

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE

Département : ELECTROTECHNIQUE

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Spécialité : COMMANDE ELECTRIQUE

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

ETUDE DES ONDULEURS MULTINIVEAUX

Présenté par : BOUDJEBIRA Mezen  
BOUDJEBIRA Fadi

Encadrant : BENABDA Amina      GRADE : MCB      UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA

Jury de Soutenance :

GUOUELBOURK Sihem	MCA	UNIVERSTE BADJI MOKHTAR ANNABA	Président
BENABDA Amina	MCB	UNIVERSTE BADJI MOKHTAR ANNABA	Encadrant
MERABET Leila	Prof	UNIVERSTE BADJI MOKHTAR ANNABA	Examineur

Année Universitaire : 2024/2025

# REMERCIEMENT

Avant tout chose, je rends grâce à ALLAH, le Tout-Puissant, infiniment miséricordieux, pour m'avoir offert la santé, la persévérance et l'énergie requises pour accomplir ce travail, sans sa volonté, rien du tout cela n'aurait été possible.

Je remercie chaleureusement mon encadrante, madame BENABDA Amina, pour sa disponibilité, sa bienveillance, et surtout pour ses conseils avisés et ses orientations précieuses tout au long de ce projet, son soutien constant et sa rigueur scientifique ont été essentiels à l'aboutissement de ce travail.

Je tiens également à remercier ma famille, dont le soutien moral, la patience et les encouragements inlassables m'ont apporté la force nécessaire pour avancer et la motivation de persévérer, même dans les moments les plus difficiles. Merci pour leur confiance inébranlable en mes capacités.

Je souhaite également remercier l'ensemble du corps enseignant de l'UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR – ANNABA, et plus particulièrement les professeurs du département de l'ELECTROTECHNIQUE, pour la qualité de l'enseignement qu'ils m'ont transmis au fil des années. Grâce à eux, j'ai pu acquérir les compétences nécessaires pour mener à bien mon projet.

Un grand merci à mes camarades et collègues pour leur esprit de collaboration, les échanges enrichissants, les moments de partage et d'entraide qui ont rythmé cette phase de recherche.

Enfin, j'adresse mes remerciements à toutes celles et ceux qui, de manière directe ou indirecte, ont participé à la réussite de ce travail. Leur appui m'a été d'une grande valeur, et je leur exprime ma profonde gratitude.

---

<b>REMERCIEMENT.....</b>	<b>I</b>
<b>SOMMAIRE.....</b>	<b>II</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>III</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>IV</b>
<b>RESUME.....</b>	<b>V</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>VI</b>

## **Chapitre I : Les systèmes photovoltaïque et leur interface électrique**

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>I.1. Présentation des systèmes photovoltaïques.....</b>	<b>1</b>
I.1.1. Principe de fonctionnement.....	1
I.1.2. Modélisation et caractéristiques des panneaux PV.....	2
I.1.2.1. Modèles électriques d'une cellule photovoltaïque.....	2
I.1.2.2. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque.....	4
I.1.2.2.1 Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ).....	4
I.1.2.2.2 Tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ).....	5
I.1.2.2.3 La Puissance maximale $P_{Max}$ .....	7
I.1.2.2.4 Facteur de forme, FF.....	7
I.1.2.2.5 Le rendement $\eta$ .....	7
I.1.2.3. Le rendement quantique, EQE.....	7
<b>I.2. Interface électrique entre le générateur PV et le réseau.....</b>	<b>9</b>
I.2.1. Convertisseurs DC-DC (hacheur).....	9
I.2.1.1. Les types des convertisseurs DC-DC.....	10
I.2.1.2. Modélisation de l'hacheur survolteur.....	10
I.2.1.3. Commande MPPT.....	13

---

I.2.2. Convertisseurs DC-AC (onduleur).....	14
<b>I.3. Influence des systèmes photovoltaïques sur le réseau de distribution.....</b>	<b>16</b>
I.3.1. Influence sur le plan de tension.....	17
I.3.2. Influence sur la qualité de l'énergie.....	17
I.3.2.1 Injection d'harmoniques de courant.....	17
I.3.2.2 Injection de courant continu au réseau.....	17
I.3.3. Déséquilibre entre phases.....	18
I.3.4. Influence sur le plan de protection.....	18
I.3.5. Influence sur les pertes dans les réseaux de distribution.....	18
<b>I.4. Influence du réseau de distribution sur le fonctionnement des installations photovoltaïques.....</b>	<b>19</b>
I.4.1. Régime de neutre et courants de fuite.....	19
I.4.2. Creux de tension et tenue des systèmes PV.....	20
I.4.3. Présence de composante continue et d'harmoniques de tension.....	21
I.4.4. Inter harmoniques.....	22
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>22</b>

## **Chapitre II : Etude des structures d'onduleurs multiniveaux**

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>23</b>
<b>II.1. Généralité sur les onduleurs.....</b>	<b>23</b>
<b>II.2. Classification des onduleurs multi-niveaux.....</b>	<b>25</b>
<b>II.3. Description détaillée de chaque structure.....</b>	<b>26</b>
II.3.1 onduleur a diode de clamping .....	26
II.3.1.1 topologie de l'onduleur NPC.....	26
II.3.1.2 Les avantages de la topologie NPC.....	28
II.3.1.3 Les inconvénients de la topologie NPC.....	29

---

II.3.1.4 Les méthodes de commande.....	31
II.3.2 onduleur en pont de cascade.....	34
II.3.2.1 Le fonctionnement de la structure cascade en pont H.....	36
II.3.2.2 Les avantages de la topologie CHB.....	36
II.3.2.3 Les Inconvénients de la topologie CHB.....	37
II.3.2.4 Les domaines d'applications de la topologie CHB.....	37
II.3.3 Onduleur à condensateur flottant.....	37
II.3.3.1 Le fonctionnement de la topologie FC.....	38
II.3.3.2 Les avantages de la topologie FC .....	39
II.3.3.3 Les inconvénients de la topologie FC .....	39
<b>II.4 Comparaison théorique des structures.....</b>	<b>39</b>
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>41</b>

### **Chapitre III : Analyse des performances des structures multi-niveaux**

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>42</b>
<b>III.1. Modèle étudié.....</b>	<b>42</b>
<b>III.2. Les résultats.....</b>	<b>43</b>
III.2.1. Onduleur a 2 niveaux avec filtre.....	44
III.2.2. Onduleur a 3 niveaux sans filtre.....	47
III.2.3. Onduleur a 5 niveaux sans filtre.....	51
<b>III.3. L'interprétation des résultats.....</b>	<b>54</b>
<b>III.4. La comparaison.....</b>	<b>56</b>
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>56</b>

<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>VII</b>
---------------------------------	------------

---

<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>VIII</b>
---------------------------	-------------

## **Chapitre I**

<b><u>Figure I.1</u></b> : Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque.....	2
<b><u>Figure I.2</u></b> : Schéma équivalent électrique de la cellule PV à une diode.....	3
<b><u>Figure I.3</u></b> : Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque.....	4
<b><u>Figure I.4</u></b> : Différents régimes selon la puissance d'éclairement.....	6
<b><u>Figure I.5</u></b> : Les différentes zones de la caractéristique I (V).....	8
<b><u>Figure I.6</u></b> : Symbole d'un convertisseur DC-DC.....	9
<b><u>Figure I.7</u></b> : Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage.....	10
<b><u>Figure I.8</u></b> : Schéma de principe d'un convertisseur Boost.....	11
<b><u>Figure I.9</u></b> : Schémas équivalents de l'hacheur survolteur.....	12
<b><u>Figure I.10</u></b> : Principe de la commande P&O.....	13
<b><u>Figure I.11</u></b> : Algorithme de perturbation et de l'observation (P&O).....	14
<b><u>Figure I.12</u></b> : Symbole d'un convertisseur DC-AC.....	14
<b><u>Figure I.13</u></b> : Circuit de puissance d'un onduleur triphasé.....	15
<b><u>Figure I.14</u></b> : Schéma simplifié du courant de fuite via les capacités des panneaux PV, la Terre et l'onduleur.....	19
<b><u>Figure I.15</u></b> : Courbes de tolérance en tension des onduleurs.....	21

## **Chapitre II**

<b><u>Figure II.1</u></b> : Schéma d'un onduleur triphasé.....	23
<b><u>Figure II.2</u></b> : Commande MLI d'un onduleur triphasé.....	24
<b><u>Figure II.3</u></b> : Les principales topologies des onduleurs multinationaux.....	25
<b><u>Figure II.4</u></b> : La Structure triphasé d'un onduleur NPC à trois niveaux.....	27
<b><u>Figure II.5</u></b> : Schéma d'un seul bras d'un onduleur NPC à trois niveaux.....	28

---

<b>Figure II.6 :</b> Schéma d'un seul bras d'un onduleur NPC à cinq niveaux.....	29
<b>Figure II.7 :</b> La Structure triphasé d'un onduleur NPC à cinq niveaux.....	30
<b>Figure II.8 :</b> La commande MLI sinusoïdale d'un onduleur à 3 niveaux.....	31
<b>Figure II.9 :</b> Représentation dans le plan ( $\alpha$ , $\beta$ ) des vecteurs de tension de L'onduleur à trois niveaux de tension.....	32
<b>Figure II.10 :</b> Vs dans le K-ième secteur.....	33
<b>Figure II.11 :</b> Schéma d'un onduleur en pont H cascadié.....	35
<b>Figure II.12 :</b> Schéma d'un onduleur à condensateur flottant.....	38

### **Chapitre III**

<b>Figure III.1 :</b> Le modèle de simulation étudié.....	43
<b>Figure III.2 :</b> L'irradiance et de température.....	43
<b>Figure III.3 :</b> La puissance de réseau.....	44
<b>Figure III.4 :</b> La puissance du panneau.....	44
<b>Figure III.5 :</b> La puissance de charge.....	45
<b>Figure III.6 :</b> La tension du réseau.....	45
<b>Figure III.7 :</b> Le courant du réseau.....	46
<b>Figure III.8 :</b> THD en courant.....	46
<b>Figure III.9 :</b> THD en tension.....	47
<b>Figure III.10 :</b> La puissance de réseau.....	47
<b>Figure III.11 :</b> La puissance du panneau.....	48
<b>Figure III.12 :</b> La puissance de charge.....	48
<b>Figure III.13 :</b> La tension du réseau.....	49
<b>Figure III.14 :</b> Le courant du réseau.....	49
<b>Figure III.15 :</b> THD en courant.....	50

---



---

## ***LISTE DES FIGURES***

---

<b><u>Figure III.16</u></b> : THD en tension.....	50
<b><u>Figure III.17</u></b> : La puissance de réseau.....	51
<b><u>Figure III.18</u></b> : La puissance du panneau.....	51
<b><u>Figure III.19</u></b> : La puissance de charge.....	52
<b><u>Figure III.20</u></b> : La tension du réseau.....	52
<b><u>Figure III.21</u></b> : Le courant du réseau.....	53
<b><u>Figure III.22</u></b> : THD en courant.....	53
<b><u>Figure III.23</u></b> : THD en tension.....	54

---

## **Chapitre II**

<b><u>Tableaux II.1 :</u></b> Tableau des configurations possible de commutation des interrupteurs d'un onduleur NPC a trois niveaux.....	27
<b><u>Tableaux II.2 :</u></b> Les commutations possibles des interrupteurs d'un onduleur NPC a cinq niveaux.....	30
<b><u>Tableaux II.3 :</u></b> Vecteur de commande et tension de phase.....	33
<b><u>Tableaux II.4 :</u></b> Les états de fonctionnement possibles de l'onduleur H-bridge à 3 niveaux.....	36
<b><u>Tableaux II.5 :</u></b> Les états de fonctionnement possibles de l'onduleur à condensateur flottant à 3 niveaux.....	38
<b><u>Tableaux II.6 :</u></b> Comparaison des structures d'onduleurs à trois niveaux.....	40

## **Chapitre III**

<b><u>Tableau III.1 :</u></b> Paramètres des panneaux photovoltaïques.....	43
<b><u>Tableau III.2 :</u></b> La comparaison entre les 3 cas.....	56

---

# RESUME

Les onduleurs jouent un rôle clé dans les systèmes photovoltaïques, en convertissant le courant continu produit par les panneaux solaires en courant alternatif utilisable par les appareils électriques et compatible avec le réseau. Pour la connexion au réseau, ils assurent la synchronisation de la tension, de la fréquence et garantissent la qualité de l'énergie injectée. Dans les applications autonomes, les onduleurs gèrent également le stockage et la distribution de l'énergie pour assurer une alimentation stable et fiable.

Dans ce contexte, il devient essentiel d'optimiser les performances des systèmes photovoltaïques en identifiant la structure d'onduleur la plus adaptée, en tenant compte de leurs spécificités techniques et de leur efficacité énergétique.

L'objectif de notre mémoire est d'étudier les différentes structures d'onduleurs multi-niveaux et analyser leurs performances pour des applications photovoltaïques, après comparer les structures pour identifier celles qui sont les plus adaptées et les plus performantes éliminer l'effet de l'injection d'harmoniques dans le réseau.

## الملخص

تلعب العواكس دوراً رئيسياً في أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية، حيث تقوم بتحويل التيار المستمر الناتج عن الألواح الشمسية إلى تيار متناوب يمكن استخدامه في تشغيل الأجهزة الكهربائية ومتوافق مع شبكة الكهرباء.

في أنظمة الربط مع الشبكة، تضمن العواكس تزامن الجهد والتردد، كما تضمن جودة الطاقة المحقونة في الشبكة. أما في التطبيقات المستقلة، فتتولى العواكس أيضاً إدارة تخزين الطاقة وتوزيعها لضمان توفير طاقة مستقرة وموثوقة.

وفي هذا السياق، يصبح من الضروري تحسين أداء أنظمة الطاقة الشمسية من خلال تحديد بنية العاكس الأنسب، مع الأخذ بعين الاعتبار الخصائص التقنية والكفاءة الطاقية لكل منها.

يهدف هذا البحث إلى دراسة مختلف بنيات العواكس متعددة المستويات وتحليل أدائها في التطبيقات الكهروضوئية، مع إجراء مقارنة بينها لتحديد الأنسب والأكثر كفاءة، مع العمل على تقليل تأثير حقن التوافقيات في الشبكة الكهربائية.

# ABSTRACT

Inverters play a key role in photovoltaic systems by converting the direct current (DC) generated by solar panels into alternating current (AC) that can be used by electrical devices and is compatible with the power grid. For grid-connected applications, they ensure synchronization of voltage and frequency, while also guaranteeing the quality of the injected energy. In standalone systems, inverters also manage energy storage and distribution to provide a stable and reliable power supply.

In this context, optimizing the performance of photovoltaic systems becomes essential by identifying the most suitable inverter topology, considering their technical characteristics and energy efficiency.

The objective of this thesis is to study different multilevel inverter topologies and analyze their performance for photovoltaic applications. A comparative analysis will be conducted to identify the most suitable and efficient structures, with the aim of minimizing harmonic injections into the grid.

---

Dans un contexte mondial caractérisé par l'épuisement progressif des ressources fossiles et l'urgence de limiter les émissions de gaz à effet de serre, les énergies renouvelables s'imposent comme une solution durable et indispensable. Parmi elles, l'énergie solaire photovoltaïque occupe une place centrale grâce à son abondance, sa propreté et sa facilité d'intégration dans les réseaux électriques.

Les systèmes photovoltaïques permettent de convertir directement l'énergie lumineuse en électricité à l'aide de cellules solaires. Cependant, cette conversion soulève plusieurs défis technique, notamment en ce que concerne l'adaptation de puissance (tels que les hacheurs et les onduleurs) sont utilisés pour optimiser la production, améliorer la qualité du signal et assurer une injection efficace et fiable de l'énergie.

Dans ce domaine, les structures d'onduleurs multiniveaux se distinguent par leur capacité à produire des tensions de sortie proche d'une onde sinusoïdale, réduisant ainsi les pertes, les interférences et la distorsion harmonique. Ces structures offrent une meilleure efficacité énergétique, mais au prix d'une plus grande complexité de conception et de commande.

Ce travail de recherche s'inscrit pleinement dans cette problématique en proposant une étude approfondie des systèmes photovoltaïques et de leurs interfaces électriques, en analysant les différentes topologies d'onduleurs multiniveaux, puis en comparant leurs performances à travers des simulations numériques dans un système connecté au réseau.

L'objectif est de démontrer l'intérêt technico-économique des onduleurs multiniveaux dans les systèmes photovoltaïques, en identifiant les meilleures configurations en fonction des critères de performance, de coût et de complexité.

---

# **Chapitre 1 :**

## **LES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUE ET LEUR INTERFACE ELECTRIQUE**

## **INTRODUCTION :**

Les systèmes photovoltaïques représentent une technologie clé dans la transition vers des sources d'énergie renouvelables. En exploitant l'énergie solaire, ces systèmes permettent de convertir la lumière du soleil en électricité, offrant ainsi une alternative durable aux énergies fossiles. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques repose sur l'effet photovoltaïque, un phénomène physique où les photons de la lumière solaire libèrent des électrons dans un matériau semi-conducteur, générant ainsi un courant électrique. Cette technologie, bien que complexe, est de plus en plus accessible et utilisée dans des applications allant des petites installations résidentielles aux grandes centrales solaires.

Cependant, l'intégration des systèmes PV dans les réseaux électriques existants pose des défis techniques importants. Les convertisseurs DC-DC et DC-AC jouent un rôle crucial dans l'adaptation de l'énergie produite par les panneaux solaires aux besoins du réseau électrique. Parmi ces convertisseurs, les hacheurs survolteurs et les onduleurs sont essentiels pour optimiser la puissance délivrée et assurer une injection efficace de l'énergie dans le réseau. De plus, les systèmes PV ont un impact significatif sur la qualité de l'énergie, notamment en termes de tension, d'harmoniques et de déséquilibres entre phases.

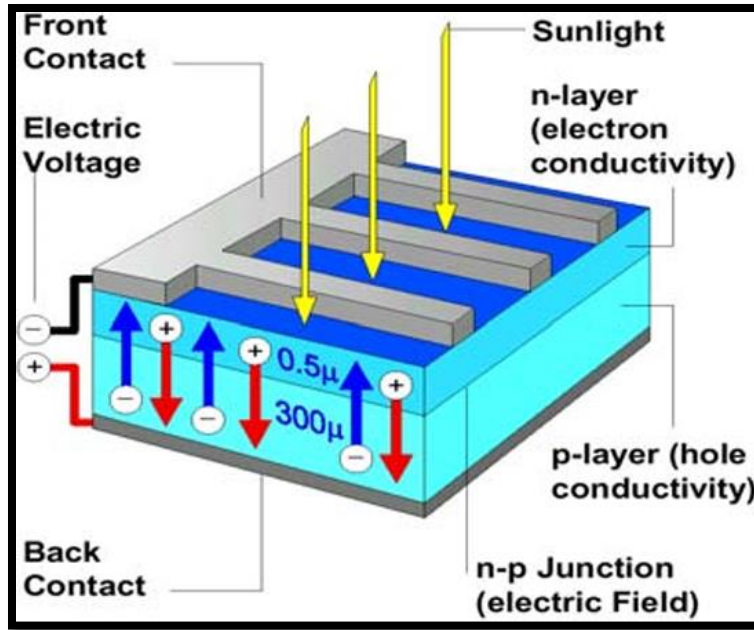
Ce chapitre explore en détail les principes de fonctionnement des systèmes photovoltaïques, leur modélisation électrique, ainsi que les interfaces nécessaires pour leur intégration au réseau électrique. Il aborde également les impacts de ces systèmes sur le réseau de distribution et les défis techniques liés à leur utilisation, tels que les courants de fuite, les creux de tension et la présence de composantes continues et harmoniques.

## **I.1. Présentation des systèmes photovoltaïques :**

### **I.1.1. Principe de fonctionnement :**

La cellule photovoltaïque, également connue sous le nom de cellule solaire, constitue l'élément central dans la conversion de l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique. Ce dispositif, basé sur des matériaux semi-conducteurs, exploite les photons issus du rayonnement solaire (une ressource énergétique illimitée) pour générer un courant électrique. Les propriétés physiques de ces matériaux, qui sont par ailleurs utilisés dans divers composants électroniques comme les transistors, les diodes et les circuits intégrés, permettent ce processus de transformation énergétique. [1]





**Figure I.1** : représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque.

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière solaire, les photons qui composent cette lumière frappent les atomes du matériau. Sous cet impact, les électrons des couches de valence, situés dans les niveaux électroniques supérieurs, peuvent être libérés. Si ces électrons retournent à leur état initial, l'énergie dégagée se manifeste sous forme de chaleur, provoquant ainsi un échauffement du matériau. [2]

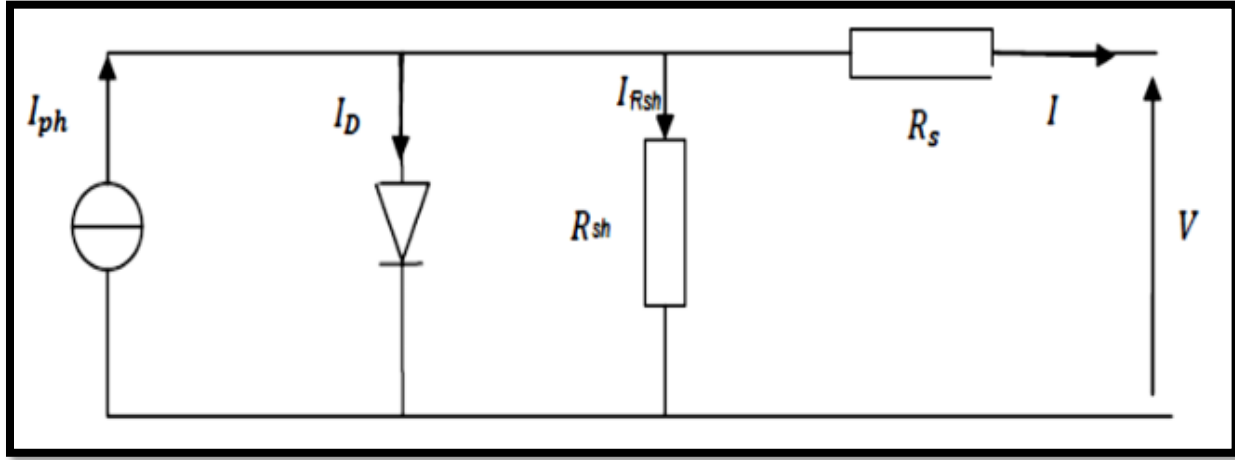
L'énergie cinétique des photons se transforme en énergie thermique lorsqu'ils sont absorbés. Toutefois, dans les cellules photovoltaïques, certains électrons libérés ne retournent pas à leur état initial. Ces électrons mis en mouvement participent à la création d'une tension électrique continue de faible intensité. Ainsi, une portion de l'énergie lumineuse est directement transformée en électricité, ce phénomène est désigné sous le nom d'effet photovoltaïque. [3]

## **I.1.2. Modélisation et caractéristiques des panneaux PV :**

### **I.1.2.1. Modèles électriques d'une cellule photovoltaïque :**

La **Figure I.2** illustre le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque exposée à la lumière. Ce modèle représente un générateur de courant associé en parallèle à une diode. Deux résistances parasites sont également intégrées dans ce circuit pour modéliser les pertes. [4]

Ces résistances exercent une certaine influence sur la caractéristique  $I = f(V)$  de la cellule :



**Figure I.2:** Schéma équivalent électrique de la cellule PV à une diode.

La loi de Kirchhoff nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I_{ph} = I_D + I_{Rsh} + I \quad \text{Donc :} \quad I = I_{ph} - I_D - I_{Rsh} \quad (1)$$

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[ \exp \left( \frac{V_{pv} + (I_{pv} R_s)}{n V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + (I_{pv} R_s)}{R_{sh}} \quad (2)$$

Les expressions de  $(I_{ph})$  et de  $(I_{sat})$  le courant de saturation de la diode sont donnés par :

$$I_{ph} = [I_{sc} + (K_i * (T - 298))] * \frac{G}{1000} \quad (3)$$

$$I_{sat} = \left( I_{sc} * \exp \left[ \left( \frac{V_{co}}{n V_t} \right) \right] - 1 \right) * \left( \frac{\tau}{298} \right)^3 * \exp \left[ \frac{q + E_g + \left( \frac{1}{298 \tau} \right)}{n K} \right] \quad (4)$$

D'où :

$I_{ph}$  : Photo courant produit.

$I_{sat}$  : courant de saturation de la diode.

$R_s, R_{sh}$  : La résistance série et la résistance parallèle, respectivement.

$V_t = \frac{KT}{q}$  tension thermique à la température T.

q : charge de l'électron ( $1.602 \cdot 10^{-19} \text{C}$ ).

K : Constante de Boltzman ( $1.381 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$ ).

$K_i$  : Constante ( $1.2 \text{A/cm}^2 \text{K}^3$ ).

$n$  : Facteur de non-idéalité de la jonction.

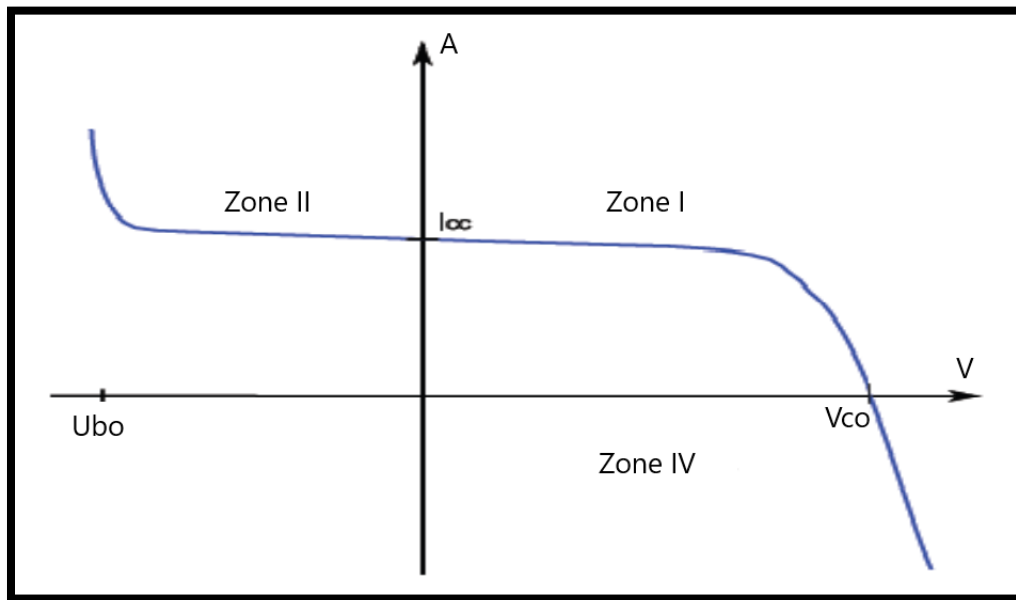
$T$  : Température effectif de la cellule en degré Kelvin.

