la relation suivante :

$$I_{ph} = P_1 \times E_1 [1 + P_2 \cdot (E - E_{ref}) + P_3 (T_j - T_{ref})] \quad (II.11)$$

$$T_j = T_a + E \left(\frac{NOCT-20}{800} \right) \quad (II.12)$$

Avec :

NOCT : Température nominale de fonctionnement de la cellule solaire.

Ta : Température ambiante.

Et Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q \times (V + R \times I_{ph})}{A \cdot n_s \cdot K \cdot T_j} - 1 \right) \right] \quad (II.13)$$

Tj : Température de la cellule en (Kelvin).

ns : Nombre de cellule en série dans un module.

Isat : Courant de saturation, il est fortement dépendant de la température, il est donné par la relation suivante :

$$I_{sat} = P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp \left(- \frac{E_g}{K \cdot T_j} \right)$$

Le courant de la résistance shunt est calculé par : (II.14)

$$I_{sh} = \frac{(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{R_{sh}} \quad (II.15)$$

Le courant du module est calculé par (II.13) (II. 15) :

$$I_{pv} = I_{ph} (E, T) - I_d (V, I_{pv}, T_j) - I_{sh} (V) \quad (II.16)$$

$$I_{pv} = P_1 \cdot E \cdot [1 + P_2 \cdot (E - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{ref})] - P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp \left(- \frac{E_g}{K T_j} \right) \cdot \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{A K T_j} \right) - 1 \right] - \frac{(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{R_{sh}} \quad (II.17)$$

Avec :

A : facteur d'idéalité de la jonction.

Eref : Irradiation ou ensoleillement de référence 1000 W/m²

Tref : Température de référence 25 °C.

II.2.3.Modèle à deux diodes (à deux exponentielles) [KEC 12]

Le module photovoltaïque est représenté par le circuit électrique suivant (figure, II.4), qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, deux diodes pour la polarisation de la cellule, une résistance shunt et une résistance série.

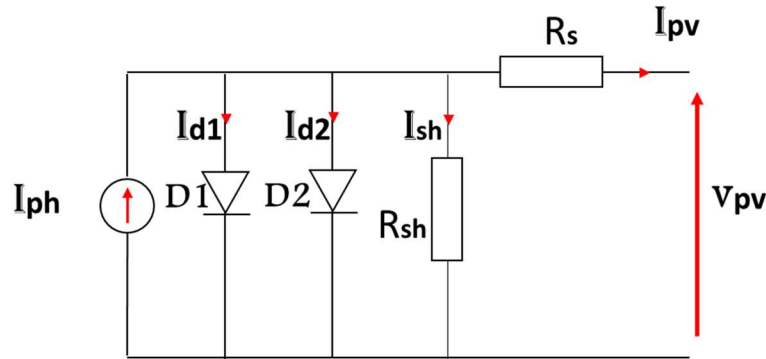


Figure (II.4) : Modèle électrique à deux diodes avec résistance shunt de la cellule PV.

Après la loi des mailles on trouve :

$$I_{pv} = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2}) - I_{sh} \quad (II.18)$$

$$I_{pv} = N_p \times \left[I_{ph} - I_{01} \times \left[e^{q \times \frac{(V_{pv} + R_s \times I_{ph})}{N_s \cdot A \cdot K T}} - 1 \right] - I_{02} \times \left[e^{q \times \frac{(V_{pv} + R_s \times I_{ph})}{N_s \cdot A \cdot K T}} - 1 \right] - \left[\frac{V_{pv} + (R_s \times I_{ph})}{R_{sh}} \right] \right] \quad (II.19)$$

I₀₁ : Courant de saturation de la diode 1.

I₀₂ : Courant de saturation de la diode 2.

II.2.4.Modèle à une diode (implicite) [OUA 11]

Un modèle électrique empirique simple, le plus proche du générateur photovoltaïque, est actuellement le plus utilisé en raison de la qualité des résultats obtenus, c'est le modèle à une diode et sans résistance shunt.

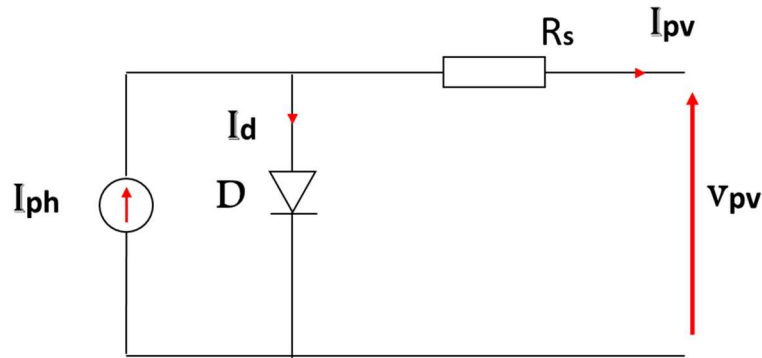


Figure (II.5) : Modèle électrique à une diode sans résistance shunt.

L'expression du courant de la cellule est donnée par les expressions suivantes :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d = I_{sc} \cdot \{ 1 - K_1 \cdot [\exp(K_2 \cdot V_{PV}^m) - 1] \} \quad (II.20)$$

Avec :

I_{ph} : Représente le photon-courant, il dépend de l'ensoleillement et de la température.

I_d : Courant de polarisation de la jonction P-N.

Où les coefficients K_1 , K_2 , K_3 , K_4 et m sont donnés par :

$$K_1 = 0.01175. \quad (II.21)$$

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{oc}^m} \quad (II.22)$$

$$K_3 = \left[\ln \left[\frac{I_{sc}(1+K_1) - I_{mpp}}{K_1 I_{sc}} \right] \right] \quad (II.23)$$

$$K_4 = \ln \left[\frac{(1+K_1)}{K_1} \right] \quad (II.24)$$

$$m = \frac{\ln \frac{K_3}{K_4}}{\ln \left(\frac{V_{mpp}}{V_{oc}} \right)} \quad (II.25)$$

Où :

I_{mpp} : Courant au point de puissance maximale appelé aussi courant optimum (I_{opt}).

V_{mpp} : Tension au point de puissance maximale ou tension optimale (V_{opt}).

I_{sc} : Courant en circuit ouvert.

V_{co} : Tension en circuit ouvert.

On applique L'équation (II.20) que pour un niveau d'insolation E et de température particuliers ($E = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$), Relatifs aux conditions standards de fonctionnement, ces derniers influent sur les paramètres qui varient selon les équations suivantes :

$$\Delta T_c = T_c - T_{stc} \quad (II.26)$$

$$\Delta I_{pv} = \alpha_{sc} \left(\frac{E}{E_{stc}} \right) \cdot \Delta T_c + \left[\left(\frac{E}{E_{stc}} \right) - 1 \right] \cdot I_{stc} \quad (II.27)$$

$$\Delta V_{pv} = -\beta_{oc} \cdot \Delta T_c - R_s \cdot \Delta I_{pv} \quad (II.28)$$

Avec :

E et E_{stc} : Représente respectivement, le niveau d'insolation dans les conditions standards de fonctionnement et des conditions quelconques.

ΔE : Représente la variation de l'ensoleillement.

T_{stc} et T_c : représente respectivement, la température dans les conditions standards de fonctionnement et dans les conditions quelconques.

ΔT_c : Désigne la variation de la température.

ΔI_{pv} : Désigne la variation du courant par rapport à l'insolation et à la température.

Δv : Désigne la variation de la tension par rapport à l'ensoleillement et à la température.

α_{cs} : Définit en tant que coefficient de courant de changement de la température [A/°C].

β_{oc} : Définit en tant que coefficient de tension de changement de la température [A/°C].

Nous obtiendrons alors les nouvelles valeurs du courant ainsi que de la tension photovoltaïque qui seront représentées par les équations suivantes :

$$I_{PV \text{ nouv}} = I_{stc} + \Delta I_{pv} \quad (II.29)$$

$$V_{PV \text{ nouv}} = V_{stc} + \Delta V_{pv} \quad (II.30)$$

Dans notre cas on a choisi le modèle d'un module photovoltaïque à une diode (modèle implicite) qui est représenté ci-dessus.

II.2.5. Caractéristiques courant / tension d'un panneau :

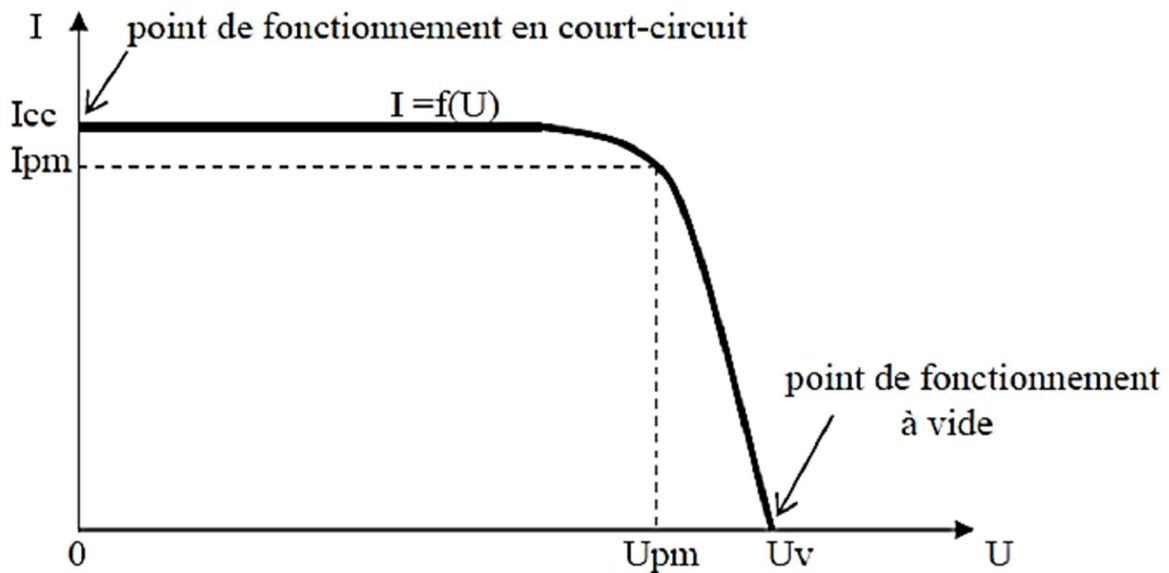
Sur cette courbe, on repère :

Le point de fonctionnement à vide : U_v pour $I = 0A$

Le point de fonctionnement en court-circuit : I_{cc} pour $U = 0V$

Pour une cellule monocristalline de 10x10cm, les valeurs caractéristiques sont :

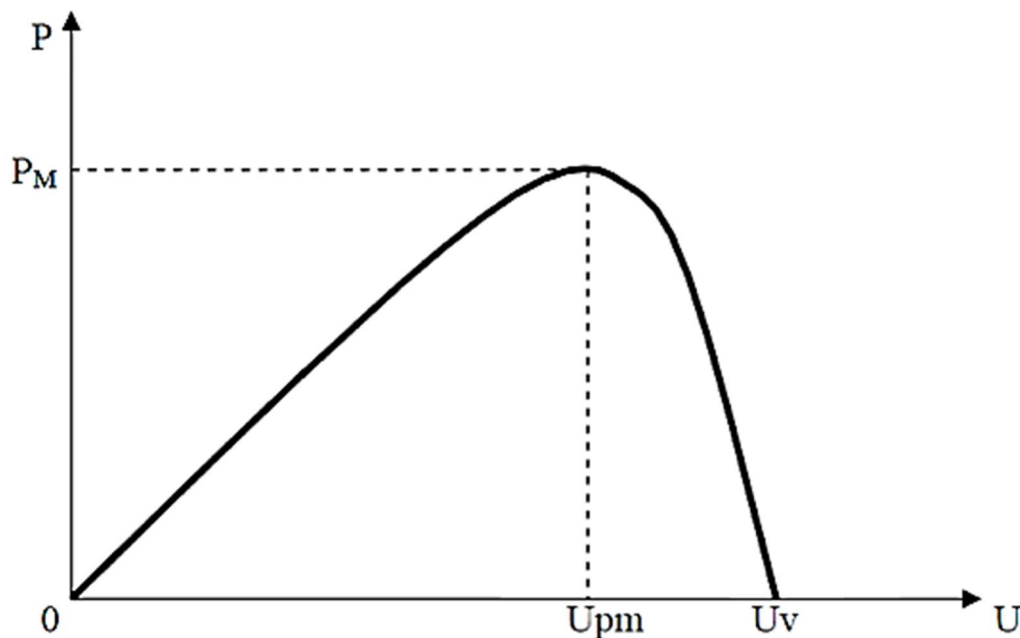
$I_{cc} = 3A$ et $U_v = 0,57V$ pour une irradiance de $G = 1000W/m^2$ et une température $T = 25^\circ C$. (Repris de catalogue de ressource pédagogique de l'enseignement technologique universitaire (iutenligne))



Figure(II.6) : A température et éclairement fixés, courbe courant / tension d'une cellule

II.2.6.Caractéristiques puissance / tension d'un panneau :

La puissance délivrée par la cellule a pour expression $P = U.I$. Pour chaque point de la courbe précédente, on peut calculer la puissance P et tracer la courbe $P = f(U)$. Cette courbe a l'allure suivante :



Figure(II.7) : A température et éclairement fixés, courbe puissance/tension d'une cellule

Cette courbe passe par un maximum de puissance (P_M).

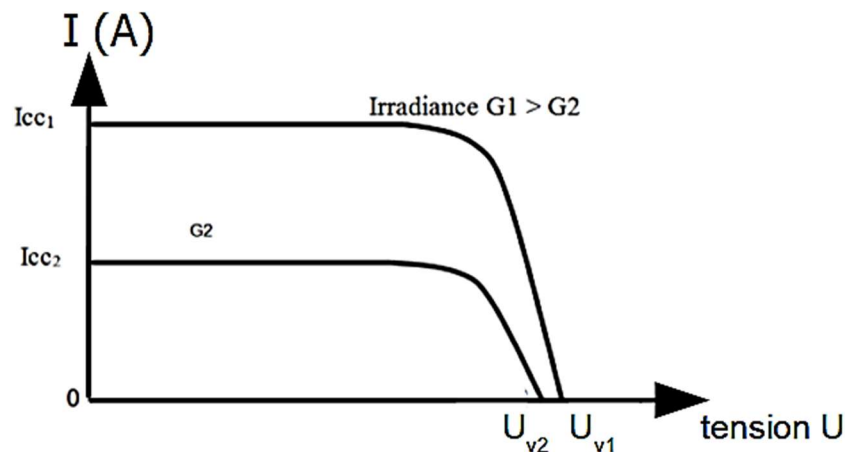
A cette puissance correspond, une tension U_{pm} et un courant I_{pm} que l'on peut aussi repérer sur la courbe $I = f(U)$.

Il y a un compromis entre la tension et le courant du panneau pour avoir une puissance maximale.

Pour une cellule monocristalline de 10x10cm, les valeurs caractéristiques sont: $PM = 1,24W$, $U_{pm} = 0,45V$, $I_{pm} = 2,75A$ ($G = 1000W/m^2$ et $\theta = 25^\circ C$).

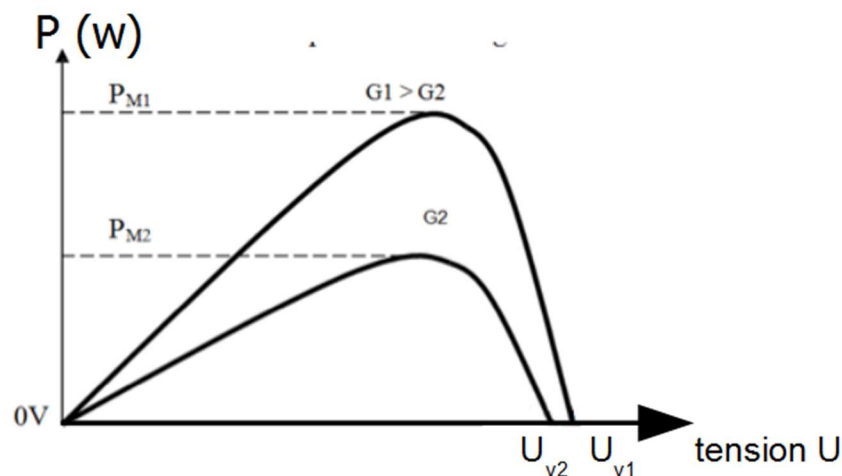
II.2.7. Influence de l'éclairement et de la température :

A température constante, la caractéristique $I = f(U)$ dépend évidemment fortement de l'éclairement : sur la courbe suivante, on remarque que le courant de court-circuit augmente avec l'éclairement $G_1 > G_2$ alors que la tension à vide varie peu.



