

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

UNIVERSITE AMAR TELIDJI DE LAGHOUAT



**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**Département d'Electrotechnique**

**Mémoire**

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en Electrotechnique

Option : *Commande Electrique*

Présenté par :

***KADARI Khaled Housseem Eldin***

**&**

***MAIZI Abdallah***

**THEME**

***Etude d'un Hacheur 'Boost' de type 'KY' :  
Application à un Système PV  
Connecté au Réseau***

**Soutenu devant le jury composé de :**

*Mr. SAROUTE Mohamed*

*Mr. BENDJEDIA Bachir*

*Mme. BENLARBI Keltoum*

*Mr. MOKRANI Lakhdar*

*Président*

*Examineur*

*Encadreur*

*Co-encadreur*

***Promotion 2023/2024***

**ملخص:**

يعنى العمل المدرج في هذه المذكرة بدراسة و محاكاة نظام كهروضوئي موصول بالشبكة الكهربائية عبر مقلب إلكترونيك الإستطاعة مستمر/مستمر من نوع 'KY' رافع للجهد على التسلسل مع مقلب مستمر/متناوب ثلاثي الأطوار ذي النبضات المعدلة العرض . القاطع الرفع للجهد من نوع 'KY' مصمم لتجاوز القيود التي تواجهها القواطع التقليدية المستخدمة في الأنظمة الكهروضوئية، حيث ينتج تياراً مستمراً في المخرج، خلافاً للمقلبات التقليدية المماثلة التي تولد تياراً متموجاً. هذه الخاصية تقلل من تموجات الجهد المخرج وتحسن من كفاءة النظام الطاقوية. تركز الجزء الأول من المذكرة على المولد الكهروضوئي، من خلال تناول مكوناته، مبدأ عمله، خصائصه ونمذجته. بعد ذلك، تم تقديم نمذجة المقلبات مستمر/مستمر بما في ذلك المقلب التقليدي والمقلب من نوع 'KY' ، بالإضافة إلى المموجين ذوي النبضات المعدلة العرض اللذين شملتهما الدراسة (مموجين ثلاثي الأطوار ذوي مستويين وثلاثة مستويات جهد). علاوة على ذلك، تم العرض التفصيلي لطريقة تغيرات الناقلية المستخدمة لتتبع نقطة الإستغلال ذات الإستطاعة القصوى، وكذلك التحكم غير المباشر والمنفصل في الإستطاعة الفعالة وغير الفعالة المرسله إلى الشبكة عبر تعديل مستوى جهد الطابق المستمر والتيارات الفعالة وغير الفعالة. تمت محاكاة هذا النظام الكهروضوئي المتصل بالشبكة باستخدام أداة *MATLAB/SIMULINK*. وقد أجريت عدة تجارب محاكاة لإثبات مساهمة القاطع الرفع للجهد من نوع 'KY' في تحسين أداء النظام وجودة الطاقة، من أجل قيم مختلفة للإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة، مقارنة بالقاطع الرفع للجهد التقليدي.

**كلمات مفتاحية :** مولد كهروضوئي، قاطع رافع للجهد تقليدي ومن نوع 'KY'، مموجات ثلاثية الأطوار ذات مستويين وثلاث مستويات جهد و ذات النبضات المعدلة العرض ، نظام كهروضوئي متصل بالشبكة الكهربائية، تتبع نقطة الإستغلال ذات الإستطاعة القصوى المؤسسة على طريقة تغيرات الناقلية، التحكم في جهد الطابق المستمر، التحكم في التيارات الفعالة وغير الفعالة، أداء النظام، جودة الطاقة.

**Résumé :** Ce mémoire porte sur une étude concernant un système PhotoVoltaïque (*PV*) connecté au réseau électrique via un convertisseur *DC-DC* survolteur de type 'KY' en cascade avec un convertisseur *DC-AC* triphasé à MLI. Conçu pour surmonter les limitations des convertisseurs traditionnels utilisés dans les systèmes de production d'énergie solaire, le convertisseur 'KY' produit un courant continu en sortie, contrairement aux hacheurs survolteurs conventionnels qui génèrent un courant ondulé. Cette caractéristique permet de réduire l'ondulation de la tension de sortie et d'améliorer l'efficacité énergétique du système. La première partie du mémoire se concentre sur le générateur photovoltaïque, en abordant ses composants, son principe de fonctionnement, ses caractéristiques et sa modélisation. Ensuite, la modélisation des convertisseurs *DC-DC*, y compris l'hacheur survolteur classique et l'hacheur survolteur de type 'KY', ainsi que les deux convertisseurs *DC-AC* à MLI concernés dans ce travail (onduleurs triphasés à deux et à trois niveaux), est présentée. De plus, la méthode de l'Incrémentation de la Conductance (*IC*) utilisée pour la commande *MPPT*, ainsi que la commande découplée et indirecte des puissances active et réactive injectées au réseau via le réglage de la tension du bus continu et des courants actifs et réactifs, sont détaillées. Ce système *PV* connecté au réseau a été simulé à l'aide de l'outil 'MATLAB/SIMULINK'. Plusieurs simulations ont été réalisées pour démontrer l'apport du convertisseur survolteur de type 'KY' sur les performances du système et la qualité d'énergie, pour différentes valeurs d'ensoleillement et de température, comparativement au convertisseur *DC-DC* survolteur classique.

**Mots clés :** Générateur *PV*, Hacheurs survolteurs classique et de type 'KY', Onduleurs triphasés à deux et trois niveaux à MLI, Système *PV* connecté au réseau, *MPPT* à Conductance Incrémentale, Commande de la tension du bus continu, Commande des courants actif et réactif, Performance du système, Qualité d'énergie.

**Abstract** : This dissertation concerns a study on a PhotoVoltaic (*PV*) system connected to the grid via a '*KY*' *DC-DC* boost converter cascaded with a three-phase *PWM DC-AC* converter. Designed to overcome the limitations of traditional boost converters used in solar power generation systems, the '*KY*' converter produces an output smooth direct current, unlike conventional boost choppers which generate pulsating current. This feature helps reduce output voltage ripples and improve the system energy efficiency. The first part of the dissertation focuses on the *PV* generator, addressing its components, its operating principle, its characteristics and its modeling. Then, the modeling of *DC-DC* converters, including the conventional boost chopper and the '*KY*' boost chopper, as well as the two *DC-AC PWM* converters concerned in this work (three-phase two and three level inverters), is presented. In addition, the Conductance Increment (*IC*) method used for *MPPT* control, as well as the decoupled and indirect control of the active and reactive powers injected into the grid via the *DC*-bus voltage and active/reactive currents control, are detailed. This grid-connected *PV* system has been simulated using the '*MATLAB/SIMULINK*' tool. Several simulation tests has been carried out to show the contribution of the '*KY*' boost converter on the system performance and energy quality, for different operating conditions of sunshine and temperature, compared to the conventional *DC-DC* boost converter.

**Key words**: *PV* generator, Conventional and '*KY*' boost choppers, Three-phase two and three level *PWM* inverters, Grid-connected *PV* system, Incremental Conductance *MPPT*, *DC* bus voltage control, Active and reactive currents control, Performance of the system, Energy quality.

# *Dédicaces*

## Dédicace

*Tout d'abord, louange à Allah de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Ensuite, je tiens à dédier cet humble travail :*

- *A ma tendre mère 'Fatima' ;*
- *A mon très cher père 'Abdelkader' ;*
- *A mes sœurs : 'Meriem', 'Asma' et 'Amina'*
- *A mon binôme 'Abdallah' ;*
- *A mes meilleurs amis : 'Riad', 'Mourad', 'Djalal', 'Kamal', 'Abdelheke', 'Mohamed', 'Amine', 'Ammar', 'Abdenour' et 'Obaïda' ;*
- *A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.*

*Khaled Housseem Eldin*

## Dédicace

*Tout d'abord, louange à Allah de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Ensuite, je tiens à dédier cet humble travail :*

- *A ma tendre mère 'Azaïba' ;*
- *A mon très cher père 'Abdelkader' ;*
- *A mon binôme 'Khaled' ;*
- *A mes meilleurs amis : 'Abdelatif', 'Ayoub', et 'Omar' ;*
- *A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.*

*Abdallah*

# *Remerciements*

## Remerciements

Tout d'abord et avant tout, louange à 'Allah' pour tous les bienfaits qu'il a mis à notre disposition, c'est lui qui nous a donné les forces morales et physiques et nous a guidés dans le chemin de la science. Grâce à dieu nous avons pu compléter notre formation par ce modeste travail de mémoire de fin d'études qui, nous l'espérons, sera bénéfique à d'autres étudiants.

Nous tenons à remercier vivement nos encadreurs Madame **Keltoum BENLARBI** et Monsieur **Lakhdar MOKRANI** pour leur constante disponibilité à notre égard et pour leur précieuse aide, ce qui nous a permis de mener à bien ce travail.

Nous adressons toute notre gratitude aux membres du jury qui ont eu l'amabilité d'accepter de lire et de juger notre travail à savoir Messieurs **Mohamed Saroute** et **Bachir Bendjedia**.

Nous remercions tous les enseignants de la faculté de Technologie en général, et spécialement les enseignants du département d'Electrotechnique qui ont contribué largement à notre formation.

Nous remercions particulièrement tous les enseignants qui nous ont fait profiter de leur savoir, tout a long nos études, le personnel administratif et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin et nous ont aidé pour l'élaboration de ce travail.

Nous remercions d'autre part l'ensemble des étudiants de notre faculté et surtout nos camarades de promotion, avec lesquels nous avons passé cinq merveilleuses années.

A la fin, permettez-nous d'adresser nos sincères remerciements à tous nos amis, à nos proches et à toute personne qui nous a encouragé et cru en nous.

***Abréviations  
et  
Nomenclature***

# Abréviations et Nomenclature

- *Abréviations*

<i>Abréviation</i>	<i>Signification</i>
<i>PV</i>	<i>PhotoVoltaïque</i>
<i>PPM</i>	<i>Point à Puissance Maximale</i>
<i>MPP</i>	<i>Maximum Power Point</i>
<i>MPPT</i>	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
<i>PO</i>	<i>Perturbation et Observation</i>
<i>DC</i>	<i>Direct Current</i>
<i>AC</i>	<i>Alternative Current</i>
<i>MLI</i>	<i>Pulse Width Modulation</i>
<i>GPV</i>	<i>Générateur PhotoVoltaïque</i>
<i>IGBT</i>	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
<i>MOSFET</i>	<i>Metal Oxide Field Effect Transistor</i>
<i>2N</i>	<i>à deux niveaux (onduleur)</i>
<i>3N</i>	<i>à trois niveaux (onduleur)</i>
<i>PLL</i>	<i>Phase Locked Loop</i>
<i>IC</i>	<i>Incremental Conductance</i>
<i>KY</i>	<i>Type d'hacheur 'boost'</i>
<i>CCM</i>	<i>Mode de Conduction Continue</i>
<i>DCM</i>	<i>Mode de Conduction Discontinue</i>
<i>PWM</i>	<i>Pulse Width Modulation</i>

• *Nomenclature*

<i>Symbole</i>	<i>Signification</i>	<i>Unité</i>
$I_m$	<i>Courant du PPM</i>	(A)
$V_m$	<i>Tension du PPM</i>	(V)
$P_m$	<i>Puissance maximale (du PPM)</i>	(W)
$I_{cc}$	<i>Courant de court-circuit</i>	(A)
$V_{co}$	<i>Tension de circuit ouvert</i>	(V)
$I_{pv}$	<i>Courant du GPV</i>	(A)
$V_{pv}$	<i>Tension du GPV</i>	(V)
$I_{ph}$	<i>Photo courant</i>	(A)
$I_{sh}$	<i>Courant shunt</i>	(A)
$I_d$	<i>Courant de diode</i>	(A)
$V_d$	<i>Tension aux bornes de la diode</i>	(A)
$I_{sat}$	<i>Courant de saturation</i>	(A)
$G_{ref}$	<i>Ensoleillement de référence (1000 W/m<sup>2</sup>)</i>	(W/m <sup>2</sup> )
$T_{ref}$	<i>Température de référence (25°C)</i>	(°C)
$\Delta G$	<i>Variation de l'ensoleillement</i>	(W/m <sup>2</sup> )
$T_{stc}$	<i>Température dans les conditions standards de fonctionnement</i>	(°C)
$T_c$	<i>Température dans des conditions quelconques</i>	(°C)
$\Delta I_{pv}$	<i>Variation du courant par rapport à l'ensoleillement et à la température</i>	(A)
$\Delta V_{pv}$	<i>Variation de la tension par rapport à l'ensoleillement et à la température</i>	(V)
$\eta$	<i>Rendement de la cellule</i>	-
$T_j$	<i>Température de la cellule</i>	(°K)
$T_a$	<i>Température ambiante</i>	(°C)
$A$	<i>Facteur d'idéalité de la diode</i>	

$K$	Constante de Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$ )	( $^\circ\text{K}$ )
$q$	Charge électrique d'un électron ( $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ )	( $^\circ\text{C}$ )
$E_g$	Tension de seuil de la diode (1.12 eV)	(V)
$I_o$	Courant de saturation de la diode	(A)
$M$	Point de puissance maximale	
$P_{pv}$	Puissance photovoltaïque	(W)
$F_e$	Fréquence de découpage ou de commutation	(Hz)
$P_{out}$	Puissance de sortie	(W)
$C$	Capacité du condensateur	(F)
$T_e$	Période de découpage ou de commutation	(s)
$S$	Surface de la cellule	( $\text{m}^2$ )
$FF$	Facteur de forme	-
$R_{sh}$	Résistance shunt	( $\Omega$ )
$R_s$	Résistance série	( $\Omega$ )
$\alpha_{sc}$	Coefficient de variation du courant due à la température ( $\text{A}/^\circ\text{C}$ )	( $^\circ\text{C}$ )
$\beta_{oc}$	Coefficient de variation de la tension due à la température ( $\text{V}/^\circ\text{C}$ )	( $^\circ\text{C}$ )
$\Delta T_c$	Variation de la température	( $^\circ\text{C}$ )
$\alpha$	Rapport cyclique de l'hacheur	-
$D$	Gain d'amplification de tension de l'hacheur ( $V_s/V_e$ )	
$f$	Fréquence du réseau	(Hz)
$\omega$	Pulsation du réseau	(rd/s)
$I_L$	Courant de l'inductance	(A)
$G_c$	Conductance	( $\Omega^{-1}$ )
$dG_c$	Variation de la conductance	( $\Omega^{-1}$ )
$I_e$	Courant d'entrée	(A)
$V_e$	Tension d'entrée	(V)
$V_L$	Tension aux bornes de l'inductance	(V)
$I_{c1,2}$	Courant des condensateurs $C_{1,2}$ respectivement	(A)

$I_s$	<i>Courant de sortie</i>	(A)
$V_s$	<i>Tension de sortie</i>	(V)
$V_{sw}$	<i>Tension aux bornes de 'S'</i>	(V)
$V_{an}, V_{bn} \& V_{cn}$	<i>Tensions simples à la sortie de l'onduleur</i>	(V)
$V_{dc}$	<i>Tension du bus continu</i>	(V)
$V_{ao}, V_{bo} \& V_{co}$	<i>Tensions de sortie des bras a, b, et c respectivement</i>	(V)
$P_g$	<i>Puissance active injectée au réseau</i>	(W)
$Q_g$	<i>Puissance réactive injectée au réseau</i>	(VAr)
$V_{ond-d,q}$	<i>Composantes de tension à la sortie de l'onduleur dans le repère 'dq'</i>	(V)
$I_{d,q}$	<i>Composantes de courant à la sortie de l'onduleur dans le repère 'dq'</i>	(A)
$R_{tot}$	<i>Résistance totale équivalente de la liaison entre onduleur et réseau</i>	( $\Omega$ )
$L_{tot}$	<i>Inductance totale équivalente de la liaison entre onduleur et réseau</i>	(H)
$I_d$	<i>Courant actif</i>	(A)
$I_q$	<i>Courant réactif</i>	(A)
$V_{ref}$	<i>Tension de référence</i>	(V)
$V_1$	<i>Amplitude de la tension fondamentale</i>	(V)
$V_{refa,b,c}$	<i>Trois tensions de référence</i>	(V)

## ***Liste des Figures***

<b>Figure</b>	<b>Page</b>
<b>Figures du Chapitre I</b>	
<b>Figure I.1</b> Différents types du rayonnement solaire	8
<b>Figure I.2</b> Spectre du rayonnement solaire	9
<b>Figure I.3</b> Cellules solaires	9
<b>Figure I.4</b> Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	11
<b>Figure I.5</b> Cellules photovoltaïques associées en parallèle	15
<b>Figure I.6</b> Cellules photovoltaïques associées en série	16
<b>Figure I.7</b> Schéma équivalent d'un module PV : Modèle à une diode	17
<b>Figure I.8</b> Caractéristiques <i>I-V</i> et <i>P-V</i> d'un module PV de 305 W de type <i>SPR-305-WHT-D</i>	20
<b>Figure I.9</b> Module PV de 305 W de type <i>SPR-305-WHT-D</i>	21
<b>Figure I.10</b> Schéma d'un générateur PV muni de diodes by-pass et d'une diode anti-retour	23
<b>Figure I.11</b> Système photovoltaïque raccordé au réseau	24
<b>Figure I.12</b> Schéma d'un système PV autonome	24
<b>Figure I.13</b> Schéma de système PV hybride	25
<b>Figures du Chapitre II</b>	
<b>Figure II.1</b> Système photovoltaïque connecté directement au réseau	29
<b>Figure II.2</b> Système photovoltaïque connecté via un bus continu-continu	30
<b>Figure II.3</b> Schéma de principe d'un hacheur survolteur ou parallèle ( <i>Boost</i> )	32
<b>Figure II.4</b> Caractéristiques des tensions et courants d'un convertisseur ' <i>Boost</i> '	33
<b>Figure II.5</b> Schéma de base d'un convertisseur <i>DC-DC</i> ' <i>boost</i> ' de type <i>KY</i>	35
<b>Figure II.6</b> Fonctionnement du convertisseur ' <i>boost</i> ' de type ' <i>KY</i> ' en mode <i>CCM</i>	36
<b>Figure II.7</b> Troisième séquence de fonctionnement du convertisseur ' <i>boost</i> ' de type <i>KY</i> en mode <i>DCM</i>	37
<b>Figure II.8</b> Schéma de principe d'une conversion <i>DC-AC</i>	38
<b>Figure II.9</b> Structure d'un onduleur de tension triphasé conventionnel raccordé au réseau	39
<b>Figure II.10</b> Schéma d'un onduleur triphasé à trois niveaux	39

<b>Figures du Chapitre III</b>	
<b>Figure III.1</b> Blocs de commande des deux étages de conversion du système PV étudié	43
<b>Figure III.2</b> Bloc de commande d'un onduleur triphasé à MLI couplé au réseau	45
<b>Figure III.3</b> Schéma de principe d'une commande MPPT	47
<b>Figure III.4</b> Organigramme de la méthode de la conductance incrémentale	49
<b>Figure III.5</b> Amplitude de la composante fondamentale des tensions de sortie d'un onduleur en fonction du taux de modulation de la MLI sinus-triangle	51
<b>Figure III.5</b> Commande à MLI du bras (a) d'un onduleur triphasé à trois niveaux	52
<b>Figures du Chapitre IV</b>	
<b>Figure IV.1</b> Schéma synoptique du système PV étudié	55
<b>Figure IV.2</b> Profils de l'éclairement et de la température appliqués au GPV du système étudié	56
<b>Figure IV.3</b> Caractéristiques I-V et P-V du générateur PV étudié pour deux cas différents : a) Différents éclairagements et $T=25^{\circ}\text{C}$ ; b) Différentes températures et $G=1000\text{W}/\text{m}^2$	57
<b>Figure IV.4</b> Système PV de 100-kW connecté au réseau via un hacheur <i>boost</i> et un onduleur à 2N	59
<b>Figure IV.5</b> Bloc de commande de l'hacheur assurant la <i>MPPT</i>	60
<b>Figure IV.6</b> Bloc de commande de l'onduleur triphasé à <i>MLI</i> à 2N garantissant une commande indirecte des puissances active et réactive	60
<b>Figure IV.7</b> Puissance du GPV et puissance active injectée au réseau dans le cas d'un conditionneur de puissance constitué d'un hacheur survolteur associé à un onduleur à deux niveaux	61
<b>Figure IV.8</b> Allure du courant et de la tension du réseau dans le cas d'un onduleur à deux niveaux	61
<b>Figure IV.9</b> Allure de la tension d'entrée (du bus continu) d'un onduleur à deux niveaux	62
<b>Figure IV.10</b> Analyse spectrale par <i>FFT</i> du courant injecté au réseau dans le cas d'un conditionneur de puissance à base d'un hacheur <i>boost</i> et un onduleur à deux niveaux	63
<b>Figure IV.11</b> Système PV de 100-kW connecté au réseau via un hacheur <i>boost</i> et un onduleur à 3N	64
<b>Figure IV.12</b> Puissance du GPV et puissance active injectée au réseau dans le cas d'un conditionneur de puissance à base d'un hacheur ' <i>boost</i> ' et d'un onduleur à <i>MLI</i> à trois niveaux	65
<b>Figure IV.13</b> Allure du courant et de la tension du réseau dans le cas d'un onduleur à trois niveaux	66

<b>Figure IV.14</b> Allure de la tension d'entrée (du bus continu) d'un onduleur à trois niveaux	67
<b>Figure IV.15</b> Analyse spectrale par <i>FFT</i> du courant injecté au réseau dans le cas du conditionneur de puissance à base d'un hacheur 'boost' et un onduleur trois niveaux	68
<b>Figure IV. 16</b> Système PV de 100-kW connecté au réseau via un hacheur 'boost' de type 'KY' et un onduleur à 2N	69
<b>Figure IV.17</b> Puissance du GPV et puissance active injectée au réseau dans le cas d'un convertisseur de type 'boost' de 'KY' associé à un onduleur à deux niveaux	70
<b>Figure IV.18</b> Allure de la tension et du courant du réseau dans le cas d'un convertisseur de type 'boost' de type 'KY' associé à un onduleur à deux niveaux	71
<b>Figure IV.19</b> Allure de la tension d'entrée (du bus continu) d'un onduleur à deux niveaux dans le cas d'un convertisseur de type 'boost' de type 'KY'	71
<b>Figure IV.20</b> Analyse spectrale par <i>FFT</i> du courant injecté au réseau dans le cas du conditionneur de puissance à base d'un hacheur 'boost' de type 'KY' et d'un onduleur à deux niveaux	72
<b>Figure IV.21</b> Système PV de 100-kW connecté au réseau via un hacheur 'boost' de type 'KY' et un onduleur à 3N	74
<b>Figure IV.22</b> Puissance du GPV et puissance active injectée au réseau dans le cas d'un convertisseur de type 'boost' de type 'KY' associé à un onduleur à trois niveaux	75
<b>Figure IV.23</b> Allure de la tension et du courant du réseau dans le cas d'un convertisseur de type 'boost' de type 'KY' associé à un onduleur à trois niveaux	75
<b>Figure IV.24</b> Allure de la tension d'entrée (du bus continu) d'un onduleur à trois niveaux dans le cas d'un convertisseur de type 'boost' de type 'KY'	76
<b>Figure IV.25</b> Analyse spectrale par <i>FFT</i> du courant injecté au réseau dans le cas du conditionneur de puissance à base d'un hacheur 'boost' de type 'KY' et d'un onduleur à trois niveaux	76

## ***Liste des Tableaux***

<b>Tableau</b>	<b>Page</b>
<b>Tableaux du Chapitre I</b>	
<b>Tableau I.1</b> Performances des principaux types de cellules PV	13
<b>Tableau I.2</b> Paramètres électriques du module PV 'Sun power SPR-305-WHT'	21
<b>Tableaux du Chapitre II</b>	
<b>Tableau II.1</b> Configurations possibles d'un bras de l'onduleur à trois niveaux	40
<b>Tableaux du Chapitre IV</b>	
<b>Tableau IV.1</b> Comparaison des performances du système PV étudié pour les quatre différents cas de convertisseurs	77
<b>Tableaux de l'annexe</b>	
<b>Tableau A.1</b> Paramètres électriques du module photovoltaïque 'Sun power SPR-305-WHT', Tableau I.2 rappelé dans l'annexe	87
<b>Tableau A.2</b> Paramètres électriques de l'hacheur 'boost' classique	88
<b>Tableau A.3</b> Paramètres électriques de l'hacheur 'boost' de type 'KY'	88
<b>Tableau A.4</b> Paramètres électriques de l'onduleur conventionnel	89
<b>Tableau A.5</b> Paramètres électriques du filtre LC à la sortie de l'onduleur	89
<b>Tableau A.6</b> Paramètres électriques du transformateur de couplage avec le réseau	89
<b>Tableau A.7</b> Paramètres électriques du réseau	90

# ***Sommaire***

<i>Titre</i>	<i>Page</i>
<b><i>Introduction Générale</i></b>	<i>1</i>
<b><i>Chapitre I Généralités sur les Systèmes Photovoltaïques</i></b>	<i>4</i>
<i>I.1. Introduction</i>	<i>5</i>
<i>I.2. Ressources des énergies renouvelables – énergie solaire</i>	<i>5</i>
<i>I.3. Rayonnement solaire – Notions préliminaires, types et spectre</i>	<i>7</i>
<i>I.3.1. Types du rayonnement solaire</i>	<i>8</i>
<i>I.3.2. Spectre du rayonnement solaire</i>	<i>8</i>
<i>I.4. Cellule solaire, effet photovoltaïque, types et principe de fonctionnement</i>	<i>9</i>
<i>I.4.1. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque</i>	<i>10</i>
<i>I.4.2. Différents types de cellules solaires</i>	<i>11</i>
<i>I.4.2.1 Cellules poly-cristallines</i>	<i>11</i>
<i>I.4.2.2 Cellules monocristallines</i>	<i>12</i>
<i>I.4.2.3 Cellule en Silicium amorphe</i>	<i>12</i>
<i>I.4.3. Comparaison des performances des différents types de cellules photovoltaïques</i>	<i>13</i>
<i>I.5. Paramètres des cellules photovoltaïques</i>	<i>13</i>
<i>I.5.1. Courant de court circuit</i>	<i>14</i>
<i>I.5.2. Tension à circuit-ouvert</i>	<i>14</i>
<i>I.5.3. Facteur de forme</i>	<i>14</i>
<i>I.5.4. Rendement de la cellule</i>	<i>14</i>
<i>I.6. Association des cellules photovoltaïques</i>	<i>14</i>
<i>I.6.1. Association en parallèle</i>	<i>15</i>
<i>I.6.2. Association en série</i>	<i>16</i>
<i>I.6.3. Association série-parallèle</i>	<i>16</i>
<i>I.7. Modélisation d'un générateur photovoltaïque</i>	<i>17</i>
<i>I.8. Caractéristiques des modules photovoltaïques</i>	<i>19</i>
<i>I.9. Panneau solaire et sa protection</i>	<i>22</i>
<i>I.10. Systèmes photovoltaïques</i>	<i>23</i>
<i>I.10.1. Type des systèmes photovoltaïques</i>	<i>23</i>

<i>I.10.2. Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques</i>	25
<i>I.11. Conclusion</i>	26
<b><i>Chapitre II Convertisseurs Statiques Dédiés aux Systèmes Photovoltaïques</i></b>	27
<i>II.1. Introduction</i>	28
<i>II.2. Architectures des systèmes PV connectés au réseau</i>	28
<i>II.2.1. Système PV connecté directement au réseau</i>	28
<i>II.2.2. Systèmes à bus continu intermédiaire</i>	29
<i>II.3. Convertisseurs statiques dédiés aux systèmes PV</i>	30
<i>II.3.1. Convertisseurs DC-DC dédiés aux systèmes PV</i>	31
<i>II.3.1.1 Hacheur survolteur</i>	32
<i>II.3.1.2 Hacheur survolteur de type 'KY'</i>	34
<i>II.3.2. Convertisseurs DC-AC dédiés aux systèmes photovoltaïques</i>	37
<i>II.3.2.1 Onduleur triphasé conventionnel</i>	38
<i>II.3.2.2 Onduleur triphasé à trois niveaux</i>	39
<i>II.4. Conclusion</i>	41
<b><i>Chapitre III Commande des Convertisseurs Statiques du Système PV Etudié</i></b>	42
<i>III.1. Introduction</i>	43
<i>III.2. Présentation du bloc de commande du système PV étudié</i>	43
<i>III.3. Commande de l'hacheur survolteur</i>	46
<i>III.3.1. Principe d'une commande MPPT</i>	46
<i>III.3.2. Différentes techniques de MPPT</i>	47
<i>III.3.3. Méthode de la conductance incrémentale</i>	47
<i>III.4. Commande de l'onduleur du système PV étudié</i>	49
<i>III.4.1. Technique de MLI sinus-triangle d'un onduleur triphasé à deux niveaux</i>	50
<i>III.4.2. Technique de MLI sinus-triangle d'un onduleur triphasé à trois niveaux</i>	52
<i>III.5. Conclusion</i>	53
<b><i>Chapitre IV Présentation et Discussion des Résultats de Simulation</i></b>	54
<i>IV.1. Introduction</i>	55

<i>IV.2. Présentation du Système PV Etudié</i>	55
<i>IV.3. Présentation et discussion des résultats</i>	58
<i>IV.3.1. Cas d'un conditionneur de puissance à base d'un hacheur 'boost' conventionnel et un onduleur à deux niveaux</i>	58
<i>IV.3.2. Cas d'un conditionneur de puissance à base d'un hacheur 'boost' conventionnel et un onduleur à trois niveaux</i>	63
<i>IV.3.3. Cas d'un conditionneur de puissance à base d'un hacheur 'boost' de type 'KY' et un onduleur à deux niveaux</i>	68
<i>IV.3.4. Cas d'un conditionneur de puissance à base d'un hacheur 'boost' de type 'KY' et un onduleur à trois niveaux</i>	72
<i>IV.4. Comparaison des résultats</i>	76
<i>IV.5. Conclusion</i>	78
<b>Conclusion Générale</b>	79
<b>Annexe</b>	82

# ***Introduction Générale***

# *Introduction générale*

Le développement durable est devenu un impératif mondial pour répondre aux défis environnementaux et énergétiques actuels. Dans ce contexte, les énergies renouvelables émergent comme des solutions essentielles pour assurer une transition vers un avenir énergétique plus propre et plus durable [1].

Parmi ces énergies renouvelables, l'énergie solaire occupe une place prépondérante en raison de son abondance, de sa disponibilité et de sa capacité à être captée et convertie efficacement en électricité.

Les systèmes photovoltaïques (*PV*) représentent une technologie clé dans l'utilisation de l'énergie solaire pour la production d'électricité. Ces systèmes transforment directement la lumière solaire en électricité à l'aide de cellules photovoltaïques. Cependant, la performance globale d'un système *PV* dépend non seulement de la qualité des cellules photovoltaïques, mais également de la conception et de la mise en œuvre des composants associés, tels que les convertisseurs statiques et les systèmes de stockage d'énergie [2].

Dans ce mémoire, nous allons nous intéresser aux systèmes de conversion *PV* où nous allons nous consacrer essentiellement à une étude concernant la commande d'un système *PV* connectée au réseau via une topologie récente de convertisseur *DC-DC boost* de type *KY* en cascade avec un onduleur triphasé à *MLI*.

Dans le premier chapitre, nous entreprendrons une étude sur l'énergie solaire photovoltaïque. Nous aborderons brièvement son historique ainsi que le principe de la conversion *PV*. Nous définirons également la cellule photovoltaïque, en exposant le principe de son fonctionnement. En outre, nous présenterons les modèles et les caractéristiques des modules photovoltaïques, en mettant en évidence les paramètres essentiels qui les définissent. Enfin, nous procéderons à la modélisation d'un générateur photovoltaïque (*GPV*) en vue de son incorporation au modèle du système *PV* étudié.

Le deuxième chapitre portera sur une étude de modélisation des convertisseurs statiques que comprend le système photovoltaïque connecté au réseau électrique étudié. Cette étude inclura la modélisation des convertisseurs *DC-DC* (hacheur survolteur conventionnel et hacheur *boost* de type *KY*), ainsi que les convertisseurs *DC-AC* triphasés à MLI auxquels on s'intéresse dans cette étude, à savoir les onduleurs triphasés et deux et trois niveaux.

Dans le troisième chapitre, nous allons aborder la commande des convertisseurs statiques modélisés. Ensuite, nous examinerons brièvement les différents types de techniques de poursuite du point de puissance maximale (*MPPT* : *Maximum Power Point Tracking* en anglais) tout en accordant une attention particulière à la méthode de la conductance incrémentale que nous allons utiliser dans ce travail. De plus, nous exposerons la technique de commande à MLI sinus-triangle des deux onduleurs concernés dans cette étude.

