

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE
Département : Electrotechnique
Domaine : SCIENCES ET
ECHNOLOGIES
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

ETUDE D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE CONNECTE
AU RESEAU

Présenté par :

Bouhenna Akram Zineddine

Bouhedja Zakaria

Encadrant : BENSIALI Nadia

Grade : Prof

Universite : UBMA

Jury de Soutenance :

SETTOUL Samir	M.A.B	UBMA	Président
BENSIALI Nadia	Prof	UBMA	Encadrant
MOHAMMEDI Moufid	M.C.A	UBMA	Examinateur

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciement :

On tient à exprimer toute notre reconnaissance à notre encadreur Madame BEN SI ALI NADIA qu'on remercie infiniment de nous avoir encadrés, guidé, aidée et conseillé.

On remercie nos très chers parents, On remercie très spécialement nos frères et sœurs qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs soutiens morales inconditionnels ont guidé nos réflexions et nous ont poussé à aller de l'avant.

On remercie tous nos collègues de la promotion et toutes les personnes qui nous ont conseillé, guidé et étaient la raison de la réussite de ce mémoire, on les remercie pour leur sincère amitié, et à qui je dois ma reconnaissance, mon respect et ma gratitude

Résumé :

L'intensité de l'irradiation solaire et la température des cellules ont un impact sur la puissance produite par un module photovoltaïque. Pour optimiser les performances des systèmes d'énergie renouvelable, il est essentiel d'utiliser un algorithme MPPT qui vise à attirer la source d'entrée vers son point de puissance maximale. Nous avons examiné la modélisation des divers éléments de la chaîne photovoltaïque, tels que le panneau solaire photovoltaïque, le hacheur Boost, l'onduleur à deux niveaux et le filtre LCL, dans cette étude. En mode relié au réseau, la synchronisation des tensions a été assurée grâce à la PLL, et des régulations de courants et de tensions ont été instaurées pour assurer un bon fonctionnement du système.

ملخص:

تؤثر شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة الخلايا على القدرة المنتجة من قبل الوحدة الضوئية. ولتحقيق أقصى أداء لأنظمة الطاقة المتجددة، من الضروري استخدام خوارزمية تتبع نقطة القدرة القصوى (MPPT) لتوجيه مصدر الإدخال نحو نقطة القدرة القصوى. في هذه الدراسة، قمنا بفحص نمذجة مختلف عناصر سلسلة الطاقة الضوئية، مثل اللوح الشمسي الضوئي، ومحول ال-Boost، والمحول ذي المستويين، وفلتر LCL. في وضع الاتصال بالشبكة، تم ضمان تزامن الجهود بفضل PLL، وتم وضع تنظيمات للتيارات والجهود لضمان التشغيل السليم للنظام.

Abstract:

The intensity of solar irradiation and the temperature of the cells impact the power produced by a photovoltaic module. To optimize the performance of renewable energy systems, it is essential to use an MPPT algorithm to track the maximum power point of the input source. In this study, we examined the modeling of various elements of the photovoltaic chain, such as the photovoltaic solar panel, the Boost converter, the two-level inverter, and the LCL filter. In grid-connected mode, voltage synchronization was ensured using the PLL, and current and voltage regulations were established to ensure the proper functioning of the system.

Sommaire :

Introduction générale.....1

CHAPITRE I :

Composants des systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Introduction.....3

I.1. Les différentes connexions des systèmes photovoltaïques.....3

I.1.1. Les systèmes autonomes.....3

I.1.2. Les systèmes Hybrides4

I.1.3. Les systèmes raccordés au réseau.....4

I.2. Les panneaux photovoltaïques.....5

I.3. Cellule photovoltaïque.....5

I.4. Les différents types de Cellule photovoltaïque.....6

I.4.1. Cellule en silicium polycristallin.....6

I.4.2. Cellule en silicium monocristallin.....7

I.4.3. Cellule silicium amorphe en couche mince.....7

I.4.4. Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS.....8

I.4.5. Cellule multijonction.....9

I.5. Facteur de forme.....9

I.6. Le rendement.....10

I.7. Point de puissance maximale (PPM).....10

I.8. Circuit équivalent et modèle mathématique d'une cellule solaire réelle..... 11

I.9. Caractéristiques courant - tension (I-V) de la cellule photovoltaïque.....	11
I.9.1. Courant de court-circuit (obtenue pour $V=0$).....	11
I.9.2. Tension de circuit ouvert (obtenue pour $I= 0$).....	12
I.10. Regroupement des cellules.....	12
I.10.1. Regroupement en série.....	12
I.10.2. Regroupement en parallèle.....	13
I.10.3. Regroupement hybride (série et parallèle).....	14
I.11. Protection d'un générateur photovoltaïque	15
I.11.1. Protection lors de la connexion en parallèle de plusieurs GP.....	15
I.11.2. Protection lors de la connexion en série de plusieurs GP.....	15
I.12. Influence des systèmes photovoltaïques sur le réseau de distribution.....	16
I.12.1. Influence sur le plan de tension.....	16
I.12.2. Influence sur le plan de protection.....	16
I.13. Le Potentiel Solaire en Algérie.....	16
I.14. Les régulateurs	17
I.15. Les onduleurs	17
Conclusion	18

CHAPITRE II :

Les convertisseurs statiques pour les systèmes photovoltaïques

Introduction.....	19
II.1. Convertisseur DC/DC pour les systèmes d'énergie solaire.....	19
II.2. Types de hacheurs.....	19

II.2.1. Le hacheur dévolteur (Buck).....	19
II.2.2. Le hacheur dévolteur-survolteur.....	20
II.2.3. Le hacheur survolteur (Boost).....	20
II.2.3.1. Principe de fonctionnement.....	21
II.2.3.2. Modèle mathématique équivalent.....	21
II.3. La commande MPPT.....	22
II.3.1. Les méthodes de poursuite de MPP.....	22
II.3.1.1. Méthodes a contre réaction de tension.....	22
II.3.1.2. Méthodes a contre réaction de courant.....	22
II.3.1.3. Méthodes a contre réaction de puissance.....	23
II.4. Les onduleurs	25
II.4.1. Structure d'onduleur.....	25
II.4.2. Principe de fonctionnement.....	26
II.4.3 Modèle mathématique de l'onduleur de tension triphasé.....	26
II.4.4. Différentes commandes de l'onduleur.....	27
II.4.4.1. Commande plein onde.....	27
II.4.4.2. Commande MLI.....	27
II.5. Etude de la synchronisation du convertisseur sur le réseau.....	29
II.6. PLL triphasé dans le domaine de Park.....	29
II.7. Contrôle des puissances active et réactive (P et Q).....	29
II.8. Les harmoniques.....	30
II.8.1. Définition.....	30
II.8.2. Origines des harmoniques.....	30

II.8.3. La distorsion harmonique totale (THD).....	30
II.8.4. Influence des harmoniques sur le facteur de puissance.....	31
II.8.5. Les principaux effets des harmoniques dans les installations.....	31
II.8.6. Solutions pour atténuer les harmoniques.....	32
II.8.6.1. Filtrage passif.....	32
II.8.6.2. Filtrage actif.....	32
II.8.6.3. Filtrage hybride.....	32
Conclusion.....	33

CHAPITRE III :

Simulation du système

Introduction.....	34
III.1. Le Système de Photovoltaïque proposée.....	34
III.2. Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I et P.....	35
III.2.1. Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V.....	35
III.2.2. L'influence de l'éclairement sur la caractéristique P-V.....	36
III.3. L'influence de la température sur les caractéristiques I et P.....	36
III.3.1. L'influence de la température sur la caractéristique I-V.....	36
III.3.2. L'influence de la température sur la caractéristique P-V.....	37
III.4. Le filtre LCL.....	37
III.4.1. Dimensionnement du filtre LCL.....	38
III.5. Modélisation du réseau BT.....	38
III.6. Résultats des simulations.....	39
III.6.1. L'onduleur.....	39

III.6.3.1. Synchronisation avec le réseau.....	43
III.6.2.. Le hacheur.....	43
III.6.3. Schéma de simulation globale.....	47
III.6.4. Régulations.....	47
III.6.5. Influence de l'éclairage sur le courant du réseau.....	49
III.6.6. Ecoulement de puissance.....	54
III.6.7. Le THD du réseau.....	55
Conclusion.....	56
Conclusion générale.....	57

Liste des figures et des tableaux

Liste des figures :

CHAPITRE I :

Figure I.1 : Solaire photovoltaïque autonome en site isolé

Figure I.2 : Solaire photovoltaïque hybride

Figure I.3 : Solaire photovoltaïque en autoconsommation

Figure I.4 : Composition panneau solaire

Figure I.5 : Structure d'une cellule photovoltaïque.

Figure I.6 : Cellule photovoltaïque polycristallin

Figure I.7 : Cellule photovoltaïque monocristalline

Figure I.8 : Cellule photovoltaïque amorphe

Figure I.9 : Cellule photovoltaïque en couche mince à base de cuivre

Figure I.10 : Cellule multijonction

Figure I.11 Caractéristiques I-V, P-V, d'un module PV

Figure I.12 : Circuit équivalent de diode d'une cellule photovoltaïque réel

Figure I.13 : Caractéristique d'un groupement de n cellules identiques en série.

Figure I.14 : Caractéristique d'un groupement de n cellules identiques en parallèle

Figure I.15 : Caractéristique résultante d'un groupement hybride de cellules identiques.

Figure I.16 : Principe de base d'un hacheur

CHAPITRE II :

Figure II.1 : Schéma électrique d'un hacheur série

Figure II.2 : Schéma électrique d'un hacheur abaisseur-élevateur

Figure II.3 : Schéma de principe d'un convertisseur Boost

Figure II.4 : Algorithme de perturbation et de l'observation (P&O)

Figure II.5 : Algorithme incrémental conductance

Figure II.6 : Simulation d'un convertisseur BOOST avec un panneau PV

Figure II.7 : Le courant de sortie de hacheur

Figure II.8 : La tension de sortie de hacheur

Figure II.9 : La puissance de sortie de hacheur

Figure II.10 : Schéma de simulation d'un onduleur triphasée

Figure II.11 : Schéma de la simulation de la commande MLI

Figure II.12 : Principe de la commande MLI

Figure II.13 : Exemple d'allures de signaux déformés

Figure II.14 : Diagramme de Fresnel des puissances

Figure II.15 : Installations d'un filtre passif

Figure II.16 : Installations d'un filtre actif

Figure II.17 : Installations d'un filtre hybride.

Figure II.18 : Le positionnement des charges polluantes en amont du réseau

Figure II.19 : La séparation des sources

Figure II.20 : Le regrouper les charges polluantes

Figure II.21 : L'utilisation des transformateurs à couplages particuliers

CHAPITRE III :

Figure III.1 : schéma synoptique d'un système photovoltaïque relié au réseau électrique

Figure III.2 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V

Figure III.3 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique P-V

Figure III.4 : L'influence de la température sur la caractéristique I-V

Figure III.5 : L'influence de la température sur la caractéristique P-V

Figure III.6 : Schéma de puissance d'un filre LCL

Figure III.7 : Schéma de simulation d'un onduleur connecté au réseau

Figure III.8 : le courant à la sortie d'onduleur

Figure III.9 : Essai1 : le courant et la tension à la sortie de l'onduleur

Figure III.10 : Essai2 : le courant et la tension à la sortie de l'onduleur

Figure III.11 : la tension à la sortie de l'onduleur et la tension du réseau

Figure III.12 : Schéma de simulation d'un convertisseur BOOST avec GPV

Figure III.13 : le courant de I_{pv}

Figure III.14 : Le courant de sortie du hacheur

Figure III.15 : la tension V_{pv}

Figure III.16 : La tension V_{dc} a la sortie du hacheur

Figure III.17 : la puissance P_{pv}

Figure III.18 : La puissance de sortie du hacheur

Figure III.19 : Schéma de simulation global PV raccordé au réseau

Figure III.20 : Régulation du courant d'axe direct

Figure III.21 : Régulation du courant d'axe en quadrature

Figure III.22 : Régulation de la tension du Bus Continu.

Figure III.23 : Le signale d'irradiation

Figure III.24 : Le courant du PV

Figure III.25 : La tension du PV

Figure III.26 : La puissance du PV

Figure III.27 : la tension à la sortie de l'onduleur

Liste des figures et des tableaux

Figure III.28 : le courant de la sortie d'onduleur

Figure III.29 : Zoom sur le courant à la sortie d'onduleur pour $t \in [0.1, 0.2]$

Figure III.30 : Zoom sur le courant à la sortie d'onduleur pour $t \in [0.4, 0.5]$

Figure III.31 : Zoom sur le courant à la sortie d'onduleur pour $t \in [0.9, 1]$

Figure III.32 : Régulation de la tension du Bus Continu avec le changement d'éclairément

Figure III.33 : Régulation du courant d'axe direct avec le changement d'éclairément

Figure III.34 : Régulation du courant d'axe en quadrature avec le changement d'éclairément

Figure III.35 : Schéma de simulation global PV raccordé au réseau avec charge

Figure III.36 : Écoulement de puissance pour une charge qui consomme 80 kW.

Figure III.37 : le THD en % du réseau.

Liste des tableaux :

Tableau I.1 : Potentiel solaire en Algérie.

Tableau III.1 : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque panneau dans conduction standard

Introduction générale

Introduction générale :

La transition vers des sources d'énergie renouvelables est devenue une priorité mondiale en raison des préoccupations croissantes concernant le changement climatique et la durabilité des ressources énergétiques. L'énergie solaire photovoltaïque (PV) se présente comme une solution prometteuse, offrant une alternative propre et abondante aux sources d'énergie traditionnelles. L'intégration de systèmes photovoltaïques dans les réseaux électriques est essentielle pour accroître la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique et réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Ce mémoire de master se propose d'étudier et de simuler un système photovoltaïque connecté au réseau électrique. L'objectif principal de cette recherche est de comprendre les mécanismes et les interactions des différents composants du système, d'évaluer les performances des convertisseurs statiques utilisés, et de modéliser le comportement global du système en conditions réelles. Ce travail s'articule autour de trois chapitres principaux, chacun focalisé sur un aspect clé du système photovoltaïque.

Dans le premier chapitre, nous examinerons les composants des systèmes photovoltaïques connectés au réseau. Nous analyserons les caractéristiques techniques, les performances et les rôles de chaque composant dans l'ensemble du système. Une attention particulière sera portée aux technologies émergentes et aux innovations récentes qui peuvent améliorer l'efficacité et la fiabilité des systèmes photovoltaïques.

Le deuxième chapitre sera dédié aux convertisseurs statiques pour les systèmes photovoltaïques. Les convertisseurs jouent un rôle crucial dans la conversion du courant continu (DC) produit par les panneaux solaires en courant alternatif (AC) compatible avec le réseau électrique. Nous étudierons les différents types de convertisseurs, leurs principes de fonctionnement, leurs performances et leur impact sur la qualité de l'énergie. Ce chapitre comprendra également une discussion sur les défis techniques liés aux convertisseurs et les solutions possibles pour améliorer leur efficacité et leur robustesse.

Le troisième chapitre portera sur la simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique. À l'aide de logiciels de simulation tels que MATLAB/Simulink, nous développerons un modèle détaillé du système intégrant tous les composants étudiés dans les chapitres précédents. Cette simulation permettra de reproduire les conditions réelles de fonctionnement, d'évaluer les performances du système sous diverses conditions météorologiques et de charge, et d'analyser l'impact de la production photovoltaïque sur la stabilité et la qualité du réseau

électrique. Les résultats de cette simulation fourniront des insights précieux pour optimiser la conception et l'intégration des systèmes photovoltaïques.

En conclusion, ce mémoire vise à offrir une contribution significative à la compréhension et à l'optimisation des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique. En combinant une étude détaillée des composants, une analyse approfondie des convertisseurs statiques et une simulation réaliste du système global, nous espérons fournir des recommandations pratiques pour les ingénieurs, les chercheurs et les décideurs politiques. Ces recommandations permettront de maximiser les bénéfices de l'énergie photovoltaïque et de promouvoir une adoption plus large et plus efficace de cette technologie dans le cadre des efforts mondiaux de transition énergétique.

CHAPITRE I :

Composants des systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Introduction :

L'énergie solaire est répartie plutôt que concentrée, ce qui la rend plus adaptée aux charges faibles. Ce type d'énergie est écologique, silencieuse, entièrement autonome, sans frais de fonctionnement, mais son utilisation nécessite un investissement considérable. Les éléments d'un système solaire varient en fonction de l'utilisation. Il existe des systèmes photovoltaïques qui fonctionnent de manière autonome et des systèmes photovoltaïques qui sont connectés au réseau. Le domaine principal de recherche de ce mémoire se concentre sur la deuxième catégorie de systèmes connectés au réseau. Le schéma bloc ci-dessous illustre les éléments essentiels d'un système photovoltaïque connecte au réseau.

I.1. Les différentes connexions des systèmes photovoltaïques :

En fonction de l'utilisation de l'énergie, il y a trois catégories distinctes de Systèmes PV :

- Systèmes autonomes.
- Systèmes hybrides.
- Systèmes raccordés au réseau. [1]

I.1.1. Les systèmes autonomes :

D'après la nécessité, les systèmes autonomes fournissent de l'électricité à un ou plusieurs consommateurs situés dans des zones éloignées du réseau. La Figure (I.1) ci-dessous illustre l'illustration d'un système photovoltaïque autonome connecté à un système de stockage afin de satisfaire les besoins des consommateurs à tout moment.

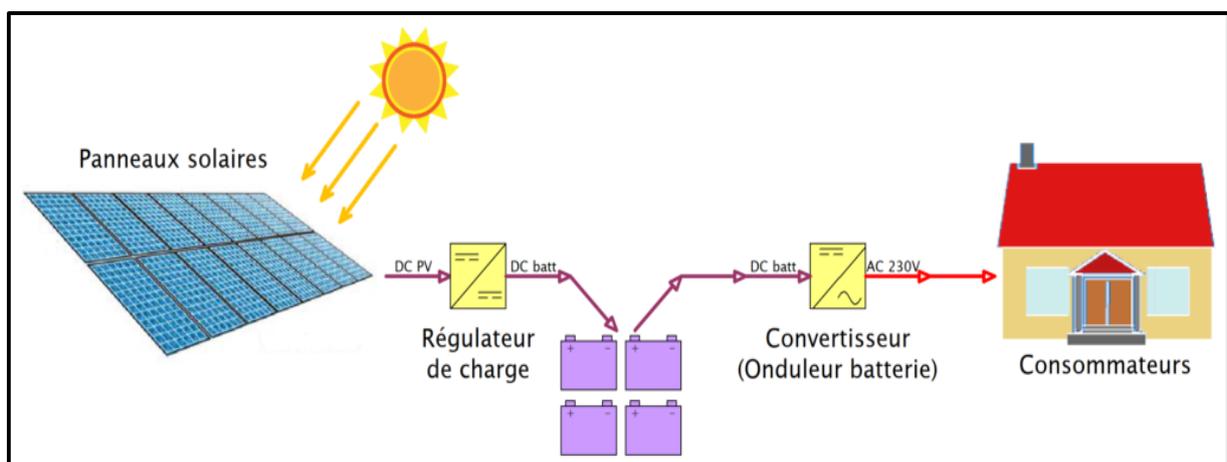


Figure I.1 : Solaire photovoltaïque autonome en site isolé [1]

CHAPITRE I : Composants des systèmes photovoltaïques connecte au réseau

I.1.2. Les systèmes Hybrides :

Les systèmes photovoltaïques hybrides intègrent un générateur photovoltaïque et un autre générateur : éolien, groupe électrogène, système hydroélectrique et même parfois le réseau publique d'électricité.

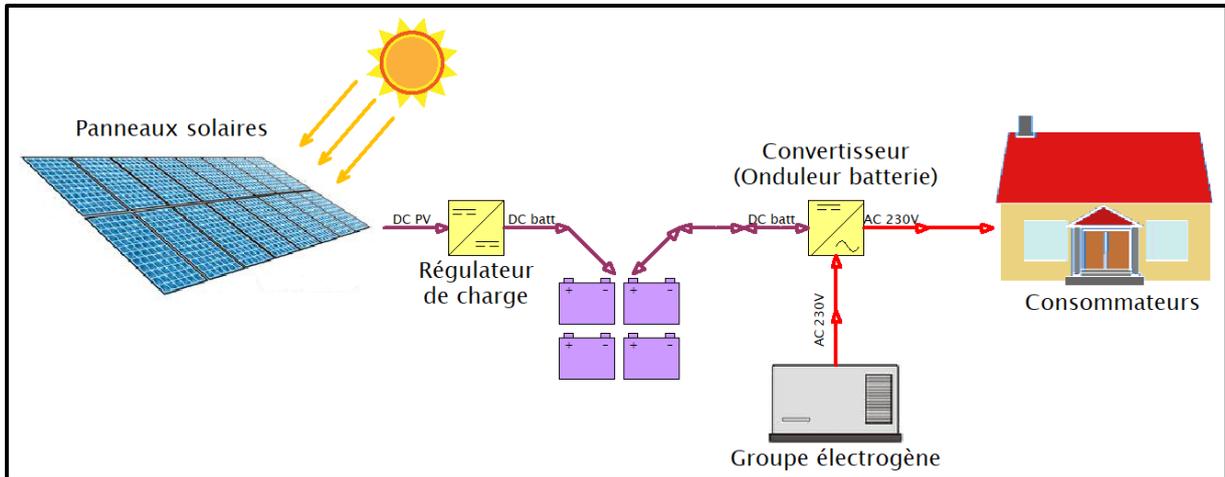


Figure I.2 : Solaire photovoltaïque hybride [1]

I.1.3. Les systèmes raccordés au réseau :

Un système solaire connecté au réseau est un système qui est directement connecté au réseau électrique grâce à des convertisseurs. Le fonctionnement de ce genre de système présente de nombreux avantages pour le (producteur/consommateur) car c'est le réseau qui assure le maintien de l'équilibre entre la production et la consommation d'énergie.

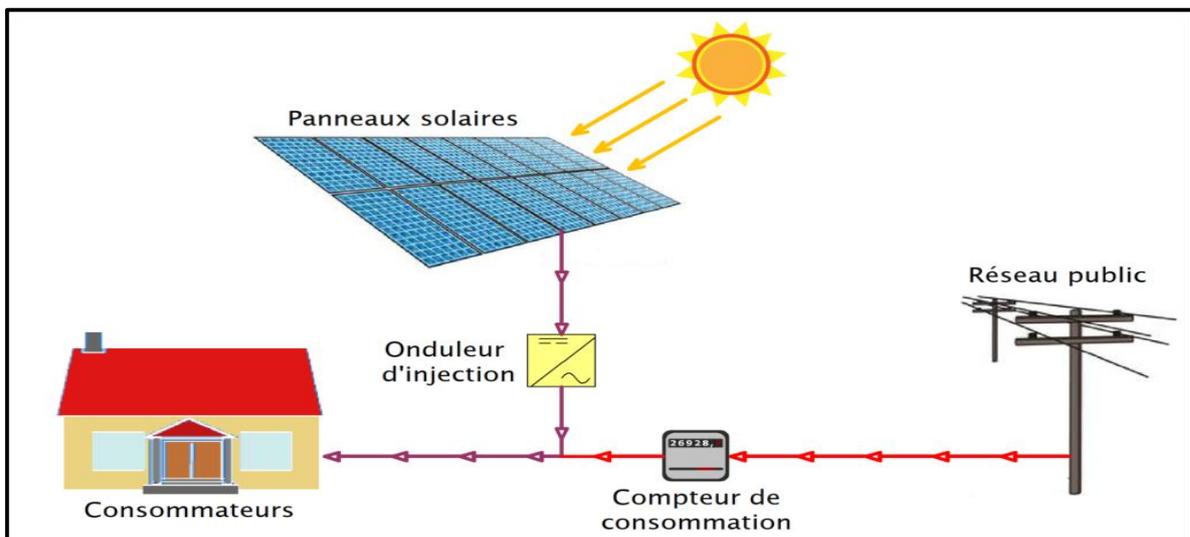


Figure I.3 : Solaire photovoltaïque en autoconsommation [1]

I.2. Les panneaux photovoltaïques :

Un panneau solaire photovoltaïque est composé d'un ensemble de cellules photovoltaïques, composées d'un matériau semi-conducteur en deux couches, l'une ayant une dotation positive (P) et l'autre ayant une dotation négative (N). Il s'agit d'une union PN. Quand un électron est retiré, un "trou" se crée à sa place, agissant comme une charge positive. La jonction PN entraîne une émission d'électrons et de trous de part et d'autre (les électrons vers N et les trous vers P), ce qui entraîne une variation de potentiel (exprimée en volts). Ainsi, une cellule photovoltaïque génère du courant électrique constant.

