

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ÉCOLE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIES INDUSTRIELLES  
- ANNABA -



المدرسة العليا للتكنولوجيات الصناعية  
- عنابة -

Année 2020

DEPARTEMENT DU SECOND CYCLE

FILIERE

ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État

**ÉTUDE ET SIMULATION DE LA CONNEXION D'UN SYSTÈME  
PHOTOVOLTAÏQUE AU RESEAU ELECTRIQUE (MICRO-GRID)**

Spécialité

Production Electrique et Energie Renouvelables

Par

Bouglouf Mouaad

Fareh Kamal

Sous la direction de :

DJELLAD Abdelhak

Grade

MAB

Établissement d'affiliation

ESTI Annaba

Devant le jury

Président :

ESTI Annaba

Examineurs :

ESTI Annaba

ESTI Annaba



## Dédicace

*A mes très chers parents*

*(Ardjem et Souad)*

*Pour tout l'amour dont vous m'avez entouré, pour tout ce que vous*

*avez*

*fait pour moi.*

*Je ferai de mon mieux pour rester un sujet de fierté à vos yeux avec*

*l'espoir de ne jamais vous décevoir.*

*Que ce modeste travail, soit l'exaucement de vos vœux tant formulés et*

*de*

*Vos prières quotidiennes.*

*A ma chère femme Rima*

*A mon cher frère Oussama*

*A mes très chères Sœurs*

*(Roumaïssa, Asma, Amina)*

*A mon oncle Chaker*

*A mon binôme Kamal pour son soutien moral, sa patience et sa*

*compréhension tout au long de ce travail*

*A mes très chers amis*

*(Moumen, SidAli, Hani, klai)*

*En souvenir de nos éclats de rire, des bons moments et nuits blanches.*

*En souvenir de tout ce qu'on a vécu ensemble.*

*J'espère de tout mon cœur*

*Que notre amitié durera*

*éternellement.*

*Mouaad*





## Dédicace

*A mes très chers parents*

*(Abdallah et Sarhouda)*

*Pour tout l'amour dont vous m'avez entouré, pour tout ce que vous*

*avez*

*fait pour moi.*

*Je ferai de mon mieux pour rester un sujet de fierté à vos yeux avec*

*l'espoir de ne jamais vous décevoir.*

*Que ce modeste travail, soit l'exaucement de vos vœux tant formulés et*

*de*

*Vos prières quotidiennes.*

*A mes très chers frères*

*(Imed, el zine)*

*A mes très chères Sœurs*

*A mon binôme Mouaad pour son soutien moral, sa patience et sa*

*compréhension tout au long de ce travail*

*A mes très chers amis*

*(Ahmed, Mehdi, Imed, Moumen , klai, Abd el kader)*

*En souvenir de nos éclats de rire, des bons moments et nuits blanches.*

*En souvenir de tout ce qu'on a vécu ensemble.*

*J'espère de tout mon cœur*

*Que notre amitié durera*

*éternellement.*

*Kamal*



# *Remerciements*

*On tient à la fin de ce travail à remercier ALLAH le tout puissant de nous avoir donné la foi et de nous avoir permis d'en arriver là Malgré les circonstances difficiles auxquelles nous avons été confrontés.*

*En préambule à ce mémoire, on souhaitait adresser nos remerciements les plus sincères aux professeurs qui nous ont étudiés durant notre parcours académique et aux personnes qui nous ont apporté leurs aides et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.*

*On tient à remercier sincèrement notre encadreur Mr DJELLAD Abdelhak, d'avoir accepté de nous encadrer, proposer notre thème et nous avoir guidé tout le long de notre travail par ses précieuses directives, pour sa confiance et sa gentillesse, sa disponibilité ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'elle a bien voulu nous consacrer.*

*On exprime également nos gratitude à nos examinateurs, qui vont nous honorer en évaluant ce travail.*

*Par la même occasion, nous tenons à remercier les responsables administratifs pour nous avoir accueillies chaleureusement au sein de leur structure.*

*Mouaad et Kamal*

***Table de matières***

**Introduction Générale.....1**

***Chapitre I***

***Généralité sur le système photovoltaïque***

**I.1 Introduction .....3**

**I.2 Ensoleillement PV.....3**

**I.3 Énergie Solaire.....4**

**I.4 Rayonnement Solaire.....6**

**I.5 Constitution D'un Générateur Photovoltaïque (GPV) .....7**

**I.6 Cellules PV.....7**

**I.6.1 Les Différents Technologie Des Cellules Solaire.....8**

**I.6.2 Module photovoltaïque.....10**

**I.6.3 Panneau photovoltaïque.....10**

**I.6.4 Centrale photovoltaïque.....10**

**I.6.5 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....11**

**I.7 Les Facteurs De Positionnement Qui Influent Le Rendement.....12**

**I.7.1 L'angle d'incidence.....12**

**I.7.2 L'angle d'inclinaison.....13**

**I.8 Les Différents Types Systèmes.....14**

**I.8.1 Les Systèmes Autonomes (Stand-Alone PV system).....14**

**I.8.2 Les Systèmes Hybrides (Hybrid PV system.....15**

**I.8.3 Les Système connecté au réseau (Grid-connected PV system).....16**

**I.9 Avantages Et Inconvénients De Énergie PV.....17**

**I.9.1 Avantages.....17**

**I.9.2 Inconvénients.....18**

**I.10 Conclusion.....18**

**Chapitre II**

**Modélisation d'un système photovoltaïque**

**II.1** Introduction.....19

**II.2** Modélisation D'un Système D'énergie Photovoltaïque.....19

**II.2.1** Circuit équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque.....19

**II.2.1.1** Cas d'une cellule idéale.....19

**II.2.1.2** Cas d'une cellule réelle.....20

**II.2.2** Générateur photovoltaïque.....21

**II.2.2.1** Caractéristiques d'un générateur photovoltaïque.....21

**II.2.2.2** Association en parallèle.....22

**II.2.2.3** Association en série.....22

**II.2.2.4** Association mixte (série-parallèle).....23

**II.3** Simulation d'une cellule photovoltaïque.....24

**II.3.1** Modèle de simulation.....24

**II.3.2** Caractéristiques I(V) et P(V).....24

**II.3.3** Effets climatiques sur la cellule PV.....26

**II.3.3.1** Influence de la température sur la cellule.....26

**II.3.3.1.1** Caractéristique (I-V).....26

**II.3.3.1.2** Caractéristique (P-V).....27

**II.3.3.2** Influence de l'éclairement sur la cellule.....27

**II.3.3.2.1** Caractéristique (I-V).....28

**II.3.3.2.2** Caractéristique (P-V).....28

**II.4** Simulation Du Générateur Photovoltaïque.....29

**II.4.1** Modèle de simulation.....29

**II.4.2** Caractéristique (I-V).....29

**II.4.3** Caractéristique (P-V).....30

**II.4.4** Influence de l'association des cellules PV sur le GPV.....30

**II.4.4.1** Influence de l'association série des cellules PV.....30

**II.4.4.2** Influence de l'association parallèle des cellules PV.....32

**II.4.4.3** Influence de l'association série / parallèle des cellules PV.....33

**II.4.5** Effets climatiques sur le générateur PV.....34

**II.4.5.1** Influence de la température sur le générateur PV.....34

---

<b>II.4.5.2</b> Influence de l'éclairement sur le générateur PV.....	35
<b>II.5</b> Rendement énergétique.....	36
<b>II.6</b> Facteur de forme.....	36
<b>II.7</b> Conclusion.....	36

### *Chapitre III*

#### *Étage d'adaptation & commande MPPT*

<b>III.1</b> Introduction.....	38
<b>III.2</b> Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge.....	38
<b>III.3</b> Convertisseur DC/DC (Hacheur Boost) pour le système photovoltaïque.....	39
<b>III.4</b> Algorithmes MPPT .....	41
<b>III.4.1</b> Algorithme perturbation et observation (P&O).....	42
<b>III.4.2</b> Technique de l'incrémentation de la conductance (InCond).....	44
<b>III.5</b> Résultats De Simulation.....	47
<b>III.5.1</b> Modèle de simulation pour la commande MPPT P&O.....	47
<b>III.5.2</b> Modèle de simulation pour la commande MPPT InCond.....	49
<b>III.6</b> Conclusion.....	51

### *Chapitre IV*

#### *Connexion du système GPV au réseau (Micro-grid)*

<b>IV.1</b> Introduction.....	52
<b>IV.2</b> Structure de connexion avec un Onduleur triphasé unique.....	52
<b>IV.3</b> Connexion de générateur PV avec le réseau.....	53
<b>IV.3.1</b> Modélisation de l'onduleur triphasé.....	53
<b>IV.3.2</b> Qualité du signal de sortie et paramètres de performances de l'onduleur.....	54
<b>IV.4</b> Stratégies de commande.....	55
<b>IV.4.1</b> Commande MLI sinus-triangle.....	55
<b>IV.4.2</b> Commande MLI vectorielle (SVM).....	58
<b>IV.4.2.1</b> Modulation par MLI Vectorielle.....	58
<b>IV.4.2.1.1</b> Vecteurs spatiaux de tension.....	60
<b>IV.4.2.1.2</b> Modulation du vecteur spatial.....	63

---

IV.4.2.2	Théorie de l'MLI Vectorielle.....	66
IV.4.2.3	Principe de la M.L.I vectorielle.....	68
IV.4.2.3.1	Détermination de $V_\alpha$ , $V_\beta$ , $V_{\text{réf}}$ et l'angle $\theta$ .....	70
IV.4.2.3.2	Détermination des secteurs.....	71
IV.4.2.3.3	Détermination des instants $T_1$ et $T_2$ .....	72
IV.4.2.3.4	Détermination de la période de commutation.....	74
IV.5	Modèle de simulation.....	76
IV.5.1	Commande MLI sinus-triangle.....	76
IV.5.2	Commande MLI vectorielle (SVM).....	79
IV.6	Présentation du système complet.....	82
IV.6.1	Modèle de simulation.....	83
IV.7	Conclusion.....	86
	<b>Conclusion Générale</b> .....	<b>88</b>
	<b>Références</b> .....	<b>89</b>