Le quatrième chapitre sera consacré à la présentation et la discussion des résultats de simulation nous permettant d'évaluer les performances du système *PV* connecté au réseau en utilisant l'outil *MATLAB/SIMULINK*. La simulation concernera les différents éléments du système *PV* étudié (*GPV*, convertisseurs *DC-DC boost* et *boost* de type *KY*, convertisseurs *DC-AC* triphasés à 2 et 3 niveaux, filtre *LC*, réseau ou bus infini, ainsi que le bloc de commande des deux convertisseurs). Le bloc de commande comprend l'implémentation de la technique de *MPPT* basée sur la méthode de la conductance incrémentale, ainsi que des boucles de commande indirecte des puissances active et réactive injectées au réseau, par réglage de la tension du bus continu et des deux courants (actif et réactif) du côté réseau.

En effet, différentes simulations seront effectuées et les résultats obtenus seront présentés et discutés afin de mettre en évidence l'impact du convertisseur *DC-DC* de type *KY* sur les performances du système étudié et sur la qualité d'énergie dans différentes conditions de fonctionnement, y compris les variations d'ensoleillement et de température.

*Chapitre I*  
*Généralités sur les Systèmes*  
*Photovoltaïques*

## I.1. Introduction

Le soleil est une source d'énergie pratiquement inépuisable, capable de couvrir notre consommation énergétique totale plusieurs milliers de fois. C'est pourquoi l'homme a longtemps cherché à exploiter cette énergie abondante et distribuée sur toute la planète, et il a réussi à atteindre cet objectif grâce à la cellule photovoltaïque en particulier.

Le terme '*photovoltaïque*' vient du grec et est composé de deux parties : '*photos*' signifiant lumière et '*volt*' se référant à l'unité de tension électrique, en l'honneur du physicien italien '*Alessandro Volta*'. Ce phénomène a été découvert au XIX<sup>ème</sup> siècle (1839) par le physicien français '*Alexandre Edmond Becquerel*'.

La première cellule photovoltaïque a été développée au début de 1954 pour fournir de l'énergie aux satellites. Depuis 1958, les cellules photovoltaïques ont exclusivement alimenté le système énergétique des satellites jusqu'à leurs premières applications terrestres au début des années 1970 [3].

Au début, le photovoltaïque a été utilisé pour fournir de l'énergie aux petites maisons isolées et aux équipements de télécommunication. Aujourd'hui, en raison de sa fiabilité et de son respect de l'environnement, le photovoltaïque occupe une place importante.

Pour comprendre ce phénomène, nous allons rappeler dans ce chapitre quelques notions de base sur le rayonnement solaire et les propriétés des semi-conducteurs, qui sont les matériaux de base des cellules photovoltaïques. Une fois ces rappels théoriques terminés, il sera facile d'expliquer le fonctionnement de la cellule photovoltaïque en passant au système photovoltaïque complet et à ses trois types, à savoir : les systèmes autonomes, les systèmes connectés au réseau et les systèmes hybrides.

## I.2. Ressources des énergies renouvelables – énergie solaire

Comparées aux énergies conventionnelles telles que les énergies fossiles et nucléaires, les énergies renouvelables présentent un double avantage : elles ne produisent pas d'émissions de gaz à effet de serre lors de leur utilisation et elles sont inépuisables grâce à leurs gisements renouvelables. Contrairement aux énergies de stockage telles que le gaz, le fioul, le charbon et l'uranium, les énergies renouvelables sont des énergies de flux. Ainsi, la production d'électricité décentralisée à partir de sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sécurité d'approvisionnement pour les consommateurs tout en préservant l'environnement [4].

Le recours aux ressources des énergies renouvelables a connu une croissance significative au cours des dernières années. Dans les 20 à 30 prochaines années, un système énergétique durable reposera sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et une augmentation de l'utilisation des énergies renouvelables.

En 2023, les énergies renouvelables représentent environ 43% (3 869.7 GW) du mix énergétique électrique mondial, dont 37% (1419 GW) proviennent de l'énergie solaire, 33% (1268 GW) de l'hydroélectricité renouvelable et 29% (1133 GW) de l'éolien. Ceci place l'énergie solaire comme la plus grande source d'énergie renouvelable en termes de capacité, ayant dépassé l'hydroélectricité renouvelable en 2023. Intéressons nous alors à l'énergie solaire en général et l'énergie photovoltaïque en particulier [5].

La distance entre la Terre et le Soleil est d'environ 150 millions de kilomètres et la vitesse de la lumière est pratiquement égale à 300 000 km/h. Ainsi, les rayons du Soleil mettent environ 8 minutes pour nous parvenir. La constante solaire représente la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au Soleil. Sa valeur est généralement considérée comme étant égale à 1360 W/m<sup>2</sup>. Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à environ 1000 W/m<sup>2</sup> en raison de l'absorption dans l'atmosphère [6].

En travaillant sur l'effet photoélectrique, les chercheurs ont découvert que la lumière n'avait pas seulement une nature ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules appelées photons. L'énergie d'un photon est donnée par la relation suivante [7] :

$$E=h \times c / \lambda$$

Où :

$h$  est la constante de Planck,

$c$  est la vitesse de la lumière,

et  $\lambda$  la longueur d'onde du photon.

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande.

Une façon commode d'exprimer cette énergie est :  $E=1.26/\lambda$ .

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns ( $\mu\text{m}$ ). L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi [7] :

- 5.4% dans la bande des ultraviolets ( $<0,4 \mu\text{m}$ ),
- 62.7% dans la bande visible ( $0,4 \text{ à } 0,8 \mu\text{m}$ ),
- 31.9% dans la bande des infrarouges ( $>0,8 \mu\text{m}$ ).

### I.3. Rayonnement solaire – Notions préliminaires, types et spectre

Le soleil, une étoile parmi tant d'autres, possède un diamètre de 1 390 000 km, soit environ 50 fois celui de la Terre. Composé de 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, il renferme pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que *Langevin* et *Perrin*, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'*Einstein*, ont émis cette idée il y a environ soixante ans.

Désormais, il est largement accepté que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène-hélium, convertissant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium, la réaction se produisant dans son noyau à une température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, chaque seconde, le soleil perd 4 millions de tonnes de matière sous forme de rayonnement. Sa lumière, se déplaçant à une vitesse de 300 000 km/s, met environ 8 minutes pour atteindre la Terre (la distance moyenne entre le soleil et la terre étant environ 150 millions de kilomètres).

La distribution spectrale de son atmosphère présente un pic pour une longueur d'onde d'environ  $0,5 \mu\text{m}$ , et la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ  $5780^\circ\text{K}$ .

Le rayonnement solaire est composé de photons dont la longueur d'onde varie de l'ultraviolet ( $0,2\mu\text{m}$ ) à l'infrarouge lointain ( $2,5\mu\text{m}$ ).

Afin de prendre en compte la distance parcourue par les rayons, il est nécessaire d'introduire la notion de masse d'air (*AM*) qui correspond à la longueur relative du trajet à travers l'atmosphère terrestre parcourue par le rayonnement solaire direct [8].

### I.3.1. Types du rayonnement solaire

Au niveau du sol, le rayonnement solaire global, reçu par une surface plane inclinée, est composé de trois composantes principales (voir figure I.1) :

**a) Le rayonnement direct** qui est un flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant du disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère.

**b) Le rayonnement diffus** qui est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère.

**b) Le rayonnement réfléchi** qui est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol. Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lien appelé *Albédo* ( $\varepsilon$ )  $0 \leq \varepsilon \leq 1$  qui est égal au rapport de la puissance du rayonnement réfléchi sur la puissance du rayonnement solaire reçu [9].

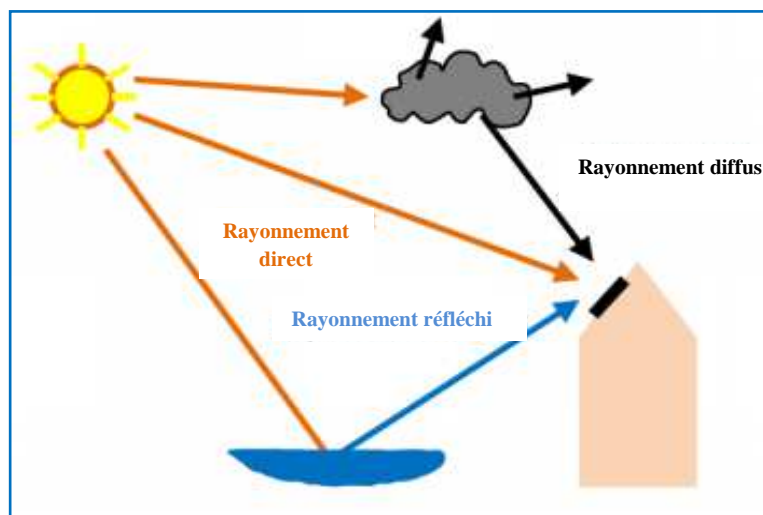


Figure I.1 Différents types de rayonnement solaire

### I.3.2. Spectre du rayonnement solaire

Le rayonnement électromagnétique solaire est composé de 'grains' de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à sa longueur d'onde  $\lambda$ . Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond à l'émission d'un corps noir porté à environ 5900 °K. Une allure spectrale standard, compilée selon les données recueillies par les satellites (désignée sous le nom de *AM0*) et les données mesurées sur terre (désignée sous le nom de *AM1,5*), est illustrée par la figure I.2. Sa distribution en énergie est répartie en : Ultraviolet '*UV*' ( $0.20 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$ ) 6.4%, visible ( $0.38 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$ ) 48.0% et Infrarouge '*IR*' ( $0.78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$ ) 45.6% [10].

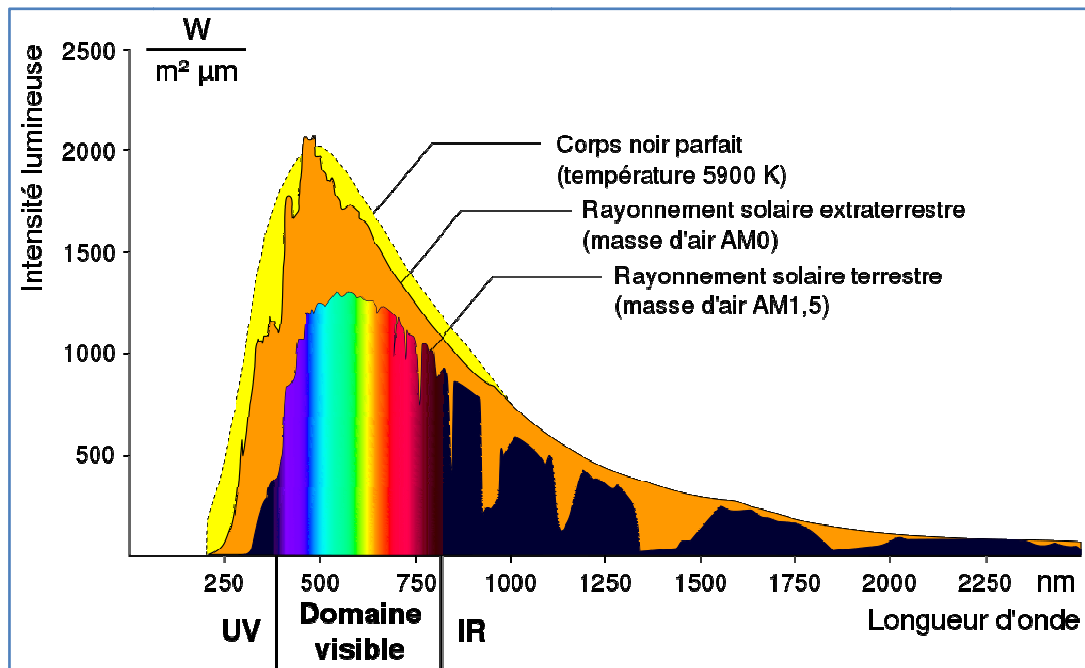


Figure I.2 Spectre du rayonnement solaire

#### I.4. Cellule solaire, effet photovoltaïque, types et principe de fonctionnement

La cellule solaire ou photovoltaïque (*PV*) est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs de type *P-N* qui produisent un courant électrique sous l'effet des photons lumineux. Ces cellules *PV* ou plaques solaires (voir figure I.3) sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par 'effet photovoltaïque' [11].

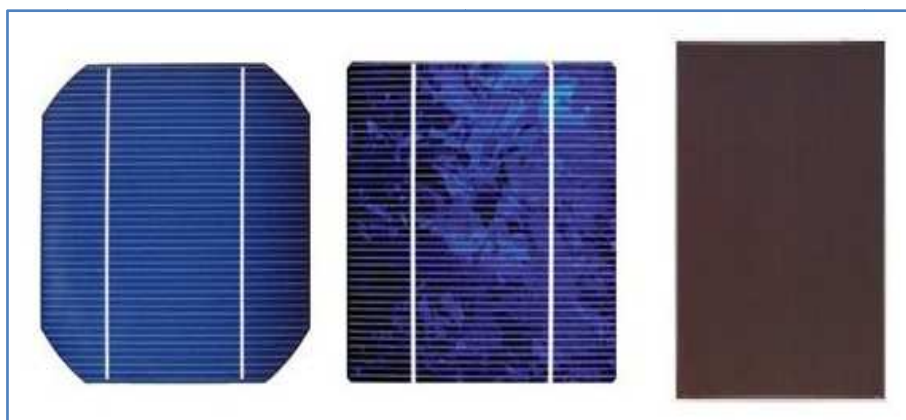


Figure I.3 Cellules solaires

L'énergie photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité. A l'encontre de l'énergie solaire passive, qui utilise les éléments structuraux d'un bâtiment pour mieux le chauffer (ou le refroidir), et de l'énergie solaire active, qui utilise un caloporteur (liquide ou gazeux) pour transporter et stocker la chaleur du soleil (cas d'un chauffe-eau solaire), l'énergie photovoltaïque n'est pas une forme d'énergie thermique. Elle utilise une photopile pour transformer directement l'énergie solaire en électricité [12].

L'énergie photovoltaïque, c'est à dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français *Edmond Becquerel* comme nous l'avant déjà mentionné auparavant dans ce chapitre.

Toutefois, ce n'est qu'en cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie '*Bell telephone company*', aux *Etats-Unis*, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire d'un système photovoltaïque.

#### **1.4.1 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque**

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est basé sur les propriétés des semi-conducteurs qui, lorsqu'ils sont frappés par des photons, mettent en mouvement un flux d'électrons. Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à 300 000 km/s et qu'*Albert Einstein* appelait 'grains de lumière' dans les années 1920.

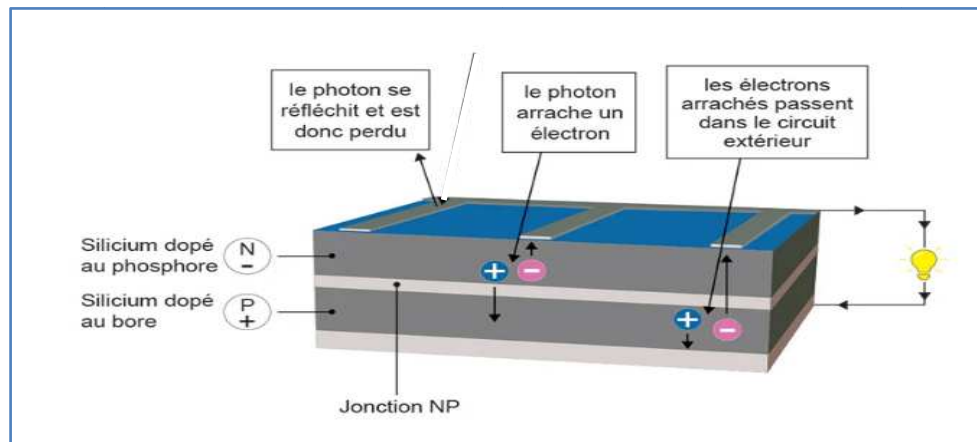
Quand ils frappent un élément semi-conducteur comme le *Silicium*, ils arrachent des électrons de ses atomes. Ces électrons commencent à se déplacer, de manière désordonnée, à la recherche d'autres 'trous' dans lesquels se repositionner [13].

Mais pour qu'il y ait un courant électrique, ces mouvements d'électrons doivent tous aller dans la même direction. Pour les aider, nous combinerons deux types de *Silicium*.

Le côté exposé au soleil est 'dopé' avec des atomes de *Phosphore* qui ont plus d'électrons que le *Silicium* et l'autre côté est dopé avec des atomes de *Bore* qui a moins d'électrons. Ce double côté devient une sorte de batterie : le côté fortement chargé d'électrons devient la borne négative (*N*), le côté avec moins d'électrons devient la borne positive (*P*). Un champ électrique est créé entre les deux.

Lorsque les photons excitent les électrons, ils migrent vers la zone *N* grâce au champ électrique, tandis que les 'trous' vont vers la zone *P*. Ils sont récupérés par des contacts électriques déposés à la surface des deux zones avant d'entrer dans le circuit externe sous forme d'énergie électrique.

Ainsi, un courant continu est créé. Une couche antireflet est utilisée pour empêcher la perte d'un trop grand nombre de photons en étant réfléchi par la surface, voir figure I.4.



**Figure I.4** Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

### I.4.2 Différents types de cellules solaires

Il existe différents types de cellules photovoltaïques, les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de *Silicium*. Chaque type de cellules à un rendement qui lui est spécifique. Par contre, quel que soit leur type, le rendement est assez faible : entre 8 et 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. Voici les trois principaux types de cellules *PV* [14]:

#### I.4.2.1 Cellules poly-cristallines

Une cellule en *Silicium poly-cristallin* (*p-Si*) est un type de cellule solaire constituée de *Silicium* dont la structure cristalline est composée de nombreux cristaux de taille différente. Ces cellules sont moins efficaces que les cellules en *Silicium monocristallin*, mais elles sont également moins chères à produire.

En effet, les cellules en *Silicium poly-cristallin* présentent plusieurs avantages par rapport aux cellules en *Silicium monocristallin* :

- Elles sont moins chères à produire ;
- Elles sont plus faciles à fabriquer ;
- Elles peuvent être fabriquées en plus grandes tailles.

Cependant, les cellules en silicium *Poly-cristallin* présentent également quelques inconvénients :

- Elles sont moins efficaces ;
- Elles sont plus sensibles aux défauts ;
- Elles ont une durée de vie plus courte.

#### **I.4.2.2 Cellules monocristallines**

Les cellules photovoltaïques monocristallines sont fabriquées à partir d'un unique cristal de *Silicium* (*c-Si*). On les distingue à leur aspect noir mat et uni en surface. Un module photovoltaïque monocristallin propose en général un bon rendement, au moins autour de 20%. De ce fait, les panneaux solaires équipés de cellules monocristallines sont souvent les plus chers [14].

Les cellules monocristallines présentent plusieurs avantages par rapport aux autres types de cellules solaires :

- Elles sont plus efficaces ;
- Elles sont plus résistantes aux défauts ;
- Elles ont une durée de vie plus longue.

Cependant, les cellules monocristallines présentent également quelques inconvénients :

- Elles sont plus chères à produire ;
- Elles sont plus difficiles à fabriquer ;
- Elles peuvent être endommagées par la chaleur excessive.

#### **I.4.2.3 Cellule en *Silicium amorphe***

Les cellules en *Silicium amorphe* (*a-Si*) sont un type de cellules solaires fabriqué à partir de *Silicium* dont la structure atomique est désordonnée, c'est-à-dire non cristallisée. Ce matériau absorbe beaucoup plus la lumière qu'un *Silicium cristallin*, ce qui permet d'obtenir des cellules plus fines et plus flexibles.

Les cellules en *Silicium amorphe* présentent plusieurs avantages par rapport aux cellules en *Silicium cristallin* :

- Elles sont moins chères à produire car le procédé de fabrication est plus simple et moins d'énergie est nécessaire ;
- Elles sont flexibles et elles peuvent être appliquées sur des surfaces courbées ou souples ;
- Elles sont plus performantes en faible luminosité et peuvent produire de l'électricité même par temps nuageux ou en intérieur ;

- Elles sont moins sensibles à la température et elles conservent ainsi une meilleure efficacité par temps chaud.

Par contre, les cellules en *Silicium amorphe* présentent également quelques inconvénients :

- Elles sont moins efficaces et leur rendement de conversion énergétique est généralement inférieur à 10 % ;
- Elles ont une durée de vie plus courte et ont tendance à se dégrader plus rapidement que les cellules en silicium cristallin ;
- Elles sont moins stables et peuvent être sensibles à l'humidité et à l'oxydation.

#### I.4.3. Comparaison des performances des différents types de cellules photovoltaïques

Le choix du type de cellules *PV* pour une application donnée dépend de plusieurs facteurs, notamment le rendement, le coût, la flexibilité et la durabilité. Le tableau suivant résume les performances des principaux types de cellules *PV* [15].

**Tableau I.1** Performances des principaux types de cellules *PV*

Type de cellule	Rendement	Coût	Flexibilité	Durabilité	Applications
<i>Silicium mono-cristallin (c-Si)</i>	20-26%	Élevé	Faible	Bonne	Toits solaires Centrales solaires
<i>Silicium poly-cristallin (p-Si)</i>	15-20%	Moyen	Faible	Bonne	Toits solaires Centrales solaires
<i>Silicium amorphe (a-Si)</i>	5-10%	Faible	Bonne	Moyenne	Calculatrices Montres solaires Toits solaires intégrés

#### I.5. Paramètres des cellules photovoltaïques

Les caractéristiques principales d'une cellule solaire photovoltaïque comprennent son rendement de conversion, sa tension de circuit ouvert, son courant de court-circuit et son facteur de forme (*FF*).

Ces indicateurs sont déterminés à partir des courbes courant-tension, ce qui permet une comparaison juste entre différentes cellules dans des conditions similaires. Nous allons les définir brièvement dans ce qui suit [16] :

### I.5.1. Courant de court circuit

Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) représente le courant maximal qu'une cellule solaire peut fournir. Il tend à augmenter proportionnellement avec l'intensité lumineuse (l'ensoleillement), et sa valeur est déterminée lorsque la tension ( $V$ ) est égale à zéro.

### I.5.2. Tension à circuit-ouvert

La tension à circuit ouvert ( $V_{co}$ ) est déterminée lorsque le dispositif *PV* ne laisse passer aucun courant. Cette valeur dépend du type de cellule solaire, de l'intensité lumineuse et des matériaux constitutifs de la couche active.

### I.5.3. Facteur de forme

Le facteur de forme (*Fill Factor* en anglais) d'une cellule solaire est influencé par divers paramètres. Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale et la puissance théorique, calculée en multipliant la tension à circuit ouvert par le courant de court-circuit.

Ce facteur est un indicateur de la qualité électrique de la cellule et est exprimé par l'équation suivante :

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{V_m \times I_m}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (\text{I.1})$$

Où ( $P_m$ ) est la puissance maximale fournie par la cellule et ( $V_m$  et  $I_m$ ) sont respectivement la tension et le courant correspondant.

### I.5.4. Rendement de la cellule

Le rendement d'une cellule solaire est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule ( $P_m$ ) et la puissance lumineuse incidente :

$$\eta = \frac{P_m}{S \times G} \quad (\text{I.2})$$

Où ( $G$  en  $W/m^2$ ) est l'éclairement reçu par la cellule et ( $S$ ) est sa surface soumise à cet ensoleillement.

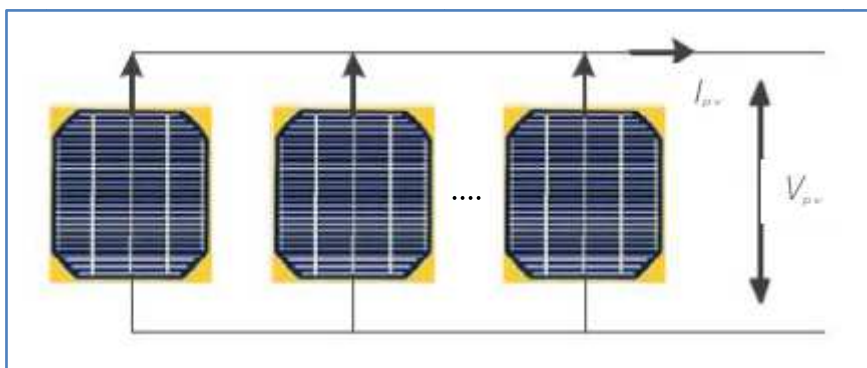
## I.6. Association des cellules photovoltaïques

Les cellules *PV* peuvent être interconnectées en série et/ou en parallèle pour accroître la tension et/ou l'intensité du courant fourni.

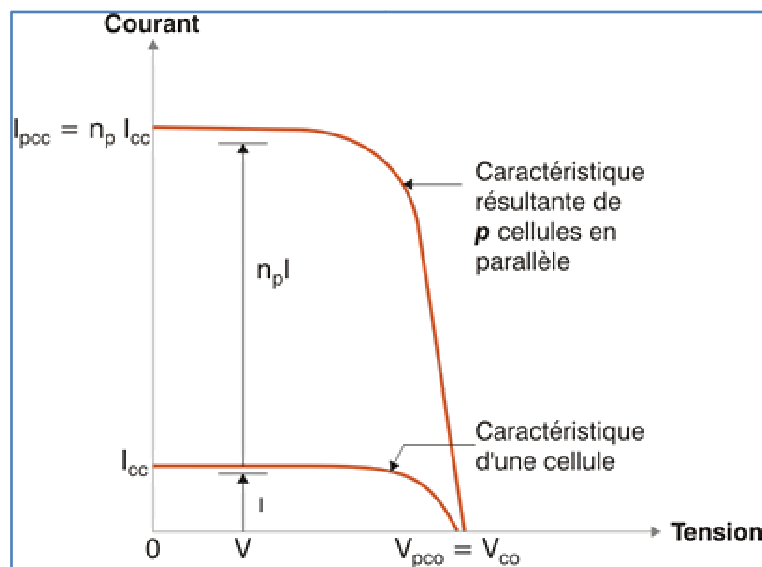
Cependant, certaines précautions s'imposent. En effet, la présence de cellules moins performantes ou l'occultation d'une ou plusieurs d'entre elles (à cause de l'ombrage, de la poussière, ... etc.) risquent d'endommager irrémédiablement les cellules [17].

### I.6.1. Association en parallèle

Lorsqu'on regroupe des cellules photovoltaïques en parallèle, elles sont toutes soumises à la même tension. La caractéristique du groupement ainsi obtenu est déterminée par la somme des courants générés par chaque cellule à une tension donnée, comme illustré sur la figure I.5.



a) Schéma

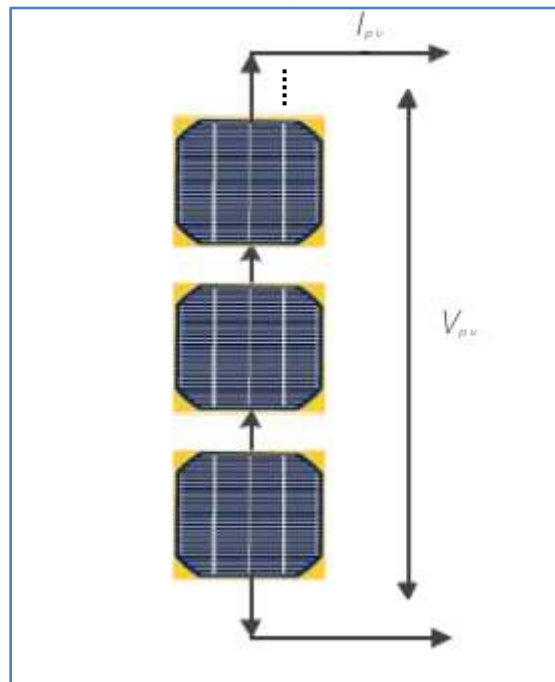


b) Caractéristique I-V

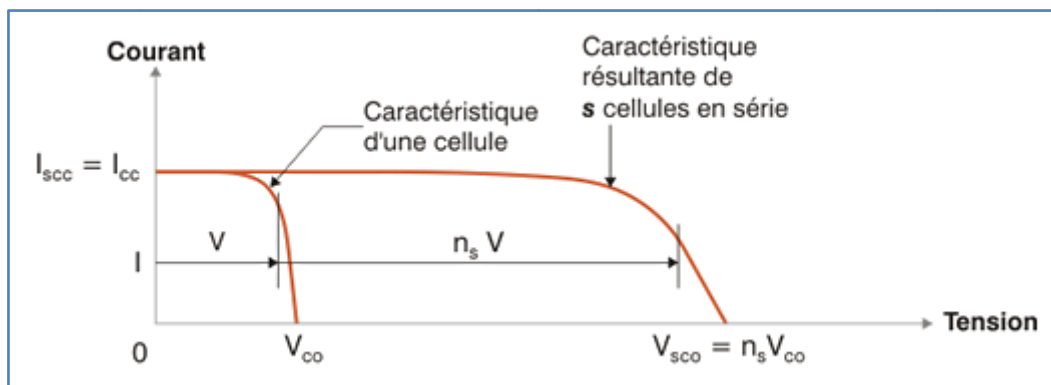
**Figure I.5** Cellules photovoltaïques associées en parallèle

### I.6.2. Association en série

Dans un circuit en série, les cellules sont parcourues par un courant identique, et la caractéristique globale du circuit en série est déterminée en additionnant les tensions pour un courant donné, comme illustré dans la figure I.6.



a) Schéma



b) Caractéristique I-V

Figure I.6 Cellules photovoltaïques associées en série

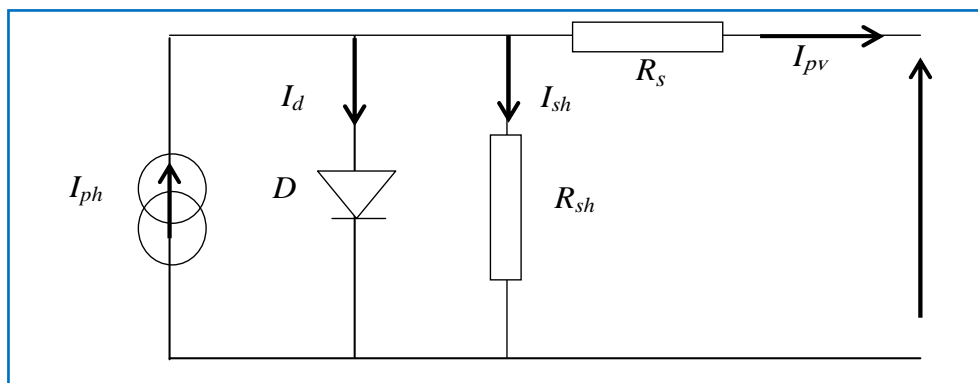
### I.6.3. Association série-parallèle

Pour obtenir une satisfaction tant en courant qu'en tension, l'utilisation d'un agencement mixte (montage série-parallèle) est recommandée. C'est le schéma typique adopté par les panneaux ou modules photovoltaïques [18].

## I.7. Modélisation d'un générateur photovoltaïque

La modélisation d'un générateur photovoltaïque (*GPV*) nécessite la représentation électrique équivalente de ce système complexe, composé de panneaux solaires assemblés en série-parallèle, eux-mêmes constitués de cellules solaires interconnectées de la même manière. Divers modèles mathématiques ont été proposés pour simuler la relation courant-tension (*I-V*) d'un module ou d'une cellule solaire. Ces modèles diffèrent par leur approche de calcul, leur précision et le nombre de paramètres impliqués. Dans ce travail, nous allons nous limiter à la présentation du modèle à une diode simple et offrant une assez bonne précision.

Le schéma équivalent d'un module photovoltaïque réel doit tenir compte des effets résistifs. Dans le cas du modèle à une diode, le schéma équivalent d'un module *PV* (voir figure I.7) est constitué d'une diode (*D*), une source de courant ( $I_{ph}$ ) caractérisant le photocourant, une résistance série ( $R_s$ ) représentant les pertes par effet *Joule*, et une résistance shunt ( $R_{sh}$ ) caractérisant un courant de fuites entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à ( $R_s$ ) [19].



**Figure I.7** Schéma équivalent d'un module *PV* : Modèle à une diode

D'après ce schéma équivalent, le courant de sortie du module photovoltaïque peut être exprimé sous la forme mathématique suivante:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (I.3)$$

Où  $I_{ph}$ ,  $I_d$ ,  $I_{sh}$  et  $I_{pv}$  sont respectivement le photo-courant, le courant de la diode, le courant de la résistance shunt et le courant de fonctionnement (ou courant délivré par le module *PV*) qui dépendent du rayonnement solaire et de la température des cellules *PV* constituant le module.

Le courant  $I_{ph}$  dépend directement du rayonnement solaire  $G$  et de la température des cellules  $T_j$ , il est donné par la relation suivante :

$$I_{ph} = K_1 \times G (1 + K_2 \times (G - G_{ref}) + K_3 (T_j - T_{ref})) \quad (I.4)$$

Où  $K_{1,2,3}$  sont des paramètres constants propres à la cellule PV.

La température des cellules  $T_j$  peut être estimée à partir de la température ambiante et de l'ensoleillement comme suit [20] :

$$T_j = T_a + G \left( \frac{NOCT - T_{ref}}{G_{ref}} \right) \quad (I.5)$$

Où :  $NOCT$  est la température nominale de fonctionnement de la cellule solaire,  
et  $T_a$  est la température ambiante.