$E_g$  : Energie de gap (pour le silicium cristallin est égale à 1.12 eV).

$G$  : l'ensoleillement en  $W/m^2$ . [4]

### **I.1.2.2. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :**

La cellule photovoltaïque présente une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire, illustrée à la **Figure I.3**. Cette caractéristique couvre trois des quatre quadrants du plan I-V. La cellule agit en tant que récepteur dans les quadrants 2 et 4, ce qui est à éviter car cela peut entraîner des phénomènes d'échauffement localisés, appelés (hot spots), susceptibles d'endommager la cellule. Le fonctionnement normal de la cellule se situe dans le quadrant 1, où elle se comporte comme un générateur en produisant de l'énergie électrique. Ainsi, il est essentiel de maintenir la cellule dans ce quadrant pour garantir un fonctionnement optimal. [5]



**Figure I.3:**Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque.

#### **I.1.2.2.1 Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) :**

Ce courant correspond à l'intensité mesurée en l'absence de tension appliquée à la cellule, c'est-à-dire lorsque le potentiel est nul. Il s'agit du courant maximal que la cellule photovoltaïque est capable de délivrer. Sa valeur est influencée par divers paramètres, notamment la température ambiante, la longueur d'onde du rayonnement incident, la surface active exposée de la cellule ainsi que la mobilité des charges électriques dans le matériau. Par ailleurs, ce courant évolue de façon proportionnelle à l'intensité lumineuse reçue : plus la lumière est intense, plus le courant généré est élevé. [6]

#### **I.1.2.2.2 Tension de circuit ouvert (Vco) :**

Comme l'indique son appellation, cette tension correspond à la mesure effectuée aux bornes de la cellule photovoltaïque lorsqu'elle est en circuit ouvert, c'est-à-dire sans connexion à une charge externe ou reliée à une charge de résistance quasi infinie. Elle est étroitement liée à la nature technologique de la cellule solaire (qu'il s'agisse d'une jonction PN ou d'une jonction Schottky) ainsi qu'aux propriétés des matériaux utilisés dans la couche active. De plus, les caractéristiques des interfaces entre cette couche active et les électrodes influencent également cette tension. Il est à noter que la tension à vide varie en fonction du niveau d'éclairement auquel la cellule est exposée. [7]

$$V_{co} = \frac{KT_c}{q} * \log \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (5)$$

Avec :

$\frac{KT_c}{q}$  : représentant le potentiel thermodynamique.

$T_c$  : est la temperature absolute.

$Q$  : la constante de la charge d'electron,  $1.602*10^{-23}$  C.

$K$  : la constante de Boltzman,  $1.38*10^{-23}$  J/k.

$I_{ph}$  : le courant photonique.

$I_s$  : le courant de saturation.

Deux régimes peuvent être observés suivant le degré d'éclairement **Figure I.4.**

- Régime des faibles flux lumineux : dans ce cas,  $I_{ph} \gg I_s$ , ce qui permet d'écrire :

$$\log \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) = \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (6)$$

D'où :

$$V_{co} \approx \frac{KT_c}{q} * \left( \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (7)$$

C'est la zone de comportement linéaire de la cellule. La formule précédente peut s'écrire aussi

$$V_{co} = R_0 * I_{ph} \quad (8)$$

En posant :

$$R_0 = \frac{KT_c}{qI_s} \quad (9)$$

**$R_0$**  : est la résistance interne de la diode en polarisation externe nulle (circuit ouvert) et sous faible flux lumineux.

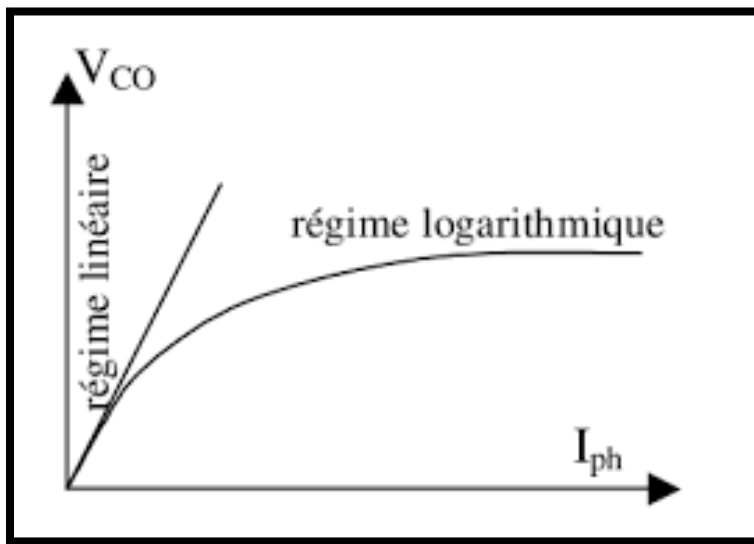
- Régime des flux lumineux suffisamment intenses pour que  **$I_{ph}/I_s$** , soit :

$$\frac{I_{ph}}{I_s} \gg 1 \quad (10)$$

D'où :

$$V_{co} = \frac{KT_c}{q} * \log \left( \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (11)$$

C'est le domaine du comportement logarithmique.



**Figure I.4:** Différents régimes selon la puissance d'éclairement.

Il est important de noter que cette tension augmente proportionnellement au logarithme du courant de photo-génération ( $I_{ph}$ ), donc au logarithme de l'illumination. En revanche, elle diminue avec la température, malgré la présence du terme  $\frac{KT_c}{q}$ .

En effet, le courant de saturation, qui dépend de la surface de la diode (et donc de la cellule) ainsi que des propriétés de la jonction, croît de façon exponentielle avec la température. Cette variation thermique compense largement le terme  $\frac{KT_c}{q}$ , entraînant ainsi une diminution de la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) lorsque la température augmente.

Cette caractéristique est cruciale à prendre en compte lors du dimensionnement des systèmes photovoltaïques. [8]

#### **I.1.2.2.3 La Puissance maximale $P_{MAX}$ :**

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale  $P_{MAX}$ , correspondrait donc à la tension de circuit ouvert  $V_{max}$  multipliée par le courant de court-circuit.

$$P_{max} = V_{max} \times I_{max} \quad (12)$$

Le produit ( $V_{max} * I_{max}$ ) donne la puissance maximale qui représente 80% environ du produit ( $V_{co} I_{sc}$ ).

#### **I.1.2.2.4 Facteur de forme, FF :**

Un paramètre clé, dérivé de la caractéristique courant-tension (**I-V**), permet d'évaluer la performance d'une cellule ou d'un générateur photovoltaïque : il s'agit du facteur de remplissage, ou fill factor (**FF**). Ce paramètre est défini comme le rapport entre la puissance maximale réellement fournie par la cellule, notée  $P_{max}$ , et la puissance théorique calculée comme le produit du courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) par la tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ). Plus ce facteur est élevé, plus la cellule est efficace pour exploiter l'énergie solaire. Les cellules les plus performantes résultent de compromis technologiques optimisés afin de se rapprocher au mieux des caractéristiques idéales.

Le facteur de remplissage est exprimé par la formule suivante : [9]

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} * I_{cc}} \quad (13)$$

#### **I.1.2.2.5 Le rendement $\eta$ :**

Le rendement  $\eta$  d'une cellule photovoltaïque exprime sa capacité à convertir l'énergie lumineuse reçue en énergie électrique. Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{in}$ .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{ff * I_{cc} * V_{co}}{P_{in}} \quad (14)$$

L'amélioration de ce rendement peut être obtenue en augmentant certains paramètres clés tels que le facteur de forme (**FF**), le courant de court-circuit (**I<sub>cc</sub>**) ainsi que la tension à vide (**V<sub>oc</sub>**). Le rendement de conversion constitue un indicateur central dans l'évaluation des performances d'une cellule : sa seule valeur permet déjà d'apprécier l'efficacité globale du dispositif. [7]

#### **I.1.2.3. Le rendement quantique, EQE :**

Le rendement quantique désigne le rapport entre le nombre d'électrons générés et injectés dans le circuit externe, et le nombre total de photons incidents frappant la surface de la cellule photovoltaïque. Lorsqu'on exclut les photons perdus par réflexion à la surface de la cellule ainsi que ceux traversant la cellule sans être absorbés (pertes par transmission), on parle alors de rendement quantique interne (IQE, internal quantum efficiency).

En revanche, lorsque ces pertes sont prises en compte, on utilise le terme rendement quantique externe (EQE, external quantum efficiency). Ce dernier se définit de la manière suivante :

$$EQE(\lambda) = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\phi(\lambda)} * \frac{E_{ph}(\lambda)}{e} = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\phi(\lambda)} * \frac{hc}{e\lambda} \quad (15)$$

Où  $\phi(\lambda)$  est le flux lumineux incident,  $e$  la charge de l'électron et  $E_{ph}$  l'énergie du photon (avec  $E_{ph}(\lambda)=hc/\lambda$ ,  $h$  étant la constante de Planck,  $c$  la vitesse de la lumière et  $\lambda$  la longueur d'onde).

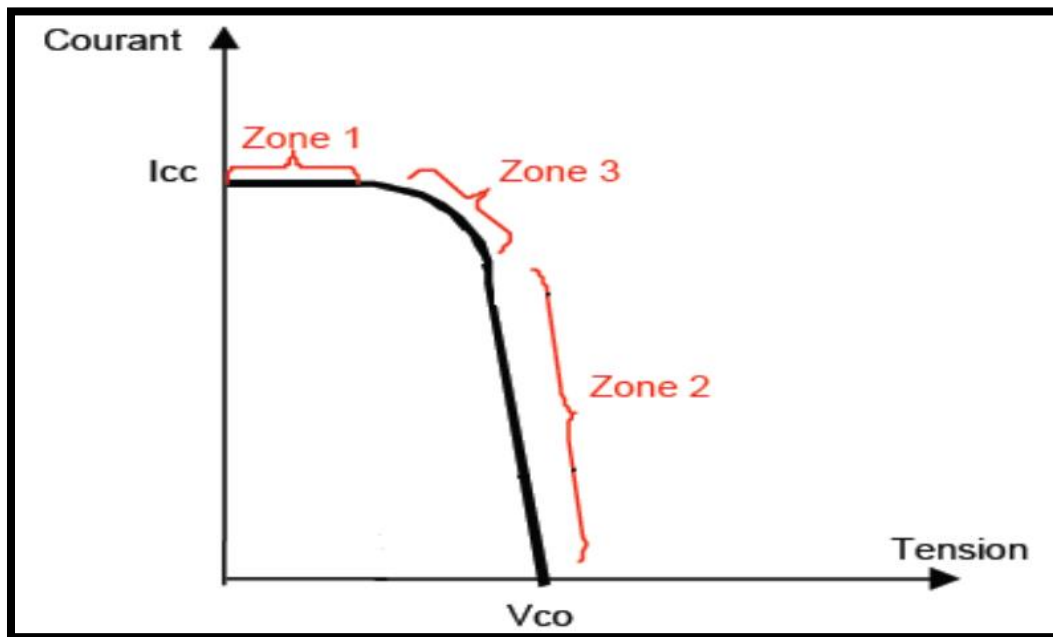
L'EQE est aussi désigné sous le terme d'IPCE (de l'expression anglaise Incident Photon to Current Efficiency). En remplaçant les trois constantes par leur valeur numérique, on obtient :

$$IPCE=1.24*\frac{J_{cc}}{\phi(\lambda)*\lambda} \quad (16)$$

Où  $J_{cc}$  est exprimé en  $A*cm^{-2}$ ,  $\phi(\lambda)$  en  $W*cm^{-2}$  et  $\lambda$ , en  $\mu m$ . [10]

- **Zones de fonctionnement du module photovoltaïque :**

Les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque évoluent selon la température, l'éclairement et, plus généralement, les conditions de fonctionnement lorsqu'il alimente une charge spécifique. Ce paragraphe rappelle brièvement le comportement du générateur soumis à ces différentes contraintes, notions indispensables pour comprendre son fonctionnement et envisager des optimisations.



**Figure I.5:** Les différentes zones de la caractéristique I (V).

La caractéristique électrique globale d'un générateur photovoltaïque, constitué de plusieurs cellules connectées entre elles, présente une forme similaire à celle d'une cellule photovoltaïque unique, à condition que toutes les cellules soient soumises à des conditions d'irradiation et de température homogènes. Cette uniformité est essentielle pour éviter les déséquilibres pouvant compromettre le fonctionnement optimal du générateur.

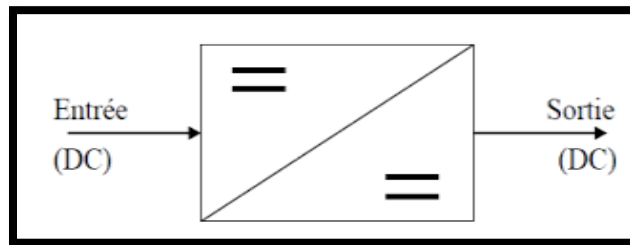
La courbe courant-tension  $I(V)$  d'un générateur photovoltaïque peut être divisée en trois zones distinctes :

1. **Zone 1 :** assimilable à un générateur de courant de valeur  $I_{cc}$ , proportionnelle à l'irradiation, avec une admittance interne modélisable par  $1/R_{sh}$  (résistance de shunt).
2. **Zone 2 :** comparable à un générateur de tension  $V_{oc}$ , avec une impédance interne équivalente à la résistance série  $R_s$ .
3. **Zone 3 :** dans cette région intermédiaire, l'impédance interne du générateur évolue de manière significative, allant de  $R_s$  à  $R_{sh}$ . C'est dans cette zone que se trouve le point de puissance maximale (*Maximum Power Point*, MPP), défini par le couple  $(I_{max}, V_{max})$ . Seule une charge dont la caractéristique passe précisément par ce point permet d'extraire la puissance maximale disponible dans les conditions d'ensoleillement et de température données.

## **I.2. Interface électrique entre le générateur PV et le réseau :**

### **I.2.1. Convertisseurs DC-DC (hacheur) :**

Les hacheurs sont des convertisseurs de type continu-continu (DC-DC) qui permettent de réguler efficacement la puissance électrique dans des circuits en courant continu, avec une grande flexibilité et un rendement élevé. La **Figure I.6** illustre le symbole d'un tel convertisseur.

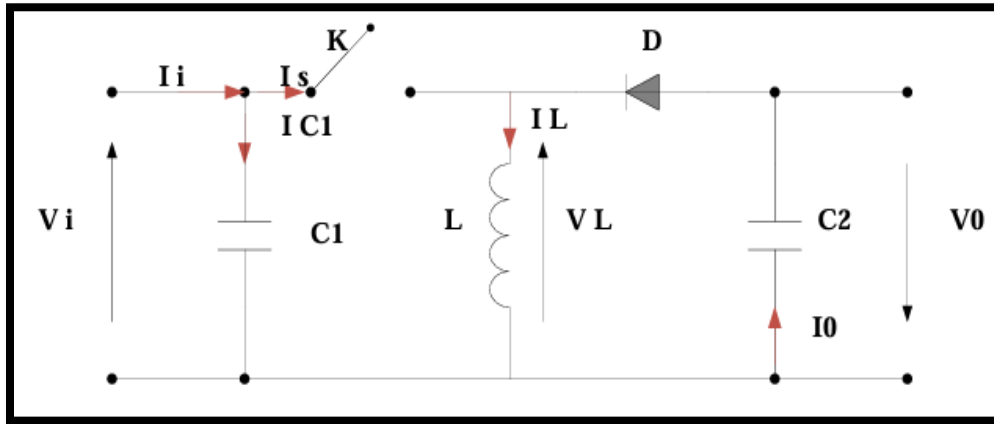


**Figure I.6:** Symbole d'un convertisseur DC-DC.

Un hacheur est généralement constitué de condensateurs, d'inductances et de dispositifs de commutation. Dans le cas idéal, ces composants ne consomment aucune puissance active, ce qui explique les performances énergétiques élevées de ce type de conversion. La technique du découpage a permis de remédier au faible rendement et à l'encombrement important des alimentations linéaires traditionnelles. Dans une alimentation à découpage **Figure I.7**, la tension



d'entrée est interrompue à une fréquence déterminée à l'aide d'un transistor qui alterne entre les états passant et bloqué. Ce processus génère une onde de tension de forme carrée, qui peut ensuite être filtrée pour produire une tension continue.



**Figure I.7:** Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage.

Il existe plusieurs topologies de convertisseurs DC-DC couramment utilisées dans les systèmes photovoltaïques, permettant de générer les tensions et courants requis et d'assurer une adaptation optimale entre les panneaux solaires et les différentes charges. Le principe du convertisseur survolteur, utilisé dans le cadre de ce travail, est présenté ci-après. [11]

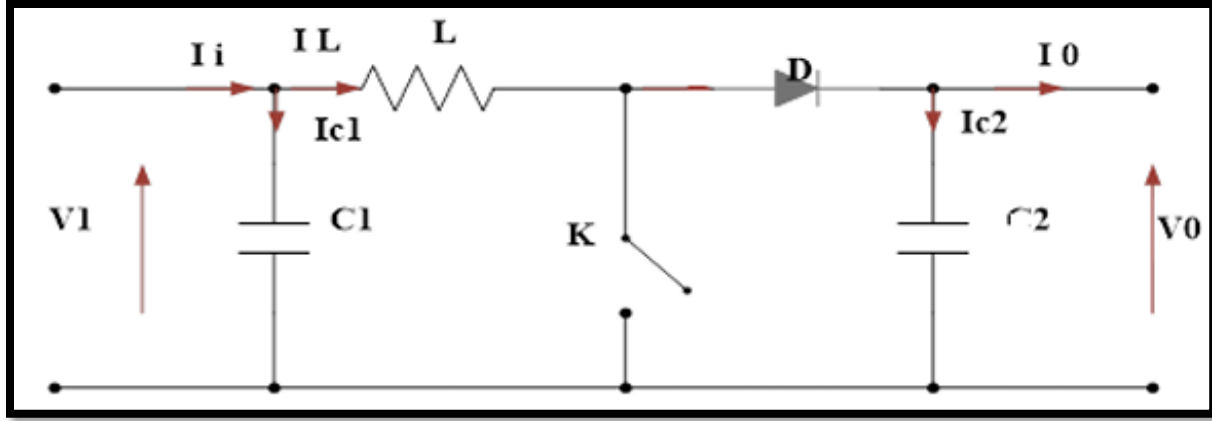
#### **I.2.1.1. Les types des convertisseurs DC-DC :**

Les convertisseurs DC-DC, également appelés hacheurs, sont largement utilisés dans les systèmes d'énergie solaire afin d'adapter la source en courant continu à amplitude variable, telle que le panneau photovoltaïque, à une charge qui nécessite généralement une tension continue constante. Il existe trois configurations de base pour ce type de convertisseur :

- Les élévateurs (BOOST) dans lesquels  $V_s > V_e$ .
- Les abaisseurs (BUCK) dans lesquels  $V_s < V_e$ .
- Il y a aussi un type (BUCK-BOOST), mélange entre les deux précédant s'est le « flyback », car  $V_s$  est inversée par rapport à  $V_e$ . [12]

#### **I.2.1.2. Modélisation de l'hacheur survolteur :**

Le convertisseur survolteur est fréquemment désigné dans la littérature sous les appellations d'hacheur Boost ou hacheur parallèle. La **Figure I.8** illustre ce type de convertisseur. Il est constitué d'une source d'entrée en courant continu, d'une inductance connectée en série avec cette source, et d'une sortie également en courant continu représentée par une charge résistive en parallèle avec un condensateur. Étant donné que le courant reste toujours positif et que les commutations doivent être contrôlées à l'amorçage comme au blocage, l'interrupteur K peut être réalisé à l'aide d'un transistor.



**Figure I.8:** Schéma de principe d'un convertisseur Boost.

Durant l'intervalle de temps  $\alpha T$ , l'interrupteur est fermé, ce qui provoque une augmentation linéaire du courant dans l'inductance. La tension aux bornes de l'interrupteur  $K$  est alors nulle. Ensuite, pendant l'intervalle de temps  $[\alpha T, T]$ , l'interrupteur s'ouvre : l'énergie accumulée dans l'inductance est transférée vers la charge par l'intermédiaire de la diode de roue libre  $D$ , et la tension aux bornes de  $K$  devient égale à  $V_0$ . En imposant que la tension moyenne aux bornes de l'inductance soit nulle sur une période d'échantillonnage, on obtient la relation suivante :

$$V_0(1 - \alpha) = V_i \quad (17)$$

Pour analyser le fonctionnement réel de ce convertisseur, il est nécessaire d'établir son modèle mathématique détaillé. Cela implique la représentation du circuit équivalent pour les deux états du commutateur (fermé et ouvert), et la déduction du modèle reliant les variables d'entrée et de sortie. La **Figure I.9** présente les schémas équivalents du convertisseur survolteur pour les deux phases : interrupteur fermé pendant  $\alpha T_s$ , puis ouvert pendant  $(1-\alpha) T_s$ .

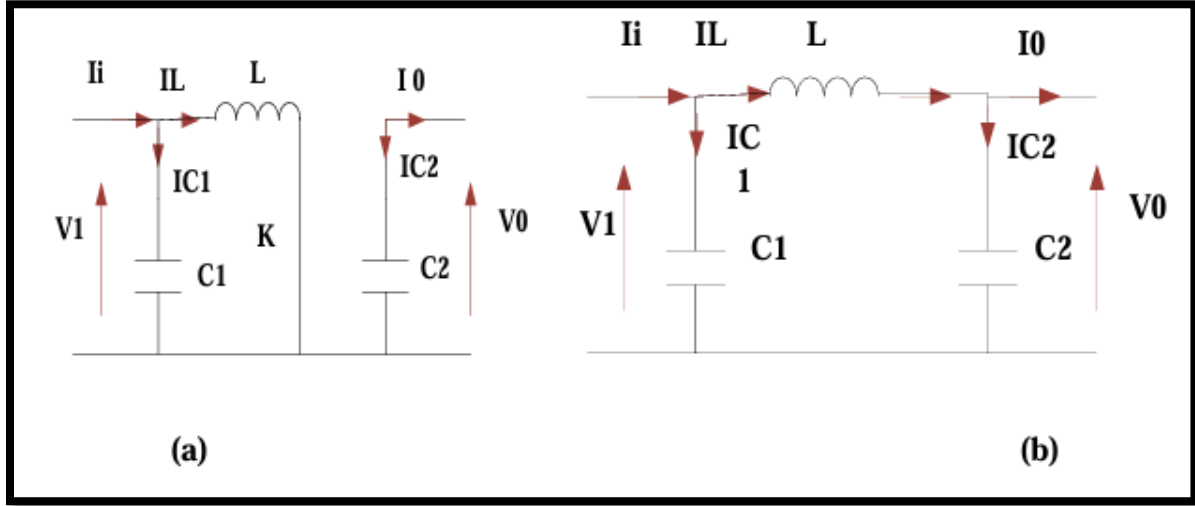
En appliquant les lois de Kirchhoff aux circuits équivalents du convertisseur survolteur durant ses deux phases de fonctionnement, on obtient les systèmes d'équations suivants :

- Pour la première période  $T \in [0, \alpha.T]$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_1(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = +V_i(t) \end{cases} \quad (18)$$

- Pour la deuxième période  $T \in [\alpha.T, T]$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv1(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{diL(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \end{cases} \quad (19)$$



**Figure I.9:** Schémas équivalents de l'hacheur survolteur.

D'où :

(a) : K ouvert.

(b) : K fermé.

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

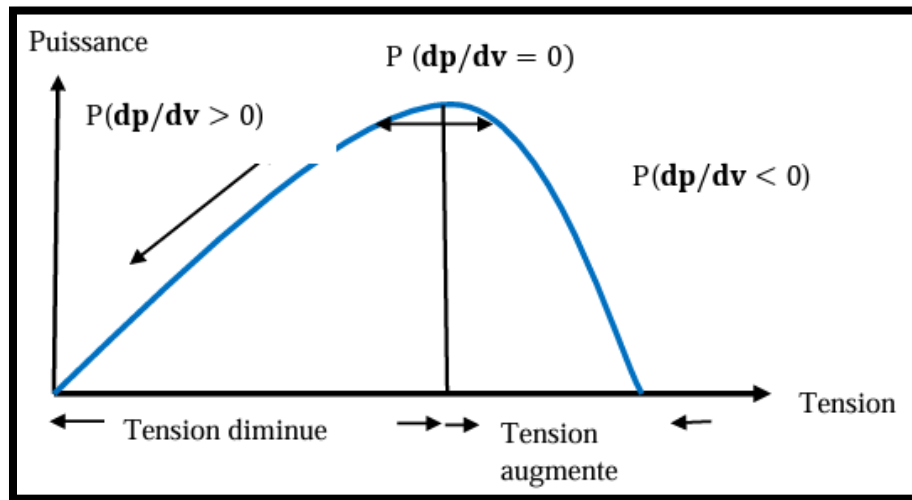
$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T_S = \frac{dx}{dt} d T_S + \frac{dx}{dt(1-d)} (1-d) T_S \quad (20)$$

En appliquant la relation (15) sur les systèmes d'équations (13) et (14), on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur :

$$\begin{cases} i_L = i_i - C_1 \frac{dv1(t)}{dt} \\ i_0 = (1-d)i_L - C_2 \frac{dv0(t)}{dt} \\ V_i = L \frac{diL(t)}{dt} + (1-d)V_0 \end{cases} \quad (21)$$

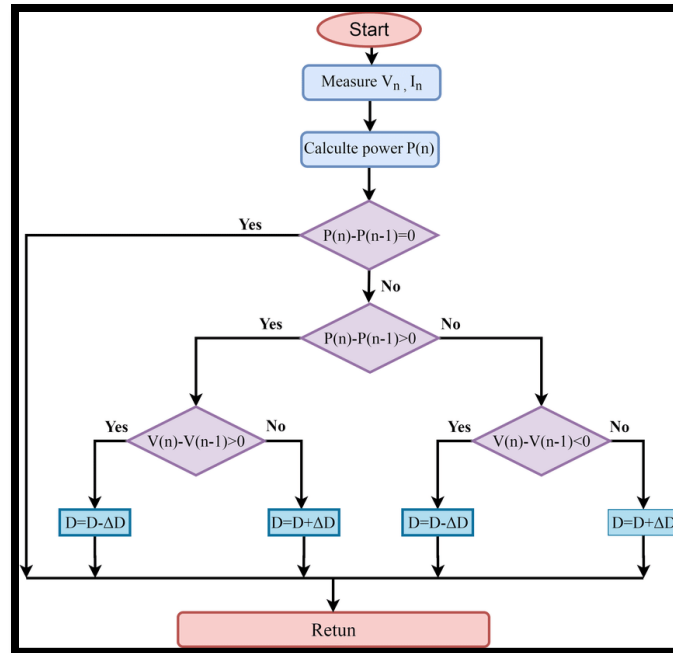
### I.2.1.3. Commande MPPT :

En raison du coût élevé du générateur photovoltaïque, il est indispensable d'en assurer une exploitation optimale et rationnelle afin de garantir un fonctionnement économique et performant. Pour ce faire, il est essentiel de faire fonctionner le générateur PV dans la zone où il délivre sa puissance maximale. Il existe plusieurs méthodes de commande MPPT (Maximum Power Point Tracking). Dans le cadre de cette étude, nous avons retenu l'algorithme de type Perturb and Observe (P&O), une technique largement étudiée dans la littérature scientifique [13]. Comme son nom l'indique, cette approche consiste à perturber le système (en modifiant la tension de référence ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC) puis à observer l'effet de cette perturbation sur la puissance de sortie du générateur. L'objectif est d'ajuster dynamiquement ce rapport cyclique  $D$ , de manière à se rapprocher continuellement du point de puissance maximale [14].