Figure(II.8) : courbe courant / tension d'une cellule pour 2 valeurs irradiantes.

A partir de la courbe précédente, on peut tracer les courbes de puissance $P = f(U)$ pour les 2 éclairements. On remarque que la puissance maximum délivrée par la cellule augmente avec l'éclairement.



Figure(II.9) : courbe puissance / tension d'une cellule pour 2 valeurs irradiantes

La tension à vide et la puissance maximum diminuent très faiblement lorsque la température augmente.

II.2.8. Regroupement série ou parallèle de panneaux ou cellules :

Le **groupement série** : permet d'augmenter la tension de sortie. Pour un groupement de n cellules montées en série la tension de sortie U_s a pour expression générale :

$$U_s = n \cdot U_c \quad (\text{II.31})$$

Avec U_c : tension fournie par une cellule

Pour ce groupement, le courant est commun à toutes les cellules.

Le **groupement en parallèle** : permet d'augmenter le courant de sortie. Pour un groupement de n cellules montées en parallèle, le courant de sortie I_s a pour expression générale :

$$I_s = n \cdot I \quad (\text{II.32})$$

Avec I : courant fourni par une cellule

II.3. Electronique de puissance et la conversion électrique :

L'énergie électrique est surtout distribuée sous forme de tensions alternatives sinusoïdales ou continues. L'électronique de puissance permet de modifier la présentation de l'énergie électrique pour l'adapter aux différents besoins. L'électronique de puissance utilise des convertisseurs statiques. Ces derniers seront modélisés comme suit :

II.3.1. Les hachures :

Hacheur ou convertisseur continu-continu (DC /DC), il permet de régler le transfert d'énergie d'une source continue vers la charge avec un rendement élevé. Selon la structure, il peut être abaisseur ou élévateur de tension et, dans certaines conditions, renvoyer de l'énergie à l'alimentation.

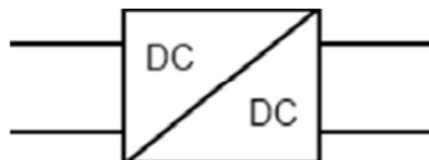


Figure (II.10) : Symbole d'un convertisseur DC-DC

Les deux types les plus utilisés :

- Hacheur abaisseur (ou Buck).
- Hacheur élévateur (ou Boost).

II.3.1.1.Hacheur abaisseur (Buck):

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

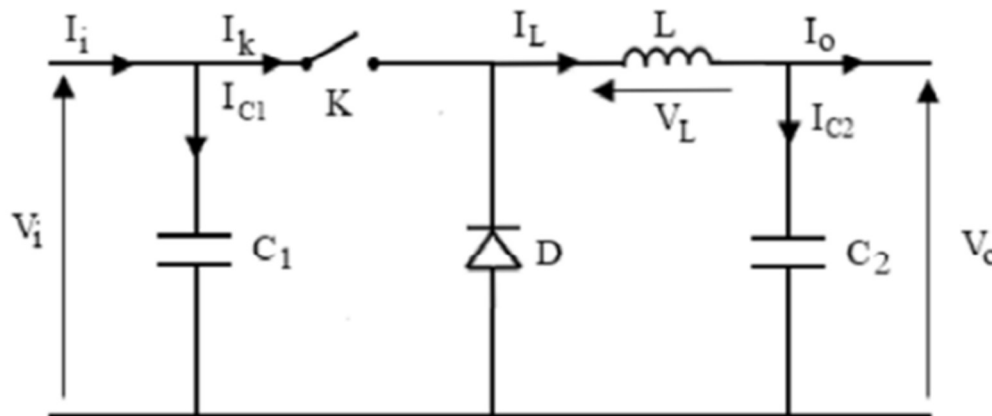


Figure (II.11) : Schéma électrique d'un hacheur Buck.

✓ Fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , la tension appliquée aux bornes de la diode est V_i . La source V_i fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps $t \in [\alpha T_e, T_e]$, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle.

$$V_o = \alpha \cdot V_i \quad (\alpha \text{ c'est le rapport cyclique})$$

✓ Modèle mathématique équivalent :

Pour savoir le comportement réel nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par la suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure (II.12) montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec le commutateur fermé, tandis que la figure (II.13) représente le convertisseur dévolteur avec le commutateur ouvert pendant $(1 - \alpha) T_e$.

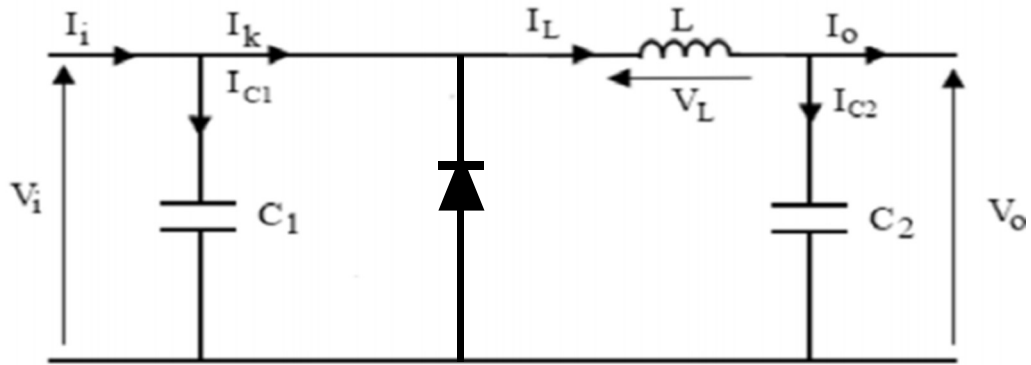


Figure (II.12) : Schéma électrique d'un hacheur Buck fermé.

Lorsqu'on applique la loi de Kirchhoff sur le circuit ci-dessus on aura les équations suivantes :

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (II.33)$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \quad (II.34)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \quad (II.35)$$

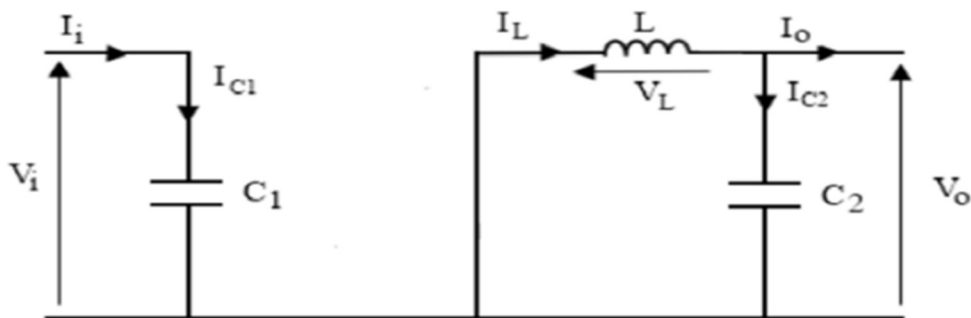


Figure (II. 13) : Schéma électrique d'un hacheur Buck ouvert

Les équations suivantes sont déduites de la figure (II.13) :

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) \quad (II.36)$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L - I_o(t) \quad (II.37)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = -V_o(t) \quad (II.38)$$

II.3.1.2.Hacheur élévateur (Boost) :

C'est un convertisseur DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

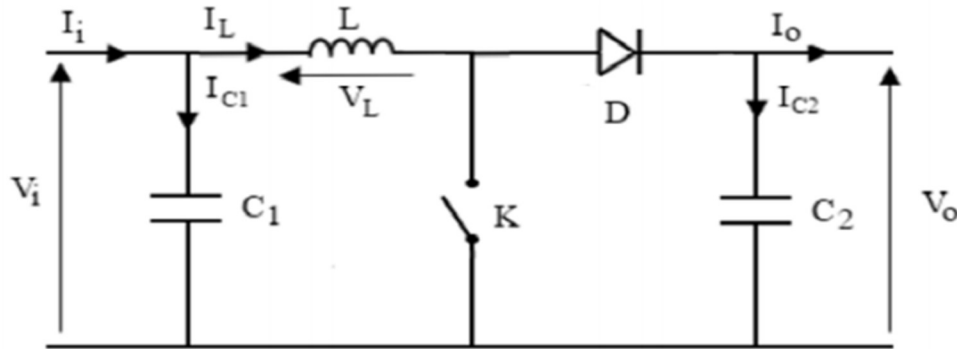


Figure (II.14) : Schéma électrique d'un hacheur boost.

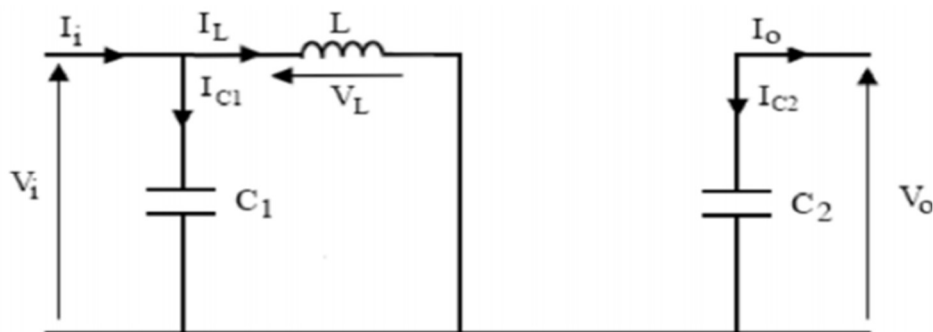
✓ Fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps $t \in [\alpha T, T_e]$, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. On a alors $V_k = V_o$. En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à :

$$V_o (1 - \alpha) = V_i \quad (II.39)$$

✓ Modèle mathématique équivalent :

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. celui de la figure (II.14), présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c.-à-d. entre $[0, \alpha T_a]$.



Figure(II.15) : Schéma électrique d'un hacheur boost fermé

Comme pour le circuit Buck, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (\text{II.40})$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t) \quad (\text{II.41})$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) \quad (\text{II.42})$$

À l'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant :

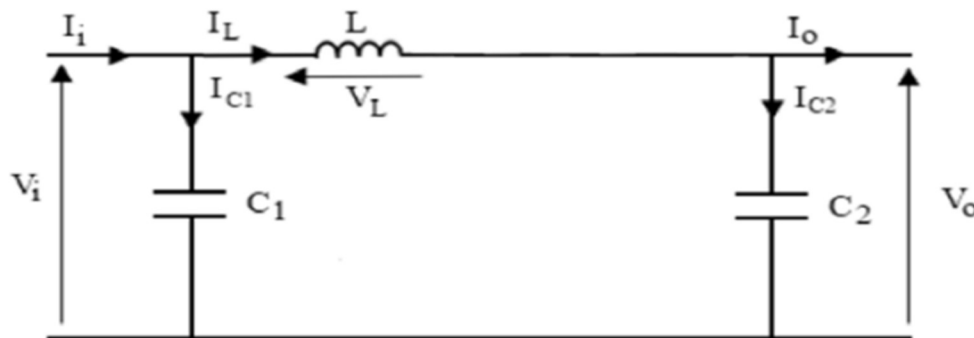


Figure (II.16) : Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert.

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (\text{II.43})$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \quad (\text{II.44})$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \quad (\text{II.45})$$

II.4.Modélisation du convertisseur DC/AC (Onduleur) :

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Le schéma de symbole d'onduleur monophasé et triphasé est donné dans la figure ci-dessous :

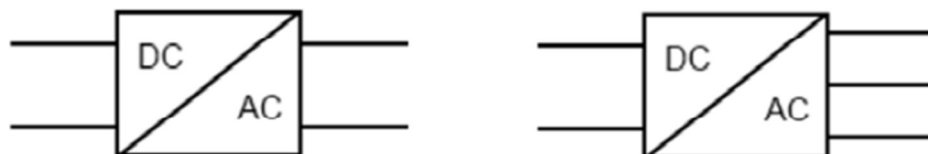


Figure (II.17) : Symboles du convertisseur DC-AC monophasé et triphasé.

Dans notre cas on choisit l'onduleur triphasé, Les tensions composées V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} sont obtenues à partir de ces relations :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

Avec : V_{ao} , V_{bo} , V_{co} sont les tensions à l'entrée de l'onduleur (continues). On a pris le point « O » comme référence pour ces dernières tensions. Les trois tensions à l'entrée continue sont données par les relations qui suivent :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (\text{II.47})$$

Avec : V_{an} , V_{bn} , V_{cn} sont les tensions de phase de la charge, ou de sortie de l'onduleur et V_{no} est la tension du neutre de la charge par rapport au point « O ». On a supposé que la charge est équilibrée c.à.d.

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.48})$$

En remplaçant (II.46) dans (II.45) on aura :

$$V_{no} = \frac{1}{3} \times (V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{II.49})$$

Puis en remplaçant (II.47) dans (II.44) on aura :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3} \times (2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3} \times (2V_{bo} - V_{ao} - V_{co}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3} \times (2V_{co} - V_{ao} - V_{bo}) \end{cases} \quad (\text{II.50})$$

Si on suppose que :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{dc} \cdot S_a \\ V_{bo} = V_{dc} \cdot S_b \\ V_{co} = V_{dc} \cdot S_c \end{cases} \quad (II.51)$$

Si est l'état de l'interrupteur K_i tel que :

$S_i = 1$ si K_i fermé.

$S_i = 0$ si K_i ouvert.

Donc :

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}$$

Le courant modulé par l'onduleur est donné par :

$$I_{ond} = S_a \cdot i_a + S_b \cdot i_b + S_c \cdot i_c \quad (II.52)$$

II.5.Modélisation du filtre RL associé au convertisseur :

La liaison au réseau électrique est réalisée via un filtre d'entrée du premier ordre RL, ayant pour objectifs de respecter l'alternance des sources et d'empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau.

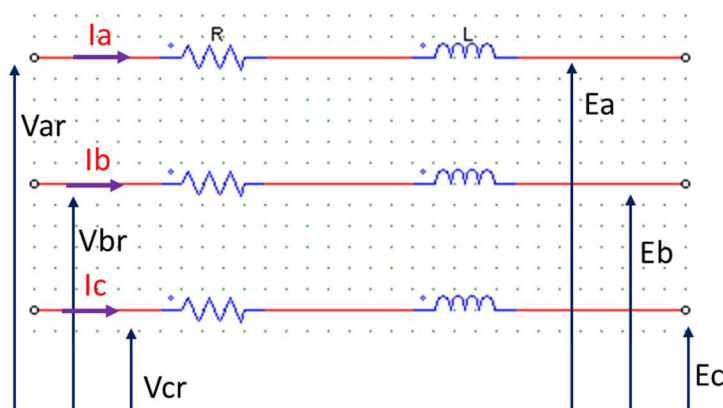


Figure (II. 18) : Représentation du filtre RL

L'application de la loi des mailles pour chaque phase au point de raccordement du filtre donne les équations qui lient les tensions modulées par le convertisseur et les courants transitant le filtre :

$$\begin{cases} V_{ar} = R_f + L_f \cdot \frac{di_{ar}}{dt} + E_a \\ V_{br} = R_f + L_f \cdot \frac{di_{br}}{dt} + E_b \\ V_{cr} = R_f + L_f \cdot \frac{di_{cr}}{dt} + E_c \end{cases} \quad (II.53)$$

D'où

$$\begin{cases} I_{ar} = \frac{1}{R_f + L_f \cdot P} (V_{ar} - E_a) \\ I_{br} = \frac{1}{R_f + L_f \cdot P} (V_{br} - E_b) \\ I_{cr} = \frac{1}{R_f + L_f \cdot P} (V_{cr} - E_c) \end{cases} \quad (II.54)$$

II.6. Modélisation du réseau électrique :

Les charges sont des éléments consommateurs d'énergie électrique dans un système. La consommation de cette puissance électrique dépend des caractéristiques de la charge. Une modélisation correcte de ces caractéristiques est indispensable pour représenter finement le comportement de la charge connecté à l'onduleur de tension. Qui peut être une charge R ou un réseau basse tension à travers un filtre.