Et le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_{sat} \left( \exp \left( \frac{q \times (V_{pv} + R_s \times I_{pv})}{A \times n_s \times K \times T_j} \right) - 1 \right) \quad (I.6)$$

Avec :

$T_j$  : Température de la cellule en ( $^{\circ}K$ )

$n_s$  : Nombre de cellules en série dans un module

$q$  est la charge électrique élémentaire qui est égale à  $1.6 \times 10^{-19}$  C ;

$K$  est la constante de Boltzmann ( $K = 1.3854 \times 10^{-23}$  J/ $^{\circ}K$ ) ;

$A$  est le facteur de qualité de la diode ;

$(KT_j/q)$  est le potentiel thermique ;

$I_{sat}$  est le Courant de saturation, il est fortement dépendant de la température et il est donné par la relation suivante :

$$I_{sat} = K_4 \times T_j^3 \times \exp \left( \frac{-E_g}{K \times T_j} \right) \quad (I.7)$$

Le courant de la résistance shunt est calculé par :

$$I_{sh} = \frac{(V_{pv} + R_s \times I_{pv})}{R_{sh}} \quad (I.8)$$

Le courant du module est exprimé en utilisant (I.3) à (I.8) :

$$I_{pv} = I_{ph}(G, T_j) - I_d(V_{pv}, I_{pv}, T_j) - I_{sh}(V_{pv}, I_{pv}) \quad (I.9)$$

Ce qui donne [14] :

$$I_{pv} = K_1 \times G \times \left( 1 + K_2 \times (G/G_{ref}) + K_3 \times (T_j/T_{ref}) - K_4 \times T_j^3 \times \exp\left(-\frac{E_g}{K \times T_j}\right) \times \left( \exp\left(\frac{q \times (V_{pv} + R_s \times I_{pv})}{A \times n_s \times k \times T_j}\right) - 1 \right) - \frac{(V_{pv} + R_s \times I_{pv})}{R_{sh}} \right) \quad (I.10)$$

Où :  $G_{ref}$  est l'irradiation ou l'ensoleillement de référence (1000 W/m<sup>2</sup>)

$T_{ref}$  est la température de référence (25 °C).

Par ailleurs, le courant photovoltaïque délivré par le module PV est exprimé par :

$$I_{pv} = I_{cc} \left( 1 - K_1 \left( e^{K_2 \times V_{pv}^m} - 1 \right) \right) \quad (I.11)$$

Dans cette équation, le photo-courant  $I_{pv}$  dépend des paramètres  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $m$  et de la tension aux bornes du module PV ( $V_{pv}$ ). Ces coefficients ( $K_1$ ,  $K_2$ ,  $m$ ) sont donnés par les équations suivantes :

$$K_2 = \frac{K_4}{v_{co}^m} \quad (I.12)$$

$$K_3 = \ln \left( \frac{I_{cc}(1+K_1) - I_{pm}}{K_1 \times I_{cc}} \right) \quad (I.13)$$

$$K_4 = \ln \left( \frac{1+K_1}{K_1} \right) \quad (I.14)$$

$$m = \frac{\ln \left( \frac{K_3}{K_4} \right)}{\ln \left( \frac{V_{pm}}{V_{co}} \right)} \quad (I.15)$$

Où :

$$K_1 = 0.01175 ;$$

$I_{pm}$  est le courant au point de puissance maximal ;

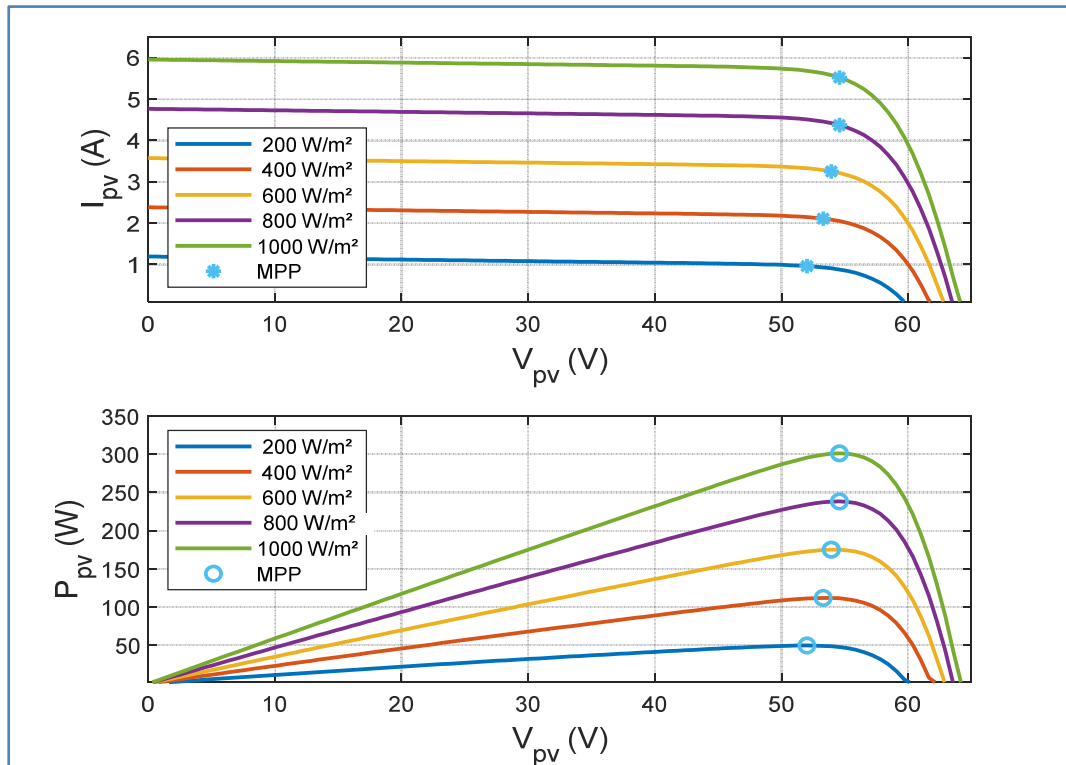
$V_{pm}$  est la tension au point de puissance maximal ;

$I_{cc}$  est le courant de court-circuit ;

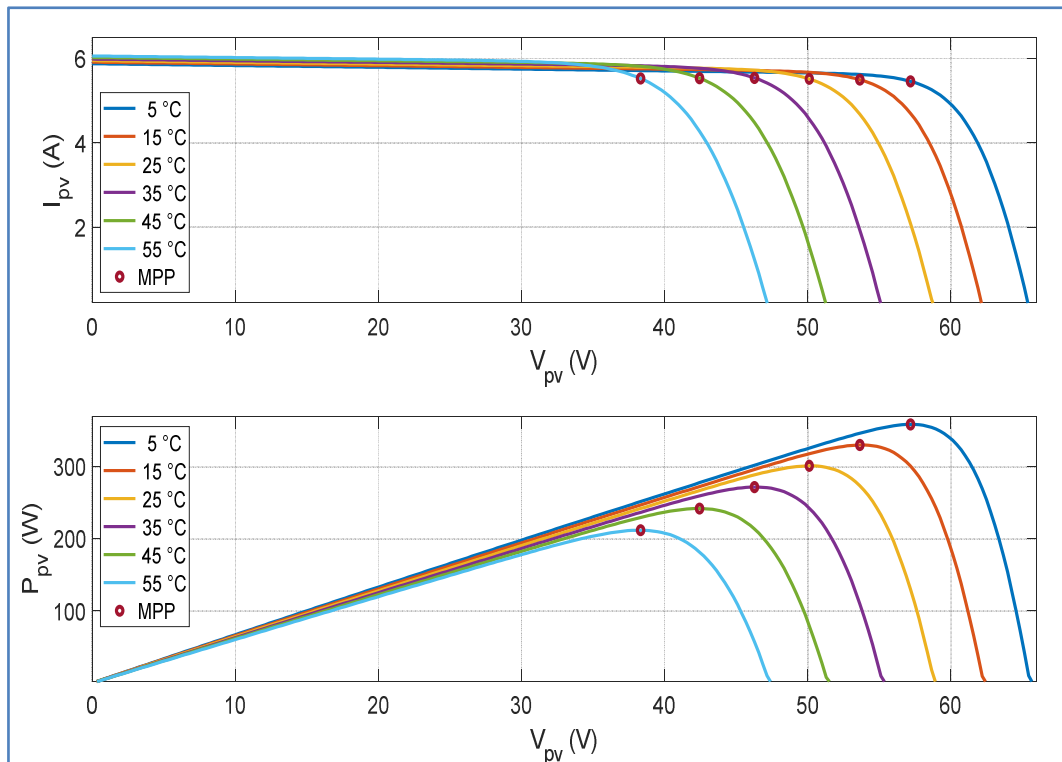
$V_{co}$  est la tension en circuit ouvert.

## I.8. Caractéristiques des modules photovoltaïques

Les caractéristiques électriques  $I$ - $V$  et  $P$ - $V$  d'un module photovoltaïque dépendent de la température et de l'irradiation. La figure I.8 illustre ces caractéristiques ( $I$ - $V$  et  $P$ - $V$ ) pour différents éclaircissements et différentes températures. Ces caractéristiques concernent un module PV de 305 W de type *SPR-305-WHT-D* (voir figure I.9) dont les paramètres sont récapitulés dans le tableau I.1.



a) Pour différents éclaircements à  $T_{ref}=25^{\circ}\text{C}$

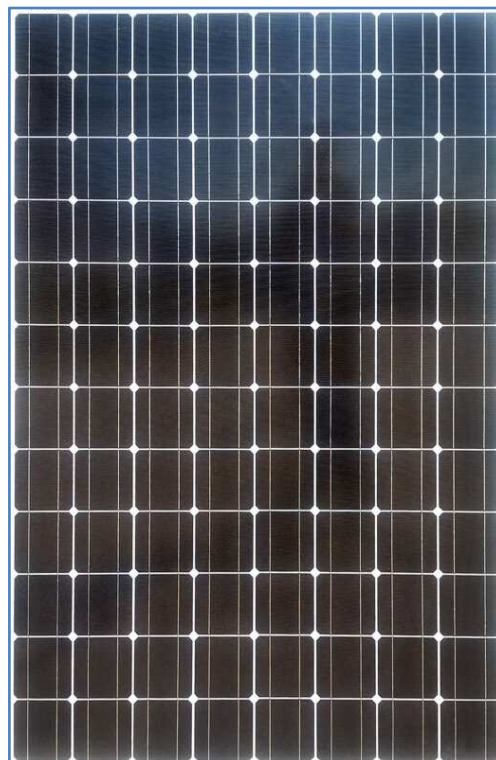


b) Pour différentes températures à  $G_{ref}=1000\text{W}/\text{m}^2$

Figure I.8 Caractéristiques  $I$ - $V$  et  $P$ - $V$  d'un module PV de 305 W de type SPR-305-WHT-D

**Tableau I.2** Paramètres électriques du module PV 'Sun power SPR-305-WHT' [21]

<b>Paramètre</b>	<b>Valeur</b>
Puissance nominale crête du module PV, $P_n$	305Wc
Courant au point de puissance maximale, $I_{pm}$	5.58A
Tension au point de puissance maximale, $V_{pm}$	54.7 V
Courant de court-circuit, $I_{sc}$	5.96 A
Tension en circuit ouvert, $V_{oc}$	64.2 V
Coefficients de variation de $I_{sc}$ / température	0.00368 A/°K
Coefficients de variation de $V_{oc}$ / température	-0.1751 V/°K
Nombre de cellules en séries	96
Résistance série, $R_s$	0.37152 $\Omega$
Résistance shunt, $R_{sh}$	269.5934 $\Omega$
Facteur de qualité de la diode, $A$	0.94504
Longueur, $L$	1559 mm
Largeur, $l$	1046 mm
Epaisseur, $e$	46 mm
Poids, $M$	18.6 kg
Rendement nominal, $\eta$	18.7 %
Valeur nominale de l'ampérage du fusible en série	15A

**Figure I.9** Module PV de 305 W de type SPR-305-WHT-D

En général, nous constatons que la tension à vide varie peu en fonction de l'éclairement par contre le courant de court-circuit augmente avec son augmentation. En outre, nous remarquons que le courant de court circuit dépend peu de la température puisqu'il augmente légèrement à mesure que la température augmente. Par contre, quand celle-ci augmente la tension de circuit ouvert diminue considérablement. Par conséquent, la puissance maximale du générateur *PV* subit une diminution significative.

### **I.9. Panneau solaire et sa protection**

Un panneau photovoltaïque est constitué de plusieurs modules *PV* assemblés, connectés entre eux en série ou en parallèle. Cette configuration détermine les caractéristiques électriques du panneau. En effet, la connexion en série cumule les tensions des modules, augmentant ainsi la tension totale du générateur, tandis que la connexion en parallèle additionne leurs intensités, augmentant l'ampérage. L'ensemble des panneaux photovoltaïques d'une installation est appelé champ *PV*. Ces modules sont fixés sur une structure métallique orientée selon un angle d'inclinaison optimal pour maximiser la captation de l'énergie solaire [22].

Étant donné que les panneaux photovoltaïques sont conçus pour une production d'électricité sur plusieurs années, il est crucial de mettre en place une protection électrique adéquate pour l'installation. Cette protection vise à prolonger la durée de vie des panneaux en prévenant les pannes dommageables pouvant survenir suite à l'interaction des cellules et à leur fonctionnement en cas d'ombrage. Deux types de protection sont couramment utilisés dans les installations actuelles pour répondre à ce besoin (voir figure I.10).

On utilise *une diode anti- retour* afin d'établir une protection en cas de connexion de modules *PV* en parallèle pour éviter les courants négatifs ou bien quand une charge joue le rôle d'un générateur en basculant du récepteur.

On utilise *des diodes by-pass* pour la protection lors de la mise en série des modules *PV* permettant ainsi de ne pas perdre la totalité de la chaîne et éviter les points chauds dus à l'ombrage par exemple.

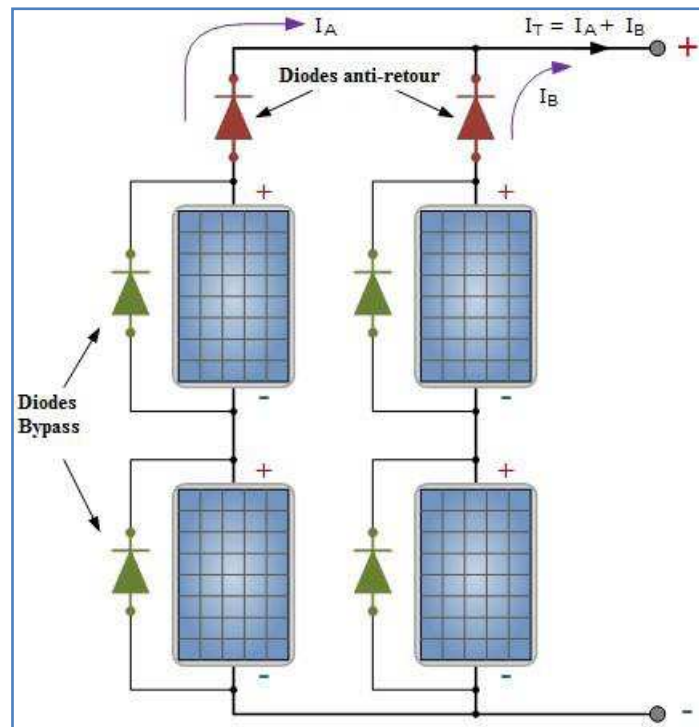


Figure I.10 Schéma d'un générateur PV muni de diodes by-pass et d'une diode anti-retour

## I.10. Systèmes photovoltaïques

Un système photovoltaïque, également connu sous le nom de système d'énergie solaire, est conçu pour exploiter l'énergie du soleil et la convertir en électricité utilisable grâce à l'effet photovoltaïque. Ce processus implique la transformation de la lumière (photons) en électricité (tension). Lorsque la lumière du soleil atteint les cellules PV du système, l'énergie solaire libère les électrons de leurs atomes, permettant leur circulation à travers le matériau et générant ainsi un courant électrique [23].

### I.10.1. Type des systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques peuvent être classés en trois grandes catégories en fonction de leur mode de connexion au réseau électrique et de leur capacité de stockage d'énergie [24] :

**a) Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau :** Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau sont les plus courants. Ils sont connectés au réseau électrique public et l'électricité qu'ils produisent est injectée dans le réseau à l'aide d'un onduleur (généralement précédé d'un convertisseur *DC-DC*), voir figure I.11.

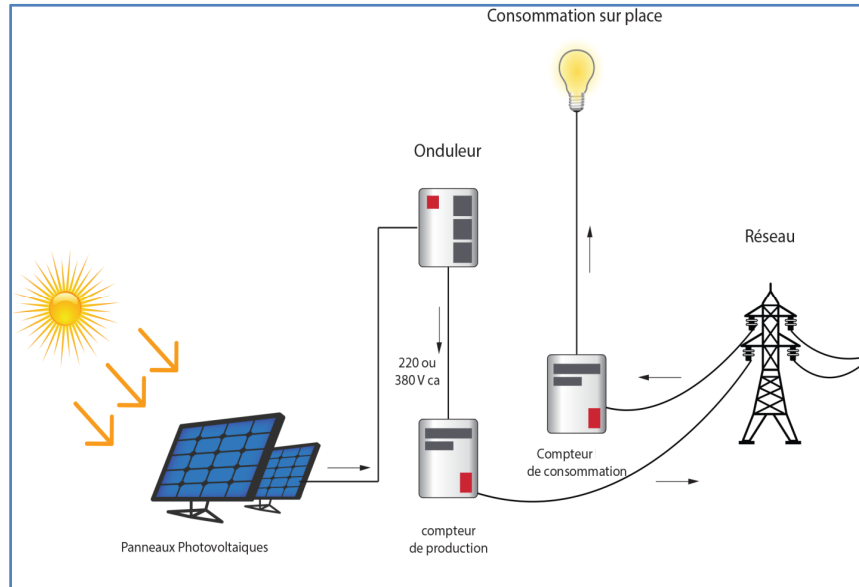


Figure I.11 Système photovoltaïque raccordé au réseau

**b) Un système PV autonome :** Un système photovoltaïque autonome est un dispositif isolé qui fournit de l'électricité à un ou plusieurs utilisateurs sans nécessiter de connexion au réseau électrique comme l'illustre la figure suivante [25].

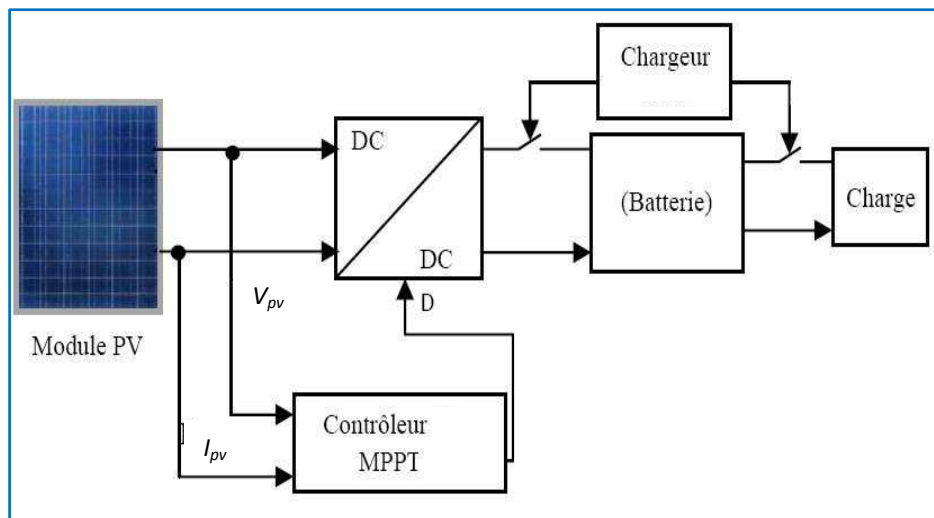


Figure I.12 Schéma d'un système PV autonome

**c) Un système PV hybride :** Un système PV hybride reçoit une partie de son énergie d'une ou de plusieurs sources (GPV, éolienne, groupe diesel, batteries, ... etc.), voir figure ci-après [26].

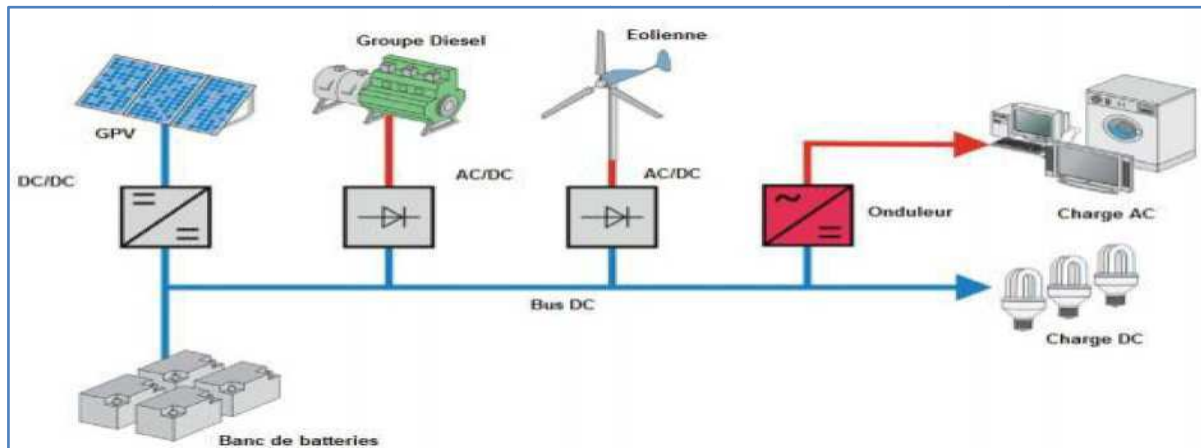


Figure I.13 Schéma de système PV hybride

### I.10.2. Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques offrent plusieurs avantages, tels que :

- *Nature renouvelable de l'énergie* : Les systèmes photovoltaïques utilisent l'énergie du soleil, une ressource renouvelable et abondante.
- *Réduction des émissions de gaz à effet de serre* : En produisant de l'électricité sans émissions de  $CO_2$ , les systèmes photovoltaïques contribuent à réduire l'empreinte carbone.
- *Indépendance énergétique* : Les propriétaires de systèmes photovoltaïques peuvent réduire leur dépendance vis-à-vis des fournisseurs d'électricité traditionnels et des fluctuations des prix de l'énergie.
- *Faibles coûts d'exploitation* : Une fois installés, les systèmes photovoltaïques ont des coûts d'exploitation relativement faibles, car ils ne nécessitent pas de carburant et ont peu de pièces mobiles.

Cependant, ils présentent également certains inconvénients :

- *Coût initial élevé* : L'installation d'un système photovoltaïque peut être coûteuse, bien que les coûts aient considérablement diminué ces dernières années.
- *Dépendance aux conditions météorologiques* : La production d'électricité des systèmes photovoltaïques dépend de l'intensité du soleil, ce qui signifie que leur efficacité peut être réduite par temps nuageux ou pluvieux.
- *Besoin d'espace* : Les installations photovoltaïques nécessitent souvent de grandes surfaces pour les panneaux solaires, ce qui peut poser des défis dans les environnements urbains ou densément peuplés.

- *Stockage d'énergie* : Les systèmes photovoltaïques autonomes nécessitent souvent des solutions de stockage d'énergie, comme des batteries, pour fournir de l'électricité lorsqu'il n'y a pas de soleil, ce qui peut ajouter des coûts supplémentaires et des complexités techniques.

### **I.11 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons exploré l'énergie solaire à travers sa forme *PV*. Nous avons examiné le fonctionnement des cellules solaires, des modules et des panneaux photovoltaïques. Ensuite, nous avons fourni un aperçu sur les systèmes photovoltaïques, en mettant en lumière leurs composants et leurs divers types.

Au chapitre suivant, nous allons nous intéresser au conditionneur de puissance d'un système PV connecté au réseau composé principalement d'un hacheur de type *KY* auquel on s'intéresse plus particulièrement dans cette étude et un onduleur à *MLI*.

# *Chapitre II*

## *Convertisseurs Statiques Dédiés aux Systèmes Photovoltaïques*

## II.1. Introduction

Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique sont caractérisés par leur couplage direct avec le réseau grâce à des convertisseurs continu-continu/continu-alternatif. Cette liaison présente diverses contraintes technologiques, notamment en ce qui concerne la qualité du signal électrique injecté dans le réseau.

La sécurité revêt une importance capitale dans ce contexte, puisque l'onduleur connecté au réseau doit surveiller en permanence toute perturbation éventuelle sur le réseau et interrompre instantanément l'injection en cas de défaillance ou de coupure.

Ce chapitre propose une étude de modélisation des convertisseurs les plus couramment utilisés dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique. Notre étude inclut la modélisation des convertisseurs *DC-DC* de type hacheur '*boost*' et de type hacheur '*KY*' ; et du convertisseur *DC/AC* (onduleur à *MLI*) pouvant constituer le conditionneur de puissance d'un système photovoltaïque relié au réseau.

## II.2. Architectures des systèmes PV connectés au réseau

En principe, il existe deux types de structures de systèmes photovoltaïques connectés au réseau [27] :

### II.2.1. Système PV connecté directement au réseau

Un système photovoltaïque connecté directement au réseau, parfois désigné comme un système *PV* connecté au réseau sans dispositif de stockage d'énergie, se caractérise par la connexion directe des panneaux solaires au réseau électrique, sans l'intervention d'éléments de stockage intermédiaires comme les batteries.

Il se compose d'un générateur photovoltaïque relié directement au réseau électrique grâce à un onduleur, voir figure II.1.

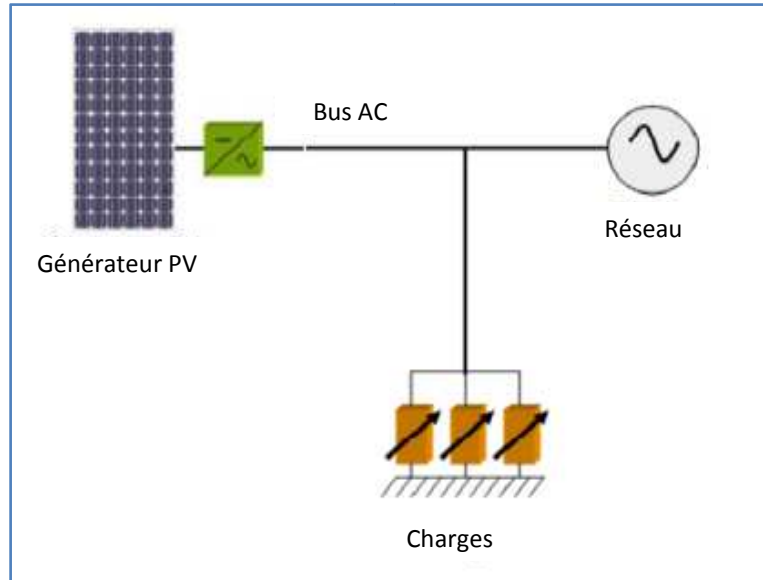


Figure II.1 Système photovoltaïque connecté directement au réseau

### II.2.2. Systèmes à bus continu intermédiaire

Les systèmes à bus continu intermédiaire, également connus sous le nom de systèmes à bus continu central, représentent une configuration répandue dans les domaines de l'énergie solaire et des énergies renouvelables.

Dans ce schéma, les panneaux solaires se connectent à un bus continu central, souvent appelé bus *DC*, qui joue le rôle d'interface entre les panneaux solaires et les autres composants du système, tels que les onduleurs et les dispositifs de stockage d'énergie.

Le générateur photovoltaïque est relié via un convertisseur continu-continu à un onduleur qui délivre une tension modulée. Ensuite, celle-ci, après filtrage pour réduire les harmoniques, fournit en sortie une tension pratiquement sinusoïdale pouvant être injectée dans le réseau.

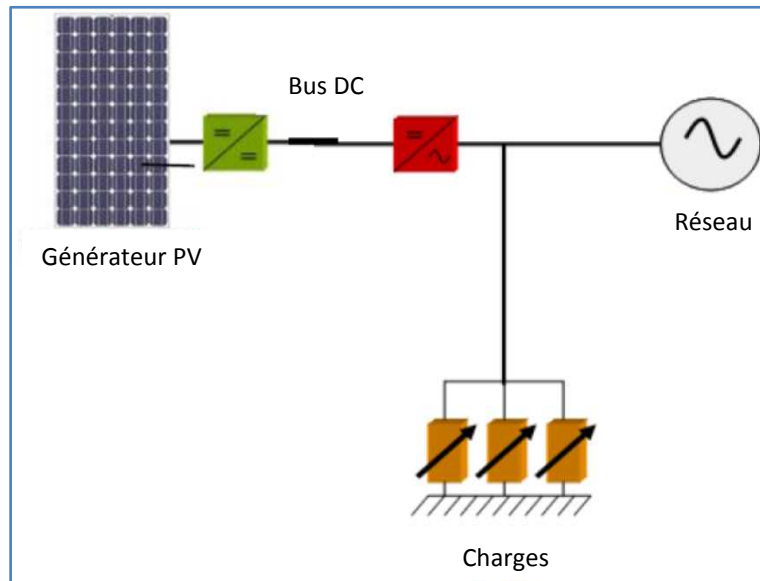


Figure II.2 Système photovoltaïque connecté via un bus continu-continu

### II.3. Convertisseurs statiques dédiés aux systèmes PV

Les convertisseurs statiques de type *DC-DC* (hacheur '*boost*' ou autre) et/ou de type *DC-AC* (onduleur à *MLI*) constituent le conditionneur de puissance qui est le plus utilisé dans un système photovoltaïque relié au réseau. Ceux-ci permettent une mise en forme de l'énergie *PV* pour quelle soit adéquate à l'injection au réseau.

Pour garantir une efficacité optimale de ce processus de conversion de puissance, il est crucial de maintenir un rendement élevé afin de réduire les pertes d'énergie et d'éviter la surchauffe des composants électroniques [17].

Ainsi, l'ensemble du processus de conversion de puissance doit être centré sur les composants de stockage d'énergie, tels que les inductances et les condensateurs, ainsi que sur les commutateurs. Le choix des composants de puissance dépend de la quantité de puissance à convertir ou à réguler. Les *MOSFETs* (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont généralement utilisés pour les puissances relativement faibles (quelques kilos Watts), tandis que les *IGBTs* (transistors bipolaires à grille isolée) sont préférés pour les puissances plus élevées. Quant aux thyristors, ils ont traditionnellement été utilisés et reconnus pour leur efficacité dans les applications nécessitant les niveaux de puissance les plus élevés.

Dans cette section, nous allons présenter les deux types de convertisseurs pouvant être utilisés dans les systèmes *PV* connectés au réseau [28].

### II.3.1. Convertisseurs *DC-DC* dédiés aux systèmes *PV*

Les convertisseurs *DC-DC* jouent un rôle crucial dans les systèmes photovoltaïques, en optimisant la conversion de l'énergie solaire captée par les panneaux *PV* selon les conditions de fonctionnement du système.

La tension produite par les panneaux d'un système *PV* est continue et de faible amplitude. Pour l'augmenter à une valeur supérieure, on utilise un convertisseur appelé hacheur de type élévateur ou '*boost*'. En général, le convertisseur '*boost*' est la solution la plus simple pour augmenter la tension d'une alimentation *DC* tout en assurant un rendement élevé [29].

Le convertisseur *DC/DC* (hacheur) permet de relier le système *PV* à un bus continu, auquel les diverses éléments énergétiques du système sont reliées : la charge (l'utilisateur final) et éventuellement d'autres sources d'énergie ou de stockage (batteries, autres sources renouvelables, pile à combustible, ...etc.). Il permet un réglage de la tension du bus continu tout en assurant un lissage des fluctuations de cette même tension [29].

Un hacheur peut être construit en utilisant des interrupteurs électroniques contrôlables à l'ouverture et à la fermeture, tels que les thyristors *GTO* (*Gate Turn-Off Thyristors*) ou les transistors bipolaires ou à effet de champ ou encore à grille isolée fonctionnant en mode de commutation. Le principe d'un hacheur est de connecter puis de déconnecter périodiquement la source d'alimentation de la charge en utilisant ces interrupteurs électroniques. Il doit être capable d'être ouvert ou fermé à volonté pour produire une tension de sortie continue réglable.

Les hacheurs sont largement utilisés pour réguler la vitesse des moteurs à courant continu (*MCC*). Ils équipent notamment la plupart des véhicules à traction moyenne, tels que ceux utilisés dans les réseaux de métro. En outre, on les retrouve dans la majorité des équipements liés à l'utilisation de l'énergie éolienne ou solaire [29].

Les convertisseurs *DC-DC*, sont employés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau *PV*) à la charge, qui requiert généralement une tension *DC* constante. Les trois configurations de base sont :

- Le convertisseur dévolteur ou l'hacheur série ;
- Le convertisseur survolteur ou encore l'hacheur survolteur (ou parallèle);
- Et le convertisseur dévolteur- survolteur ou bien l'hacheur série – parallèle.