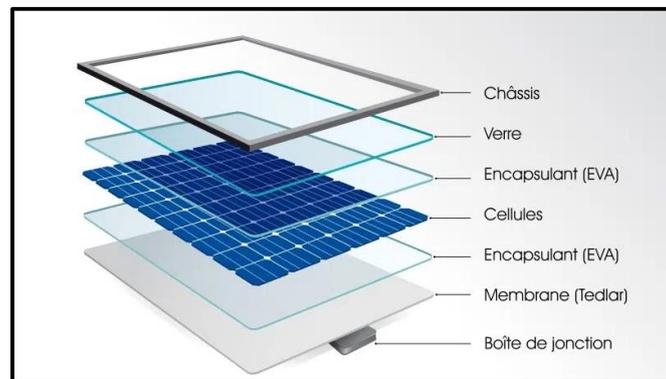


Figure I.4 : composition panneau solaire [2].

I.3. Cellule photovoltaïque :

La cellule solaire est une combinaison de matériaux qui permet de transformer de manière efficace l'énergie lumineuse en électricité.

La combinaison de plusieurs couches de matériaux semi-conducteurs de différentes compositions crée une jonction. La fusion ressemble à une sorte de « sandwich ». En traversant la jonction, un photon libère son énergie et engendre un transfert d'électrons de la zone négative, appelée n, vers la zone positive, appelée p. Lorsqu'on connecte chaque face du sandwich à un fil conducteur, on crée un courant électrique. [3].

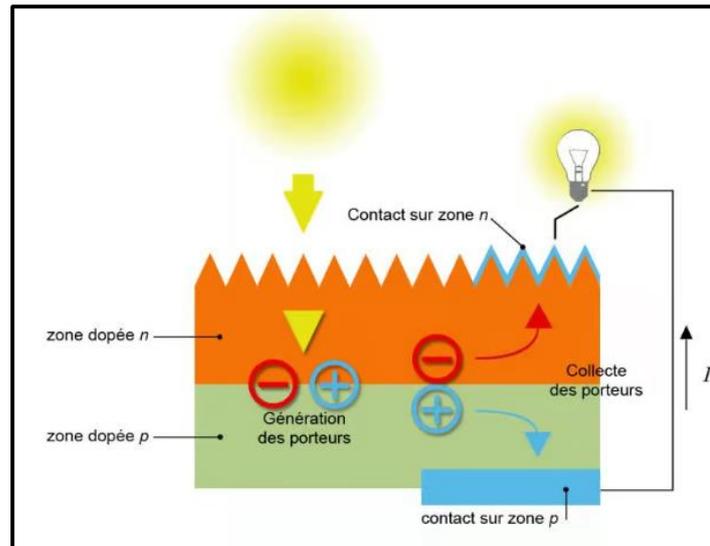


Figure I.5 : Structure d'une cellule photovoltaïque.

I.4. Les différents types de Cellule photovoltaïque :

I.4.1. Cellule en silicium polycristallin :

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.

➤ **Avantages :**

- Bon rendement (environ 100 Wc/m^2)
- Durée de vie importante (+/- 30 ans)
- Moins cher que le monocristallin

➤ **Inconvénients :**

- Rendement faible sous un faible éclairciment

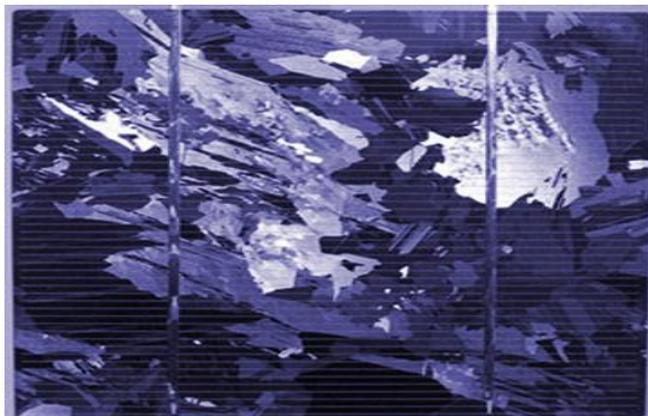


Figure I.6 : Cellule photovoltaïque polycristallin [3].

I.4.2. 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.

➤ **Avantages :**

- Meilleur rendement que le polycristallin (environ 150 Wc/m²)
- Durée de vie importante (+/- 30 ans)

➤ **Inconvénients :**

- Plus cher que le polycristallin
- Rendement faible sous un faible éclairement

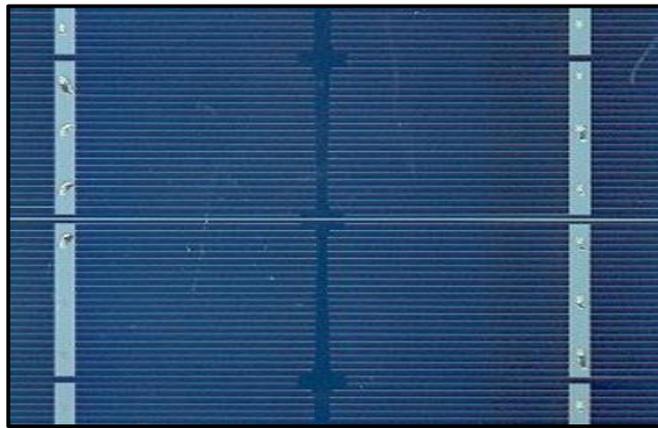


Figure I.7 : Cellule photovoltaïque monocristalline [3].

I.4.3. 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".

➤ **Avantages :**

- Fonctionnent avec un éclairement faible
- Bon marché par rapport aux autres types de cellules
- Moins sensible aux températures élevées
- Souple

CHAPITRE I : Composants des systèmes photovoltaïques connecte au réseau

➤ Inconvénients :

- Rendement faible en plein soleil (environ 60 Wc/m^2), les cellules en couche mince nécessite une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses
- Durée de vie courte (+/- 10 ans), performances qui diminuent sensiblement avec le temps

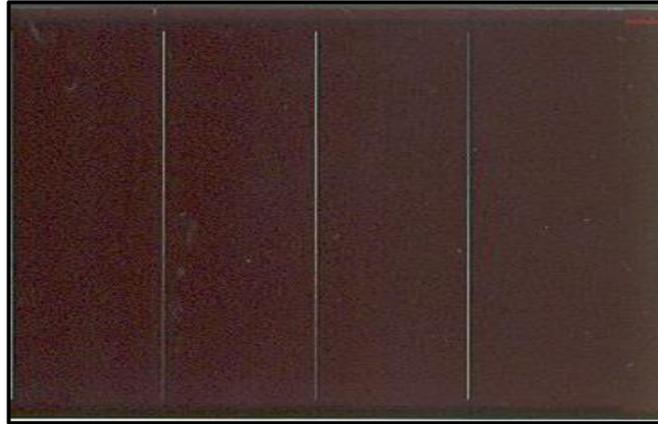


Figure I.8 : Cellule photovoltaïque amorphe [3].

I.4.4. Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS :

Les cellules CIS représentent une nouvelle génération de cellules solaires sous forme de films minces, de type CIS (cuivre, indium, sélénium) ou CIGS (cuivre, indium, gallium et sélénium). Les matières premières nécessaires à la fabrication de ces cellules sont plus faciles à se procurer que le silicium utilisé dans les cellules photovoltaïques classiques (bien que ce dernier soit déjà très abondant sur terre). De plus, leur efficacité de conversion énergétique est la plus élevée à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couche mince.

➤ Avantages :

- Meilleurs rendements par rapport aux autres cellules photovoltaïques en couche mince
- La cellule peut être construite sur un substrat flexible

➤ Inconvénients :

- Les cellules en couche mince ont un rendement plus faible que les cellules "épaisses"

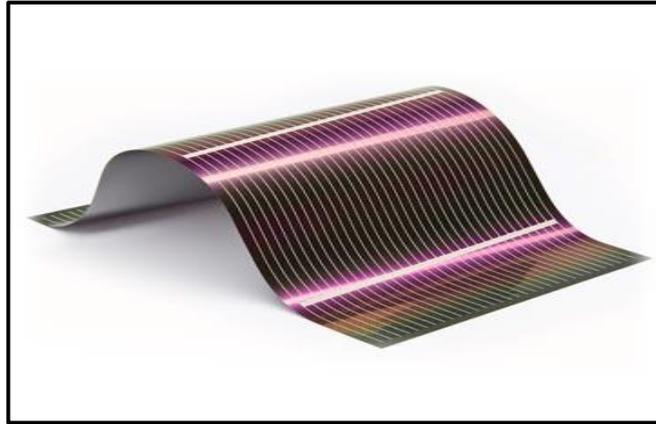


Figure I.9 : Cellule photovoltaïque en couche mince à base de cuivre [3].

I.4.5. Cellule multijonction :

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.

- Avantages
- Rendement inégalé
- Inconvénients
- Pas ou peu d'applications commerciales



Figure I.10 : cellule multijonction [3].

I.5. Facteur de forme :

La courante tension de la cellule ne se présente pas sous la forme d'un rectangle de côtés I_{cc} et V_{co} , mais plutôt sous la forme d'un coude avec un point de puissance maximum. Le rapport entre la puissance maximale et le produit $I_{cc} V_{co}$ est appelé facteur de forme (FF) [5].

CHAPITRE I : Composants des systèmes photovoltaïques connecte au réseau

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (I.1)$$

$$P_m = V_m \cdot I_m \quad (I.2)$$

I.6. Le rendement :

Le rendement énergétique, également connu sous le nom de rendement de conversion, correspond à la proportion entre la puissance maximale générée et la puissance de rayonnement solaire générée par la cellule photovoltaïque de surface S . Ce taux est calculé dans les conditions habituelles, c'est-à-dire avec une intensité solaire de 1 kW/m^2 à une température de cellule de 25°C et un spectre AM1.5. Ces conditions normalisées sont appelées STC, ce qui signifie "Conditions de test standard". Le niveau d'énergie 11 de la cellule est représenté par [5] :

$$\eta = \frac{P_m}{\Phi \cdot S} = \frac{P_m}{P_0} \quad (I.3)$$

I.7. Point de puissance maximale (PPM) :

C'est le point de fonctionnement (V_{mp} , I_{mp}) où la cellule solaire génère sa puissance maximale. La figure (I.11) montre les courbes typiques I-V, et P-V pour un module PV de 100kW [5].

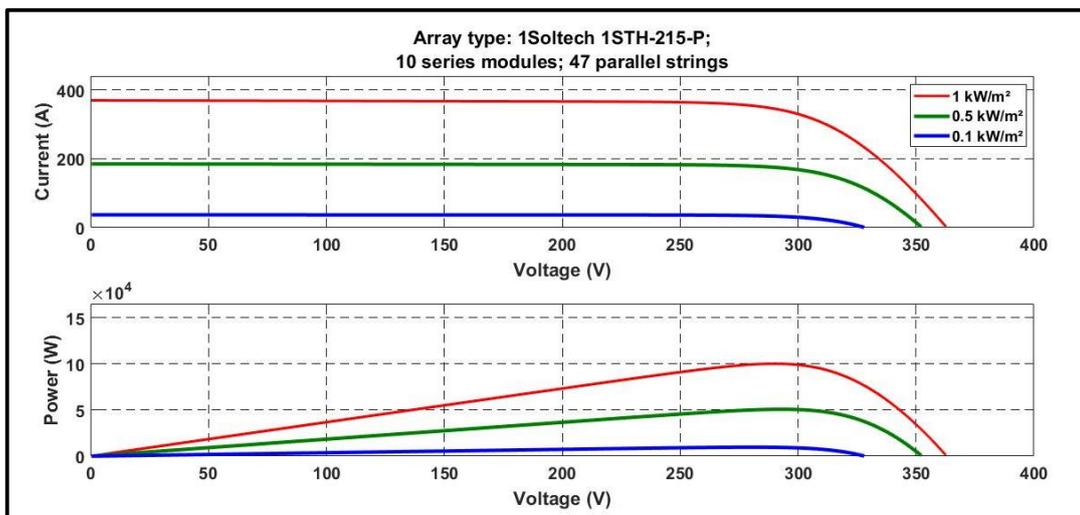


Figure I.11 : Caractéristiques I-V, P-V, d'un module PV

I.8. Circuit équivalent et modèle mathématique d'une cellule solaire réelle :

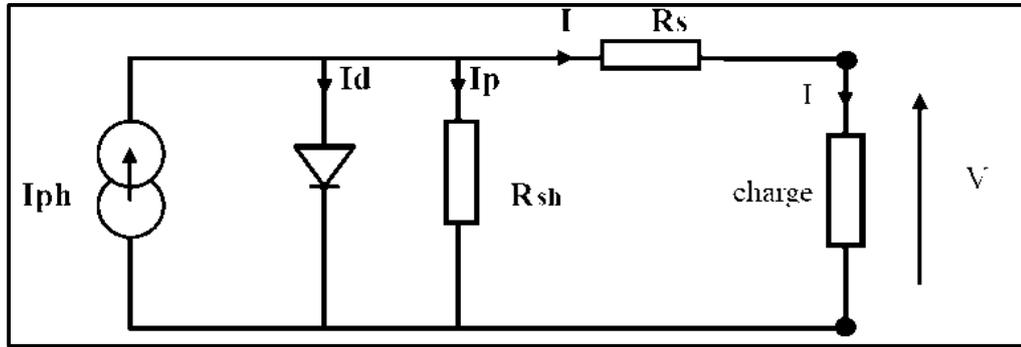


Figure I.12 : Circuit équivalent de diode d'une cellule photovoltaïque réel [6].

En appliquant la loi de Kirchhoff sur ce circuit en obtient le modèle mathématique suivant :

$$I = I_{ph} - I_d - I_r \quad (I.4)$$

Avec :

$$I_d = I_0 \left[e^{\left(\frac{q(V+R_s I)}{nkT} \right)} - 1 \right] \quad (I.5)$$

$$I_p = \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (I.6)$$

Donc :

$$I = I_{ph} - \left[I_0 \left[e^{\left(\frac{q(V+R_s I)}{nkT} \right)} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right] \times \frac{R_s}{R_s + R_{sh}} \quad (I.7)$$

I.9. Caractéristiques courant - tension (I-V) de la cellule photovoltaïque :

I.9.1. Courant de court-circuit (obtenue pour V=0) :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V+R_s I_{cc}}{V_T} \right)} - 1 \right] - \left(\frac{V}{R_{sh}} + \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}} \right) \quad (I.8)$$

Le terme I_d devant I_{ph} peut être négligé en court-circuit $V=0$, et pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible). La formule simplifiée du courant de court-circuit est donc [7]:

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right)} \quad (I.9)$$

D'où :

$$I_{cc} \cong I_{ph} \quad (I.10)$$

I.9.2. Tension de circuit ouvert (obtenue pour I= 0) :

Son expression est déduite de l'équation (I.8) [7]:

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V_{co}}{V_T}\right)} - 1 \right] - \left(\frac{V_{co}}{R_{sh}}\right) \quad (I.11)$$

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V_{co}}{V_T}\right)} - 1 \right] - \left(\frac{V_{co}}{R_{sh}}\right) \quad (I.11)$$

Dans le cas idéal ($R_s \rightarrow 0$, $R_{sh} \rightarrow \infty$, $I_{ph} = I_{cc}$) on obtient :

$$V_{co} = V_T \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right] \quad (I.12)$$

I.10. Regroupement des cellules :

Dans des conditions d'ensoleillement habituelles (1000 W/m^2 ; 25°C ; AM 1,5), une cellule en silicium de 150cm^2 peut générer une puissance maximale d'environ 2,3 Wc à une tension de 0,5 V. Ainsi, une cellule photovoltaïque basique est considérée comme un générateur photovoltaïque de faible puissance, ce qui est insuffisant pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Il est donc possible de fabriquer des générateurs photovoltaïques en associant, en série et/ou en parallèle, un grand nombre de cellules élémentaires [8].

I.10.1. Regroupement en série :

Une série de cellules (N_s) permet d'accroître la tension du générateur photovoltaïque. On utilise donc le même courant pour traverser les cellules et on obtient la caractéristique du groupement série en additionnant les tensions élémentaires de chaque cellule. Les caractéristiques électriques d'une association série de cellules (N_s) sont résumées dans l'équation [8].

$$V_{co}N_s = N_s \times V_{co} \quad (I.13)$$

$$I_{cc}N_s = I_{cc} \quad (I.14)$$

CHAPITRE I : Composants des systèmes photovoltaïques connecte au réseau

- V_{coNs} : la somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.
- I_{ccNs} : courant de court-circuit de N_s cellules en série.

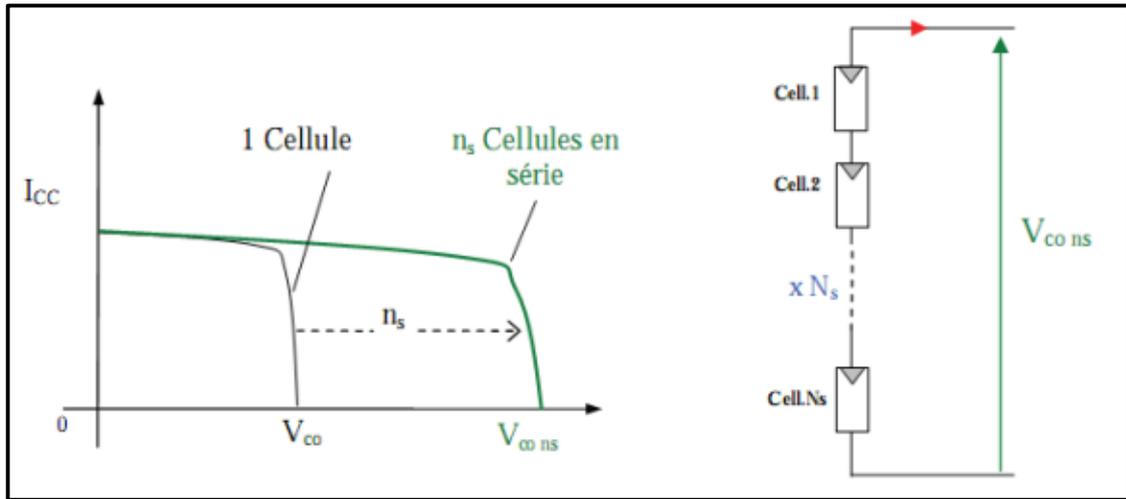


Figure I.13 : caractéristique d'un groupement de n cellules identiques en série [8].

I.10.2. Regroupement en parallèle :

Il est envisageable d'associer une cellule (N_p) en parallèle, comme illustré dans la figure (I.14), ce qui permet d'augmenter le courant de sortie du générateur ainsi généré. Lorsqu'il y a un groupe de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue en additionnant les courants [8].

Avec :

$$I_{ccNp} = I_{cc} \times N_p \quad (I.15)$$

$$V_{co} = V_{coNp} \quad (I.16)$$

- I_{ccNp} : la somme des courants de court circuit de (N_p) cellule en parallèle.
- V_{coNp} : tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle

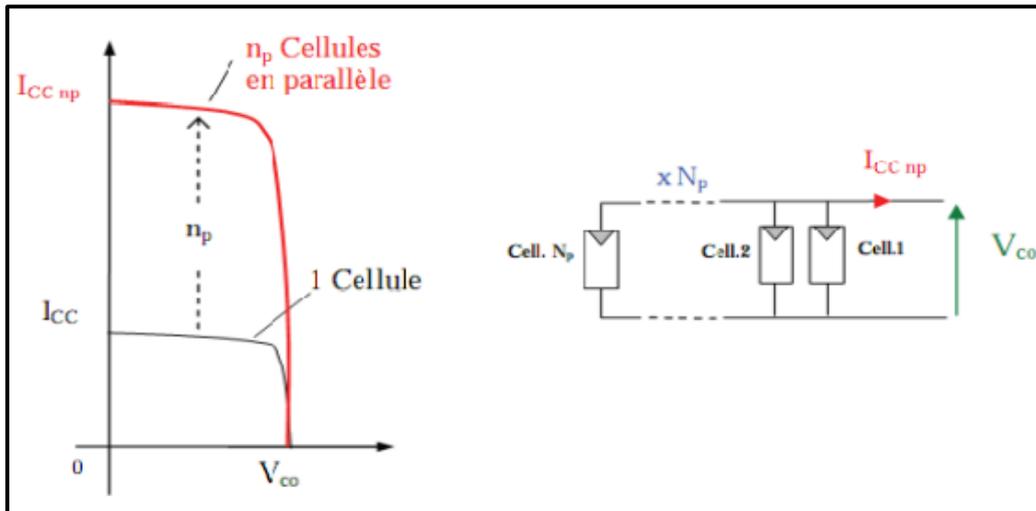


Figure I.14 : caractéristique d'un groupement de n cellules identiques en parallèle [8].

I.10.3. Regroupement hybride (série et parallèle) :

Ce genre d'association est souvent employé afin d'obtenir une tension considérable, car l'association en série des photopiles produit une tension égale à la somme des.

Les différentes tensions et le courant sont identiques à ceux d'une seule cellule. Le schéma ci-dessous illustre la caractéristique d'un groupe de deux modules solaires, ce qui peut être généralisé à une variété de modules solaires en série. Ce type de groupe accroît la tension.

Dans le but d'atteindre des puissances de quelques kW, à une tension adéquate, il est essentiel de combiner les modules en panneaux et de les monter en rangées de panneaux série et parallèle afin de créer ce qu'on appelle un générateur photovoltaïque.

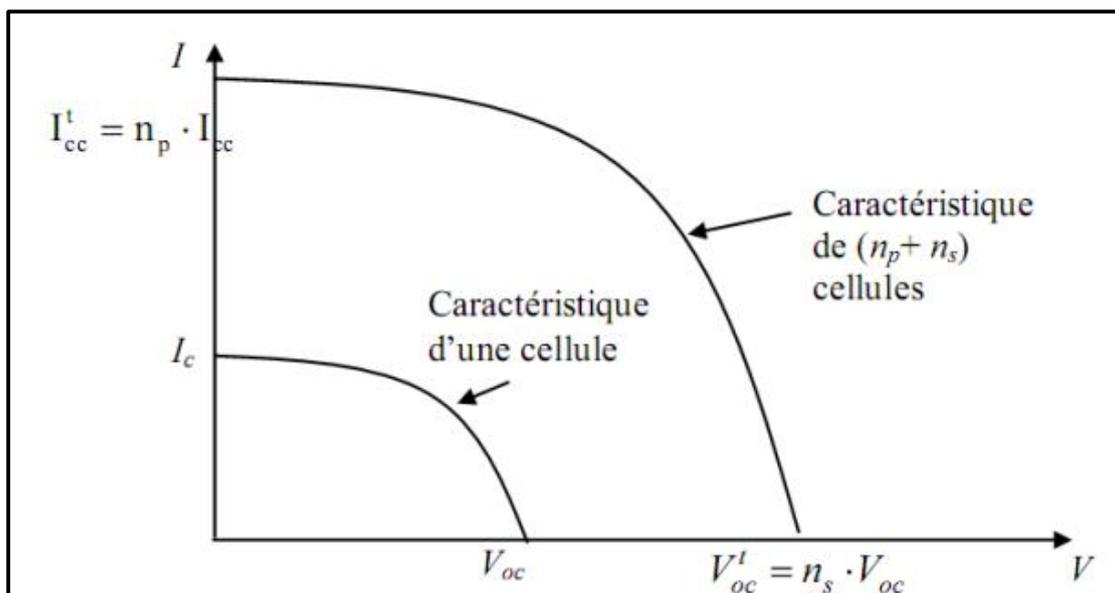


Figure I.15 : caractéristique résultante d'un groupement hybride de cellules identiques.

I.11. Protection d'un générateur photovoltaïque :

Afin d'assurer une durée de vie prolongée d'une installation photovoltaïque visant à générer de l'électricité, il est nécessaire d'inclure des protections électriques dans les modules PV pour prévenir les pannes destructrices causées par l'association de cellules en série et de panneaux en parallèle. Deux types de protections traditionnelles sont employés dans les installations actuelles pour cette raison.