## Liste des figures

### Chapitre I

<b>Figure I.1</b> Irradiation solaire globale pour l'Algérie.....	3
<b>Figure I.2</b> Énergie solaire.....	4
<b>Figure I.3</b> Énergie thermique.....	5
<b>Figure I.4</b> Énergie solaire photovoltaïque.....	5
<b>Figure I.5</b> Composants du rayonnement solaire dans une plan horizontal.....	6
<b>Figure I.6</b> Unités de production photovoltaïque.....	7
<b>Figure I.7</b> Description d'une cellule photovoltaïque.....	8
<b>Figure I.8</b> Les Différents Types de panneau solaire.....	9
<b>Figure I.9</b> Module photovoltaïque.....	10
<b>Figure I.10</b> Panneau photovoltaïque.....	10
<b>Figure I.11</b> Centrale photovoltaïque.....	11
<b>Figure I.12</b> Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	11
<b>Figure I.13</b> Angle d'incidence sur un module photovoltaïque.....	12
<b>Figure I.14</b> Rendement des modules PV en fonction de l'angle d'incidence.....	13
<b>Figure I.15</b> Angle d'inclinaison des modules photovoltaïques.....	13
<b>Figure I.16</b> Schéma générale d'une installation PV autonome.....	14
<b>Figure I.17</b> Schéma de raccordement d'une installation Hybride.....	15
<b>Figure I.18</b> Schéma d'une installation autonome de type pompage d'eau solaire.....	16
<b>Figure I.19</b> Schéma d'une installation PV connectée au réseau, avec batteries.....	17

**Chapitre II**

**Figure II.1** Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque idéale.....19

**Figure II.2** Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque réelle.....20

**Figure II.3** Générateur photovoltaïque .....21

**Figure II.4** Les différentes zones de la caractéristique I (V), T=25°C.....21

**Figure II.5** Caractéristique résultante du regroupement de Np cellules en parallèle.....22

**Figure II.6** Caractéristique résultante du regroupement de Ns cellules en série.....23

**Figure II.7** Association mixte des modules solaires.....23

**Figure II.8** Schéma bloc de la cellule PV en MATLAB-SIMULINK.....24

**Figure II.9** Caractéristique I(V) d'une cellule (T=25°C, G=1000W/m<sup>2</sup>).....25

**Figure II.10** Caractéristique P(V) d'une cellule (T=25°C, G=1000W/m<sup>2</sup>).....25

**Figure II.11** Caractéristique I(V) pour différentes températures.....26

**Figure II.12** Caractéristique P(V) pour différentes températures.....27

**Figure II.13** Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement.....28

**Figure II.14** Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement.....28

**Figure II.15** Caractéristique I(V) d'une générateur PV (T=25°C, G=1000W/m<sup>2</sup>).....29

**Figure II.16** Caractéristique P(V) d'une générateur PV (T=25°C, G=1000W/m<sup>2</sup>).....30

**Figure II.17** Caractéristique I(V) pour différents nombres de cellule en série.....31

**Figure II.18** Caractéristique P(V) pour différents nombres de cellule en série.....31

---

**Figure II.19** Caractéristique I(V) pour différents nombres de cellule en parallèle.....32

**Figure II.20** Caractéristique P(V) pour différents nombres de cellule en parallèle.....32

**Figure II.21** Caractéristique I(V) pour différents nombres de cellule en série / parallèle.....33

**Figure II.22** Caractéristique P(V) pour différents nombres de cellule en série / parallèle.....33

**Figure II.23** Caractéristique I(V) d'un générateur pour différentes températures .....34

**Figure II.24** Caractéristique P(V) d'un générateur pour différentes températures.....34

**Figure II.25** Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement.....36

**Figure II.26** Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement.....36

### *Chapitre III*

**Figure III.1** Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque .....39

**Figure III.2** Circuit électrique du convertisseur Boost.....39

**Figure III.3** Circuits équivalents du convertisseur Boost pour, (A) : S fermé, (B) : S ouvert.40

**Figure III.4** Différentes zones de fonctionnement.....43

**Figure III.5** Organigramme de la méthode P&O.....43

**Figure III.6** Différentes zones de fonctionnement.....45

**Figure III.7** Organigramme de l'algorithme l'incrémental de la conductibilité .....46

**Figure III.8** Schéma bloc de la commande MPPT (P&O).....47

**Figure III.9** Poursuite de la puissance avec la technique P&O.....47

**Figure III.10** Variation de la puissance avec variation de l'irradiation (P&O).....48

**Figure III.11** Variation de la puissance avec variation de la température (P&O).....48

**Figure III.12** Schéma bloc de la commande MPPT (InCond).....49

**Figure III.13** Poursuite de la puissance avec la technique InCond.....49

**Figure III.14** Variation de la puissance avec variation de l'irradiation (InCond).....50

**Figure III.15** Variation de la puissance avec variation de la température (InCond).....50

**Chapitre IV**

**Figure IV.1** Mise en série de Plusieurs modules PV à un seul onduleur.....52

**Figure IV.2** Circuit équivalent d'un onduleur triphasé.....53

**Figure IV.3** Principe de la commande sinusoïdale.....56

**Figure IV.4** Modulation de largeur d'impulsion MLI (onduleur monophasée).....56

**Figure IV.5** Principe de la technique MLI sinusoïdal (sinus-triangle).....57

**Figure IV.6** Modulation de largeur d'impulsion MLI pour l'onduleur triphasée .....58

**Figure IV.7** Topologie d'un onduleur triphasé de tension.....59

**Figure IV.8** Huit états topologies de l'onduleur triphasé.....60

**Figure IV.9** Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur.....59

**Figure IV.10** Topologie  $1 - V_1(1,0,0)$  de l'onduleur triphasé.....61

**Figure IV.11** Représentation de la topologie 1 dans le plan  $(\alpha, \beta)$ .....61

**Figure IV.12** Représentation des vecteurs de tension différents de zéro dans le plan  $(\alpha, \beta)$ ..62

**Figure IV.13** Les deux topologies de l'onduleur  $V_7$  et  $V_8$ .....62

**Figure IV.14** Représentation des vecteurs de tension nulle dans le plan  $(\alpha, \beta)$ .....63

**Figure IV.15** Vecteur de tension de sortie dans le plan  $(\alpha, \beta)$ .....64

**Figure IV.16** L'amplitude de la tension de sortie.....64

**Figure IV.17** Projection du vecteur de tension dans le secteur n°1.....65

<b>Figure IV.18</b>	Schéma représentatif d'un onduleur de tension triphasé.....	66
<b>Figure IV.19</b>	Projection des vecteurs de tension $V_{AN}$ , $V_{BN}$ , $V_{CN}$ sur le plan $(\alpha, \beta)$ .....	70
<b>Figure IV.20</b>	L'algorithme pour déterminer les secteurs.....	72
<b>Figure IV.21</b>	Production du vecteur de tension dans le secteur n°1.....	73
<b>Figure IV.22</b>	Temps de commutation pour chaque semi-conducteur dans chaque secteur.....	75
<b>Figure IV.23</b>	Schéma bloc de la commande MLI vectorielle.....	76
<b>Figure IV.24</b>	Schéma de simulation MLI sinusoïdal.....	76
<b>Figure IV.25</b>	Signaux de la porteuse et des trois tensions de références.....	76
<b>Figure IV.26</b>	Tension composée $V_{ab}$ .....	77
<b>Figure IV.27</b>	Tension simple $V_a$ .....	77
<b>Figure IV.28</b>	Courants $I_a$ , $I_b$ et $I_c$ .....	77
<b>Figure IV.29</b>	Spectre harmonique du courant en fonction d'ordre harmonique.....	78
<b>Figure IV.30</b>	Spectre harmonique du courant en fonction de la fréquence.....	78
<b>Figure IV.31</b>	Schéma de simulation MLI vectorielle (SVM).....	79
<b>Figure IV.32</b>	Courant de phase $I_a$ .....	79
<b>Figure IV.33</b>	Tension simple $V_a$ .....	80
<b>Figure IV.34</b>	Tension composée $V_{ab}$ .....	80
<b>Figure IV.35</b>	Spectre harmonique du courant en fonction d'ordre harmonique .....	81
<b>Figure IV.36</b>	Spectre harmonique du courant en fonction de la fréquence.....	81
<b>Figure IV.37</b>	Système PV raccordé au réseau.....	83
<b>Figure IV.38</b>	Schéma bloc du système complet.....	83
<b>Figure IV.39</b>	Puissance active générée par l'onduleur.....	84

---

<b>Figure IV.40</b> Puissance réactive générée par l'onduleur.....	84
<b>Figure IV.41</b> Variation de l'irradiation.....	84
<b>Figure IV.42</b> Tension du PV.....	85
<b>Figure IV.43</b> Courant du PV.....	85
<b>Figure IV.44</b> Puissance du PV.....	85

*Liste des tableaux*

**Tableau 1.1** Caractéristique du silicium.....9

**Tableau 2.1** Caractéristique électrique de la cellule dans les conditions standards<CST>  
T=25°C, G=1000W /m<sup>2</sup>.....24