Dans cette étude, nous nous focalisons sur la modélisation de l'hacheur survolteur classique et d'un récent convertisseur *DC-DC* qui est également un hacheur 'boost' mais de type 'KY'. Ces deux configurations peuvent être utilisées dans les systèmes photovoltaïques.

### II.3.1.1 Hacheur survolteur

Il s'agit d'un convertisseur *DC-DC* de type direct appelé aussi hacheur parallèle (ou encore hacheur 'boost' en anglais). La source d'entrée est de type courant continu (composée d'une inductance en série avec une source de tension), tandis que la charge de sortie est de type tension continue (avec un condensateur en parallèle avec la charge) [30].

Il est aussi connu sous le nom d'hacheur élévateur, son schéma de principe de base est illustré par la figure II.3. Son application typique consiste à convertir la tension d'entrée en une tension de sortie supérieure.

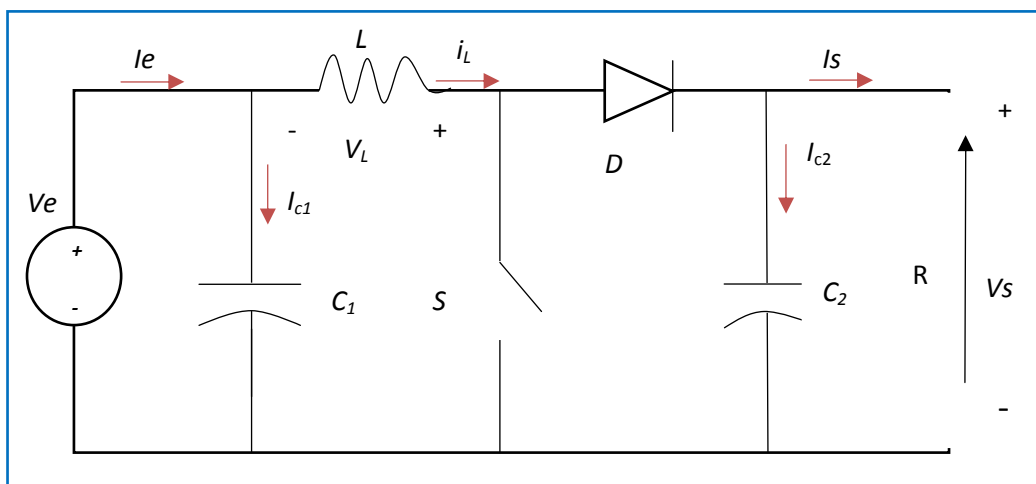


Figure II.3 Schéma de principe d'un hacheur survolteur ou parallèle (Boost)

Dans un premier laps de temps  $[0 \alpha T_e]$ , le transistor (*S*) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, celle-ci emmagasine de l'énergie. Cette phase dure de 0 à  $t_f = \alpha T_e$  (où  $t_f$  est le temps de fermeture de l'interrupteur 'S' avec  $0 \leq t_f \leq T_e$  et ' $\alpha$ ' est le rapport cyclique avec  $0 \leq \alpha \leq 1$ ). Ensuite, le transistor (*S*) s'ouvre dans un deuxième laps de temps  $[\alpha T_e T_e]$  et l'inductance (*L*) s'opposant à la diminution du courant ( $I_L$ ), génère une tension qui s'ajoute à la tension de la source, et elles s'appliquent toutes les deux sur la charge (*R*) à travers la diode (*D*). Cette phase dure de  $t_f$  à  $T_e$  (où  $t_o = T_e - t_f$  avec  $t_o$  est le temps d'ouverture du transistor). Dans ce deuxième laps de temps, l'inductance (*L*) libère cette énergie à la charge (*R*) via une diminution de courant  $i_L$ , voir figure II.4 qui résume quelques caractéristiques dynamiques de courant/tension de ce convertisseur [31].

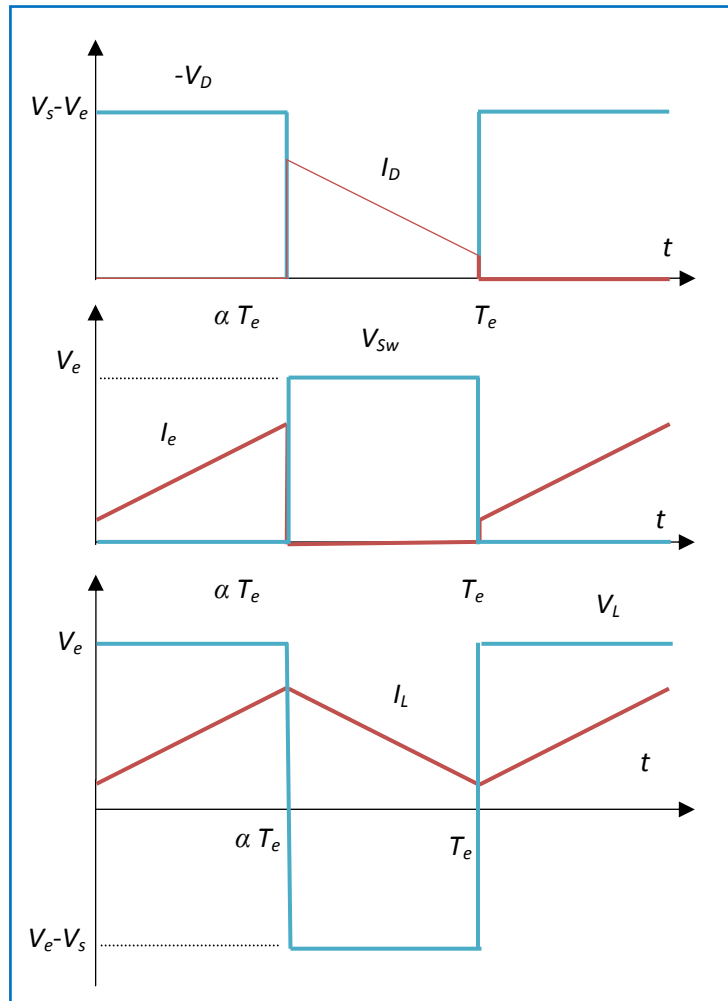


Figure II.4 Caractéristiques des tensions et courants d'un convertisseur 'Boost'

Sachant qu'en régime établi la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle, on déduit facilement la tension moyenne à la sortie de l'hacheur à partir de l'équation suivante :

$$V_s = V_e / (1 - \alpha) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$$\alpha = \frac{t_f}{T_e} \quad (\text{II.2})$$

A pertes minimales on a :

$$P_s = P_e \Rightarrow V_s \times I_s = V_e \times I_e \Rightarrow I_s = \frac{V_e \times I_e}{V_s} \Rightarrow I_s = I_e (1 - \alpha)$$

Donc :

$$(1 - \alpha) = \frac{V_e}{V_s} = \frac{I_s}{I_e} \quad (\text{II.3})$$

Où :

$I_e$  : est le courant d'entrée ;

$V_e$  : est la tension d'entrée ;

$i_L$  : est le courant circulant dans l'inductance ;

$V_L$  : est la tension aux bornes de l'inductance ;

$I_{c1,2}$  : est le courant du condensateur  $C_{1,2}$  ;

$I_s$  : est le courant de sortie ;

$V_s$  : est la tension de sortie ;

$V_{sw}$  : est la tension aux bornes de 'S'.

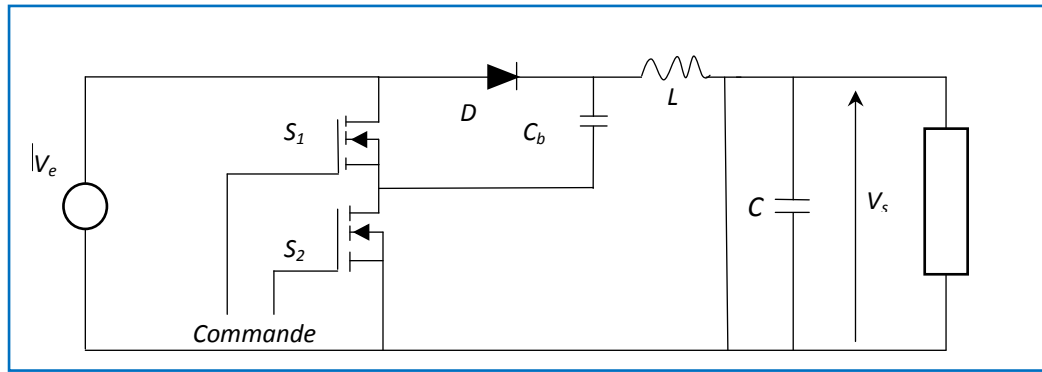
### II.3.1.2 Hacheur survolteur de type 'KY'

Le convertisseur 'KY' est un type spécifique de convertisseur *DC-DC* permettant le 'boosting' de la tension de sortie. Il est conçu pour résoudre les limitations des convertisseurs traditionnels utilisés dans les systèmes photovoltaïques. En effet, contrairement aux convertisseurs *boost* conventionnels qui génèrent un courant ondulé en sortie, le convertisseur 'KY' délivre un courant de sortie continu. Cette caractéristique permet de réduire l'ondulation de la tension de sortie et d'améliorer l'efficacité énergétique du système [32].

En outre, le convertisseur 'KY' garantit une meilleure stabilité du système et une réponse transitoire plus rapide, notamment lorsqu'il fonctionne en mode de conduction continue (*CCM*). En résumé, le convertisseur 'KY' représente une avancée significative dans la conception des convertisseurs *DC-DC* de type 'boost', offrant des performances améliorées pour les applications photovoltaïques [32].

Le convertisseur 'KY' est conçu pour élever la tension d'entrée (provenant d'un générateur photovoltaïque par exemple) à un niveau compatible avec la charge (dans le cas des systèmes *PV* ceci facilite la liaison et l'intégration au réseau électrique).

Il est généralement contrôlé par modulation de largeur d'impulsions par ajustement du rapport cyclique de ses deux interrupteurs de puissance,  $S_1$  et  $S_2$ , afin de pouvoir effectuer un réglage de la tension de sortie (ou la tension d'entrée dans le cas des systèmes *PV* reliés aux réseaux puisque dans ce cas c'est l'onduleur qui se charge de stabiliser la tension du bus continu), voir figure II.5.



**Figure II.5** Schéma de base d'un convertisseur DC-DC 'boost' de type KY

Une caractéristique essentielle pour les performances de ce convertisseur 'boost' réside dans la continuité de circulation du courant dans l'inductance pendant une période de commutation. En effet, si le courant dans l'inductance reste au-dessus de zéro pendant toute la période de commutation, le convertisseur fonctionne en mode de conduction continue (CCM) ; tandis que s'il s'annule et reste nul pendant une partie de chaque cycle de commutation, ce convertisseur fonctionne en mode de conduction discontinue (DCM) [33].

#### a) Mode de conduction continue

En mode de conduction continue, le convertisseur possède deux séquences de fonctionnement (a) et (b), voir figure II.6.

Pendant la première séquence (a), l'interrupteur  $S_1$  est débloqué et  $S_2$  est bloqué. Le condensateur flottant ' $C_b$ ' se chargera au niveau de la tension d'entrée dans un court laps de temps. De sa part, l'inductance absorbera de l'énergie et son courant augmentera progressivement [34].

Et pendant la deuxième séquence (b), l'interrupteur  $S_1$  est bloqué et  $S_2$  est débloqué. Dans ce cas, l'inductance libère son énergie vers le condensateur de sortie, et son courant (de l'inductance) diminue progressivement.

Après analyse de ces deux modes de fonctionnement, le rapport 'tension de sortie / tension d'entrée' en mode CCM peut être exprimée par l'équation (II.4) en régime établi [34].

$$D_{CCM} = \frac{V_s}{V_e} = 1 + \alpha \quad (\text{II.4})$$

' $\alpha$ ' représente le rapport cyclique de conduction de l'interrupteur  $S_1$  sur chaque période de commutation (' $S_1$ ' conduit si  $0 \leq t_f = \alpha T_e \leq T_e$  avec  $0 \leq \alpha \leq 1$ ).

Par contre,  $S_2$  conduit pendant '1-  $\alpha$ ' de la période de commutation pendant  $t_o$  (c'est-à-dire de  $t_f$  à  $T_e$  où  $t_o = T_e - t_f = \alpha T_e - T_e = (1 - \alpha)T_e$ ). En effet, les deux interrupteurs conduisent de façon complémentaire pour éviter le court-circuit de la source.

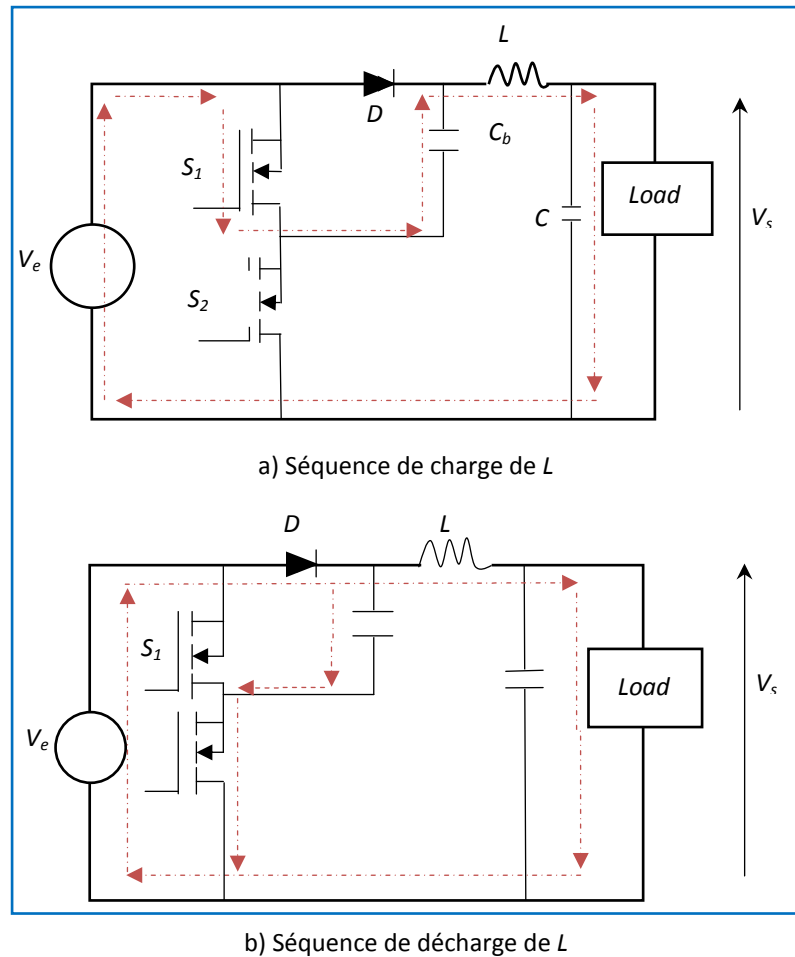
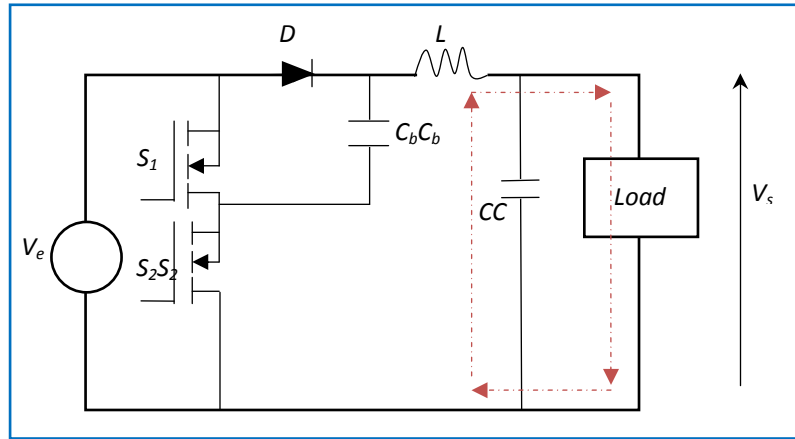


Figure II.6 Fonctionnement du convertisseur 'boost' de type 'KY' en mode CCM

### b) Mode de conduction discontinue

Le fonctionnement du convertisseur 'KY' peut éventuellement basculer en mode de conduction discontinue dans des situations de faible charge ou de faible fréquence de commutation. Dans ces conditions et pendant la période de décharge de l'inductance, le courant  $i_L$  diminue jusqu'à zéro avant d'atteindre la fin du cycle de commutation. Par conséquent, une logique de commutation supplémentaire est nécessaire pour que  $S_2$  soit bloqué lorsque le courant de l'inductance s'annule. Sinon, le courant de l'inductance circule dans le sens inverse, ce qui provoquera une perte de puissance importante [34].

Dans ce mode 'DCM', on aura en plus des deux séquences de fonctionnement en mode 'CCM' une troisième séquence de conduction supplémentaire comme l'illustre la figure II.7. Sa durée varie en fonction de l'inductance 'L', de la période de commutation 'T<sub>e</sub>' du convertisseur et de la résistance équivalente de la charge 'R'.



**Figure II.7** Troisième séquence de fonctionnement du convertisseur 'boost' de type KY en mode DCM

En conséquence, le rapport 'tension de sortie / tension d'entrée' en mode DCM peut être exprimée par l'équation (II.5) en régime établi [34] :

$$D_{DCM} = \frac{V_s}{V_e} = \frac{\left(1 - \frac{a^2}{k}\right) + \sqrt{1 + \frac{a^4}{k} + \frac{6a^2}{k}}}{2} \quad (\text{II.5})$$

Avec :  $k = 2L / (T_e R)$ .

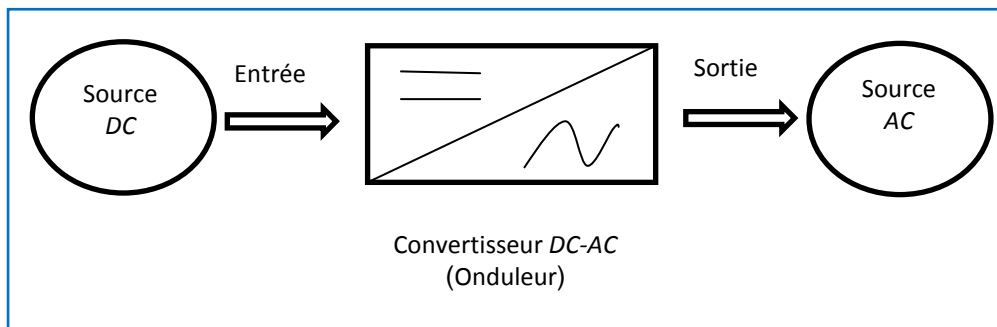
Pratiquement, il est conseillé d'éviter ce mode de fonctionnement via un bon dimensionnement de l'inductance 'L' pour une fréquence de commutation et une fourchette de charge données.

### II.3.2. Convertisseurs DC-AC dédiés aux systèmes photovoltaïques

Un convertisseur DC-AC ou encore un onduleur est un dispositif de l'électronique de puissance permettant de délivrer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique continue (par exemple une source photovoltaïque), voir figure II.8.

Les onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques sont quelque peu différents des onduleurs classiques utilisés en électrotechnique, mais leur rôle de conversion DC-AC est le même. Ils utilisent des transistors de puissance ou des thyristors GTO [28].

L'onde de sortie présente, dans le plus simple des cas, une forme carrée qui peut s'adapter à quelques types de charges.



**Figure II.8** Schéma de principe d'une conversion DC-AC

Le fonctionnement d'un onduleur repose sur l'électronique de commutation, permettant ainsi de transformer une tension continue en une tension alternative. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à deux topologies triphasées qui peuvent être utilisées dans un système PV connecté au réseau, à savoir l'onduleur triphasé à deux niveaux et celui à trois niveaux que nous allons présenter et modéliser dans ce qui suit [30].

### II.3.2.1 Onduleur triphasé conventionnel

La majorité des onduleurs adoptent une architecture en pont, principalement composée de transistors bipolaires à grille isolée (*IGBT* : '*Isolated Gate Bipolar Transistors*'). Ce choix découle à la fois de la capacité de ces composants à commuter des courants et tensions élevés à des fréquences de découpage de plusieurs dizaines de *kHz*, et de leur capacité de blocage sans avoir recours aux circuits d'aide à la commutation [30].

L'onduleur de tension triphasé à deux niveaux se compose de trois cellules de commutation :  $C_1$ ,  $C_2$  et  $C_3$ , ce qui donne un total de six interrupteurs. Chaque cellule est constituée de deux interrupteurs :  $K_{11}$  et  $K_{12}$  pour la cellule  $C_1$ ,  $K_{21}$  et  $K_{22}$  pour la cellule  $C_2$ , et  $K_{31}$  et  $K_{32}$  pour la cellule  $C_3$ , voir figure II.9.

Cet onduleur est modélisé en associant à chaque bras (cellule  $C_{i=1,2,3}$ ) une fonction représentant l'état des interrupteurs et pouvant être définis par trois grandeurs booléennes de commande  $S_i$  avec  $i \in \{1, 2, 3\}$  :

- Si le transistor supérieur de la cellule  $C_i$  est en état conduction alors  $S_i = 1$  ;
- Si le transistor inférieur de la cellule  $C_i$  est en état conduction alors  $S_i = 0$ .

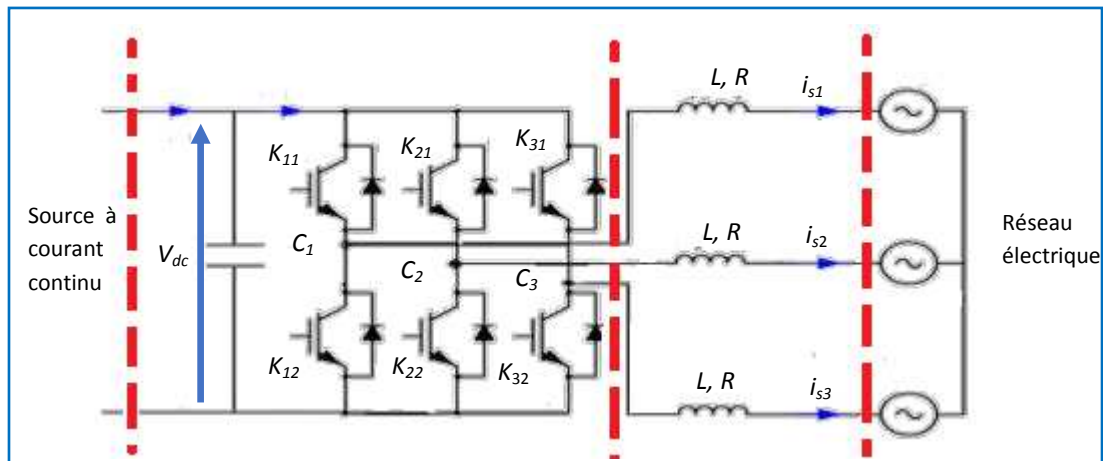


Figure II.9 Structure d'un onduleur de tension triphasé conventionnel raccordé au réseau

Les tensions simples délivrées à la de sortie de cet onduleur peuvent être exprimées par les équations suivantes :

$$\begin{pmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{pmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \tag{II.6}$$

### II.3.2.2 Onduleur triphasé à trois niveaux

L'onduleur triphasé à trois niveaux se compose de trois bras et de deux sources de tension continue ' $V_{dc}/2$ ' (qui peuvent être remplacées par une seule source munie d'un demi-pont capacitif constitué de deux condensateurs). Chaque bras est équipé de quatre interrupteurs en série et de deux diodes médianes. Chaque interrupteur est constitué d'un transistor et d'une diode montée en antiparallèle, voir figure II.10.

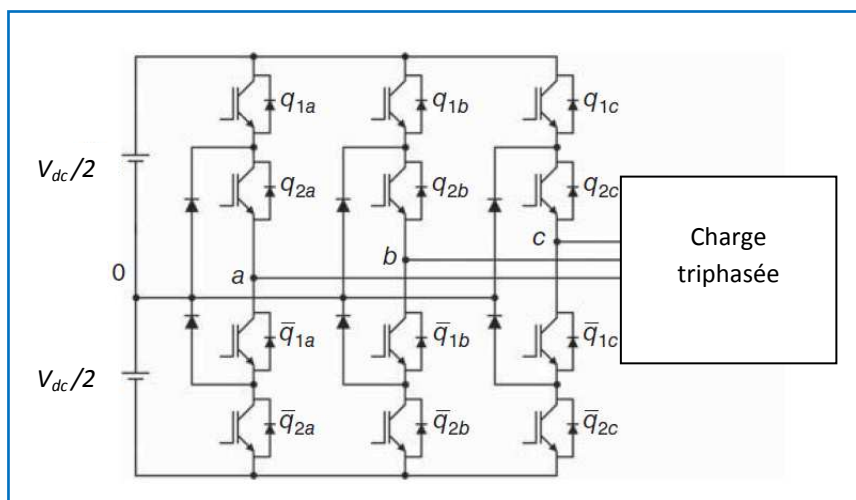


Figure II.10 Schéma d'un onduleur triphasé à trois niveaux

Maintenant, on va exprimer la tension  $v_{ao}$  délivrée à la sortie du premier demi-bras entre la borne ( $a$ ) de la charge et le point neutre ( $O$ ) de la source. Cette tension est entièrement définie par l'état ('0' ou '1') des quatre interrupteurs ( $T_{q1a}$ ,  $T_{q2a}$ ,  $T_{q3a}$  et  $T_{q4a}$ ) du bras. Et comme, l'onduleur à trois niveaux est symétrique, l'étude peut se limiter au fonctionnement d'un bras (où on distingue trois configurations possibles) [31].

Le tableau récapitulatif ci-dessous résume la tension de sortie  $V_{ao}$  d'un bras d'un onduleur à trois niveaux en fonction des états des quatre interrupteurs. Il est à noter que la tension aux bornes des interrupteurs de puissance ne dépasse jamais la moitié de la tension du bus d'entrée. Comparativement à l'onduleur conventionnel qui délivre deux niveaux de tension, chaque demi-bras de cet onduleur présente trois niveaux de tension grâce à la fermeture de deux interrupteurs adjacents [31].

**Tableau II.1** Configurations possibles d'un bras de l'onduleur à trois niveaux

Etat des interrupteurs				Tension de sortie $v_{ao}$
$q_{1a}$	$q_{2a}$	$q_{3a}$	$q_{4a}$	
1	1	0	0	$V_{dc}/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-V_{dc}/2$

Notons d'après cette table de vérité que ( $q_{3a} = \bar{q}_{1a}$  &  $q_{4a} = \bar{q}_{2a}$ ). De même, on peut écrire pour les deux autres bras : ( $q_{3b} = \bar{q}_{1b}$  &  $q_{4b} = \bar{q}_{2b}$ ) et ( $q_{3c} = \bar{q}_{1c}$  &  $q_{4c} = \bar{q}_{2c}$ ).

Ces différents états seront représentés par les notations '1', '0' ou '-1', correspondant respectivement aux niveaux de tension  $V_{dc}/2$ , 0 et  $-V_{dc}/2$ .

Ainsi, les transitions de ce bras entre l'état '1' et l'état '0' se font en commutant entre les interrupteurs  $T_{q1a}$  et  $T_{q3a}$ , tandis que  $T_{q2a}$  reste toujours fermé et  $T_{q4a}$  toujours ouvert.

De même, les transitions entre l'état '0' et l'état '-1' se font en commutant entre les interrupteurs  $T_{q2a}$  et  $T_{q4a}$ , avec  $T_{q1a}$  ouvert et  $T_{q3a}$  fermé. Chacun des trois bras de l'onduleur peut prendre indépendamment les trois états '1', '0' ou '-1'.

On peut montrer que la tension de sortie du premier demi-bras ' $V_{ao}$ ' peut être exprimée ainsi :

$$v_{ao} = (q_{1a} + q_{2a} - 1) \frac{V_{dc}}{2} \quad (\text{II.7})$$

De même, on peut écrire :

$$v_{bo} = (q_{1b} + q_{2b} - 1) \frac{V_{dc}}{2} \quad (\text{II.8})$$

$$v_{co} = (q_{1c} + q_{2c} - 1) \frac{V_{dc}}{2} \quad (\text{II.9})$$

Après manipulation des équations (II.7) à (II.9), on obtient les expressions des tensions simples de cet onduleur :

$$\begin{pmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{pmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{pmatrix} 2 & 2 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 2 & 2 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 2 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_{1a} \\ q_{2a} \\ q_{1b} \\ q_{2b} \\ q_{1c} \\ q_{2c} \end{pmatrix}^T \quad (\text{II.10})$$

## II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné en détail la modélisation des convertisseurs statiques essentiels pouvant être utilisés dans les systèmes photovoltaïques reliés au réseau électrique.

Notre analyse s'est concentrée sur les convertisseurs *DC-DC*, notamment l'hacheur 'boost' et l'hacheur 'boost' de type 'KY', ainsi que les convertisseurs *DC-AC* à *MLI* auxquels on s'intéresse dans cette étude.

Ceci fournit des perspectives précieuses pour l'étude des systèmes photovoltaïques, offrant ainsi une base solide pour des applications plus efficaces et durables de l'énergie solaire dans les réseaux électriques.

*Chapitre III*  
*Commande des Convertisseurs*  
*Statiques du Système PV Etudié*

### III.1. Introduction

Après avoir présenté, au chapitre précédent, une étude détaillée sur les convertisseurs statiques *DC-DC* et *DC-AC* constituant le conditionneur de puissance du système *PV* étudié, nous allons présenter dans ce chapitre le bloc de commande de ce même système (constitué des blocs de commande de ces mêmes convertisseurs) qui permet respectivement :

- La poursuite du point de puissance maximale en appliquant la technique de la conductance incrémentale aux deux hacheurs survolteurs étudiés ;
- Le réglage indirect des puissances active et réactive injectées au réseau et ceci à l'aide d'une boucle externe dédiée au réglage de la tension du bus continu, et de deux boucles internes consacrées au réglage des deux courants actif et réactif des onduleurs étudiés.

### III.2. Présentation du bloc de commande du système *PV* étudié

Dans cette section, nous allons présenter et décrire le bloc de commande du système *PV* étudié qui comprend deux étages (voir figure III.1) :

- Un premier étage qui assure une commande *MPPT* permettant de piloter l'hacheur '*boost*' du système *PV* étudié en générant le rapport cyclique adéquat (voir section III.3) ;
- Un deuxième étage qui commande le convertisseur *DC-AC* (onduleur à *MLI*) en stabilisant la tension du bus continu et en régulant les deux courants (actifs et réactif) injectés au réseau tout en garantissant une synchronisation des tensions avec celles du réseau. Cet étage de commande est détaillé ci-après.

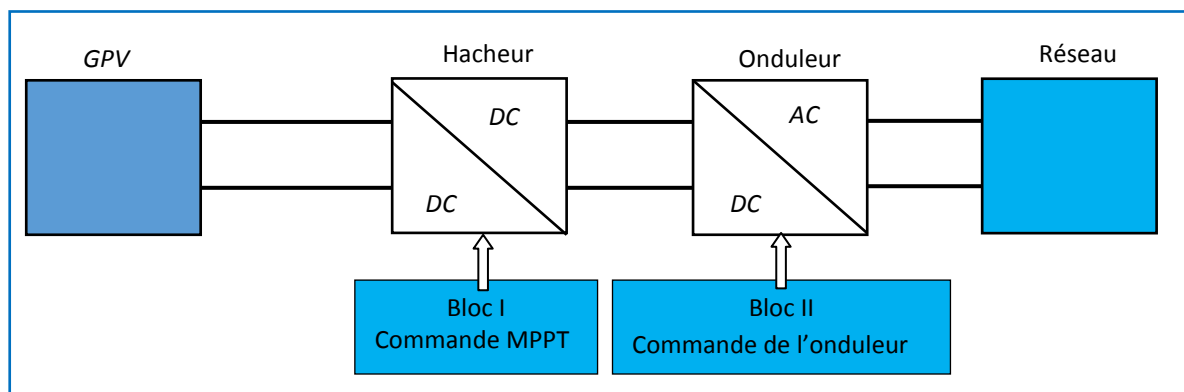


Figure III.1 Blocs de commande des deux étages de conversion du système *PV* étudié

Le deuxième bloc de commande du système *PV* comprend deux boucles internes pour réguler les courants actif et réactif injectés dans le réseau. La référence du courant réactif est maintenue à zéro, ce qui permet d'assurer un fonctionnement à facteur de puissance unitaire du côté du réseau c'est-à-dire une injection de puissance réactive 'nulle' dans le réseau. Ces deux boucles génèrent les références des deux composantes de tension ( $d$  (active) et  $q$  (réactive)), lesquelles sont ensuite transformées dans le repère  $abc$  pour calculer les références des tensions des deux onduleurs à *MLI*. L'angle ' $\theta$ ' de la transformation  $dq \rightarrow abc$  et  $abc \rightarrow dq$  est calculée en se basant sur la fréquence du réseau estimée par un circuit spécifique appelé boucle à verrouillage de phase (*PLL : Phase Locked Loop*) pour synchroniser les tensions délivrées par l'onduleur à celles du réseau.

Ce même bloc de commande comprend également une boucle externe qui est utilisée pour ajuster la tension du bus continu issue de l'hacheur '*boost*'. Cette boucle génère la référence du courant actif injecté dans le réseau.