**Figure I.10:** Principe de la commande P&O.

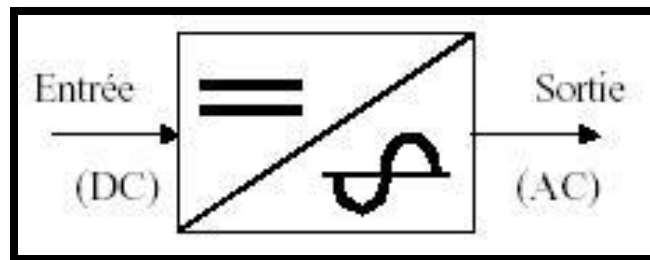
Plus précisément, si la puissance instantanée  $P(k)$  mesurée à un instant donné est supérieure à celle de l'itération précédente  $P(k-1)$ , la perturbation appliquée est maintenue dans la même direction. En revanche, si la puissance diminue, la direction de la perturbation est inversée afin de corriger la trajectoire de fonctionnement. Le logigramme décrivant le fonctionnement de l'algorithme Perturb and Observe (P&O) est présenté à la **Figure I.11** [15].



**Figure I.11:** Algorithme de perturbation et de l'observation (P&O).

## I.2.2. Convertisseurs DC-AC (onduleur) :

L'onduleur, placé généralement à proximité du tableau électrique, transforme le courant continu produit par vos panneaux en courant alternatif pour vous permettre d'alimenter vos différents appareils électriques. Comme cette activité dégage de la chaleur, il vaut mieux le placer dans un endroit frais comme votre garage ou votre cave. L'onduleur est toujours accompagné d'un disjoncteur pour vous protéger contre les risques d'électrocution. [16]



**Figure I.12:** Symbole d'un convertisseur DC-AC.

Dans les systèmes photovoltaïques (PV), les onduleurs jouent un rôle crucial en assurant une connexion efficace avec les modules PV. Ils doivent optimiser le transfert d'énergie, améliorer le rendement global du système par rapport aux méthodes de commande classiques et garantir une bonne qualité de la puissance injectée dans le réseau. Différents types d'onduleurs sont

couramment utilisés dans les installations PV. Parmi ceux-ci, nous présentons le principe de fonctionnement de l'onduleur de tension triphasé, utilisé dans ce travail.

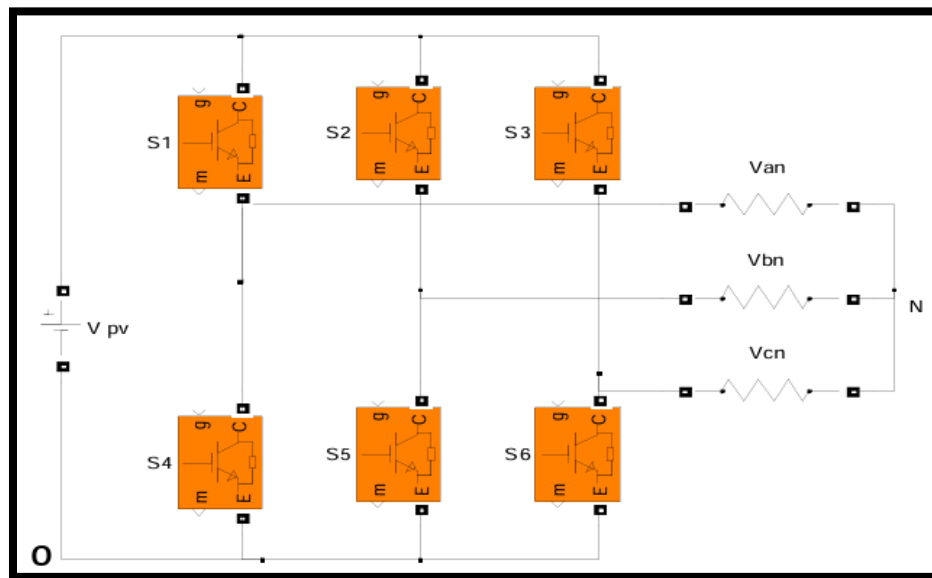
L'onduleur de tension triphasé à deux niveaux est constitué de trois bras, chacun formé de deux interrupteurs électroniques qui composent une cellule de commutation. Le fonctionnement de ces interrupteurs est commandé de manière complémentaire, afin d'éviter toute situation de court-circuit au niveau de la source en courant continu. Chaque interrupteur est bidirectionnel en courant, et est généralement réalisé à l'aide d'un IGBT associé à une diode de roue libre connectée en antiparallèle, ce qui permet une conduction dans les deux sens.

Le schéma de puissance de l'onduleur triphasé à deux niveaux est illustré à la **Figure I.13**.

Dans cette configuration, on distingue plusieurs types de tensions :

- Les tensions de branche  $V_{AO}$ ,  $V_{BO}$ , et  $V_{CO}$ , qui sont mesurées par rapport à la borne négative de la tension continue  $V_{PV}$ ,
- Et les tensions de phase  $V_{AN}$ ,  $V_{BN}$ , et  $V_{CN}$ , mesurées par rapport à un point neutre flottant, issu d'une charge équilibrée connectée en étoile.

À partir de ces tensions de phase, on peut déterminer les tensions composées entre phases :  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$ , et  $V_{CA}$ .



**Figure I.13:** Circuit de puissance d'un onduleur triphasé.

Dans le schéma de puissance illustré à la **Figure I.13**, il convient de souligner que les deux interrupteurs de chaque bras de l'onduleur sont commandés de manière complémentaire, de façon à prévenir tout court-circuit entre les bornes de la source continue. En fonction des états de

conduction de ces interrupteurs, on peut déduire les tensions de branche en sortie de l'onduleur, mesurées par rapport à la borne négative "O" de la source  $V_{DCV\_DC}$ , selon les relations suivantes :

$$\begin{cases} V_{AO} = S1.V_{PV} \\ V_{BO} = S2.V_{PV} \\ V_{CO} = S3.V_{PV} \end{cases} \quad (22) [11]$$

### **I.3. Influence des systèmes photovoltaïques sur le réseau de distribution :**

La filière photovoltaïque bénéficie d'un soutien important des pouvoirs publics, en réponse à plusieurs défis stratégiques : la lutte contre le changement climatique, l'accroissement de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique, ainsi que le développement d'un secteur industriel national. Cette filière se distingue par un ensemble de caractéristiques techniques spécifiques :

- La puissance installée peut varier d'une échelle domestique de quelques kilowatts (kW) à des centrales solaires de plusieurs mégawatts (MW).
- Le nombre de producteurs d'électricité solaire peut devenir très important à terme, notamment avec l'essor de la production décentralisée.
- La plupart des installations sont raccordées au réseau public de distribution en basse tension.
- Les systèmes reposent sur des convertisseurs statiques, sans recours à des machines tournantes.
- Il existe une grande diversité de modules photovoltaïques et d'onduleurs disponibles sur le marché.
- La production reste intermittente, car dépendante des conditions d'ensoleillement.

Traditionnellement, les réseaux de distribution fonctionnaient selon une logique passive, avec des flux de puissance unidirectionnels allant du poste source vers les utilisateurs finaux. Toutefois, l'intégration croissante de la production décentralisée, et en particulier photovoltaïque, bouleverse cette organisation. Désormais, les flux de puissance et les profils de tension sont influencés à la fois par les charges et les sources de production locales.

Ces nouvelles conditions techniques posent des défis d'exploitation pour les gestionnaires de réseau. En effet, le raccordement massif de systèmes photovoltaïques peut entraîner des effets notables sur le comportement du réseau de distribution, notamment :[17]

### **I.3.1. Influence sur le plan de tension :**

Les générateurs photovoltaïques (PV) ont un effet direct sur le profil de tension du réseau ainsi que sur le fonctionnement des équipements de régulation. Les tensions aux différents nœuds du réseau varient en fonction des injections de puissance active et réactive. Ce phénomène est particulièrement critique lors de périodes de fort ensoleillement couplées à une faible demande locale : dans de telles conditions, la tension peut excéder les seuils admissibles, en particulier dans les sections terminales du réseau, mettant en difficulté la stabilité et la qualité de service.

Une étude menée par l'Université d'Agriculture et de Technologie de Tokyo illustre bien ce phénomène : dans la localité d'Ota City, qui regroupe environ 550 installations photovoltaïques, l'injection d'énergie électrique sur le réseau entraîne une élévation de la tension, pouvant aller jusqu'au seuil de découplage automatique de certains systèmes, en particulier les week-ends, où la consommation est généralement plus faible [18]. Ainsi, l'augmentation de la tension provoquée par l'injection d'énergie photovoltaïque peut entraîner le découplage de dispositifs de protection ou de conversion [19].

### **I.3.2. Influence sur la qualité de l'énergie :**

#### **I.3.2.1 Injection d'harmoniques de courant :**

Les interfaces électroniques de puissance, notamment les onduleurs, peuvent introduire des harmoniques de découpage dans le réseau électrique si elles ne sont pas équipées de filtres adaptés et performants. En pratique, même les onduleurs de génération récente contribuent à l'amplification des harmoniques de courant, particulièrement lorsqu'ils fonctionnent à charge partielle. En effet, un dispositif opérant à puissance réduite ne peut garantir une qualité de courant équivalente à celle obtenue à puissance nominale, ce qui se traduit par une augmentation du taux de distorsion harmonique (THD). Ces distorsions peuvent affecter immédiatement certains équipements électroniques, entraînant des dysfonctionnements tels que des erreurs de synchronisation ou de commutation, des déclenchements intempestifs des disjoncteurs, ou encore des inexactitudes dans la mesure d'énergie sur les compteurs. [20]

#### **I.3.2.2 Injection de courant continu au réseau :**

Une étude menée en Espagne a examiné le phénomène d'injection de courant continu par une douzaine d'onduleurs commercialisés en Europe, en comparant les modèles équipés de transformateurs à haute fréquence (HF), ceux à basse fréquence (BF) et les onduleurs sans transformateur. Les résultats ont montré que tous les types étudiés introduisent une composante continue dans le réseau, y compris ceux dotés de transformateurs BF, bien que dans ce dernier cas,



l'amplitude de l'injection soit sensiblement plus faible. Dans le cadre du projet **DISPOWER**, des essais en laboratoire ont été réalisés sur 12 onduleurs utilisant la modulation de largeur d'impulsion (MLI ou PWM), de puissance comprise entre 0,2 et 4 kW. Les mesures ont révélé que, même en présence d'harmoniques paires de forte amplitude, la composante DC injectée restait toujours inférieure à 600 mA, et dans 8 cas sur 12, elle ne dépassait pas 100 mA. Les auteurs soulignent également l'hétérogénéité des normes en vigueur sur ce sujet et l'urgence d'une harmonisation réglementaire. [21]

### **I.3.3. Déséquilibre entre phases :**

L'intégration des systèmes photovoltaïques (PV) peut provoquer un déséquilibre entre les phases, notamment lorsque des onduleurs monophasés sont utilisés. Si la production d'énergie n'est pas correctement répartie entre les trois phases d'un système PV triphasé, cela engendre une dissymétrie sur le réseau basse tension (BT). Plusieurs études ont confirmé ce déséquilibre, qui détériore la qualité globale du service électrique fourni. [20]

### **I.3.4. Influence sur le plan de protection :**

Bien que l'injection de courant issue des systèmes photovoltaïques (PV) ait généralement un impact limité sur le courant de défaut dans les réseaux de distribution, leur présence peut néanmoins perturber la coordination des dispositifs de protection. Plus précisément, l'intégration de la production décentralisée peut altérer la sensibilité et la sélectivité des protections, deux paramètres essentiels au fonctionnement fiable du réseau.

Ce déséquilibre peut se traduire par Des déclenchements intempestifs de protections sur des départs en bon état (fausses coupures), Ou à l'inverse, une absence de déclenchement en cas de défaut réel sur un départ donné, phénomène connu sous le nom d'aveuglement de la protection.

Ces dysfonctionnements compromettent la fiabilité de l'exploitation et exigent une reconfiguration des schémas de protection, tenant compte des nouvelles sources de production décentralisée.[22]

### **I.3.5. Influence sur les pertes dans les réseaux de distribution :**

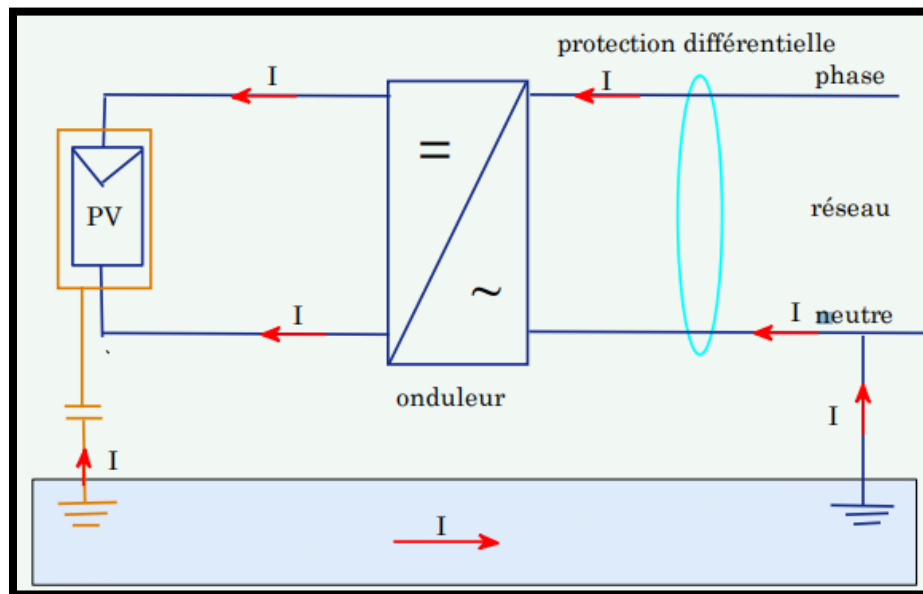
Des recherches indiquent que les centrales photovoltaïques de grande puissance (plusieurs MW), souvent raccordées à des départs haute tension A (HTA) dédiés, tendent à accroître les pertes dans le réseau. À l'inverse, les installations photovoltaïques résidentielles, situées à proximité des points de consommation, permettent généralement une diminution de ces pertes. [23]

## **I.4. Influence du réseau de distribution sur le fonctionnement des installations photovoltaïques :**

Le comportement, les caractéristiques et les perturbations des réseaux de distribution ont une incidence directe sur le bon fonctionnement des systèmes PV. Ces perturbations peuvent être liées à la nature intrinsèque du réseau, à la dégradation de la qualité de tension causée par d'autres utilisateurs, ou à une combinaison de ces facteurs. Ces effets peuvent entraîner des coupures injustifiées des onduleurs. [24]

### **I.4.1. Régime de neutre et courants de fuite :**

Dans les réseaux basse tension, le régime de neutre le plus couramment utilisé est le régime TT, où le point neutre du transformateur de distribution est relié à la terre, de même que les masses métalliques des appareils. Dans ce cadre, la protection des personnes repose sur des dispositifs différentiels (disjoncteurs ou interrupteurs différentiels), conçus pour interrompre le circuit en cas de fuite de courant. Or, dans une installation photovoltaïque, des courants de fuite peuvent apparaître en raison des propriétés capacitatives des modules PV, des structures mécaniques de support, ainsi que des onduleurs, notamment à travers les capacités des filtres CEM. L'association de ces capacités avec une composante alternative présente dans le circuit continu (DC) génère des courants de fuite vers la terre, tant du côté AC que DC, désignés sous le nom de courants de décharge capacitifs. Ce phénomène est particulièrement marqué pour certaines architectures d'onduleurs dépourvus de transformateur. [21]



**Figure I.14:** Schéma simplifié du courant de fuite via les capacités des panneaux PV, la Terre et l'onduleur. [24]

Les courants de fuite générés dans une installation photovoltaïque peuvent atteindre des niveaux significatifs, ce qui les rend potentiellement dangereux en cas de contact direct avec les personnes. Cependant, leur première conséquence est souvent le déclenchement intempestif des disjoncteurs différentiels, qui sont désormais obligatoires en France. En effet, conformément à la norme C15-100 et au guide UTE C15-712, régissant les composants des installations photovoltaïques, une protection différentielle doit être installée en tête d'installation. Dans les logements d'habitation, cette exigence est renforcée par l'obligation d'utiliser des disjoncteurs différentiels à haute sensibilité, limités à un courant de défaut de 30 mA. Cette valeur pourrait même être abaissée à 10 mA dans un futur proche, ce qui accentuerait davantage la sensibilité aux courants de fuite.

Il convient de souligner que ce problème ne se pose pas dans certains pays étrangers. Par exemple, en Espagne, les onduleurs sans transformateur sont proscrits, tandis qu'en Allemagne, la protection des personnes repose sur des fusibles et non sur des dispositifs différentiels, en raison de l'usage d'un régime de neutre TN au lieu du régime TT appliqué en France. Les essais expérimentaux menés dans le cadre du projet DISPOWER ont mis en évidence que l'amplitude des courants de fuite dépend principalement de la topologie des onduleurs. En revanche, aucun lien direct n'a été établi avec les conditions météorologiques pendant les deux mois de tests. Les auteurs soulignent toutefois que l'humidité ambiante pourrait, sur le long terme, augmenter la capacité parasite entre les modules photovoltaïques et la terre.[21]

Dans le cadre du projet ESPRIT, des simulations théoriques ont mis en évidence que le courant de décharge capacitif dépend de plusieurs facteurs, notamment :

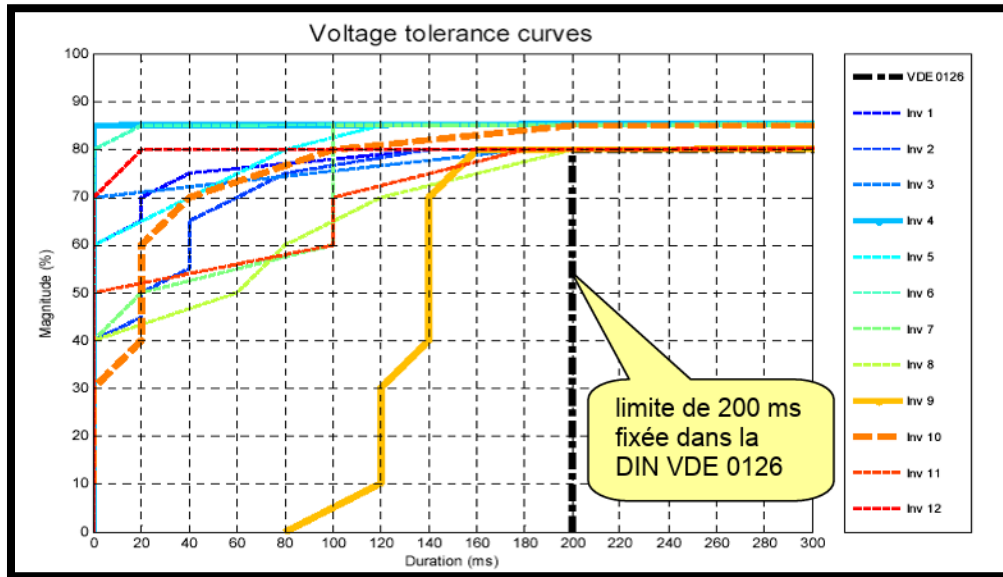
- La technologie employée pour les modules photovoltaïques, ainsi que leur surface active.
- **Le type d'onduleur** : les onduleurs intégrant un transformateur d'isolement génèrent des courants de fuite négligeables, alors que certaines configurations sans transformateur peuvent produire des courants de plusieurs centaines de milliamperes.
- La résistance équivalente de mise à la terre, qui est elle-même variable en fonction du taux d'humidité. Cette résistance peut chuter à des valeurs très faibles, provoquant ainsi des déclenchements intempestifs des dispositifs différentiels de protection.

#### **I.4.2. Creux de tension et tenue des systèmes PV :**

Dans le cadre du projet européen DISPOWER, des essais ont été réalisés sur 12 onduleurs photovoltaïques conformes à la norme DIN VDE 0126, également connue sous le nom de VDE AR-N 4105, qui régit les installations de production d'énergie issues de sources renouvelables. L'objectif était d'évaluer leur sensibilité aux creux de tension. La figure I.15 illustre les résultats, en représentant la profondeur du creux en ordonnée et sa durée en abscisse. Un repère vertical

pointillé à 200 ms indique la limite maximale imposée par la norme pour le découplage de l'onduleur si la tension chute à 80 % de la tension nominale  $U_n$ .

Tous les onduleurs testés ont respecté ce critère de découplage pour  $U = 80 \% U_n$ , et ce, en moins de 200 ms. Cependant, plusieurs se déconnectent déjà pour  $U = 85 \% U_n$ , avec des temps bien inférieurs à 200 ms, ce qui témoigne d'une sensibilité élevée de ces onduleurs aux creux de tension.



**Figure I.15:** Courbes de tolérance en tension des onduleurs.

Ce résultat signifie que, lors d'un creux de tension causé par un court-circuit sur le réseau HTB, la majorité des installations photovoltaïques exposées à cette chute se déconnecteront presque instantanément. Si la puissance cumulée de ces installations est significative par rapport à la charge totale de la zone affectée, cela peut entraîner une perte importante de production, provoquant un déséquilibre critique entre production et consommation. Ce type de situation a déjà contribué à des incidents, comme celui de novembre 2006, où des déconnexions massives d'éoliennes ont aggravé une baisse de fréquence sur le réseau UCTE. Dans le pire des cas, un tel déséquilibre peut conduire à un incident généralisé, voire à un black-out. Pour éviter cela, il devient impératif de renforcer la résilience des systèmes PV face aux creux de tension.

### **I.4.3. Présence de composante continue et d'harmoniques de tension**

⋮

Dans les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau, les onduleurs assurent la conversion du courant continu (DC) généré par les modules en courant alternatif (AC) via des techniques de modulation de largeur d'impulsion (MLI). Cependant, leur qualité de fonctionnement peut être compromise par des déséquilibres de tension sur le réseau électrique, notamment en présence de déformations de la sinusoïde induites par des harmoniques d'ordre pair, souvent générées par des charges non linéaires. Cette déformation peut provoquer l'injection involontaire d'une composante

continue dans la tension délivrée par l'onduleur, un phénomène particulièrement fréquent dans les architectures sans transformateur d'isolement, où la séparation galvanique avec le réseau est absente. [25]

#### **I.4.4. Inter harmoniques :**

Les inter-harmoniques sont des composantes de fréquence non multiples entiers de la fréquence fondamentale (50 Hz ou 60 Hz selon les régions), et peuvent apparaître dans le réseau à la suite de variations rapides de charge, ou encore en raison de la saturation magnétique des transformateurs. Les mesures expérimentales effectuées dans le cadre du projet DISPOWER, menées sur un échantillon de douze onduleurs photovoltaïques, ont révélé que ces inter-harmoniques peuvent provoquer des perturbations significatives sur les systèmes de détection de fréquence et d'évaluation d'impédance du réseau, compromettant la stabilité du contrôle réseau.[26]

### **CONCLUSION :**

Les systèmes photovoltaïques représentent une solution stratégique et durable pour la production d'énergie à partir de sources renouvelables. Toutefois, leur intégration harmonieuse dans les infrastructures électriques actuelles impose une prise en compte rigoureuse des contraintes techniques et des effets sur la qualité de l'énergie délivrée. Les dispositifs de conversion statique, tels que les convertisseurs DC-DC et DC-AC (onduleurs), sont des éléments clés pour maximiser la puissance extraite des modules solaires et assurer sa compatibilité avec les exigences du réseau électrique. Néanmoins, plusieurs problématiques demeurent, notamment la gestion des courants de fuite, des chutes de tension temporaires, ainsi que l'injection de composantes continues et harmoniques, susceptibles de perturber la stabilité dynamique du réseau.

Les analyses développées dans ce chapitre soulignent la nécessité de concevoir des architectures photovoltaïques robustes, capables de résister aux perturbations externes tout en garantissant une qualité de service optimale. Cela passe par l'intégration de protections sélectives, telles que les disjoncteurs différentiels ou les filtres actifs/passifs, afin d'assurer la sécurité des personnes et des équipements, et de préserver la fiabilité de l'alimentation.