**Tableau 4.1** Les différents états de l'onduleur.....69

## *Liste des symboles*

<b>R<sub>s</sub></b>	Résistance série en [ $\Omega$ ]
<b>R<sub>sh</sub></b>	Résistance shunte en [ $\Omega$ ]
<b>I<sub>ph</sub></b>	Photo-courant en [A]
<b>I<sub>d</sub></b>	Courant traversant la diode en [A]
<b>I<sub>s</sub></b>	Courant de saturation inverse de la diode en [A]
<b>I<sub>sh</sub></b>	Courant parallèle en [A]
<b>I</b>	Courant de panneau en [A]
<b>V</b>	Tension de panneau en [V]
<b>I<sub>cc</sub></b>	Courant de court-circuit en [A]
<b>V<sub>co</sub></b>	Tension de circuit-ouvert en [V]
<b>T</b>	Température absolue en (Kelvin)
<b>G</b>	Eclairement en [ $W/m^2$ ]
<b>q</b>	Charge de l'électron en ( $1.9 \cdot 10^{-19}$ [C])
<b>K</b>	Constante de Boltzman en $1.3854 \cdot 10^{-23}$ [J/k]
<b>I<sub>scc</sub></b>	Courant de court-circuit d'une N <sub>s</sub> cellules en [A]
<b>I<sub>pcc</sub></b>	Courant de court-circuit d'une N <sub>p</sub> cellules en [A]
<b>V<sub>sco</sub></b>	Tension de circuit-ouvert d'une N <sub>s</sub> cellules en [V]
<b>V<sub>pco</sub></b>	Tension de circuit-ouvert d'une N <sub>p</sub> cellules en [V]
<b>I<sub>mcc</sub></b>	Courant de court-circuit d'une cellules mixte en [A]
<b>V<sub>mco</sub></b>	Tension de circuit-ouvert d'une cellules mixte en [V]
<b>S</b>	Surface de cellule en [ $m^2$ ]
<b>P<sub>inc</sub></b>	la puissance solaire incidente
<b>V<sub>con</sub></b>	Température de la cellule en (Kelvin)
<b>I<sub>opt</sub></b>	Courant optimale en [A]
<b>V<sub>opt</sub></b>	Tension optimale en [V]
<b>P<sub>max</sub></b>	Puissance maximale en [W]
<b>I<sub>pv</sub></b>	Courant photovoltaïque en [A]
<b>V<sub>pv</sub></b>	Tension photovoltaïque en [V]

<b>P<sub>PV</sub></b>	Puissance photovoltaïque en [W]
<b><math>\eta</math></b>	Rendement énergétique
<b>FF</b>	Facteur de forme
<b><math>\beta</math></b>	L'angle d'incidence en (°).
<b>R</b>	Le rendement en (%)
<b>L</b>	Latitude du lieu
<b>N</b>	Nombre de jour
<b>PPM</b>	$\alpha$ Angle d'inclinaison des modules photovoltaïques

*Liste des abréviations*

<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change
<b>GES</b>	Gaz à effet de serre
<b>PPm</b>	Partie par million
<b>PV</b>	Photovoltaïque
<b>GPV</b>	Générateur Photovoltaïque
<b>MLI</b>	Modulation de Largeur d'Impulsions
<b>SVM</b>	Space vector modulation
<b>PWM</b>	Pulse Width Modulation
<b>THD</b>	Total Harmonic Distortion
<b>P&amp;O</b>	Perturbation and Observation
<b>InCond</b>	Incremental Conductance
<b>MPP</b>	Maximum Power Point
<b>MPPT</b>	Maximum Power Point Tracking
<b>BOOST</b>	Convertisseur DC/DC élévateur

---

# **Introduction Générale**

---

## **Introduction Générale**

La demande de l'énergie électrique a augmenté durant ces dernières décennies. La majeure partie de cette énergie a été produite à partir de sources fossiles (pétrole, gaz et charbon). Ces dernières sont rapidement épuisables. En outre, les produits de la combustion de ces sources entraînent des problèmes comme l'effet de serre et de la pollution qui constituent de grands dangers pour l'environnement et la vie terrestre. Depuis la révolution industrielle, les carburants conventionnels ont été responsables du changement climatique en produisant plus de 60% du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) émis dans l'atmosphère chaque année. Le Groupe intergouvernemental des experts sur les changements climatiques IPCC a mentionné que la concentration de GES dans l'atmosphère ne doit pas dépasser l'équivalent de 450 ppm<sup>3</sup> de CO<sub>2</sub> en volume en 2030, par rapport à 385 ppm actuellement, et 280 ppm avant l'évolution industrielle. La limite des 450 ppm du CO<sub>2</sub> a été sélectionnée pour réduire l'émission du CO<sub>2</sub> et limiter l'augmentation de la température à 2°C dans le monde.

Dans le cadre de la réduction des dommages de ces émissions, l'énergie renouvelable a attiré l'attention du monde entier comme une source d'énergie alternative. Plusieurs pays industriels, durant ces deux dernières décennies, ont commencé à améliorer et développer une large gamme de projets d'énergies renouvelables impliquant des cellules PV, des éoliennes, les technologies de conversion hydroélectriques et la biomasse pour répondre à leurs besoins énergétiques. Par exemple, au moins 118 pays avaient une politique visant à promouvoir la production d'énergie renouvelable au début de 2011 par rapport à 55 pays au début de 2005. Cela est clairement visible dans le développement des énergies renouvelables, qui sont passées de 207 GW en 2006 à 312 GW en 2010. L'investissement annuel a augmenté pour atteindre 211 milliards de dollars, soit plus de trois fois qu'en 2006, qui étaient de 63 milliards de dollars.

Le soleil est une source d'énergie primaire qui crée par la suite une variété importante de sources d'énergie renouvelables sur Terre.

Cependant, l'énergie solaire qui peut être collectée directement sur la surface terrestre représente encore la plus grande quantité d'énergie renouvelable par rapport à toutes les autres sources renouvelables, soit 3.850.000 EJ / an par rapport à 7400 EJ / an pour l'énergie des océans, 6000 EJ / an pour l'énergie éolienne, 1548 EJ / an pour la bioénergie et 147 EJ / an pour l'énergie hydraulique; où la demande mondiale annuelle actuelle d'énergie (517 EJ / an) pourrait être couverte avec seulement 0.02% du flux solaire directe. Par conséquent, l'énergie solaire pourrait être suffisante pour assurer les besoins énergétiques futures à venir.

Afin de bien mener notre étude, notre travail sera partagé en quatre chapitres comme suit :

- En premier chapitre, on fait une description générale sur l'énergie solaire photovoltaïque : Définitions, Ensoleillement, Rayonnement solaire, technologies des cellules et les différents types de connexion du générateur photovoltaïque au réseau.
- Le second chapitre est consacré à la modélisation et la simulation de chaque éléments constituée le système solaire photovoltaïque ainsi que les caractéristiques du générateur PV.
- Le troisième chapitre est basé sur l'adaptation et la commande MPPT.
- Finalement le quatrième chapitre présente l'étude de la connexion du système GPV au réseau (Micro-grid)

Le mémoire se termine par une conclusion générale. Nous indiquons aussi quelques perspectives possibles pour nos activités de recherche futures.

---

# **Chapitre I :**

# **Généralité sur le**

# **Systeme PV**

---

## I.1 Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, elle pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but en utilisant plusieurs types de procédés parmi eux le moyen dit cellule photovoltaïque.

Dans ce chapitre nous allons étudier le fonctionnement d'une cellule PV et en déduire son modèle mathématique. Nous avons aussi cité les différents types de cellule PV ainsi que les modes de montage ce qui conduit au module PV, l'association de ce dernier permet de réaliser un panneau PV.

## I.2 Ensoleillement PV

L'ensoleillement est une mesure de l'énergie du rayonnement solaire reçue par une surface bien définie durant un temps donné. Il est généralement exprimé en irradiation moyenne en watts par mètre carré ( $W/m^2$ ). L'irradiation est l'intégrale de temps de rayonnement sur une période déterminée et elle est communément exprimée en  $W/m^2$ . La puissance solaire moyenne varie pour les emplacements géographiques différents [1].

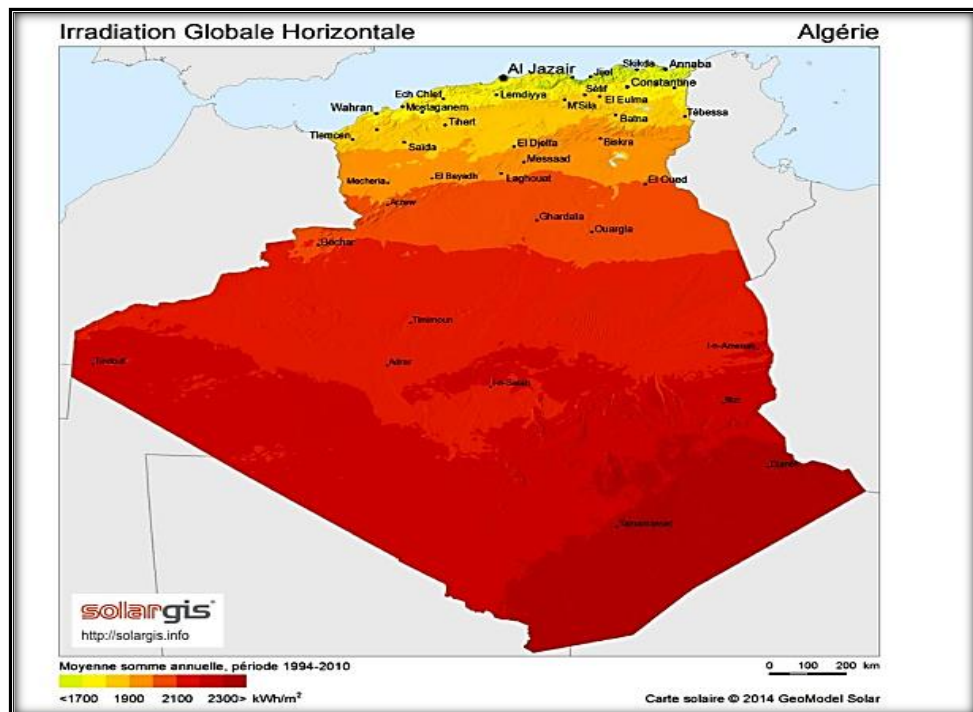


Figure I.1 Irradiation solaire globale pour l'Algérie

La Figure I.1 présente la carte Atlas solaire algérienne, qui montre la moyenne d'irradiation solaire reçue sur le territoire algérien durant la période comprise entre 1994-2010. On remarque que notre pays a des grandes opportunités d'installer les générateurs PV dans les sites isolés de même que dans les installations PV raccordées au réseau électrique national pour diminuer le nombre des stations de production d'électricité à base du gaz naturel.