On donne d'abord l'expression des deux puissances active et réactive injectées dans le réseau dans le repère ' $dq$ ' :

$$P_g = \frac{3}{2}(V_d I_d + V_q I_q) \quad (\text{III.1})$$

$$Q_g = \frac{3}{2}(V_q I_d - V_d I_q) \quad (\text{III.2})$$

Ensuite, l'orientation de la tension du réseau sur l'axe ( $d$ ) du repère ' $dq$ ' ( $V_d=V_g$  et  $V_q=0$ ), nous permet de commander de façon découplée la puissance active et réactive injectées au réseau. En effet, dans ces conditions ' $P_g$ ' peut être réglée par ' $I_d$ ' et ' $Q_g$ ' par ' $I_q$ '.

Par ailleurs, on a les équations des tensions du côté alternatif du système *PV* étudié dans le repère  $dq$  :

$$V_{ond\_d} = R_{tot} I_d - L_{tot} \frac{dI_d}{dt} - \omega L_{tot} I_q + V_d \quad (\text{III.3})$$

$$V_{ond\_q} = R_{tot} I_q + L_{tot} \frac{dI_q}{dt} + \omega L_{tot} I_d + V_q \quad (\text{III.4})$$

Où :

$V_{ond\_d,q}$  sont les composantes des tensions à la sortie de l'onduleur dans le repère ' $dq$ ' ;

$I_{d,q}$  sont les composantes des courant à la sortie de l'onduleur dans le repère ' $dq$ ' ;

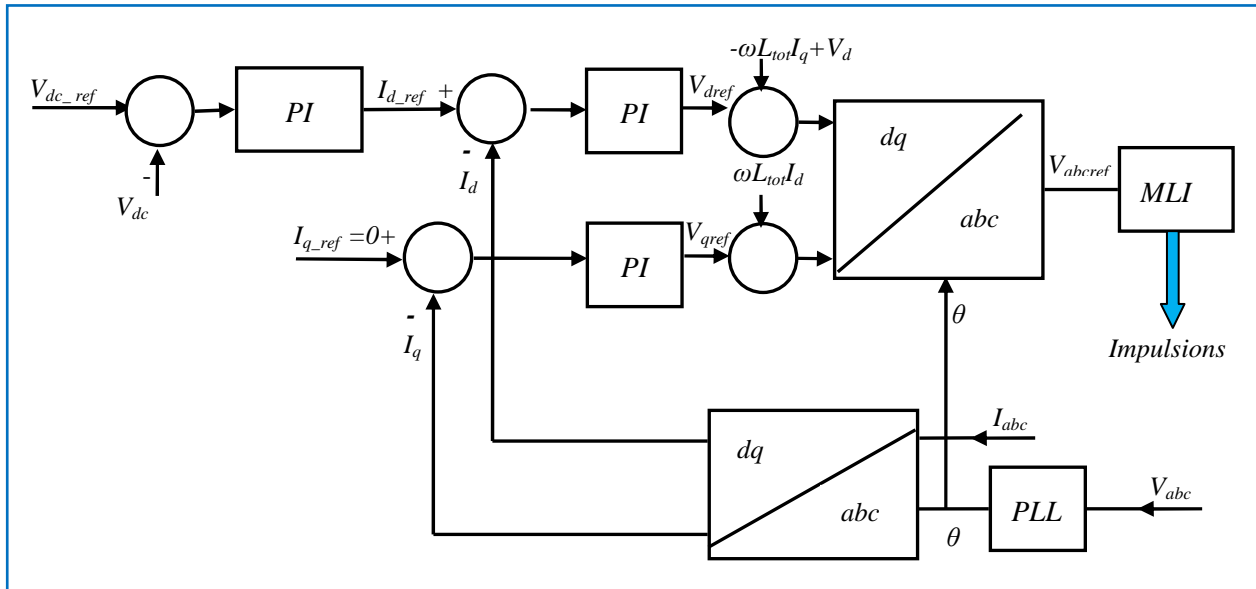
$V_{d,q}$  sont les composantes des tensions du réseau dans le repère 'dq' ;

$R_{tot}$  et  $L_{tot}$  sont respectivement la résistance et l'inductance totales et en série représentant le filtre, les lignes et le transformateur de couplage au réseau ;

$\omega$  est la pulsation du réseau.

Et comme la puissance moyenne à l'entrée du bus continu est égale à la puissance active échangée avec l'onduleur (c'est-à-dire le réseau), alors on peut régler la tension du bus continu ' $V_{dc}$ ' en agissant sur la composante directe ' $I_d$ ' du courant de l'onduleur. En outre, la référence du courant réactif ' $I_q$ ' est choisie égale à 'zéro' pour n'injecter au réseau que de la puissance active ce qui garantit un mode de fonctionnement à facteur de puissance unitaire.

Ainsi, le bloc de commande de l'onduleur triphasé à MLI connecté au réseau est présenté par la figure suivante :



**Figure III.2** Bloc de commande d'un onduleur triphasé à MLI couplé au réseau

Ce bloc de commande de l'onduleur génère à sa sortie les trois tensions de référence à utiliser pour générer les impulsions qui permettent le pilotage de celui-ci, via le générateur d'impulsions à MLI convenable au type d'onduleur triphasé (à deux niveaux ou à trois niveaux).

### III.3. Commande de l'hacheur survolteur

L'hacheur survolteur du système PV étudié est utilisé pour assurer un fonctionnement au point de puissance maximale (*Maximum Power Point 'MPP'*). La poursuite du *MPP* (*MPPT : Maximum Power Point Tracking*) est nécessaire pour extraire le maximum de puissance d'un système PV.

En général, un convertisseur *DC-DC* est placé entre le *GPV* et la charge, et en faisant varier le rapport cyclique on peut poursuivre le *MPP* pour différentes conditions d'opération [36].

Cette technique de commande *MPPT* permet d'exploiter au maximum l'énergie d'une installation solaire photovoltaïque. L'utilisation d'un régulateur de suivi du point de puissance maximale augmente l'efficacité énergétique d'un système PV d'environ 30%.

Initialement développée en 1968, cette technique a joué un rôle fondamental dans le fonctionnement des systèmes PV. Son principe consiste à ajuster automatiquement le rapport cyclique du convertisseur *DC-DC* (qui est l'hacheur *boost*) jusqu'à atteindre la valeur optimale maximisant la puissance fournie par le système PV.

Ainsi, quelles que soient les conditions météorologiques (de température  $T$  et d'éclairement  $G$ ), cette commande positionne le système au point de fonctionnement offrant la puissance maximale ( $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$ ) [37].

#### III.3.1. Principe d'une commande *MPPT*

Un algorithme permettant une commande *MPPT* peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le *MPP*.

En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du convertisseur statique *DC-DC* en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (Courant  $I_{pv}$  et tension  $V_{pv}$  et par conséquent de la puissance du *GPV*) jusqu'à se placer sur le *MPP*.

La figure suivante représente le schéma de principe d'une commande *MPPT* appliquée à un convertisseur *DC-DC* relié à un générateur photovoltaïque.

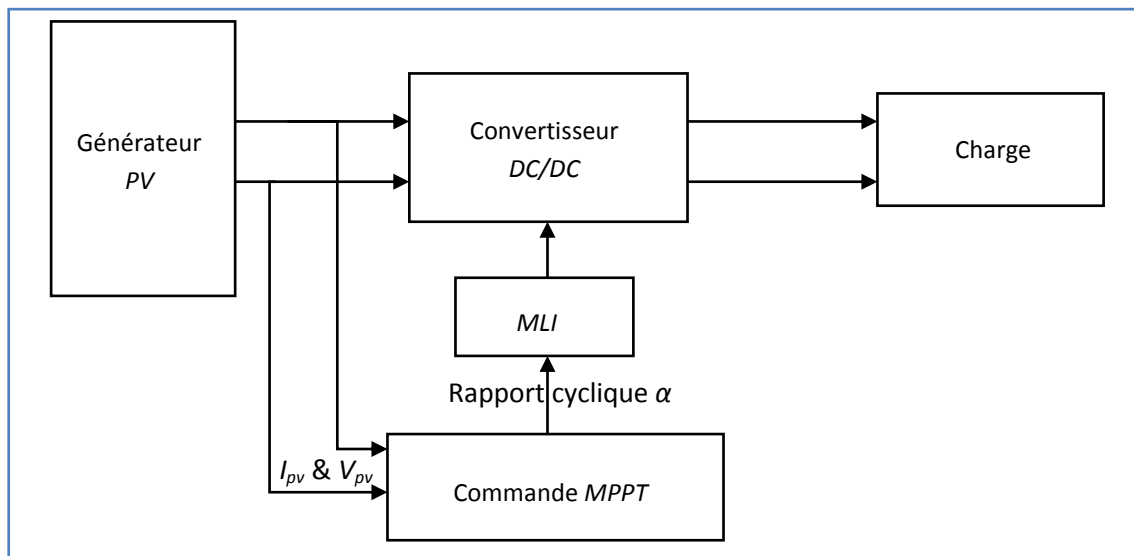


Figure III.3 Schéma de principe d'une commande MPPT

### III.3.2. Différentes techniques de MPPT

Il existe différents types d'algorithmes effectuant la recherche du point de puissance maximale, on cite principalement :

- La technique de 'perturbation et observation' notée '*P&O*' ;
- La méthode d'Incrément de la Conductance notée '*IC*' ;
- Et la méthode de la capacité parasite.

Dans notre travail, nous nous sommes limitées à la méthode de la conductance d'incrémentale qui est l'une des techniques les plus utilisées en pratique et que nous allons présenter ci-après et utiliser pour commander l'hacheur survolteur du système PV étudié.

### III.3.3. Méthode de la conductance incrémentale

Cette technique repose sur la variation de la conductance observée du côté du générateur PV et son impact sur la position du point de fonctionnement.

La conductance et son changement élémentaire (incrément) du côté d'une source photovoltaïque sont définis respectivement par :

$$G_c = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (\text{III.5})$$

$$dG_c = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (\text{III.6})$$

La caractéristique puissance-tension d'un générateur *PV*, permet d'établir les conditions suivantes :

- si  $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$  alors le point de fonctionnement du *GPV* est à gauche du *PPM* ;
- si  $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$  alors le point de fonctionnement du *GPV* est sur le *PPM* ;
- si  $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0$  alors le point de fonctionnement du *GPV* est à droite du *PPM*.

D'autre part, nous avons la dérivée de la puissance du *GPV* qui peut s'exprimer ainsi :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(V_{pv}I_{pv})}{dV_{pv}} = I_{pv} \frac{dV_{pv}}{dV_{pv}} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (\text{III.7})$$

D'où on peut déduire les conditions suivantes sur la variation de la conductance :

- Si  $I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \Rightarrow \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$  alors le point de fonctionnement du *GPV* est sur le *PPM* ;
- Si  $I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > 0 \Rightarrow \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$  alors le point de fonctionnement du *GPV* est à gauche du *PPM* ;
- Si  $I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} < 0 \Rightarrow \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} < -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$  alors le point de fonctionnement du *GPV* est à droite du *PPM*.

Ainsi, à chaque instant, le *MPP* peut être atteint en comparant la valeur de la conductance ( $I_{pv}/V_{pv}$ ) avec son incrément ( $dI_{pv}/dV_{pv}$ ).

L'organigramme de la figure III.4 résume les étapes de cet algorithme de *MPPT*. Dans ce cas, ' $V_{ref}$ ' représente la tension de référence utilisée pour générer le rapport cyclique (c'est-à-dire la commande de l'hacheur), tandis que ' $\Delta V$ ' désigne son incrément [38].

Notons que la tension délivrée à la sortie de l'hacheur '*boost*' augmente avec l'augmentation du rapport cyclique. Donc, l'organigramme précédent reste valable si on remplace la tension de référence par le rapport cyclique et ' $\Delta V$ ' par ' $\Delta \alpha$ '. Ainsi, on peut générer une valeur du rapport cyclique requis ' $\alpha$ ' pour atteindre le *MPP* à la place de ' $V_{ref}$ '.

Une fois le rapport cyclique déterminé, on peut générer les impulsions de commande du transistor 'S' de l'hacheur *boost* ou encore les deux transistors 'S<sub>1</sub>' et 'S<sub>2</sub>' de l'hacheur *boost* de type 'KY'.

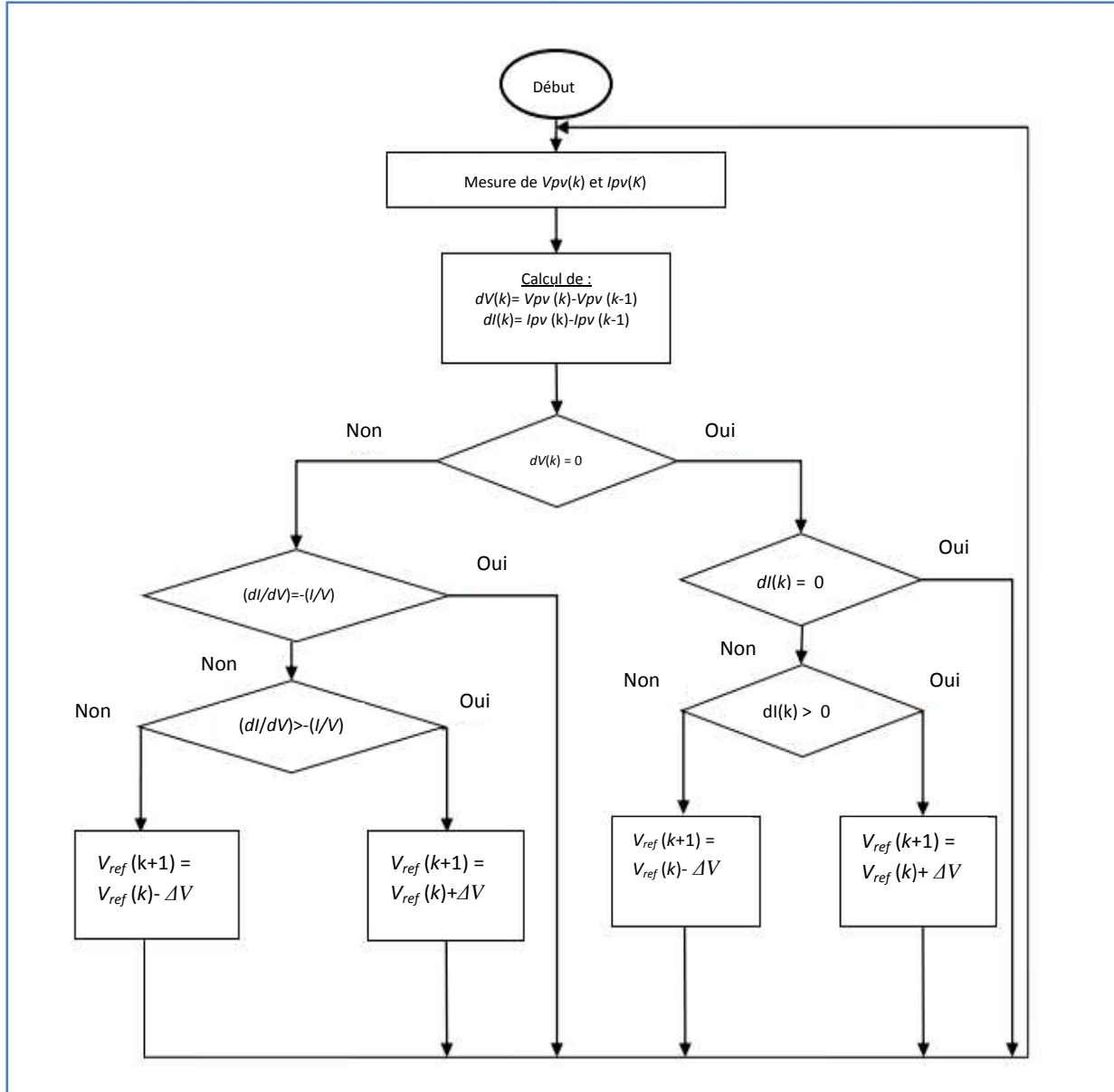


Figure III.4 Organigramme de la méthode de la conductance incrémentale

### III.4. Commande de l'onduleur du système PV étudié

L'onduleur du système PV étudié joue un rôle crucial en assurant simultanément le réglage de la tension du bus continu (tension d'entrée) et des courants actif et réactif injectés dans le réseau (courants de sortie). Cela permet, de manière indirecte, de contrôler les puissances (active et réactive) injectées dans le réseau.

De plus, l'onduleur garantit la synchronisation de ses tensions de sortie avec celles du réseau en suivant la fréquence du réseau grâce à la *PLL* qui estime la fréquence du réseau et en générant les amplitudes appropriées.

Il existe plusieurs techniques de commande destinée au pilotage des onduleurs triphasés. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la technique de commande par modulation de largeur d'impulsions (*MLI*) sinus – triangle qui est couramment utilisée. Dans ce qui suit, nous allons présenter deux variantes de cette technique de commande l'une est adaptée à l'onduleur triphasé à deux niveaux et l'autre est dédiée à l'onduleur triphasé à trois niveaux.

#### III.4.1. Technique de *MLI* sinus-triangle d'un onduleur triphasé à deux niveaux

Elle permet la reproduction d'un signal à fréquence constante en comparant un signal de référence avec un signal porteur triangulaire de fréquence plus élevée. Le signal de référence, appelé signal modulant, détermine la forme d'onde de la tension de sortie.

Cette technique se distingue par son taux de modulation appelé aussi coefficient de réglage ' $r$ ' et son indice de modulation ' $m$ '.

En effet, la largeur d'impulsion d'une technique à *MLI* sinus-triangle dépend du rapport entre le signal de référence et le signal triangulaire (porteuse). Ce rapport définit le taux de modulation :

$$r = \frac{V_{refm}}{V_{pm}} \quad (III.8)$$

Où  $V_{refm}$  est l'amplitude du signal de référence et  $V_{pm}$  est l'amplitude du signal de la porteuse (triangulaire).

On peut exprimer l'amplitude de la tension fondamentale d'une tension simple d'un onduleur triphasé conventionnel par :

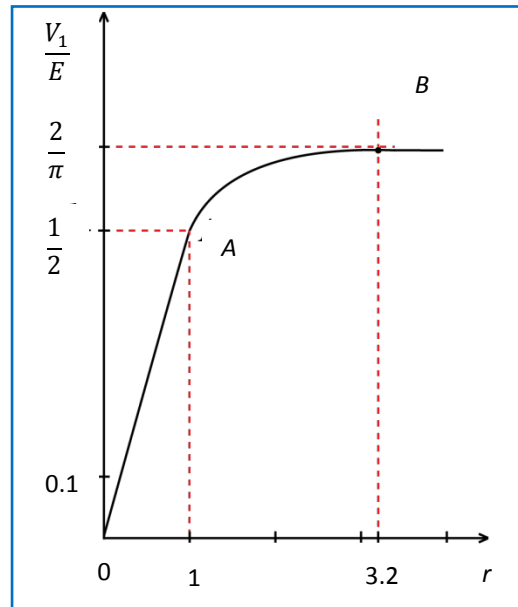
$$V_1 = r \frac{E}{2} \quad (III.9)$$

Lorsque ' $r$ ' varie de 0 à 1, ' $V_1$ ' varie de manière linéaire en fonction du taux de modulation. La valeur limite de ' $r$ ' est déterminée par la technique de modulation utilisée, et la valeur maximale de ' $V_1$ ' est égale à ' $E/2$ '.

Pour des valeurs de ' $r$ ' supérieures à 1, ' $V_1$ ' augmente de manière non linéaire et se stabilise à sa valeur maximale. Dans cette région, l'onduleur est en état de sur-modulation, voir figure III.5.

Un développement en série de *Fourier* des tensions de sortie d'un onduleur triphasé conventionnel dans le cas d'une onde rectangulaire montre que l'amplitude maximale de la première harmonique de ces tensions est [39] :

$$V_1 = \frac{4}{\pi} \times \frac{E}{2} = \frac{2}{\pi} E \quad (\text{III.10})$$



**Figure III.5** Amplitude de la composante fondamentale des tensions de sortie d'un onduleur en fonction du taux de modulation de la *MLI* sinus-triangle

D'autre part, la fréquence  $f_p$  du signal de la porteuse triangulaire est généralement considérablement supérieure à la fréquence  $f_r$  du signal de modulation ou de référence. L'indice de modulation qui est le rapport  $(f_p/f_r)$  est un paramètre très important de la commande à *MLI* sinus-triangle, il est exprimé par :

$$M = f_p/f_r \quad (\text{III.11})$$

Pour les valeurs faibles de ' $M$ ', il est nécessaire de synchroniser le signal de la porteuse avec celui de référence afin d'éliminer les sous-harmoniques indésirables dans la tension de sortie. Lorsque ces signaux sont synchronisés, ' $M$ ' est un nombre entier.

La valeur de ' $M$ ' dépend de la fréquence du signal de référence et affecte de manière significative la performance de l'onduleur. En augmentant la fréquence, les pertes de commutation dans l'onduleur augmentent, mais le spectre de tension de sortie est amélioré et il est plus facile de filtrer les harmoniques de haute fréquence provoquées par la modulation.

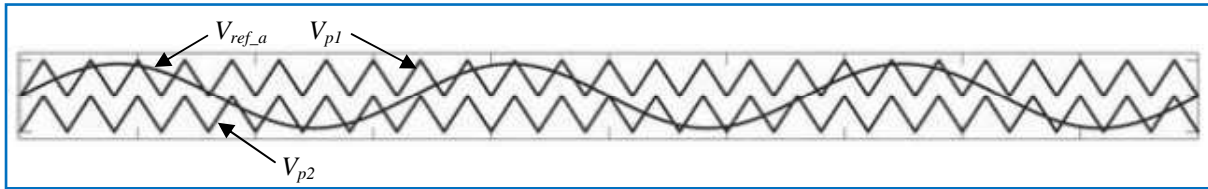
En résumé le bloc de *MLI* d'un onduleur triphasé à deux niveaux reçoit les trois tensions de référence ( $V_{ref\_a,b,c}$ ) et les compare au signal triangulaire de la porteuse ( $V_p$ ) pour générer les impulsions (signaux de commande des six transistors) ainsi :

- Si  $V_{ref\_a,b,c}(t) > V_p(t)$  alors  $S_{i=1,2,3} = 1$  ;
- Si  $V_{ref\_a,b,c}(t) < V_p(t)$  alors  $S_{i=1,2,3} = 0$  ;

Notons que ' $S_{i=1,2,3}=1$ ' veut dire que le transistor en haut ( $K_{1i}$ ) de la cellule  $C_{i=1,2,3}$  est mis en conduction et le transistor en bas ( $K_{2i}$ ) de la même cellule est bloqué. De même, ' $S_{i=1,2,3}=0$ ' veut dire que le transistor en bas ( $K_{2i}$ ) de la cellule  $C_{i=1,2,3}$  est mis en conduction et le transistor en haut ( $K_{1i}$ ) de la même cellule est bloqué.

### III.4.2. Technique de *MLI* sinus-triangle d'un onduleur triphasé à trois niveaux

Cette technique permet la modulation des largeurs d'impulsions des trois niveaux des tensions générées par les trois bras de l'onduleur. Dans ce cas, le bloc de *MLI* d'un onduleur triphasé à trois niveaux reçoit les trois tensions de référence ( $V_{ref\_a,b,c}$ ) et les compare à deux signaux triangulaires (porteuse positive  $V_{p1}$  et porteuse négative  $V_{p2}$ ) pour générer les impulsions (signaux de commande des douze transistors). La figure III.6 illustre le signal de référence ( $V_{refa}$ ) du bras (a) et les deux porteuses ( $V_{p1}$  et  $V_{p2}$ ).



**Figure III.6** Commande à MLI du bras (a) d'un onduleur triphasé à trois niveaux

Les signaux de commande ( $q_{1a}, q_{1a}, q_{3a} = \bar{q}_{1a}$  &  $q_{4a} = \bar{q}_{2a}$ ) des quatre transistors ( $T_{q1a}, T_{q2a}, T_{q3a}$  et  $T_{q4a}$ ) de ce bras sont générés comme suit [40]:

- Si  $V_{refa}(t) > V_{p1}(t)$  alors  $q_{1a} = 1$  ;
- Si  $V_{refa}(t) < V_{p1}(t)$  alors  $q_{1a} = 0$  ;
- Si  $V_{refa}(t) > V_{p2}(t)$  alors  $q_{2a} = 1$  ;
- Si  $V_{refa}(t) < V_{p2}(t)$  alors  $q_{2a} = 0$  ;

Les signaux de commande  $q_{3a}$  et  $q_{4a}$  se déduisent par complémentarité aux deux signaux  $q_{1a}$  et  $q_{2a}$ . De même, les signaux de commande des deux bras (b& c) peuvent être déterminés en remplaçant respectivement  $V_{refa}$  par ( $V_{refb}$  &  $V_{refc}$ ) et ( $q_{1a}, q_{2a}, q_{3a}$  et  $q_{4a}$ ) par ( $q_{1b}, q_{2b}, q_{3b}$  et  $q_{4b}$ ) et ( $q_{1c}, q_{2c}, q_{3c}$  et  $q_{4c}$ ) respectivement.

### III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la partie commande des deux types de convertisseurs *DC-DC* (*boost* et *boost* de type *KY*) ainsi que des convertisseurs *DC-AC* (onduleurs à *MLI* à deux et à trois niveaux), qui forment le conditionneur de puissance du système *PV* étudié.

Ces deux étages constituent le bloc de commande du système étudié, assurant à la fois un suivi du point de puissance maximale (*MPPT*) et une régulation indirecte et découplée des puissances active et réactive injectées dans le réseau. Cette régulation est réalisée à travers trois boucles de rétroaction, concernant la tension du bus continu ainsi que les courants actif et réactif à la sortie de l'onduleur.

Après avoir terminé la partie théorique de notre étude concernant le système *PV* connecté au réseau, nous allons entamer désormais la partie simulation, ce qui fera l'objet du chapitre suivant.

*Chapitre IV*  
*Présentation et Discussion des*  
*Résultats de Simulation*

## IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons d'abord décrire et introduire le système *PV* étudié qu'on a simulé à l'aide de *MATLAB/SIMULINK* qui est une interface graphique permettant de construire des modèles sous forme de diagrammes blocs. Il offre l'avantage d'établir des modèles hiérarchisés qui donnent la possibilité de voir le système à différents niveaux. *SIMULINK* permet également de concevoir des modèles modulaires, qui ont l'avantage d'être facilement reliés entre eux afin de simuler la dynamique d'un système.

Ensuite, nous examinerons et discuterons les résultats de simulation obtenus dans diverses conditions de fonctionnement, notamment les variations d'éclairement et de température, en mode *MPPT*. Ceci sera réalisé en comparant deux types d'étage *DC-DC* du conditionneur de puissance : un hacheur '*boost*' conventionnel et un hacheur '*boost*' de type '*KY*'. Pour chaque configuration, nous analyserons les performances du système en termes de suivi du *MPP* en particulier et de la qualité d'énergie afin de mettre en évidence les avantages du convertisseur *DC-DC* de type '*KY*'.

## IV.2. Présentation du Système PV Etudié

Le système *PV* étudié est composé d'un générateur *PV*, d'un hacheur '*boost*' (conventionnel ou de type '*KY*') et d'un onduleur triphasé à *MLI* (à deux ou à trois niveaux) connecté au réseau à travers un filtre *LC* et un transformateur de couplage, voir figure IV.1. Les données des différents éléments de ce système sont récapitulées dans une annexe placée à la fin de ce mémoire.

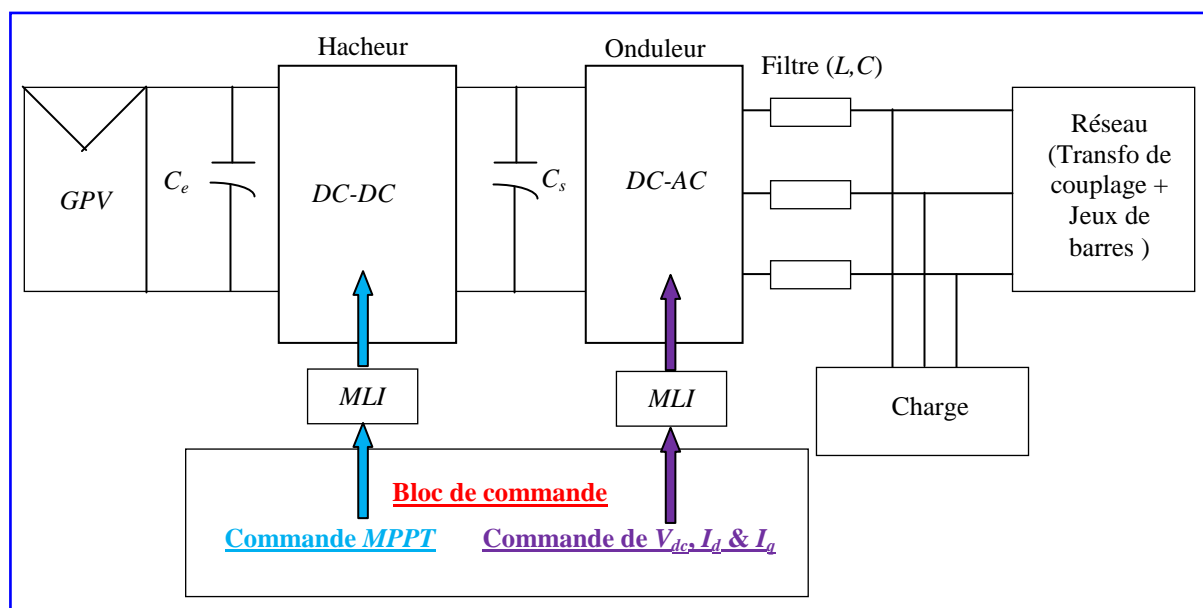
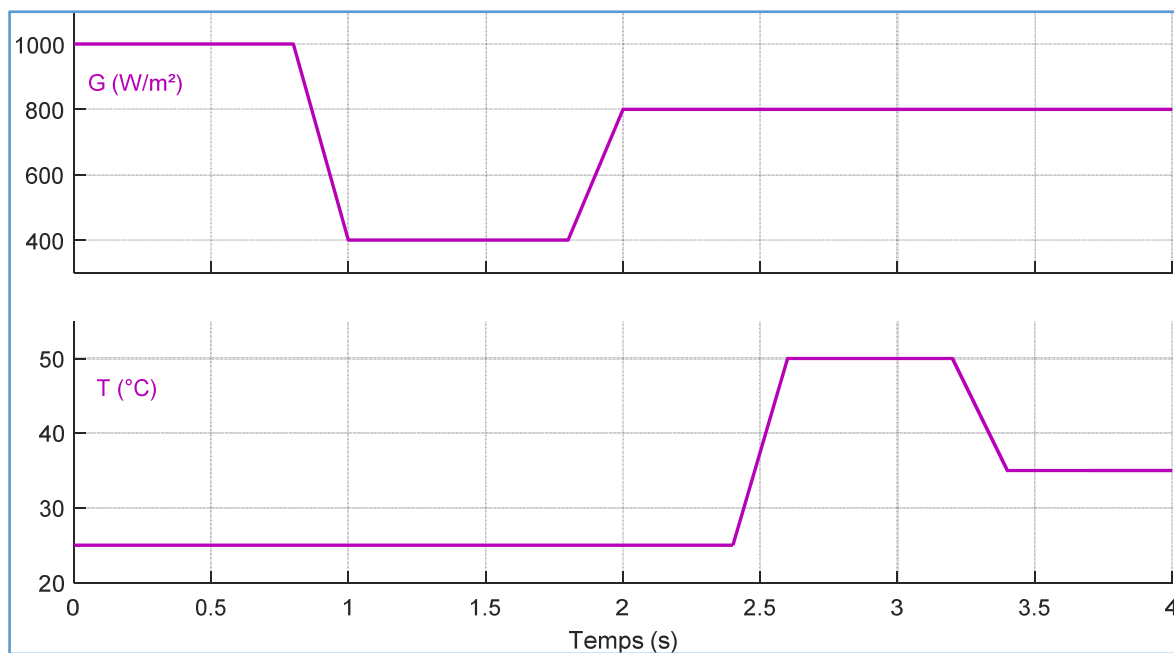


Figure IV.1 Schéma synoptique du système PV étudié

Ce système a été simulé sous *MATLAB/SIMULINK*. Le générateur photovoltaïque est constitué de ( $N_p=66$ ) branches parallèles (ou encore '*strings*') chacune de ( $N_s=5$ ) modules de type '*Sun Power - SPR-305*' (d'une puissance de 305 Wc délivrée pour un éclairement  $G=1000$  W/m<sup>2</sup> et une température  $T=25^\circ\text{C}$ ) en série dont les paramètres et les caractéristiques I-V et P-V ont été présentées au premier chapitre. Ainsi, ce système possède une puissance nominale (obtenue pour  $G=1000$  W/m<sup>2</sup> et  $T=25^\circ\text{C}$ ) d'environ 100 kWc.

Dans nos simulations, nous avons considéré des profils d'éclairement et de température qui sont illustrés par la figure suivante IV.2.