- La diode anti-retour protégera les GPV d'un courant négatif. Il est possible que ce phénomène se produise lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou lorsqu'une charge en connexion directe peut passer du mode récepteur au mode générateur, comme une batterie pendant la nuit.
- Lorsque l'éclairement n'est pas homogène, les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules, ce qui évite l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. La conduction de ces diodes a un impact sur la caractéristique de sortie du générateur, en entraînant une diminution d'une partie de la production d'énergie et en créant deux niveaux de puissance maximum [9].

I.11.1. Protection lors de la connexion en parallèle de plusieurs GPV :

En cas de mise en parallèle de plusieurs chaînes de cellules sur une charge de type batterie, par exemple, il existe un risque que les chaînes de cellules éclairées débitent dans des chaînes sombres ou que la batterie se décharge à travers le générateur. Il existe des diodes anti-retour qui sont mises en série avec le GPV (de blocage) pour cela.

La présence de cette diode est essentielle lorsque le module PV est alimenté par une batterie. En réalité, cette diode empêche le débit de la batterie sur le module photovoltaïque pendant la nuit. Lorsque la cellule n'est pas illuminée, il est possible qu'une batterie se décharge à travers celle-ci si nous ne disposons pas d'une diode de blocage [9].

I.11.2. Protection lors de la connexion en série de plusieurs GPV :

En raison d'un ombrage ou de la chaleur, toutes les cellules en série présentent des caractéristiques différentes, ce qui entraîne des déséquilibres. Une diode by-pass est indispensable lors d'un montage de cellules PV en série afin d'empêcher le fonctionnement (en sens inverse) d'une cellule ombrée et ainsi éviter sa destruction [9].

I.12. Influence des systèmes photovoltaïques sur le réseau de distribution :

Dans l'ancien temps, les réseaux de distribution étaient considérés comme des éléments passifs où les flux de puissance se déplacent de manière unidirectionnelle depuis la source jusqu'aux individus finaux. En raison de l'intégration des productions décentralisées, les flux de puissance et les tensions sont affectés non seulement par les charges, mais également par les sources. En raison de ces particularités techniques des installations solaires photovoltaïques, le raccordement des systèmes photovoltaïques au réseau peut avoir des conséquences significatives sur leur contrôle. Les impacts les plus importants des panneaux solaires photovoltaïques sur le réseau de distribution sont les suivants [9] :

I.12.1. Influence sur le plan de tension :

La présence de panneaux solaires photovoltaïques a un impact sur la tension et les systèmes de réglage du réseau. Les injections de puissances actives et réactives sur le réseau entraînent une variation de la tension. Pendant une période de forte luminosité et de faible consommation, il est possible que la tension de certains nœuds du réseau dépasse le seuil autorisé. Selon une recherche menée par l'université d'agriculture et technologie de Tōkyō, dans la ville d'Ota City, qui regroupe environ 550 installations photovoltaïques, l'entrée d'énergie sur le réseau entraîne une augmentation de la tension jusqu'à un seuil qui entraîne le découplage de certains systèmes, en particulier en fin de semaine lorsque la consommation est faible.

I.12.2. Influence sur le plan de protection :

Les systèmes photovoltaïques contribuent peu au courant de défaut dans le réseau de distribution, ce qui a des répercussions limitées sur la protection. Cependant, il est possible d'affecter la sélectivité et la sensibilité des protections du réseau, ce qui peut entraîner un déclenchement inattendu du départ sain ou l'aveuglement de la protection du départ en problème.

I.13. Le Potentiel Solaire en Algérie :

En raison de sa position géographique, l'Algérie possède l'un des plus grands gisements solaires au monde. Sur la quasi-totalité du territoire national, la durée d'insolation dépasse les 2000 heures par an et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

La quantité d'énergie reçue chaque jour sur une surface horizontale de 1m² est d'environ 5KWh sur la plupart du territoire national, ce qui équivaut à environ 1700KWh/m² par an au nord et 2263KWh/m² par an au sud du pays [9].

CHAPITRE I : Composants des systèmes photovoltaïques connecte au réseau

Au Sahara, cette potentialité peut jouer un rôle crucial dans le développement durable si elle est mise en valeur de manière économique. Le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie est présenté dans le tableau ci-dessous.

Tableau I.1 : Potentiel solaire en Algérie.

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie	4 %	10 %	86 %
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

I.14. Les régulateurs :

Le régulateur ou convertisseur continu - continu est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue avec un rendement élevé. Le découpage se fait à une fréquence très élevée ce qui a pour conséquence de créer une tension moyenne. C'est l'analogie, pour les sources de tensions continues, du transformateur utilisé en régime alternatif.

Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le régulateur est dit dévolteur. Dans le cas contraire, il est dit survolteur. Il existe des régulateurs capables de travailler des deux manières (Boost-Buck). [10].

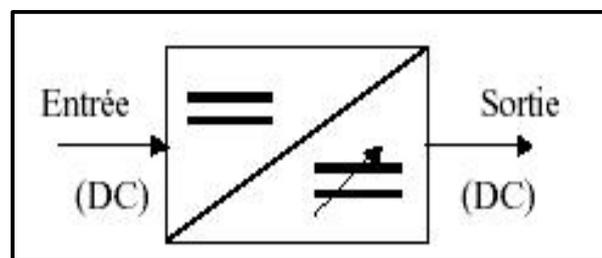


Figure I.16 : principe de base d'un hacheur [10].

I.15. Les onduleurs :

L'onduleur est l'un des éléments essentiels de la chaîne photovoltaïque. Il offre la possibilité de transformer la tension continue générée par le hacheur en une tension sinusoïdale afin de fournir plus d'applications. Les semi-conducteurs ont joué un rôle crucial dans le développement de ces

CHAPITRE I : Composants des systèmes photovoltaïques connecte au réseau

convertisseurs, en particulier grâce à leur grande souplesse. Cela a donné lieu à la création de nouveaux types d'onduleurs, ainsi qu'à l'amélioration des techniques de commande et à la réduction des coûts d'exploitation.

Grâce à ces progrès technologiques, il est possible d'incorporer l'onduleur dans des applications particulièrement captivantes, non seulement dans le secteur industriel, mais également dans la vie quotidienne [11].

Conclusion :

Depuis quelques années, la conversion photovoltaïque a connu une évolution significative en raison de l'intérêt grandissant pour l'énergie solaire. Dans ce chapitre, nous avons exposé les divers concepts liés à l'énergie solaire et à la création d'un système photovoltaïque. Nous avons également examiné le principe de la conversion photovoltaïque, les technologies utilisées, ainsi que les différents systèmes de connexion photovoltaïques, lesquels seront principalement abordés dans notre travail. Dans les chapitres à venir, nous aborderons la modélisation des différentes composantes de notre système, l'optimisation à l'aide d'un algorithme MPPT pour atteindre le point de puissance maximale, et enfin, le contrôle du système en ce qui concerne le réseau.

CHAPITRE II :

Les convertisseurs statiques pour les systèmes photovoltaïques

Introduction :

Les convertisseurs sont des dispositifs (équipements électroniques) qui sont intégrés entre le générateur photovoltaïque (PV) et la charge afin de maximiser l'utilisation de l'énergie fournie par le PV. Il est essentiel de maintenir la puissance maximale fournie par le GPV, tout en réduisant au minimum les pertes de chaleur dans les composants du convertisseur.

II.1 Convertisseur DC/DC pour les systèmes d'énergie solaire :

Afin d'assurer un fonctionnement optimal du panneau solaire photovoltaïque, il est nécessaire d'installer un dispositif de contrôle entre le panneau solaire photovoltaïque et la charge. Cette adaptation vise à optimiser le transfert d'énergie vers la charge. Il est possible d'augmenter considérablement le rendement en puissance du photovoltaïque en utilisant un convertisseur statique DC-DC (hacheur) muni d'une commande MPPT, ce qu'on appelle la poursuite de point de puissance maximale [12].

II.2 Types de hacheurs :

II.2.1 Le hacheur dévolteur (Buck) :

Ce type de convertisseur DC-DC est un hacheur abaisseur. D'où son nom, la tension de sortie est inférieure à celle d'entrée.

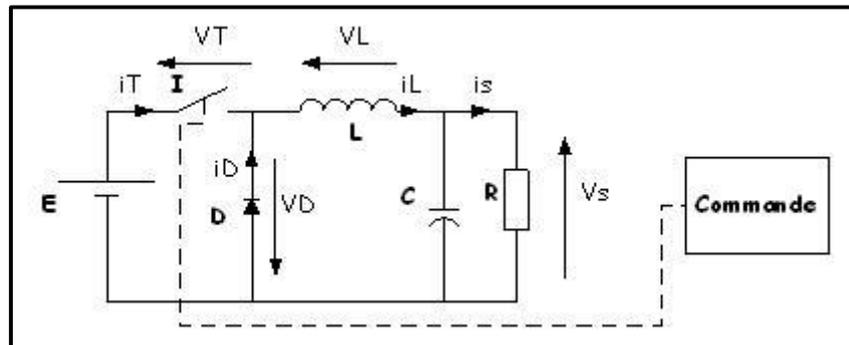


Figure II.1 : Schéma électrique d'un hacheur série [12].

L'ensemble du circuit est composé d'un interrupteur I à amorçage et blocage commandés (Thyristor avec circuit d'extinction, transistor bipolaire, transistors MOS ou IGBT...) et d'un interrupteur à blocage et amorçage spontanés (diode D).

La charge est formée par la résistance R . Les éléments L et C constituent un filtre qui vise à réduire l'oscillation causée par le découpage sur la tension et le courant de sortie. En calculant correctement ces éléments, on peut supposer que i_s et V_s sont continus (on ignore l'ondulation résiduelle). [12].

II.2.2 Le hacheur dévolteur-survolteur :

Le convertisseur indirect DC-DC avec stockage inductif est connu sous le nom d'hacheur abaisseur-élevateur. Le type de source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et le type de charge de sortie continue est de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge des résistances).

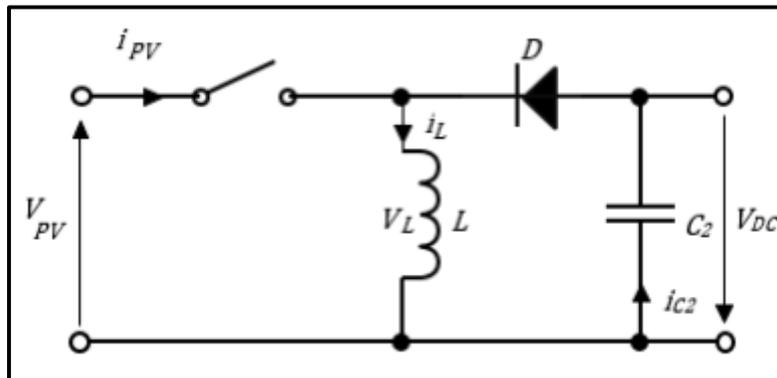


Figure II.2 : Schéma électrique d'un hacheur abaisseur-élevateur [12].

II.2.3 Le hacheur survolteur (Boost) :

Ce dispositif est désigné sous le nom de hacheur parallèle, car le semi-conducteur à fermeture et ouverture commandées est dérivé vers les bornes de l'entrée.

On utilise le convertisseur BOOST dans les systèmes photovoltaïques qui ont un suiveur du point de puissance maximale (MPPT). Ce phénomène découle du fait que ce convertisseur utilise un mode de courant continu pour extraire autant de puissance que possible des cellules solaires.

Pour notre étude, nous avons choisi le convertisseur BOOST car il présente des caractéristiques exceptionnelles telles que la capacité d'obtenir une tension élevée à sa sortie, ce qui garantit un bon rendement. [13].

II.2.3.1 Principe de fonctionnement :

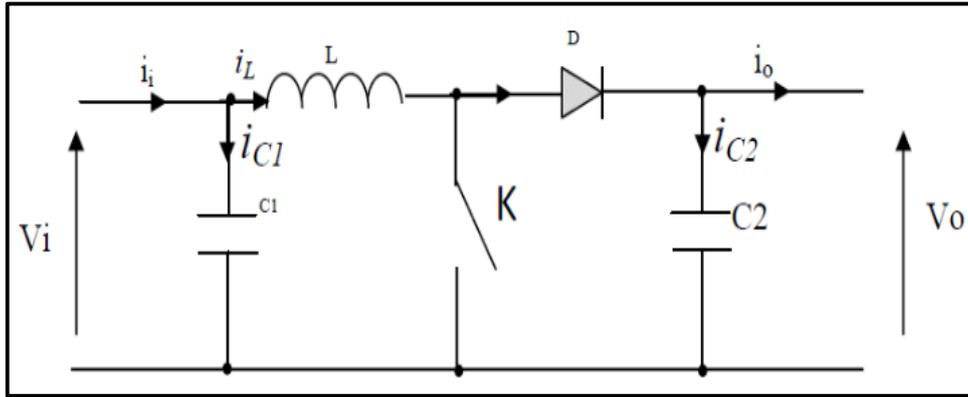


Figure II.3 : Schéma de principe d'un convertisseur Boost [13].

Son fonctionnement repose sur la position du commutateur K, qu'il soit ouvert ou fermé. Pendant la durée t_{ON} c.-à-d. $d \in [0, d.Ts]$ lorsque ce dernier est fermé, le courant augmente progressivement, ce qui permet à l'inductance de stocker davantage d'énergie tout au long de la fermeture de K. Ensuite, le switch passe à l'état d'ouverture, c'est-à-dire pendant la période t_{OFF} $d \in [d.Ts, Ts]$; pendant cette transition de la fermeture à l'ouverture, l'inductance L s'oppose à la fluctuation du courant I_L dans son circuit.

Le flux magnétique dans son noyau est également affecté par cette variation, ce qui entraîne une tension à ses bornes qui s'ajoute à la tension de source, ce qui se retrouve aux bornes du condensateur C2. La variation de la taille du courant à l'intérieur de la self est exprimée par :

II.2.3.2 Modèle mathématique équivalent :

En appliquant les lois de Kirchhoff sur le circuit de la figure, on obtient les systèmes d'équations suivants [13] :

Pour la première période dTs :

$$\begin{cases} i_{c1} = c1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2} = c2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ v_L(t) = L \frac{di_l}{dt} = -v_i(t) \end{cases} \quad (II.1)$$

Pour la deuxième période (1-d) Ts:

$$\begin{cases} i_{c1} = c1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2} = c2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_l(t) - i_i(t) \\ v_L(t) = L \frac{di_l}{dt} = v_i(t) - v_o(t) \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

II.3 La commande MPPT :

Il est essentiel de suivre le point de puissance maximale (MPPT) (The maximum power point tracker) afin d'extraire la puissance maximale du module PV. Un convertisseur DC/DC est généralement installé entre la photovoltaïque et la charge, ce qui permet de modifier le rapport cyclique du point de fonctionnement [14].

II.3.1 Les méthodes de poursuite de MPP :

De nombreux algorithmes sont employés afin de déterminer le point de puissance maximale. Dans l'idéal, le contrôle de la puissance est automatisé afin de s'ajuster aux conditions météorologiques changeantes.

II.3.1.1 Méthodes a contre réaction de tension :

Le fonctionnement de ce type de mécanismes repose sur la régulation de la tension de fonctionnement des panneaux en comparant cette tension à une tension de base. Cela entraîne la création d'une tension d'erreur qui modifie le rapport cyclique de la PWM de commande pour supprimer cet avertissement. Trois types de méthodes sont disponibles en fonction de la nature de cette tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe).

- Méthode à tension de référence fixe
- Méthode a tension de référence en fonction de Voc
- Tension de référence extrême (Cellule pilote)

II.3.1.2 Méthodes a contre réaction de courant :

L'utilisation de cette méthode ne requiert qu'une mesure de courant afin d'obtenir des informations sur le point opérationnel et actuel du système. Permet de déterminer le courant optimal dans lequel le panneau doit fonctionner afin d'obtenir le maximum de puissance.

- Méthode à courant de référence en fonction du courant de court-circuit Isc
- Méthode de maximisation du courant de sortie

II.3.1.3 Méthodes a contre réaction de puissance :

L'objectif de ces méthodes est de trouver le point de fonctionnement optimal du panneau en utilisant des algorithmes de recherche itérative afin d'optimiser la puissance générée sans perturber le fonctionnement du système. Les valeurs de référence ne reposent pas sur des valeurs préétablies ou à partir des paramètres opérationnels, mais plutôt sur la maximisation constante de la puissance produite par les panneaux solaires. Par conséquent, pour un point spécifique, on effectue une recherche dans un certain sens. Si la puissance du panneau augmente, on maintient cette direction de recherche, sinon on cherche dans le sens inverse.

- **Algorithme perturbation et observation :**

On utilise principalement l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPM), qui repose sur la perturbation du système en augmentant ou en diminuant la tension de référence, ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur (DC-DC), puis en observant l'effet sur la puissance de sortie pour une éventuelle correction de ce rapport cyclique (D).

Si la puissance actuelle du générateur $P(k)$ est plus élevée que la valeur précédente $P(k-1)$, alors la direction de perturbation précédente est conservée, sinon la perturbation du cycle précédent est inversée. La Figure présente l'organigramme de l'algorithme de perturbation et d'observation (P et O).

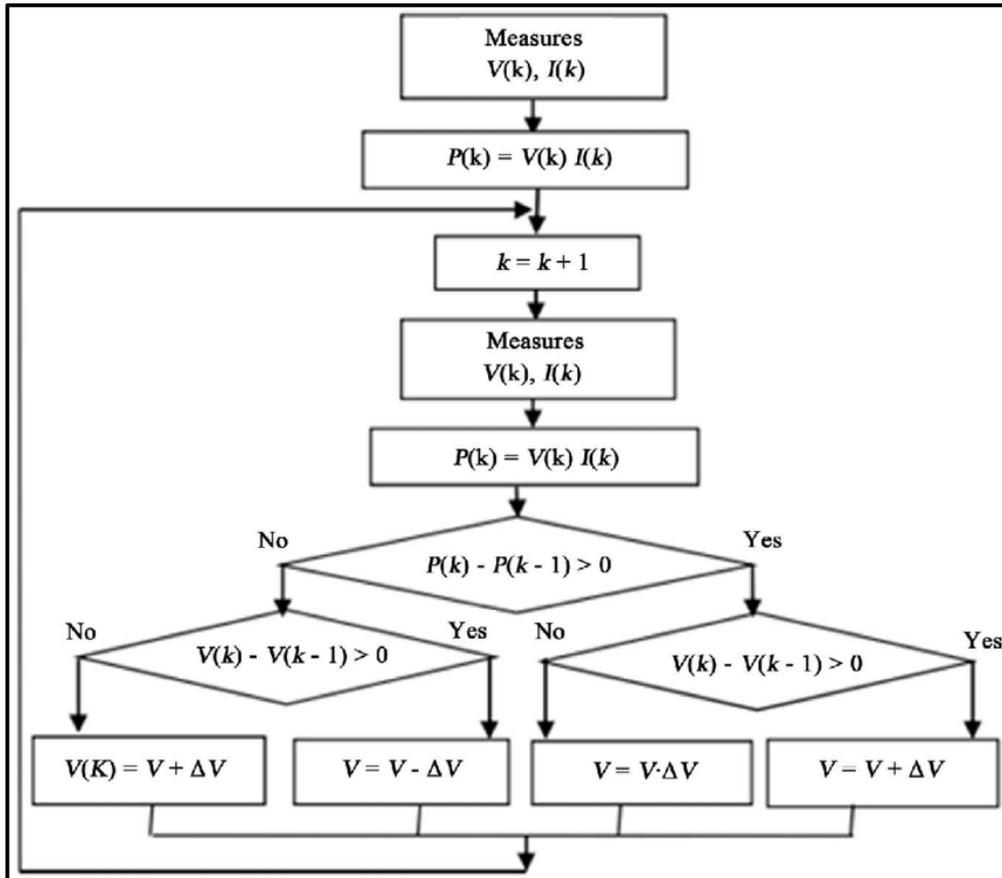


Figure II.4 : Algorithme de perturbation et de l’observation (P&O) [14].

• **Algorithme incrémentation de la conductance :**

En dérivant la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension, l’algorithme par incrémentation de conductance se produit, ce qui donne un résultat égal à zéro. On peut le décrire en utilisant les équations suivantes :

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \tag{II.3}$$

$$\frac{1 * dP}{V * dV} = \frac{1}{V} \tag{II.4}$$

On définit la conductance de la source $\frac{1}{V}$ et incrémentation de la conductance $\frac{dI}{dV}$.

Étant donné que la tension V du panneau est toujours positive, le point de puissance maximale MPP est atteint lorsque la conductance de la source est égale à une croissance de la conductance de la source avec un signe moins, et qu’elle se trouve à gauche de ce point lorsque la conductance est supérieure, et vice-versa, comme suit :

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} > 0 \text{ Si } \frac{1}{V} > -\frac{dI}{dV} \\ \frac{dP}{dV} = 0 \text{ Si } \frac{1}{V} = -\frac{dI}{dV} \\ \frac{dP}{dV} < 0 \text{ Si } \frac{1}{V} < -\frac{dI}{dV} \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

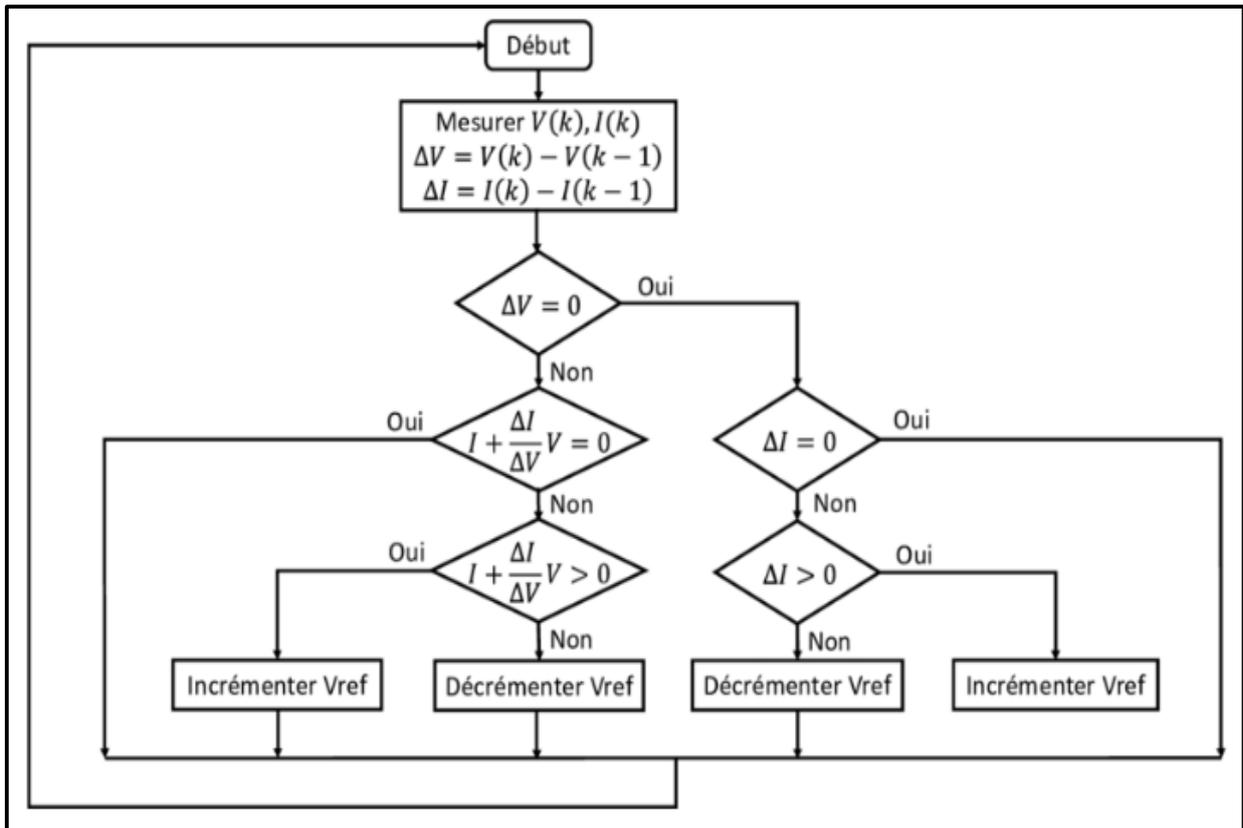


Figure II.5 : Algorithme incrémental conductance [14].

II.4 Les onduleurs :

II.4.1 Structure d'onduleur :

Les onduleurs triphasés comprennent trois bras distincts. Chaque bras est constitué de deux boutons. Les interrupteurs sélectionnés forment effectivement une cellule de conversion.