Il existe aussi autres facteurs qui ont une influence sur la puissance d'un module photovoltaïque, parmi eux on trouve la température du module. En général, les conditions de test standard des modules PV (STC) sont créées à  $1000 \text{ W/m}^2$  à la masse d'air de 1,5 et une température de fonctionnement de  $25^\circ\text{C}$ . Toutefois, cette condition n'est pas remplie dans la plupart des cas, en particulier dans les zones de hautes températures. Dans la pratique, une température plus élevée affectera l'efficacité des modules PV, et se traduit par une réduction de la puissance de sortie entre 0.38 et 0.50% pour chaque augmentation de  $1^\circ\text{C}$ . Ainsi, dans les pays chauds, où la température atteint  $50^\circ\text{C}$  en été, l'efficacité du module PV est réduite de 12.5%. L'efficacité d'un panneau PV est également affectée par la vitesse et la direction du vent, l'angle d'inclinaison du panneau PV par rapport à la terre, la capacité de procéder un suivi de soleil et le phénomène d'ombrage [1].

### **I.3 Énergie Solaire**

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré ( $\text{kWc/m}^2$ ) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année [2].



**Figure I.2** Énergie solaire

L'énergie solaire produite et utilisée selon plusieurs procédés :

- **L'énergie solaire thermique** : qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.



Figure I.3 Énergie thermique

- **L'énergie solaire photovoltaïque** : qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon.



Figure I.4 Énergie solaire photovoltaïque

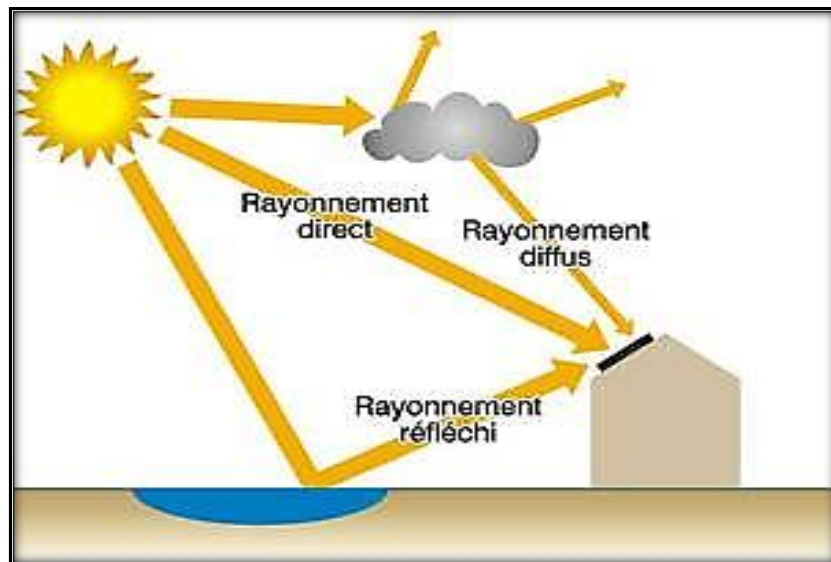
- **L'énergie solaire passive** : est une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire qui consiste à utiliser directement la lumière pour le chauffage.

## I.4 Rayonnement Solaire

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre  $150.10^6$  Km, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante  $180.10^6$  GW. Cette énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie [3].

Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de  $0.22$  à  $10 \mu\text{m}$ , l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit :

- 9 % dans la bande des ultraviolets ( $< 0.4 \mu\text{m}$ ).
- 47 % dans la bande visible ( $0.4$  à  $0.8 \mu\text{m}$ ).
- 44 % dans la bande des infrarouges ( $> 0.8 \mu\text{m}$ ).



**Figure I.5** Composants du rayonnement solaire dans un plan horizontal

L'énergie que transmet le soleil à la surface de l'atmosphère par rayonnement est égale à  $1350 \text{ Watts/m}^2$  (c'est la constante solaire). Cependant, en traversant l'atmosphère, des parties de ce rayonnement sont **réfléchies, absorbées ou diffusées**, ce qui diminue significativement cette valeur. Cette diminution est d'autant plus forte que la couche d'atmosphère est importante. Ainsi, l'énergie que nous transmet le Soleil dépend de plusieurs facteurs comme **l'épaisseur de l'atmosphère** où l'on se trouve ou encore **la position du Soleil** et sa valeur atteint dans les meilleures conditions  $900$  à  $1000 \text{ Watts/m}^2$ .

## I.5 Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV)

Tous les jours, le soleil fournit de l'énergie à la terre. Le monde peut utiliser cette énergie gratuite grâce à une technologie appelée photovoltaïque, qui transforme l'énergie solaire en électricité [4].

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée [4].



(a) Cellule photovoltaïque      (b) Panneau photovoltaïque      (c) Champ photovoltaïque

**Figure I.6** Unités de production photovoltaïque

### I.5.1 Cellules PV

Les cellules solaires sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé effet photovoltaïque. Elles sont fabriquées à l'aide des matériaux semi-conducteurs et réalisées à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. On peut la représenter comme une diode plate qui est sensible à la lumière.

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque [5].

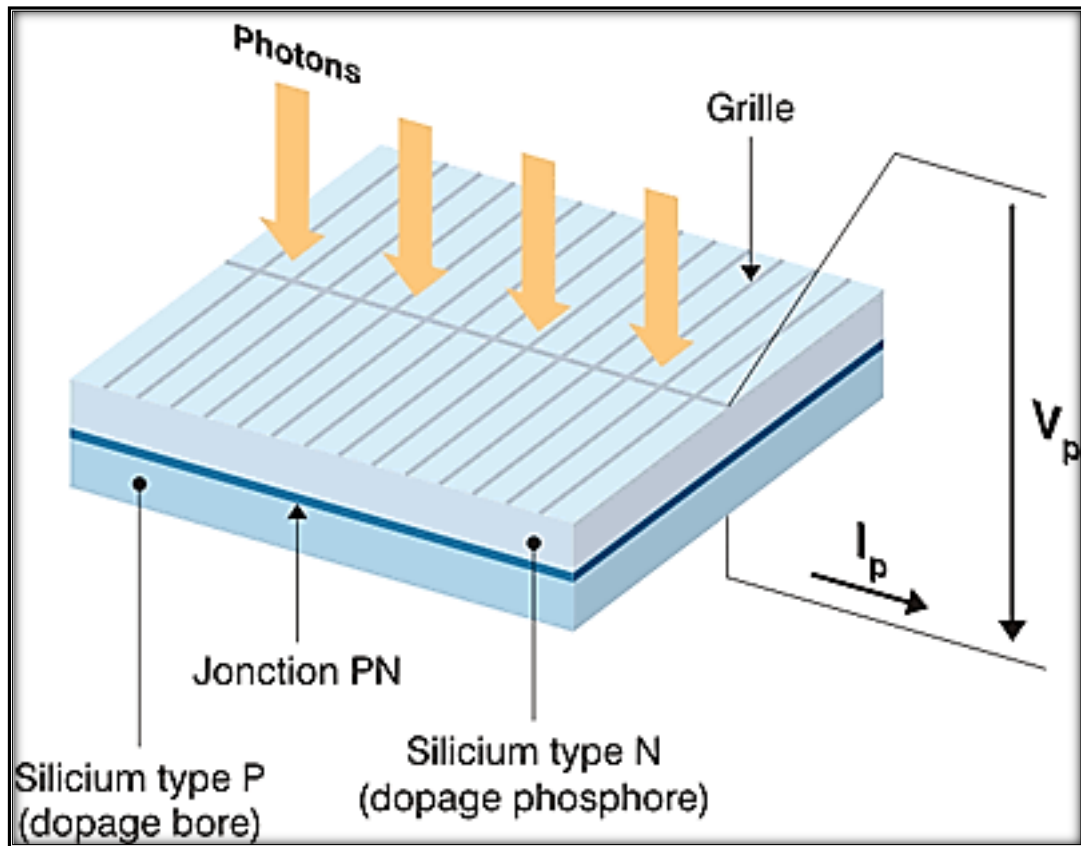


Figure I.7 Description d'une cellule photovoltaïque

### I.5.1.1 Différents technologie des cellules solaire

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 leurs types, leurs rendements est assez faible de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. Il existe trois principaux types de cellules [5].

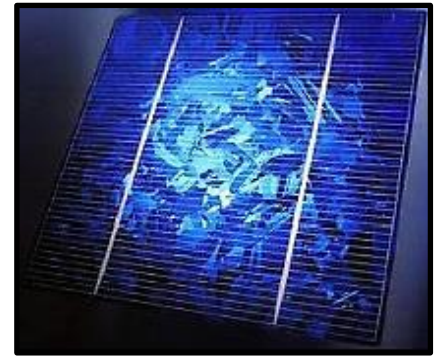
- **Cellules monos-cristallines** : Elles ont le meilleur rendement ainsi qu'un coût très élevé, du fait que leurs fabrications sont compliquées.
- **Cellules poly-cristallines** : Un rendement plus faible, et un coût de fabrication moins important ainsi qu'une conception plus au moins facile.
- **Cellules amorphes** : Elles sont utilisées dans de petits produits tel que des calculatrices ou encore des montres elles ont un rendement assez faible, elles nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium donc un cout plus élevé.



Cellule amorphe



Cellule mono-cristalline



Cellule poly-cristalline

**Figure I.8** Différents Types de panneau solaire**Tableau I.1** Caractéristique du silicium

Technologie	Rendement typique (%)	Rendement maximum obtenu en laboratoire(%)
Mono cristallin	12-15	24
Poly cristallin	11-14	18.6
Couche mince: amorphe	6-7	12.7

Une photopile fonctionne comme un générateur de courant dont la tension de fonctionnement dépend du courant absorbé par la charge qui lui est appliquée. Ces pertes de puissance électrique parviennent au niveau d'une cellule photovoltaïque et diminuent ainsi considérablement le rendement. Parmi les causes de ces pertes, on peut citer [6] :

- La réflexion de la lumière sur la face avant de la photopile (40 % pour le Si poli, peut être réduit par des traitements appropriés).
- Le courant réel est inférieur au courant idéal à cause de la recombinaison des paires électron-trou sur les défauts (en particulier sur les impuretés) et des courants de fuite.
- Facteur de forme (ou facteur de courbe) dû aux courants de diffusion et de recombinaison à travers la jonction.
- Résistances série et shunt entraînant des pertes par effet joule.