Par ailleurs, une maîtrise approfondie des interactions entre générateurs photovoltaïques et réseaux de distribution constitue une condition essentielle pour une exploitation optimisée. Elle permet notamment d'ajuster les stratégies de commande et de renforcer la stabilité locale tout en maximisant le taux de pénétration des énergies renouvelables dans le mix énergétique.

Enfin, l'évolution continue des technologies de conversion, couplée à la normalisation des pratiques de raccordement, constitue un levier déterminant pour favoriser l'intégration massive du photovoltaïque. Ces avancées contribueront non seulement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, mais également au renforcement de la résilience et de la flexibilité des réseaux électriques face aux enjeux futurs de la transition énergétique.

## **Chapitre 2 :**

# ETUDE DES STRUCTURES D'ONDULEURS MULTINIVEAUX

## **INTRODUCTION :**

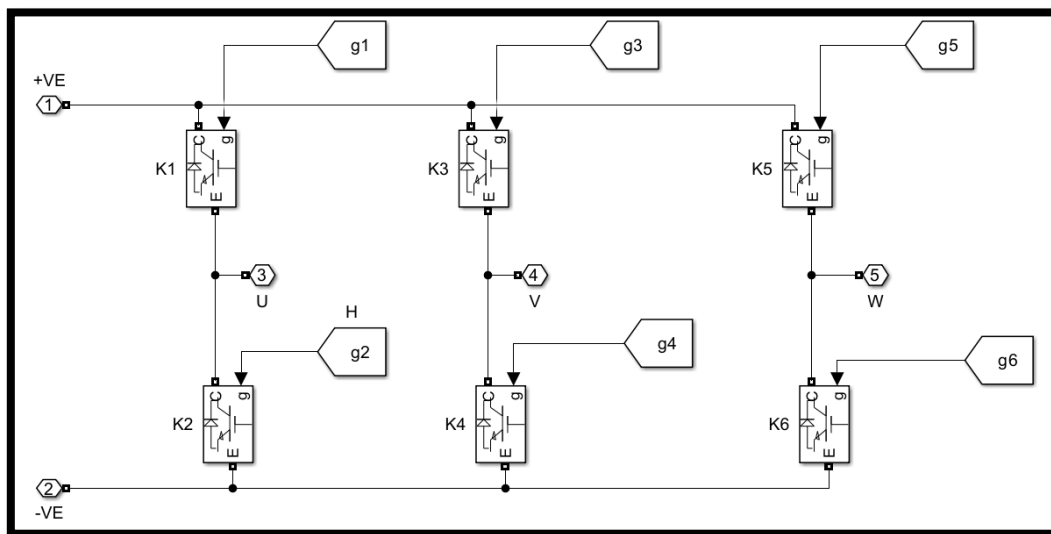
Les onduleurs multiniveaux jouent un rôle essentiel dans la conversion de l'énergie, en particulier pour les applications nécessitant une tension et une puissance élevées. Contrairement aux structures conventionnelles, ces onduleurs permettent de générer une tension de sortie plus proche d'une onde sinusoïdale, réduisant ainsi la distorsion harmonique et améliorant le rendement énergétique. Leur conception avancée leur confère des avantages considérables en matière d'efficacité, de réduction des contraintes sur les composants et de compatibilité avec les réseaux électriques modernes.

Grâce à ces caractéristiques, les onduleurs multiniveaux sont largement adoptés dans divers domaines tels que les systèmes photovoltaïques connectés au réseau, les entraînements industriels haute puissance, la traction électrique, ainsi que les réseaux intelligents. Cependant, leur mise en œuvre reste complexe en raison du nombre élevé de composants, des stratégies de commande sophistiquées et de la gestion des déséquilibres de tension.

Ce chapitre explore les principales topologies d'onduleurs multiniveaux. Nous analyserons le fonctionnement et la méthode de commande de chaque structure, les composants et la complexité de leur commande.

### **II.1. Généralité sur les onduleurs :**

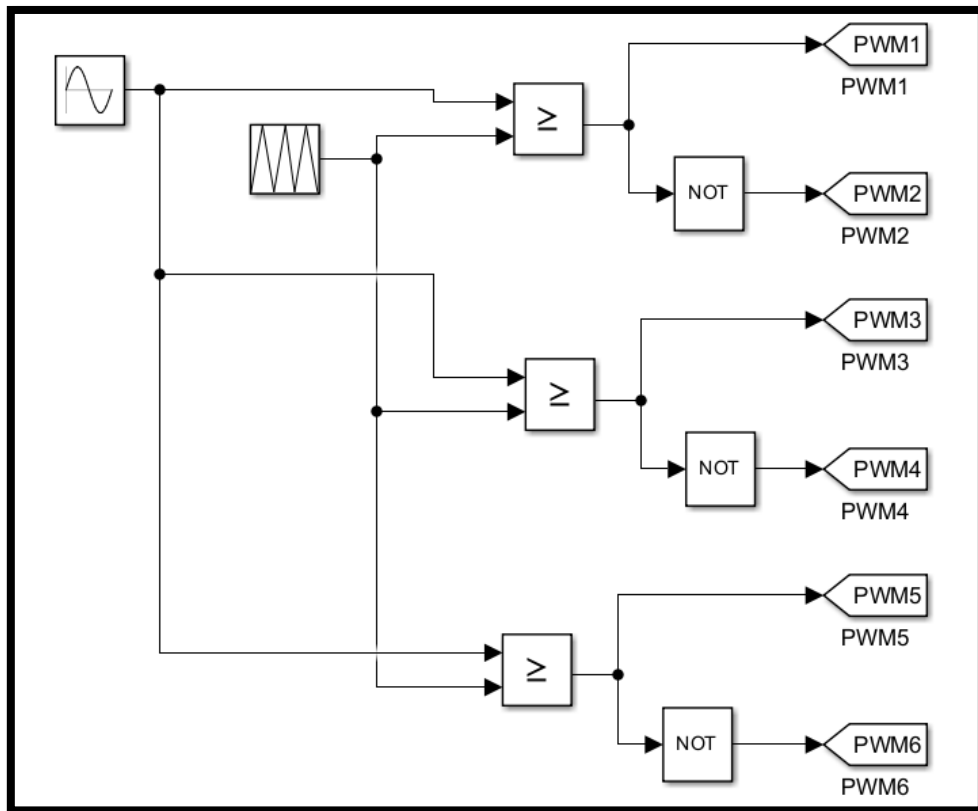
Un onduleur triphasé est un convertisseur statique chargé de transformer une source de courant continu en courant alternatif, en agissant sur les dispositifs semi-conducteurs via une commande adaptée. Cette conversion permet d'obtenir en sortie une tension alternative présentant une valeur moyenne nulle. L'objectif principal de cet onduleur est de générer une tension triphasée dont l'amplitude, la phase et la fréquence peuvent être pilotées et ajustées selon les besoins du système. [27]



**Figure II.1 :** Schéma d'un onduleur triphasé.

Dans le fonctionnement d'un onduleur, les composants électriques jouent un rôle fondamental pour assurer une conversion d'énergie fiable et performante. Parmi ces éléments, on retrouve les transistors, les diodes, les condensateurs et les inductances (bobines), chacun intervenant à des étapes spécifiques du processus de conversion. Les transistors assurent la commutation entre les différentes sources d'énergie, tandis que les diodes participent à la redressement du courant alternatif en courant continu. Les condensateurs et les inductances, quant à eux, ont pour fonction de filtrer et stabiliser le courant ainsi que de réguler la tension. Ensemble, ces composants fonctionnent de manière complémentaire afin de garantir un flux énergétique stable et continu, assurant ainsi à l'onduleur sa capacité à fournir de l'électricité de secours en cas d'interruption de l'alimentation principale. [28]

Pour le pilotage d'un onduleur triphasé, plusieurs stratégies de commande peuvent être mises en œuvre, telles que la commande décalée, la commande à hystérésis, la commande en pleine onde, ou encore la commande par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI ou PWM). La **Figure II.2** illustre le principe de la commande MLI appliquée à un onduleur triphasé.



**Figure II.2 :** Commande MLI d'un onduleur triphasé.

- Mais la tension de sortie de l'onduleur triphasé classique est une onde carrée, générant une distorsion harmonique **THD** importante. Cela nécessite des filtres supplémentaires pour réduire les interférences électromagnétiques et protéger les équipements sensibles ce qui augmentera le coût du système. C'est ici que nous trouvons les avantages de l'onduleurs multiniveaux.

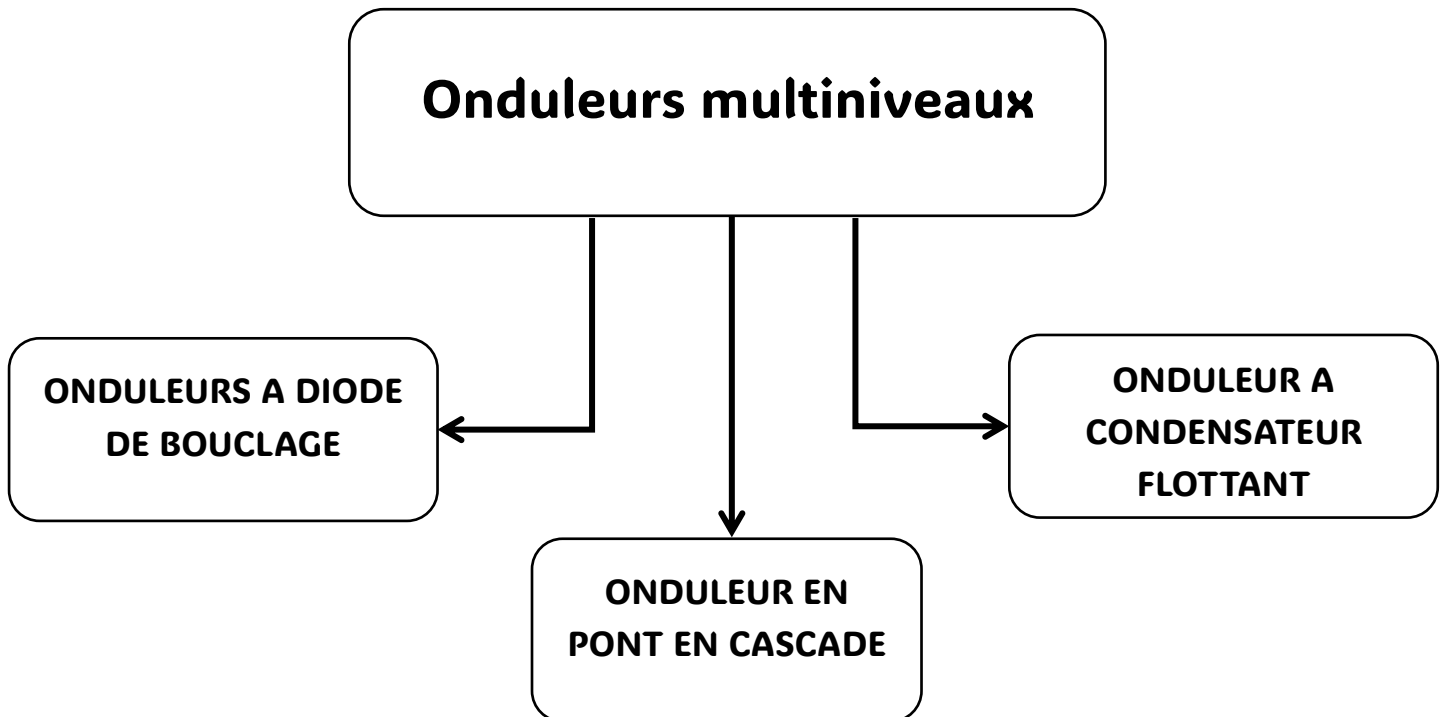


## **II.2. Classification des onduleurs multi-niveaux :**

Un onduleur multiniveau est capable de commuter chaque entrée ou sortie entre au moins trois niveaux de tension. Ces dernières années, l'apparition de nouveaux composants de puissance pouvant être commandés aussi bien à l'ouverture qu'à la fermeture a permis de concevoir des convertisseurs plus fiables, plus rapides et plus performants.

Un onduleur de tension multiniveaux se caractérise par une structure à trois niveaux ou plus. Grâce à cette architecture, les onduleurs à trois niveaux sont réversibles : ils peuvent fonctionner comme onduleurs, transférant l'énergie d'une source de tension continue vers une charge en courant alternatif, ou comme redresseurs, assurant le transfert d'énergie en sens inverse. [29]

Les onduleurs multiniveaux se déclinent principalement en trois topologies, illustrées dans la figure suivante :



**Figure II.3 :** les principales topologies des onduleurs multiniveaux.

**ONDULEUR A DIODE DE BOUCLAGE :** Aussi appelé Neutral Point Clamped (NPC), cet onduleur a été proposé initialement par Baker. Il se distingue par sa capacité à générer une tension de sortie avec un nombre impair de niveaux. Le tout premier modèle d'onduleur NPC visait à produire une tension à trois niveaux en empilant deux interrupteurs de base, chacun étant associé à une source de tension continue indépendante. À partir de cette invention initiale, plusieurs chercheurs ont proposé des variantes structurales en s'appuyant sur le principe fondamental de la topologie NPC. [30]

**ONDULEUR EN PONT CASCADE :** Proposé en 1975, ce type de convertisseur multiniveaux repose sur la mise en série de plusieurs structures monophasées à deux niveaux, chacune alimentée par sa propre source de tension continue. Dans cette configuration, chaque phase est pilotée par un pont en H et couplée à un transformateur à travers des bobines d'interphase, lesquelles sont formées à partir d'enroulements de transformateurs présentant des rapports de transformation distincts. Cette topologie présente l'avantage notable de fonctionner avec une seule source de tension continue globale, tout en étant adaptée aux applications à fort courant, notamment grâce à l'intégration des bobines d'interphase. Cependant, la tension et le courant tolérés par les transistors demeurent restreints. [31]

**ONDULEUR A CONDENSATEUR FLOTTANT :** Proposée par T. Meynard et H. Foch en 1992, cette topologie multiniveaux présente une structure similaire à celle de l'onduleur à diode de clamping, mais remplace les diodes de blocage par des condensateurs, d'où son nom d'Onduleur à Condensateurs Flottants. Cette conception vise à résoudre deux problèmes majeurs : le balancement des tensions et la réduction du nombre excessif de diodes nécessaires dans la structure classique. [31]

## **II.3. Description détaillée de chaque structure :**

### **II.3.1 onduleur a diode de clamping :**

Le convertisseur multiniveaux à diodes de clamping, également connu sous le nom de Neutral Point Clamped (NPC), est l'une des topologies les plus répandues dans les systèmes de conversion de puissance moyenne et haute tension. Introduit en 1981 par Nabae, Takahashi et Akagi [32], cet onduleur offre une solution efficace pour produire des tensions alternatives à plusieurs niveaux, à partir d'une source continue unique, tout en réduisant les contraintes sur les composants de commutation.

#### **II.3.1.1 topologie de l'onduleur NPC :**

Parmi les différentes structures d'onduleurs multiniveaux, on retrouve l'onduleur à diodes de clamping de type NPC, illustré dans la **Figure II.4**. Pour ce type d'architecture, le nombre total de niveaux de tension en sortie, noté  $N$ , est défini par la relation  $N = \frac{m}{2} + 1$ .

Où  $m$  représente le nombre total d'interrupteurs utilisés par phase.

Le schéma d'un onduleur NPC à trois niveaux est présenté dans la **Figure II.4**. Son alimentation en courant continu repose sur deux condensateurs montés en série (**C1 et C2**), générant un point médian. Ce point milieu joue un rôle essentiel en fournissant un palier de tension supplémentaire par rapport à une structure classique à deux niveaux, ce qui permet de créer un niveau intermédiaire. Grâce à cela, l'onduleur est capable de délivrer trois niveaux distincts de tension à la sortie. L'intérêt fondamental de cette topologie réside dans l'amélioration de la

qualité du signal en sortie : elle permet de diminuer significativement les harmoniques et de réduire les efforts électriques supportés par les composants de commutation.

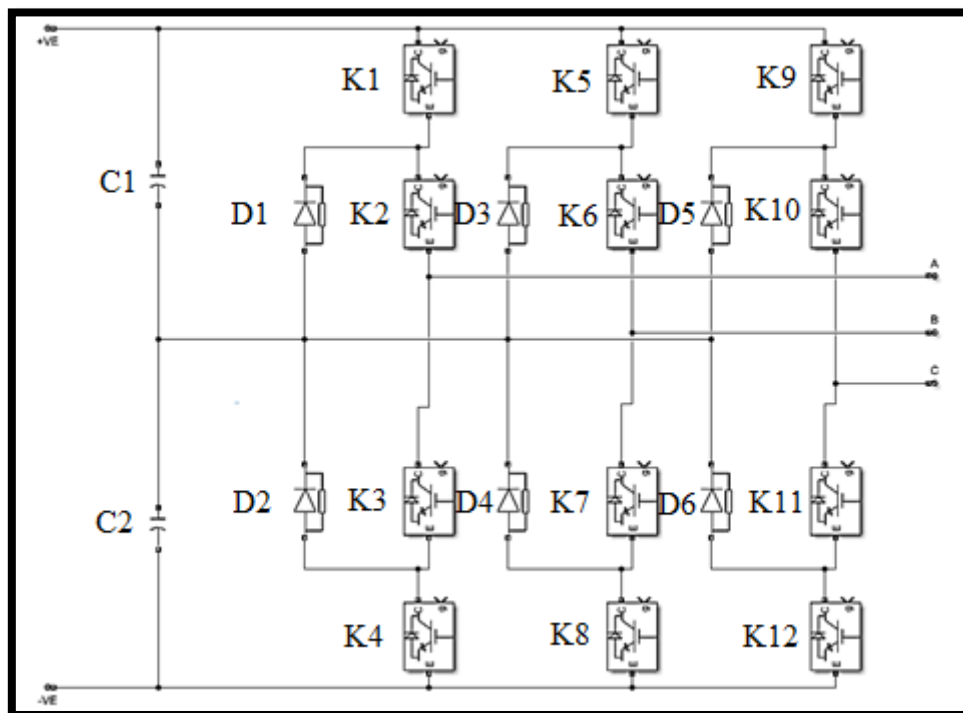
Chaque phase (A, B et C) de l'onduleur comporte quatre interrupteurs commandés (K1, K2, K3 et K4 pour la phase A), ainsi que deux diodes de maintien reliées au point milieu du bus continu, comme présenté à la **Figure II.5**. Les interrupteurs commandés sont conçus pour être unidirectionnels en tension mais bidirectionnels en courant, ce qui correspond à une association d'un transistor et d'une diode en antiparallèle. [33]

Parmi les 16 configurations possibles d'ouverture et de fermeture des interrupteurs K1, K2, K3 et K4 ( $2^4=16$ ), seules trois configurations sont exploitées en fonctionnement normal. Les autres configurations sont à proscrire, car elles entraînent soit des courts-circuits au niveau des sources de tension continue, soit la déconnexion de la charge.

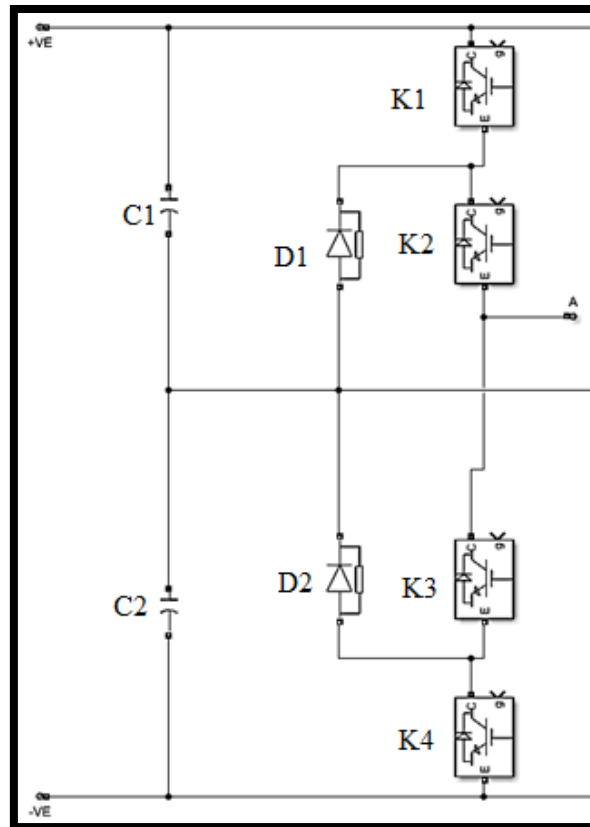
Ce tableau nous montre les trois configurations possibles :

Etat des interrupteurs				Tension de sortie
K1	K2	K3	K4	
1	1	0	0	$E/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-E/2$

**Tableau II.1 :** Tableau des configurations possible de commutation des interrupteurs d'un onduleur NPC a trois niveaux.



**Figure II.4 :** la Structure triphasé d'un onduleur NPC à trois niveaux.



**Figure II.5 :** Schéma d'un seul bras d'un onduleur NPC à trois niveaux.

### **II.3.1.2 Les avantages de la topologie NPC :**

La structure NPC présente de nombreux atouts comparativement à celle d'un onduleur bipolaire classique à deux niveaux:

- Les composants semi-conducteurs de puissance ne sont soumis qu'à une tension inverse équivalente à la moitié de la tension fournie par la source continue.
- Le bus continu est commun à l'ensemble des phases, ce qui simplifie l'architecture d'alimentation.
- La stratégie de commande reste relativement aisée à implémenter.
- La qualité spectrale de la tension de sortie est significativement améliorée, ce qui permet de réduire la taille des filtres passifs nécessaires.
- Moins de pertes de commutation qu'un onduleur deux niveaux.
- Faible THD donc meilleure qualité de forme d'onde.
- Compatibilité avec les applications moyenne/haute tension permet d'utiliser des composants de tension plus faible.[34]

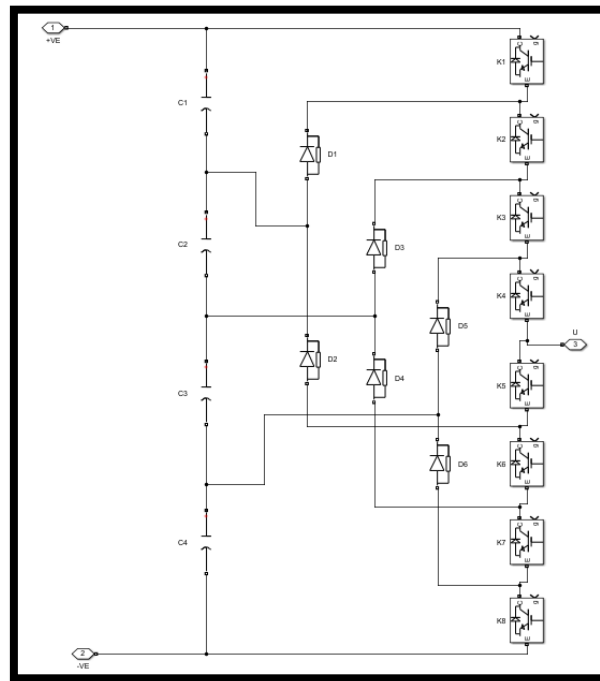
### II.3.1.3 Les inconvénients de la topologie NPC :

- Commande plus complexe, nécessitant une synchronisation précise.
- Équilibrage de tension entre les condensateurs délicat.
- Nombre élevé de composants : augmentation des coûts et de l'encombrement.
- Sensibilité aux déséquilibres dynamiques, pouvant générer des distorsions.

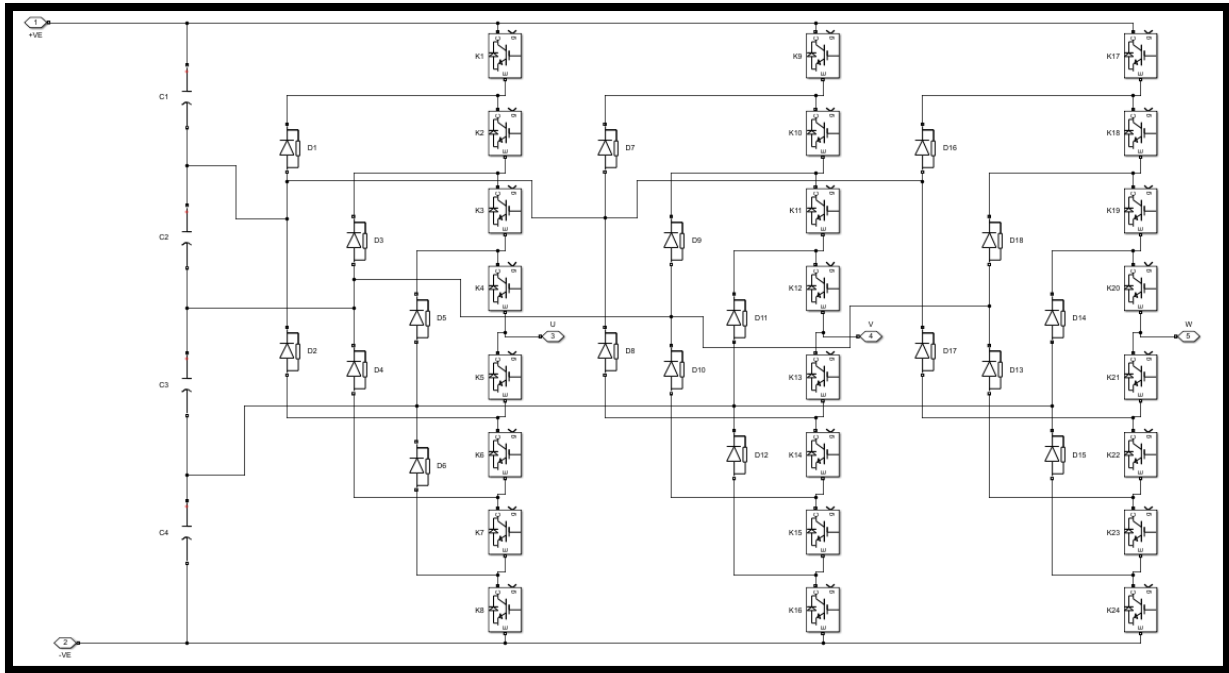
La structure NPC peut être étendue à cinq niveaux ou davantage en ajoutant des paires supplémentaires d'interrupteurs et de diodes. L'onduleur triphasé à cinq niveaux basé sur la topologie NPC comprend trois bras symétriques, chacun constitué de huit interrupteurs montés en série. Chaque interrupteur est formé d'un semi-conducteur bicommandable de type IGBT associé à une diode en antiparallèle.