Notre réseau électrique peut être modélisé par les équations suivantes :

$$\begin{cases} E_a(t) = E\sqrt{2} \sin wt. \\ E_b(t) = E\sqrt{2} \sin(wt - \frac{2\pi}{3}) \\ E_c(t) = E\sqrt{2} \sin(wt - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (II.55)$$

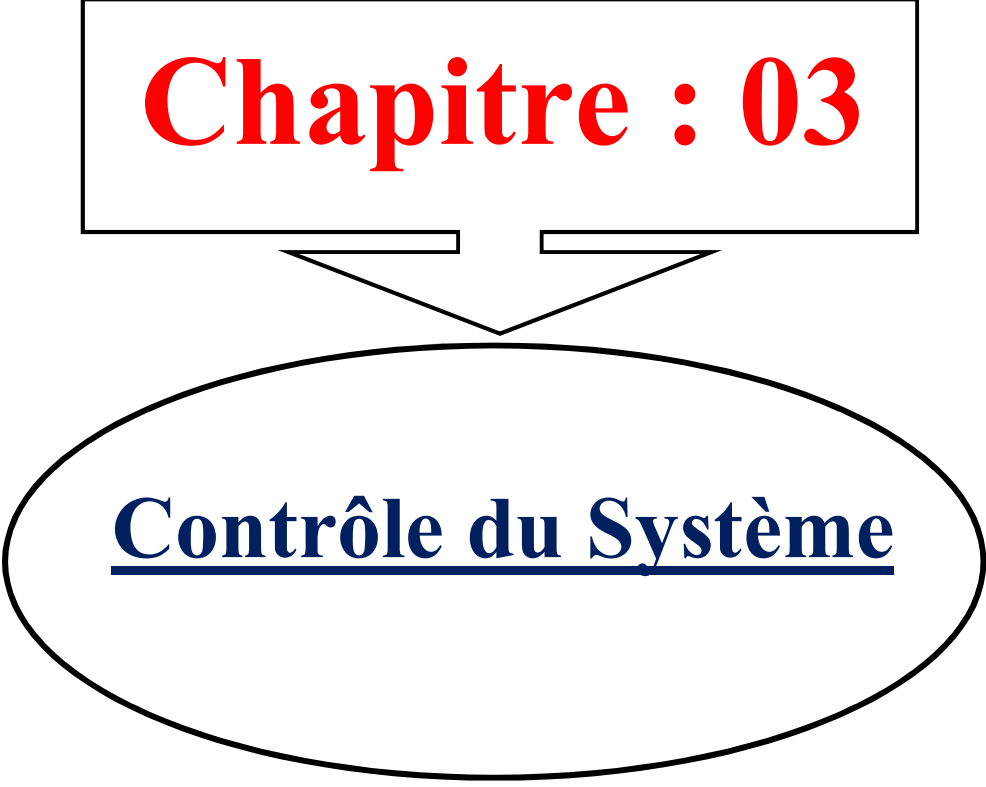
II.7.Poursuite du point de puissance maximal (PPM) :

Par définition, une commande MPPT (maximum power point Tracking) associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques, la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{mpp} , I_{mpp}). Dans le chapitre suivant nous irons l'expliquer d'une façon plus claire.

II.8.Conclusion :

La modélisation de chaque composant du système photovoltaïque complet a été élaborée à partir de modèles de la littérature (champ PV, convertisseurs, et MPPT) ; cette modélisation est une étape essentielle qui nous permet d'introduire un certain nombre de modèles puis d'évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres constitutants. Dans un système énergétique photovoltaïque, on désire toujours travailler au voisinage du point de puissance maximale MPP, afin de minimiser au maximum les pertes en énergie produite, et obtenir une bonne qualité d'énergie.

Chapitre : 03



Contrôle du Système

III.1.Introduction :

Le but de ce sujet (contrôle de système) dans ce chapitre est d'étudier et de développer des stratégies de commande robuste d'un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique triphasé afin d'atteindre les objectifs fondamentaux suivants :

- ✓ La gestion d'énergie électrique entre le générateur photovoltaïque et la charges et le réseau.
- ✓ La poursuite du point de puissance maximal (MPPT) délivrée par le générateur photovoltaïque quel que soit les conditions atmosphériques.
- ✓ L'injection au réseau des courants sinusoïdaux en phase avec les tensions triphasées de réseau par une faible distorsion harmonique.

Le module photovoltaïque est un générateur de puissance finie pouvant fonctionner selon toute combinaison de courant et de tension, la meilleure combinaison s'appelle le point de puissance maximale (PPM) qui donne une puissance maximale pour un éclairement et une température donnée. La tension et le courant correspondants sont appelés tension optimale et courant optimum. Une connexion directe ne permet pas de faire fonctionner le module à sa tension optimale (puissance maximal) cependant, Il est possible d'insérer un convertisseur DC/DC d'adaptation, appelé extracteur du point de puissance maximale (maximum power point tracker(MPPT)), entre la source photovoltaïque et la charge qui permettra alors la recherche du (MPP). (Voir figure III.1).

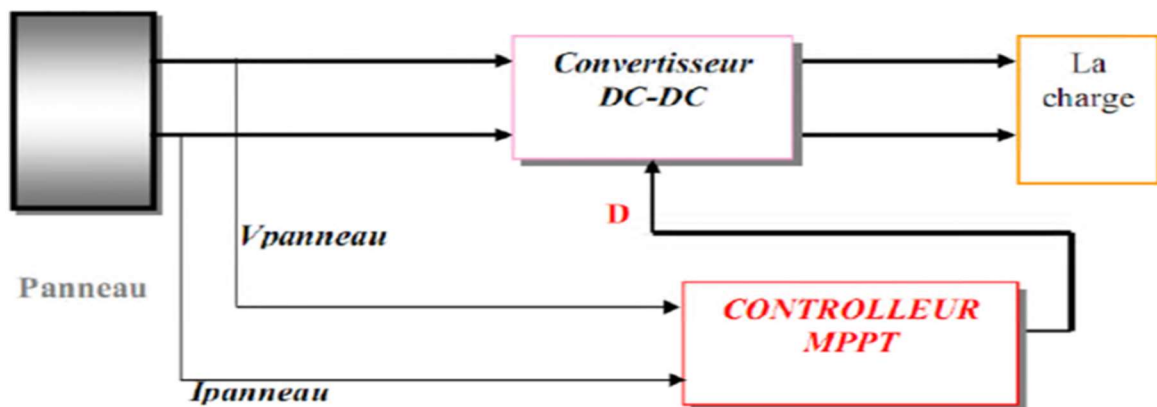


Figure (III.1) : chaine de conversion photovoltaïque avec convertisseur DC/DC.

III.2.Recherche le point de puissance maximum (MPP) :

Au cours des années, plusieurs algorithmes(MPPT) ont été développés et largement adaptés afin de déterminer le point de puissance maximum.

III.2.1.Méthode de courbe d'ajustage (Curve-fitting méthode) [BEL 09]

La caractéristique non linéaire du générateur photovoltaïque peut être modélisée en utilisant des équations mathématiques ou des approximations numériques. Cependant, leurs résolution est très difficile par des commandes numériques conventionnelles. Par conséquent, leurs applications ne semblent pas appropriées pour obtenir le MPP. Néanmoins, d'autres approches basées sur ce modèle sont employées.

L'équation (III.1) représente la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un générateur photovoltaïque, où (a,b,c et d) sont des coefficients déterminés par le prélèvement des valeurs de la tension photovoltaïque V_{pv} , du courant I_{pv} , et de la puissance P_{pv} . la tension optimal qui correspond à la puissance maximale est obtenu par l'équation (III.2)

$$P_{pv} = a. V^3_{pv} + b. V^2_{pv} + C. V_{pv} + d \quad (III.1)$$

$$V_{opt} = \frac{-b\sqrt{b^2-3ac}}{3a} \quad (III.2)$$

Les variations des conditions climatiques désavantagent beaucoup cette méthode vu que les approximations numériques ne seront plus valides.

III.2.2.Méthode de la table de consultation (look-up table) [BEL 09]

Dans cette méthode, les valeurs mesurées de la tension et du courant photovoltaïque sont comparées à ceux stockées dans le système de commande, qui correspond à ceux dans les équations optimale de fonctionnement, sous des conditions climatiques réelles. Cet algorithme nécessite une grande capacité de mémoire pour le stockage des données et l'exécution doit être ajustée en fonction du panneau photovoltaïque utilisé, en plus, il est difficile d'enregistrer et de stocker toutes les conditions possibles du fonctionnement du système.

III.2.3.Méthode de tension en circuit ouvert du générateur photovoltaïque (Open-circuit voltage photovoltaic generator method) [KEC 12]

Cette méthode est basée sur la tension du générateur PV au point de puissance maximale qui est approximativement proportionnelle à sa tension à circuit ouvert V_{oc} . La constante proportionnelle k_1 , dépend de la technologie des cellules photovoltaïques, du facteur de forme et des conditions météorologiques.

$$K_1 = \frac{V_{mpp}}{V_{oc}} \quad (III.3)$$

La tension de circuit ouvert du générateur PV est mesurée en arrêtant le système, cette opération s'effectue à une certaine fréquence, et la tension de fonctionnement est ajustée sur le point de puissance maximale. Bien que cette méthode soit apparemment simple, il est difficile de choisir une valeur optimale de k_1 . Cette méthode souffre donc d'inexactitude mais présente l'avantage d'être simple et à bas prix. Aussi, l'interruption de service à la limite des systèmes avec stockage où la déconnexion des panneaux est « transparente » pour l'utilisateur.

III.2.4.Méthode de courant de court-circuit du générateur PV (Short circuit current photovoltaic generator method) [KEC 12]

Cette méthode est similaire à la précédente et qui est basée sur la proportionnalité existante entre le courant de court-circuit et le courant au point de puissance maximale :

$$K_2 = \frac{I_{mpp}}{I_{sc}} \quad (III.4)$$

Cette méthode présente les mêmes avantages et inconvénients que ceux de la méthode de la tension de circuit ouvert.

III.2.5.Méthode de la conductance incrémentielle [MEC 13]

La méthode par incrémentation de conductance se résulte en dérivant la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension et en mettant le résultat égal à zéro. Ceci peut être décrit par les équations suivantes :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (III.5)$$

$$\frac{1}{V_{pv}} \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{1}{V_{pv}} \quad (III.6)$$

On définit la conductance de la source $\frac{1}{V_{pv}}$ et incrémentation de la conductance $\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}$.

Puisque la tension V_{pv} du panneau est toujours positive, le point de puissance maximale MPP est alors atteint si la conductance de la source égale l'incrémentation de la conductance de la source avec un signe moins, et qu'elle est à gauche de ce point lorsque la conductance est supérieure il incrémente la conductance et vice-versa, comme suit :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0 \text{ si } \frac{1}{V_{pv}} > -\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (\text{III.7})$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \text{ si } \frac{1}{V_{pv}} = -\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (\text{III.8})$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0 \text{ si } \frac{1}{V_{pv}} < -\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (\text{III.9})$$

III.2.5.1.Algorithme d'incrément de conductance :

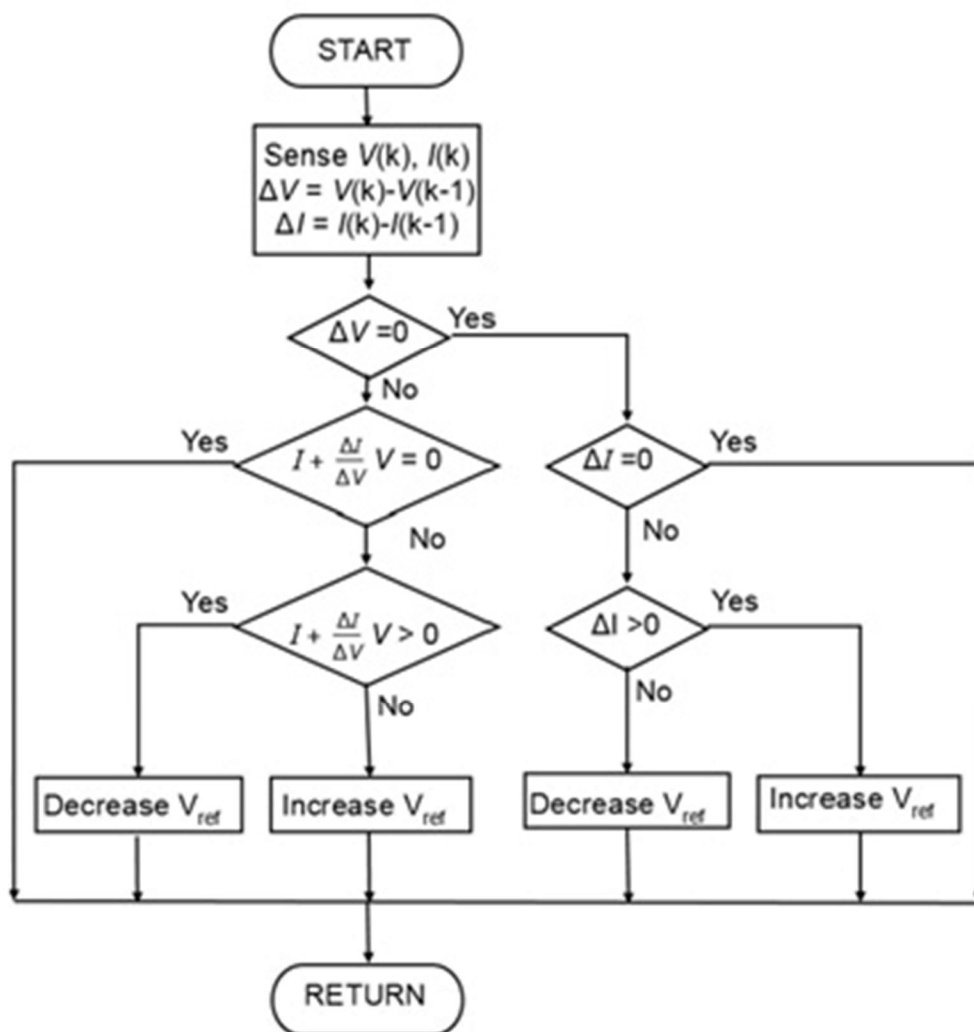


Figure (III.2) : Algorithme d'incrément de conductance

III.2.6.Méthode de perturbation observation (P&O) [OUA 11]

Le principe de la commande MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte ainsi, comme l'illustre la figure (III.3), On peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande appropriée. En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

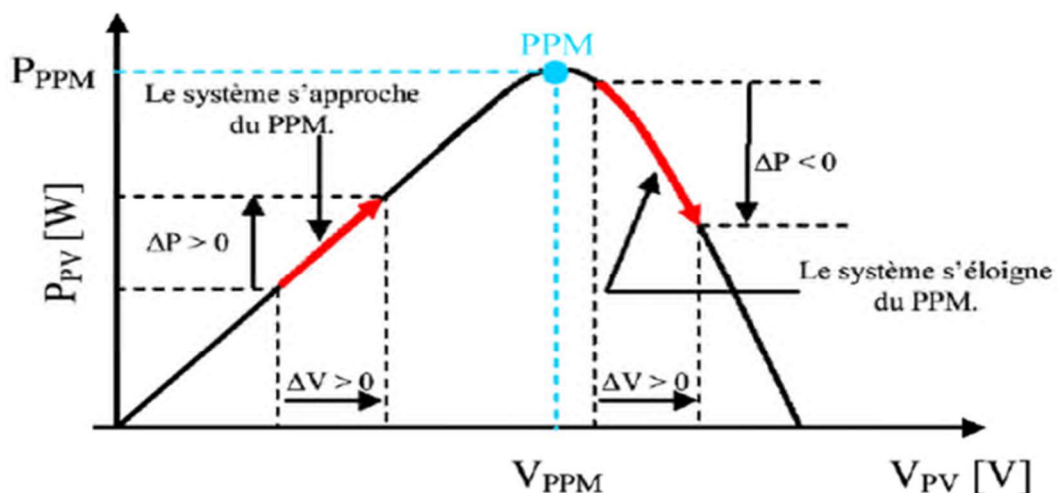


Figure (III. 3) : Caractéristique P_{pv} (V_{pv}) d'un panneau solaire.