### I.5.2 Module photovoltaïque

Les modules photovoltaïques constitués par une association de certain nombre de cellules. Ces dernières sont connectées entre eux soit en série ou en parallèle. La connexion en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin [5,7].



Figure I.9 Module photovoltaïque.

### I.5.3 Panneau photovoltaïque

Les panneaux solaires photovoltaïques qui sont composé d'un groupement de modules élémentaires associés en série et en parallèle suivant la puissance souhaitée.



Figure I.10 Panneau photovoltaïque

### I.5.4 Centrale photovoltaïque

Une centrale solaire photovoltaïque est un ensemble destiné à augmenter la quantité de production solaire d'électricité. Elle est constituée de panneaux solaires photovoltaïques reliés entre eux (série et parallèle) et utilise des onduleurs pour être raccordée au réseau [8].



Figure I.11 Centrale photovoltaïque

## I.6 Principe de fonctionnement

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au Bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore), créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsqu'un photon de la lumière arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques. Les atomes, chargés positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargés négativement, dans la zone N. Une différence de potentiel électrique, c'est-à-dire une tension électrique, est ainsi créée. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque [9].

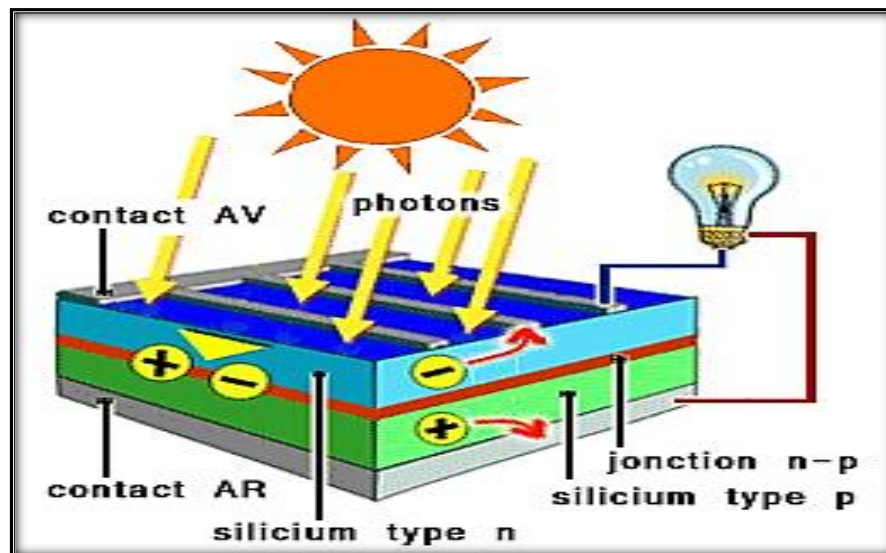
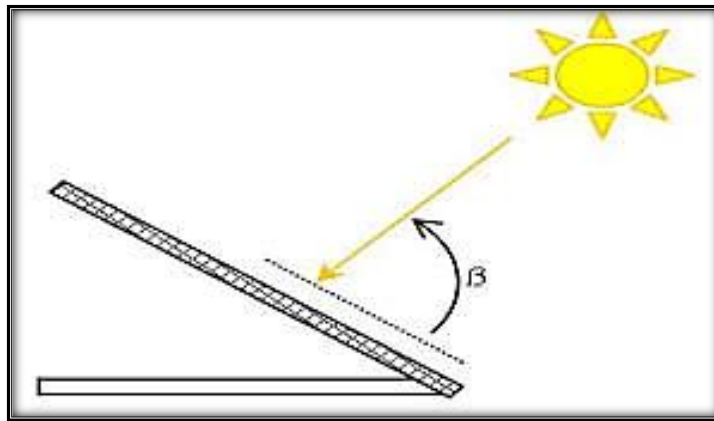


Figure 1.12 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.

## I.7 Facteurs de positionnement

### I.7.1 L'angle d'incidence

Cela correspond au plan formé entre le panneau photovoltaïque et les rayons lumineux, (Figure I.13). Cet angle a une grande importance. L'angle d'incidence optimal correspond à un angle de  $90^\circ$ . Chaque fois que cet angle diminue ou augmente, la surface en  $m^2$  du panneau solaire exposé aux rayons lumineux diminue et donc en partant de la puissance du panneau solaire, le rendement diminue aussi [10].



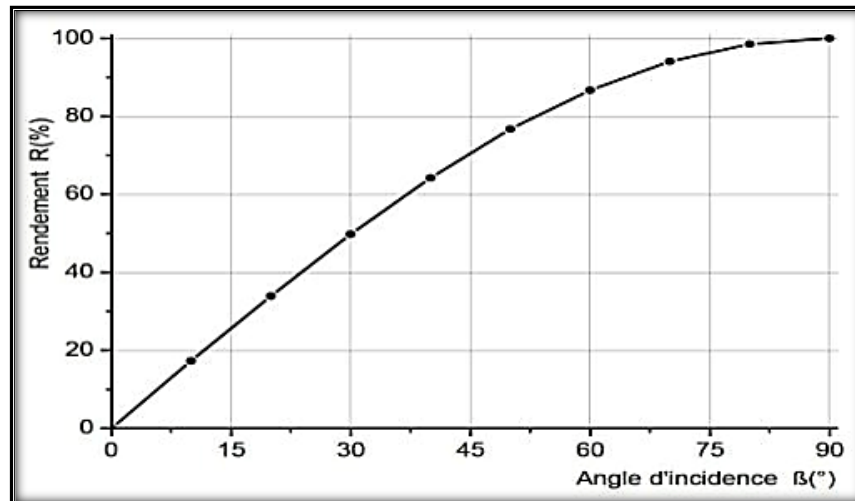
**Figure I.13** Angle d'incidence sur un module photovoltaïque

L'angle d'incidence joue un rôle majeur pour les rendements du panneau. Il est défini selon l'équation suivante :

$$R = 100 \times \sin(\beta) \quad [I.1]$$

Avec, R, le rendement en (%) et  $\beta$ , l'angle d'incidence en ( $^\circ$ ).

La figure suivante représente l'évolution du rendement en fonction de l'angle d'incidence,

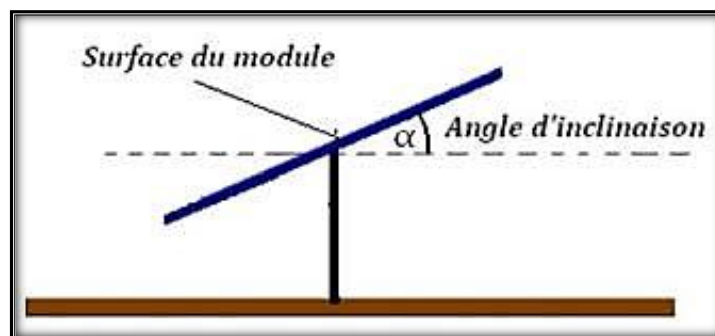


**Figure I.14** Rendement des modules PV en fonction de l'angle d'incidence

Ainsi, le rendement est maximal lorsque les rayons arrivent perpendiculairement (90°) sur le module photovoltaïque. Alors que pour un angle de 45°, le rendement n'est que de 70 %.

### I.7.2 L'angle d'inclinaison

L'angle d'inclinaison correspond à l'angle formé par le plan du module solaire par rapport à l'horizontale [10].



**Figure I.15** Angle d'inclinaison des modules photovoltaïques

L'évolution de la trajectoire du soleil variant selon les saisons, l'angle d'inclinaison (pour un module photovoltaïque n'étant pas muni d'un système rotatif) est plus réduit en été et plus importante en hiver. L'inclinaison d'un module photovoltaïque par rapport à l'horizontale est donnée par la relation suivante [1, 2] :

$$\alpha = L - \sin^{-1} \left( 0,4 \times \left( \frac{N \times 360}{365} \right) \right) \quad [I.2]$$

Avec,  $L$  : latitude du lieu,  $N$  : nombre de jour entre l'équinoxe de printemps (21 mars de chaque année) et le jour considéré. Cette relation permettant un rendement supérieur n'est valable que lorsque le module solaire en question est muni d'un système qui lui permet de s'incliner. Or on ne trouve ce système que très rarement.

## I.8 Différents types des systèmes PV

Les différents types des systèmes photovoltaïques peuvent être classés comme suit :

- Systèmes autonomes (Stand-alone PV system)
- Systèmes hybrides
- Systèmes connectés au réseau (Grid-connected PV system).

### I.8.1 Systèmes autonomes (Stand-Alone PV system)

On distingue par l'appellation « Stand-Alone PV » tout système dépendant uniquement de l'énergie solaire comme source d'énergie électrique et qui peut être de l'ordre de milliwatts jusqu'à des kilowatts ou plus. Ces systèmes peuvent comporter des accumulateurs qui emmagasinent l'énergie produite par les modules PV au cours de la journée (phase d'ensoleillement) et servant durant la nuit (phase d'obscurité) ou lors des périodes où le rayonnement solaire est insuffisant (Figure 1.16). Ils peuvent également répondre aux besoins d'une application sans recours aux accumulateurs (par exemple : site isolé, pompage solaire...etc.) [11].