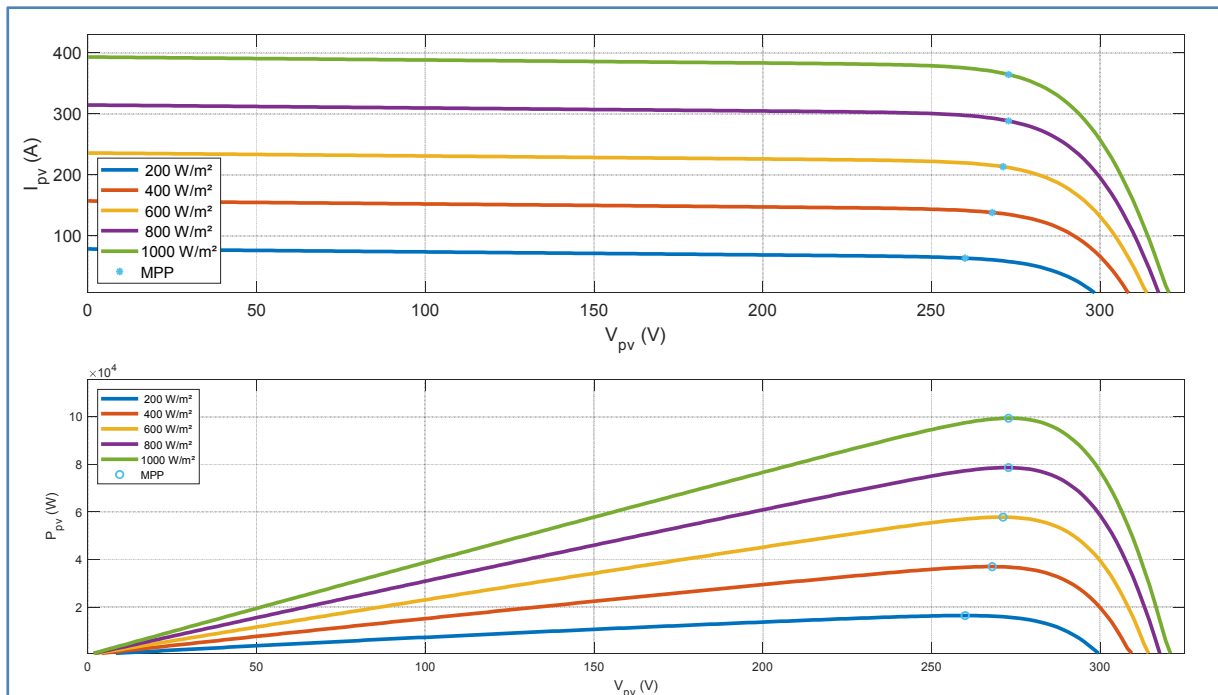


**Figure IV.2** Profils de l'éclairement et de la température appliqués au GPV du système étudié

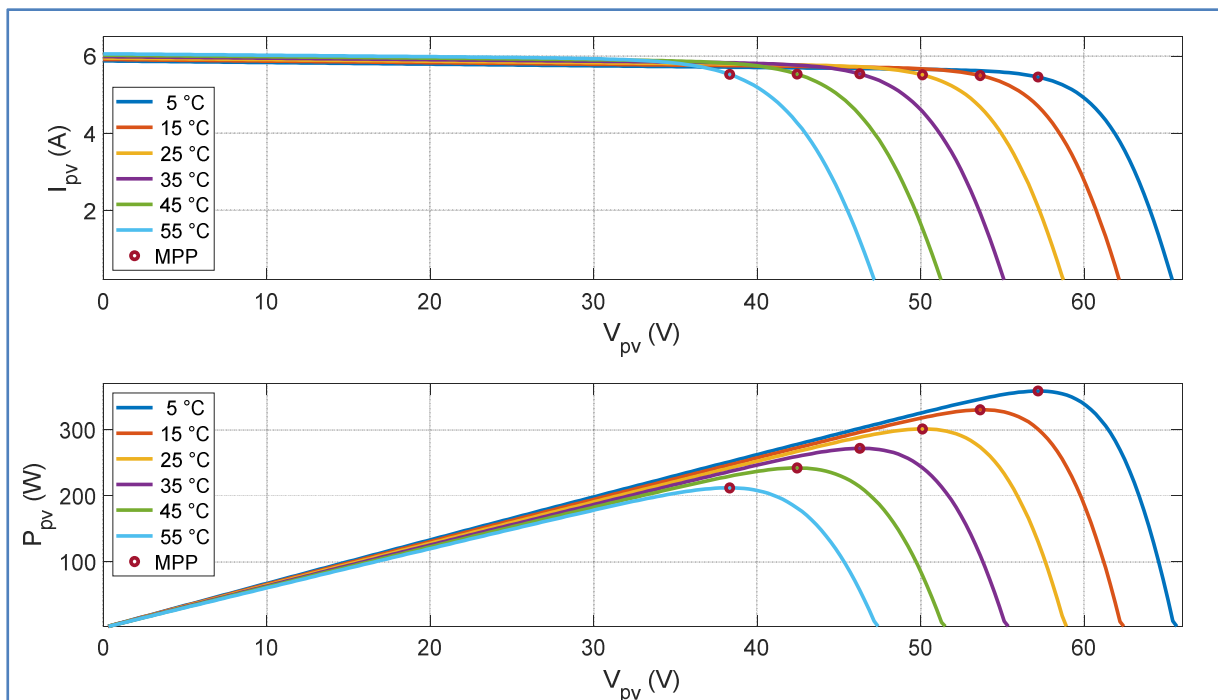
De plus, nous avons simulé la dynamique de ce système PV sur un intervalle de 4 secondes selon le scénario suivant :

- Dans l'intervalle  $[0 \ 0.1]$  s, la commande de l'hacheur et celle de l'onduleur ne sont pas encore débloquées et le système reste en mode '*stand-by*' ;
- Dans l'intervalle  $[0.1 \ 0.4]$  s, l'hacheur opère en boucle ouverte avec un rapport cyclique fixé à 0.5 et l'onduleur fonctionne normalement. Dans cette séquence, l'éclairement et la température sont constants ( $G=1000$  W/m<sup>2</sup> &  $T=25^\circ\text{C}$ ).
- Dans l'intervalle  $[0.4 \ 4]$  s, l'hacheur opère normalement (la commande *MPPT* est activée) et l'onduleur fonctionne normalement aussi en réglant ' $V_{dc}$ ' à sa référence et en assurant un fonctionnement à facteur de puissance unitaire. Pendant cet intervalle  $G$  et  $T$  varient selon leurs profils respectifs.

Par ailleurs, les caractéristiques  $I$ - $V$  et  $P$ - $V$  du générateur  $PV$  du système étudié pour différents éclairagements et températures sont illustrées par la figure (IV.3).



a) Différents éclairagements et  $T=25^\circ\text{C}$



b) Différentes températures et  $G=1000\text{W/m}^2$

**Figure IV.3** Caractéristiques  $I$ - $V$  et  $P$ - $V$  du générateur  $PV$  étudié pour deux cas différents

### IV.3. Présentation et discussion des résultats

L'étage *DC-DC* du système *PV* étudié est constituée soit d'un hacheur '*boost*' conventionnel, soit d'un hacheur '*boost*' de type '*KY*', tandis que l'étage *DC-AC* est composé soit par un onduleur triphasé conventionnel (à deux niveaux) ou bien à trois niveaux.

Dans ce qui suit, nous allons présenter et discuter les résultats de simulation de ces quatre cas, puis nous allons les comparer en termes de performance et de qualité d'énergie.

#### IV.3.1. Cas d'un conditionneur de puissance à base d'un hacheur '*boost*' conventionnel et un onduleur à deux niveaux

Dans ce cas, le schéma bloc du système *PV* étudié, simulé sous l'environnement *MATLAB/SIMULINK*, est illustré par la figure (IV.4).

De plus, la figure (IV.5) représente le bloc de commande de l'hacheur qui assure la poursuite du *MPP* par le biais du 'bloc de commande *MPPT*' et la génération des impulsions *DC-DC* pour piloter le transistor du convertisseur survolteur.

En outre, la figure (IV.6) illustre le bloc de commande de l'onduleur à *MLI* à deux niveaux qui garantit un réglage de la tension du bus continu et des deux courants (actif et réactif) injectés au réseau. Ce bloc comprend principalement les trois régulateurs '*PI*' de '*V<sub>dc</sub>*', '*I<sub>d</sub>*' et '*I<sub>q</sub>*', un bloc '*PLL*' pour synchroniser les tensions de sortie de l'onduleur avec celles du réseau et un générateur d'impulsions pour délivrer les signaux de commande des six transistors de l'onduleur.

D'autre part, les figures (IV.7) à (IV.10) illustrent les résultats de simulation obtenus pour ce cas spécifique. On note que la puissance délivrée par le générateur *PV* est pratiquement nulle en mode stand-by (c'est-à-dire pour  $t \in [0 \ 0.1] \text{ s}$ ), car pendant ce laps de temps la commande de l'hacheur et celle de l'onduleur ne sont pas encore activées et le système n'est pas fonctionnel.

Ensuite (pour  $t \in [0.1 \ 0.4] \text{ s}$ ), on remarque que la puissance délivrée par le générateur *PV* ne correspond pas à sa valeur maximale du *MPP*, en effet elle est en dessous de celle-ci car la commande *MPPT* n'est pas encore activée et l'hacheur fonctionne en boucle ouverte avec un rapport cyclique constant ( $\alpha=0.5$ ).

Par contre, et à partir de 0.4s jusqu'à 4s, le système fonctionne en mode *MPPT* et le niveau de la puissance délivrée par le *GPV* varie selon le profil de l'éclairement (augmente avec son augmentation) et le profile de la température (diminue avec son augmentation), ce qui montre l'efficacité de la *MPPT* (voir figures IV.2 & IV.7).



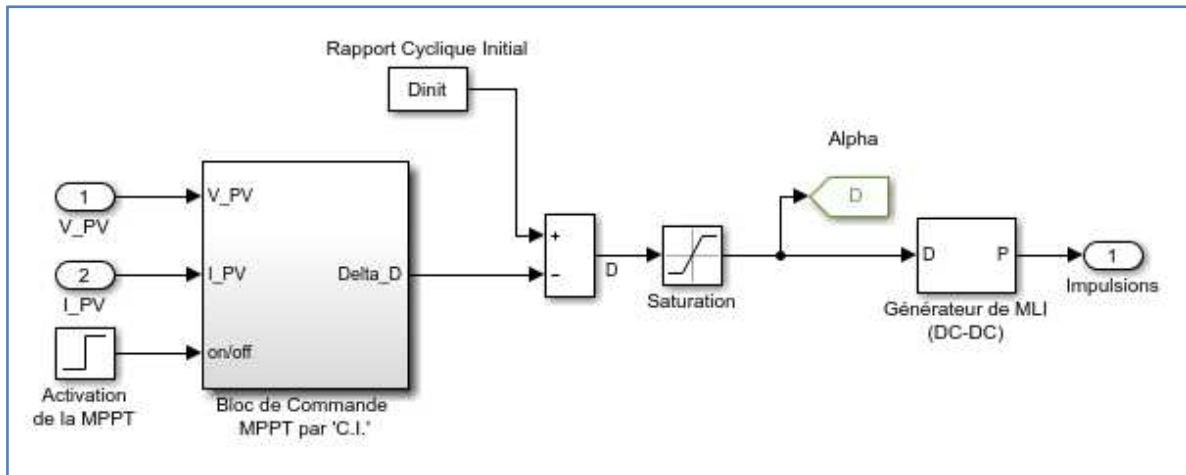


Figure IV.5 Bloc de commande de l'hacheur assurant la MPPT

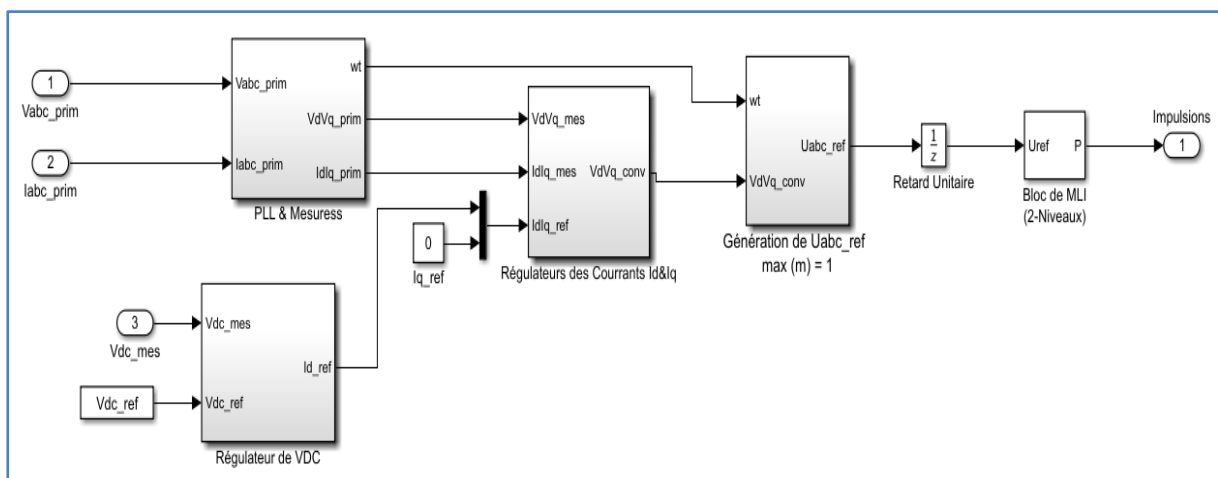


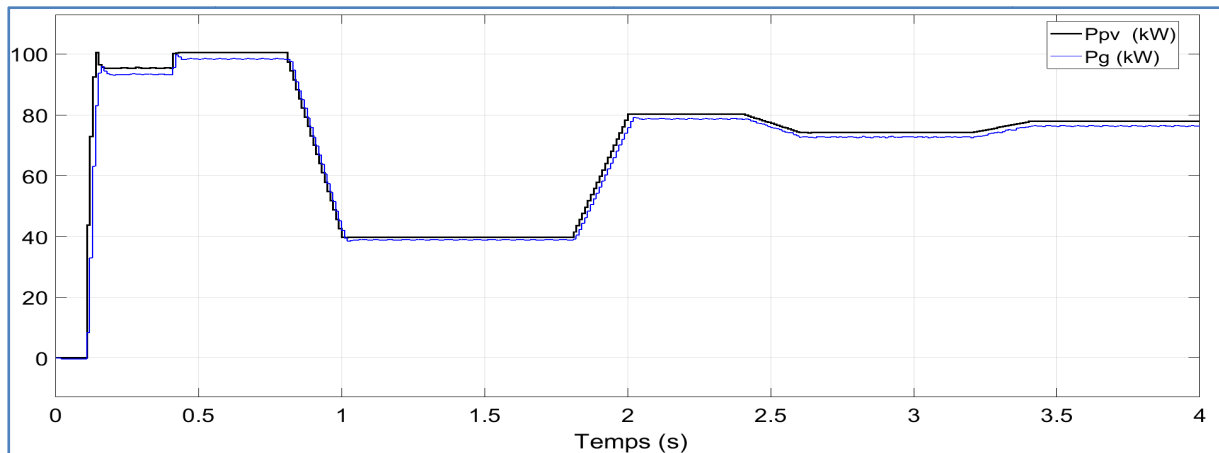
Figure IV.6 Bloc de commande de l'onduleur triphasé à MLI à 2N garantissant une commande indirecte des puissances active et réactive

De sa part, la puissance injectée dans le réseau est égale à la puissance du générateur photovoltaïque aux pertes près, voir figure (IV.7). Ces pertes sont dissipées dans le conditionneur de puissance, le filtre, le transformateur de couplage et les lignes de transport de l'énergie.

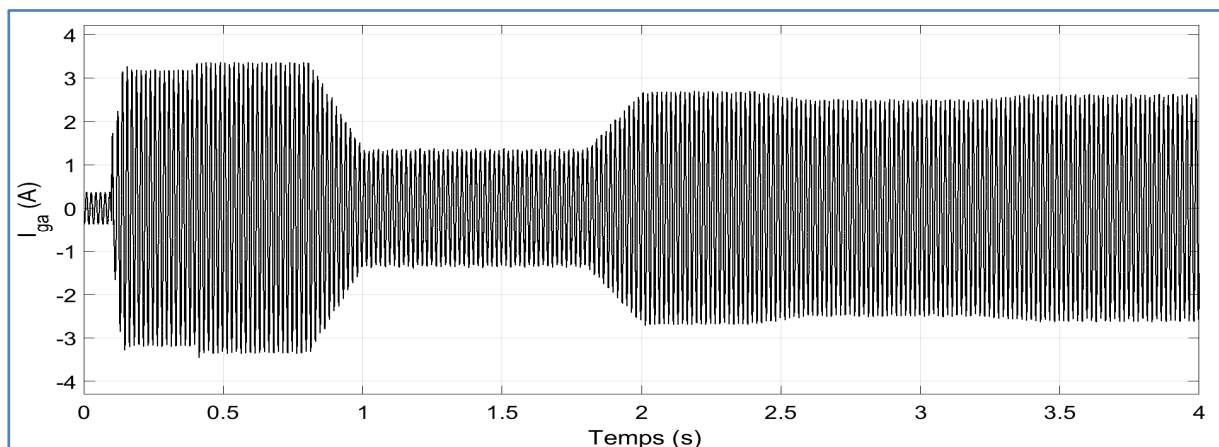
De plus, le courant injecté dans le réseau du côté haute tension varie en amplitude selon le profil de la puissance, étant donné que la tension du réseau reste pratiquement constante (source de tension), comme le montre la figure IV.8.a. On remarque également que ce courant injecté au réseau est pratiquement en phase avec la tension du réseau ce qui confirme le bon réglage découplé des courants actif et réactif et assure un fonctionnement à facteur de puissance unitaire, voir figure IV.8.b.

En outre, la figure IV.9 illustre l'évolution de la tension du bus continu ' $V_{dc}$ ' (tension d'entrée de l'onduleur à MLI), qui suit convenablement sa référence (500V) pour divers

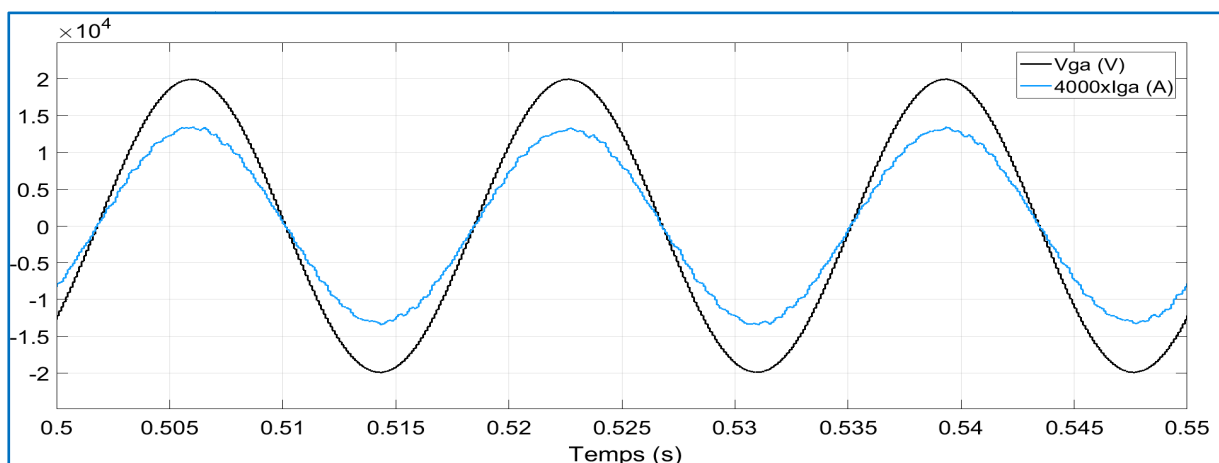
niveaux de puissance, même en présence de variations considérables de l'éclairement et de la température, en marquant des déviations non significatives pendant les transitions.



**Figure IV.7** Puissance du *GPV* et puissance active injectée au réseau dans le cas d'un conditionneur de puissance constitué d'un hacheur survolteur associé à un onduleur à deux niveaux

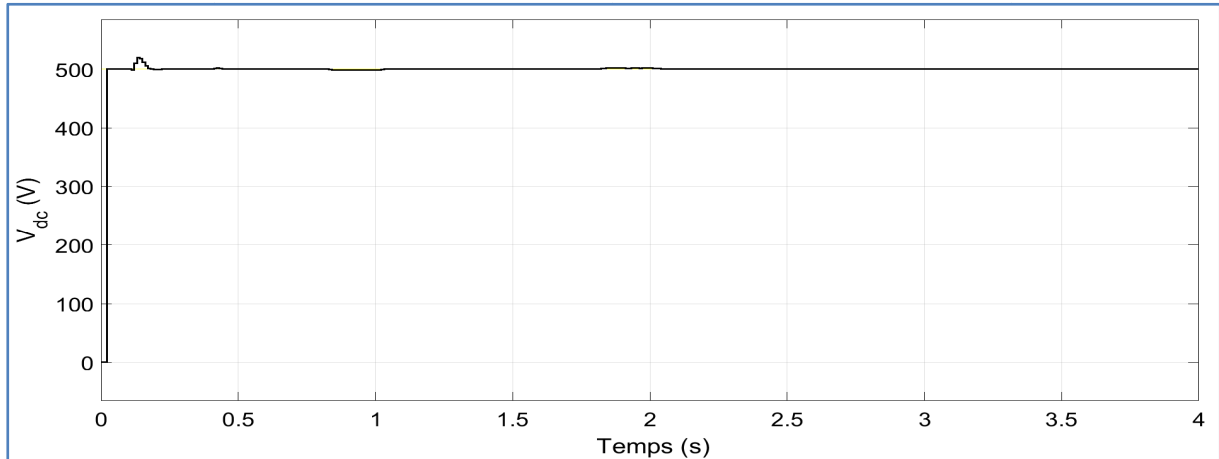


a) Courant injecté au réseau



b) Zoom du courant et de la tension

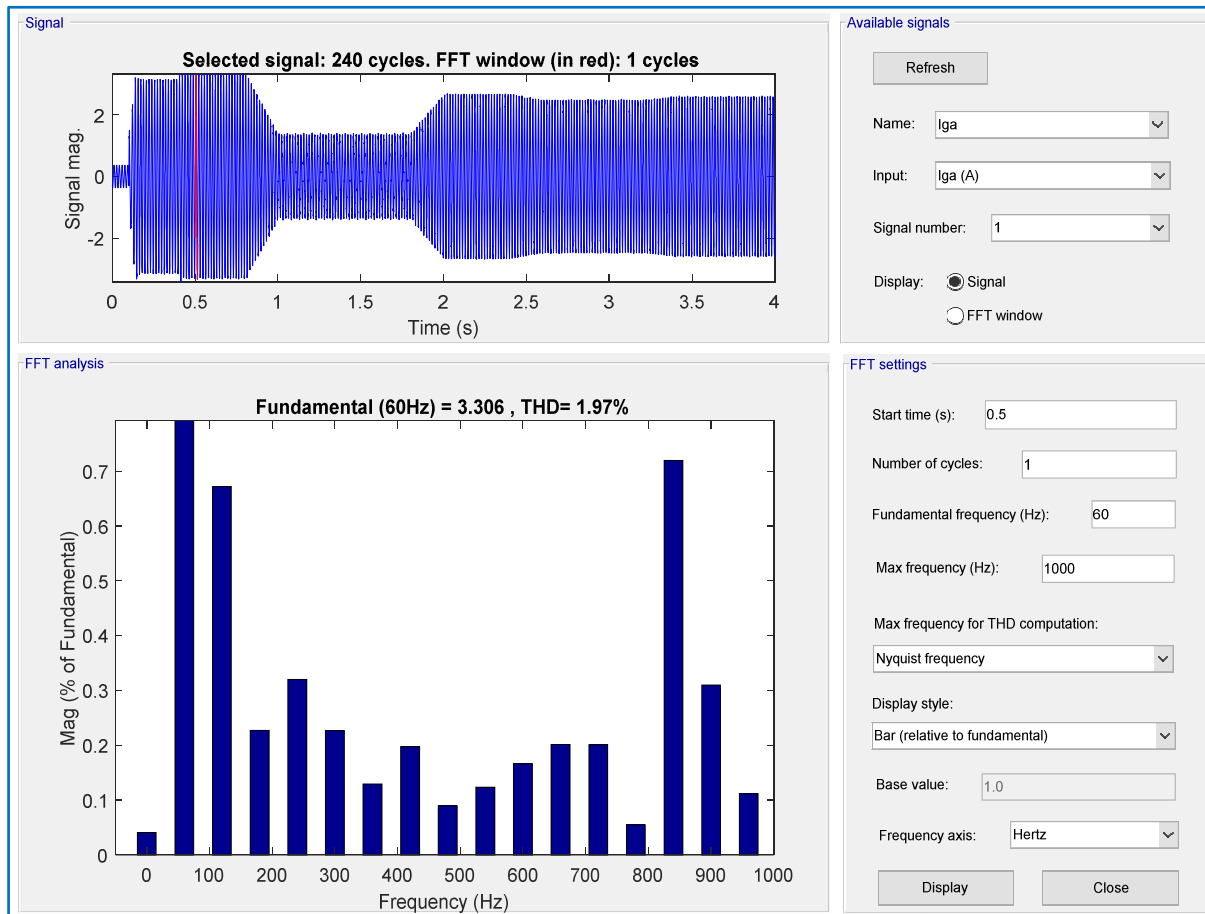
**Figure IV.8** Allure du courant et de la tension du réseau dans le cas d'un onduleur à deux niveaux



**Figure IV.9** Allure de la tension d'entrée (du bus continu) d'un onduleur à deux niveaux

Par ailleurs, une analyse spectrale par *FFT* du courant injecté dans le réseau nous permet d'évaluer la qualité de l'énergie transmise par le système photovoltaïque au réseau, à travers le taux de distorsion harmonique *THD%*, comme l'illustre la figure (IV.10).

Nous avons considéré une fenêtre d'analyse de 'un cycle' à partir de  $t=0.5$  s. On remarque que ce taux de distorsion harmonique de courant injecté dans le réseau dans ce cas est de 1.97 % et se situe en dessous de la norme requise, établie à 5 %. Cette performance est le résultat de la fréquence élevée de commutation de l'onduleur et de la présence du filtre *LC* à sa sortie.



**Figure IV.10** Analyse spectrale par *FFT* du courant injecté au réseau dans le cas d'un conditionneur de puissance à base d'un hacheur boost et un onduleur à deux niveaux

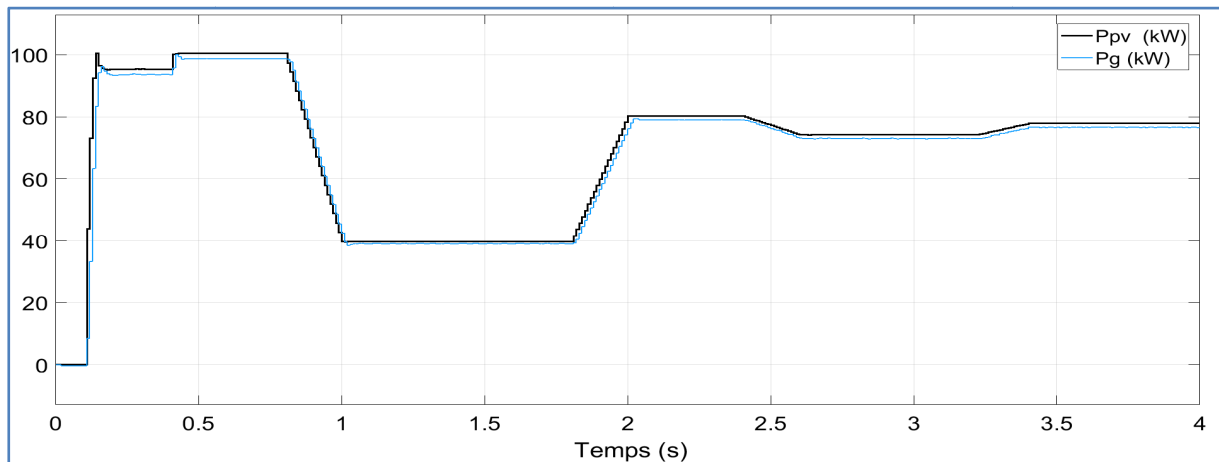
### IV.3.2. Cas d'un conditionneur de puissance à base d'un hacheur 'boost' conventionnel et un onduleur à trois niveaux

Le schéma bloc sous *SIMULINK* du système *PV* étudié à base d'un hacheur survolteur conventionnel et un onduleur à trois niveaux est illustré par la figure IV.11.

Le bloc de commande de l'hacheur qui assure la poursuite du *MPP* est similaire à celui de la figure IV.5. De plus, le bloc de commande de l'onduleur à *MLI* à trois niveaux garantit le réglage de la tension du bus continu et des deux courants (actif et réactif) injectés au réseau et ne diffère de celui de la figure IV.6 que par le générateur d'impulsions qui délivre dans ce cas les signaux de commande des 12 transistors de l'onduleur (c'est un générateur d'impulsion d'un onduleur à trois niveaux).



La figure suivante représente l'allure de la puissance générée par le *GPV* ainsi que celle de la puissance injectée dans le réseau électrique.

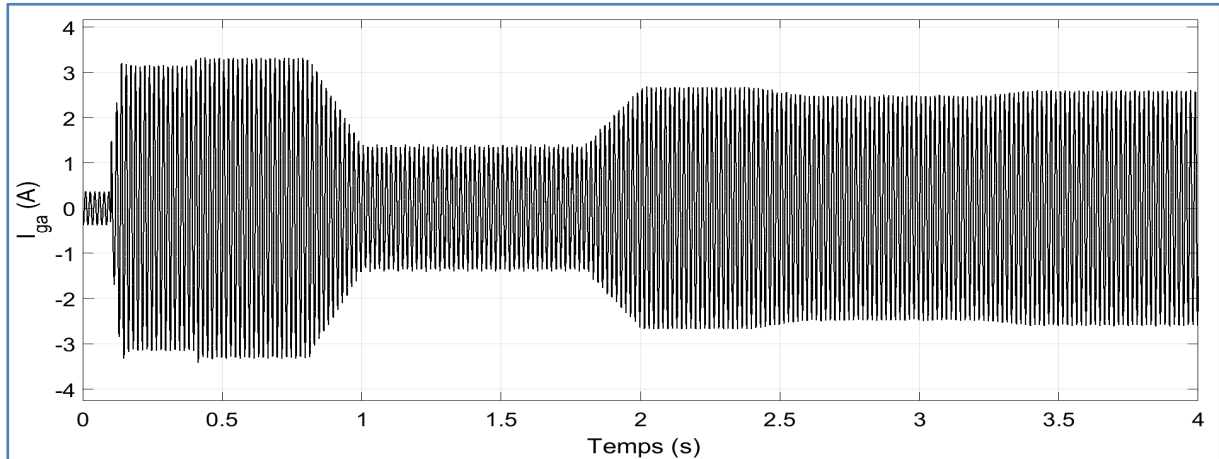


**Figure IV.12** Puissance du *GPV* et puissance active injectée au réseau dans le cas d'un conditionneur de puissance à base d'un hacheur 'boost' et d'un onduleur à *MLI* à trois niveaux

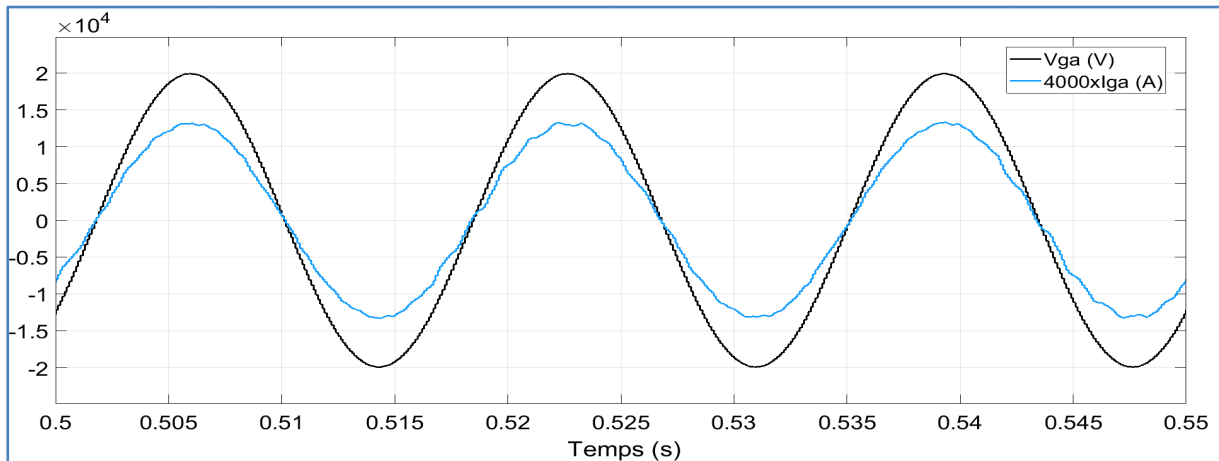
On a noté une fois de plus que la puissance injectée dans le réseau électrique suit pratiquement le niveau de celle du *GPV* lequel varie selon le profil d'éclairement solaire et la température (aux pertes près dans le conditionneur de puissance, le filtre *LC*, le transformateur de couplage et les lignes) ce qui indique le bon suivi du *MPP*. Pratiquement, il n'existe pas de différence entre les résultats obtenus dans le cas des deux onduleurs, mis à part la qualité de la puissance délivrée au réseau qui devient un peu plus lisse dans le cas de l'onduleur à trois niveaux (voir figures IV.7 et IV.11).