La source de tension continue est composée de quatre groupes de condensateurs, correspondant à (N-1) niveaux, qui constituent le bus continu. Dans ce mode de fonctionnement, chaque semi-conducteur supporte une tension d'ouverture correspondant à un quart de la tension totale de la source continue, ce qui rend cette architecture particulièrement adaptée aux applications haute tension. Les tensions aux bornes de chaque condensateur sont égales à  $V_E/(N-1)$ .

Chaque paire d'interrupteurs, par exemple (K1, K5), forme une cellule de commutation dont les deux composants sont commandés de manière complémentaire. La **Figure II.6** illustre schématiquement un bras de cet onduleur, tandis que la **Figure II.7** présente la structure triphasée complète d'un onduleur à cinq niveaux. [35]



**Figure II.6 :** Schéma d'un seul bras d'un onduleur NPC à cinq niveaux.



**Figure II.7 :** La Structure triphasé d'un onduleur NPC à cinq niveaux.

Une analyse topologique d'un bras met en évidence cinq configurations possibles permettant de déterminer les séquences de fonctionnement de l'onduleur. Cela implique, dans un premier temps, la définition des différents états que peut prendre la tension simple. Seuls les cinq états suivants sont envisageables [35] :

Etat des interrupteurs								Etat des interrupteurs
K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	
1	1	1	1	0	0	0	0	$+V_{dc}/2$
0	1	1	1	1	0	0	0	$+V_{dc}/4$
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	$-V_{dc}/4$
0	0	0	0	1	1	1	1	$-V_{dc}/2$

**Tableau II.2 :** Les commutations possibles des interrupteurs d'un onduleur NPC a cinq niveaux.

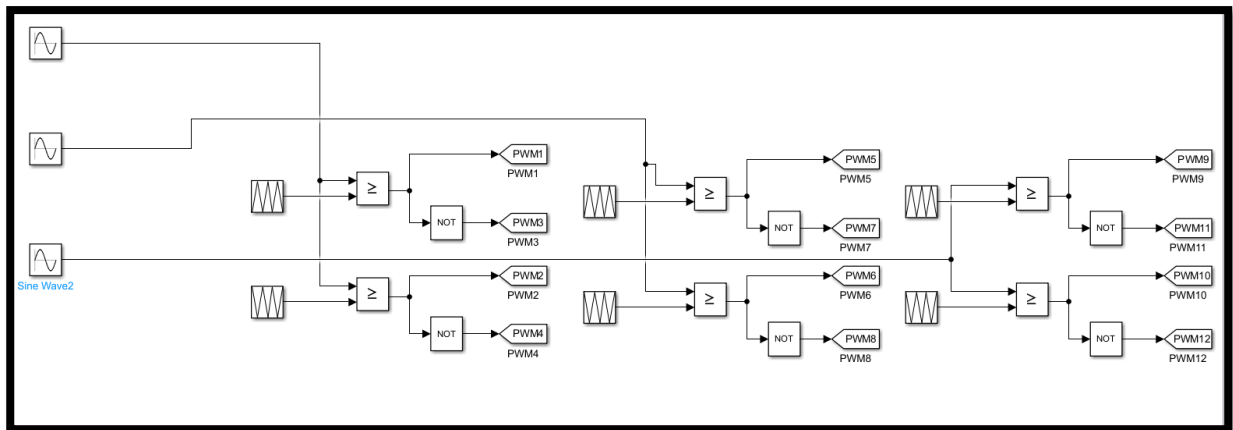
### **II.3.1.4 Les méthodes de commande :**

La performance de l'onduleur NPC dépend fortement de la stratégie de modulation utilisée. L'objectif est de générer une tension de sortie aussi proche que possible d'une sinusoïde, tout en assurant un bon rendement, un faible taux de distorsion harmonique et un bon équilibrage des tensions des condensateurs du bus continu.

#### **➤ Modulation Sinusoïdale à Largeur d'Impulsions (SPWM) :**

La SPWM multiniveau est une généralisation de la SPWM classique utilisée dans les onduleurs deux niveaux. Elle repose sur la comparaison d'un signal de référence sinusoïdal avec plusieurs signaux porteurs triangulaires.

- Pour un onduleur NPC à trois niveaux, deux porteuses sont utilisées.
- Chaque intervalle entre deux porteuses correspond à un niveau de tension de sortie.
- Cette méthode est simple à implémenter, mais offre une faible utilisation du bus DC et une moins bonne qualité d'onde que la SVPWM.[36][37]



**Figure II.8:** la commande MLI sinusoïdale d'un onduleur à 3 niveaux.

#### **➤ Modulation Vectorielle (SVPWM) :**

La modulation vectorielle, également connue sous le nom de Space Vector **PWM**, constitue une technique de modulation temps réel appliquée aux systèmes triphasés. Elle s'appuie sur le principe qu'un vecteur unique peut représenter simultanément les trois tensions d'un réseau triphasé équilibré, c'est-à-dire à somme nulle. Cette méthode agit de manière synchronisée sur l'ensemble des trois phases. Elle repose notamment sur les principes suivants :

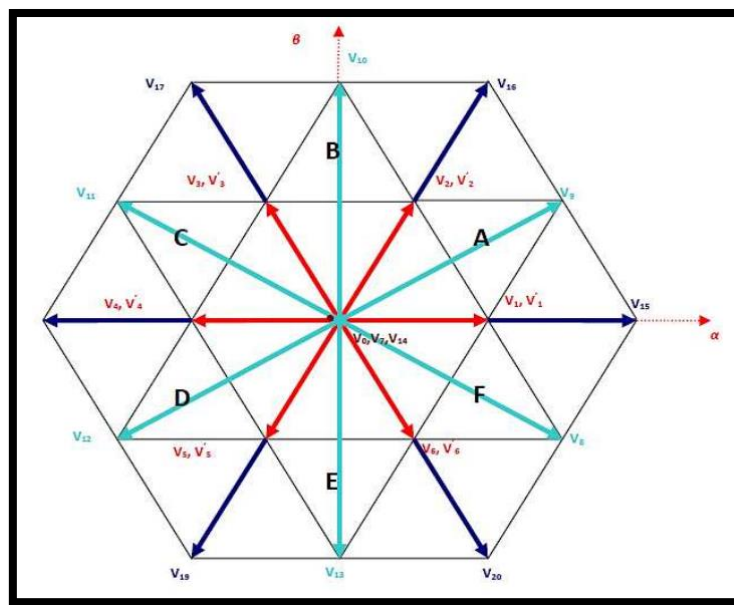
- Le signal de référence est prélevé à des intervalles réguliers  $T$ , ce qui correspond à une modulation de largeur d'impulsion (**MLI**) régulière.

- Pour chaque phase, une impulsion de durée  $T$  est produite, centrée sur la période (modulation symétrique), avec une valeur moyenne correspondant à la tension de référence au moment de l'échantillonnage [38].

Cette technique de modulation est appliquée directement dans le plan diphase obtenu via la transformation de Concordia, ce qui permet d'appréhender les signaux triphasés comme un ensemble unique.

Dans le cas d'un onduleur triphasé à trois niveaux de tension, composé de trois branches et offrant trois états de commutation par bras, on recense un total de  $3^3=27$  combinaisons de commutation possibles. Par conséquent, l'onduleur peut générer 27 vecteurs distincts de tension de sortie ( $V_{an}$ ,  $V_{bn}$ ,  $V_{cn}$ ). [39]

La représentation sur le plan  $(\alpha, \beta)$  de ces 27 vecteurs est donnée par la figure II.9 :

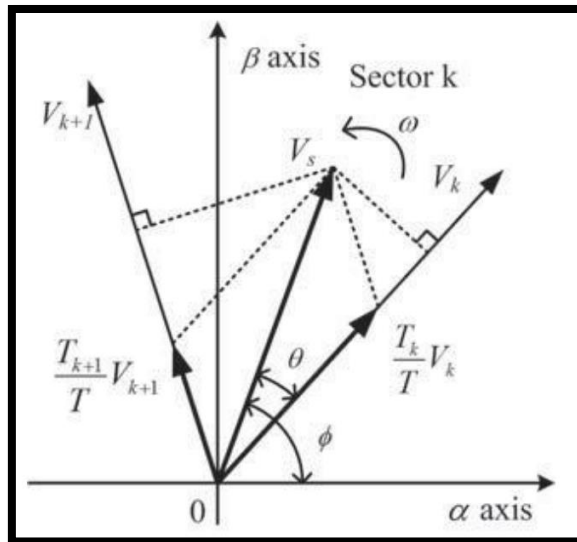




Vecteur de tension	Vecteur de commande	Les tensions simples		
		$V_{AN}$	$V_{BN}$	$V_{CN}$
$V_0$	[000]	0	0	0
$V_1$	[100]	$2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
$V_2$	[110]	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
$V_3$	[010]	$V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
$V_4$	[110]	$2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
$V_5$	[001]	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
$V_6$	[101]	$V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
$V_7$	[111]	0	0	0

**Tableau II.3 :** Vecteur de commande et tension de phase.

Chacun avec l'angle  $2\pi/3$  (rad) et l'amplitude  $2V_{dc}/3$ . Si le vecteur de tension  $V_s$  se trouve dans un secteur arbitraire, il correspondra à deux vecteurs actifs de ce secteur et ils sont utilisés pour moduler  $V_s$  qui représentera la tension triphasée. (Quach et al., 2012). [40]



**Figure II.10:**  $V_s$  dans le K-ième secteur.

La commande par modulation vectorielle (**MLI vectorielle**) élabore les signaux d'impulsion de façon simultanée, en synchronisation avec la rotation continue du vecteur de référence.

À l'inverse, la modulation sinusoïdale exige de calculer séparément les instants de commutation pour chacun des bras de l'onduleur [39].

Le principe fondamental de la MLI vectorielle repose sur la génération, en sortie de l'onduleur, d'un vecteur de tension moyen  $V_s$ , obtenu par la combinaison temporelle de vecteurs de tension dits actifs et nuls. Chacun de ces vecteurs est appliqué durant des intervalles précis afin de reproduire, sur une période d'échantillonnage, le comportement du vecteur de référence avec un maximum de fidélité [41].

$$T_{MLI}V_s = T_aV_a + T_bV_b + T_cV_c$$

$$T_{MLI} = T_a + T_b + T_c$$

Avec :

$V_a, V_b, V_c$  : Vecteur actifs délivrés par l'onduleur adjacent au vecteur  $V_s$ .

$T_{MLI}$  : période de découpage  $V_a$ .

$T_a$  : temps d'application du vecteur  $V_a$ .

$T_b$  : temps d'application du vecteur  $V_b$ .

$T_c$  : temps d'application du vecteur  $V_c$ . [39]

➤ **SHE-PWM (Selective Harmonic Elimination):**

Cette technique consiste à calculer les angles de commutation optimaux pour éliminer certaines harmoniques spécifiques.

- Elle permet de réduire considérablement le THD avec un nombre réduit de commutations.
- Elle est particulièrement efficace pour les applications à fréquence constante.
- L'inconvénient principal est la complexité des calculs (résolution d'équations non linéaires). [42][43]

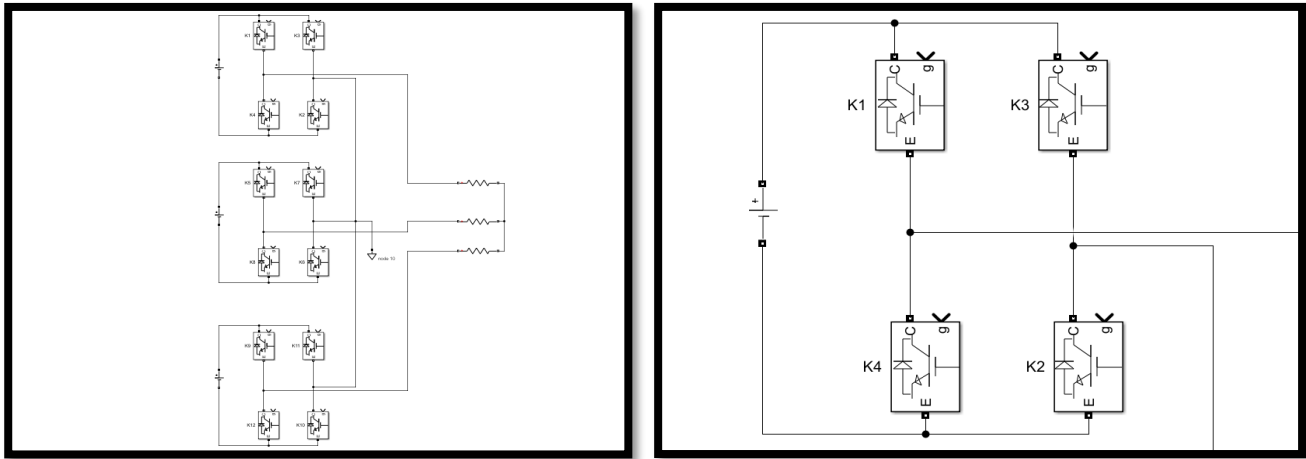
### **II.3.2 onduleur en pont de cascade :**

La structure en pont H cascadié représente la première topologie multiniveaux mentionnée dans la littérature, ayant été proposée en 1971 par W.M. Murray [44]. Un onduleur multiniveaux en cascade est constitué d'une succession de ponts monophasés à deux niveaux, chacun étant alimenté de manière autonome par une source de tension continue distincte. Ce principe a

introduit l'idée novatrice d'utiliser des sources CC indépendantes pour synthétiser une tension alternative en sortie.

Dans cette configuration, chaque cellule monophasée est connectée à sa propre alimentation en courant continu et génère une tension alternative en sortie. La **Figure II.11** montre l'architecture de base d'un onduleur à trois niveaux en cascade, construit par l'association en série de  $\frac{N-1}{2}$ , ponts à deux niveaux. La tension alternative globale en sortie correspond à la somme des tensions fournies par chaque cellule élémentaire. Le nombre de niveaux obtenus en sortie est donné par la formule :  $N=2s+1$  où  $s$  désigne le nombre de sources de tension continue utilisées [45].

Parmi les topologies classiques, la configuration en cascade s'est imposée dans les systèmes d'énergie renouvelable à moyenne et haute tension, notamment dans le domaine photovoltaïque, en raison de sa modularité et de la simplicité de sa structure.



**Figure II.11 :** schéma d'un onduleur en pont H cascadié.

### **II.3.2.1 Le fonctionnement de la structure cascade en pont H :**

Comme dans le cas de l'onduleur NPC à trois niveaux, trois modes de fonctionnement distincts peuvent être identifiés :

#### **➤ Séquences 1 : Génération du niveau maximum**

Dans cette configuration, les interrupteurs **K3** et **K4** sont maintenus en état bloqué, tandis que **K1** et **K2** sont activés. La tension de sortie atteint alors le niveau **Vdc**. Les interrupteurs **K1** et **K2** subissent une tension inverse de **Vdc**.

#### **➤ Séquences 2 : Génération du niveau intermédiaire**

Ici, les interrupteurs **K1** et **K3** sont ouverts, tandis que **K2** et **K4** sont en conduction. La tension de sortie correspond à **0V**. Dans ce cas, une tension inverse de **Vdc** est appliquée aux interrupteurs **K1** et **K3**.

➤ **Séquences 3 : Génération du niveau minimum**

Les interrupteurs **K1** et **K2** sont bloqués, tandis que **K3** et **K4** sont conducteurs. La tension de sortie descend à **V<sub>dc</sub>**, et les interrupteurs **K3** et **K4** supportent alors une tension inverse de **V<sub>dc</sub>**. [46]

Les trois états de commutation possibles sont résumés au tableau 4 :

Etat des interrupteurs				Tension de sortie
K1	K2	K3	K4	
1	1	0	0	+V <sub>dc</sub>
0	1	0	1	0
0	0	1	1	-V <sub>dc</sub>

**Tableau II.4 :** Les états de fonctionnement possibles de l'onduleur H-bridge à 3 niveaux.

**II.3.2.2 Les avantages de la topologie CHB :**

- Elle permet d'alimenter une charge en moyenne ou haute tension à partir d'une ou plusieurs sources de basse tension.
- Elle offre la capacité de délivrer une puissance accrue, avec une excursion maximale de la tension de sortie atteignant  $\pm V_{dc}$ , contre  $\pm V_{dc}/2$  dans certaines architectures classiques.
- L'architecture **CHB** se distingue par l'absence de nécessité d'un équilibrage actif des tensions dans le bus continu et par la compatibilité naturelle des niveaux de tension avec les interrupteurs utilisés, évitant ainsi les circuits d'adaptation.
- Son agencement reste relativement épuré, nécessitant un nombre de composants réduit comparativement aux autres structures standards, ce qui simplifie sa mise en œuvre. [47]

**II.3.2.3 Les Inconvénients de la topologie CHB :**

- Une communication entre les différents ponts est requise pour synchroniser les références et les ondes porteuses.
- Elle exige l'utilisation de sources continues indépendantes, ce qui limite son emploi dans certains contextes [48].
- L'augmentation du nombre de niveaux de tension de sortie entraîne une croissance significative de la taille du convertisseur [49].
- Un contrôle additionnel ainsi qu'une commutation plus fréquente sont nécessaires pour maintenir constantes les tensions des condensateurs [50].

**II.3.2.4 Les domaines d'applications de la topologie CHB :**

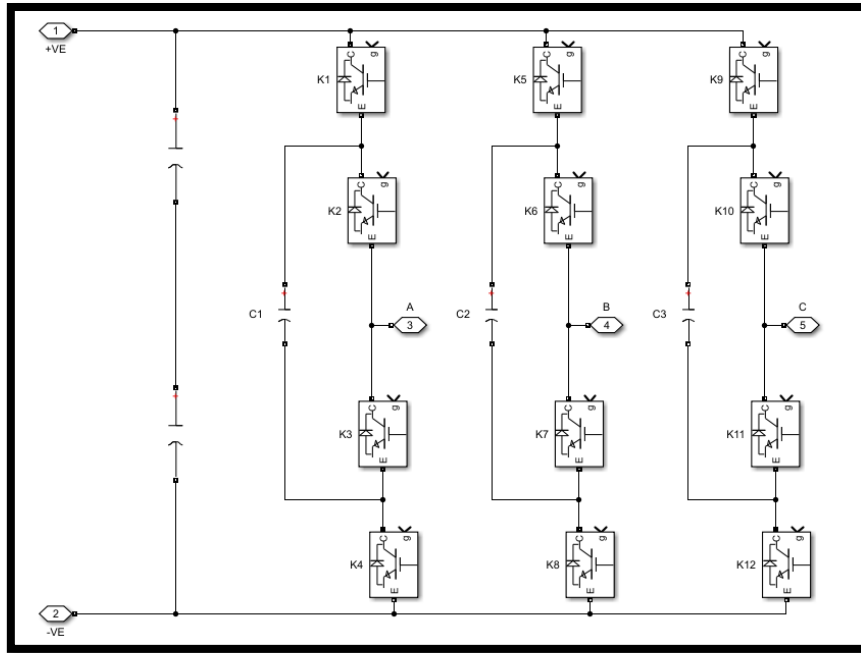
- **Systèmes photovoltaïques :** Le CHB est utilisée dans les systèmes photovoltaïque pour convertir la tension continue des panneaux solaires en tension alternative de qualité raccordable au réseau. Elle permet une

modulation fine de la tension avec un faible taux de distorsion harmonique, idéale pour l'intégration au réseau électrique.[51]

- **Système de batterie à énergie renouvelable** : Grâce à sa modularité et à son rendement élevé, elle améliore la qualité de puissance avec une distorsion harmonique réduite.
- **Système d'entraînement moteur** : Elle permet un contrôle précis tout en réduisant la distorsion harmonique, les vibrations et l'échauffement, ce qui augmente la durée de vie des moteurs.
- **Compensateurs de facteur de puissance** : Elle contribue à la réduction des harmoniques et à l'amélioration de la qualité de l'énergie, tout en s'adaptant rapidement aux variations de charge pour une compensation efficace.
- **Entraînements de véhicules électriques** : Grâce à sa haute densité de puissance, sa faible émission électromagnétique et son efficacité énergétique, elle améliore l'autonomie et la fiabilité des véhicules [52].

### **II.3.3 Onduleur à condensateur flottant :**

La structure à condensateurs flottants, également appelée structure multicellulaire (MC) ou à cellules imbriquées, se caractérise par sa modularité, composée de plusieurs sous-convertisseurs de puissance [53]. Proposée en 1992 par T. Meynard et Foch [54], elle vise à résoudre les problèmes liés à l'équilibrage des tensions du bus continu, tout en réduisant le nombre excessif de diodes [55]. Sa configuration est similaire à celle de l'onduleur NPC, mais les diodes de clamp y sont remplacées par des condensateurs de stockage d'énergie, agissant comme sources de tension flottantes (batteries), comme illustré à la **Figure II.12** [56].



**Figure II.12 :** schéma d'un onduleur à condensateur flottant.

### **II.3.3.1 Le fonctionnement de la topologie FC :**

Dans un onduleur à condensateur flottant comportant  $N$  niveaux, chaque bras doit intégrer  $2(N-1)$  interrupteurs ainsi que  $N(N-1)/2$  capacités. Cette structure permet de générer les  $N$  niveaux de tension à l'aide de  $2N-1$  séquences de fonctionnement différentes. Elle présente l'avantage de corriger certaines limites de la topologie NPC, notamment en ce qui concerne l'équilibrage des tensions supportées par les interrupteurs [57].

Chaque paire d'interrupteurs disposés verticalement constitue une cellule de commutation, dans laquelle les interrupteurs sont actionnés de façon complémentaire. Pour assurer un fonctionnement optimal des onduleurs multicellulaires, il est essentiel de maintenir les tensions aux bornes des condensateurs flottants à des niveaux équilibrés et appropriés [58].

Les états de fonctionnement possibles pour l'onduleur à condensateur flottant 3 niveaux sont montrées dans ce tableau :

Etat des interrupteurs				Tension de sortie
K1	K2	K3	K4	
1	1	0	0	$E/2$
1	0	0	1	0
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-E/2$

**Tableau II.5 :** Les états de fonctionnement possibles de l'onduleur à condensateur flottant à 3 niveaux.

### **II.3.3.2 Les avantages de la topologie FC :**

Bien que son principe de fonctionnement soit proche de celui de la topologie NPC, cette structure présente plusieurs avantages notables :

- Elle élimine le recours aux diodes de blocage, nécessaires dans la configuration NPC.
- La tension de blocage est identique pour tous les interrupteurs, ce qui simplifie leur dimensionnement.
- Les condensateurs ne sont jamais connectés en série entre différents niveaux, supprimant ainsi le risque de déséquilibre de tension.
- Grâce à sa modularité, il est facile de concevoir des structures à un nombre élevé de niveaux [57].
- Elle permet d'obtenir aussi bien un nombre pair qu'un nombre impair de niveaux de tension.
- Une seule source de courant continu est suffisante par phase [58].

### **II.3.3.3 Les inconvénients de la topologie FC :**

Malgré ses tous, cette structure présente certaines limites :

- Le maintien d'un partage équilibré de la tension du bus continu entre les cellules de commutation impose un contrôle précis des tensions aux bornes des condensateurs flottants.
- La régulation de ces tensions nécessite une stratégie de commande avancée, afin de garantir un fonctionnement optimal et stable de chaque niveau de tension.
- Cette structure fait appel à un plus grand nombre de condensateurs de stockage à haute tension que d'autres topologies, ce qui peut compromettre la fiabilité du système global et alourdir les coûts de réalisation. [59]

## **II.4 Comparaison théorique des structures :**

Les topologies NPC, CHB et FC constituent les solutions les plus répandues dans le domaine des applications à puissance moyenne ou élevée. Le choix de l'une d'elles repose sur une analyse multicritère, prenant en compte la simplicité de l'implémentation, la qualité du signal de sortie, la modularité de la conception, la complexité du pilotage, le coût global, ainsi que des contraintes spécifiques à chaque application.

Le tableau ci-dessous résume les principales différences entre ces trois topologies :

Critère	NPC (Neutral Point Clamped)	CHB (Cascaded H-Bridge)	FC (Flying Capacitor)
<b>Nombre de composants</b>	4 interrupteurs + 2 diodes de clamp + 2 condensateurs partagée pour toutes les phases	4 interrupteurs + 1 source DC par cellule	4 interrupteurs + condensateur + 2 condensateurs partagée pour toutes les phases
<b>Besoin en sources DC</b>	Une seule source DC partagée pour toutes les phases	Une source DC isolée par cellule H-bridge	Une seule source DC, mais répartie via des condensateurs
<b>Complexité de commande</b>	Moyenne à élever : équilibrage du point neutre requis	Moyenne : synchronisation des cellules requise	Élevée : équilibrage actif des condensateurs flottants nécessaire
<b>Qualité de l'onde de sortie (THD)</b>	Bonne (faible THD)	Excellente, surtout à haut nombre de niveaux	Excellente même à bas nombre de niveaux
<b>Redondance de commutation</b>	Oui, exploitable pour équilibrer le point neutre	Non, chaque cellule est indépendante	Oui, permet un meilleur équilibrage du courant et de la tension
<b>Fiabilité et robustesse</b>	Bonne, mais dépend des diodes de clamp	Excellente grâce à la modularité et l'isolation des cellules	Moins fiable à cause des nombreux condensateurs sensibles
<b>Modularité / évolutivité</b>	Moyenne, structure centralisée	Très bonne, structure modulaire et extensible	Moyenne, possible mais avec complexité croissante
<b>Coût global</b>	Modéré	Élevé si nombreuses cellules et sources DC	Très élevé à cause du nombre de composants passifs et du contrôle complexe
<b>Applications typiques</b>	Photovoltaïque, entraînements moteurs, UPS, industrie moyenne tension	Photovoltaïque, batteries modulaires, traction, STATCOM	UPS, traction, aviation, qualité critique de puissance

**Tableau II.6 :** Comparaison des structures d'onduleurs à trois niveaux.

### Analyse comparative :

- NPC est adapté aux applications industrielles et fixes avec un bus DC centralisé, mais son évolutivité au-delà de 3 niveaux reste limitée à cause de la complexité du point neutre et du grand nombre de diodes à gérer.
- CHB est idéal pour les applications modulaires, comme les systèmes PV ou le stockage d'énergie, car chaque cellule fonctionne de façon autonome. Toutefois, il nécessite plusieurs sources DC, ce qui peut être contraignant.
- FC offre une excellente qualité d'onde et n'utilise pas de diodes, mais son contrôle est complexe, surtout en ce qui concerne l'équilibrage des condensateurs. C'est une solution puissante mais coûteuse.