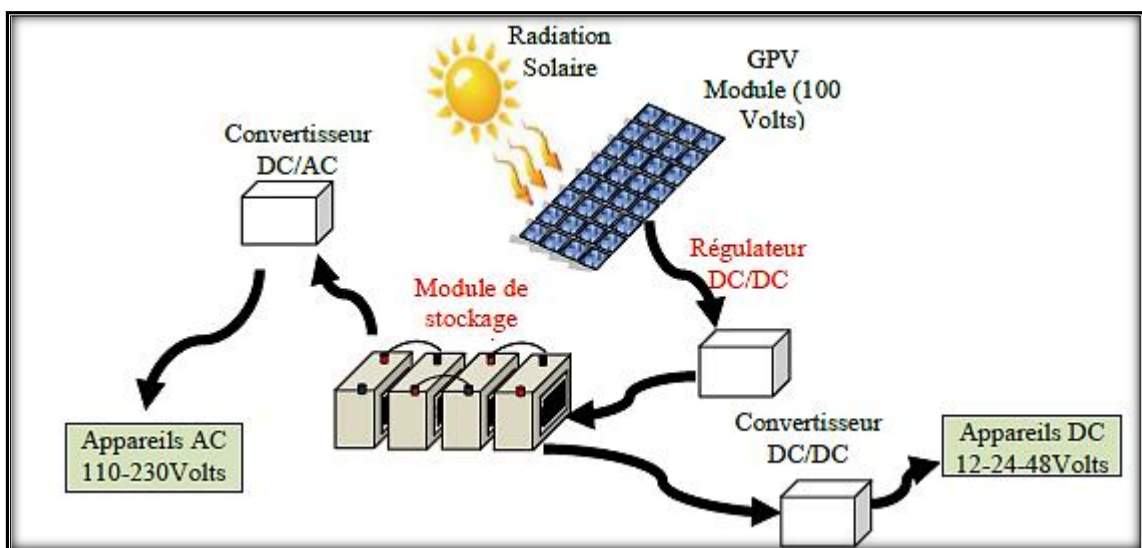
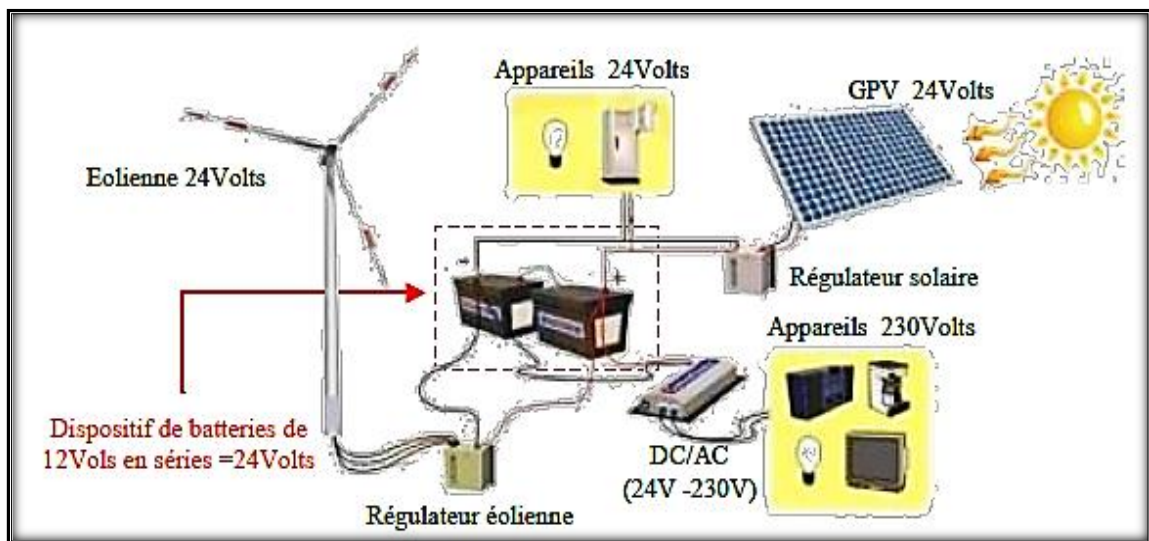


Figure I.16 Schéma générale d'une installation PV autonome

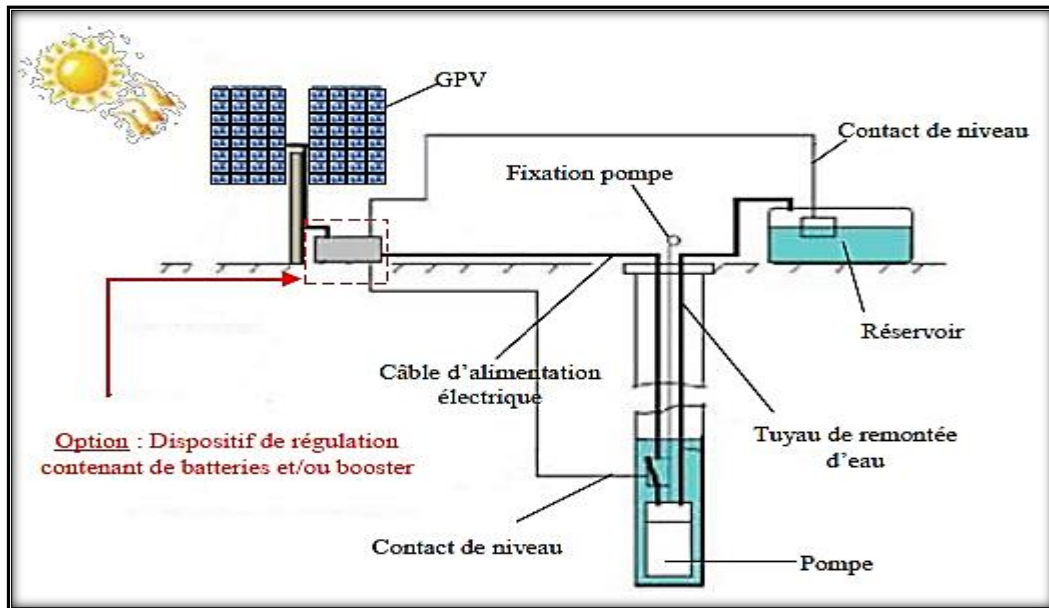
### I.8.2 Systèmes hybrides (Hybrid PV system)

Les systèmes hybrides, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité, sont composés d'un GPV combiné à une autre source d'énergie comme une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou les deux à la fois. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée ; lorsqu'il n'y a pas assez de lumière solaire à certains moments de l'année, ou si on désire diminuer notre investissement dans les champs de modules photovoltaïques ou/et les batteries d'accumulateurs [11,12].



**Figure I.17** Schéma de raccordement d'une installation hybride

D'autre système photovoltaïque peut aussi, être considérés autonome comme c'est le cas du pompage solaire de l'eau pour irrigation ou consommation potable. On peut aussi les considérer comme hybride si l'installation combine le système avec d'autre source d'énergie électrique [12].



**Figure 1.18** Schéma d'une installation autonome de type pompage d'eau solaire

### I.8.3 Système connecté au réseau (Grid-connected PV system)

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau sont les résultats de la tendance à la décentralisation du réseau public d'électricité. L'énergie électrique est produite plus près des lieux de consommation et non pas seulement par de grandes centrales thermiques ou hydroélectriques. Au fur et à mesure que l'utilisation de ce système, non centralisé, se propage, la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution sera réduite d'où l'avantage.

Un système connecté à un réseau, produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin ; ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie d'accumulateurs. Il est toujours possible d'utiliser ceux-ci pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau [11].

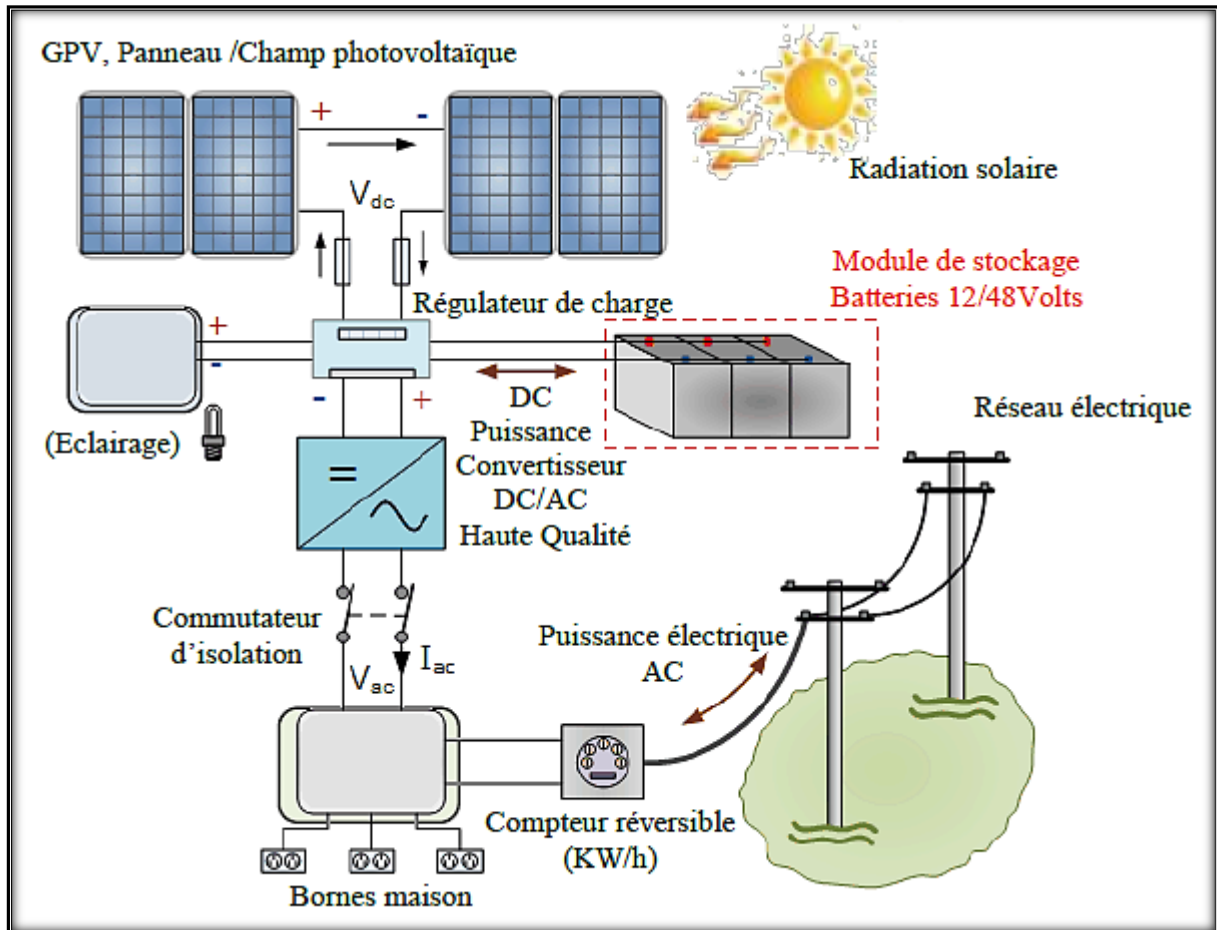


Figure I.19 Schéma d'une installation PV connectée au réseau, avec batteries

## I.9 Avantages et inconvénients

Les avantages de l'énergie photovoltaïque les plus importants sont [13] :

### I.9.1 Avantages

- Energie indépendante, le combustible (le rayonnement solaire) est renouvelable et gratuit.
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.
- Génère l'énergie requise.
- Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité.
- L'extension des systèmes est facile, la taille d'une installation peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de la charge.