Il est essentiel qu'ils fonctionnent de manière complémentaire afin de ne jamais perturber la source continue V_e . Il est nécessaire que les interrupteurs soient bidirectionnels en termes de courant.. [15].

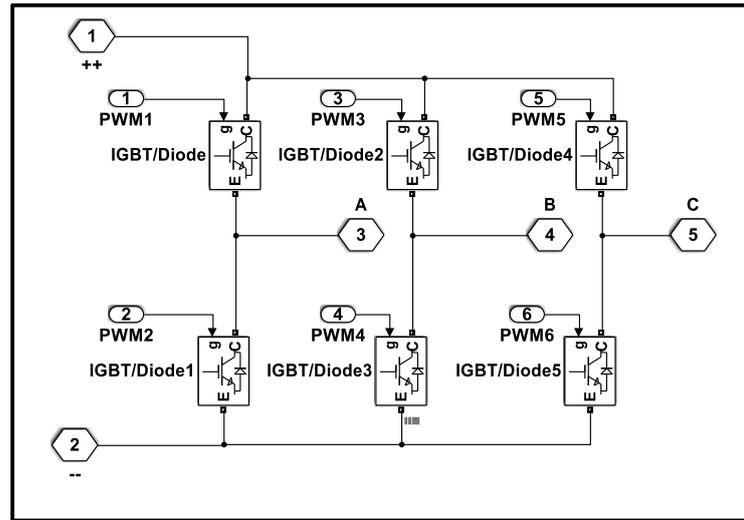


Figure II.10 : Schéma de simulation d'un onduleur triphasé

II.4.2 Principe de fonctionnement :

La figure (II.10) présente une représentation schématique de l'onduleur. Afin de garantir la continuité des courants de sortie alternatifs I_a , I_b et I_c , il est nécessaire de compenser deux à deux les interrupteurs S_1 et S_1' , S_2 et S_2' , S_3 et S_3' . De plus, afin que les tensions de sortie V_A , V_B et V_C soient identiques à un tiers de la période T de leur principe fondamental, il est nécessaire de commander chaque demi-pont avec un retard de $T/3$ par rapport au précédent. Après avoir commandé pleine onde, on peut fermer [15] :

$$S_1 \text{ pour } \omega t = 0 \qquad S_1' \text{ pour } \omega t = \pi \qquad (II.6)$$

$$S_2 \text{ pour } \omega t = 2\pi/3 \qquad S_2' \text{ pour } \omega t = \pi + 2\pi/3 \qquad (II.7)$$

$$S_3 \text{ pour } \omega t = 4\pi/3 \qquad S_3' \text{ pour } \omega t = \pi + 4\pi/3 \qquad (II.8)$$

II.4.3 Modèle mathématique de l'onduleur de tension triphasé:

En théorie, les états des interrupteurs, qui sont considérés comme parfaits, sont représentés par trois fonctions logiques ($k = A, B, C$) comme :

- $K_k = 1$: l'interrupteur du haut est fermé et par conséquent celui du bas est ouvert.

- $K_k = 0$: l'interrupteur du haut est ouvert et par conséquent celui du bas est fermé.

La relation entre le vecteur $[K_A K_B K_C]^t$ et le vecteur des tensions $[U_{AB} U_{BC} U_{CA}]^t$ est donnée par [16] :

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = E \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_A \\ K_B \\ K_C \end{bmatrix} \qquad (II.9)$$

CHAPITRE II : Les convertisseurs statiques pour les systèmes photovoltaïques

Avec :

E : la valeur de la tension continue de l'entrée du l'onduleur

Si les tensions sont équilibrées, les expressions des tensions simples peuvent être déduites des tensions composées :

$$\begin{cases} V_A = \frac{U_{AB} - U_{CA}}{3} \\ V_B = \frac{U_{BC} - U_{AB}}{3} \\ V_C = \frac{U_{AC} - U_{BA}}{3} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

À partir des relations (II.9) et (II.10), on obtient l'expression des tensions simples en fonction de l'état des interrupteurs comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} E \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_A \\ K_B \\ K_C \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

II.4.4 Différentes commandes de l'onduleur :

Il existe plusieurs types de commande d'onduleurs comme (commande symétrique (adjacente), Décalée (disjointe), MLI...).les différents commandes ont le but d'obtenir l'allure sinusoïdale au niveau de la sortie et pour chaque commande le principe de fonctionnement ce change [15].

II.4.4.1 Commande plein onde :

On commande deux thyristors d'un même bras avec un décalage de 180° . Les thyristors des deux bras adjacents sont régulés avec un décalage de 120° . Des tensions composées sont obtenues avec des valeurs de E, 0 ou $-E$ volts, avec une durée d'un niveau non nul de 120° par alternance.

II.4.4.2 Commande MLI :

La modulation de largeur d'impulsions est une méthode qui permet à la fois la variation de l'amplitude du fondamental de la tension et le contrôle de son contenu harmonique. Cette méthode consiste à comparer l'amplitude de la modulante (tension de référence de l'onduleur) avec un signal en dent de scie appelé porteuse. La tension de sortie est une suite de créneaux d'amplitude fixe et de largeur variable.

CHAPITRE II : Les convertisseurs statiques pour les systèmes photovoltaïques

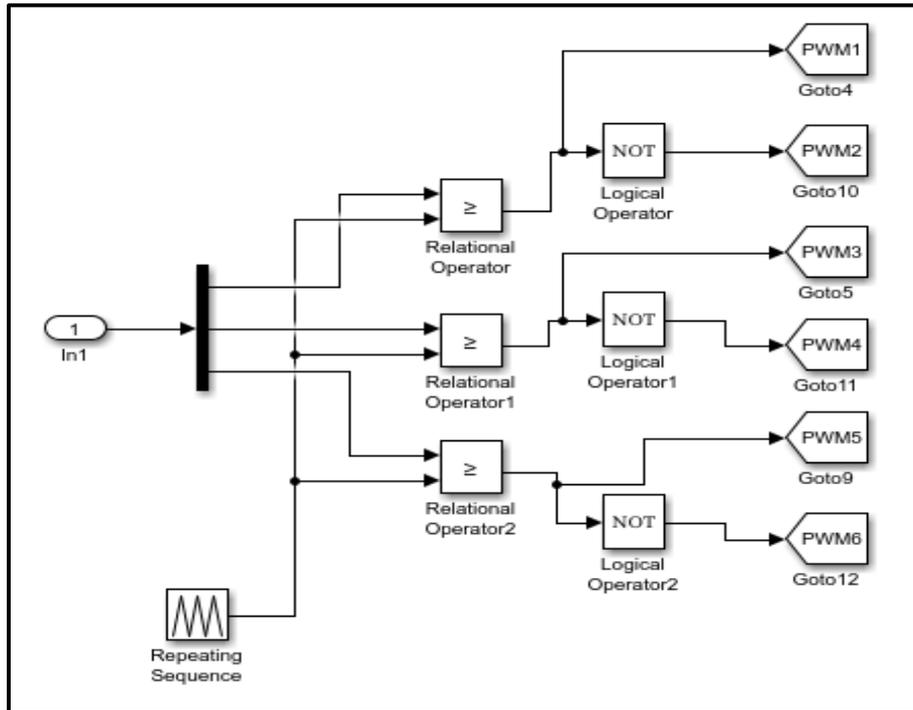


Figure II.11 : schéma de la simulation de la commande MLI

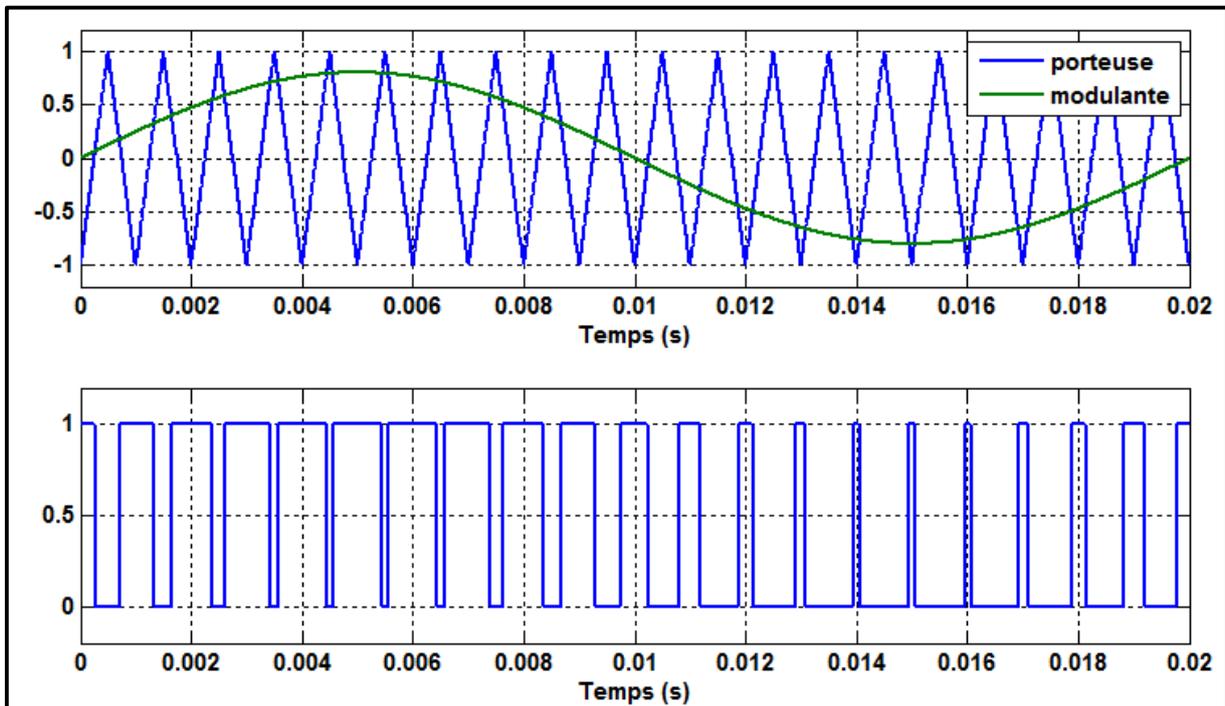


Figure II.12 : Principe de la commande MLI

II.5 Etude de la synchronisation du convertisseur sur le réseau :

Pour relier des sources au réseau électrique, il est essentiel de synchroniser la tension du générateur de production avec celle du réseau. C'est la raison pour laquelle il est essentiel d'avoir des informations sur la phase et la fréquence de la tension du réseau [17].

II.6 PLL triphasé dans le domaine de Park :

La PLL triphasée repose sur l'application d'une transformation inverse de Park sur les tensions triphasées du réseau. Par action sur l'angle du repère de Park (θ_{est}), la composante d'axe q générée par cette transformation est asservie à zéro. L'angle (θ_{est}) est égal à l'angle (θ_r) du réseau dans le régime établi [17].

II.7 Contrôle des puissances active et réactive (P et Q) :

L'objectif de cette forme de commande est de définir les valeurs de puissance active et réactive injectées dans le réseau. En utilisant la commande MLI des courants, le circuit de contrôle doit créer une valeur instantanée du courant débité par l'onduleur afin que le courant fourni par le réseau soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante.

On calcule ces courants en utilisant les références de puissances et en mesure la tension au point de connexion. Ces calculs seront effectués dans le référentiel de Park en utilisant les équations suivantes [18]:

$$P_{ref} = (V_{dr} \cdot I_{dr_ref} + V_{qr} \cdot V_{qr_ref}) \quad (II.12)$$

$$Q_{ref} = (V_{qr} \cdot I_{dr_ref} + V_{dr} \cdot V_{qr_ref}) \quad (II.13)$$

On déduit :

$$I_{dr_ref} = \frac{P_{ref} \cdot V_{dr} + Q_{ref} \cdot V_{qr}}{V_{dr}^2 \cdot V_{qr}^2} \quad (II.14)$$

$$I_{qr_ref} = \frac{P_{ref} \cdot V_{qr} + Q_{ref} \cdot V_{dr}}{V_{dr}^2 \cdot V_{qr}^2} \quad (II.15)$$

Avant de calculer les courants, on transforme cette tension mesurée dans le référentiel de Park. Le PLL (Phase Locked Loop) est utilisée pour synchroniser la transformation de Park avec la pulsation de la tension mesurée sur le réseau.

II.8 Les harmoniques :

II.8.1 Définition :

La forme d'onde de la tension du réseau est constamment perturbée par des harmoniques. La présence des harmoniques entraîne des perturbations causées par la superposition, sur l'onde fondamentale à 50Hz, d'ondes sinusoïdales également, mais à des fréquences différentes de celle de la fondamentale. Les courants non sinusoïdaux qui traversent les impédances du réseau sont absorbés par les récepteurs, ce qui entraîne une déformation de la sinusoïde de tension d'alimentation. Selon la figure (II.13), la déformation de la forme d'onde se manifeste par l'émergence de fréquences harmoniques de tension [19].

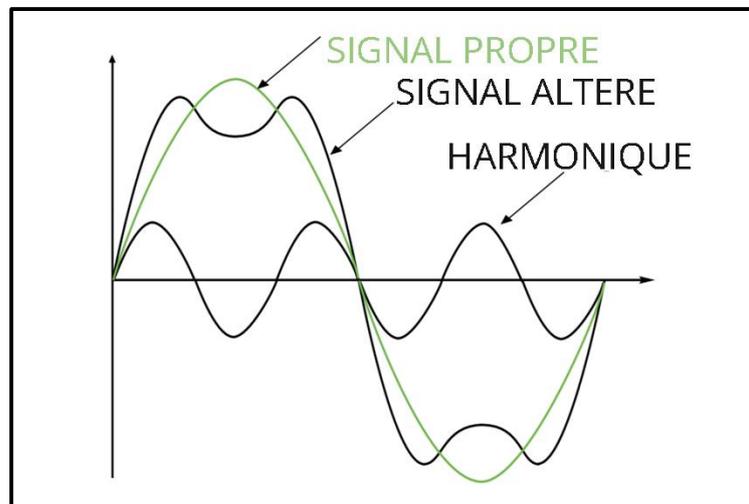


Figure II.13 : Exemple d'allures de signaux déformés

II.8.2 Origines des harmoniques :

Tous les domaines industriels, tertiaires et domestiques sont équipés de dispositifs générateurs d'harmoniques. Par exemple, il s'agit d'ordinateurs, de variateurs de vitesse, et ainsi de suite.

Les autres charges, en raison de leur mode de fonctionnement, distordent le courant et produisent également des harmoniques, comme les lampes fluorescentes, les lampes à décharge, les machines à souder et les dispositifs avec un cœur magnétique saturé. Toutes les charges qui distordent le courant sinusoïdal normal produisent des harmoniques et sont donc des charges non linéaires [19].

II.8.3 La distorsion harmonique totale (THD) :

Le taux de distorsion harmonique se mesure normalement harmonique par harmonique dans les phases de conception et d'essai des matériels. L'indication de la répartition des harmoniques

CHAPITRE II : Les convertisseurs statiques pour les systèmes photovoltaïques

permet, en effet, de diagnostiquer l'origine des non-linéarités. Certaines formes de distorsion peuvent être plus indésirables que d'autres [10].

II.8.4 Influence des harmoniques sur le facteur de puissance :

Le facteur de puissance d'un signal sinusoïdal est calculé en fonction du rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S.

Lorsque les harmoniques sont présentes, la puissance apparente S est constituée de trois éléments : l'actif P, le réactif Q et le déformant D. La puissance générée par les courants harmoniques est représentée par l'équation suivante [10]:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

P : puissance active, S : puissance apparente, Q : puissance réactive, D : puissance déformante

$$D = 3V_{\text{eff}} \sqrt{\sum_{h=2}^{50} i_h^2} \quad (\text{II.17})$$

II.8.5 Les principaux effets des harmoniques dans les installations :

Les tensions harmoniques générées par les courants harmoniques liés aux différentes impédances du réseau vont se superposer à la tension fondamentale du réseau. En conséquence, la tension n'est plus sinusoïdale. La présence de pollution sur le réseau de distribution pourrait avoir des conséquences néfastes sur le bon fonctionnement de tous les récepteurs (ou charges) connectés au réseau [10].

On distingue quelques effets des harmoniques sur les équipements électriques et les lignes :

- Échauffement des câbles et des équipements
- des perturbations électromagnétiques
- Pertes de puissance
- Problèmes de résonance
- Réduction de la durée de vie des matériels
- Non-conformité aux normes de qualité de l'énergie

II.8.6 Solutions pour atténuer les harmoniques :

II.8.6.1 Filtrage passif :

Le filtre passif est un circuit LC accordé sur chaque fréquence d'harmonique à filtrer, est placé en parallèle sur le générateur d'harmoniques.

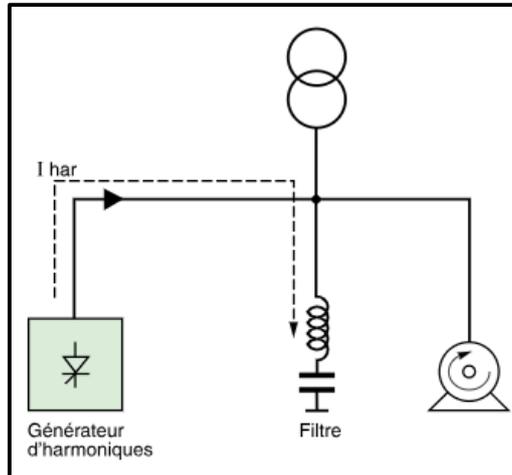


Figure II.14 : Installations d'un filtre actif

II.8.6.2 Filtrage actif :

Les filtres actifs sont des systèmes électroniques de puissance installés en série ou en parallèle avec la charge non-linéaire.

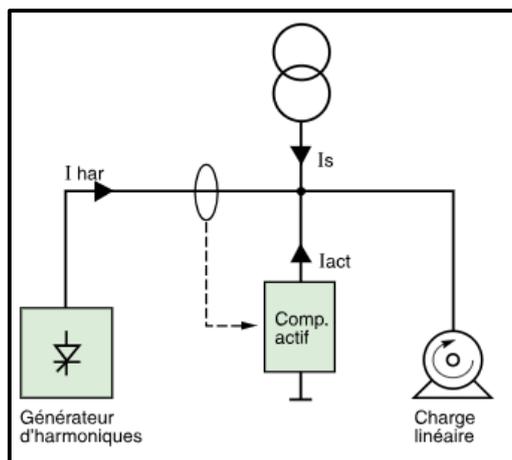


Figure II.15 : Installations d'un filtre actif

II.8.6.3 Filtrage hybride :

Les deux types de dispositifs précédents peuvent être associés au sein d'un même équipement et constituer un filtre hybride

CHAPITRE II : Les convertisseurs statiques pour les systèmes photovoltaïques

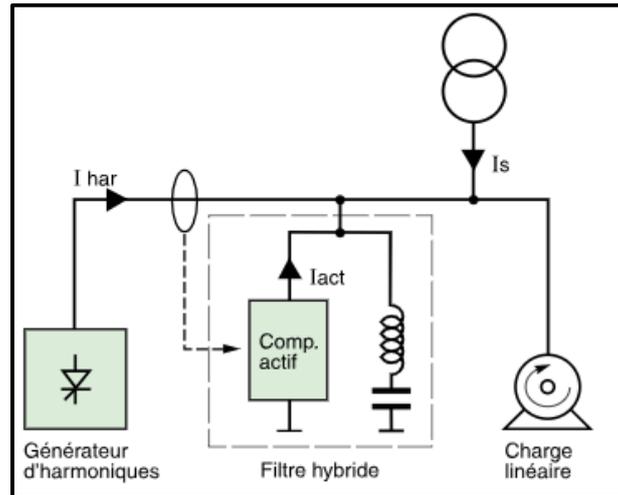


Figure II.16 : Installations d'un filtre hybride.

Conclusion :

Les différents éléments du système photovoltaïque complet ont été modélisés en utilisant des modèles de la littérature (champ photovoltaïque, convertisseurs et MPPT). Cette étape cruciale nous permet d'introduire plusieurs modèles, puis d'évaluer les caractéristiques de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres qui les composent. Au sein d'un système photovoltaïque, il est toujours souhaitable de travailler près du point de puissance maximale MPP, afin de réduire au maximum les pertes d'énergie générée.

Les divers types de phénomènes et perturbations qui impactent la qualité de l'énergie électrique ont été examinés, ainsi que leurs origines, leurs conséquences, ainsi que les normes qui s'appliquent aux phénomènes d'harmonies.

CHAPITRE III :

Simulation du système

Introduction :

Dans ce chapitre, nous simulerons un générateur photovoltaïque raccordé au réseau. Le problème des perturbations harmoniques liées aux composants non linéaires sur la qualité de l'énergie fournie au réseau sera expliqué. Les courbes de tension, de courant et de puissance seront présentées à chaque étage du système, du générateur à l'onduleur, à la charge et au réseau électrique.

III.1 Le Système de Photovoltaïque proposée

Le système photovoltaïque proposé est représenté sur la figure (III.1). Il comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur "boost", une commande MPPT "perturbation et observation", un onduleur de tension (DC-AC) commandé par MLI, un filtre LCL et le réseau électrique.

Dans notre travail on a utilisé un générateur photovoltaïque qui donne une puissance maximale de 100 kw .Le générateur est constitué de 10 modules en séries et 47 parallèles. Le module utilise est « 1Soltech 1STH-215-P » dont les caractéristiques sont données par le tableau (III.1)

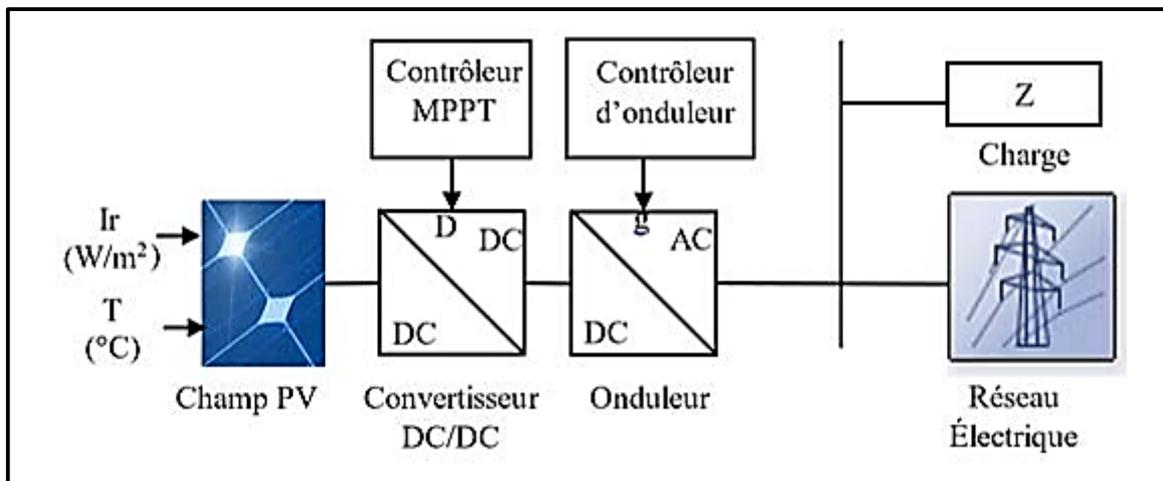


Figure III.1 : schéma synoptique d'un système photovoltaïque relié au réseau électrique

Tableau III.1 Caractéristiques électriques du module photovoltaïque panneau dans conduction standard

Eclairement standard G	1000 W/m ²
Température standard T	25°C
Puissance maximale Pmax	213.15 W
Tension à Pmax ou tension optimale V _{opt}	29 V
Courant à Pmax ou courant optimale I _{opt}	7.35 A
Courant de court- circuit I _{sc}	7.84 A
Tension à circuit ouvert V _{co}	36.3 V
Nombre des cellules en séries	60
Coefficient de la température de I _{sc}	0.102 %/°C
Coefficient de température de V _{co}	-0.36099 %/°C
Résistance série R _s	0.39383 Ω
Résistance série R _{shunt}	313.3991 Ω

III.2 Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I et P :

III.2.1 Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V :

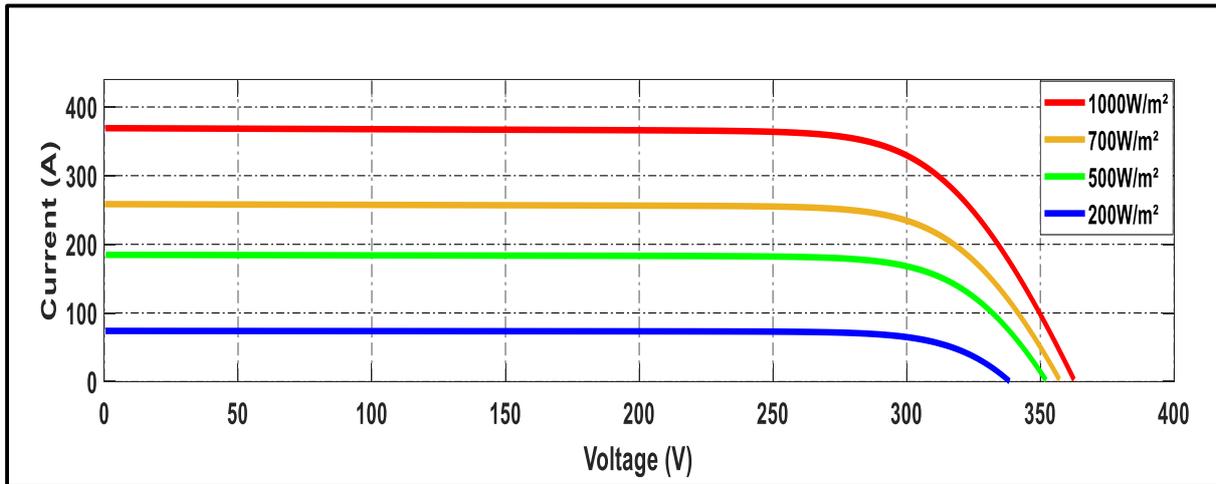


Figure III.2 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V

- La figure (III.2) montre une forte diminution du courant de court-circuit et une faible diminution de la tension du circuit ouvert en raison de la diminution de l'éclairement. Ce qui démontre que le courant de court-circuit de la cellule dépend de l'éclairement, tandis que la tension de circuit ouvert est moins affectée par la variation de l'éclairement.