## **CONCLUSION :**

Ce chapitre a permis d'approfondir l'étude des principales architectures d'onduleurs multiniveaux : l'onduleur à diodes de limitation de tension (NPC), l'onduleur modulaire en ponts cascades (CHB) et celui à condensateurs flottants (FC). Chacune de ces topologies présente des caractéristiques propres en termes de conception structurelle, de stratégie de commande, de comportement dynamique et de domaines d'application privilégiés.

La sélection de l'architecture la plus pertinente dépend directement des contraintes imposées par l'usage visé : exigences de modularité, qualité spectrale de la tension de sortie, complexité de la commande ou encore considérations économiques. Aucune des structures n'offre une solution universelle ; chaque configuration implique des compromis technico-économiques qu'il convient de pondérer selon les performances attendues et les conditions réelles de fonctionnement.

## **Chapitre 3 :**

# ANALYSE DES PERFORMANCES DES STRUCTURES MULTI-NIVEAUX

## **INTRODUCTION :**

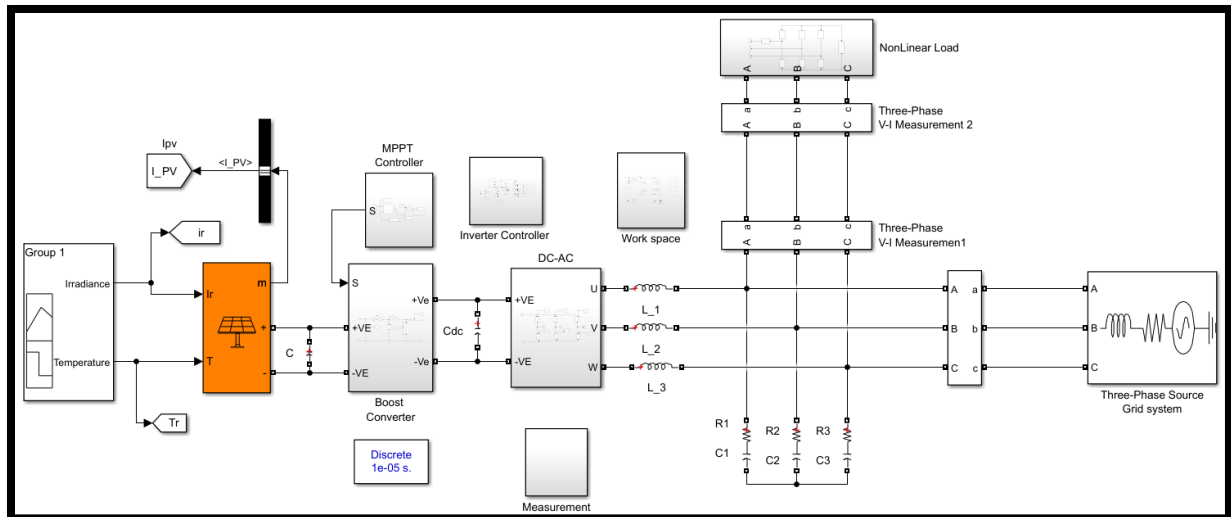
L'onduleur constitue un élément central dans tout système électrique utilisant une source continue pour alimenter une charge alternative ou un réseau. Les structures multiniveaux, de plus en plus étudiées et utilisées, offrent des performances supérieures en termes de qualité de signal, de rendement énergétique et de contraintes de commutation. Toutefois, ces avantages doivent être vérifiés à travers une analyse rigoureuse basée sur des critères de performance clairs.

L'objectif de ce chapitre est de démontrer que dans un système connecté au réseau et alimentant une charge non linéaire les onduleurs multiniveaux améliorent la qualité de l'énergie de manière supérieure aux onduleurs classiques et d'évaluer et de comparer les performances de différentes structures d'onduleurs multiniveaux à travers une série de simulations numériques. De plus, nous cherchons de prouver que l'augmentation du nombre de niveaux entraîne une réduction du taux de distorsion harmonique (THD). Dans le cadre de cette étude, nous avons effectué une comparaison entre des onduleurs à deux niveaux avec filtre et des onduleurs de type NPC à trois et cinq niveaux sans filtre.

La méthodologie adoptée repose sur l'utilisation de l'environnement MATLAB/Simulink, qui offre une flexibilité et une précision adaptées à la modélisation des systèmes électroniques de puissance. À partir de modèles simulés, les résultats obtenus permettent une analyse comparative entre les différentes configurations testées.

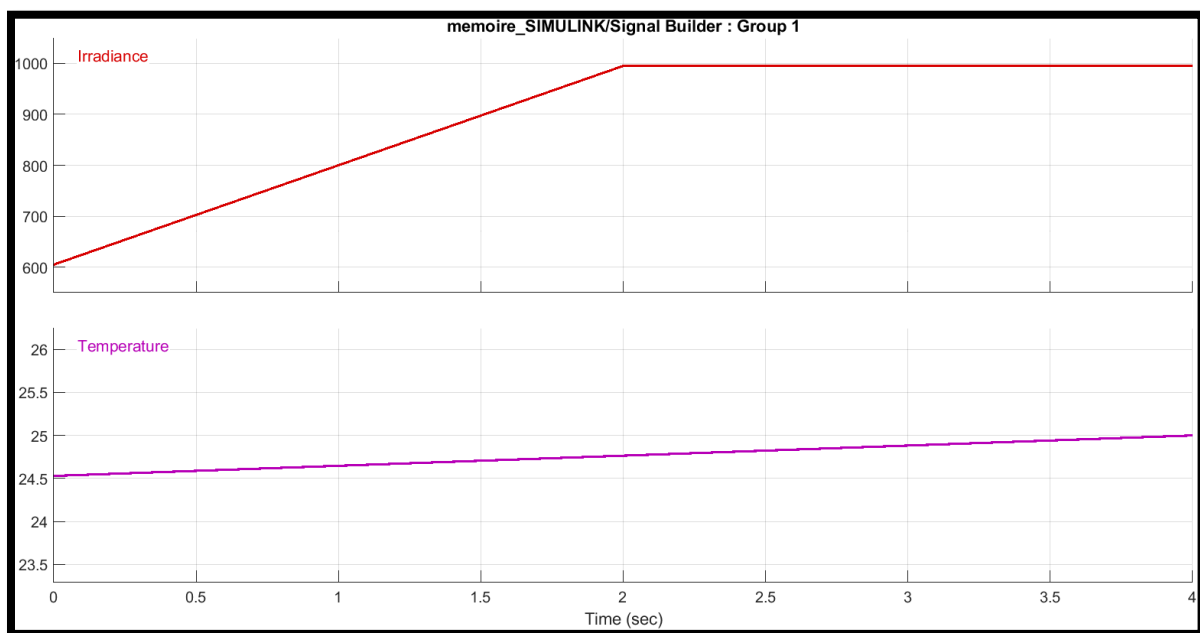
### **III.1. Modèle étudié :**

Le système étudié est connecté au réseau électrique avec une charge non-linéaire de type PD3. La stratégie MPPT est basée sur l'algorithme P&O (Perturb and Observ), tandis que la commande des onduleurs repose sur une technique vectorielle associée à la modulation MLI (Modulation à largeur d'impulsion) pour la génération des signaux de commande. Afin de garantir un facteur de puissance unitaire, la composante  $I_q$  a été fixée à zéro. Un PLL (**phase-Locked Loop**) est utilisé dans le modèle de simulation pour assurer l'alignement en phase avec le réseau. Le courant injecté  $I_d$  dans le réseau est déterminé à partir de la tension  $V_{DC}$ , Le courant  $I_{Ld}$  et de l'expression de  $I_{dref} = \frac{2}{3} \times \frac{V_{pv} \times I_{pv}}{338}$ , qui correspond à la puissance active convertie en courant de référence dans le repère tournant.



**Figure III.1 : Le modèle de simulation étudié.**

## III.2. Les résultats :

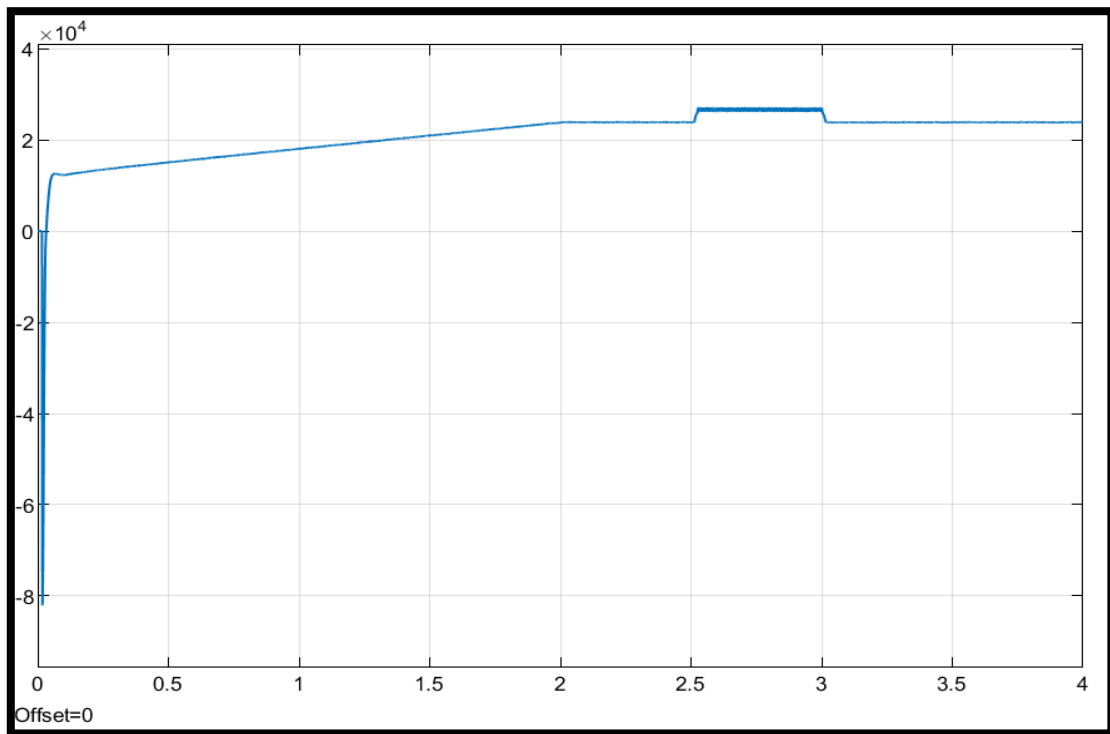


**Figure III.2 : L'irradiance et de température.**

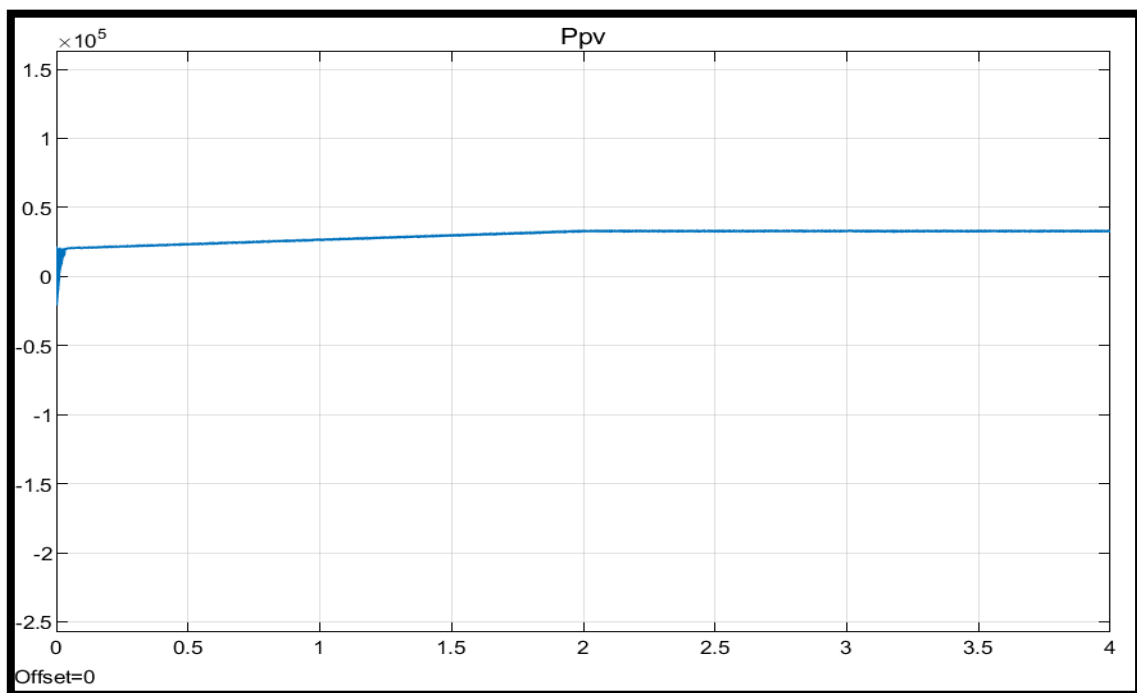
Chaines en parallèle	9
Nombre des modules	153
$P_{max}$ par module (W)	218.871
Courant de court- circuit (A)	7.97
Tension de circuit ouvert (V)	36.6
$I_{mp}$ (A)	7.47
$V_{mp}$ (V)	29.3

**Tableau III.1 : Paramètres des panneaux photovoltaïques.**

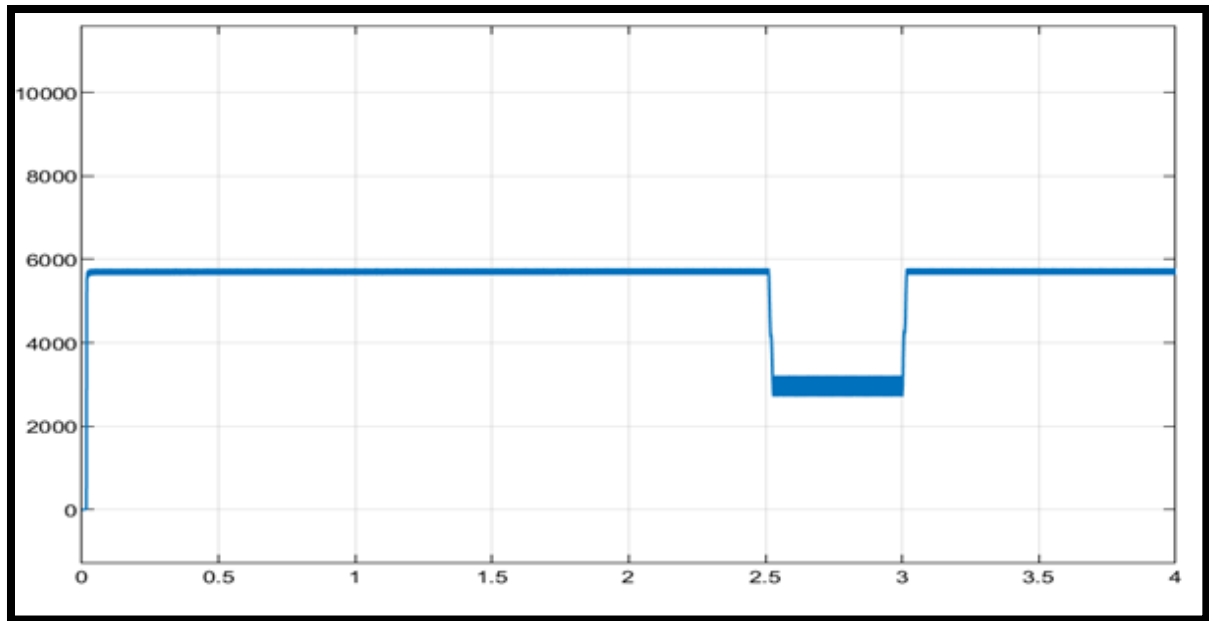
### **III.2.1. Onduleur a 2 niveaux avec filtre :**



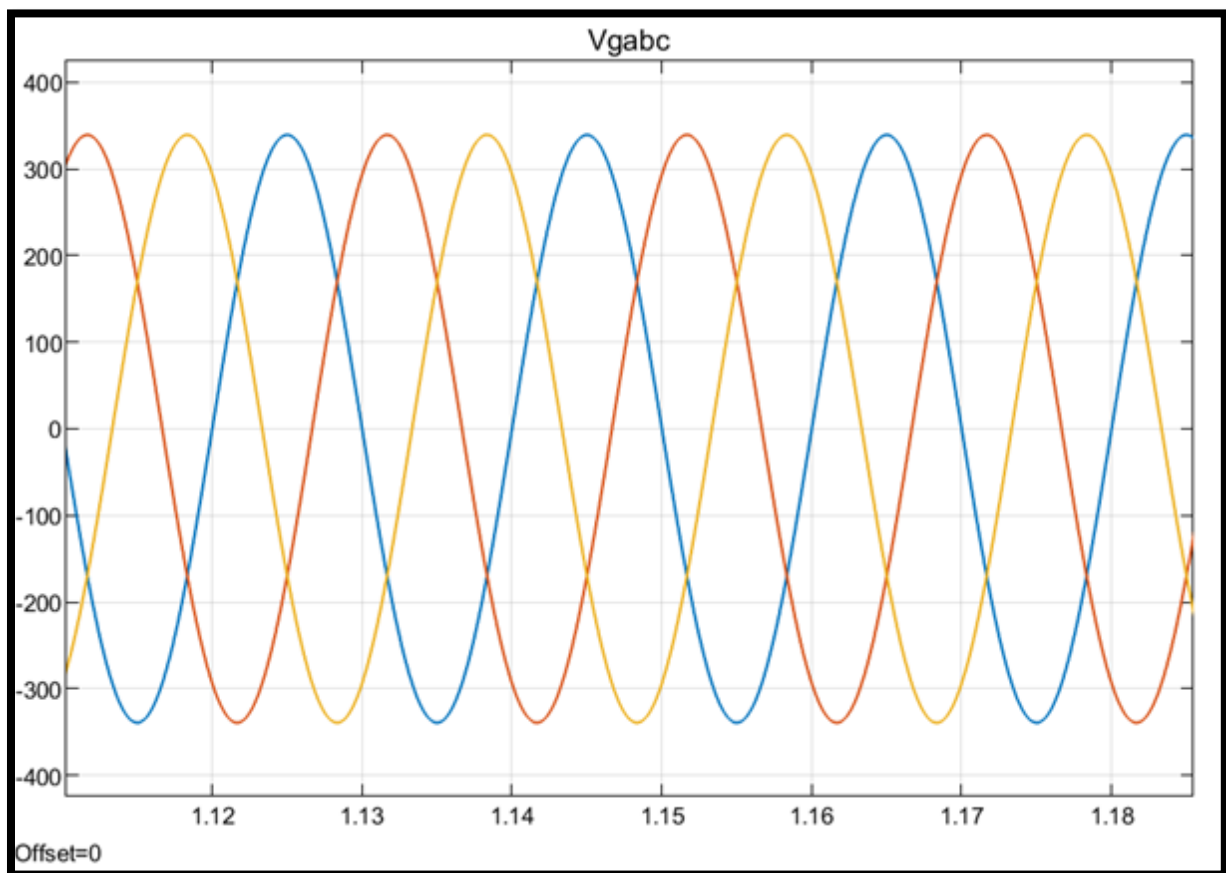
**Figure III.3 :** La puissance de réseau.



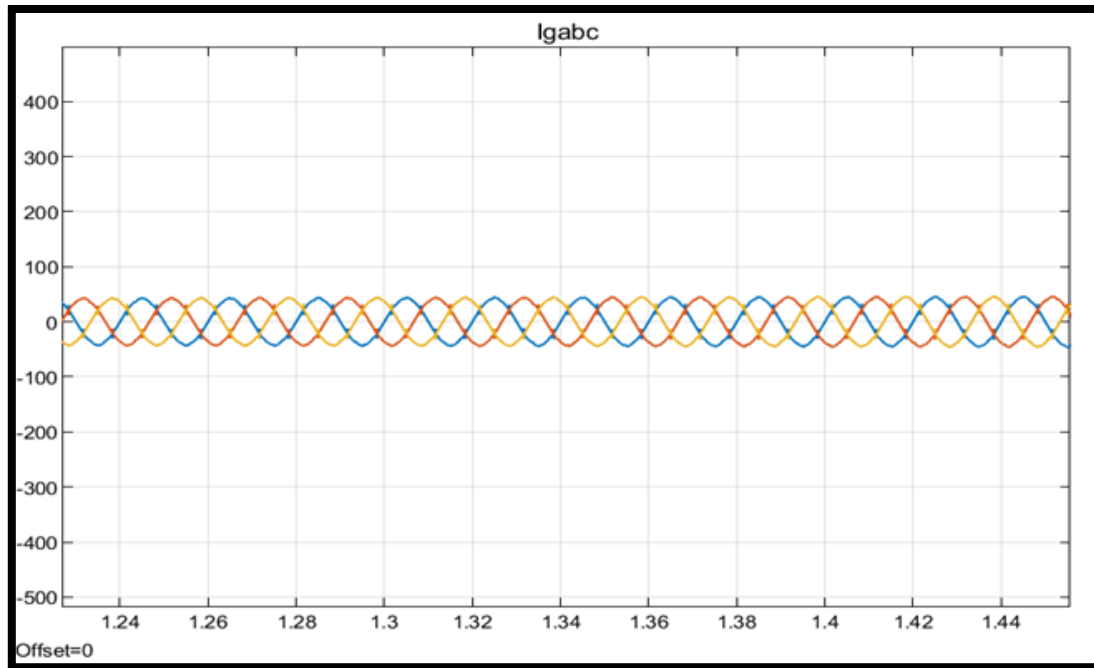
**Figure III.4 :** La puissance du panneau.



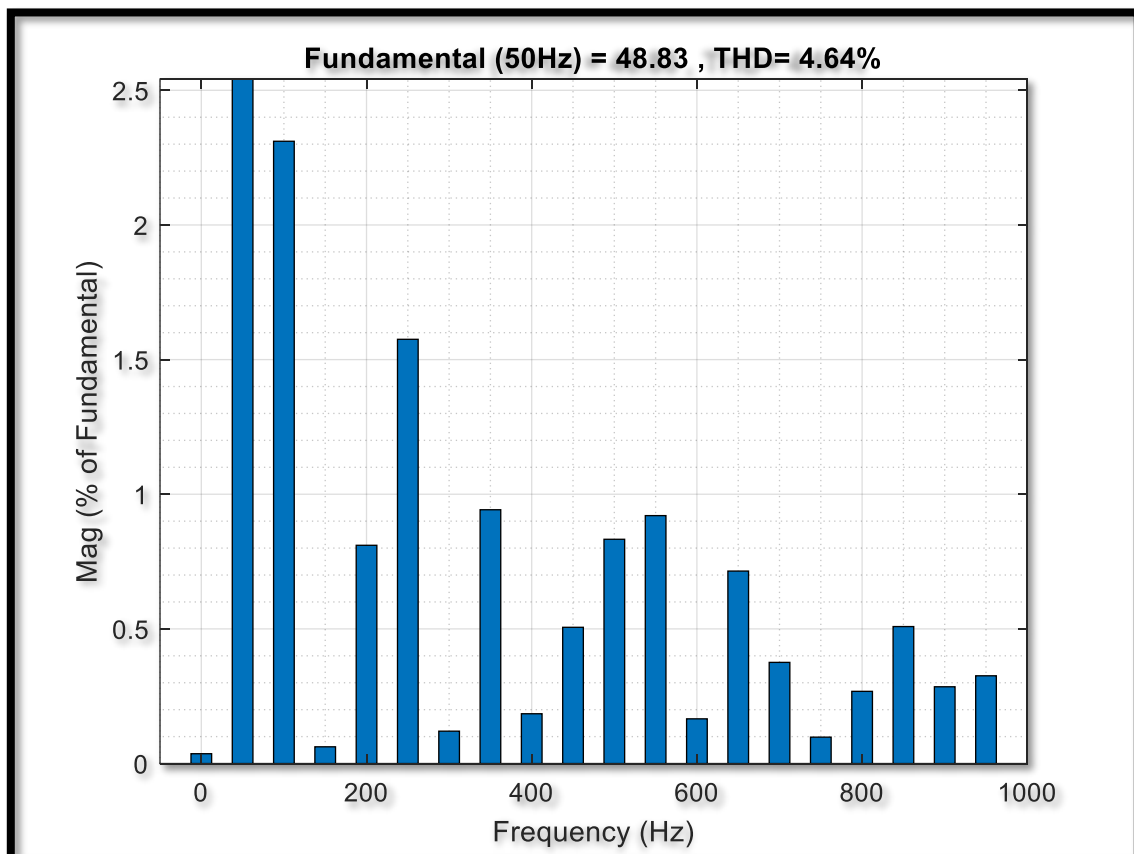
**Figure III.5 :** La puissance de charge.