Il est également à noter qu'une hausse de la température et une baisse de l'éclairement, entraînent naturellement une diminution de la puissance produite par le *GPV*, et vice versa. Le niveau de puissance délivrée se stabilise et demeure constant pendant les périodes où la température et ou l'éclairement est constant.

En outre, le courant injecté dans le réseau, du côté haute tension, varie en amplitude dans le même sens que les variations de puissance, car la tension du réseau demeure pratiquement constante (source de tension), comme l'illustre la figure IV.13.a. On remarque que le courant injecté au réseau est pratiquement en phase avec la tension du réseau ce qui confirme le bon réglage des courants et assure un fonctionnement à facteur de puissance unitaire, voir figure IV.13.b.



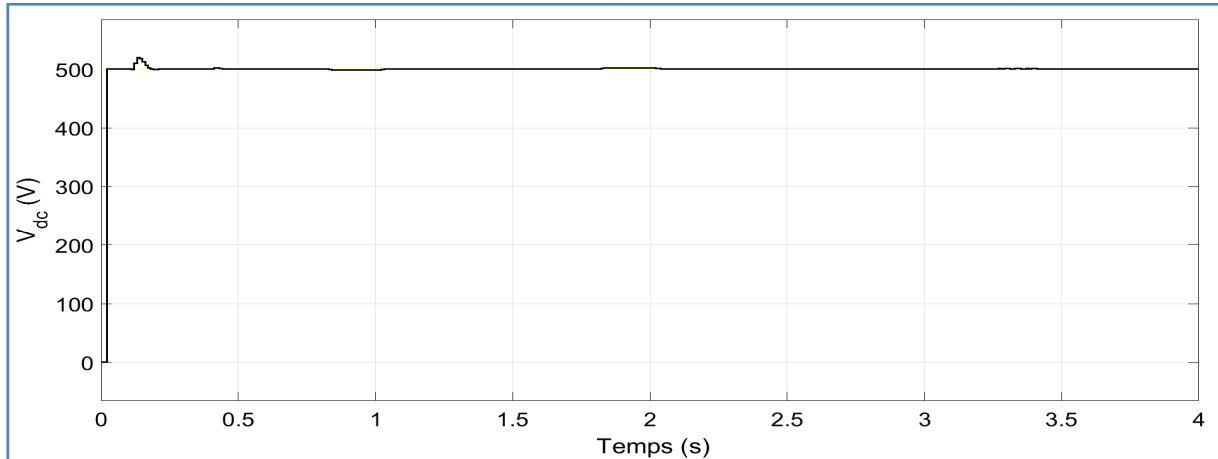
a) Courant injecté au réseau



b) Zoom du courant et de la tension

**Figure IV.13** Allure du courant et de la tension du réseau dans le cas d'un onduleur à trois niveaux

Par ailleurs, la figure suivante montre aussi l'évolution de la tension du bus continu, qui marque un pic au début, puis reste collée pratiquement à sa référence (500V) pour différents niveaux de puissance (mises à part de petites déviations pendant les périodes de transition), malgré les larges variations de l'éclairement et de la température. Ceci montre le bon réglage de la tension du bus continu.



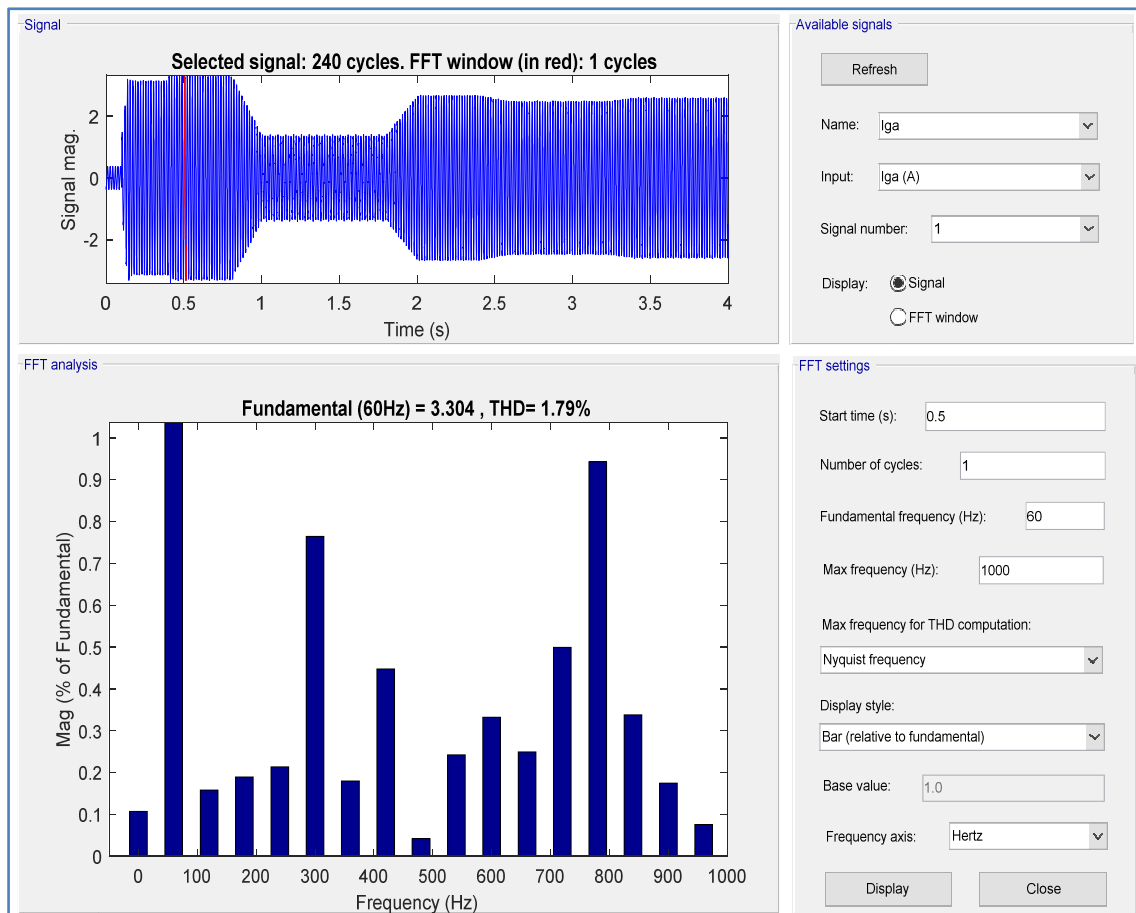
**Figure IV.14** Allure de la tension d'entrée (du bus continu) d'un onduleur à trois niveaux

En outre, une analyse spectrale par *FFT* du courant injecté dans le réseau nous permet d'évaluer la qualité de l'énergie transmise par le système photovoltaïque au réseau, à travers le taux de distorsion harmonique *THD%*, comme l'illustre la figure (IV.15). Nous avons considéré une fenêtre d'analyse de 'un cycle' à partir de  $t=0.5$  s.

Une légère distorsion harmonique du courant injecté dans le réseau par rapport à une onde sinusoïdale parfaite a été notée, avec un *THD%* de 1.79%.

Cette distorsion est le résultat des propriétés intrinsèques du convertisseur lui-même. Cependant, bien que le *THD* est légèrement proche de 2% dans ce cas, il reste significativement en dessous de la norme standard de 5% et meilleur que celui obtenu dans le cas d'un onduleur à deux niveaux (1.97 %) comme il fallait s'y attendre.

Par conséquent, même avec cette légère distorsion, le courant demeure généralement presque sinusoïdal et conforme aux exigences de qualité de l'électricité, garantissant ainsi le bon fonctionnement et la compatibilité du système avec le réseau électrique.



**Figure IV.15** Analyse spectrale par FFT du courant injecté au réseau dans le cas d'un conditionneur de puissance à base d'un hacheur 'boost' et un onduleur trois niveaux

### IV.3.3. Cas d'un conditionneur de puissance à base d'un hacheur 'boost' de type 'KY' et un onduleur à deux niveaux

Le schéma du système PV étudié, simulé sous MATLAB/SIMULINK, est illustré par la figure IV.16. Les simulations sont effectuées dans les mêmes conditions de fonctionnement précédentes.

Dans ce cas, nous étions contraints de choisir une référence de 420V pour  $V_{dc}$  (au lieu de 500 V du cas de l'hacheur 'boost' classique) vue la limitation du facteur d'amplification de l'hacheur 'KY' à '2'.

La puissance générée varie en fonction du profil d'illumination et de la température, tout en tenant compte des pertes dans le système de conversion photovoltaïque, du filtre, du transformateur de couplage et des lignes.

Il est essentiel de noter que toute augmentation de la température et toute diminution de l'illumination entraînent naturellement une diminution de la puissance générée par le générateur photovoltaïque, et vice versa. Cependant, cette puissance reste constante lorsque la température et l'illumination demeurent stables.

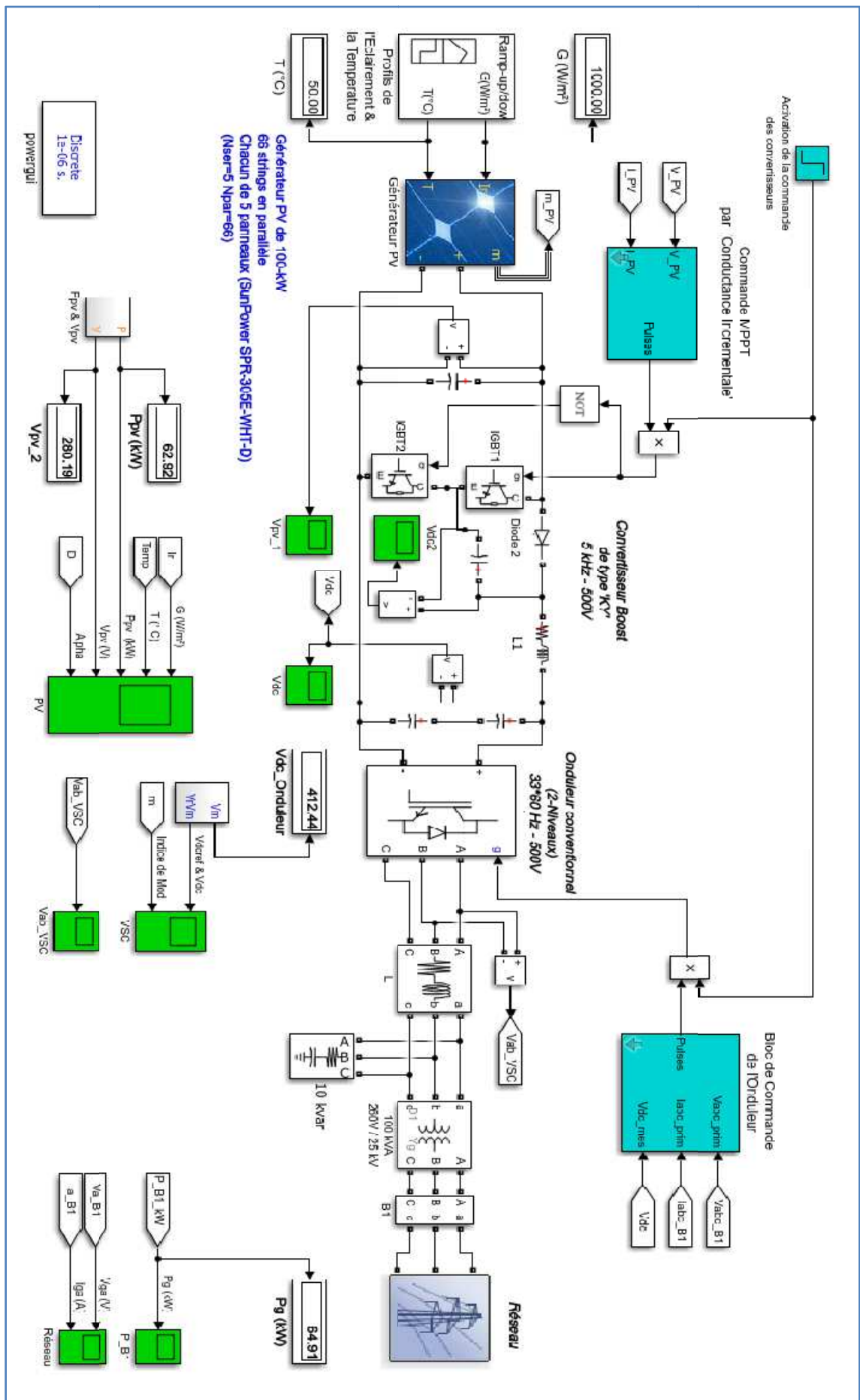


Figure IV. 16 Système PV de 100-kW connecté au réseau via un hacheur 'boost' de type 'KY' et un onduleur à 2N

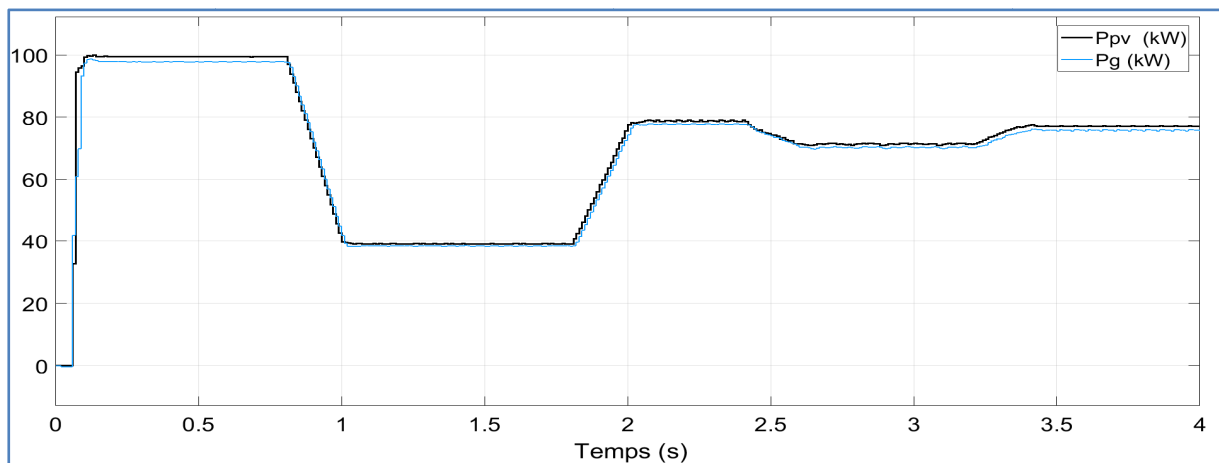
L'amplitude du courant introduit dans le réseau, mesurée à la haute tension, reflète les variations du niveau de puissance. Cette correspondance découle de la constance de la tension du réseau, agissant comme une source de tension, voir figures (IV.17 et IV.18.a).

Le courant introduit dans le réseau est pratiquement synchronisé avec la tension du réseau, ce qui confirme un réglage approprié des courants et garantit un fonctionnement à un facteur de puissance unitaire.

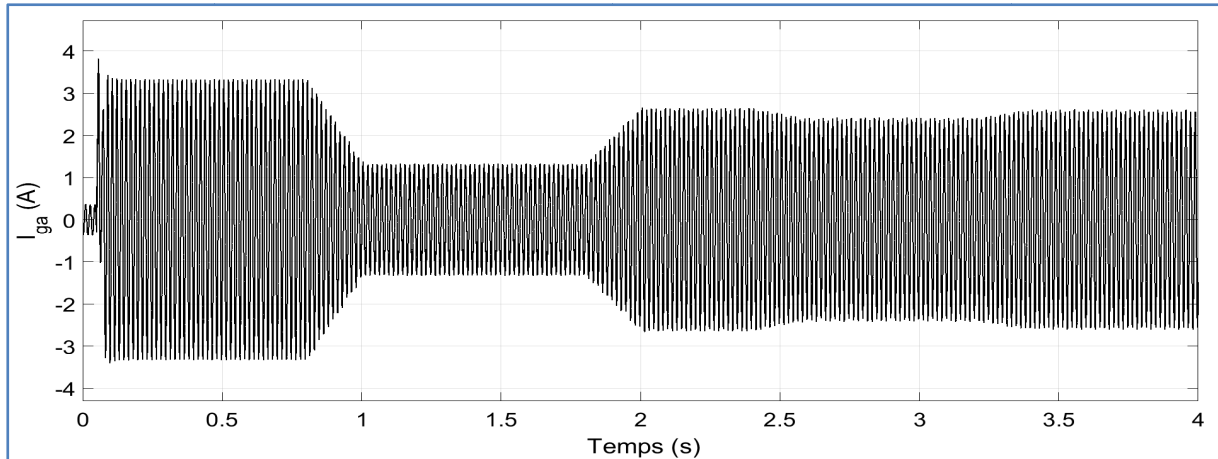
La figure IV.19 représente l'allure de la tension d'entrée du convertisseur *DC-AC*. Initialement, elle marque un petit pic, puis se stabilise autour de sa référence de (420 V), avec de légères déviations (de 15V au maximum soit 3.6%) aux moments de transition, même pour des niveaux de puissance différents, malgré les fluctuations importantes de l'éclairage et de la température. Cela confirme une fois de plus le bon réglage de la tension du bus continu.

De sa part, la figure IV.20 illustre une analyse spectrale par *FFT* du courant injecté dans le réseau.

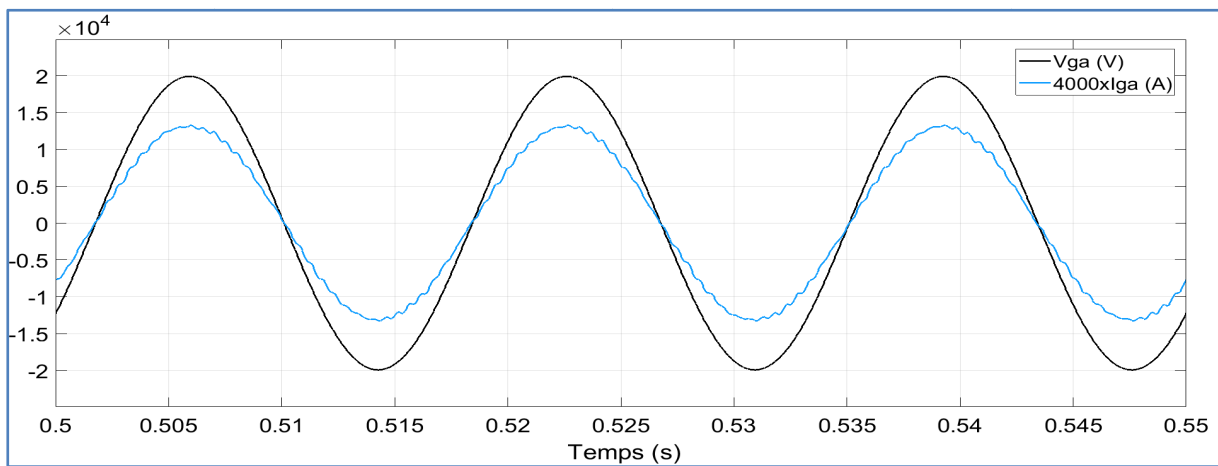
Cette analyse montre que le courant injecté dans le réseau est pratiquement sinusoïdal avec un taux de distorsion harmonique (*THD* % = 1.89%), bien au dessous de la norme de 5%. Cette performance est due à la présence du filtre *LC* ainsi qu'à la haute fréquence de commutation.



**Figure IV.17** Puissance du GPV et puissance active injectée au réseau dans le cas d'un convertisseur de type 'boost' de 'KY' associé à un onduleur à deux niveaux

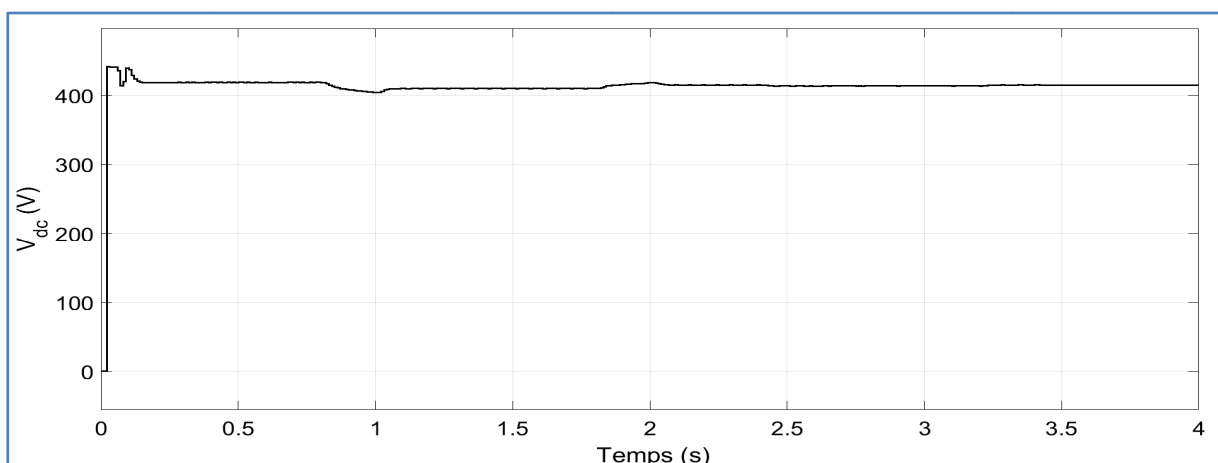


a) Courant injecté au réseau

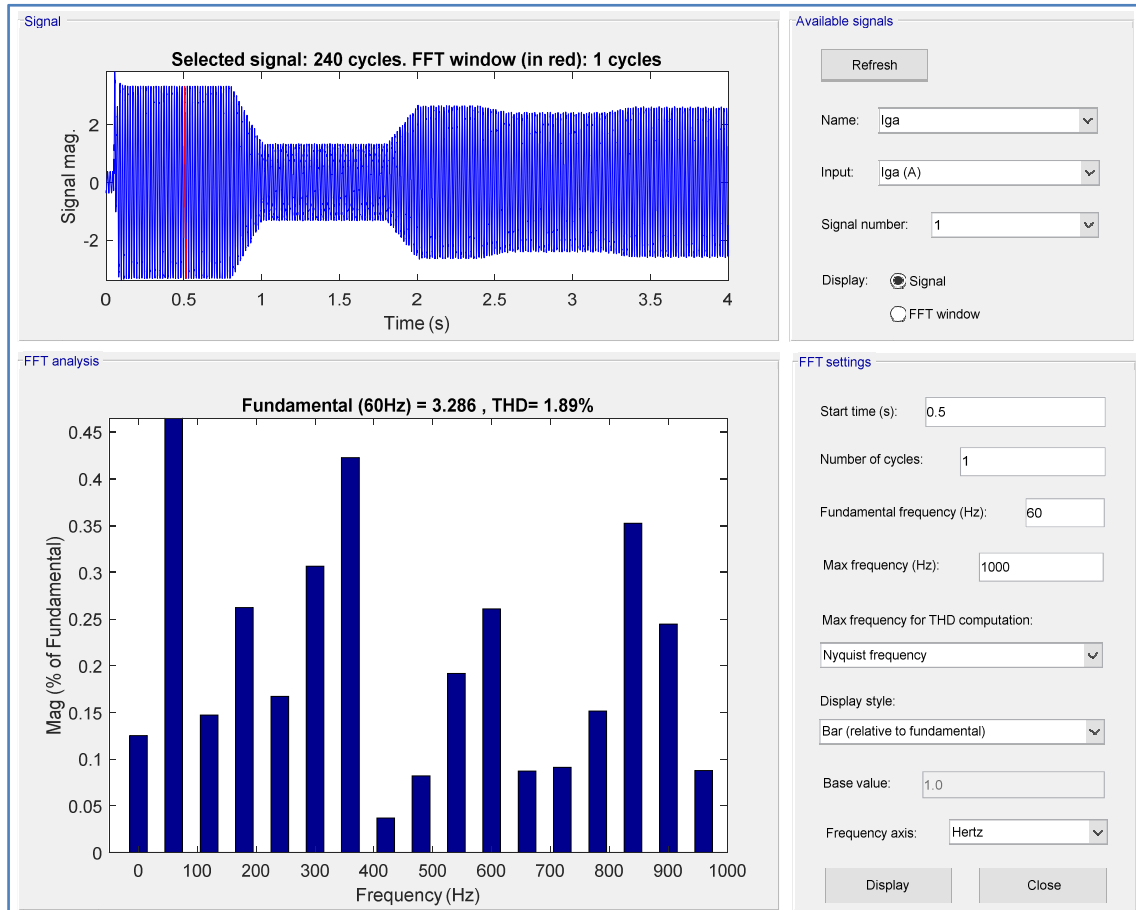


b) Zoom du courant et de la tension injectée au réseau

**Figure IV.18** Allure de la tension et du courant du réseau dans le cas d'un convertisseur de type 'boost' de type 'KY' associé à un onduleur à deux niveaux



**Figure IV.19** Allure de la tension d'entrée (du bus continu) d'un onduleur à deux niveaux dans le cas d'un convertisseur de type 'boost' de type 'KY'



**Figure IV.20** Analyse spectrale par *FFT* du courant injecté au réseau dans le cas du conditionneur de puissance à base d'un hacheur 'boost' de type 'KY' et d'un onduleur à deux niveaux

#### IV.3.4. Cas d'un conditionneur de puissance à base d'un hacheur 'boost' de type 'KY' et un onduleur à trois niveaux

Dans ce cas, le schéma du système *PV* étudié, simulé sous l'environnement *MATLAB/SIMULINK*, est illustré par la figure IV.21. Le schéma bloc de l'étage de puissance de ce convertisseur *DC-DC* de type 'KY' est constitué de deux transistors *IGBT* et une diode.

Présentons et discutons maintenant les résultats obtenus du système *PV* étudié, sachant que les simulations sont effectuées dans les mêmes conditions de fonctionnement précédentes.

Sauf que dans ce cas aussi (rappelons-le), nous étions contraints de choisir une référence de 420 V pour la tension du bus continu ' $V_{dc}$ ' vue la limitation du facteur d'amplification de l'hacheur 'KY' à '2'.

Dans ce cas aussi, la puissance du *GPV* suit sa valeur de référence variable en fonction du profil de l'éclairement et de la température, et de même pour la puissance injectée dans le réseau aux pertes près dans le système de conversion photovoltaïque, le filtre, le transformateur de couplage et les lignes, voir figure IV.22.

De plus et comme dans les cas précédents, il a été noté qu'une augmentation de la température et une diminution de l'éclairement entraînent naturellement une baisse de la puissance générée par le *GPV* et vice versa.

Cette même puissance reste constante pendant les intervalles où la température et l'ensoleillement sont constants.

D'autre part l'amplitude du courant injecté dans le réseau, mesuré du côté haute tension (ce qui justifie ses faibles valeurs de quelques ampères) reflète fidèlement les fluctuations de la puissance injectée dans le réseau. Ceci s'explique par la constance de la tension du réseau (source de tension), comme il est illustré dans la figure (IV.23.a). De plus, la figure (IV.23.b) montre que l'injection de la puissance au réseau se fait à facteur de puissance unitaire, en effet le zoom de la tension et du courant de réseau indique que les deux allures sont en phase.

La figure (IV.24) montre l'évolution de la tension d'entrée du convertisseur *DC-AC*, qui marque un pic au début, puis reste proche de sa référence de (420 V) pratiquement pour différents niveaux de puissance, malgré les larges variations de l'éclairement et de la température.

Examinons également la qualité d'énergie injectée dans le réseau par le système *PV* étudié dans ce cas de l'onduleur à trois niveaux. Pour cette fin, nous avons réalisé une analyse spectrale par *FFT* du courant injecté dans le réseau. Ensuite, nous avons déterminé le taux de distorsion harmonique (*THD* %), voir figure (IV. 25). Dans ce cas aussi, la fenêtre d'analyse par *FFT* débute l'échantillonnage du signal de courant à  $t=0.5$  s et couvre un cycle.

Cette analyse montre que le courant injecté dans le réseau est presque sinusoïdal avec un taux de distorsion harmonique (*THD* % = 1.83%), bien au dessous de la norme de 5%. Cette performance est due à la présence du filtre *LC* ainsi qu'à la haute fréquence de commutation.