III.2.2 L'influence de l'éclairement sur la caractéristique P-V :

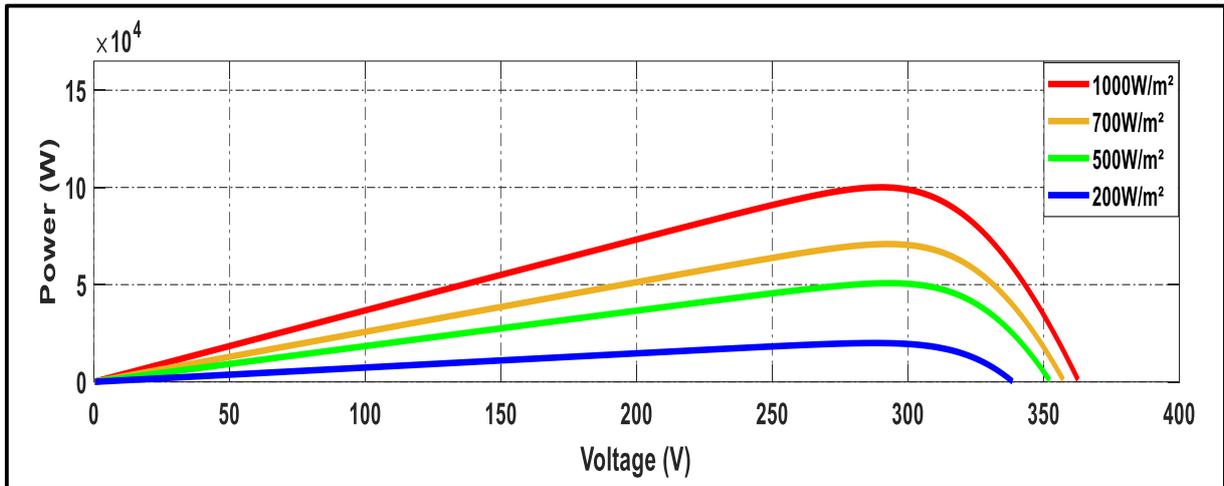


Figure III.3 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique P-V

- Selon la figure (III.3), la variation de l'éclairement a un impact sur la puissance du GPV ; plus l'éclairement augmente, plus la puissance augmente.

III.3 L'influence de la température sur les caractéristiques I et P :

III.3.1 L'influence de la température sur la caractéristique I-V :

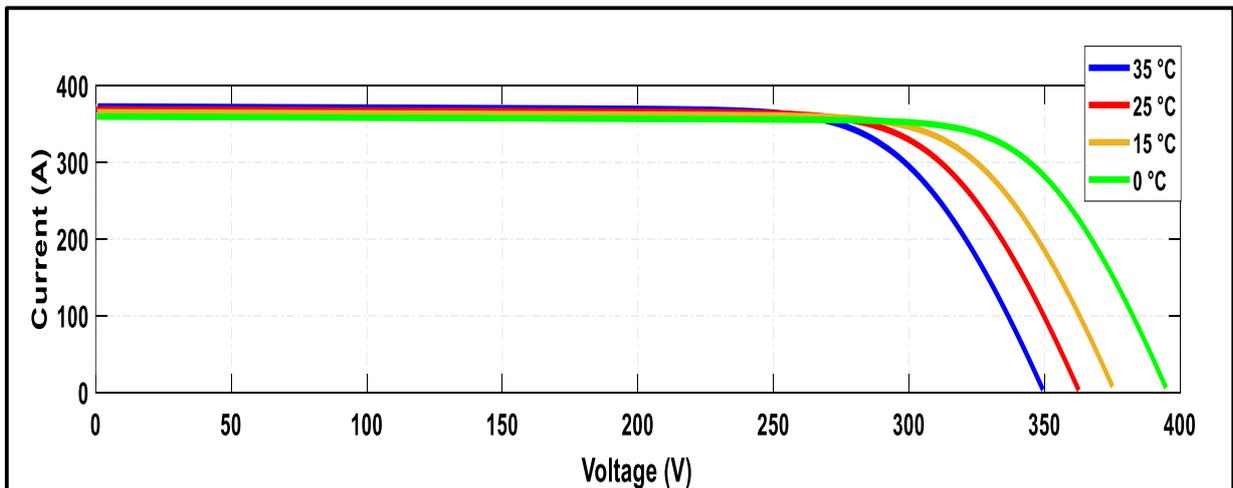


Figure III.4 : L'influence de la température sur la caractéristique I-V

- Selon la figure (III.4), la température d'un module photovoltaïque (PV) augmente alors que la tension à vide de la cellule solaire diminue. Cependant, lorsque la température du module photovoltaïque (PV) augmente, le courant de court-circuit augmente légèrement.

III.3.2 L'influence de la température sur la caractéristique P-V :

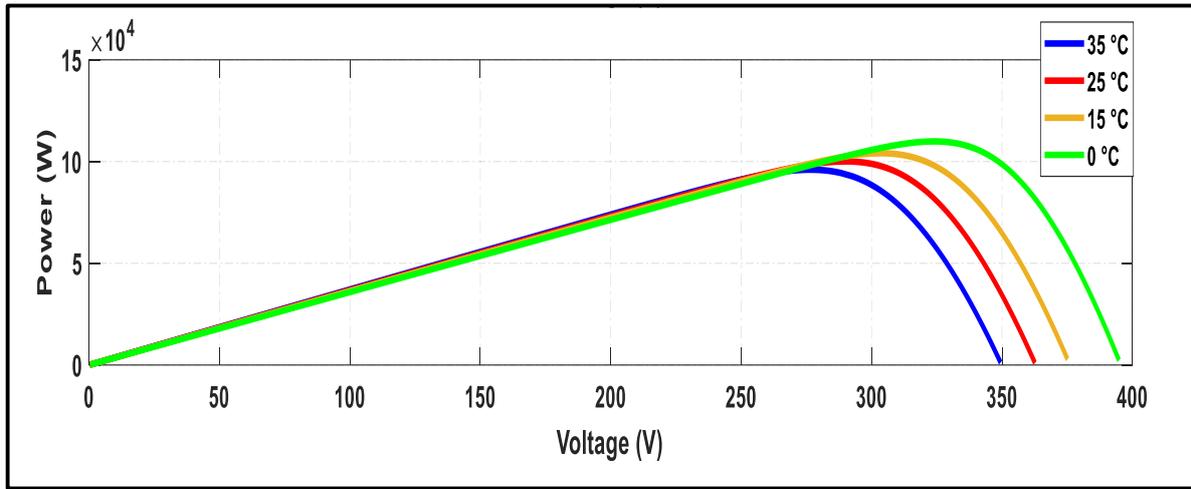


Figure III.5 : L'influence de la température sur la caractéristique P-V

- La figure (III.5) montre que l'augmentation de la température entraîne également une diminution de la puissance maximale disponible.

III.4 Le filtre LCL :

Pour les fréquences supérieures à la fréquence de résonance, l'atténuation du filtre LCL est de 60 dB/décennie, ce qui signifie que le convertisseur peut utiliser une fréquence de commutation inférieure. De plus, il améliore le découplage entre le filtre et l'impédance du réseau et réduit l'ondulation de courant à travers l'inductance du réseau. En conséquence, le filtre LCL est approprié pour notre application.

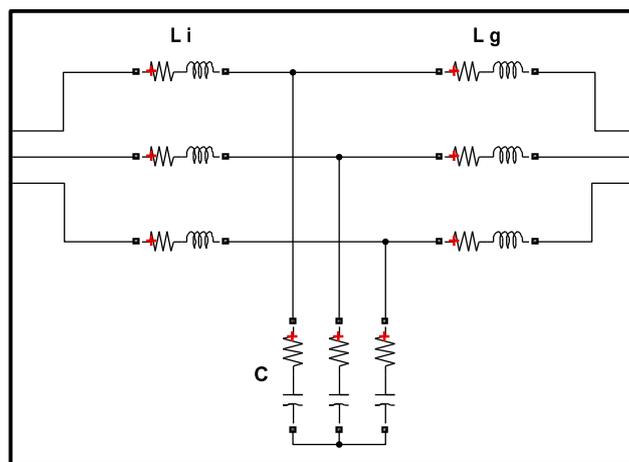


Figure III.6 : Schéma de puissance d'un filtre LCL

III.4.1 Dimensionnement du filtre LCL :

Le filtre LCL est composé de composants passifs L_i , C , r_c et L_g . Les équations dynamiques de l'onduleur connecté au réseau avec filtre LCL peuvent être exprimées comme suit :

$$\begin{cases} i_i = i_g + i_c \\ L_i \frac{di_i}{dt} = u_i - u_c \\ L_g \frac{di_g}{dt} = u_c - u_g \\ i_c = C \frac{du_c}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

La fonction de transfert correspondante du filtre LCL du troisième ordre sans la résistance d'amortissement peut être calculée comme suit :

$$H_{LCL} = \frac{1}{(CL_iL_g)S^3 + (L_i + L_g)S} \quad (\text{III.2})$$

La fonction de transfert correspondante du filtre LCL du troisième ordre avec la résistance d'amortissement peut être calculée comme suit :

$$H_{LCL} = \frac{1 + r_c CS}{(CL_iL_g)S^3 + (L_i + L_g)S^2 + (L_i + L_g)S + Cr_c} \quad (\text{III.3})$$

La fréquence de résonance f_0 peut être calculée comme suit :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(L_i + L_g)}{(CL_iL_g)}} \quad (\text{III.4})$$

III.5 Modélisation du réseau BT :

Réseau de distribution électrique. Il est basé sur un système triphasé de tensions. On peut généralement considérer que (V_a, V_b, V_c) est un système de tensions triphasé équilibré direct.

Il en est de même pour (U_{ab}, U_{bc}, U_{ca})

$$\begin{cases} V_a = V_m \sin(\omega t) \\ V_b = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_c = V_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

$$\begin{cases} U_{ab} = V_a - V_b \\ U_{bc} = V_b - V_c \\ U_{ca} = V_c - V_a \end{cases} \quad (III.6)$$

Relations pour un système triphasé équilibré :

$$\begin{cases} V_m = \sqrt{2}V_{eff} \\ U_m = \sqrt{3}V_m \\ U_{eff} = \sqrt{3}V_{eff} \end{cases} \quad (III.7)$$

III.6 Résultats des simulations :

III.6.1. L'onduleur :

Le schéma de la figure (III.7) est utilisé pour étudier l'effet du courant injecté au réseau sur les caractéristiques électriques. Dans ce cas le système considéré, est constitué d'un onduleur triphasé alimenté par une source continue $V_{dc}=600$ V. deux essais ont été effectués :

Essai1 : injection d'un courant actif

Dans ce cas on impose aux boucles de régulation des courants une consigne $I_{dref}=205$ A et $I_{qref}=0$ A

Essai2 : injection d'un courant reactif

Dans ce cas on impose aux boucles de régulation des courants une consigne $I_{dref}=0$ A et $I_{qref}=205$ A

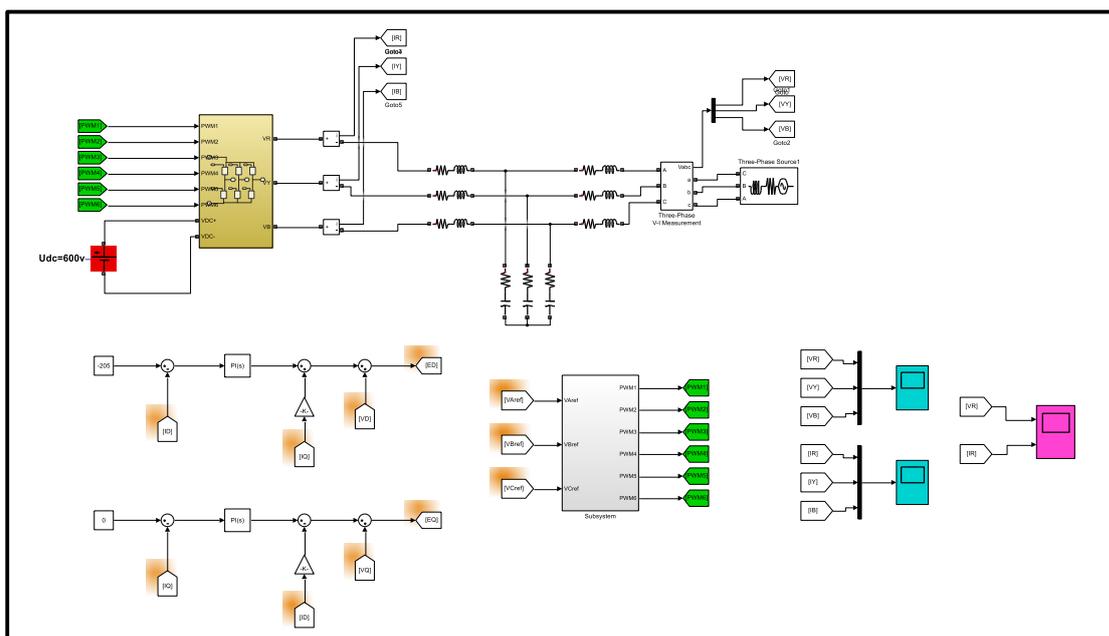


Figure III.7 : Schéma de simulation d'un onduleur connecté au réseau

La figure (III.8) représente les courants injectés au réseau avec un zoom pour $t \in [0.94, 1]$:

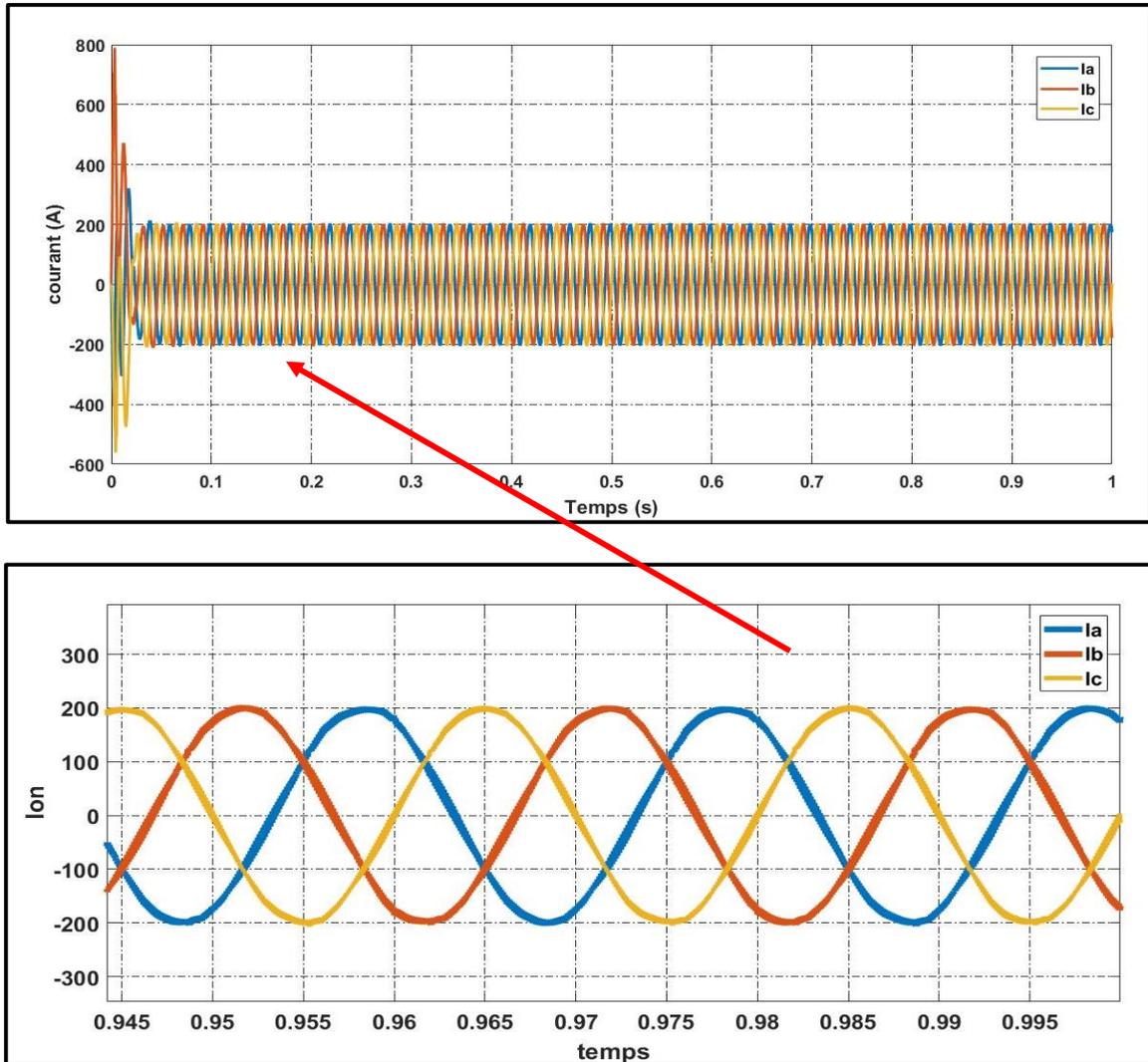


Figure III.8 : le courant de la sortie d'onduleur

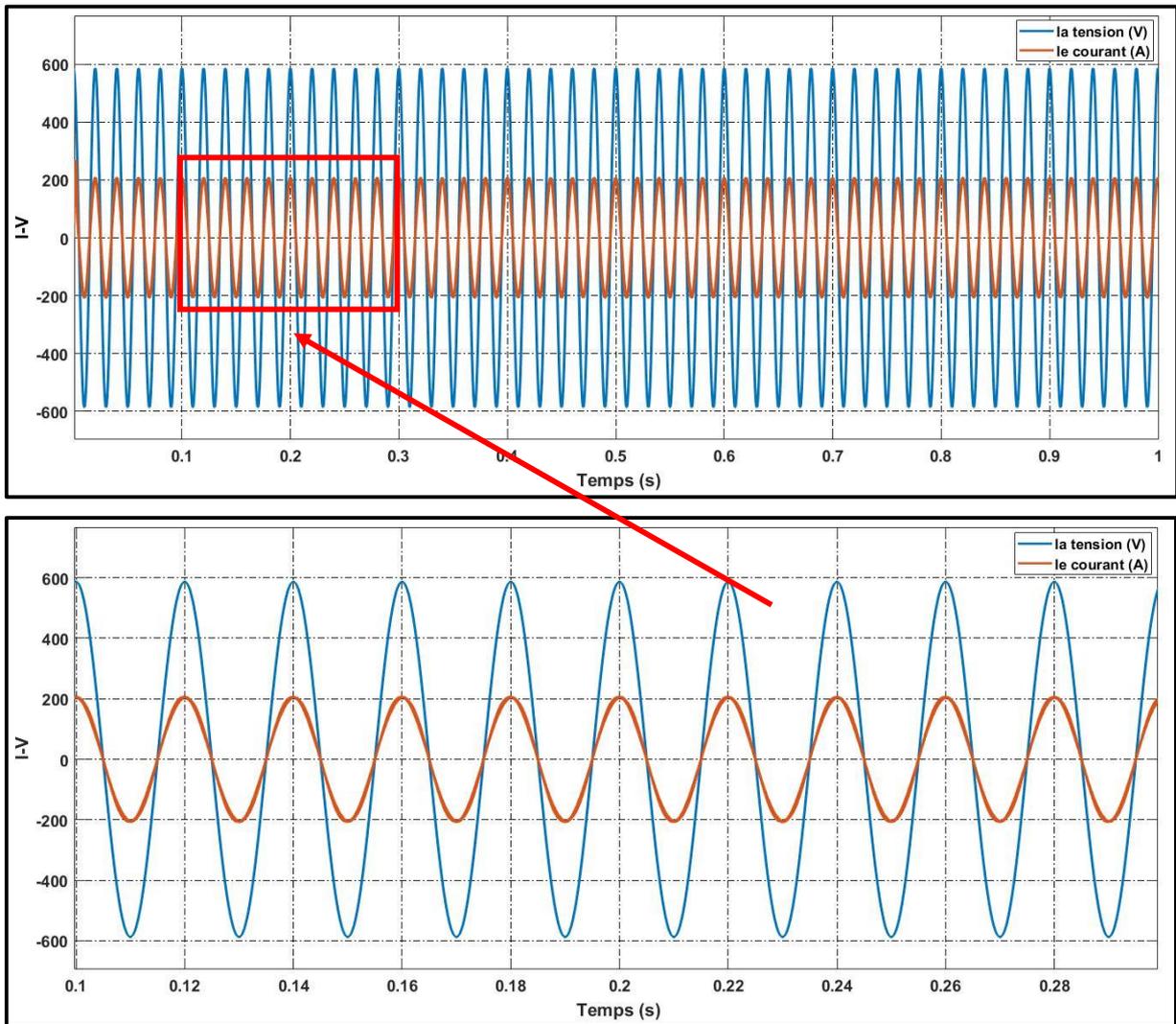


Figure III.9 :Essai1 : le courant et la tension à la sortie de l'onduleur

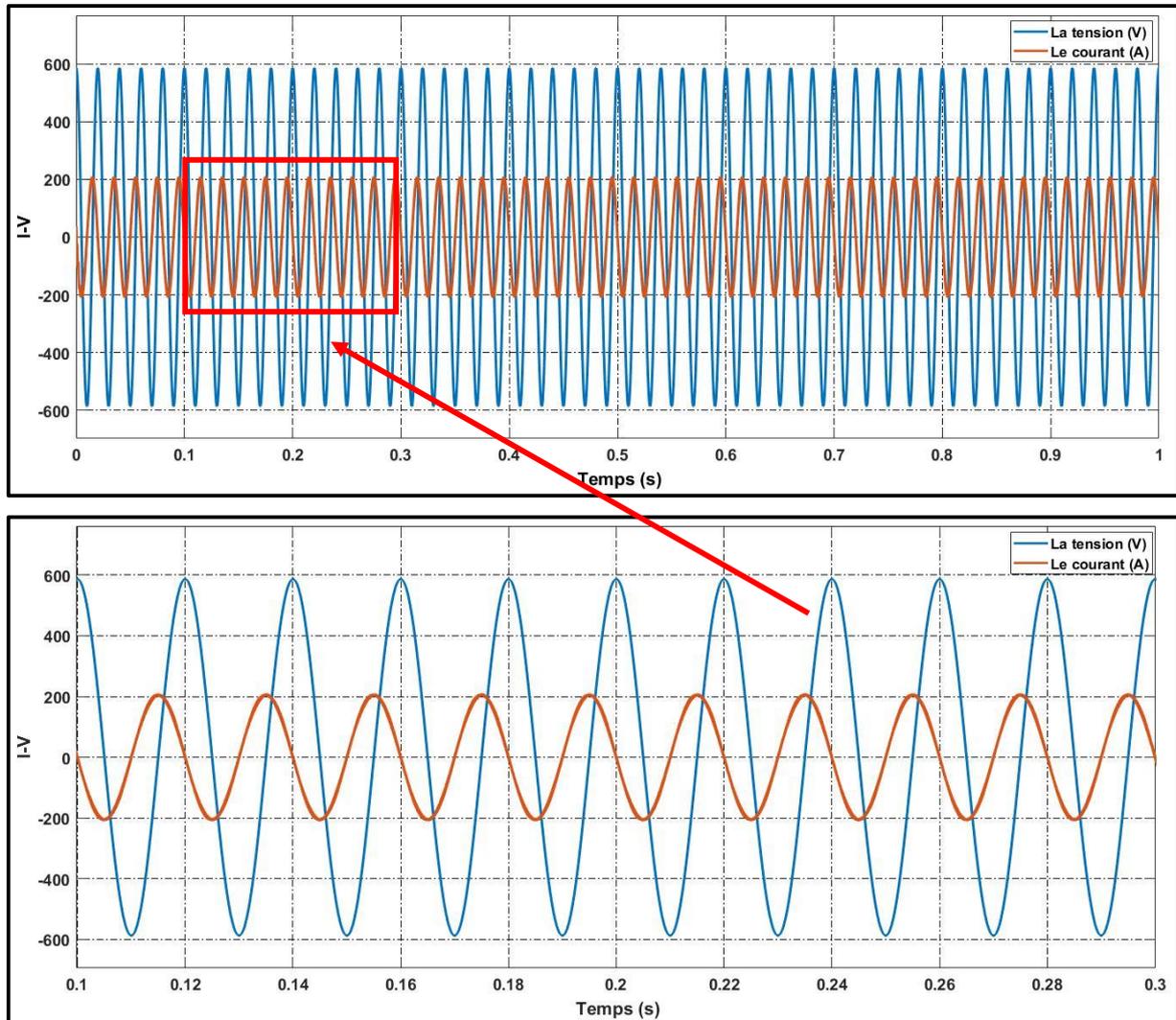


Figure III.10 : Essai2 : le courant et la tension à la sortie de l'onduleur

- D'après la figure (III.9) on constate que le courant et la tension sont en phase, par contre selon la figure (III.10) on remarque qu'il y a un déphasage de (90°) entre la tension et le courant.