La figure (III.4) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

III.2.6.1. Algorithme de perturbation et observation :

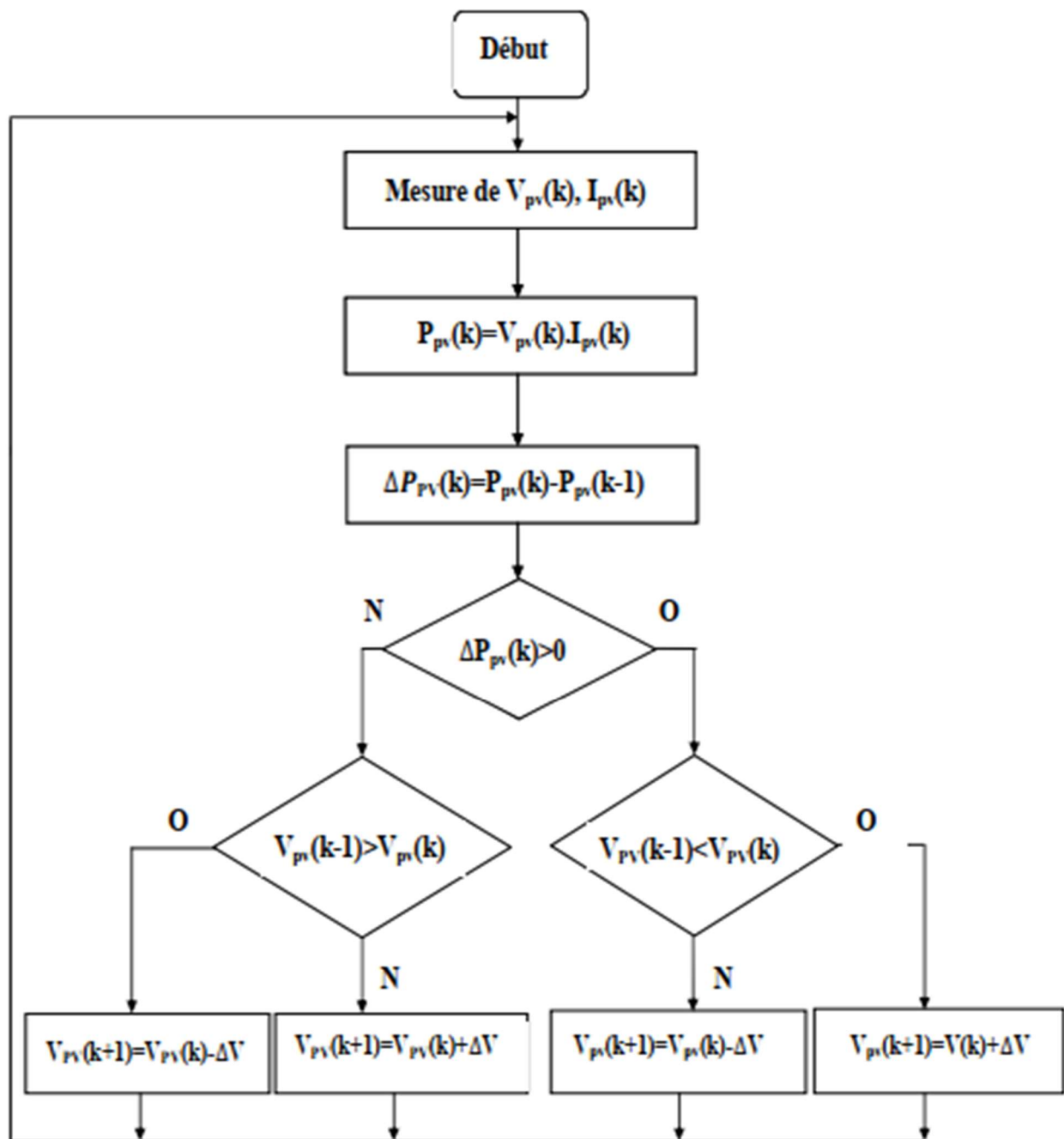


Figure (III.4) : Organigramme de l'algorithme perturbation et observation.

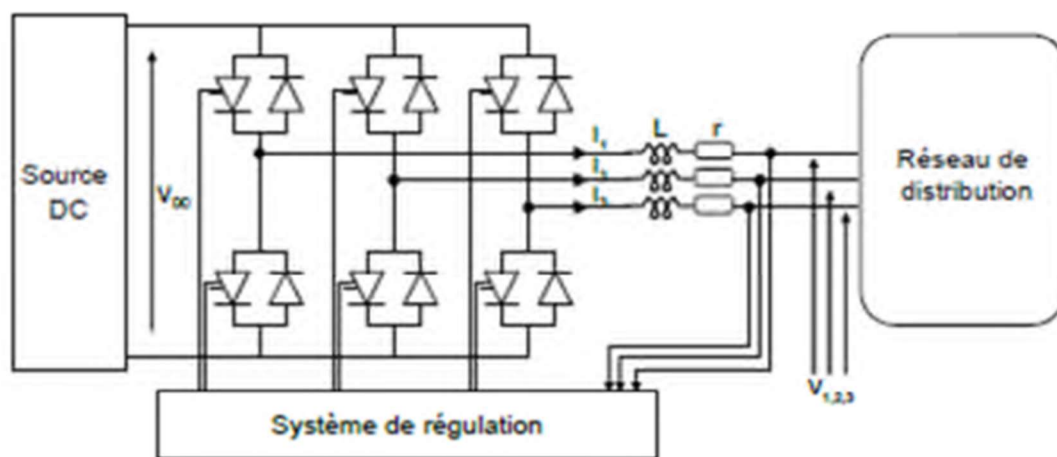
III.3. Contrôle de la liaison Onduleur-réseau électrique :

L'interface de la liaison au réseau est constituée d'un bus continu, d'un convertisseur triphasé et d'un filtre d'entrée de nature (RL). Cette interface permettra de fonctionner comme une source de courant liée au réseau électrique.

L'objectif du convertisseur est d'assurer le bon fonctionnement des convertisseurs en régulant la tension du bus continu à une valeur suffisamment élevée. Le contrôle de cette tension se fait en jouant sur la puissance active transitée au réseau.

III.4. Présentation de la structure du système côté Onduleur- réseau :

La figure ci- dessous représente la structure de l'onduleur triphasé connecté au réseau électrique :



Figure(III.5) : Schéma de structure d'un onduleur de tension triphasé connecté au réseau.

III.5. Etude de la partie contrôle de la structure proposée :

III.5.1. Onduleur de tension [ABB 11]

La figure (III.5) présente un onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de trois bras d'interrupteurs de courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor (GTO ou IGBT). Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} de tension V_{dc} . Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (R, L) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau.

En pratique, la commande des deux semi-conducteurs d'un même bras se fait de manière complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre.

Afin d'éviter un court-circuit à cause du délai de blocage des interrupteurs, il faut insérer sur un même bras, un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre. Avec l'hypothèse de commutation instantanée. Par conséquent, le condensateur ne risque aucun court-circuit.

III.5.2. Différentes commandes de l'onduleur [OUA 11]

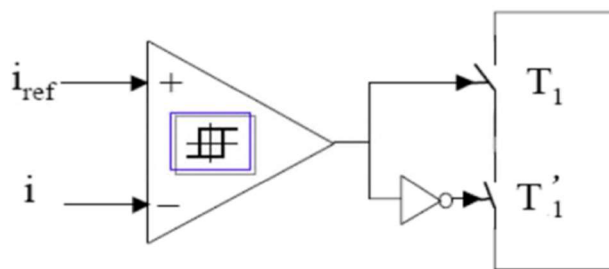
Deux stratégies de commande de l'onduleur de tension sont principalement mises en œuvre : la commande par MLI et la commande par hystérésis. La commande par hystérésis, elle peut être à bande fixe, à bande variable ou bien encore dite « modulée ». Dans notre travail, nous présenterons les modes de commande suivants :

- Hystérésis conventionnelle.
- Hystérésis modulée

III.5.2.1. Contrôle des courants par hystérésis classique [ABB 11]

Le principe du contrôle des courants par hystérésis consiste à maintenir chacun des courants générés dans une bande enveloppant les courants de référence. Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation.

La différence entre le courant de référence et celui mesuré est appliquée à l'entrée d'un comparateur à hystérésis dont la sortie fournit directement l'ordre de commande des interrupteurs du bras correspondant de l'onduleur. La figure ci-dessous présente le schéma de contrôle.



Figure(III.6) : contrôle du courant par hystérésis classique

La simplicité de la mise en œuvre de cette stratégie est son avantage, tandis que la fréquence de commutation variable peut être son inconvénient. Celui-ci peut être remédié par une version de contrôle par hystérésis avec une fréquence de commutation fixe (hystérésis modulée).

III.5.2.2. Contrôle des courants par hystérésis modulée [OUA 11]

La commande par hystérésis modulée a pour objectif de résoudre l'inconvénient majeur de la commande par hystérésis conventionnelle en fixant la fréquence de commutation des semi-conducteurs. Cette commande consiste à ajouter aux signaux (i_a^* , i_b^* , i_c^*) un signal triangulaire i_{tr} , de fréquence f_{tr} et d'amplitude A_{tr} . La fréquence f_{tr} doit être choisie égale à la fréquence de commutation que l'on souhaite imposer aux composants de puissance. Le signal ainsi obtenu attaque alors l'entrée d'un régulateur à hystérésis de largeur de bande dont la sortie permet de commander les interrupteurs de puissance. Le schéma de cette commande est décrit à la figure suivante :

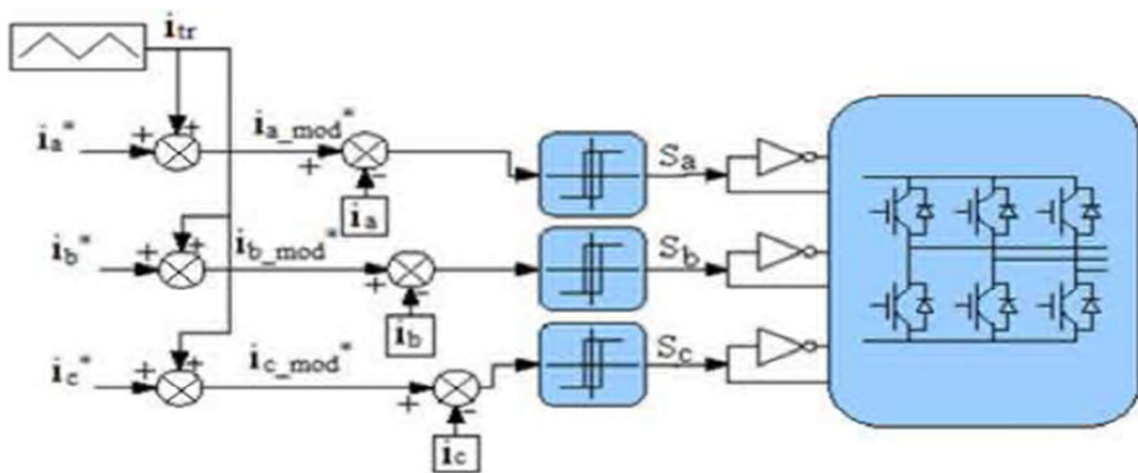


Figure (III. 7) : Contrôle des courants de l'onduleur par hystérésis modulée.

Dans le cas du contrôle par hystérésis modulée, il est important de dimensionner correctement les valeurs des deux paramètres déterminants, à savoir A_{tr} du signal triangulaire et B_h . Si ces paramètres ne sont pas correctement déterminés, la fréquence de commutation des interrupteurs de puissance sera soit supérieure, soit inférieure, à la fréquence souhaitée.

En effet, afin de fixer la fréquence de commutation en régime permanent, il ne doit exister que deux intersections entre le courant réel et la bande hystérésis pendant chaque période T : la première avec la limite inférieure du contrôleur d'hystérésis et la deuxième avec sa limite supérieure. Si cette condition est respectée, on aura ainsi une fréquence de commutation des interrupteurs constante et égale à celle du signal triangulaire.

On peut calculer A_{tr} , B_h à partir des deux cas extrêmes de vitesses de changement du courant :

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\max} \text{ et } \left(\frac{di}{dt}\right)_{\min} \quad (\text{III.10})$$

Dans le cas où la vitesse de changement du courant est maximale et pour que la fréquence de commutation soit égale à celle du signal triangulaire, nous obtenons la condition suivante :

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\max} < \frac{2.(A_{tr}+B_h)}{\frac{T}{2}} = \frac{4(A_{tr}+B_h)}{T} \quad (III.11)$$

Dans le cas où la vitesse de changement du courant est minimale, pour avoir toujours une commutation par période T, la condition suivante doit être satisfaite :

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\min} > \frac{2B_h}{T} \quad (III.12)$$

Afin d'avoir au moins une intersection entre le courant réel et les limites supérieures ou inférieures de l'hystérésis dans chaque demi période, la condition suivante est nécessaire :

$$B_h < A_{th}.$$

III.5.3. Contrôle de la tension du bus continu [SAH 12]

Le contrôle du bus continu est une procédure indispensable. L'observation des fluctuations de la tension aux bornes des condensateurs donne des indications sur l'évolution des échanges d'énergie entre ces derniers et le réseau.

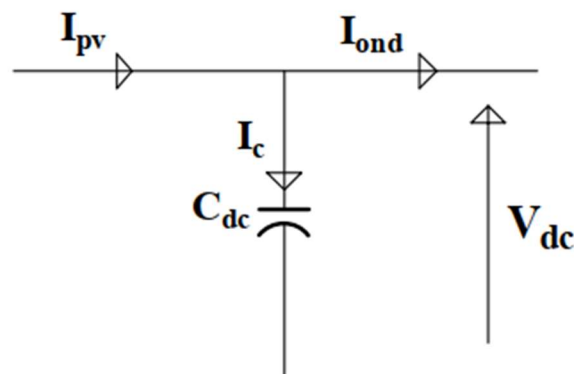


Figure (III.8) : Représentation du bus continu.

Chaque convertisseur exerce son influence sur ce circuit, par le courant qu'il donne ou qu'il prend au condensateur. L'évolution temporelle de la tension à ses bornes est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif :

$$I_c = I_{pv} - I_{ond} \quad (III.13)$$

Et :

$$V_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} \int (I_{pv} - I_{ond}). dt \quad (III.14)$$

La régulation de la tension du bus continu est assurée par une gestion des échanges de puissances entre la sortie du convertisseur côté panneau photovoltaïque et l'entrée du convertisseur côté réseau. En ajustant la puissance transitée par ce dernier, il est possible de contrôler la puissance emmagasinée dans le condensateur et donc de régler la tension du bus continu. La boucle de régulation mise en œuvre est montrée sur la figure qui suit :

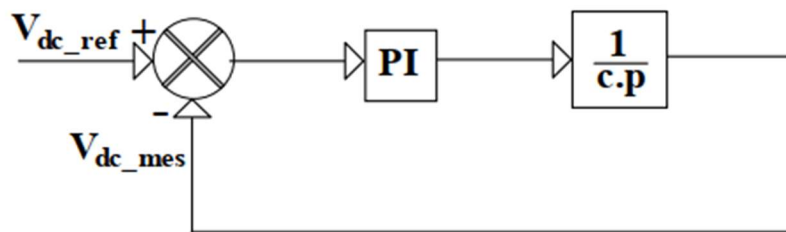


Figure (III.9) : Boucle de régulation de la tension du bus continu.