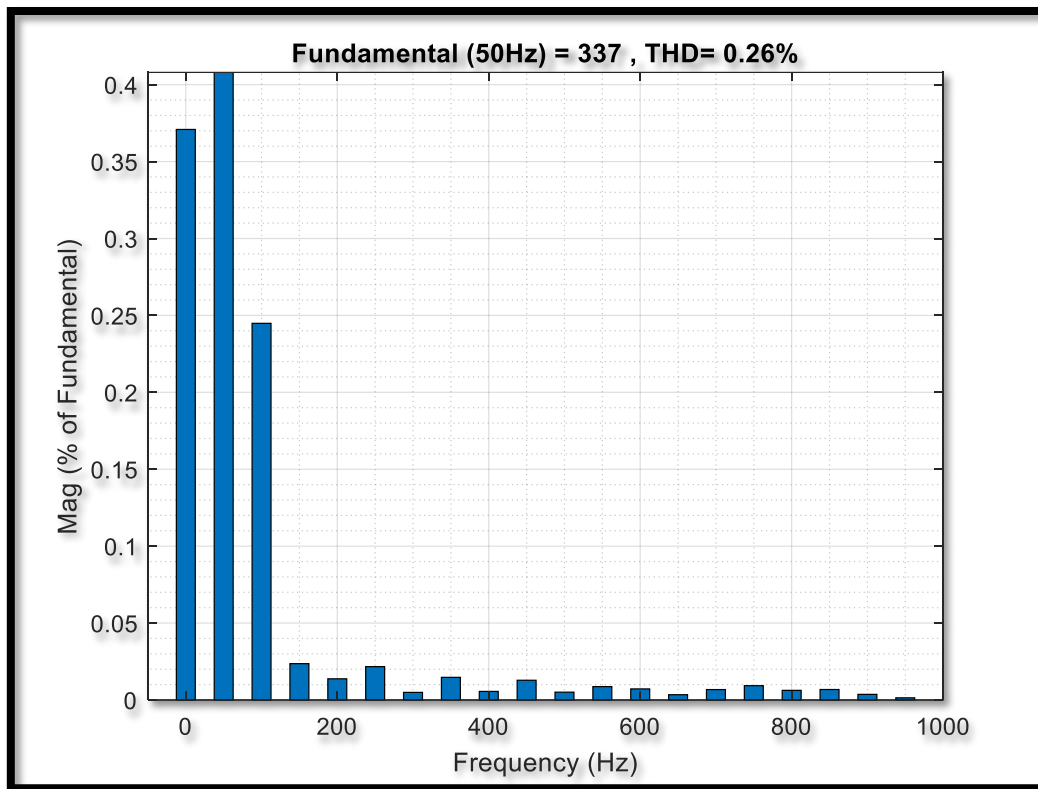
**Figure III.6 :** La tension du réseau.



**Figure III.7 :** Le courant du réseau.

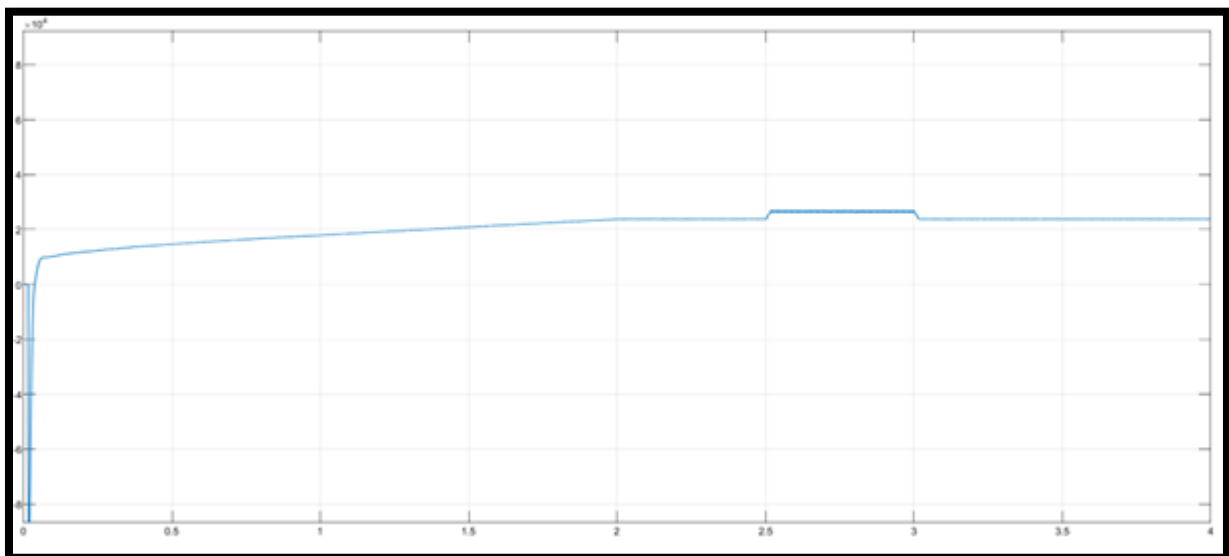


**Figure III.8 :** THD en courant.



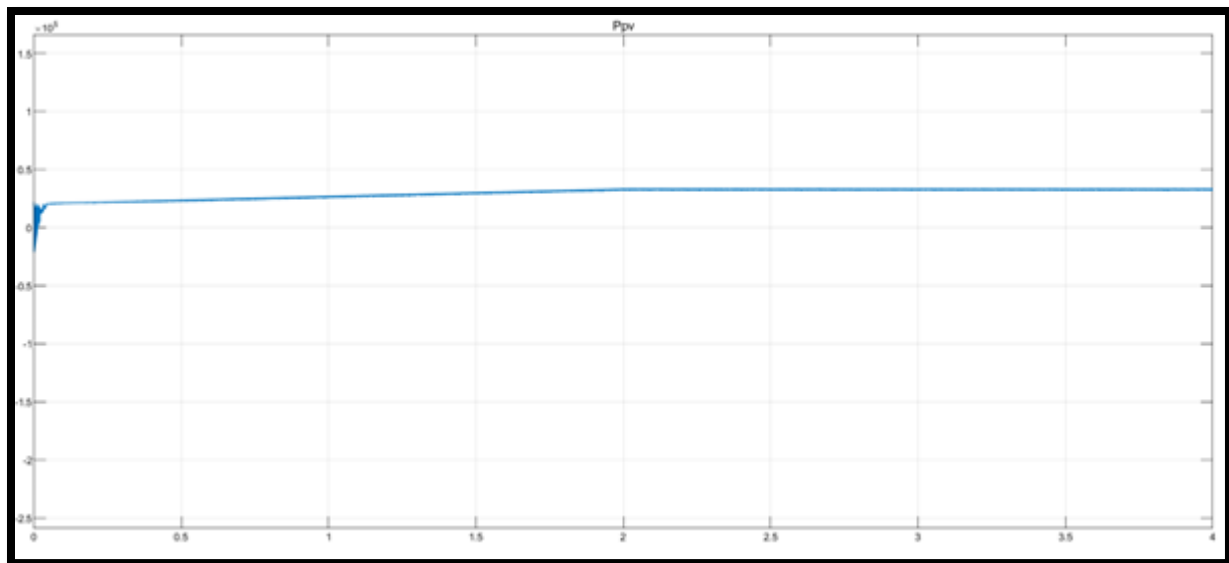
**Figure III.9 :** THD en tension.

### **III.2.2. Onduleur a 3 niveaux sans filtre :**

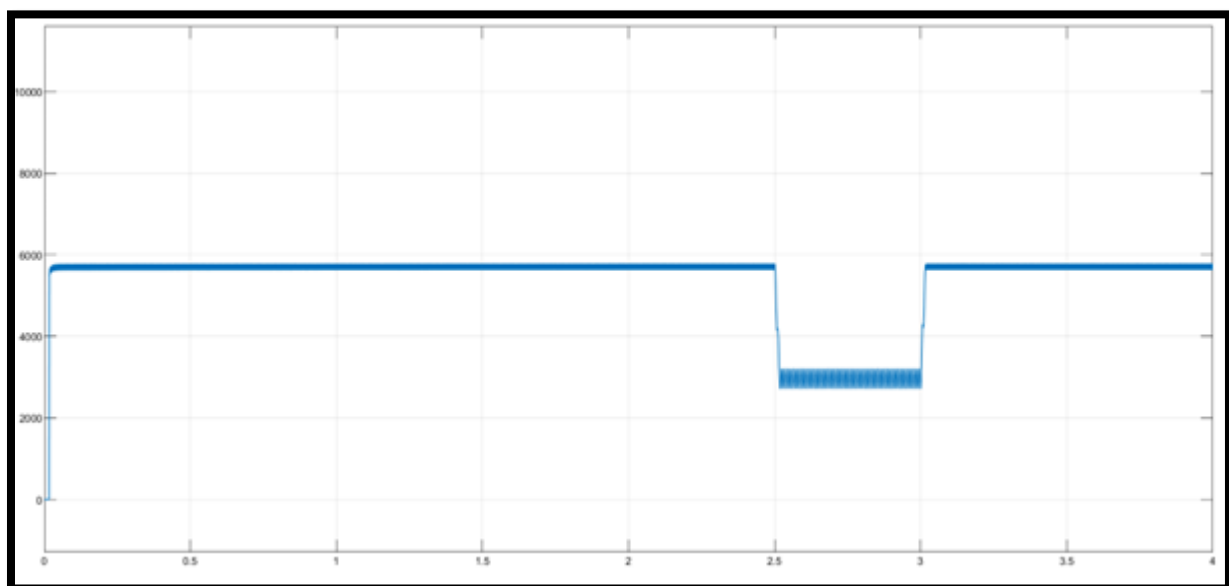


**Figure III.10 :** La puissance de réseau.

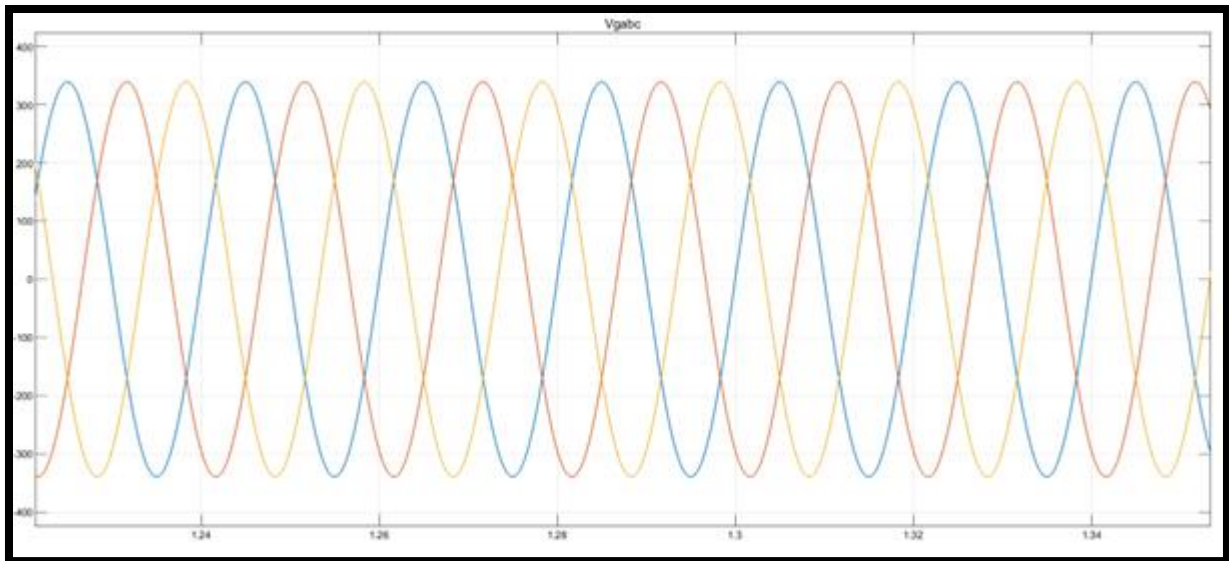




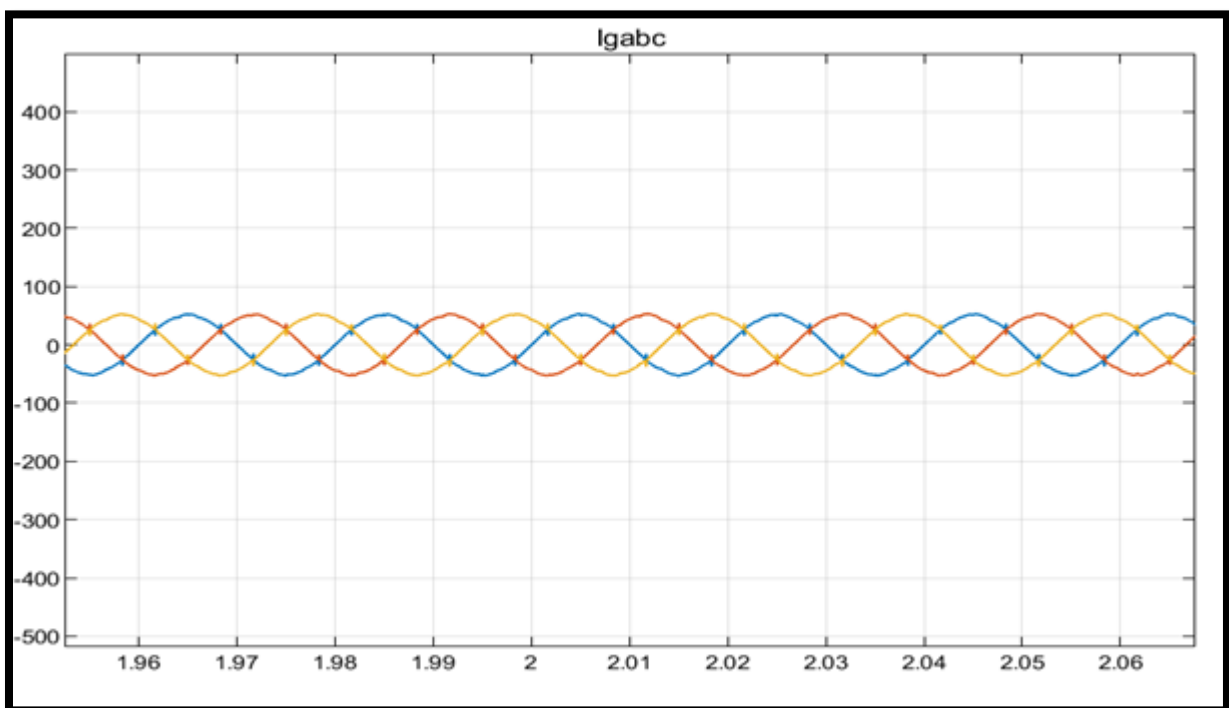
**Figure III.11** : La puissance du panneau.



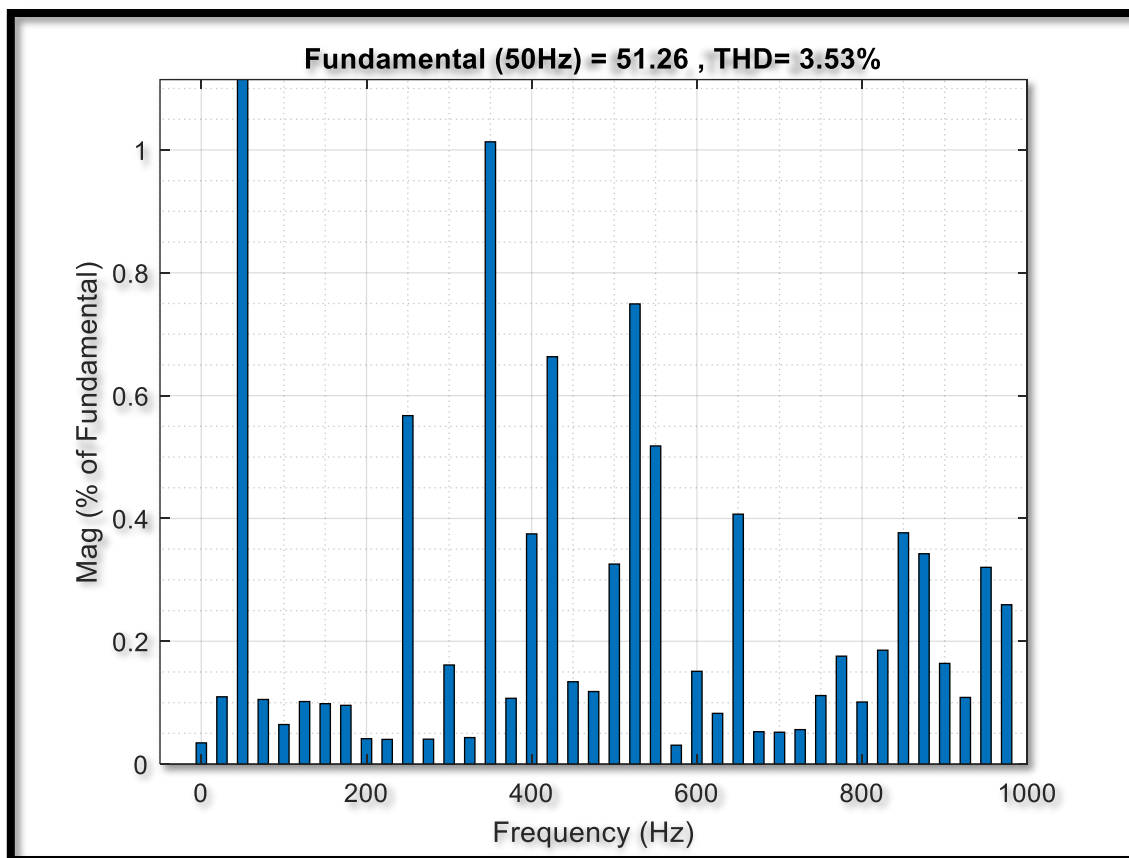
**Figure III.12** : La puissance de charge.



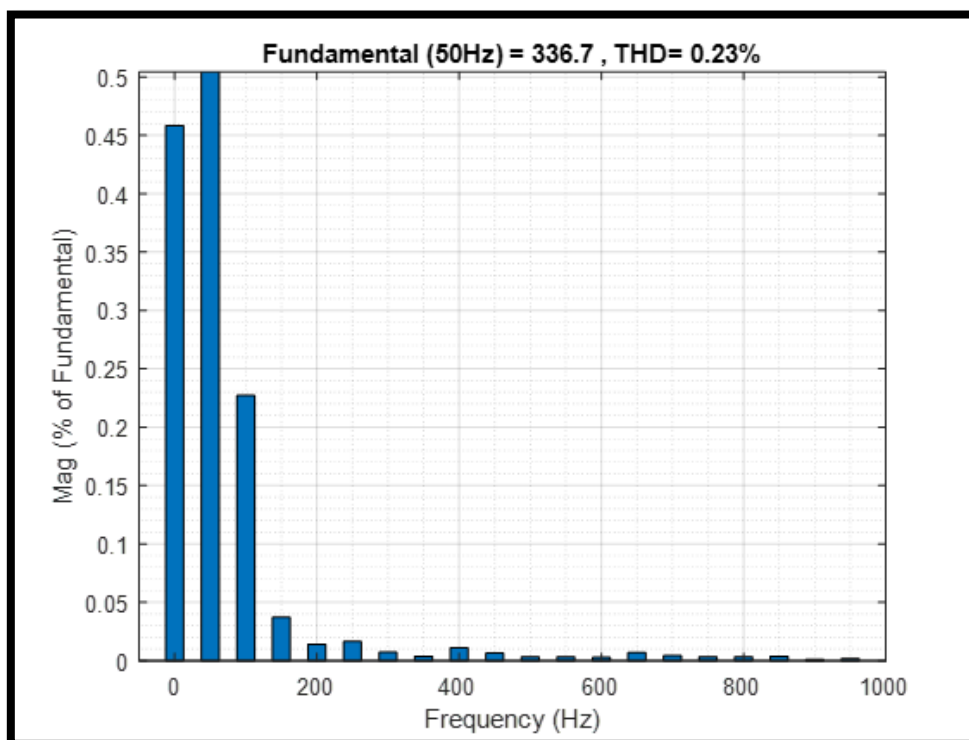
**Figure III.13** : La tension du réseau.



**Figure III.14** : Le courant du réseau.

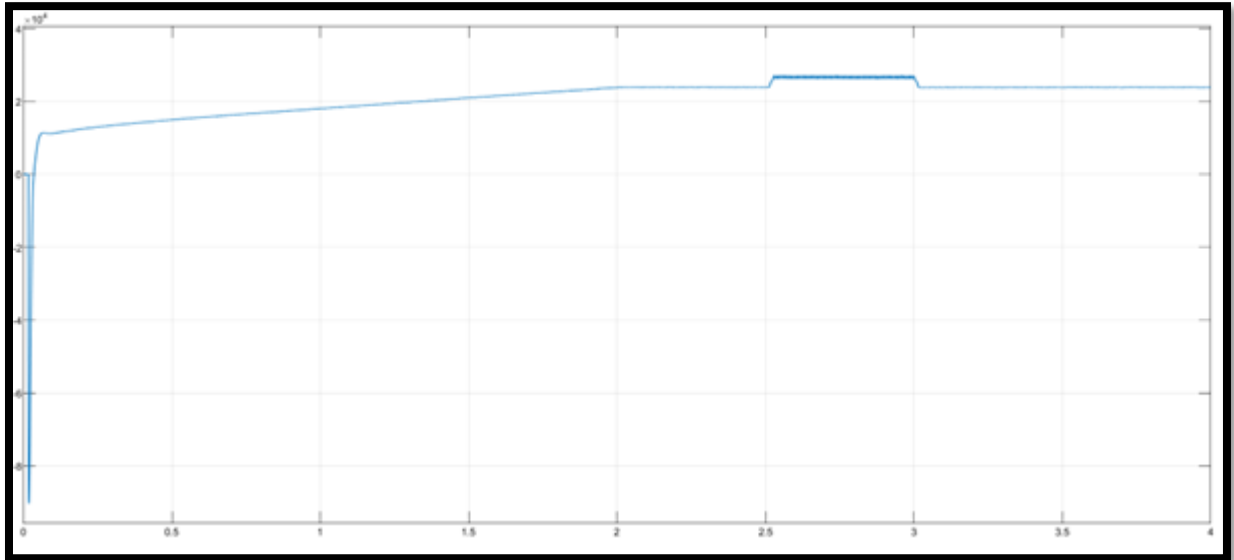


**Figure III.15 :** THD en courant.

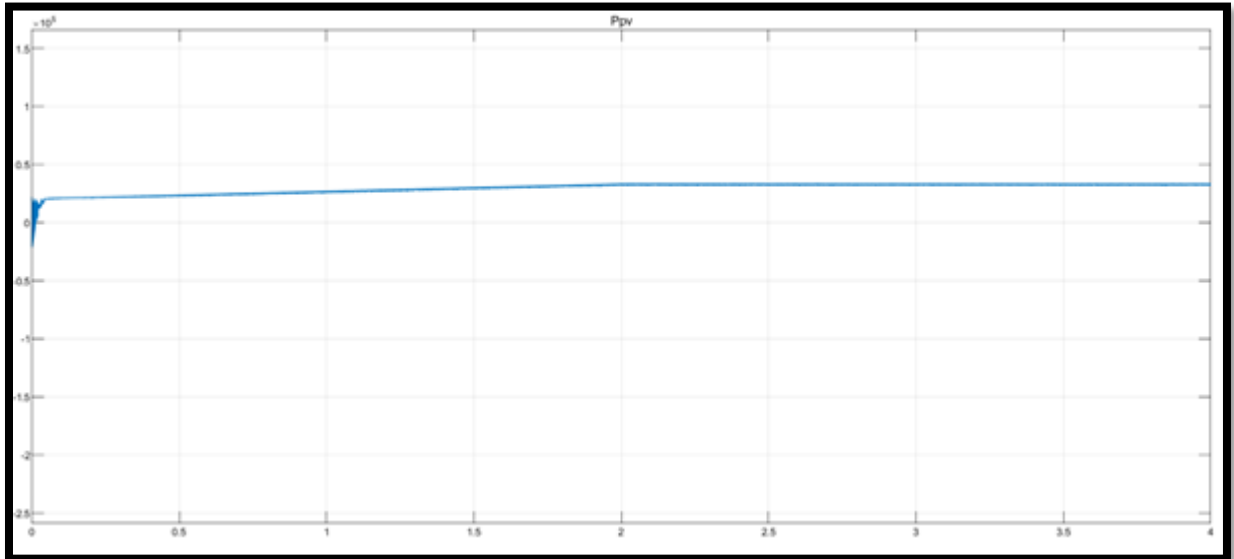


**Figure III.16 :** THD en tension.

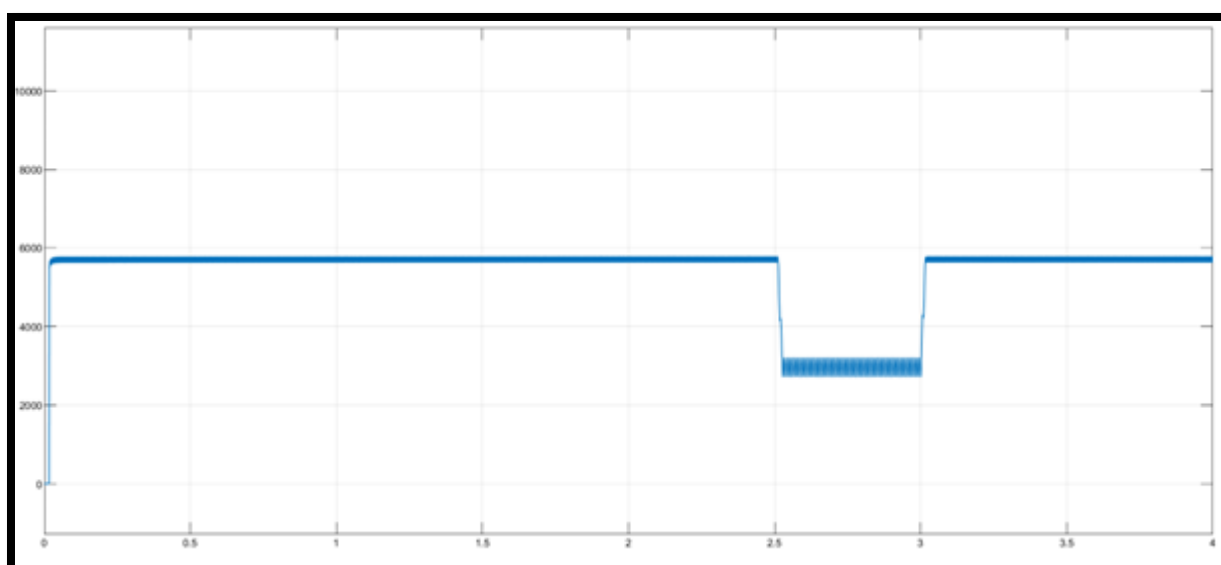
### **III.2.3. Onduleur a 5 niveaux sans filtre :**



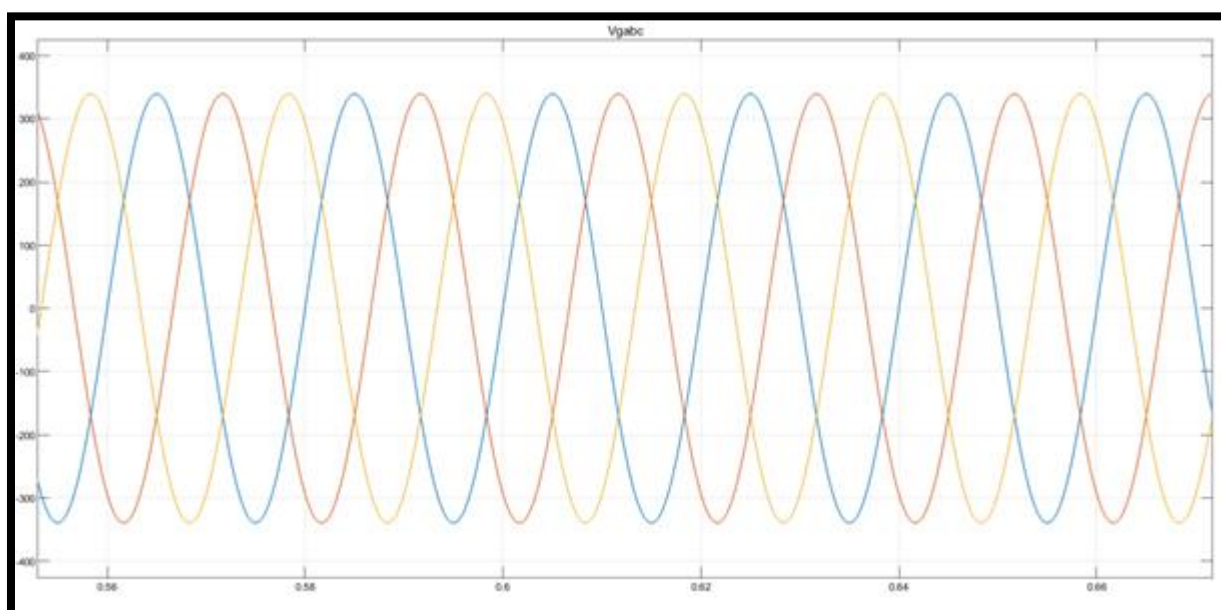
**Figure III.17 :** La puissance de réseau.