III.6.3.1. Synchronisation avec le réseau :

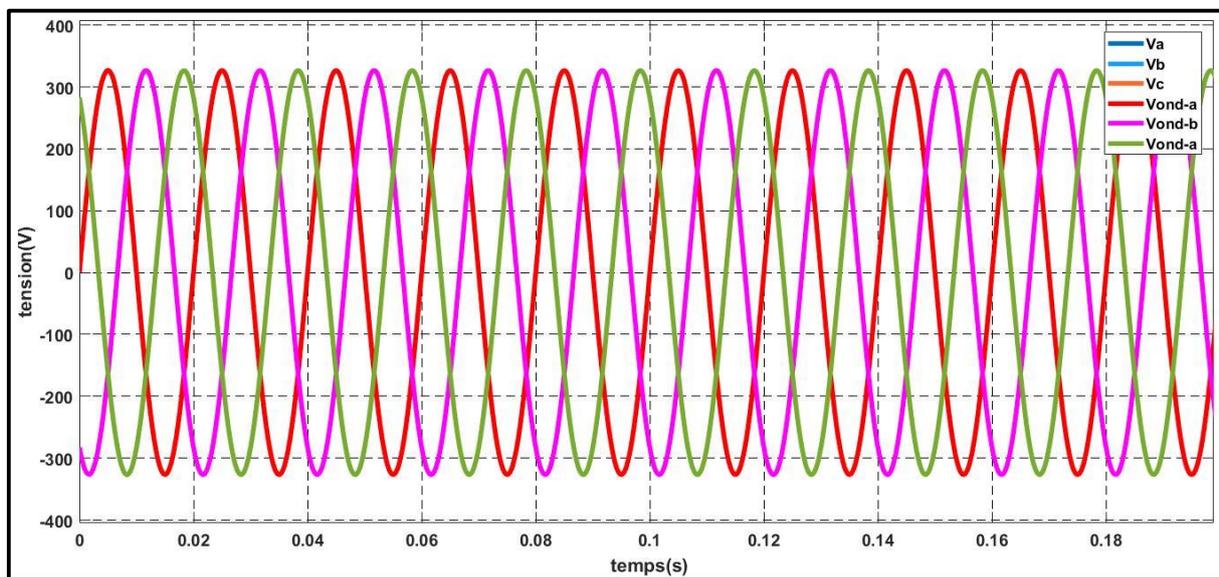


Figure III.11 : la tension à la sortie de l'onduleur et la tension du réseau

- D'après la figure (III.11) on voit que les signaux sont en phase et ont une même amplitude, donc la synchronisation de la tension produite par l'onduleur avec celle du réseau est évidente, ce qui démontre l'efficacité de notre boucle PLL.

III.6.2. Le hacheur :

On va réaliser une simulation d'un générateur PV avec un hacheur boost qui se distingue par : $C_{in} = 1000e-6$ F, $L_{boost} = 1.45e-3$ H, $C_{out} = 3227e-6$ F avec $V_{in} = 300$ V (tension du PV), on a utilisé aussi une commande MPPT de type P&O.

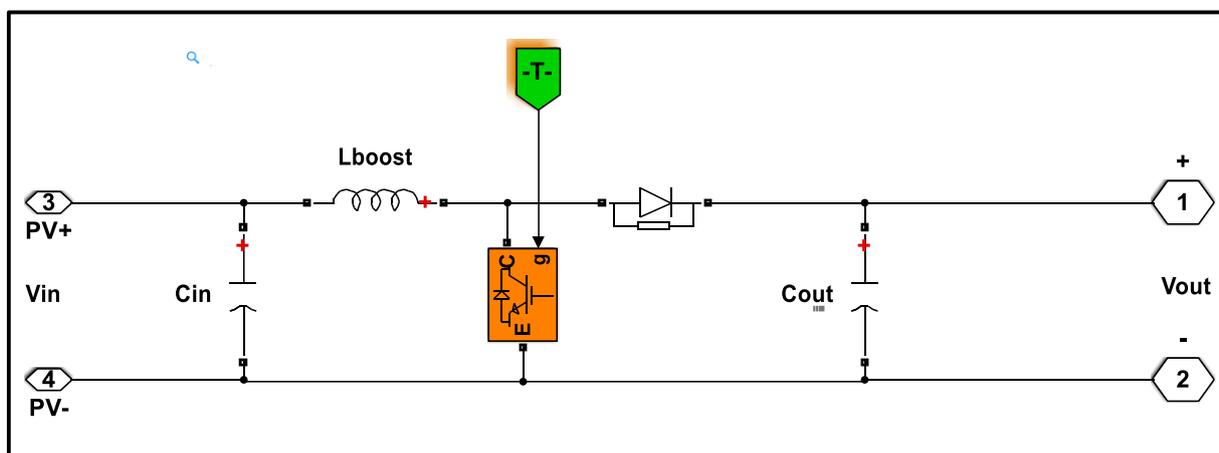


Figure III.12 : Schéma de simulation d'un convertisseur BOOST avec PV

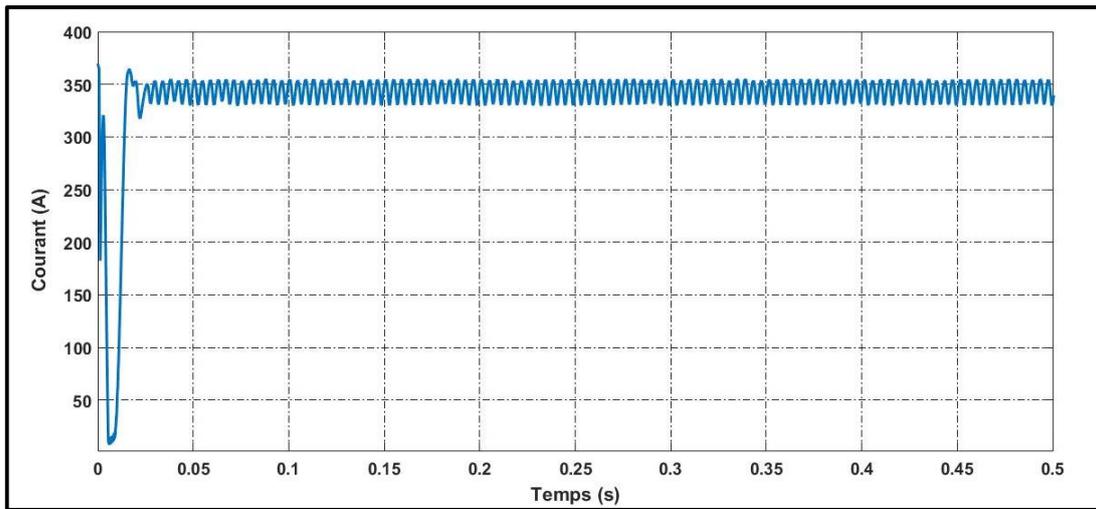


Figure III.13 : le courant I_{pv}

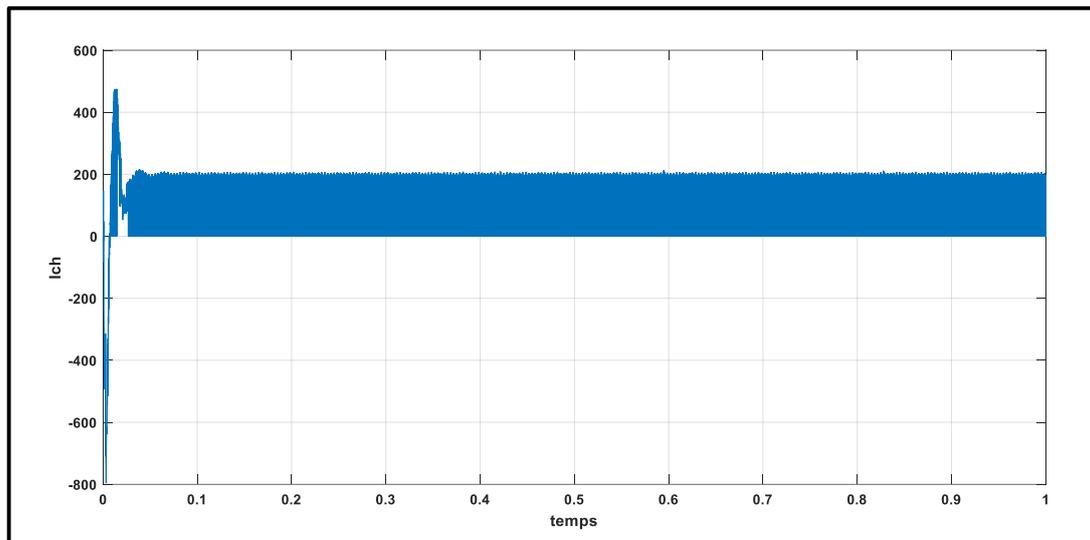


Figure III.14 : Le courant de sortie du hacheur

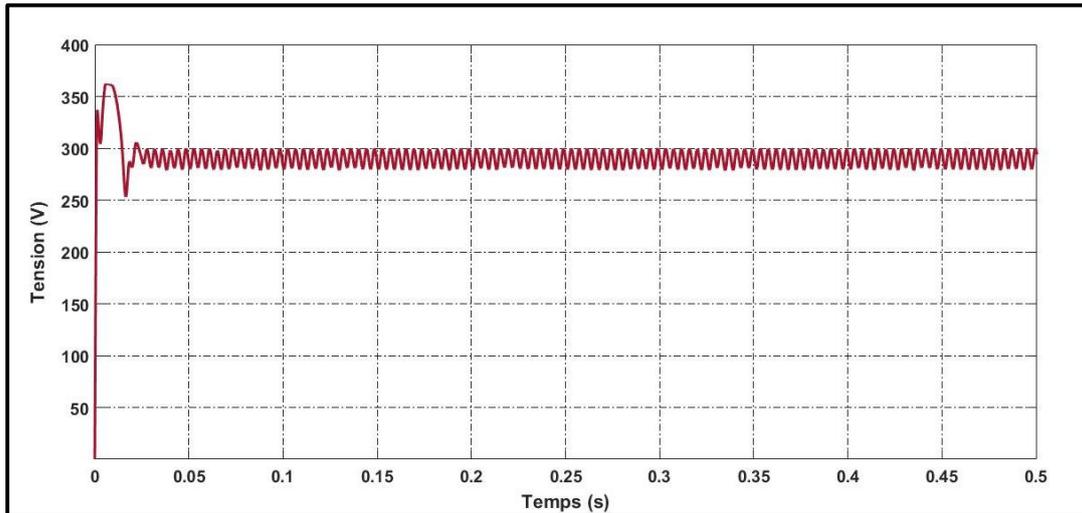


Figure III.15 : la tension V_{pv}

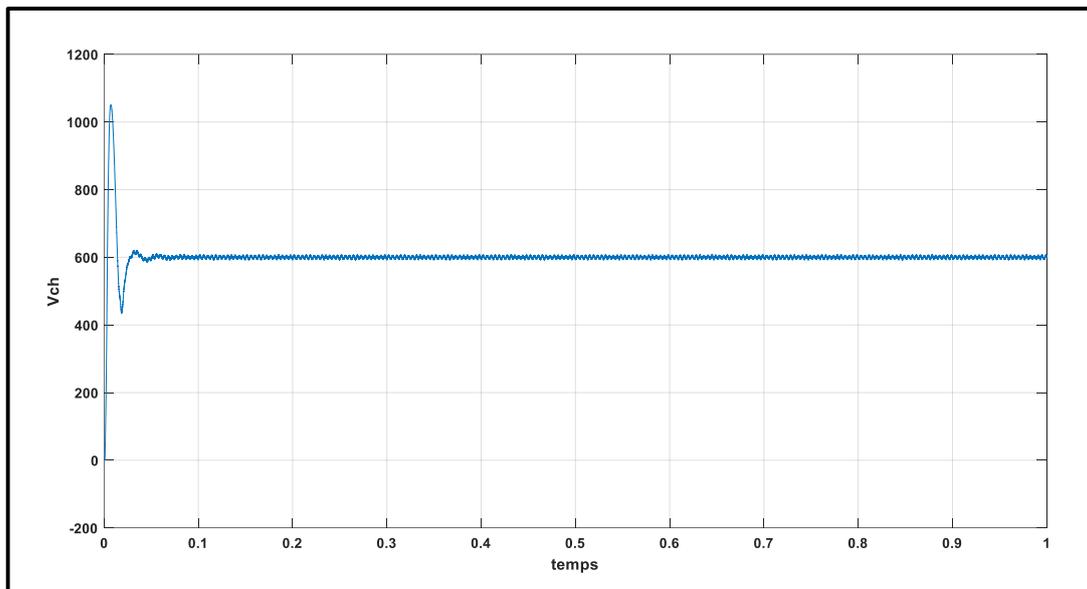


Figure III.16 : La tension V_{dc} a la sortie du hacheur

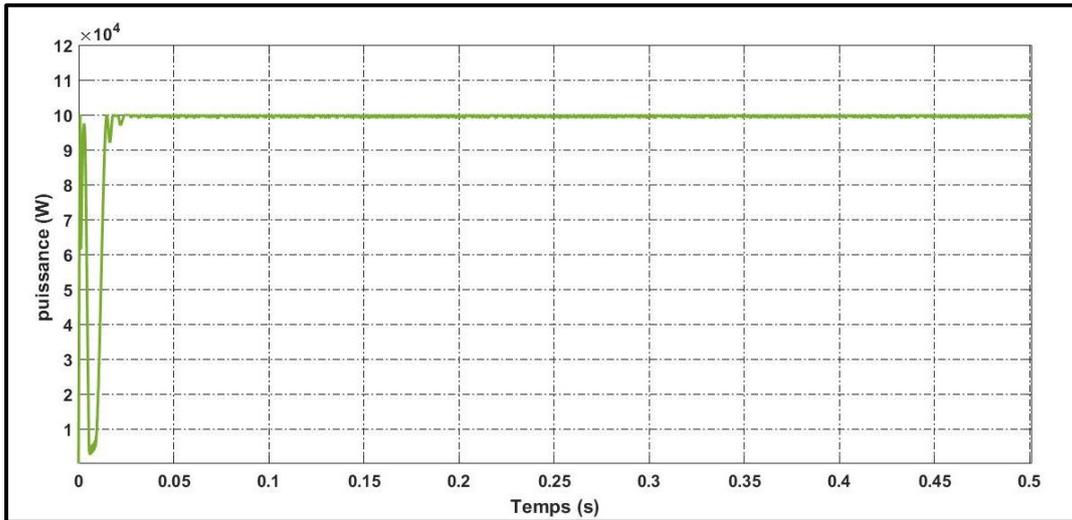


Figure III.17 : la puissance P_{pv}

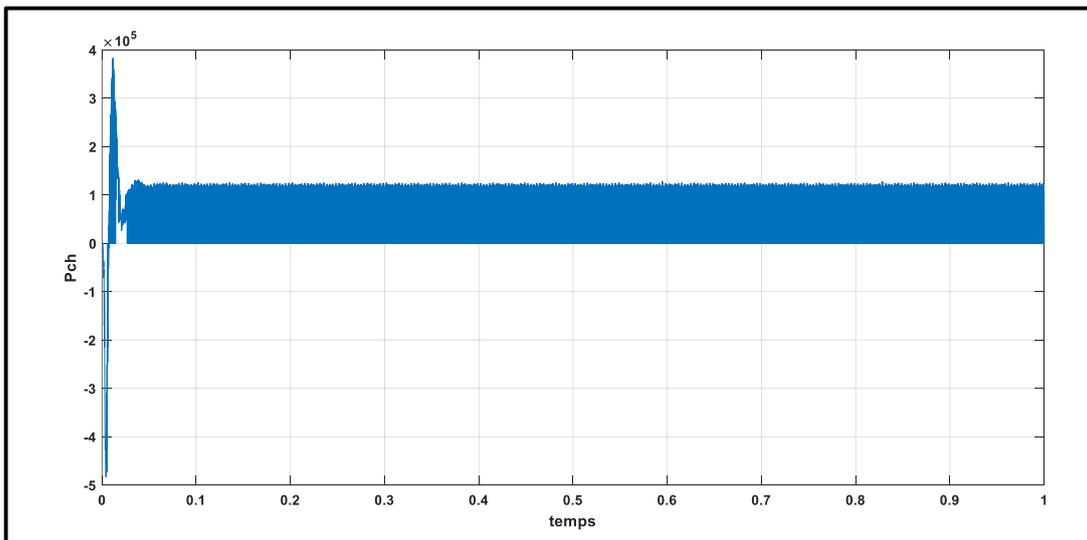


Figure III.18 : La puissance de sortie du hacheur

On a réalisé la simulation du convertisseur BOOST, avec le PV et la commande MPPT pour l'évaluation de la tension et de la puissance en sortie du convertisseur. D'après les figures (III.13, III.14) et les figures (III.15, III.16) le convertisseur élévateur mode (Boost) augmente la tension de sortie et réduit le courant de sortie

III.6.3. Schéma de simulation globale :

Dans cette simulation on a utilisé un champ photovoltaïque de 100 KW raccordé à un réseau de 270/300 V, un hacheur boost caractérisé par : ($L_{BOOST} = 1.45 \text{ mH}$, $C_{BOOST} = 3227 \text{ uF}$) commandé en MPPT de type P&O et un onduleur triphasé commandé en MLI, on a utilisé un filtre LCL ($L=500 \text{ uH}$, $C = 100 \text{ uF}$). Le schéma de simulation est représenté sur la figure (III.19).

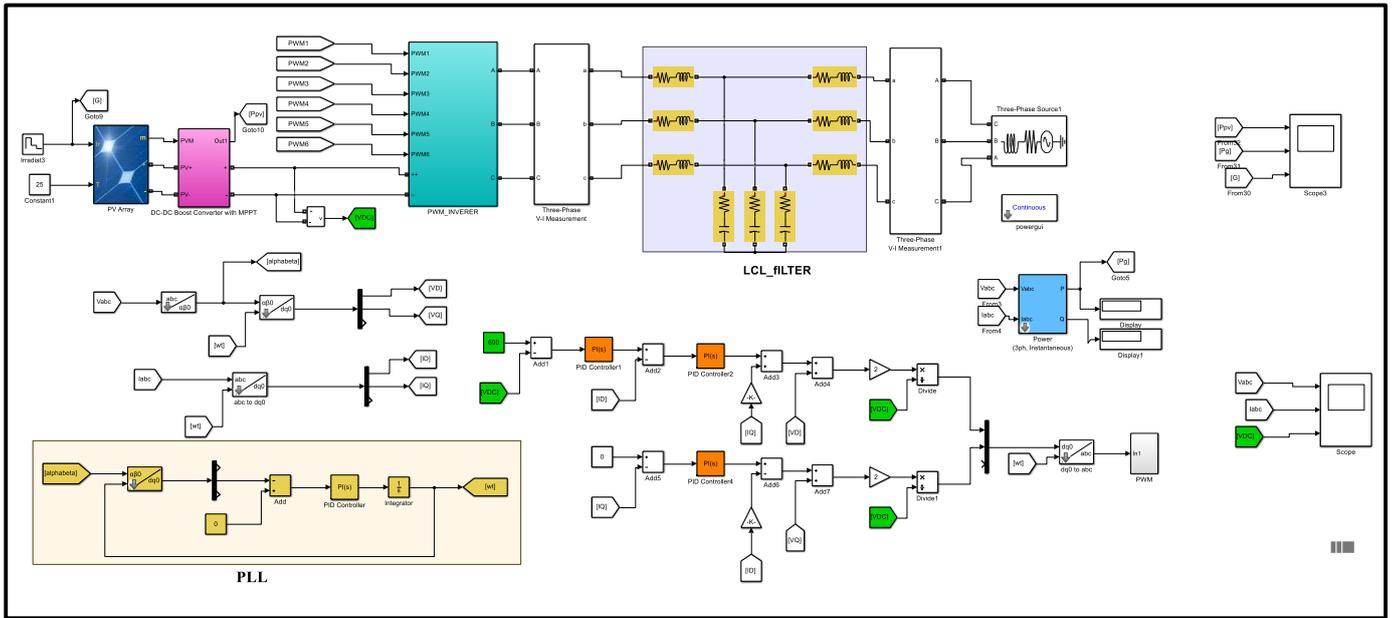


Figure III.19 : Schéma de simulation global PV raccordé au réseau

III.6.4. Régulations :