III.5.4. Contrôle des puissances active et réactive (P et Q) [MES 12]

Le but de ce type de commande est d'imposer les valeurs de puissance active et réactive injectées au réseau. Le circuit de contrôle en agissant sur la commande hystérésis des courants, doit imposer la valeur instantanée du courant débité par l'onduleur de telle sorte que le courant fourni par le réseau soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante.

Ce contrôle est représenté sur le schéma synoptique qui suit et son principe est présenté sur la figure suivante :

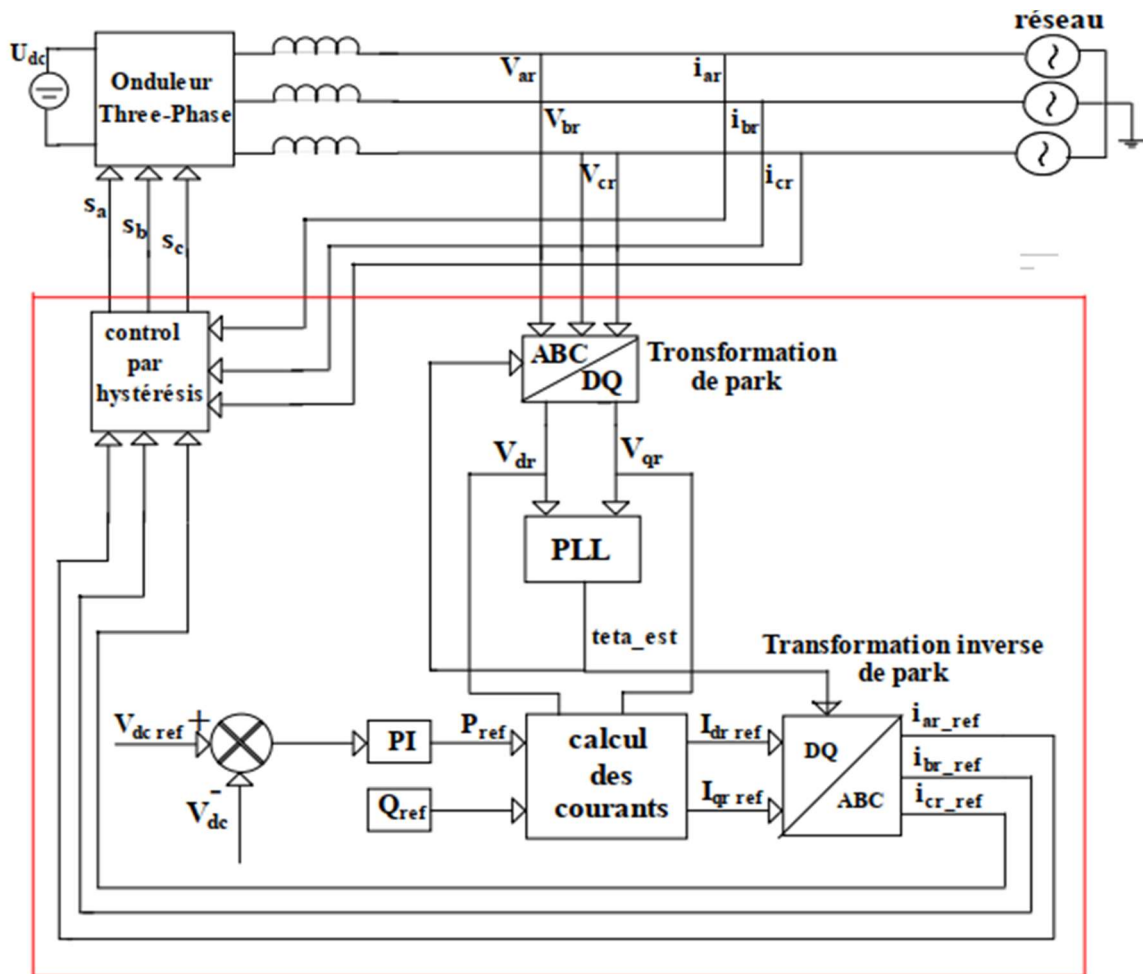


Figure (III.10) : Schéma synoptique de la connexion de l'onduleur au réseau électrique.

Les différentes simplifications réalisées après analyse du système nous ont permis de conclure que les courants de consignes en sortie du contrôle amont seront injectés au point de connexion de la production PV. Ces courants sont calculés grâce aux références de puissances et à la mesure de la tension au point de connexion ; ceux-ci vont être calculés dans le référentiel de Park selon les équations qui suivront :

$$P_{ref} = (V_{dr} \cdot I_{dr_ref} + V_{qr} \cdot I_{qr_ref}) \quad (III.15)$$

$$Q_{ref} = (V_{qr} I_{dr_ref} - V_{dr} \cdot I_{qr_ref}) \quad (III.16)$$

On déduit :

$$I_{dr_ref} = \frac{(P_{ref} \cdot V_{dr} + Q_{ref} \cdot V_{qr})}{(V_{dr}^2 + V_{qr}^2)} \quad (III.17)$$

$$I_{qr_ref} = \frac{(P_{ref} \cdot V_{qr} - Q_{ref} \cdot V_{dr})}{(V_{dr}^2 + V_{qr}^2)} \quad (III.18)$$

Où :

P_{ref} et Q_{ref} Sont les puissances de référence de la production PV

V_{dr} et V_{qr} : sont les composantes directes et quadratiques de la tension, mesurées au point de connexion de la production PV, dans le référentiel de Park.

I_{dr_ref} et I_{qr_ref} : sont les composantes directes et quadratiques du courant produit de référence par la production PV sur le réseau auquel elle est connectée. Ces courants dépendent donc des puissances de références ainsi que de la tension mesurée au point de connexion de la production.

Cette tension mesurée est transformée dans le référentiel de Park avant le calcul des courants. Une boucle à verrouillage de phase ou PLL (Phase Locked Loop) est utilisée pour synchroniser la transformation de Park sur la pulsation de la tension mesurée sur le réseau.

III.6. Etude de la synchronisation du convertisseur sur le réseau [ABB 11]

Afin de connecter des sources au réseau électrique, il faut synchroniser la tension du générateur de production avec celle du réseau, c'est pourquoi l'information de phase et de fréquence de la tension du réseau est nécessaire.

III.6.1. PLL triphasée dans le domaine de Park :

Le principe de base de la PLL triphasée consiste à appliquer une transformation inverse de Park sur les tensions triphasées du réseau. La composante d'axe q générée par cette transformation est asservie à zéro par action sur l'angle du repère de Park (θ_{est}). En régime établi l'angle (θ_{est}) est égal à l'angle (θ_{est}) du réseau.

Le principe de la PLL dans le domaine de Park est donné sur la figure suivante :

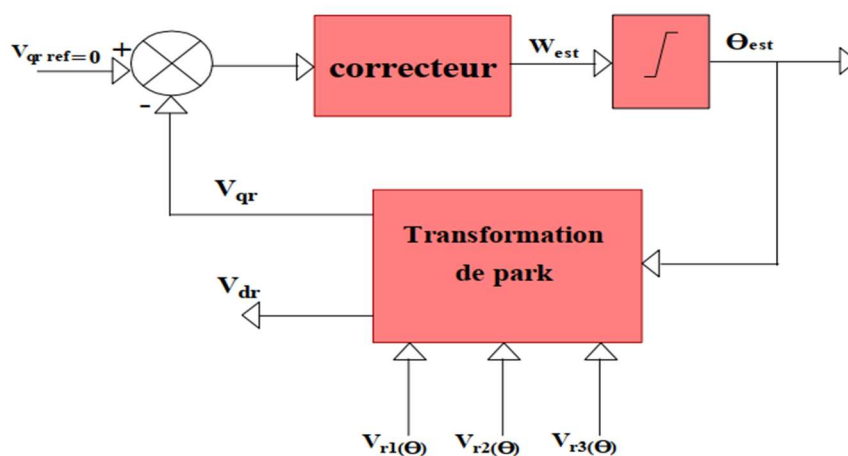


Figure (III.11) : Principe de la PLL.

III.7.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons pu citer puis expliquer brièvement les différentes méthodes de la recherche du point de puissance maximal (MPPT) et on va étudier la méthode de Conductance Incrémentale + Régulateur Intégré ».

Nous avons constaté que l'algorithme de cette méthode est mieux utilisé du fait de son efficacité de rapprocher le point de fonctionnement du générateur PV le plus près possible du PPM et de sa simplicité d'implantation. Cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM.

On s'est chargé aussi du contrôle de notre système PV connecté au réseau, ce qui nous permet ainsi d'avoir un bon contrôle de la puissance injectée au réseau.

Chapitre : 04



Simulation du Système

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous allons réaliser maintenant une simulation du système choisi complet, ainsi que de la méthode de poursuite du point de puissance maximal sous Matlab/ Simulink.

La figure (IV.1) présente le schéma global du système photovoltaïque connecté au réseau :

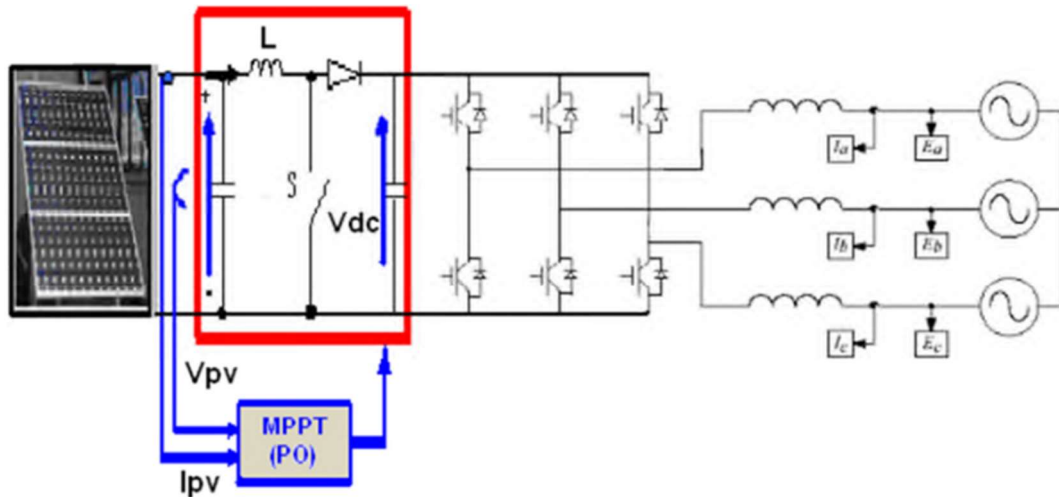


Figure (IV.1) : Schéma global du système photovoltaïque connecté au réseau électrique

IV.2.Simulation numérique :

Différentes simulations sont effectuées pour évaluer les performances du système. Les différentes parties du système (panneaux photovoltaïques, convertisseur DC/DC, convertisseur DC/AC, filtre et réseau) sont modélisées par des blocs séparés puis reliés entre eux d'une manière cohérente. Le point de puissance maximale est suivi par la méthode choisie « Conductance Incrémentale + Régulateur Intégré ».

IV.3.Résultat de simulation numérique :

Nous avons simulé notre système PV avec 330 panneaux en utilisant MATLAB/Simulink. Le générateur photovoltaïque est constitué de ($N_s=5$) panneaux en série et ($N_p=66$) panneaux en parallèle, ce qui correspond à une puissance au point de puissance maximum $P_{mpp} = 100KW$. Les panneaux sont de type **Sun Power modules (SPR-305)**, leurs paramètres dans les conditions standards de fonctionnement (un éclairement de $1000W/m^2$ et une température de $25^\circ C$) sont présentés dans le tableau de l'annexe, ($66*5*305.2 W = 100.7 kW$).

Notre montage illustre l'utilisation de SimPowerSystems pour modéliser un générateur photovoltaïque connecté à un réseau électrique public.

Prenons ce système qui est un modèle détaillé d'un réseau de 100 kW connecté à un 25- Réseau kV via un convertisseur boost DC-DC et un convertisseur de source de tension triphasé à trois niveaux (VSC). Le suivi du point de puissance maximale (MPPT) est implémenté dans le convertisseur élévateur au moyen d'un modèle Simulink utilisant la technique «Conductance Incrémentale + Régulateur Intégré ».

Le modèle détaillé contient :

- ✓ Panneau photovoltaïque délivrant un maximum de 100 kW à un rayonnement solaire de 1000 W / m².
- ✓ Convertisseur boost 5 kHz augmentant la tension à partir de la tension naturelle PV (272 V DC à puissance maximale) à 500 V CC. Le rapport cyclique de commutation est optimisé par le contrôleur MPPT qui utilise la technique «Incrémental Conductance + Integral Regulator.»
- ✓ 1980Hz (33 * 60) VSC triphasé à 3 niveaux . Le VSC convertit le 500 V CC en 260 V CA et conserve le facteur de puissance unitaire.
- ✓ Harmoniques de filtrage de banc de condensateurs de 10 kvar produits par VSC.
- ✓ Transformateur de couplage triphasé 100 kVA 260V / 25kV.
- ✓ Modèle de réseau électrique (alimentation de distribution de 25 kV + système de transmission équivalent à 120 kV).

Pour ce modèle détaillé, le circuit électrique est discrétisé à un temps d'échantillonnage de 1 μ s, alors que le temps d'échantillonnage utilisé pour les systèmes de contrôle est de 100 μ s.

Prenons le bloc de panneaux photovoltaïques et on a examiné les paramètres du modèle.

Les spécifications du fabricant pour un module sont les suivantes :

- ✓ Nombre de cellules connectées en série : 96
- ✓ Tension en circuit ouvert : $V_{oc} = 64,2$ V
- ✓ Courant de court-circuit : $I_{sc} = 5,96$ A
- ✓ Tension et courant à la puissance maximale : $V_{mp} = 54,7$ V, $I_{mp} = 5,58$ A

Le menu du bloc de panneaux photovoltaïques nous permet de tracer les caractéristiques I-V et P-V pour un module et tableau entier. Les caractéristiques de la baie SunPower-SPR305 sont reproduites ci-dessous.