- La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voir de générer des revenus.
- Entretien minimal.
- Aucun bruit.

### **I.9.2 Inconvénients**

- La fabrication des panneaux photovoltaïques relève de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
- Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques.
- Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher.

### **I.10 Conclusion**

La conversion photovoltaïque rencontre depuis quelques années une évolution profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque. Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes notions qui entrent dans l'énergie solaire et la constitution d'un système photovoltaïque et nous avons aussi exploré le principe de la conversion photovoltaïque et les technologies utilisées ainsi que les différents systèmes de connexion photovoltaïques et principalement les systèmes connectés au réseau qui feront l'objet de notre travail. Dans le prochain chapitre nous présenterons, la modélisation des différentes parties constituant notre système.

---

# **Chapitre II : Modélisation D'un Système Solaire PV**

---

## II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier la modélisation de la cellule et le générateur photovoltaïque (composé de 46 cellules connectées en série) dans les conditions standard ( $E=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ), nous allons traiter l'effet de la température et l'éclairement sur l'énergie de la cellule PV, l'effet de regroupement de cellule (série, parallèle, série – parallèle) sur l'énergie produite, on utilise l'outil MATLAB-Simulink pour faire la simulation de comportement de la cellule et du générateur PV.

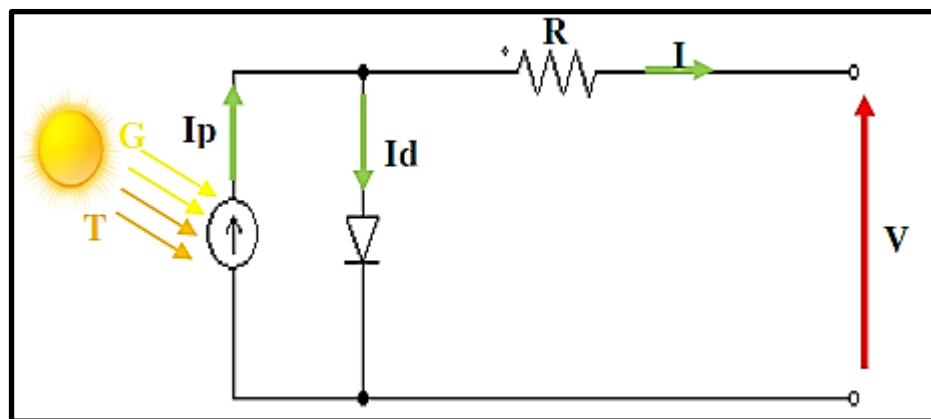
## II.2 Modélisation du système d'énergie photovoltaïque

### II.2.1 Circuit équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie plusieurs modèles électriques ont été proposés pour représenter la cellule photovoltaïque. On considère deux cas :

#### II.2.1.1 Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connectée à une charge peut être schématisée par un générateur de courant  $I_{ph}$  en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (II.1), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale [14].



**Figure II.1** Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque idéale

Les équations retenues de ce modèle sont :

$$I_{ph} = I + I_d \quad (\text{II.1})$$

Le courant  $I_{pv}$  est assimilé au courant  $I_{cc}$  avec  $V_{pv} = 0$ , courant de court-circuit obtenu en courant circulant dans la charge.

$$I = I_{ph} - I_d \tag{II.2}$$

$$I_d = I_s \left[ \exp\left(\frac{q \cdot V_{co}}{k \cdot T}\right) - 1 \right] \tag{II.3}$$

$$I_{ph} = I_{cc} \cdot \left(\frac{G}{1000}\right) \tag{II.4}$$

$$I = \left[ I_{cc} \cdot \left(\frac{G}{1000}\right) \right] - I_s \left[ \exp\left(\frac{q \cdot V_t}{k \cdot T}\right) - 1 \right] \tag{II.5}$$

### II.2.1.2 Cas d'une cellule réelle

C'est le modèle le plus classique de la littérature il fait intervenir un générateur de courant  $I_{ph}$  pour la modélisation d'un flux lumineux incident, une diode (D) caractérisant la jonction PN et deux résistances [14,15] :

- **Résistance série  $R_s$**  : La résistance série est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière représentant les pertes par effet joule.
- **Résistance parallèle  $R_{sh}$**  : rend compte des effets, tels que le courant de fuite par les bords de la cellule, elle est réduite du fait de la pénétration des impuretés métalliques dans la jonction. Elle est généralement très supérieure à ( $R_s$ ). On peut l'étudier à partir de circuit équivalent illustré dans la figure suivante :

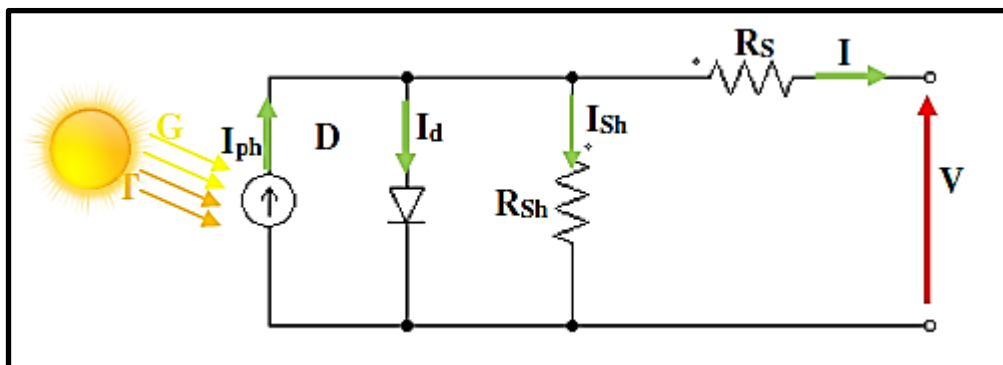


Figure II.2 Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque réelle

$$I_{ph} = I_d + I_{sh} + I \tag{II.6}$$

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{II.7}$$

$$I_d = I_s \left[ \exp\left(\frac{q \cdot V}{k \cdot T}\right) - 1 \right] \tag{II.8}$$

$$I_s = \frac{I_{cc}}{\left(\exp\left(\frac{V_{co}}{N_{cell} \cdot V_t}\right)\right)} \tag{II.9}$$

$$I_{Sh} = \frac{V_{co} + I_{cc} * R_s}{R_{sh}} \tag{II.10}$$

$$I_{Ph} = I_{cc} * \left( \frac{G}{1000} \right) \tag{II.11}$$

$$I = \left[ I_{cc} * \left( \frac{G}{1000} \right) \right] - I_s \left[ \exp. \left( \frac{q * V + I * R_s}{k * T} \right) - 1 \right] - \left( \frac{V + I * R_s}{R_{sh}} \right) \tag{II.12}$$

### II.2.2 Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est un ensemble des modules rangés sous forme de panneaux, mis en place pour obtenir une puissance, un courant  $I_{cc}$  et une tension  $V_{co}$  désirées.

La structure topologique du générateur est composée d'un nombre de modules séries  $N_s$  et d'un nombre de modules parallèles  $N_p$ .

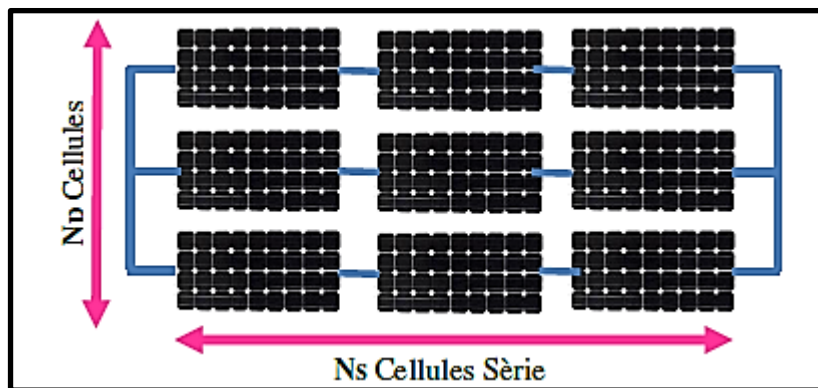


Figure II.3 Générateur photovoltaïque.

#### II.2.2.1 Caractéristiques d'un générateur photovoltaïque

La figure (II.4) représente la caractéristique courant/tension d'une cellule solaire dans les conditions de  $E=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ .

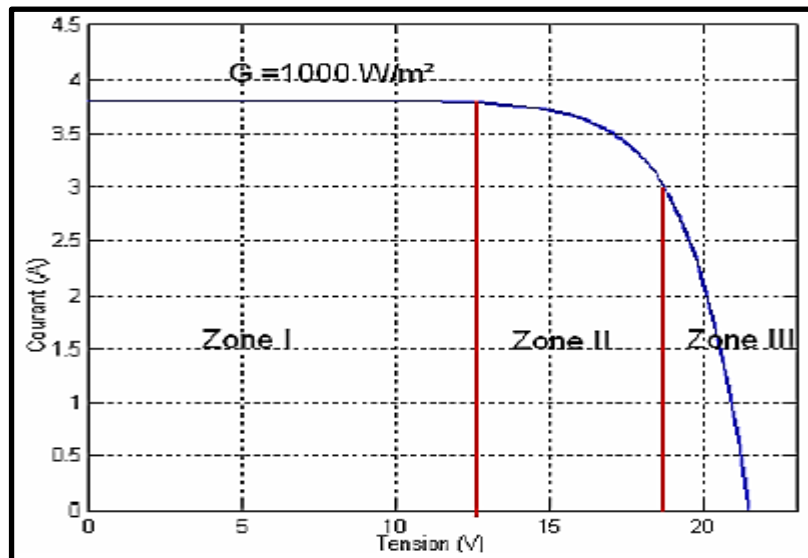


Figure II.4 Les différentes zones de la caractéristique I (V),  $T=25^\circ\text{C}$ .