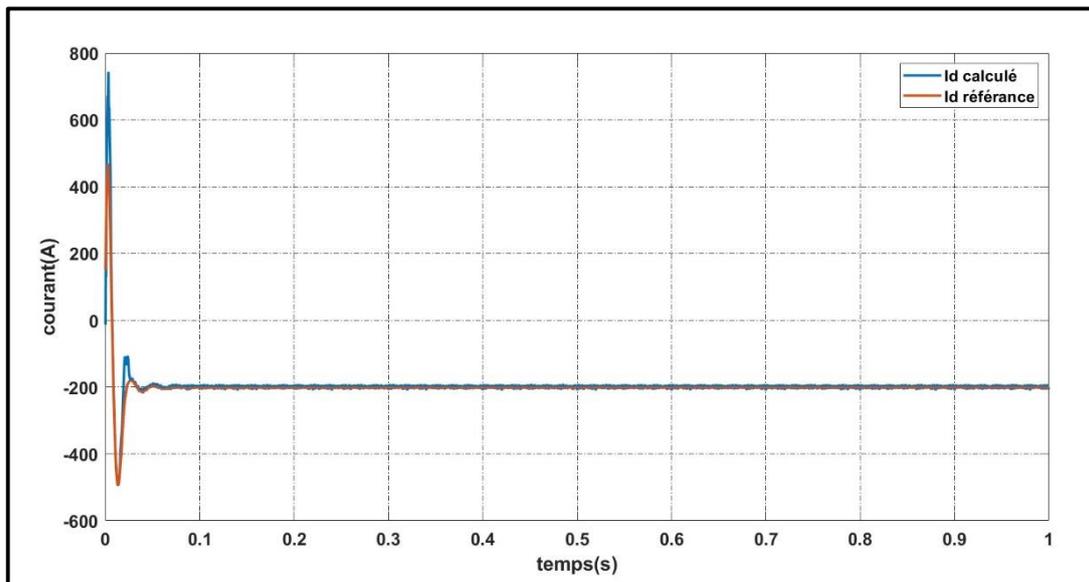


Figure III.20 : Régulation du courant d'axe direct

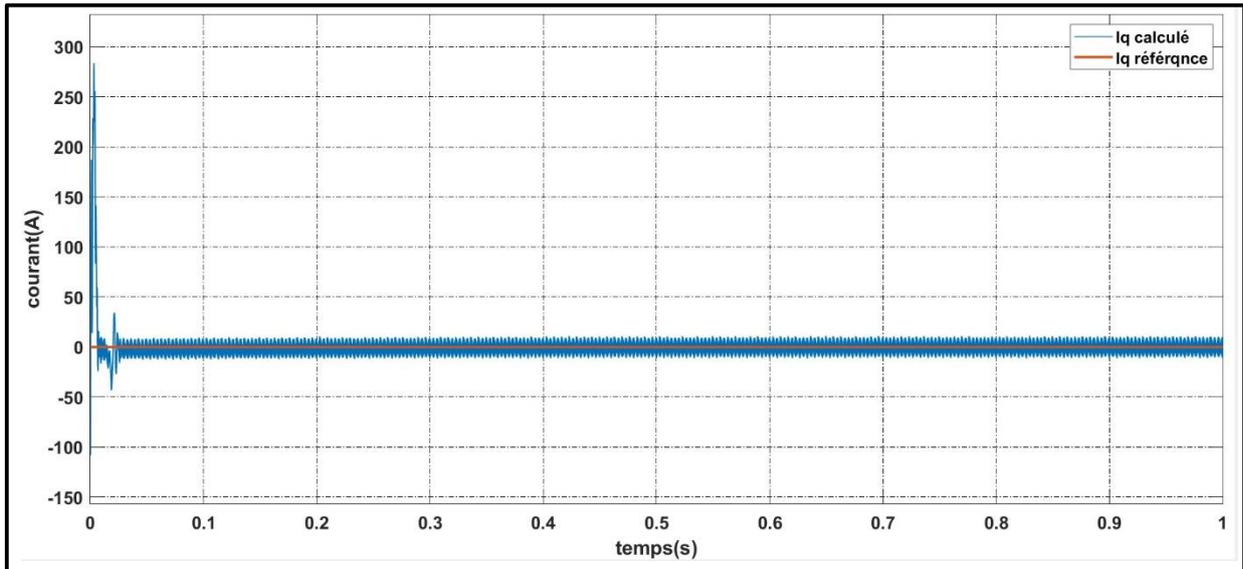


Figure III.21 : Régulation du courant d'axe en quadrature

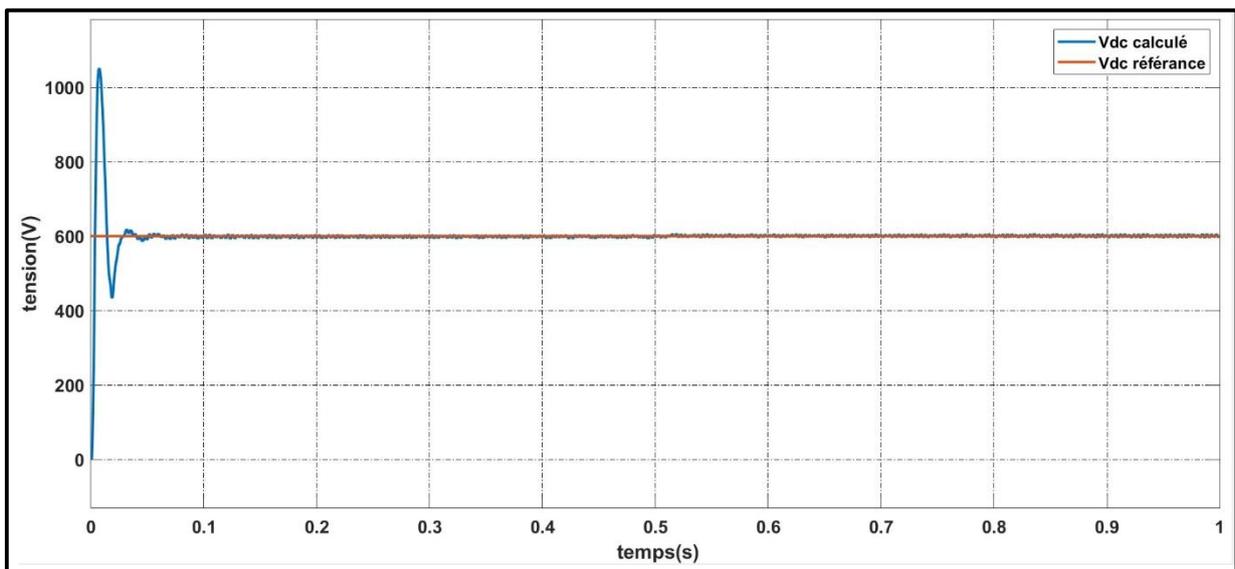


Figure III.22 : Régulation de la tension du Bus Continu

- On voit bien que les grandeurs (Courants et Tension) suivent les valeurs de référence imposées ce qui prouve l'efficacité des régulateur PI utilisés dans l'annulation de l'erreur.

III.6.5. Influence de l'éclairement sur le courant du réseau :

On injecte un signal d'irradiation à une température constante (25°C) et on observe les effets sur la tension et le courant du PV.

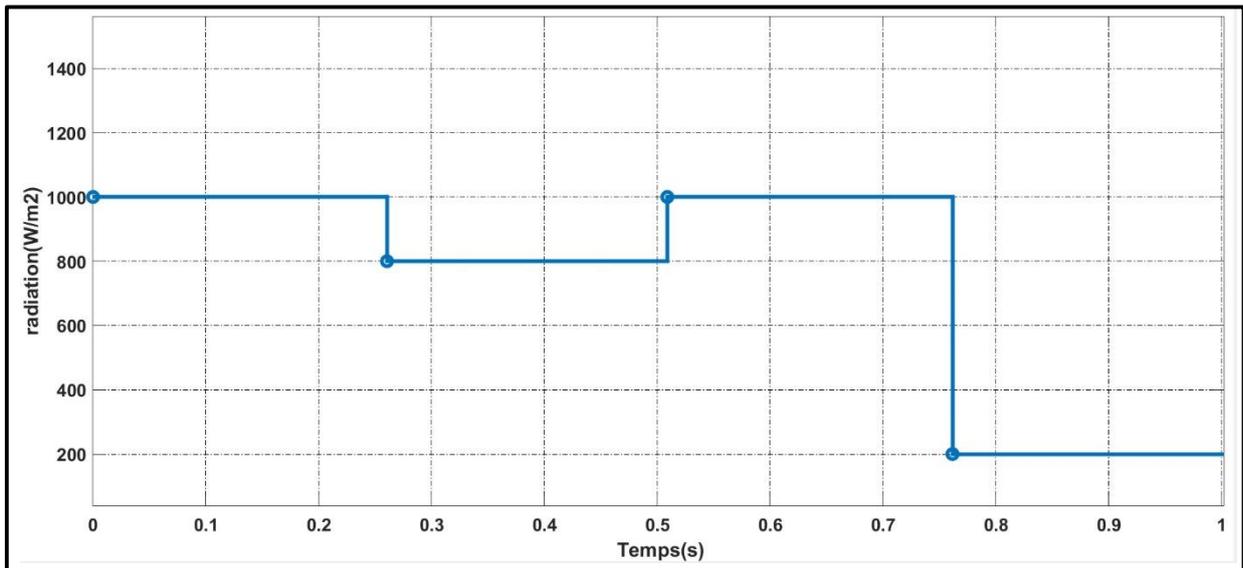


Figure III.23 : Le signal d'irradiation

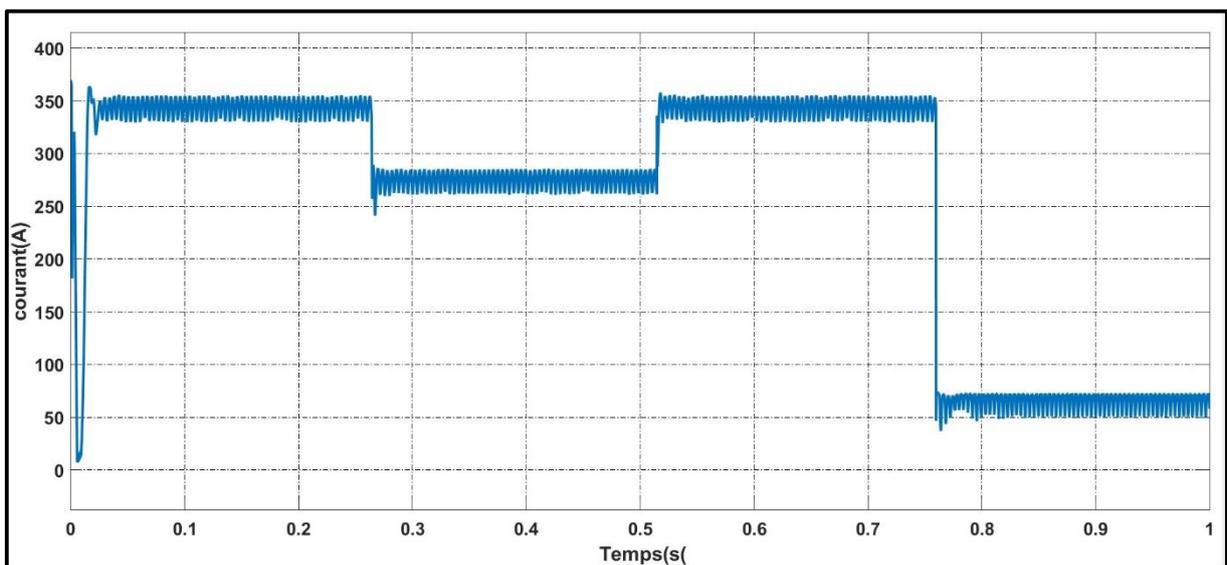


Figure III.24 : Le courant du PV

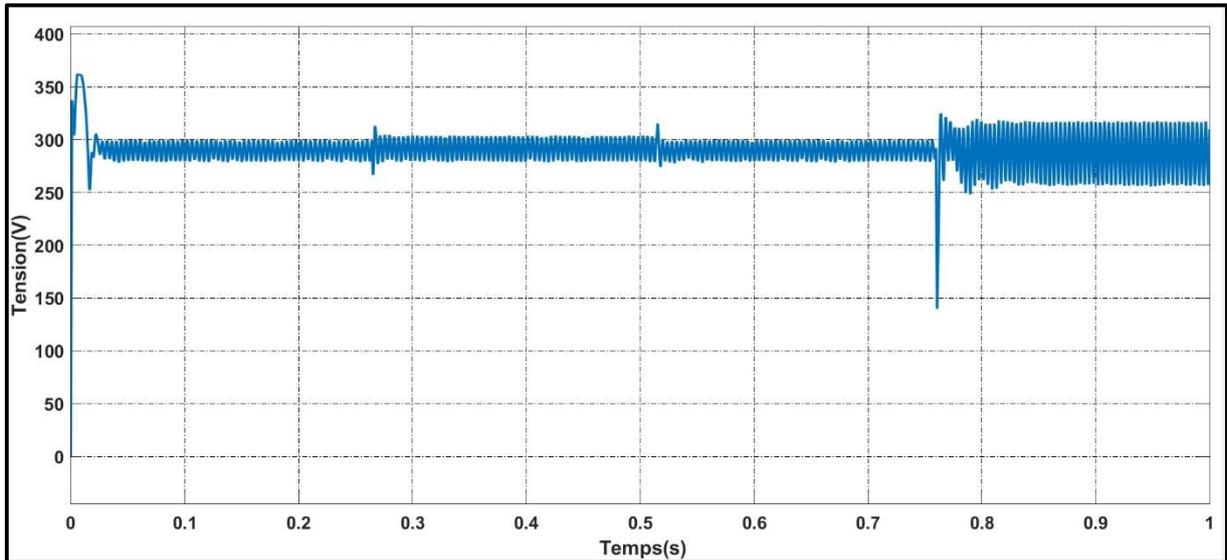


Figure III.25 : La tension du PV

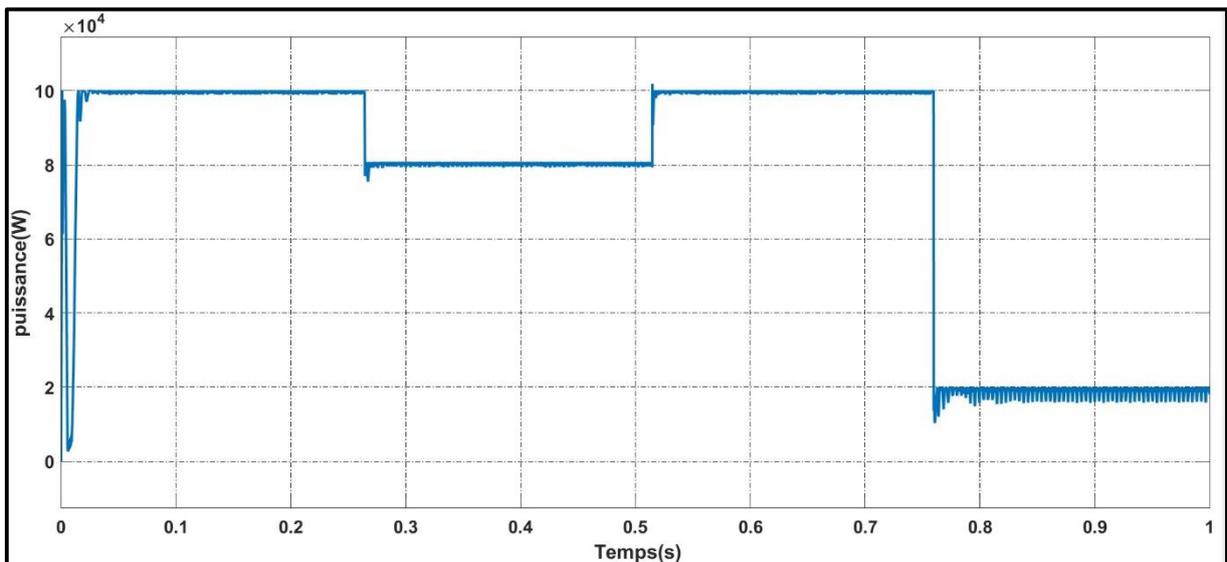


Figure III.26 : La puissance du PV

- Selon les figures (III.23, III.24, III.25, III.26), en remarque que le courant et la puissance du PV sont proportionnelles à l'éclairement.

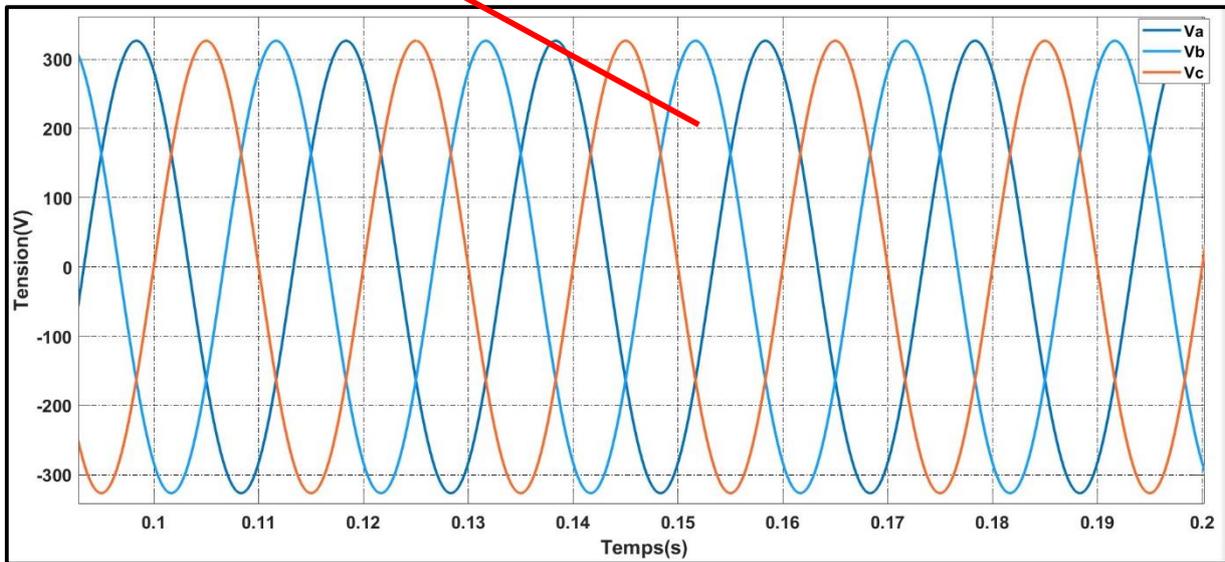
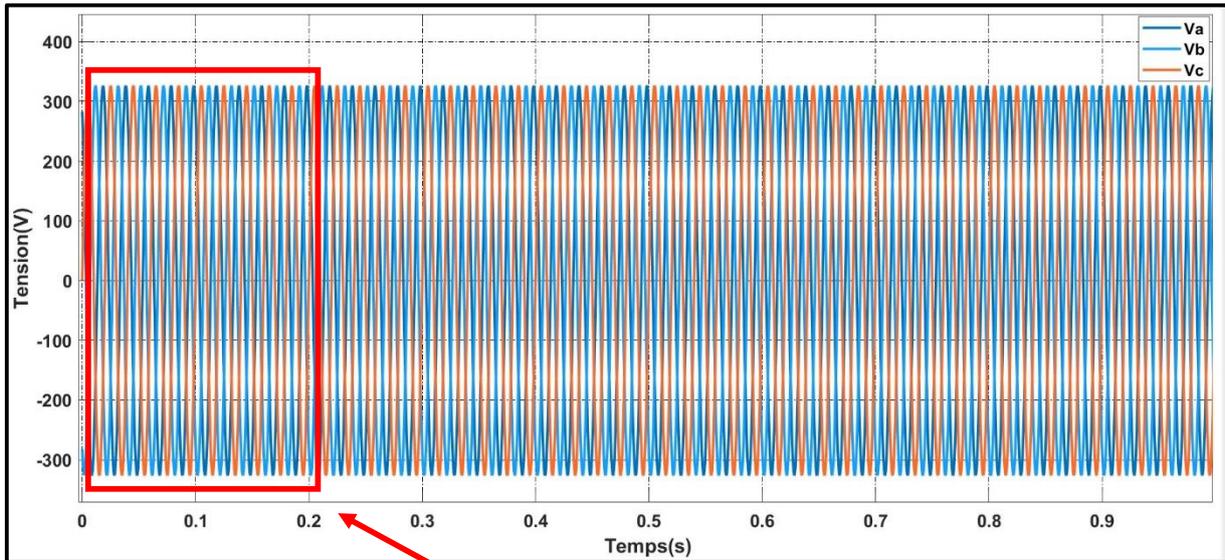


Figure III.27 : la tension à la sortie d'onduleur

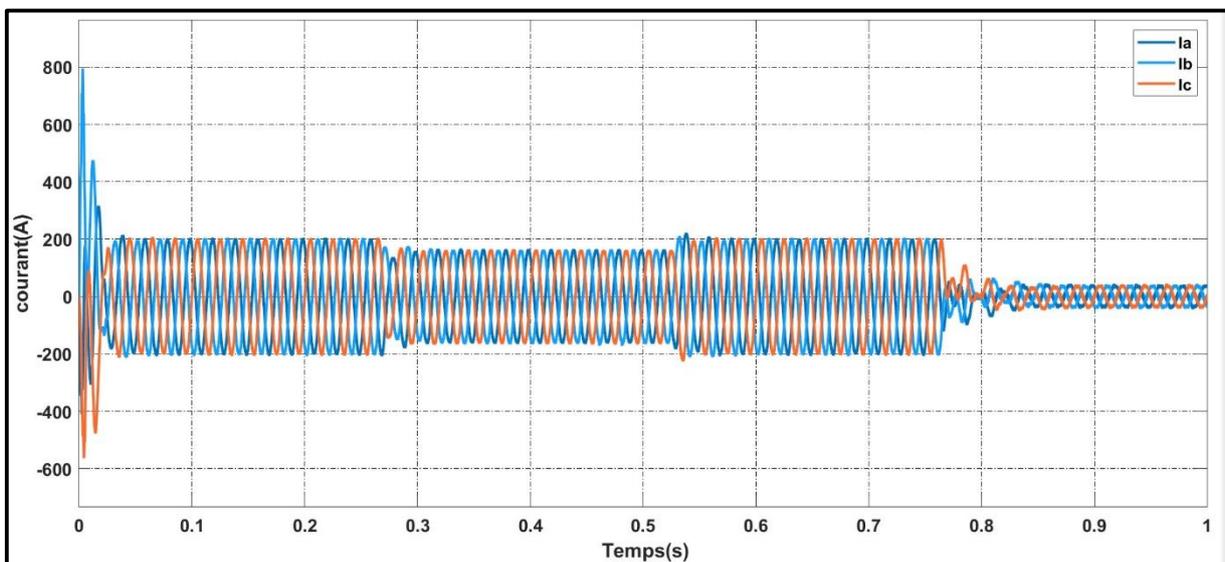


Figure III.28 : le courant à la sortie d'onduleur

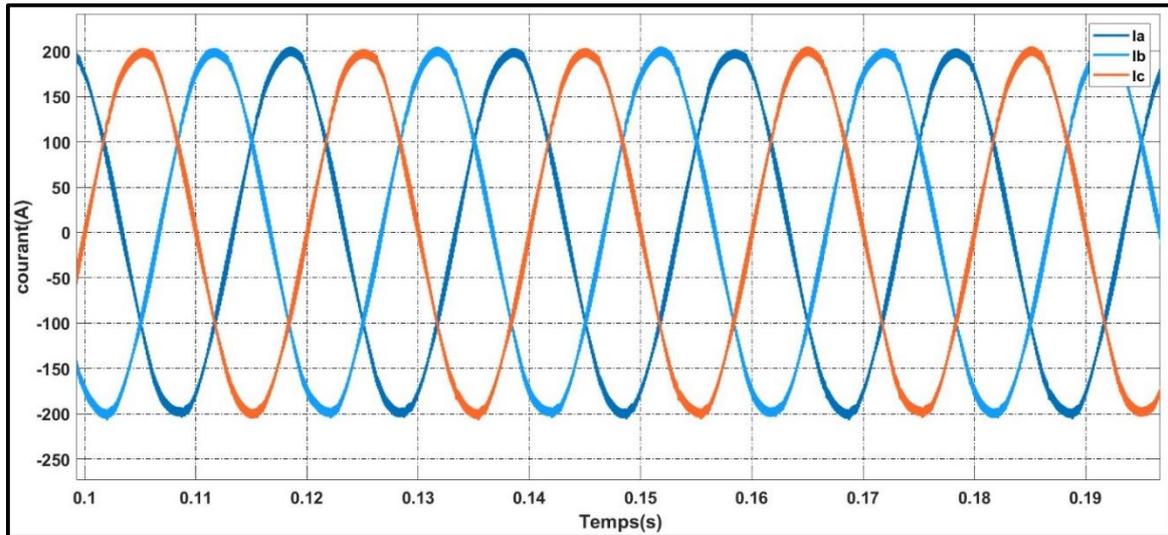


Figure III.29 : Zoom sur le courant à la sortie d'onduleur pour $t \in [0.1, 0.2]$