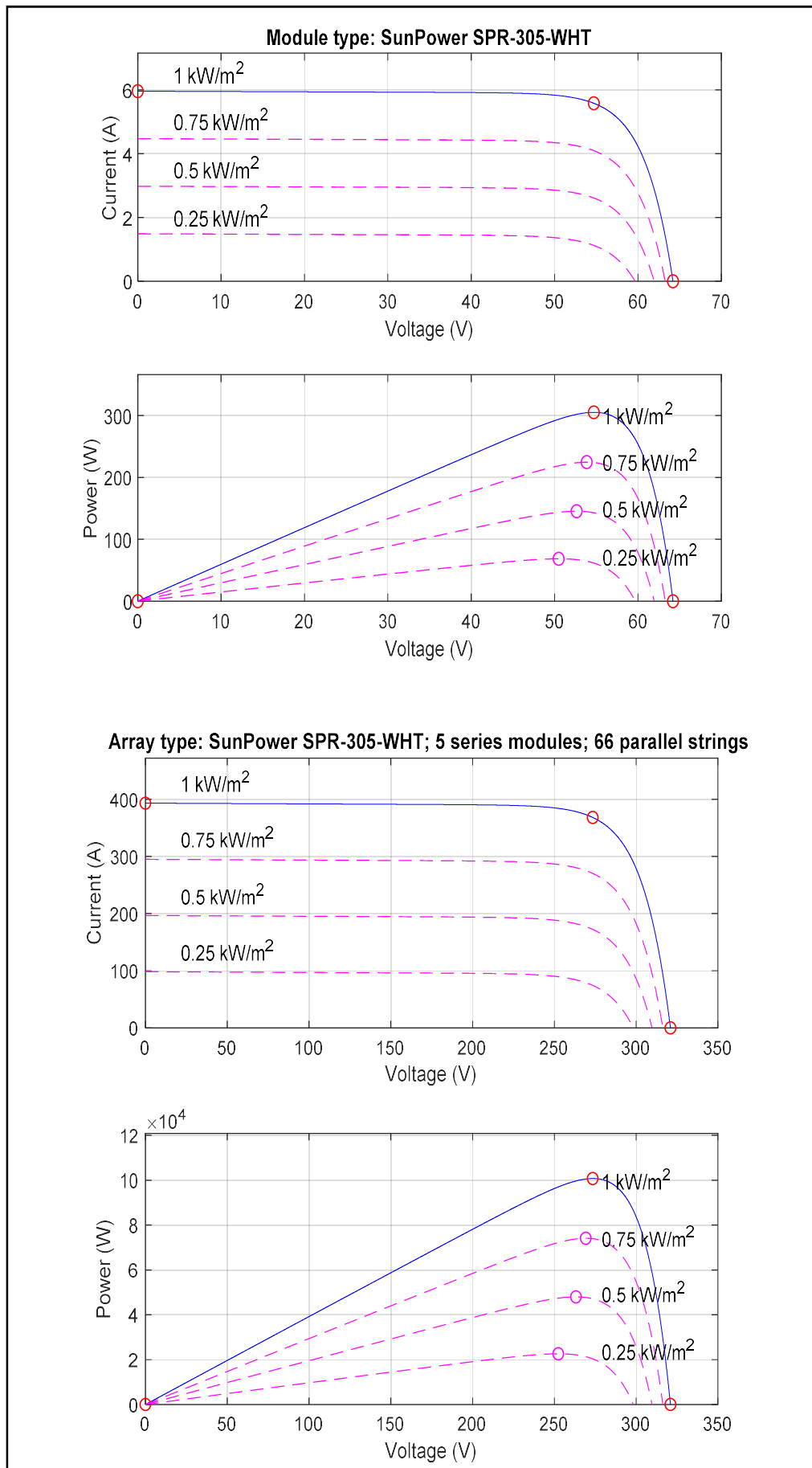


Figure (IV.2) : Caractéristique de la puissance maximale de la source photovoltaïque

IV.3.1.Simulation à ensoleillement variable et température constante :

Dans le but d'étudier les performances du système, en fonctionnement à puissance maximale avec la méthode conductance Incrémentale, on a appliqué un ensoleillement variable tel qu'il est donné en figure (IV.3) à une température fixée à 25°C.

L'allure de la puissance maximale extraite du générateur photovoltaïque est montrée dans la figure (IV.4). La tension optimale correspondante, obtenue à partir de l'algorithme conductance Incrémentale est représentée sur la figure (IV.5) La figure (IV.6) représente l'allure du courant photovoltaïque $I_{pv}(t)$. Il se développe suivant les variations de l'ensoleillement.

La caractéristique du générateur photovoltaïque $P_{pv}(V_{pv})$ au point PPM est représentée avec les caractéristiques théoriques pour les variations du niveau de l'irradiation, figures (IV.7).

La diminution de l'irradiation implique une diminution de la puissance photovoltaïque produite. Donc le point de puissance maximale se déplace pour rejoindre le nouveau point maximum correspondant à cette irradiation. L'algorithme conductance Incrémentale détermine continuellement la tension optimale qui donne la puissance maximale.

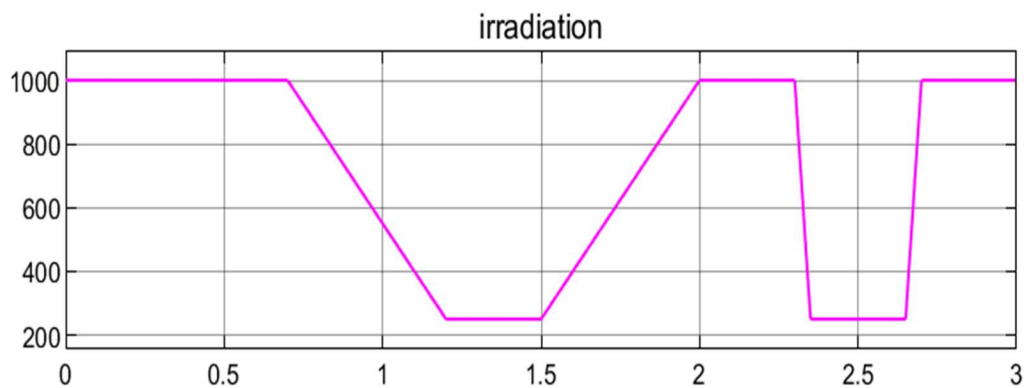


Figure (IV.3) : Variation de l'éclairement.

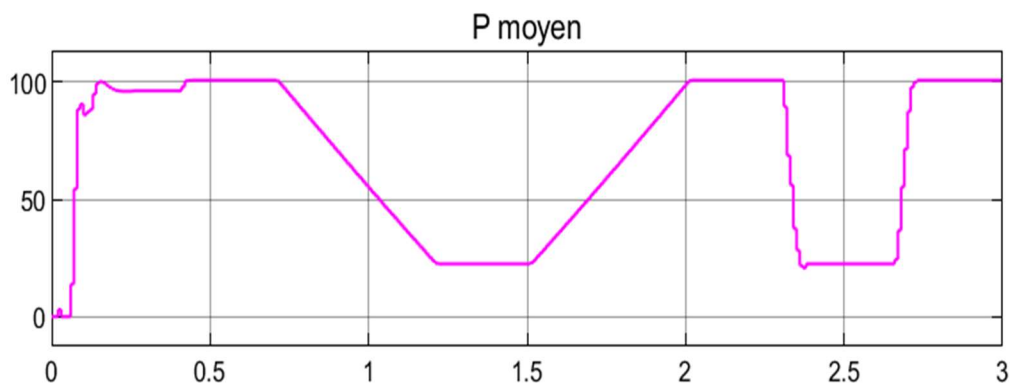


Figure (IV.4) : Allure de la puissance photovoltaïque P_{pv} .

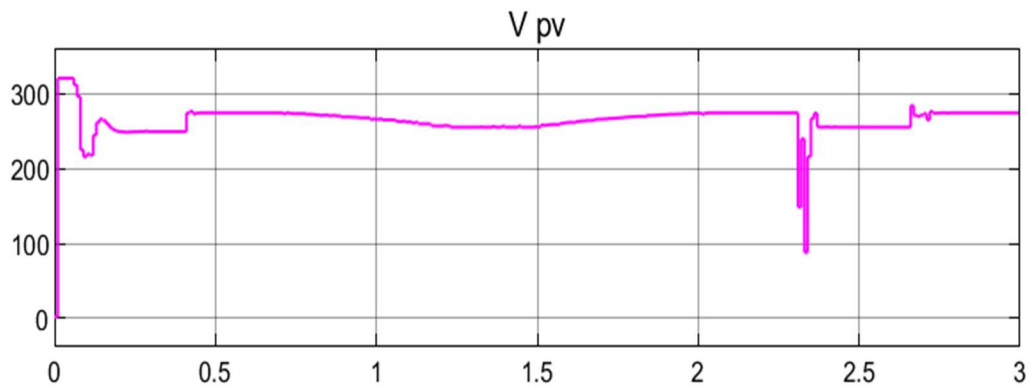


Figure (IV.5) : Allure de la tension photovoltaïque V_{pv} .

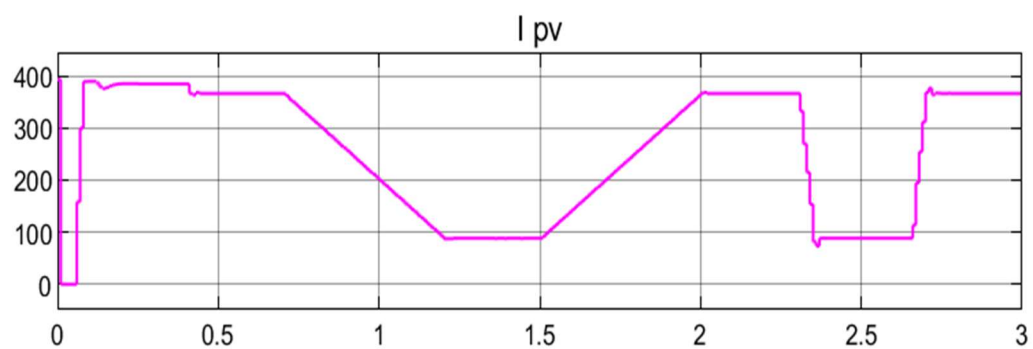


Figure (IV.6) : Allure du courant photovoltaïque I_{pv} .

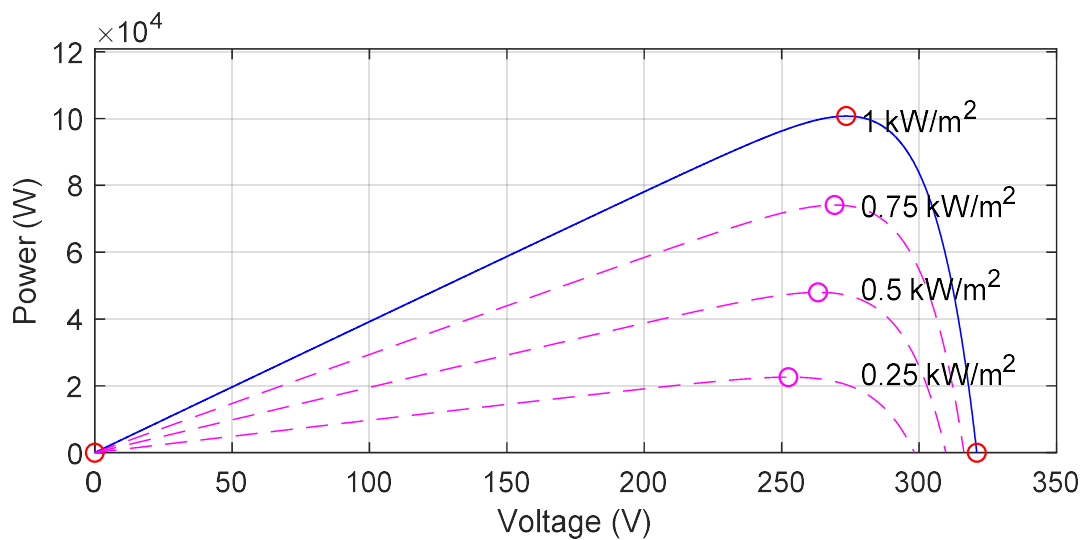


Figure (IV.7) : Allure de la puissance photovoltaïque en fonction de la tension photovoltaïque $P_{pv}(V_{pv})$.

IV.3.2. Contrôleur MPPT :

Suivi du point de puissance maximale par méthode de conductance incrémentale + régulateur intégré.

$C1 = 100e-6$ Farad

$R = 0.005$ ohm

$L = 5e-3$ Henri

$C2 = C3 = 12000e-06$ Farad

Le point de puissance maximum est obtenu lorsque

$dP / dV = 0$ où $P = V * I$

$d(V * I) / dV = I + V * dI / dV = 0$

$dI / dV = -I / V$

Le régulateur intégré minimise l'erreur $(dI / dV + I / V)$

Sortie du régulateur = correction du cycle de service

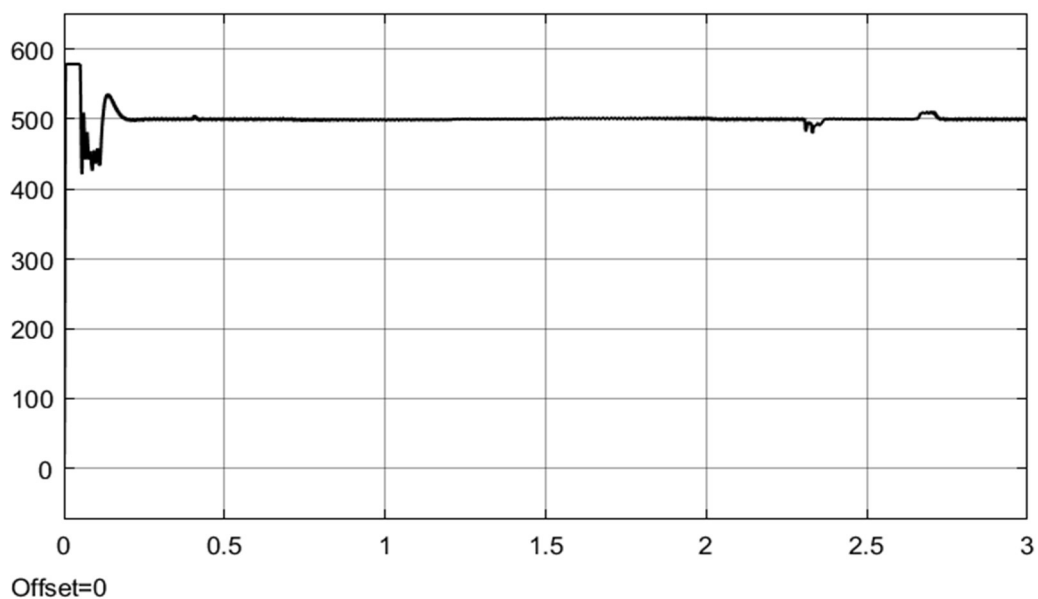


Figure (IV.8) : L'allure de Vdc

IV.3.3. Convertisseur VSC :

Le VSC à trois niveaux régule la tension du bus CC à 500 V et maintient le facteur de puissance unitaire.

Le système de contrôle utilise deux boucles de contrôle :

Une boucle de contrôle externe qui régule la tension du circuit intermédiaire

A

à ± 250 V et une boucle de contrôle interne qui régule les courants de réseau **Id** et **Iq** (courant actif et réactif Composants).

La référence de courant **id** est la sortie du contrôleur externe de tension CC. La référence actuelle **Iq** est mise à zéro afin de maintenir le facteur de puissance de l'unité. Les sorties de tension **Vd** et **Vq** du régulateur de courant sont converties en trois signaux modulateurs **Uref_abc** utilisés par le générateur d'impulsions à trois niveaux PWM.

Le système de contrôle utilise un temps d'échantillonnage de $100 \mu\text{s}$ pour les contrôleurs de tension et de courant ainsi que pour le **PLL** unité de synchronisation. Dans le modèle détaillé, les générateurs d'impulsions des convertisseurs Boost et VSC utilisent un temps d'échantillonnage de $1 \mu\text{s}$ afin d'obtenir une résolution appropriée des formes d'onde PWM.

De $t = 0$ s à $t = 0,05$ s, les impulsions vers les convertisseurs Boost et VSC sont bloquées. Tension PV correspond à la tension en circuit ouvert ($N_{\text{ser}} * V_{\text{oc}} = 5 * 64,2 = 321$ V, voir trace V sur Scope Boost).

Le pont à trois niveaux fonctionne comme un redresseur à diode et les condensateurs de liaison CC sont chargés au-dessus de 500 V (voir trace **Vdc_moyen** sur Scope VSC).

À $t = 0,05$ s, les convertisseurs Boost et VSC sont débloqués. La tension du circuit intermédiaire est régulée à $V_{\text{dc}} = 500$ V. Le rapport cyclique du convertisseur boost est fixe ($D = 0,5$ comme indiqué sur le Scope Boost) et l'irradiance est réglée sur $1000 \text{ W} / \text{m}^2$. L'état d'équilibre est atteint à $t = 0,25$ s. La tension PV résultante est donc $V_{\text{PV}} = (1-D) * V_{\text{dc}} = (1-0,5) * 500 = 250$ V (voir trace V sur Scope Boost).

Le générateur photovoltaïque la puissance de sortie est de 96 kW (voir trace **P_moyen** sur Scope Boost) alors que la puissance maximale avec une irradiance $1000 \text{ W} / \text{m}^2$ est de 100,7 kW.

On observe sur Scope Grid que la tension et le courant de la phase A à 25 kV. Les bus sont en phase (facteur de puissance unitaire).