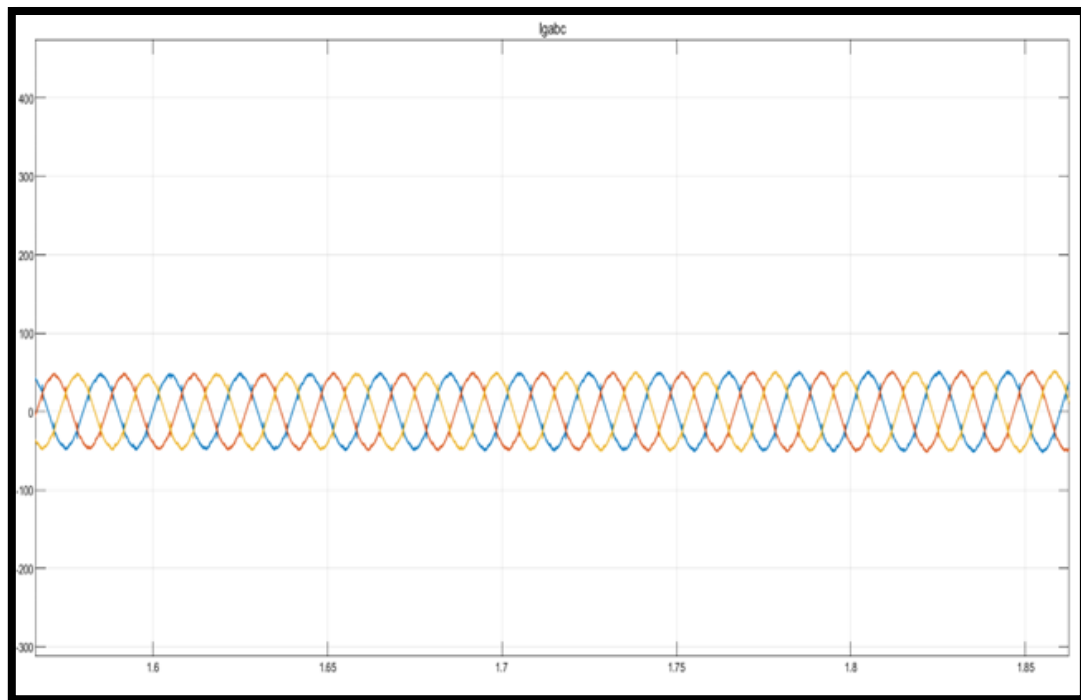
**Figure III.18 :** La puissance du panneau.



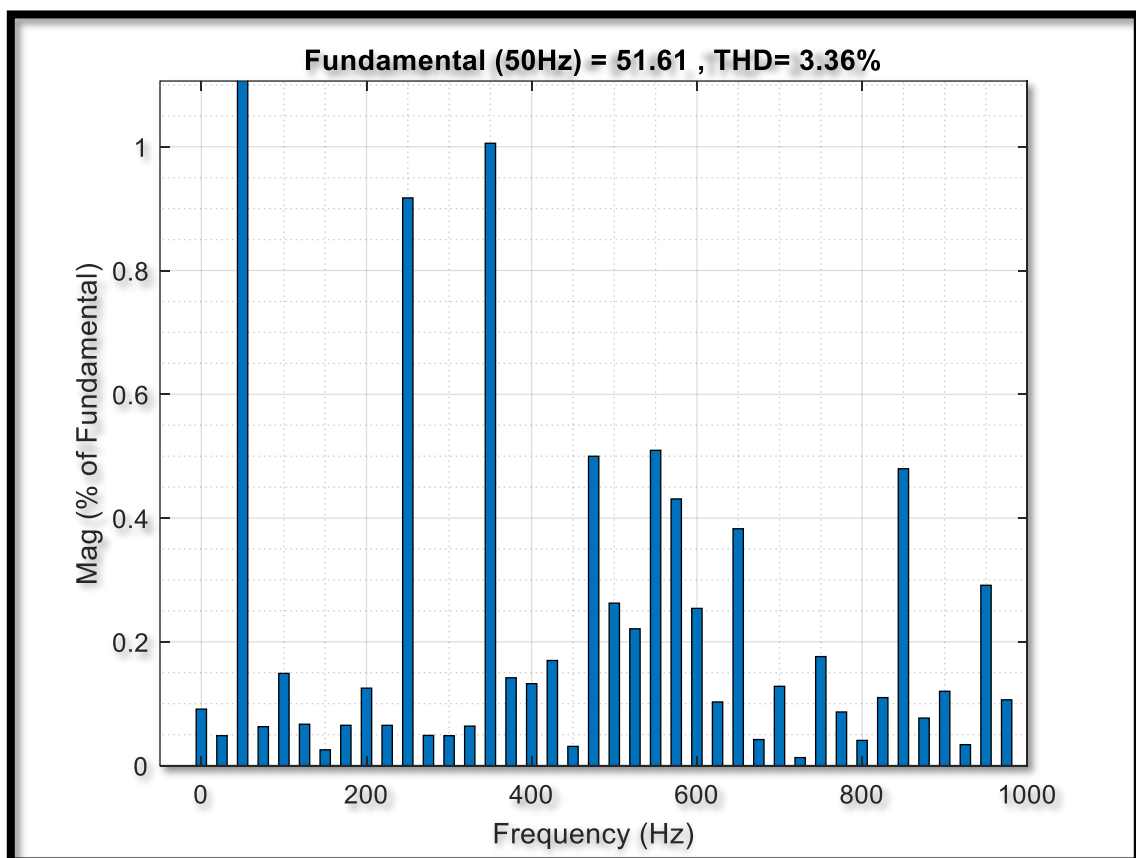
**Figure III.19** : La puissance de charge.



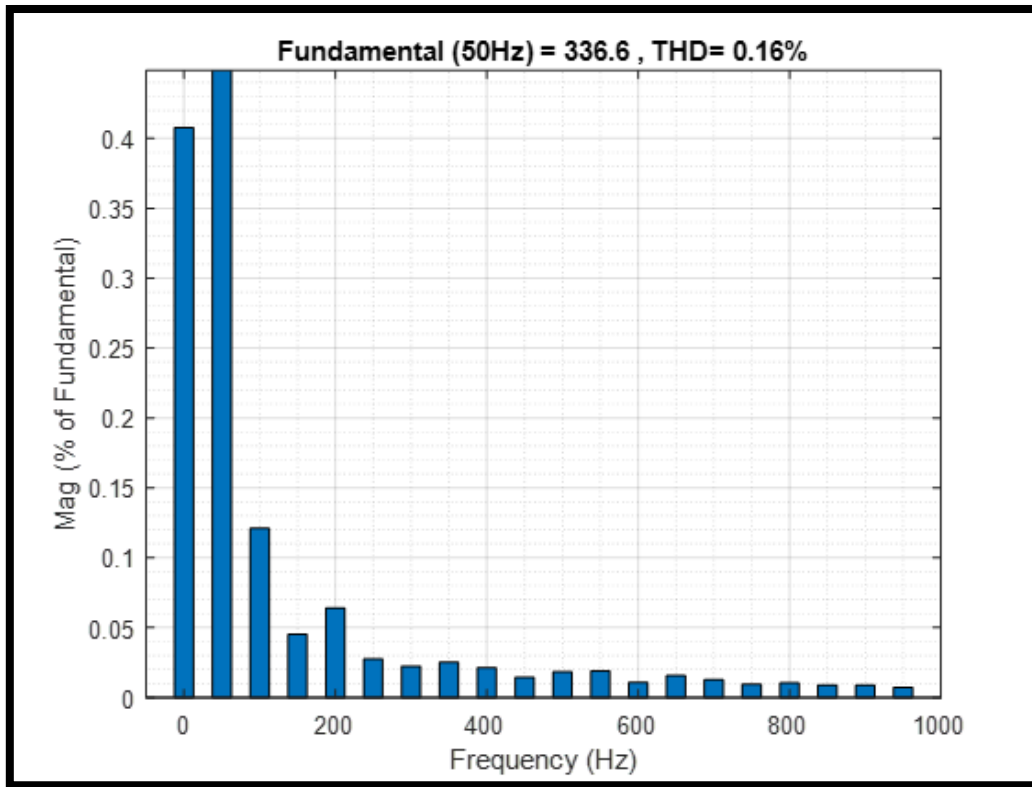
**Figure III.20** : La tension du réseau.



**Figure III.21 :** Le courant du réseau.



**Figure III.22 :** THD en courant.



**Figure III.23 :** THD en tension.

### **III.3. L'interprétation des résultats :**

On observe qu'entre 0 et 2 secondes, l'irradiation augmente progressivement, entraînant une élévation de la puissance photovoltaïque. À partir de 2 secondes jusqu'à 4 secondes, l'irradiation se stabilise à  $1000 \text{ W/m}^2$ , ce qui entraîne une puissance constante délivrée par le panneau par les trois cas étudiés : **onduleurs à 2 niveaux, à 3 niveaux et à cinq niveaux**. Dans cette phase stable, le panneau délivre une puissance d'environ 33 KW.

La charge non linéaire consomme une puissance d'environ 6 KW. Une chute de puissance est observée entre 2.5 seconds et 3 secondes, conséquence de l'ouverture de l'intercepteur durant cet intervalle de temp, et ce, pour les trois configuration : **onduleurs à 2 niveaux, à 3 niveaux et à cinq niveaux**.

La puissance injecte dans le réseau augmente parallèlement à la monte de la puissance photovoltaïque. Entre 2.5 secondes et 3 secondes, une légère augmentation de cet puissance est observé, en raison de la diminution de la puissance observe par la charge. Il est également consisté que la puissance injectée dans le réseau est plus lissée avec les onduleurs à 3 et 5 niveaux (**sans filtre**) qu'avec l'onduleur à 2 niveaux muni d'un filtre. Dans l'ensemble des cas étudiés le réseau fonctionne en mode récepteur durant cette période.

On remarque que les tensions et les courants du réseau sont globalement sinusoïdaux. Toutefois, les formes d'onde obtenues avec les onduleurs ont 3 et 5 niveaux, même sans filtre, sont plus lisses que celles générées par l'onduleur à 2 niveaux avec filtre.

### **THD en courant :**

- Onduleur à 2 niveaux avec filtre : **4.64%**.
- Onduleur à 3 niveaux sans filtre : **3.53%**.
- Onduleur à 5 niveaux sans filtrer : **3.36%**.

Ces résultats montrent que :

- Malgré l'ajout d'un filtre, l'onduleur à 2 niveaux présente un taux de distorsion harmonique élevé, en raison de sa commutation binaire (**2 niveaux de tension seulement**) ce qui produit davantage d'harmonique.
- L'onduleur à 3 niveaux sans filtre génère déjà moins d'harmonique, grâce à sa capacité de produire des formes d'onde plus proche d'une sinusoïde.
- L'onduleur à 5 niveaux présente le meilleur comportement en termes de qualité de courant injecté, même sans filtre, en réduisant significativement le THD grâce à ses niveaux intermédiaires de tension.

### **THD en tension :**

- Onduleur à 2 niveaux avec filtre : **0.26%**.
- Onduleur à 3 niveaux sans filtre : **0.23%**.
- Onduleur à 5 niveaux sans filtrer : **0.16%**.

Cela indique que :

- Les distorsions de tension sont très faibles pour tous les cas, grâce à l'impédance de réseau qui agit comme un filtre naturel.
- Toutefois, plus le nombre de niveaux augmente, plus la tension en sortie est lissée, même sans recours à un filtre.
- Le THD en tension suit la même tendance que celui de courant, confirmant la supériorité qualitative des onduleurs multiniveaux pour une injection harmonique réduite dans le réseau.



### **III.4. La comparaison :**

Voici un tableau de comparaison clair et synthétique entre les trois types d'onduleurs étudiés du point de vue économique, technique et qualitatif :

Critères	2 niveaux avec filtre	3 niveaux sans filtre	5 niveaux sans filtre
Cout totale	Élevé	Modère	Elevé
Complexité de commande	Faible	Moyenne	Elevé
Besoin d'un filtre externe	Oui	Non	Non
THD de courant	4.64 %	3.53 %	3.36 %
THD de tension	0.26 %	0.23 %	0.16 %
Qualité des formes d'onde	Moyenne	Bonne	Excellente
Rendement énergétique	Faible	Bon	Très bon
Maintenance	Moyenne	Moyenne	Complexe
Fiabilité à long terme	Moyenne	Bonne	Bonne mais dépend du design
Application optimale	Petites puissance, solutions simples	Moyennes à grandes installations	Grande installations exigeantes
Rentabilité globale	Faible	Meilleure	Bonne si rentabilisée

**Tableau III.2 :** la comparaison entre les 3 cas.

### **CONCLUSION :**

A travers a cette étude comparative des structures d'onduleurs ont 2, 3 et 5 niveaux, il a été démontré que l'augmentation du nombre de niveaux dans une architecture d'onduleur permet une amélioration significative de la qualité de l'énergie injectée dans le réseau. Malgré l'utilisation d'un filtre, l'onduleur à 2 niveaux reste moins performé que les onduleurs

multiniveaux sans filtre, tant en termes de distorsion harmonique que de qualité de forme d'onde.

Les résultats de simulation ont confirmé que les onduleurs ont 3 et 5 niveaux offrent une réduction notable du THD, avec un avantage particulier pour l'onduleur à 5 niveaux, qui présente les meilleures performances en matière de qualité du signal, même sans filtre externe. En revanche, cette amélioration se fait au prix d'une complexité de commande plus élevée et d'un coût de réalisation supérieur. Donc dans notre cas étudié nous constatons que l'onduleur à 3 niveaux sans filtre est le meilleur à utiliser.

En conclusion, les structures multiniveaux s'avèrent particulièrement adaptées aux applications nécessitant une injection d'énergie de haute qualité dans le réseau, notamment dans les systèmes photovoltaïques connectés à des charges non linéaires. Le choix du type d'onduleur doit toutefois prendre en compte un compromis entre la performance, la complexité, le coût et les exigences spécifiques de l'installation envisagée.

---

## ***CONCLUSION GENERALE***

---

L'étude menée dans ce mémoire confirme la supériorité des structures d'onduleur multiniveaux dans les systèmes photovoltaïque connectés au réseau, notamment dans des contextes impliquant des charges non linéaires. Les simulations réalisés démontrent que l'augmentation des nombres des niveaux permet de réduire significativement les distorsions harmoniques, d'améliorer la qualité de signal injecté, et d'assurer une meilleur efficacité énergétique.

Parmi les structures évaluées, l'onduleur à 5 niveaux s'est distingué par sa performance exceptionnelle, bien que sa complexité de commande et son coût soient plus élevés. En revanche, l'onduleur à 3 niveaux sans filtre représente un compromis optimal entre performance, coût et simplicité de mise en œuvre, ce qui en fait une solution adapté pour de nombreuses applications réelles.

Ainsi, le choix de la structure d'onduleur doit être orienté en fonction des besoins spécifiques de l'installation, en tenant compte des contraintes technique, économiques et environnementales. Ce travail ouvre également des perspectives pour l'optimisation des stratégies de commande et la réduction des composants passifs externes dans les systèmes d'énergie renouvelables.

---

- [1] « Le photovoltaïque fonctionnement et technologie » par BRUXELLES ENVIRONNEMENT IBGE.
- [2] B. Flèche, D. Delagnes, « Energie solaire photovoltaïque », STI ELT, juin 2007.
- [3] H. BARKA, B. MAKKAoui, A. RAHMANI, « Modélisation et contrôle d'un système photovoltaïque connecte au réseau électrique », Université-Ain-Témouchent- Belhadj Bouchaib, 2022.
- [4] S. ALLAGUI, S. LABIOD, « Etude et simulation d'un système photovoltaïque », Université Badji Mokhtar- Annaba, juin 2021
- [5] K. HELALI, « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative », Université Mouloud Mammeri- Tizi-Ouzou, juin 2012.
- [6] R. RADBEH « Réalisation et caractérisation des cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones ». Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2008
- [7] A. ZIDANE, M. SAHTOUT, « Les systèmes photovoltaïques connectes au réseau », Université Badji Mokhtar- Annaba, juin 2017
- [8] F. Zouache, « Etude de la concentration solaire sur les performances des systèmes photovoltaïques ». Mémoire de magister en Electronique, Université Mentouri de Constantine 2009.
- [9] <https://theses.hal.science/tel-00377788v1>
- [10] R. RADBEH, « Réalisation et caractérisation de cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones », Université De Limoges, Décembre 2008.
- [11] M.Y. GOHMES, B. DJELLALI, « Modélisation et commande d'un système PV connecté au réseau électrique utilisant DSTATCOM », Université Kasdi Merbah Ouargla, 2020.
- [12] <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01749555v1>
- [13] M. DADJAR, S.A. HEDLI, « Etude et simulation d'un système GPV connecté au réseau électrique alimente une charge linéaire et non linéaire », Université Badji Mokhtar- Annaba, 2024.
- [14] E.M.Berkouk, « Contribution à la Conduite des Machines Monophasées et Triphasées Alimentées par des Convertisseurs Directs et Indirects, Applications aux Gradateurs et Onduleurs Multiniveaux », Thèse de Doctorat, CNAM 1995.
- [15] N. MESBAHI « Contribution à l'Etude des Performances des Onduleurs Multiniveaux sur les Réseaux de Distribution », Université Badji Mokhtar- Annaba, 2014.
- [16] <https://www.energgreen.com/fr-BE/produits/panneaux-solaires/fonctionnement>
-

- [17] T. Tran-Quoc, R. Caire, « La distribution d'énergie électrique en présence de production décentralisée », éditeur LAVOISIER, 2010.
- [18] Y. Ueda, « Analytical Results of Output Restriction Due To the Voltage Increasing of Power Distribution Line in Grid-Connected Clustered PV Systems », 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005.
- [19] C. DJILI, « Etude d'impact d'une centrale photovoltaïque sur un réseau électrique », Université Mouloud Mammeri- Tizi-Ouzou, juillet 2017.
- [20] S. FELLOUAH, S. MESBAHI, « Etude d'un system photovoltaïque connecte au réseau », Université Mouloud Mammeri- Tizi-Ouzou, juillet 2015.
- [21] H. Colin, C. Duvauchelle, G. Moine, Y. Tanguy, B. Gaiddon, T. Tran-Quoc, « Raccordement des installations photovoltaïques au réseau public de distribution électrique à basse tension », ESPRIT, avril 2010.
- [22] <https://theses.hal.science/tel-00721980v1>
- [23] P. Loenvenbruck, «Impact of Distributed Generation on Losses, Draw Off Costs from Transmission Network and Investments of The French Distribution Network Operator Erdf », CIRED, juin 2009.
- [24] Y. MEDDOUR, Z. YAZI, « Etude de raccordement d'un système photovoltaïques au réseau électrique », Université Kasdi Merbah Ouargla, 2015.
- [25] State of the art on dispersed PV power generation: publications review on the impact of PV Distributed Generation and Electricity networks », IEE PV Upscale, 2007
- [26] Halcrow Group, DTI, «Co-ordinated experimental research into power interaction with the supply network – Phase 1» (ETSU S/P2/00233/REP), 1999.
- [27] D. BENDIB, « Etude et réalisation d'une commande MLI on-line sur circuit FPGA », mémoire de magister à l'école nationale polytechnique, juin 2009.
- [28] [socomec.fr/fr/definition-et-usages-dun-onduleur](http://socomec.fr/fr/definition-et-usages-dun-onduleur)
- [29] A.E. BOUKHDENNA, A. NEMER, « Étude Comparative des Différentes Structures des Onduleurs Multiniveaux pour le Raccordement des Systèmes Photovoltaïques au Réseau Électrique », Université Badji Mokhtar- Annaba, 2021.
- [30] <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01749555v1>
- [31] S. TAOUCHE, « Commande et réalisation d'un convertisseur multi-niveau (MLDC) », Université Saad Dahlab, Blida-1, octobre 2020.
- [32] A. Nabae, I. Takahashi, H. Akagi, «A new neutral-point-clamped PWM inverter », IEEE Transactions on Industry Applications, 1981.
- [33] K. BERRAHAL, « Application d'un onduleur multi-niveaux à la compensation de la puissance réactive », Université de Batna -2-, octobre 2018.
-

- [34] F. BECKER, « Contribution à la continuité de service des convertisseurs statiques multiniveaux », Université de Lorraine, decembre 2017.
- [35] N. MESBAHI, « Contribution à l'Etude des Performances des Onduleurs Multiniveaux sur les Réseaux de Distribution », Université Badji Mokhtar- Annaba, 2014.
- [36] J. Rodríguez, J.S. Lai, F.Z. Peng, « Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications », IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002.
- [37] M.H. Rashid, « Power Electronics: Circuits, Devices and Applications (4th ed.) ». Pearson Education, 2013.
- [38] Jean Bonal, Guy Séguier, « Entraînements Electriques à Vitesse Variable», Technique et Documentation, décembre 1998.
- [39] H. BENATTAR, N. ABDELLAOUI, « Etude et Simulation d'un Onduleur Multi niveaux pour Système Photovoltaïque », Université Djillali Liabes De Sidi-Bel-Abbes, septembre 2020.
- [40] M. BOUSEHABA, « Réalisation d'une commande mli à choix multiple », Université Abou Bekr Belkaïd De Tlemcen, juin 2017.
- [41] V.G. Agelidis, H.C. Goh, « Low Distortion Variable Level PWM Technique », IEE Proc – Electr. Power Appl, March 1998.
- [42] L.M. Tolbert, F.Z. Peng, T.G. Habetler, « Multilevel Converters for Large Electric Drives », IEEE Transactions on Industry Applications, 1999.
- [43] J.N. Chiasson, L.M. Tolbert, K.J. McKenzie, Z. Du, « Control of a Multilevel Converter Using Resultant Theory ». IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2003.
- [44] C. Rizet, « Amélioration du rendement des alimentations sans interruption », 2011.
- [45] M. MCHICHOU, « Étude et conception d'un onduleur photovoltaïque », Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, 2015.
- [46] XUEYANG JIANG, « Étude comparative de structures de convertisseurs pour les systèmes photovoltaïques connectés à un réseau électrique moyenne tension », Université Du Québec À Trois-Rivières, aout 2019.
- [47] J. Ebrahimi, E. Babaei, G. B. Gharehpetian, « A new multilevel converter topology with reduced number of power electronic components », IEEE Trans, 2011.
- [48] K.D. Teryima, A. David, S.T. Awuhe, « THD Analysis of an Overlapping Carrier Based SPWM for a 5-Level Cascaded H-bridge Multilevel Inverter », International Journal of Advanced Science and Technology, 2016.
- [49] S. A. Gonzalez, S. A. Verne, M. I. Valla, « Multilevel Converters for Industrial Applications », Boca Raton : CRC Press, 2013.
-

- [50] A. Nami, F. Zare, A. Ghosh, F. Blaabjerg, « A Hybrid Cascade Converter Topology With Series-Connected Symmetrical and Asymmetrical Diode-Clamped H-Bridge Cells », *Power Electron. IEEE Trans. On*, février 2011.
- [51] Jose Rodriguez, Jih-Sheng Lai, Fang Zheng Peng, «Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2002.
- [52] C. AOUN, C. HARABI, « Commande d'une cellule d'onduleur multiniveaux moyenne tension », *École Nationale Polytechnique*, 2024.
- [53] D. G. H. A. Lipo, « Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice », *Wiley-Blackwell*, 2003.
- [54] T. Meynard, H. Foch, « Multi-level conversion: high voltage choppers and voltage source inverters », 1992.
- [55] Xiaoming Yuang, H. Stemmler, I. Barbi, « Self-balancing of the clamping capacitor voltages in the multilevel capacitor-clamping-inverter under sub-harmonic PWM modulation », *IEEE Trans. Power Electron. Mars* 2001.
- [56] J. Rodriguez, « Multilevel Converters: An Enabling Technology for High-Power Applications », *Proc. IEEE*, novembre 2009.
- [57] XUEYANG JIANG, « Étude comparative de structures de convertisseurs pour les systèmes photovoltaïques connectés à un réseau électrique moyenne tension », *Université Du Québec À Trois-Rivières*, aout 2019.
- [58] M. AIMÉ, « Évaluation et optimisation de la bande passante des convertisseurs statiques Application aux nouvelles structures multicellulaires », *PhD thésis, Institut National Polytechnique De Toulouse*, 2003.
- [59] R. OMAR AMRANI, « Etat de l'art sur les convertisseurs AC-AC multiniveaux », *Ecole supérieur des sciences appliquées Alger*, septembre 2010.
-