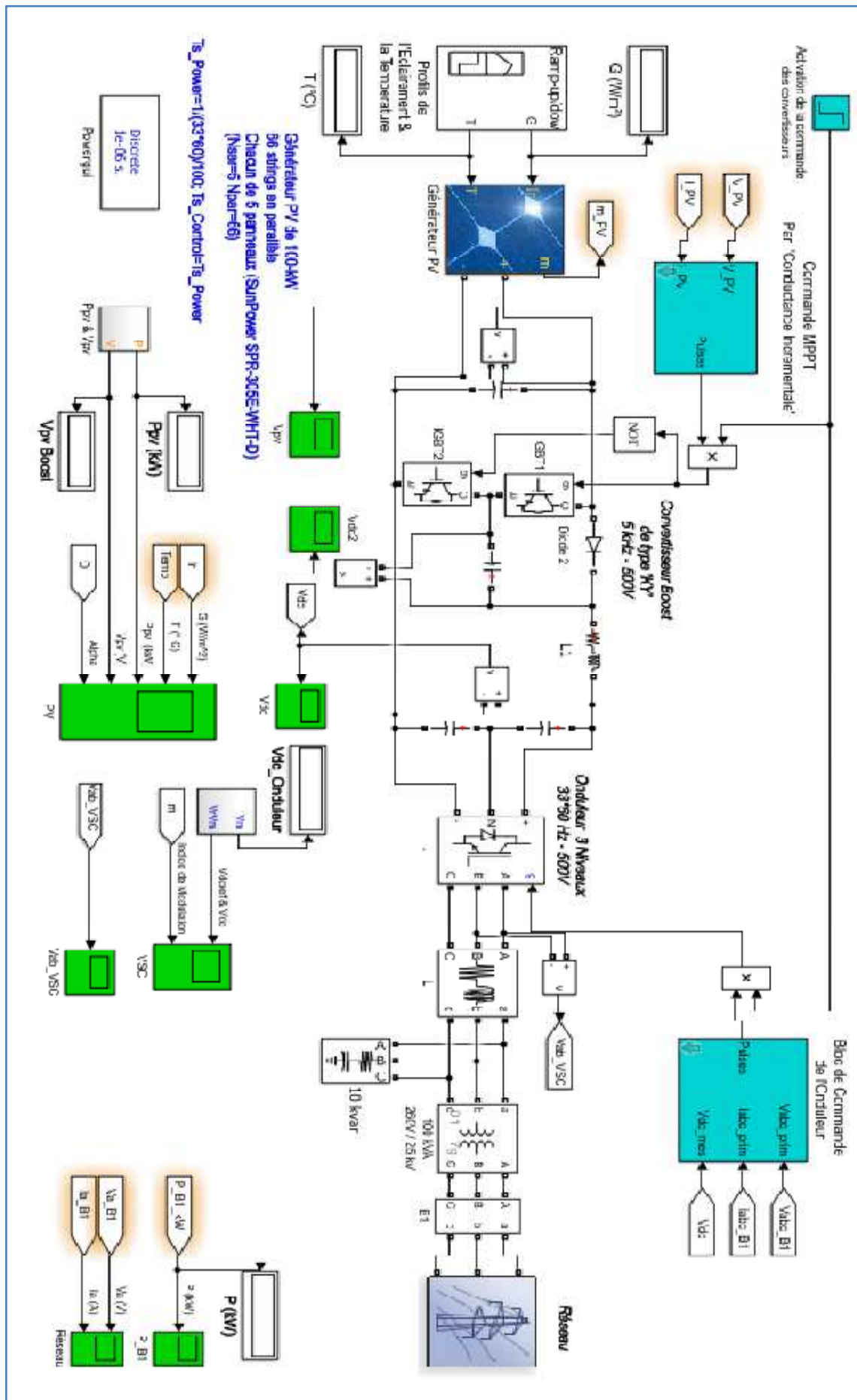
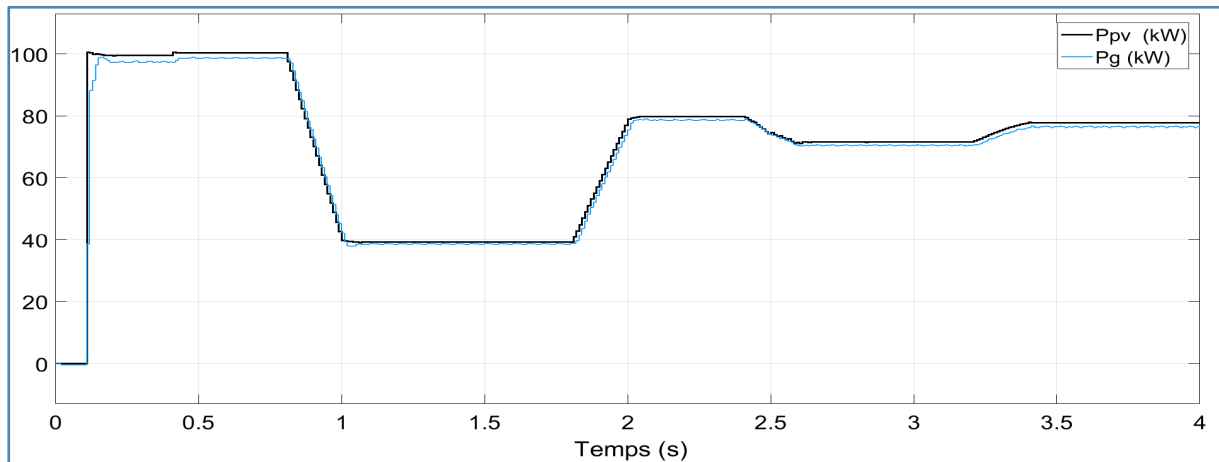
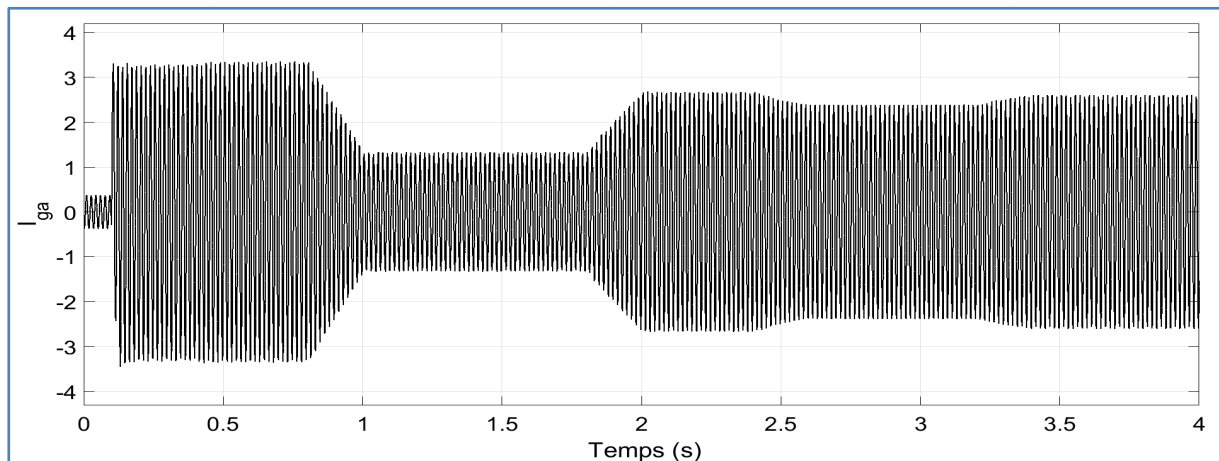


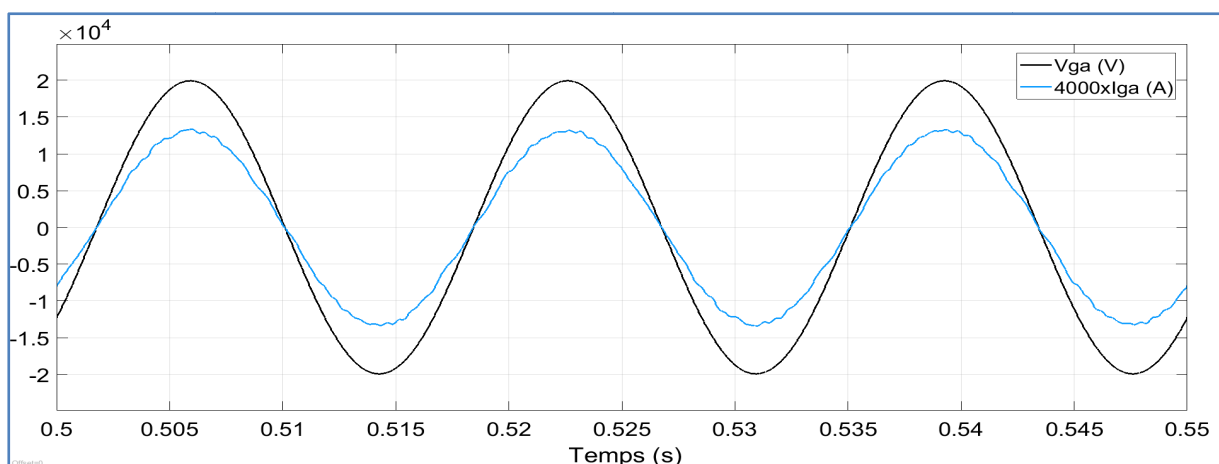
Figure IV.21 Système PV de 100-kW connecté au réseau via un hacheur 'boost' de type 'KY' et un onduleur à 3N



**Figure IV.22** Puissance du GPV et puissance active injectée au réseau dans le cas d'un convertisseur de type 'boost' de type 'KY' associé à un onduleur à trois niveaux

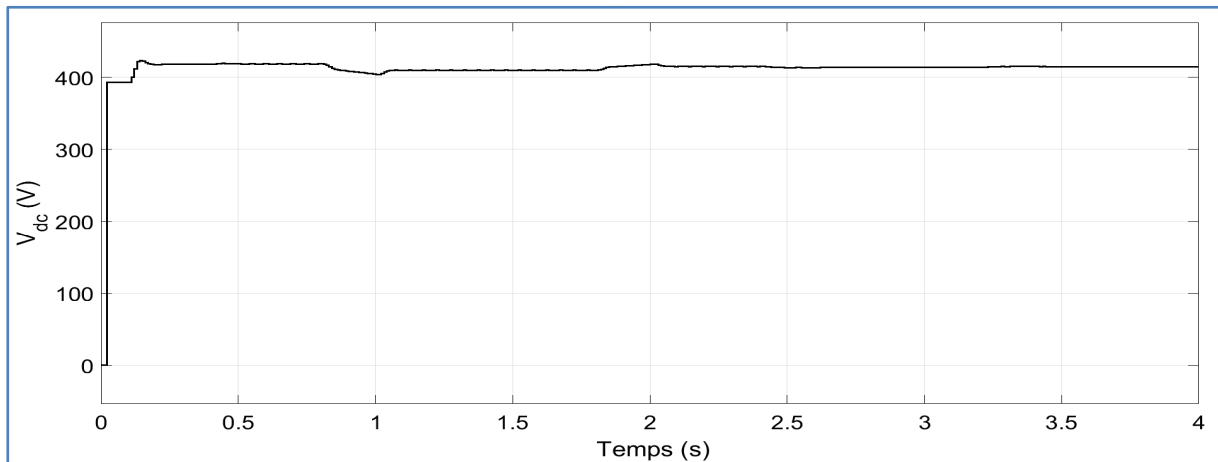


a) Courant injecté au réseau

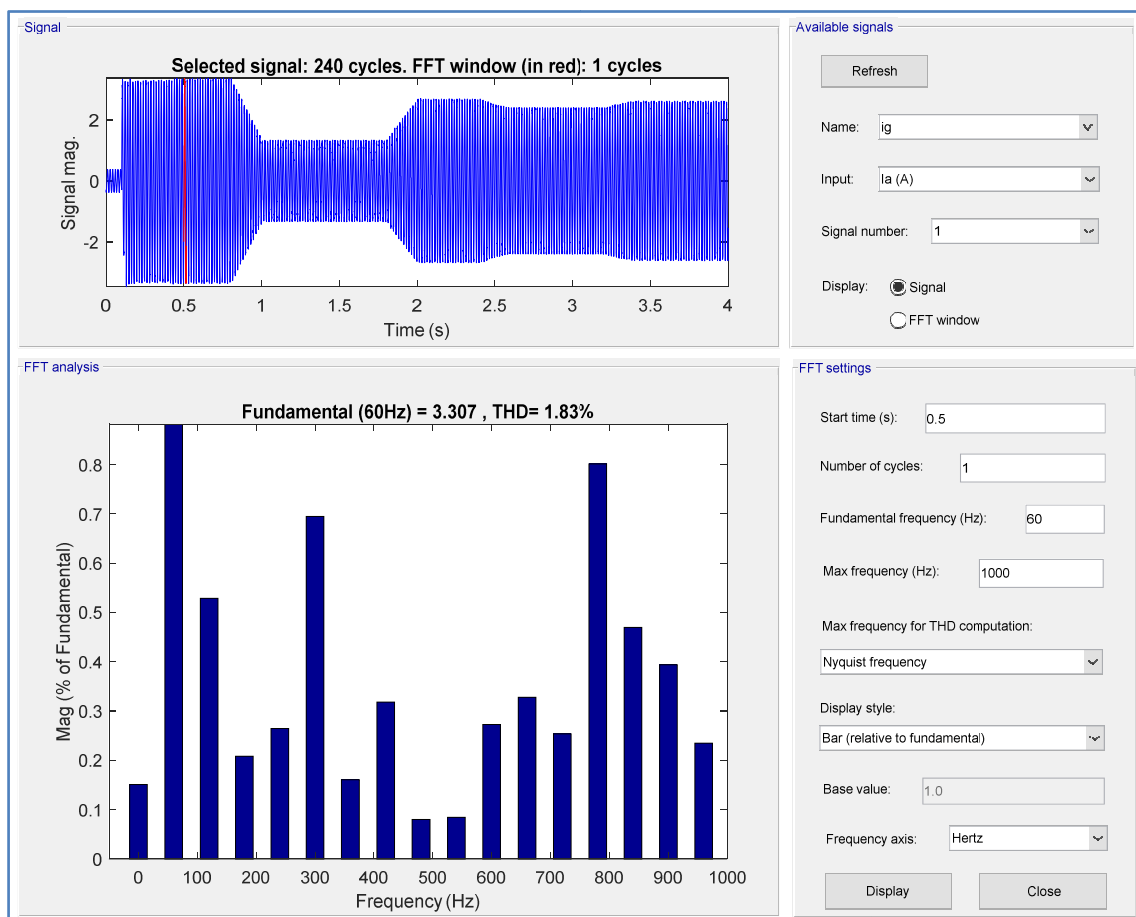


b) Zoom du courant et de la tension injectée au réseau

**Figure IV.23** Allure de la tension et du courant du réseau dans le cas d'un convertisseur de type 'boost' de type 'KY' associé à un onduleur à trois niveaux



**Figure IV.24** Allure de la tension d'entrée (du bus continu) d'un onduleur à trois niveaux dans le cas d'un convertisseur de type 'boost' de type 'KY'



**Figure IV.25** Analyse spectrale par FFT du courant injecté au réseau dans le cas du conditionneur de puissance à base d'un hacheur 'boost' de type 'KY' et d'un onduleur à trois niveaux

#### IV.4. Comparaison des résultats

Dans cette section, nous allons comparer les résultats obtenus dans les quatre cas d'étude de point de vue performance et qualité d'énergie du côté  $DC$  et  $AC$ , voir tableau IV.1.

**Tableau IV.1** Comparaison des performances du système PV étudié pour les quatre différents cas de convertisseurs

	Conditionneur de puissance du système PV étudié composé de			
	Hacheur conventionnel + Onduleur à 2N	Hacheur conventionnel + Onduleur à 3N	Hacheur de type 'KY' + Onduleur à 2N	Hacheur de type 'KY' + Onduleur à 3N
<b>Puissance délivrée par le GPV</b>	Suit le niveau de référence, varie avec l'irradiation et la température	Suit le niveau de référence, varie avec l'irradiation et la température	Suit le niveau de référence, varie avec l'irradiation et la température	Suit le niveau de référence, varie avec l'irradiation et la température
<b>Puissance injectée au réseau</b>	Suit le niveau de référence aux pertes près	Suit le niveau de référence aux pertes près	Suit le niveau de référence aux pertes près	Suit le niveau de référence aux pertes près
<b>Courant en phase avec la tension du réseau</b>	Oui, indiquant le facteur de puissance d'unité	Oui, indiquant le facteur de puissance d'unité	Oui, indiquant le facteur de puissance d'unité	Oui, indiquant le facteur de puissance d'unité
<b>Stabilité de la tension du bus continu</b>	Stable autour de la valeur de référence (500V)	Stable autour de la valeur de référence (500V)	Stable autour de la valeur de référence (420V)	Stable autour de la valeur de référence (420V)
<b>THD % de <math>I_{ga}</math></b>	1.97 %	1.79 %	1.89 %	1.83%
$\Delta I_{pv}$ (Fluctuations)	6A (1.8 %)	12A (3.6 %)	1A (0.3 %)	0.85A (0.25 %)
$\Delta V_{pv}$ (Fluctuations)	1 V (0.3 %)	0.75 V (0.026 %)	3 V (1.05 %)	7 V (1.7 %)
$\Delta V_{dc}$ (Fluctuations)	7.5 V (1.5 %)	4.5 V (0.9 %)	4V (0.95%)	1 V (0.2 %)
$\Delta I_{dc}$ (Fluctuations)	238 A (100%)	238 A (100%)	0.9A (0.38%)	0.8 A (0.34 %)

Il est clair que l'onduleur à trois niveaux délivre une énergie du côté AC de qualité supérieure à celle de son homologue à deux niveaux (voit  $THD\%$  de  $I_{ga}$ ) pour les mêmes paramètres du filtre LC et fréquence de commutation. Cette qualité d'énergie reste plus au moins la même si on change le convertisseur de l'étage DC-DC.

Du côté DC, nous avons remarqué des fluctuations non significatives des courants/tensions du GPV et du bus continu dans les quatre cas, exception faite au cas du courant du côté bus continu de l'hacheur 'boost' qui est discret de nature et présente des fluctuations de 100%, ce qui explique la supériorité du 'boost' de type 'KY' par rapport à l'hacheur survolteur classique.

Par ailleurs et de point de vue performance, nous avons retenu de bonnes performances en termes de suivi du *PPM* pour les différents niveaux d'ensoleillement et de température dans les quatre cas étudiés. De bonnes performances en termes de découplage de la commande indirecte des puissances (active et réactive) injectées au réseau et ceci grâce aux boucles de réglage efficaces de la tension du bus continu et des courants (actif et réactif) du réseau. En effet, nous avons pu imposer un facteur de puissance unitaire via le bon réglage 'au niveau zéro' du courant réactif.

#### IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons discuté et montré l'efficacité de la méthode de poursuite du point de puissance maximale basée sur la conductance incrémentale à travers les résultats de simulation obtenus. En outre, nous avons examiné la qualité d'énergie d'un système photovoltaïque à base d'un hacheur survolteur de type 'KY', comparativement à celle d'un système PV à base d'un hacheur 'boost' conventionnel.

Les résultats de simulation ont montré que la méthode de la conductance incrémentale est robuste face aux variations des conditions météorologiques (éclairage et température). De plus, ces résultats ont mis en évidence une commande découplée et indirecte efficace des puissances active et réactive injectées au réseau, grâce à un bon réglage de la tension du bus continu et des courants actif et réactif.

Grâce à ses performances élevées, la technique de *MLI* sinus-triangle a été utilisée pour la commande des onduleurs à deux et à trois niveaux. Cela a permis de bien filtrer le courant injecté au réseau, bien que le taux de distorsion harmonique du courant de réseau reste dans les limites de la norme requise (< 5%).

De plus, les résultats de simulation ont montrés aussi que l'hacheur de type 'KY' contribue de manière significative à l'amélioration de la qualité d'énergie délivrée par le *GPV*.

## ***Conclusion Générale***

## Conclusion générale

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la modélisation et la commande d'un système *PV* connectée au réseau via un hacheur *boost* de type 'KY' en cascade avec un onduleur triphasé à *MLI*.

Tout d'abord, nous avons réussi à modéliser et établir les caractéristiques *I-V* et *P-V* d'un générateur photovoltaïque de 100 kW, pour différents niveaux d'ensoleillement et de température en partant du modèle à une diode d'une cellule, un module puis un panneau *PV*.

Puis, nous avons modélisé le comportement dynamique des convertisseurs de l'électronique de puissance qui constituent le conditionneur de puissance du système *PV* étudié, à savoir :

- L'hacheur *boost* de type 'KY', équipé d'une commande *MPPT* à base de l'algorithme de la conductance incrémentale dédié à l'ajustement de la tension de fonctionnement du générateur photovoltaïque de 100 kW (puisque celle du bus continu est régulée par l'onduleur). Ceci garantit le transfert du maximum de puissance photovoltaïque disponible vers l'onduleur.
- L'hacheur *boost* conventionnel utilisé pour la même fin et à titre de comparaison avec le convertisseur *DC-DC* précédent.
- L'onduleur (à deux et trois niveaux) équipé d'une boucle de régulation externe pour maintenir la tension du bus continu à sa valeur de référence, ainsi que de deux boucles internes de régulation des courants actif et réactif du côté réseau. Ceci permet de commander indirectement la puissance active à sa valeur maximale et de maintenir la puissance réactive à zéro (en ajustant le courant réactif de référence à zéro) pour assurer un facteur de puissance unitaire du côté réseau.

Ensuite, nous avons procédé à la simulation de la dynamique du système étudié, en utilisant l'outil *MATLAB-Simulink*, composé d'un générateur photovoltaïque en cascade avec un conditionneur de puissance (convertisseur *DC-DC* + convertisseur *DC-AC*), un filtre *LC* et un transformateur élévateur de couplage garantissant à la fois un fonctionnement en mode *MPPT*, une synchronisation avec le réseau tout assurant un facteur de puissance unitaire.

Cette simulation nous a permis l'évaluation des performances du système *PV* étudié et sa qualité d'énergie dans différentes conditions de fonctionnement (différents niveaux d'éclairage, différents niveaux de température), pour différents modes d'opération (mode 'standby', mode sans *MPPT* et mode avec *MPPT*) et pour différentes variantes du conditionneur de puissance (Hacheur survolteur + Onduleur à 2 niveaux, Hacheur survolteur + Onduleur à 3 niveaux, Hacheur *boost* de type 'KY' + Onduleur à 2 niveaux, Hacheur *boost* de type 'KY' + Onduleur à 3 niveaux). Les résultats de simulation obtenus ont montré que la méthode *MPPT* basée sur la conductance incrémentale est robuste face aux variations des conditions météorologiques (ensoleillement et température).

Ces résultats ont également montré un bon suivi de la tension du bus continu, une commande efficace de la puissance active, et ont mis en évidence un fonctionnement effectif avec un facteur de puissance unitaire du côté alternatif du système en aval du filtre *LC*.

En outre, la structure du système *PV* étudié à base d'un hacheur *boost* de type 'KY' a montré des performances satisfaisantes en termes d'efficacité de la *MPPT* et de qualité d'énergie *DC* délivrée, tout en réduisant l'ondulation du courant de sortie et en améliorant l'efficacité énergétique du système.

D'après les résultats obtenus dans le cadre de ce travail, nous nous sommes permis d'avancer un ensemble de réflexions et perspectives pouvant être poursuivies dans de futures études similaires. A titre d'exemple, nous citons :

- L'investigation de l'apport d'autres configurations de convertisseurs *DC-DC boost* de type 'KY' proposées tout récemment dans la littérature spécialisée sur les performances et la qualité d'énergie du système *PV* étudié.
- Le remplacement de la boucle de la tension du bus continu par celle de la puissance active et l'intégration d'une boucle de réglage de la puissance réactive qui permet de générer la référence du courant réactif. Ceci devrait permettre de faire fonctionner le système *PV* que ce soit en mode *MPPT* ou en mode de commande découplée des puissances avec possibilité d'injection du réactif au réseau.
- L'optimisation de la taille du filtre *LC* tout en respectant la norme exigée sur le *THD* du courant injecté au réseau.

# *Bibliographie*

## ***Bibliographie***

1. O. Wasynczuk, 'Modeling and Dynamic Performance of a Line-Commutated Photovoltaic Inverter', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 4, No. 3, pp. 337-343, September 1989.
2. E. Durán, M. Sidrach-de-Cardona, J. Galán and F. Muñoz-Rodríguez, 'Comparative Analysis of Buck-Boost Converters Used to Obtain I-V Characteristic Curves of PV Modules,' IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 26, No. 3, pp. 958-965, March 2011.
3. J. W. Kimball and P. T. Krein, 'Singular Perturbation Theory for DC-DC Converters and Application to PFC Converters', IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 23, No. 1, pp. 298-304, January 2008.
4. J. Perlin, 'Let It Shine: The 6,000 – Year Story of Solar Energy', New World Library, 2013.
5. International Energy Agency (IEA), 'Renewables 2023 Global Status Report', IEA Publications, 2023.
6. J. A. Duffie and W. A. Beckman, 'Solar Engineering of Thermal Processes', Wiley, 2013.
7. H. A. Ossenbrink and K. Kiefer, 'Solar Photovoltaics: Fundamentals, Technologies and Applications', Wiley, 2017.
8. H. Rouabah, 'Schéma de Principe d'un Générateur Photovoltaïque', Mémoire de Master, Université de Ouargla - Algérie, 2014.
9. S. Petibon, 'Nouvelles Architectures Distribuées de Gestion et de Conversion de l'Energie pour les Applications Photovoltaïques', Thèse de Doctorat, Université de Toulouse – France, 2009.
10. --, 'Représentation des Différents Rayonnements Solaires Terrestres Reçus sur une Installation Donnée', Disponible à : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01077761>, Consulté le (15/04/2024).
11. A. Morsli, 'Etude d'un Système Solaire Photovoltaïque', Edition Universitaires Européennes - 2015.
12. F. Slama, 'Modélisation d'un Système Multi-Générateurs Photovoltaïques Interconnectés au Réseau Electrique', Mémoire de Magister, Université de Sétif – Algérie, 2011.
13. --, 'Structure d'une Cellule Photovoltaïque Découverte par Becquerel en 1839', Disponible à : <http://oreoletech.com/le-photovoltaique-comment-ca-marche/>, Consulté le (15/04/2024).
14. S. Makhloufi, 'Optimisation des Installations Photovoltaïque', Thèse de Doctorat en Science, Université Hadj-Lakhdar Batna, Algérie - 2013.

15. K. Ouabdelkader et H. Mersel, 'Modélisation et Contrôle d'un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau', Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira - Bejaia, Algérie, 2015.
16. M. Zidane et M. Meziani, 'Etude d'une Installation Photovoltaïque en Vue d'un Pompage Solaire  $6\text{m}^3/\text{jour}$ ', Mémoire d'Ingénieur en Electrotechnique, Université de Bejaia, Algérie, 2011.
17. B. Rakza et S. Ouanas, 'Modélisation et Commande du Système Photovoltaïque par les Réseaux de Neurones', Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, Algérie, 2017.
18. C. Djili et K. Fareb 'Etude de l'Impact d'une Centrale Photovoltaïque sur un Réseau Electrique', Mémoire de Master, Université de Tizi-Ouzou, Algérie, 2017.
19. S. Lalouni, 'Etude, commande et simulation d'une chaine hybride (photovoltaïque-éolienne) de production d'énergie électrique', Thèse de doctorat de l'université Abderrahmane Mira - Bejaia, Algérie, 2009.
20. D. Rekioua et O. Amrani, 'Etude et identification des différents modèles électriques photovoltaïques', Conférence sur les énergies renouvelables, Université de Bejaia, Algérie, 2007.
21. --, 'SunPower 305 Solar Panel', Document disponible à : [https://www.pocosolar.com/wp-content/themes/twentyfifteen/pdfs/Sunpower%20Solar%20Panels/sunpower\\_305wht\\_spec\\_sheet.pdf](https://www.pocosolar.com/wp-content/themes/twentyfifteen/pdfs/Sunpower%20Solar%20Panels/sunpower_305wht_spec_sheet.pdf), Consulté le 25/04/2024.
22. M. N. Mechalikh et Ch. E. Hamada, 'Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïques en Fonctionnement Autonome et Connecté au Réseau', Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah – Ourgla, Algérie, 2013.
23. G. N. Tiwari and S. Dubey, 'Fundamental of Photovoltaic Modules and Their Applications', Springer, 2010.
24. --, 'Un Système Photovoltaïque Autonome avec Batterie d'Accumulateurs Comprend Généralement Différents Composants', Disponible à : <https://www.ssf-asso.org/systemes-pv-autonomes/>, Consulté le (15/04/2024).
25. --, 'Système PV Connecté au Réseau', Disponible à : <http://www.solartectogo.com/energies-renouvelables/energie-solaire/systemes-photovoltaïques/systemes-raccordes-au-reseau/>, consulté le (15/04/2024).
26. E. Lorenz, G. Araujo, A. Cuevas, M. Egido, J. Minano and R. Zilles, 'Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems', Edited by: Universidad Politecnica de Madrid, Spain, 2000.

27. L. Hassaine, O. Ernesto, J. Quintero and A. Salas, 'Overview of Power Inverter Topologies and Control Structures for Grid Connected Photovoltaic Systems', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 30, pp. 796-807, 2014.
28. --, 'Convertisseur Boost', Disponible à: [https://fr.wikipedia.org/wiki/ Convertisseur\\_Boost/](https://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur_Boost/), Consulté le (15/05/2024).
29. A. Mansouri, 'Commande des Onduleurs Multiniveaux', Mémoire de Master, Université de Mohamed Boudiaf - M'sila, Algérie, 2016.
30. R. W. Erickson and D. Maksimović, 'Fundamentals of Power Electronics', Springer, 2001.
31. M.H. Rashid, 'Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications', Prentice Hall, 2013.
32. K. I. Hwu and Y. T. Yau, "KY Converter and Its Derivatives," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 24, No. 1, pp. 128-137, January 2009.
33. J. Sakly, A. Bennani–Ben Abdelghani, I. Slama–Belkhodja and H. Sammoud, 'Reconfigurable DC/DC Converter for Efficiency and Reliability Optimization', in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 5, No. 3, pp. 1216-1224, September 2017.
34. O. Hegazy, J. V. Mierlo and P. Lataire, 'Analysis, Modeling, and Implementation of a Multi-device Interleaved DC/DC Converter for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles', in *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 27, No. 11, pp. 4445-4458, November 2012.
35. H. J. Wen, C. S. Lam, W. H. Choi, C. K. Wong, M. C. Wong, 'A 97.0% Maximum Efficiency, Fast Response, Low Voltage Ripple KY Boost Converter for Photovoltaic Application', In *Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems (IESES)*, Hamilton – New Zealand, February 2018
36. J. Bratt, 'Grid Connected PV Inverters : Modeling and Simulation', Mémoire de Master, Université de San Diego State, USA, 2011.
37. MathWorks, 'Système PV solaire avec MPPT utilisant un convertisseur boost', Disponible à : <https://fr.mathworks.com/help/sps/ug/solar-pv-system-maximum-power-point-tracking-using-boost-converter.html>, Consulté le (17/05/2024).
38. J. Jiang, and R. A. Dougal, 'A review of maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems', *Solar Energy*, Vol. 76, No. 5, 2004.
39. S. Abouda, 'Contribution à la Commande des Systèmes Photovoltaïques : Application aux Systèmes de Pompage', Thèse de Doctorat, Co-tutelle de l'Université de Reims Champagne - Ardenne (France) et de l'Université de Sfax (Tunisie), 2015.

40. Y. Kai, W. Tang, X. Bi, and J. Lyu, 'An Online Monitoring Scheme of DC-Link Capacitor's ESR and C for a Boost PFC Converter', *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 31, No.8, pp. 5944-951, 2016..
41. N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, 'Power Electronics: Converters, Applications, and Design', 3rd edition - Hoboken, John Wiley & Sons Inc., 2003.

# *Annexe*

## *Paramètres du Système PV Etudié*

## Annexe

### Paramètres du Système PV Etudié

#### A.1 Paramètres électriques du module photovoltaïque ‘Sun power SPR-305-WHT’

Les paramètres du module photovoltaïque ‘Sun power SPR-305-WHT’ sous les conditions standards de fonctionnement *STC* (un éclairement de 1000W/m<sup>2</sup> et une température de 25°C) sont résumés dans le tableau suivant à titre de rappel (car ce tableau est le même que celui du premier chapitre (Tableau I.2, page 21)) :

**Tableau A.1** Paramètres électriques du module photovoltaïque ‘Sun power SPR-305-WHT’

<u>Paramètre</u>	<u>Valeur</u>
Puissance nominale crête du module $PV$ , $P_n$	305Wc
Courant au point de puissance maximale, $I_{pm}$	5.58A
Tension au point de puissance maximale, $V_{pm}$	54.7 V
Courant de court-circuit, $I_{sc}$	5.96 A
Tension en circuit ouvert, $V_{oc}$	64.2 V
Coefficients de variation de $I_{sc}$ / température	0.00368 A/°K
Coefficients de variation de $V_{oc}$ / température	-0.1751 V/°K
Nombre de cellules en séries	96
Résistance série, $R_s$	0.37152 Ω
Résistance shunt, $R_{sh}$	269.5934 Ω
Facteur de qualité de la diode, $A$	0.94504
Longueur, $L$	1559 mm
Largeur, $l$	1046 mm
Epaisseur, $e$	46 mm
Poids, $M$	18.6 kg
Rendement nominal, $\eta$	18.7 %
Valeur nominale de l’ampérage du fusible en série	15A

## A.2 Paramètres électriques de l'hacheur survolteur classique du système PV étudié

**Tableau A.2** Paramètres électriques de l'hacheur 'boost' classique

<u>Paramètre</u>	<u>Valeur</u>
Résistance, $R$	5 m $\Omega$
Inductance, $L$	5 mH
Capacité de sortie, $C_s$	6000 $\mu$ F
Capacité d'entrée, $C_e$	100 $\mu$ F
Résistance de l'IGBT à l'état ON, $R_{on}$	1 m $\Omega$
Résistance du snubber de l'IGBT, $R_s$	100 k $\Omega$
Résistance de la diode à l'état ON, $R_{on}$	0.1 m $\Omega$
Fréquence de découpage, $f_s$	5 kHz
Tension de sortie	500 V

## A.3 Paramètres électriques de l'hacheur survolteur de type 'KY' du système PV étudié

**Tableau A.3** Paramètres électriques de l'hacheur 'boost' de type 'KY'

<u>Paramètre</u>	<u>Valeur</u>
Topologie	Deux IGBT+ diode
Éléments semi-conducteurs	IGBT/Diode
Résistance, $R$	5 m $\Omega$
Inductance, $L$	5 mH
Résistance de l'IGBT à l'état 'ON'	1 m $\Omega$
Résistance du snubber de l'IGBT, $R_s$	100 k $\Omega$
Résistance de la diode à l'état 'ON'	0.1 m $\Omega$
Capacité de sortie, $C_s$	6000 $\mu$ F
Capacité d'entrée, $C_e$	100 $\mu$ F
Fréquence de découpage, $f_s$	5 kHz
Tension de sortie $V_{dc}$	415 V

#### A.4 Caractéristiques électriques de l'onduleur à deux niveaux

**Tableau A.4** Paramètres électriques de l'onduleur conventionnel

<u>Paramètre</u>	<u>Valeur</u>
Topologie	Pont universel triphasé
Éléments semi-conducteurs	IGBT/Diode
Résistance à l'état ON, $R_{on}$	1 mΩ
Résistance du snubber, $R_s$	1 MΩ
Fréquence de découpage, $f_s$	1.98 kHz
Capacité du bus continu, $C_s$	6000 μF
Tension du bus continu, $V_{dc}$	500 V

#### A.5 Caractéristiques électriques du filtre de sortie de l'onduleur

**Tableau A.5** Paramètres électriques du filtre LC à la sortie de l'onduleur

<u>Paramètre</u>	<u>Valeur</u>
Branche inductive ( $R, L$ )	(1.9 mΩ, 0.25 mH)
Branche capacitive ( $R, C$ )	(5.2 mΩ, 1.4 mF)

#### A.6 Caractéristiques électriques du transformateur de couplage avec le réseau

**Tableau A.6** Paramètres électriques du transformateur de couplage avec le réseau

<u>Paramètre</u>	<u>Valeur</u>
Puissance apparente nominale, $S_n$	100 kVA
Fréquence nominale, $f_n$	60 Hz
Couplage	$D_1/Y_g$
Tension entre phases primaire, $V_1$	260 V
Tension entre phases secondaire, $V_2$	25 kV
Résistances des bobines, $R_{1,2}$	0.001 pu
Inductance principales de bobines, $L_{1,2}$	0.03 pu
Resistance de magnétisation, $R_m$	500 pu
Inductance de magnétisation, $L_m$	500 pu

## A.7 Caractéristiques électriques du réseau

**Tableau A.7** Paramètres électriques du réseau

<u>Paramètre</u>	<u>Valeur</u>
Tension efficace entre phases	120 kV
Fréquence	60 Hz
Couplage	$Y_g$
Déphasage initial (de la phase $a$ )	$0^\circ$
Puissance apparente de court-circuit, $S_{cc}$	2500 MVA
Rapport, $X/R$	7