À $t = 0,4$ sec, MPPT est activé. Le régulateur MPPT commence à réguler la tension PV en variant le service cycle afin d'extraire la puissance maximale. La puissance maximale (100,7 kW) est obtenue en service le cycle est $D = 0,453$.

À $t = 0,6$ s, tension moyenne PV = 274 V comme prévu du module PV spécifications ($N_{\text{ser}} * V_{\text{mp}} = 5 * 54,7 = 273,5$ V).

De $t = 0,7s$ à $t = 1,2s$, l'irradiance solaire est réduite de 1000 W/m^2 à 250 W/m^2 . MPPT continue de suivre la puissance maximale.

À $t = 1,2s$ lorsque l'irradiance a diminué à 250 W/m^2 , le rapport cyclique est $D = 0,485$. La tension et la puissance PV correspondantes sont $V_{\text{moy}} = 255 \text{ V}$ et $P_{\text{moy}} = 22,6 \text{ kW}$.

Où on observe que le MMPT continue de suivre la puissance maximale pendant ce changement rapide d'irradiance.

De $t = 1,5 \text{ s}$ à 3 s , différents changements d'éclairement sont appliqués afin d'illustrer les bonnes performances du contrôleur MPPT.

IV.4.Réseau HTA :

IV.4.1.Modèles d'un réseau électrique :

Une ligne de transmission à trois constants R , L et C distribué uniformément le long de la longueur entière de la ligne. La résistance et l'inductance forment l'impédance de série. La capacité existant entre les conducteurs. Il existe trois types de ligne de transmission à savoir :

- ✓ Ligne de transmission courte.
- ✓ Ligne de transmission moyenne.
- ✓ Ligne de transmission longue.

IV.4.2.Ligne de transmission courte :

Quand la longueur d'une ligne de transmission aérienne est 50 km et pour une tension de ligne ($< 25 \text{ kV}$), on la considère comme une ligne de transmission courte. En raison de la plus petite longueur et la plus basse tension, les effets de la capacité sont petits et peuvent être négligés. Donc seulement la résistance et l'inductance de la ligne sont prises en considération selon la figure suivante.

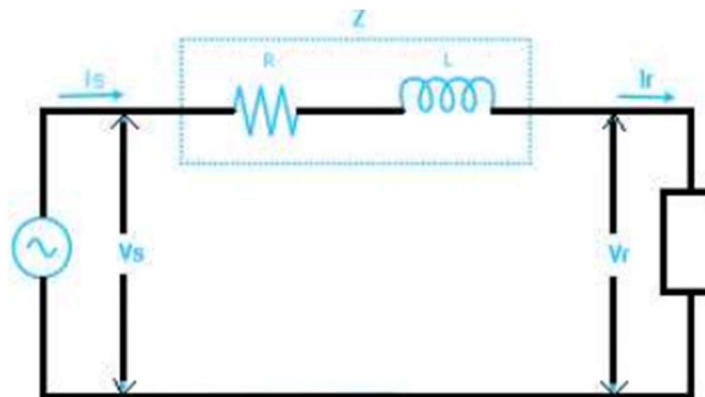


Figure (IV.9) : Modèle en série d'une ligne de transmission courte

IV.5. Système PV connecté à un réseau électrique :

IV.5.1. Modèle de boucle de régulation de l'ensemble du système PV :

Après avoir modélisé et simulé les différents composants du système photovoltaïque, nous allons les regrouper en un bloc afin de voir les paramètres tension et courant à injecter.

Le système de commande de l'ensemble est présenté à la figure III.4.

Sur ce schéma, les composantes du courant sont comparées avec ses références. Les écarts entre elles, passent par les régulateurs. Les sorties des régulateurs donnent les composantes de la tension de référence de la MLI dans le repère d-q. Passant par la transformation inverse de Park, nous obtenons les références du signal de commande MLI des interrupteurs de l'onduleur.

IV.5.1. Commande coté réseau :

L'objectif du convertisseur connecté au réseau est de maintenir la tension du bus continu constant et de garantir le fonctionnement avec un facteur de puissance requis. L'expression (7) donne la puissance réactive et active circulant entre le réseau et le convertisseur.

$$Q_{elc} = V_d \cdot I_q - V_q \cdot I_d$$

$$p_{elc} = V_d \cdot I_d - V_q \cdot I_q$$

Un contrôle vectoriel est utilisé dans un second repère tournant de Park orienté selon tension du réseau de manière à ce que sa composante quadrature soit nulle $V_q = 0$.

$$V_d = \sqrt{3} V_{eff}.$$

$$Q_{elc} = V_d \cdot I_q$$

$$p_{elc} = V_d \cdot I_d$$

Ce contrôle vectoriel permet un contrôle découplé indépendant de la puissance active et réactive.

IV.6. Résultats de simulation :

Avec la boucle de régulation, nous avons simulé et obtenu la tension $V_{ab_inverter}$ (tension à la sortie de l'onduleur), les tensions composées filtrées.

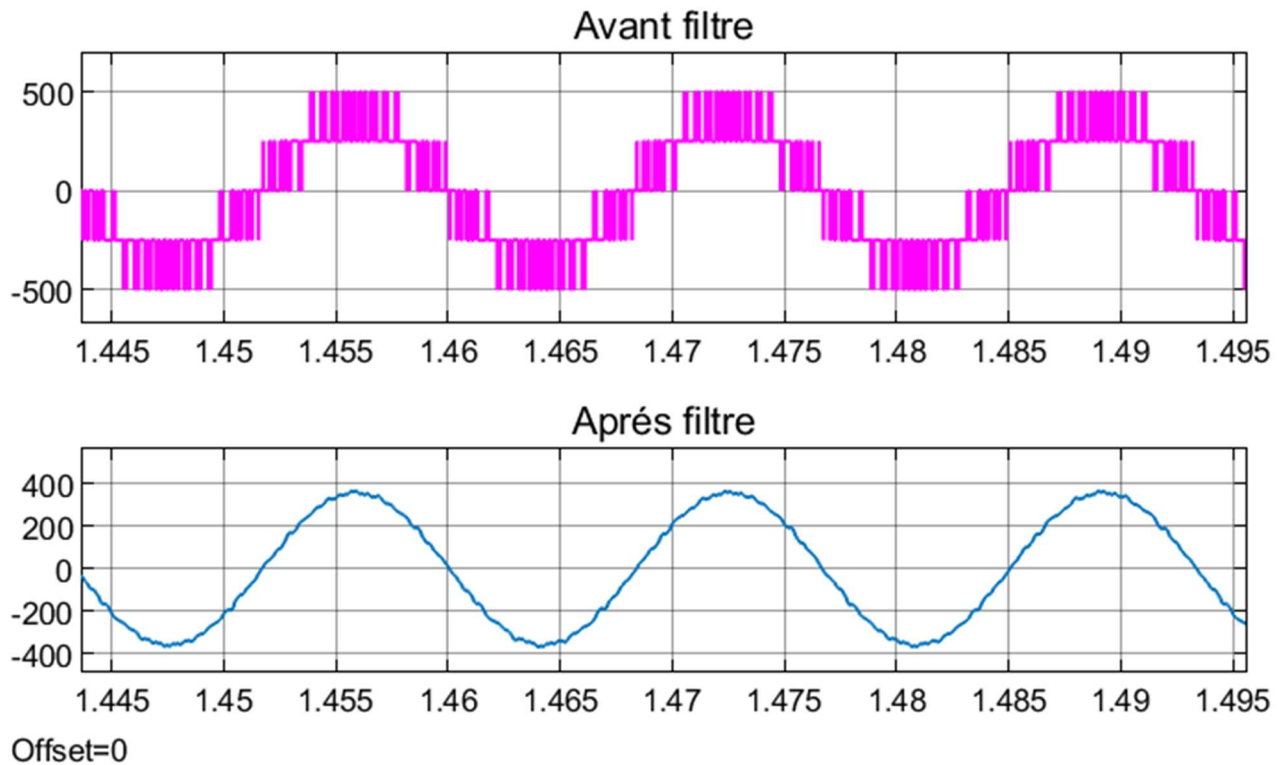


Figure (IV.10) : allure de la tension basse tension

La tension appliquée entre les phases est 25KV, avec une source de 2500MVA/120KV et un transformateur abaisseur 120KV/25KV. (Figure(IV.8)).

On injecte sur ce réseau une autre source renouvelable en augmentant la tension par transformateur élévateur de 100KVA 260V/25KV.

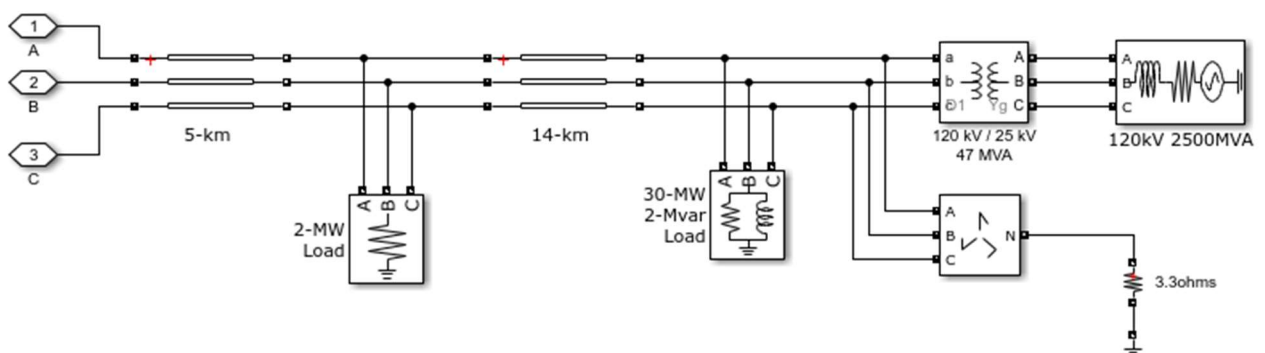


Figure (IV.11) : Réseau électrique.

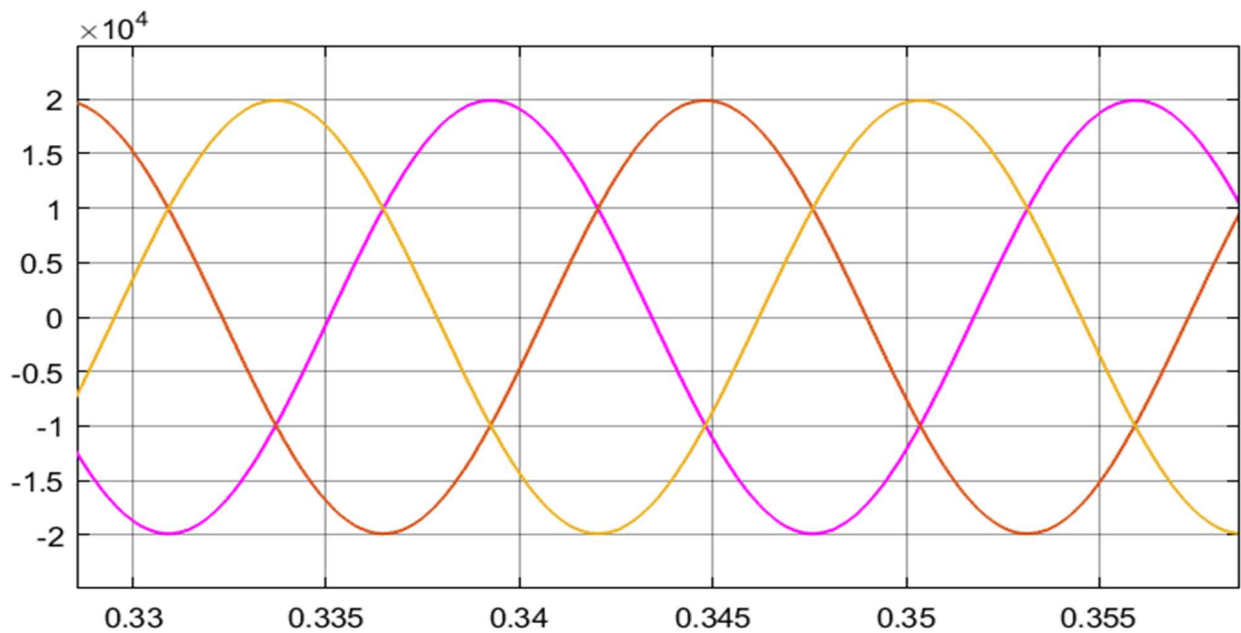


Figure (IV.12) : allure de la tension HTA

Le but de notre étude consiste à une modélisation et simulation d'un système photovoltaïque relié au réseau électrique.

Les puissances active et réactive (P_{ref} , Q_{ref}) sont des références des courants, nous avons choisi une loi de commande afin de fournir et d'extraire le maximum de puissance active.

Cette loi est basée sur le choix des références des puissances.

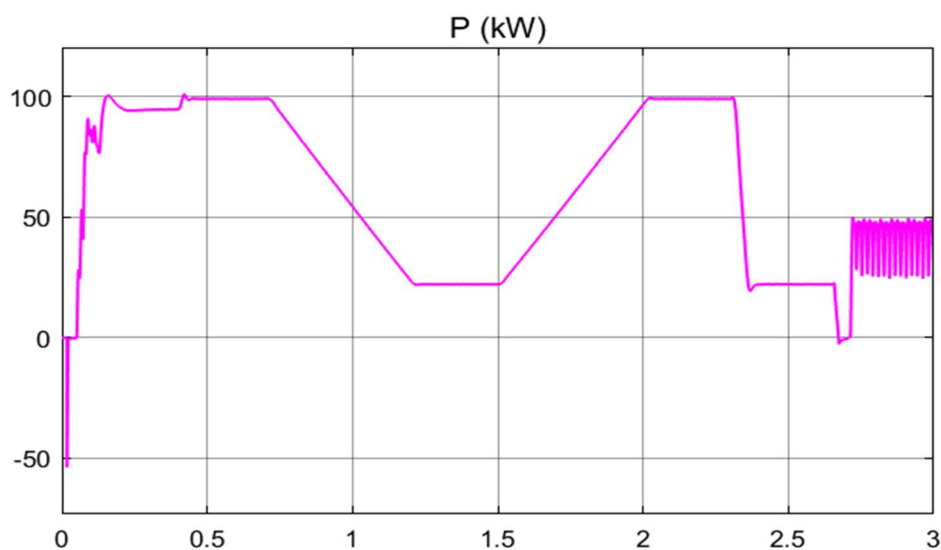


Figure (IV.13) : La puissance délivrée selon l'irradiation

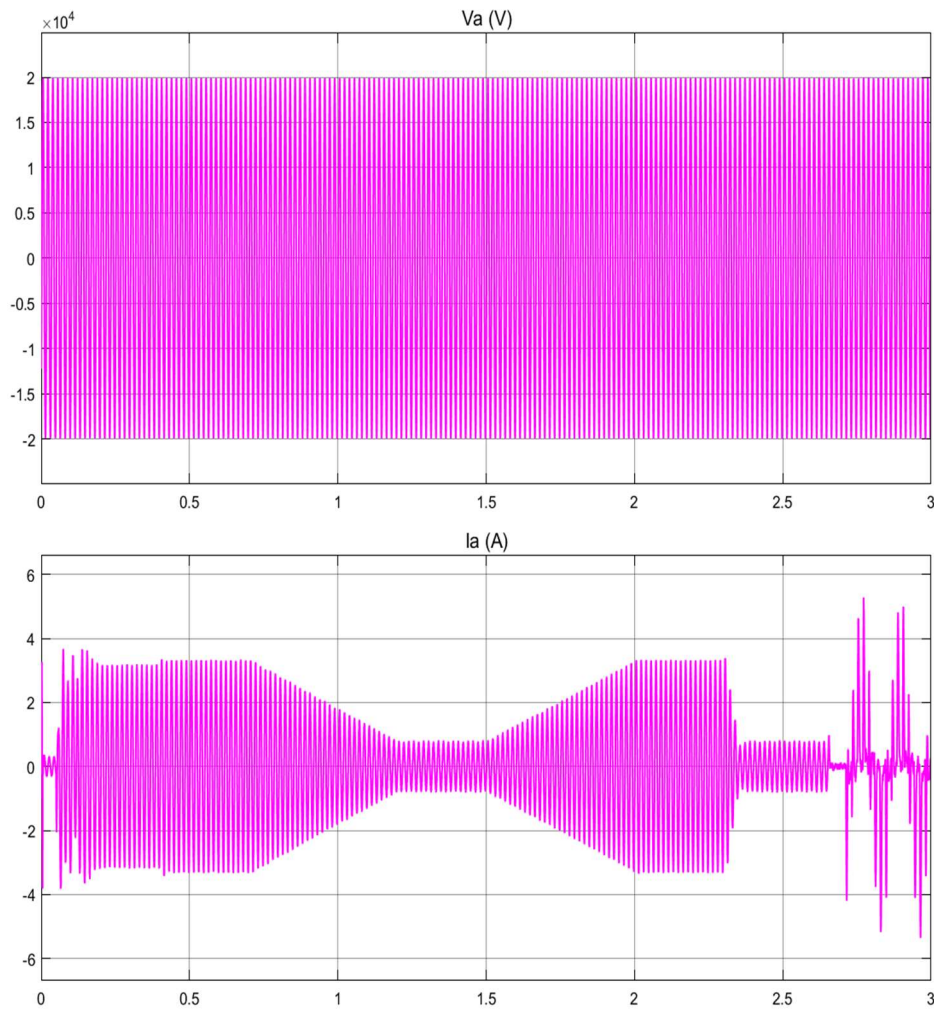


Figure (IV.14) : allure de la tension HTA et le courant

On constate d'après la quatrième graphique de la figure ci-dessus que l'allure du courant transité au réseau et de la tension efficace du réseau sont en phase, ce qui explique l'injection unique de la puissance active. De plus, les courants sont sinusoïdaux à la sortie de l'onduleur filtre et dépendent de la fréquence de la porteuse. Les obtenus par simulations sont cohérents avec ceux trouver dans la littérature.