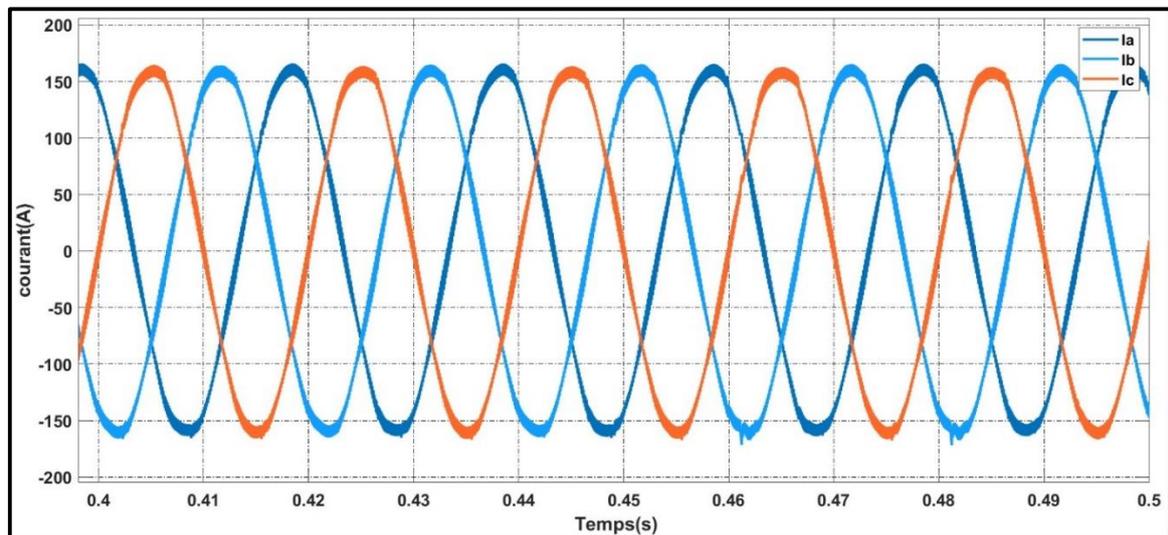


Figure III.30 : Zoom sur le courant à la sortie d'onduleur pour $t \in [0.4, 0.5]$

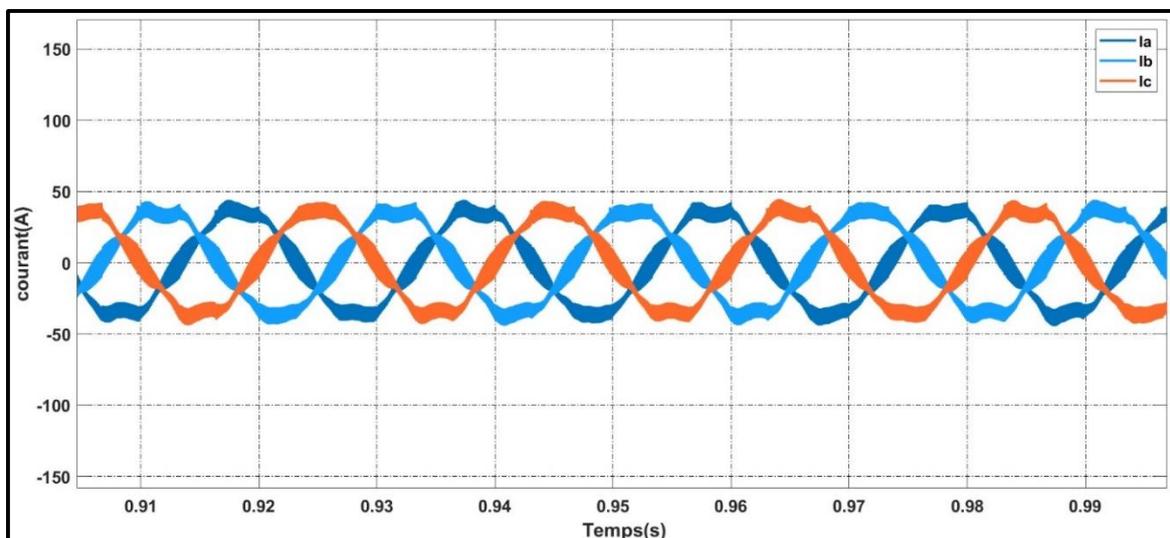


Figure III.31 : Zoom sur le courant à la sortie d'onduleur pour $t \in [0.9, 1]$

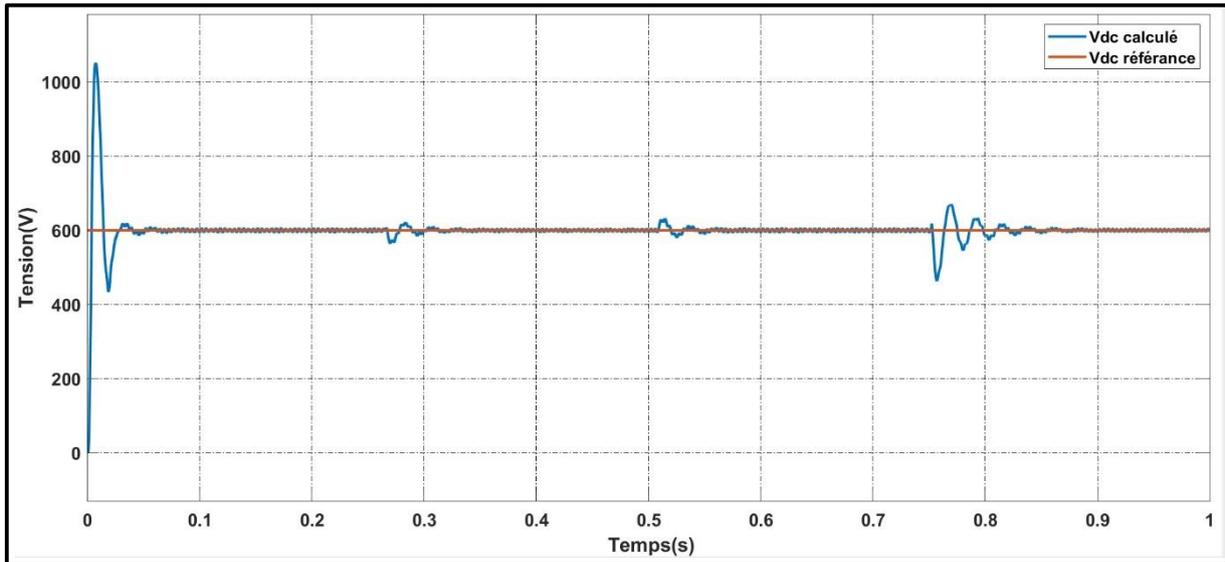


Figure III.32 : Régulation de la tension du Bus Continu avec le changement d'éclairément

- Selon la figure (III.32), on remarque que La tension du bus continu reste la même malgré le changement d'éclairément.

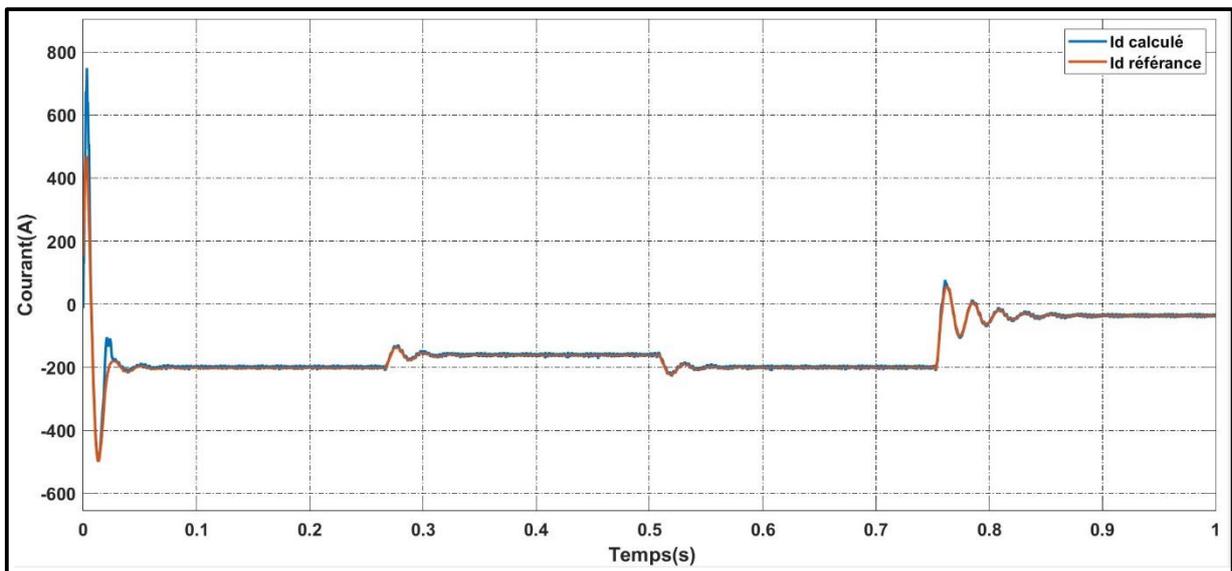


Figure III.33 : Régulation du courant d'axe direct avec le changement d'éclairément

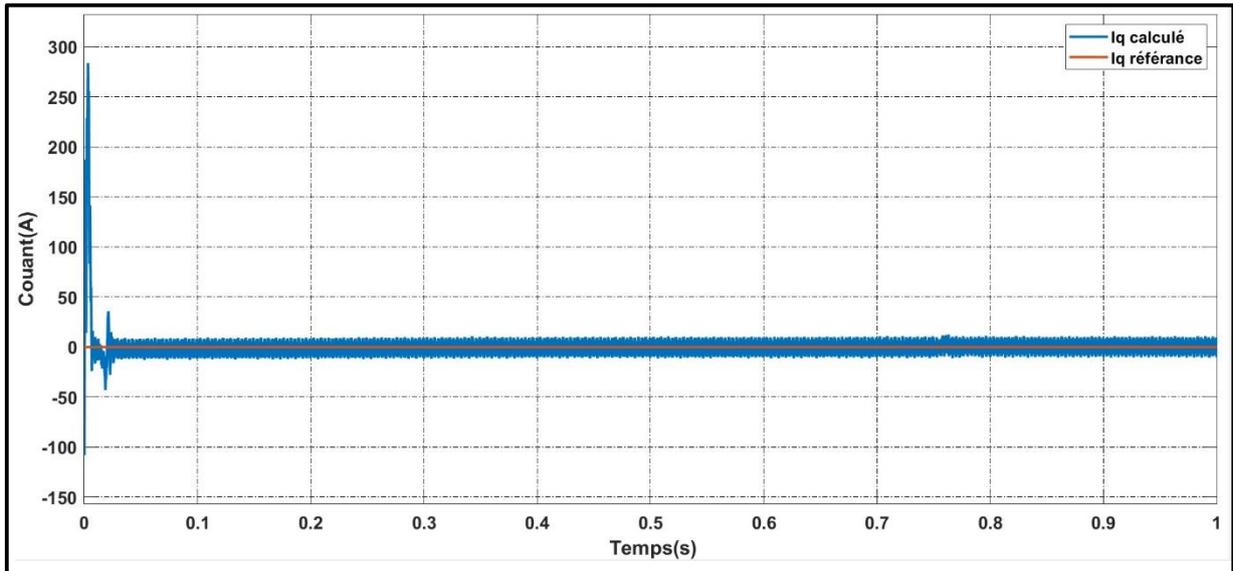


Figure III.34 : Régulation du courant d'axe en quadrature avec le changement d'éclairément

- Selon les figures (III.23, III.33), on remarque que le courant d'axe direct est inversement proportionnel à l'éclairément.

III.6.6. Ecoulement de puissance :

On a rajouté une charge de type RL avec une puissance de 80 kW.

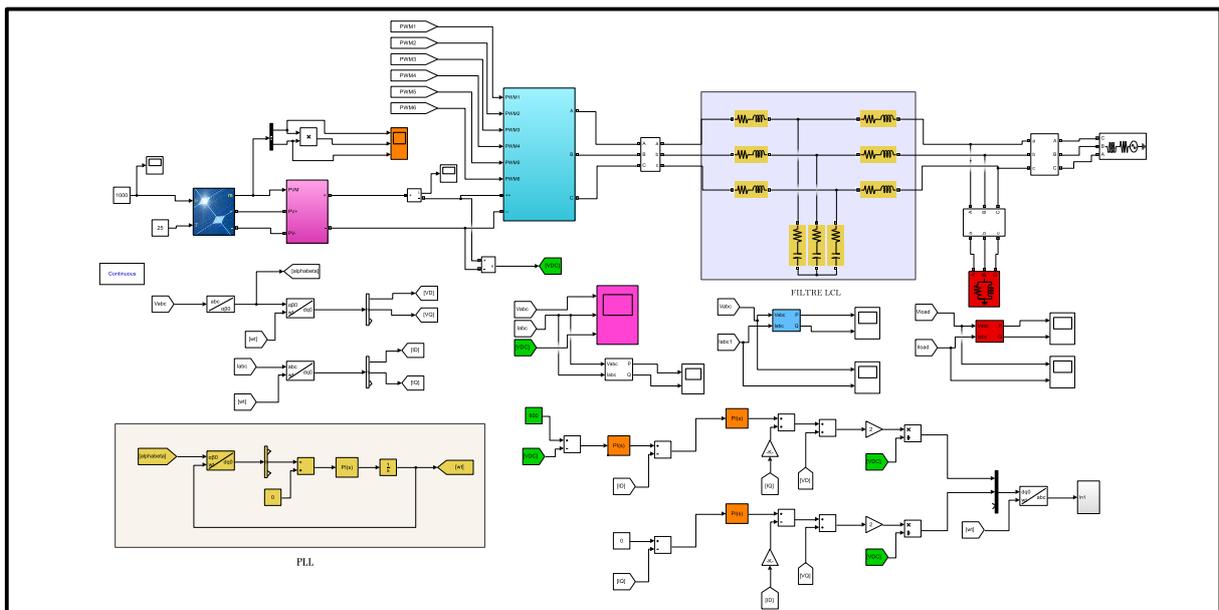


Figure III.35 : Schéma de simulation global PV raccordé au réseau avec charge

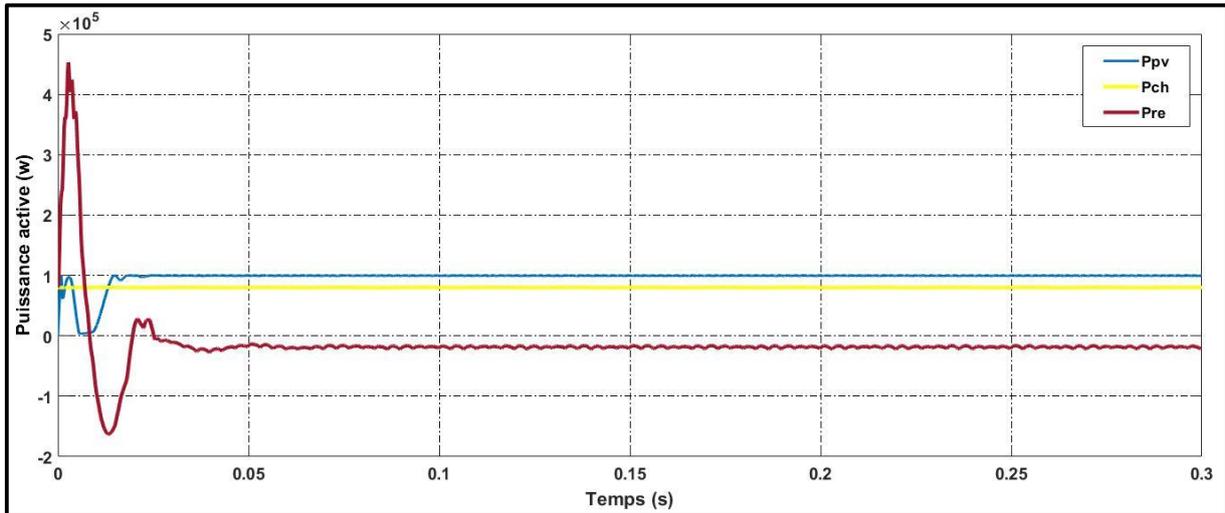


Figure III.35 : Écoulement de puissance pour une charge qui consomme 80 kW.

- Pour ce cas, nous avons connecté au réseau une charge qui consomme 80 kW, on voit que le générateur PV fournit toujours les 100 kW. Comme la charge ne consomme pas la totalité de la puissance, c'est le réseau qui reçoit le reste, soit 20 kW.

III.6.7. Le THD du réseau :

La figure (III.37) représente le THD de courant du réseau.

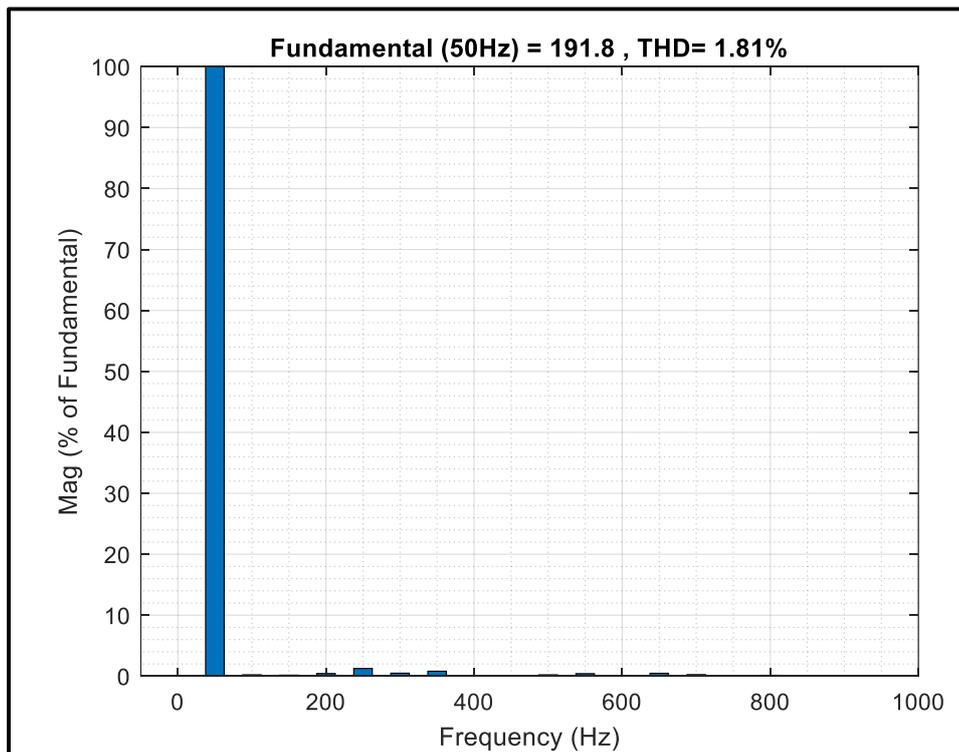


Figure III.37 : le THD en % du réseau

CHAPITRE III : Simulation du système

➤ Selon la figure (III.37) , il est évident que l'intégration du filtre améliore considérablement la qualité du courant ($THD < 5\%$). Il est observé que le courant et la tension fournis au réseau par le générateur photovoltaïque sont sinusoïdaux et équilibrés.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exposé la simulation du système photovoltaïque relié au réseau, en illustrant les différentes opérations que le générateur photovoltaïque subit pour répondre aux besoins de la charge. L'étude spectrale du courant et de la tension du réseau a démontré l'impact de la perturbation harmonique sur la qualité de l'énergie fournie par le GPV. Les résultats de la simulation ont démontré l'efficacité de l'ajout d'un filtre à la sortie de l'onduleur pour améliorer la qualité de la tension et du courant injectés dans le réseau.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Ce mémoire de master a exploré en profondeur l'étude et la simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique, en se concentrant sur les composants essentiels, les convertisseurs statiques, et la modélisation du système global. Les recherches et analyses menées dans le cadre de ce travail ont permis de mieux comprendre les défis techniques et les opportunités associées à l'intégration des systèmes photovoltaïques dans les réseaux électriques modernes.

Dans le premier chapitre, nous avons étudié les composants des systèmes photovoltaïques connectés au réseau. Cette analyse a mis en évidence les différentes technologies de cellules solaires et leurs performances, les modules photovoltaïques, les onduleurs et les dispositifs de protection et de contrôle. Nous avons souligné l'importance de chaque composant dans la performance globale du système et identifié les innovations récentes qui peuvent améliorer l'efficacité et la fiabilité des systèmes photovoltaïques.

Le deuxième chapitre s'est concentré sur les convertisseurs statiques pour les systèmes photovoltaïques. Nous avons examiné les différents types de convertisseurs, leurs principes de fonctionnement et leurs impacts sur la qualité de l'énergie. Les défis techniques liés aux convertisseurs, tels que les pertes de conversion et la gestion de l'intermittence de la production solaire, ont été discutés en détail, et des solutions possibles ont été proposées pour améliorer leur efficacité et leur robustesse.

Le troisième chapitre a présenté la simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique. À l'aide de MATLAB/Simulink, nous avons développé un modèle détaillé intégrant tous les composants étudiés précédemment. Cette simulation a permis de reproduire les conditions réelles de fonctionnement et d'évaluer les performances du système sous diverses conditions météorologiques et de charge. Les résultats ont fourni des insights précieux sur l'impact de la production photovoltaïque sur la stabilité et la qualité du réseau électrique.

En conclusion, ce mémoire a apporté une contribution significative à la compréhension et à l'optimisation des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique. Les études menées sur les composants, les convertisseurs statiques et la simulation du système global ont permis de formuler des recommandations pratiques pour améliorer l'efficacité, la fiabilité et l'intégration des systèmes photovoltaïques. Ces recommandations sont destinées à guider les ingénieurs, les chercheurs et les décideurs politiques dans leurs efforts pour promouvoir une adoption plus large et plus efficace de l'énergie photovoltaïque.

Conclusion générale

L'avenir de l'énergie photovoltaïque s'annonce prometteur, avec des avancées technologiques continues et une prise de conscience croissante de la nécessité de sources d'énergie durables. En poursuivant les recherches et les innovations dans ce domaine, nous pouvons espérer un avenir où l'énergie solaire joue un rôle central dans la transition énergétique mondiale, contribuant ainsi à un environnement plus propre et à une société plus durable.

Bibliographie :

- [1]. R. Merah, « Modélisation d'un diapositif MPPT pour l'étude de l'augmentation de la puissance produite par les générateurs photovoltaïques », Mémoire de Magistère, Université de Annaba 2010.
- [2]. G. Rami, «Contrôle de tension auto adaptif pour des productions décentralisées d'énergie connectées au réseau électrique de distribution». Thèse de doctorat L'INP Grenoble, Novembre 2006
- [3]. W. Boucheritte, « Convertisseurs multi niveaux dans les systèmes PV Connectés au Réseau», Mémoire de Magistère, Université de Biskra.
- [4]. F.SALAMA « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique». Mémoire de Magister, Université de Sétif, 2011.
- [5]. Y. Pankow, « Etude de l'intégration de la production décentralisé dans un réseau basse tension». Thèse de doctorat de l'école National supérieure d'Art et Métiers, décembre 2004
- [6]. Sophie Labrique, «Modèle équivalent», e-lee, consulté le 19/03/2024, [<https://sites.uclouvain.be/e-lee/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereSolaire/PanneauxPhotovoltaïques/Cellule/Modele.htm>].
- [7]. I. Vechiu, «Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome». Thèse de doctorat l'université du Havre, décembre 2005.
- [8]. S. Petibon, «Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques». Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Janvier 2009.
- [9]. Y. Pankow, « Etude de l'intégration de la production décentralisé dans un réseau basse tension». Thèse de doctorat de l'école National supérieure d'Art et Métiers, décembre 2004
- [10]. A. Sahli, « Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau », Mémoire de Magistère, Université de Sétif 2012
- [11]. A. Rufer & P. Barrade, Cours d'électronique de puissance « Conversion DC/DC» Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. octobre 2001.

Bibliographie

- [12]. BENDIAB.A et Atmaoui.N .Commande d'un Hacheur Boost a deux entrees » Mémoire de Master Unirrvsité de Abderrahmane MIRA- BEJAIA .2017-2018.
- [13]. Bakelli, Y., 2005. Étude et dimensionnement d'un convertisseur statique pour la connexion d'un générateur photovoltaïque» mémoire de magister. Université de Boumerdes.
- [14]. B. Bendib.'» Techniques conventionnelle et avancée de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïques : étude comparative''. Mémoire de magistère, Université Ferhat Abbas-Sétif, 2007
- [15]. A.LOUADAH « Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque », Mémoire de master en électromécanique, Université Abderrahmane Mira de BEJAIA, 2009.
- [16]. Rafika DRARENI, Zahra OUAHRANI, « Commande d'un aérogénérateur à base d'une machine asynchrone à cage connectée au réseau à travers un convertisseur AC-DC-AC », Projet de fin d'études, ENP, 2009.
- [17]. Jim Ögren, «PLL design for inverter grid connection», UPPSALA Universitet, 201
- [18]. Tarjei Midtsund, «Control of Power Electronic Converters in Distributed Power Generation Systems», Master Of Science in Energy and Environment, Norwegian University of Science and Technology, 2010.
- [19]. V. Ignatova, « Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique », Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, France 2006.
- [21]. M.ZELLAGUI Mohamed. Etude des protections des réseaux électriques MT. Mémoire de magister. UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE, 2010.