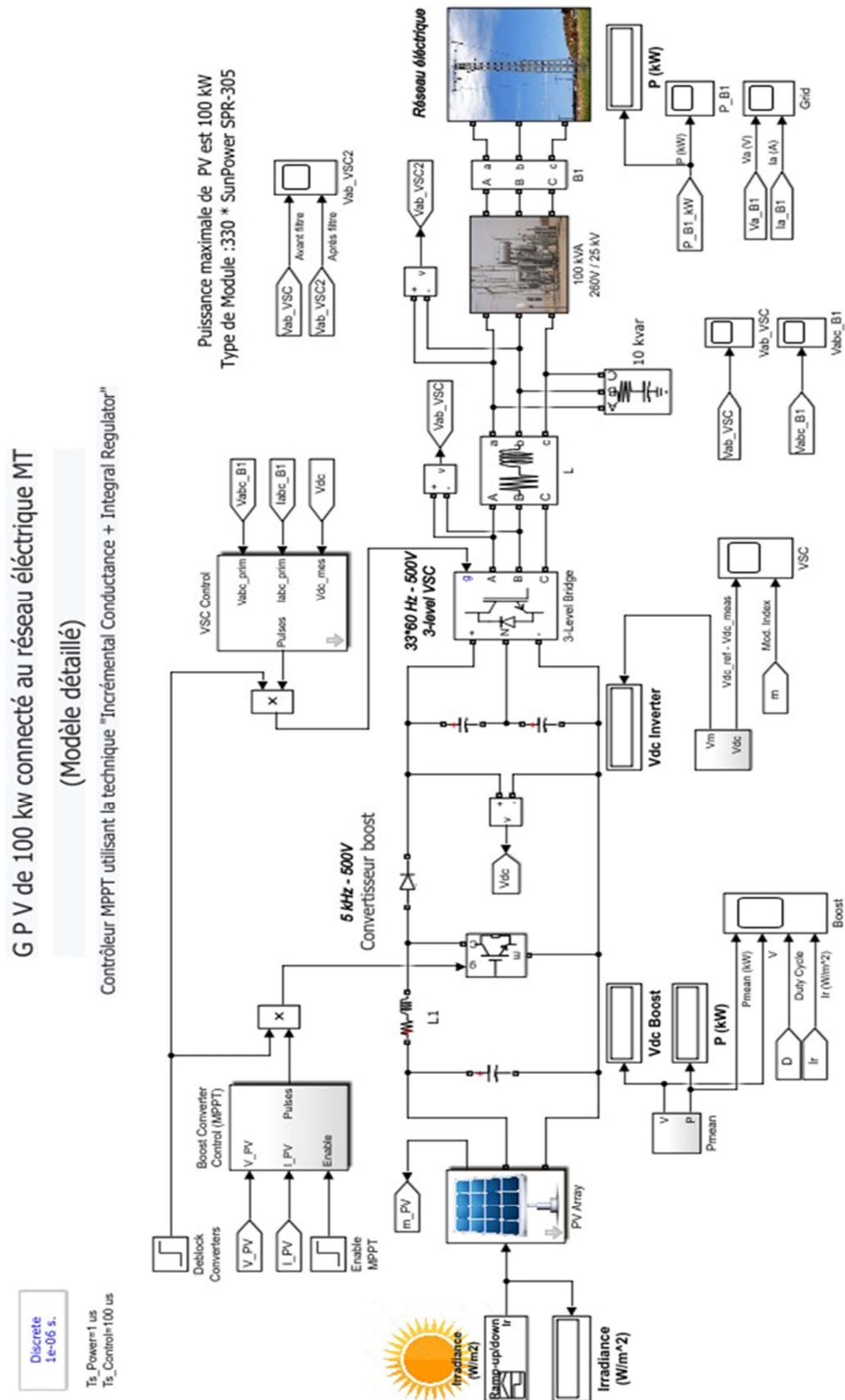


Figure (IV.15) : Simulation système par Matlab simulink

IV.7.Conclusions :

Après avoir modélisé et simulé les différents éléments d'un système photovoltaïque, il est nécessaire de faire une simulation avec le réseau pour voir puissance délivrée par le GPV.

La commande et la connexion au réseau électrique sont assurés par:

- La synchronisation de la commande par rapport à l'évolution des tensions du réseau, qui a pour objectif de reconstituer une information sur la composante directe de la tension fondamentale.
- Les courants sont comparés avec la référence puis régulés d'injecter le maximum de la puissance active.
- Nous avons choisi la commande MLI, qui nécessite un contrôle de fréquence fixe des commutations tandis que les tensions sont variables.

Les résultats obtenus des tensions et courants par simulations se rapprochent de ceux obtenus dans la littérature ce qui nous permet de valider notre travail.

IV.8.Conclusion générale :

L'augmentation des besoins énergétiques mondiaux, et dans un souci du respect de l'environnement, pousse le monde de plus en plus à s'intéresser aux énergies renouvelables. L'intérêt porté aux énergies renouvelables, nous a amené à nous intéresser aux systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique. Ces systèmes utilisent des convertisseurs pour se connecter au réseau électrique et la puissance injectée est fortement variable puisqu'elle est dépendante de l'éclairement et de la température.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation et simulation de chaque élément constituant le système photovoltaïque raccordé au réseau électrique.

Nous avons débuté par un bref aperçu sur la constitution et différentes parties du réseau électrique et la chaîne photovoltaïque pouvant être relié au réseau.

Ensuite, nous avons établi les équations régissant le GPV en choisissant le modèle électrique équivalent à une diode qui est un compromis entre la précision et la simplicité. A partir de l'analyse des résultats de simulation obtenus, nous avons pu observer l'influence des conditions extérieures sur le fonctionnement électrique de ces GPV.

Le système de commande MPPT qui permet de faire fonctionner un GPV dans les conditions optimales en fonction des variations des paramètres extérieurs a été réalisé par action sur le rapport cycle du signal de commande de l'interrupteur du convertisseur DC/DC, qui, permet d'élever la tension issue des modules PV à un niveau de tension adaptable à l'entrée du convertisseur DC/AC. Le convertisseur DC/AC (onduleur de tension) commandé par la MLI à transistors IGBT a sa sortie une tension filtrée par le filtre L, compatible à la tension du réseau a été modélisé et simulé à partir de blocs mathématiques basiques présentés dans le catalogue Matlab/Simulink.

Cette étude nous a permis de connaître les problèmes et difficultés des systèmes photovoltaïques connectés au réseau et d'avoir la prise en main du logiciel Matlab/Simulink tant important pour la modélisation.

Bibliographies :

[LAB08] : Labeled.Djamel « production décentralisée et couplage au réseau », thèse de doctorats d'états de l'Université de mentouri de Constantine, Année 2008.

[SAH 12] : A.SAHLI « Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau » Mémoire de MAGISTER en Electrotechnique, Université FERHAT ABBAS SETIF, 2012.

[MES 12] : A. MESKANI « Modélisation Et Simulation D'un Système PV Intégré à Un Réseau BT Par La Méthode Du Watt-Var découplé » Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI), Université ABDELMALEK ESSAËDI, (ENSA) Tanger, Maroc, 2012.

[OUA 11] : Y.OUADFEL, L. LAMARA « Etude et optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque », Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2011.

[KEC 12] : M .KECIRI, N.BENMESSAOUD « Etude et maximisation de puissance d'un système photovoltaïque », Mémoire de Master en Electrotechnique, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2012

[EST 10] : B.ESTIBALS « Contribution à l'amélioration des chaînes de conversion photovoltaïques par l'introduction d'architectures distribuées», Diplôme de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 2010.

[BEL cours] : Mme. BELAID « Cours énergie solaire photovoltaïque UEF 31», Université Abderrahmane Mira de Bejaia ,2015.

[BAA 12] : A.BAAMARA « Modélisation et contrôle d'un système photovoltaïque utilisant la technique d'espace d'état», Mémoire de Master en Génie Electrique. Université Kasdi Merbah Ouargla ,2012.

[BENS 12] : W. BENSACI « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », Mémoire de Master en Génie électrique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2012.

[SAL 11] : F.SALAMA « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique». Mémoire de Magister, Université de Sétif, 2011.

[LOU 09] : A.LOUADAH « Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque », Mémoire de master en électromécanique, Université Abderrahmane Mira de BEJAIA, 2009.

[MEC 13] :M.MECHALIKH, C.HAMADA « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau». Mémoire de Master Académique Université Kasdi Marbah, 2013.

[ABB 11] : L.ABBASEEN « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque », Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou 2011.

[http : //www.aros-solar.com/fr/classification-des-installations-photovoltaïques](http://www.aros-solar.com/fr/classification-des-installations-photovoltaïques),
schéma des systèmes photovoltaïques. (Dimanche 05 Mai 2020,3h15).



ANNEXE

MODÈLE : SPR-305NE-BLK-D

CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES

Valeurs dans des conditions de test standard : ensoleillement de 1 000 W/m², AM 1,5 et température de cellule de 25 °C

Puissance nominale (+5/- 3 %)	P _{nom}	305 W
Rendement (cellule)	η	22,6 %
Rendement (panneau)	η	18,7 %
Tension à puissance maximale	V _{mpp}	54,7 V
Courant à puissance maximale	I _{mpp}	5,58 A
Tension en circuit ouvert	V _{oc}	64,2 V
Courant de court-circuit	I _{sc}	5,96 A
Tension maximale du système	IEC	1.000 V
Coefficients de température	Puissance (P)	- 0,38 %/K
	Tension (V _{oc})	- 176,6 mV/K
	Courant (I _{sc})	3,5 mA/K
NOCT		46 °C +/- 2 °C
Calibre des fusibles série		20 A
Valeur indicative de courant inverse Pour 3 Strings (1,25*2*I _{sc} STC)	I _r	14,9 A
Mise à la terre		Mise à la terre du pôle positif non requise

CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES

Valeurs à température nominale d'opération de la cellule (NOCT) : ensoleillement 800W/m², température 20 °C, vitesse du vent 1 m/s

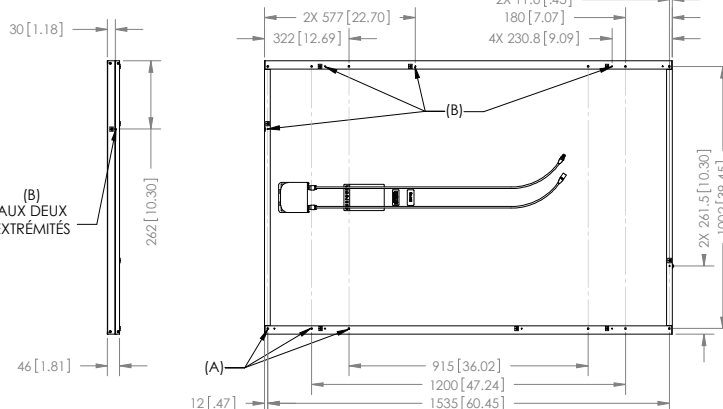
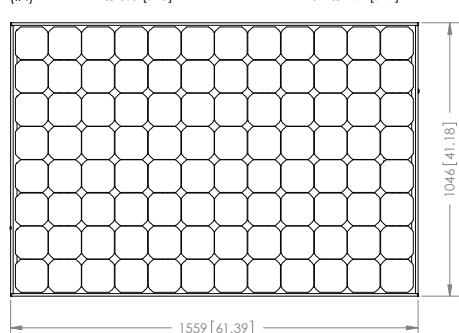
Puissance nominale	P _{nom}	226 W
Tension à puissance maximale	V _{mpp}	50,2 V
Courant à puissance maximale	I _{mpp}	4,49 A
Tension en circuit ouvert	V _{oc}	60,0 V
Courant de court-circuit	I _{sc}	4,83 A

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

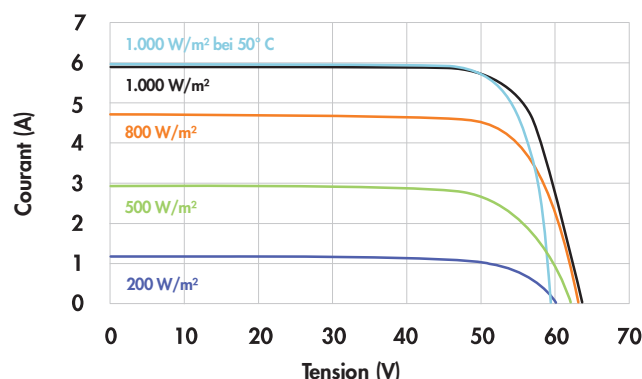
Cellules	96 cellules SunPower Maxeon™	Câbles de sortie	Longueur de 1 000 mm / Connecteurs Amphenol (Helios H4)
Vitre avant	Verre trempé haute transmission	Cadre	Alliage d'aluminium anodisé (noir) de type 6063
Boîtier de connexion	IP-65 avec 3 diodes de dérivation (bypass) 32 x 155 x 128 mm	Poids	18,6 kg

DIMENSIONS

MM (A) - TROUS DE MONTAGE (IN) 12X Ø6.6 [1.26] (B) - TROUS DE MISE À LA TERRE 10X Ø4.2 [1.17]



COURBE TENSION/COURANT



Caractéristiques de courant/tension en fonction de l'ensoleillement et de la température du module.

CONDITIONS DE TEST

Température	- 40 °C à +85 °C
Charge maximale	550 kg/m² (5 400 Pa), avant (par exemple neige) avec fixation spécifique 245 kg/m² (2 400 Pa) avant et arrière (par exemple vent)
Résistance à l'impact	Grêle : 25 mm à 23 m/s

GARANTIES ET CERTIFICATIONS

Garanties	25 ans sur la performance (garantie linéaire) 25 ans sur le produit
Certifications	IEC 61215 Ed. 2, IEC 61730 (SCII)

Veuillez lire les consignes de sécurité et les instructions d'installation avant d'utiliser ce produit. Pour plus d'informations, rendez-vous sur le site www.sunpowercorp.fr.