La caractéristique I-V se divise en trois parties [16] :

- Zone (1) où la cellule se comporte comme un générateur de courant  $I_{cc}$  proportionnel à l'éclairement.
- Zone (3) où la cellule se comporte comme un générateur de tension  $V_{co}$  (circuit ouvert).
- Zone (2) : la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé (Maximum Power Point Tracking MPPT).

### II.2.2.2 Association en parallèle

Ce type d'association pour obtenir un courant important puisque l'association en parallèle des cellules délivre un courant égal à la somme des courants individuels et une tension égale à celui d'une seule cellule [16].

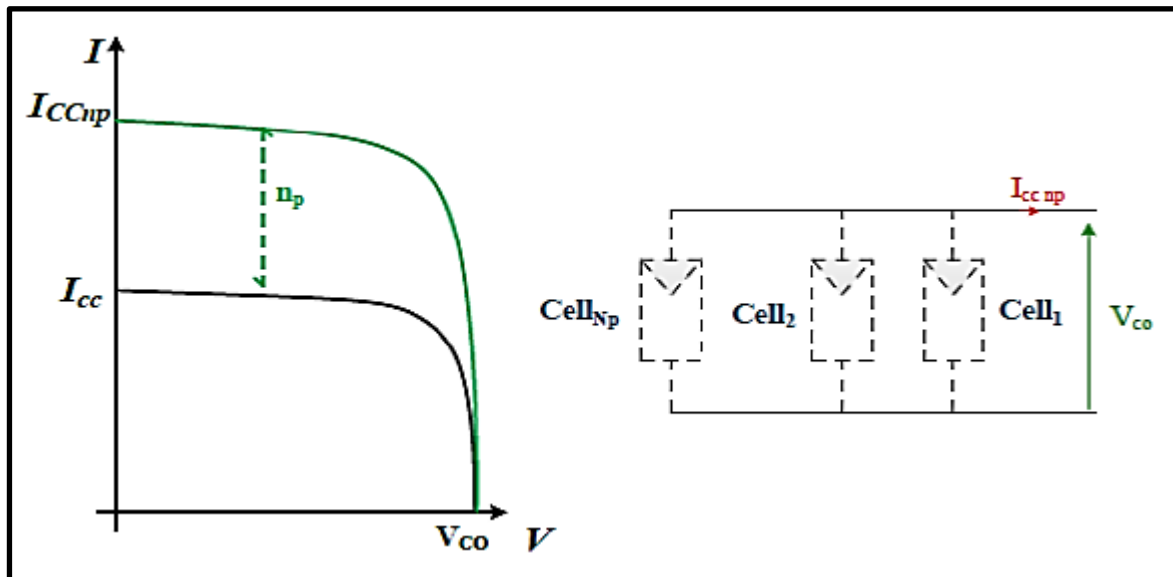


Figure II.5 Caractéristique résultante du regroupement de  $N_p$  cellules en parallèle

$$\begin{cases} V_{PCO} = V_{CO} \\ I_{PCC} = N_P \times I_{CC} \end{cases}$$

Avec :

$N_P$  : nombre des cellules en parallèle.

### II.2.2.3 Association en série

Ce type d'association pour obtenir une tension importante puisque l'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule.

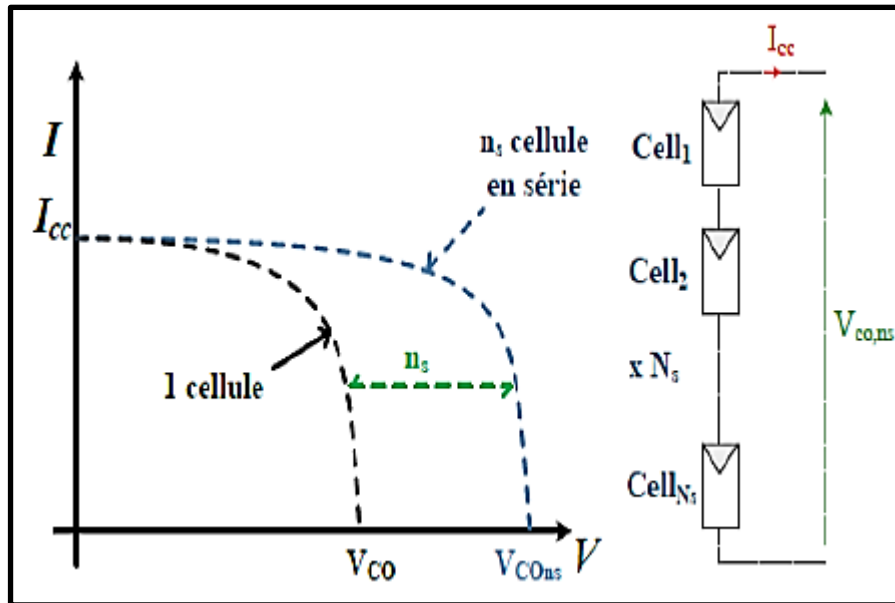


Figure II.6 Caractéristique résultante du regroupement de  $N_s$  cellules en série

$$\begin{cases} V_{sco} = N_s \times V_{co} \\ I_{scc} = I_{cc} \end{cases}$$

Avec :

$N_s$  : nombre des cellules en série.

### II.2.2.4 Association mixte (série-parallèle)

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte c'est-à-dire série-parallèle [15,16].

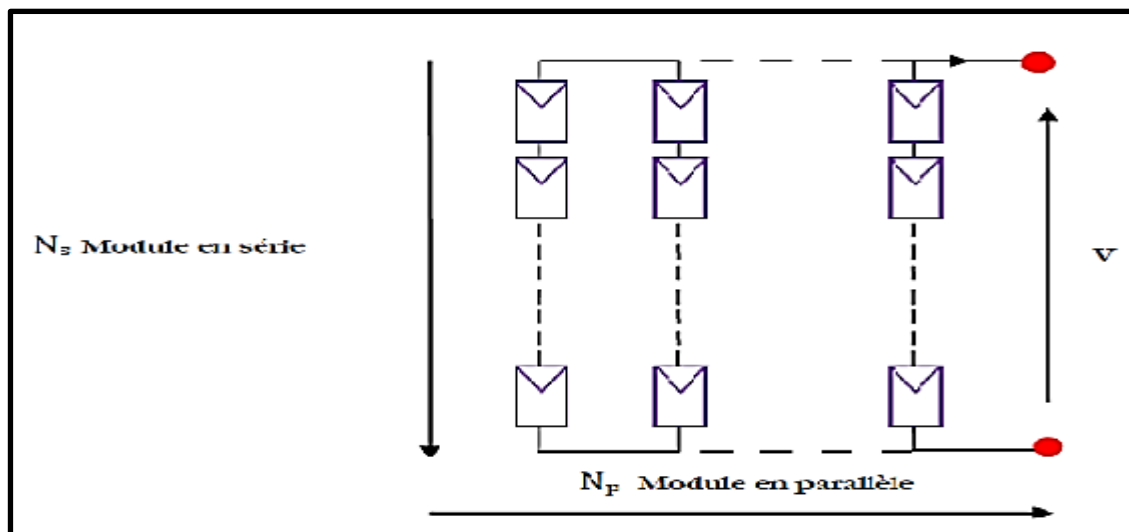


Figure II.7 Association mixte des modules solaires

$$\begin{cases} V_{MCO} = N_s \times V_{CO} \\ I_{MCC} = N_p \times I_{CC} \end{cases}$$

## II.3 Simulation d'une cellule photovoltaïque

### II.3.1 Modèle de simulation

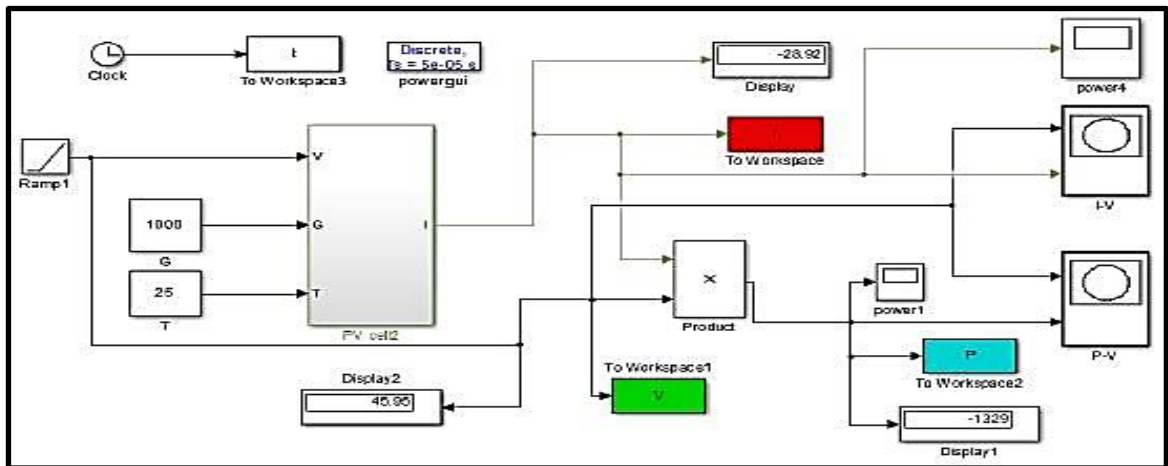


Figure II.8 Schéma bloc de la cellule PV en MATLAB-SIMULINK.

Les caractéristiques électriques de cellule sont données dans le tableau suivant :

Tableau II.2 Caractéristique électrique de la cellule dans les conditions standards

<CST> T=25°C, G=1000W /m<sup>2</sup>

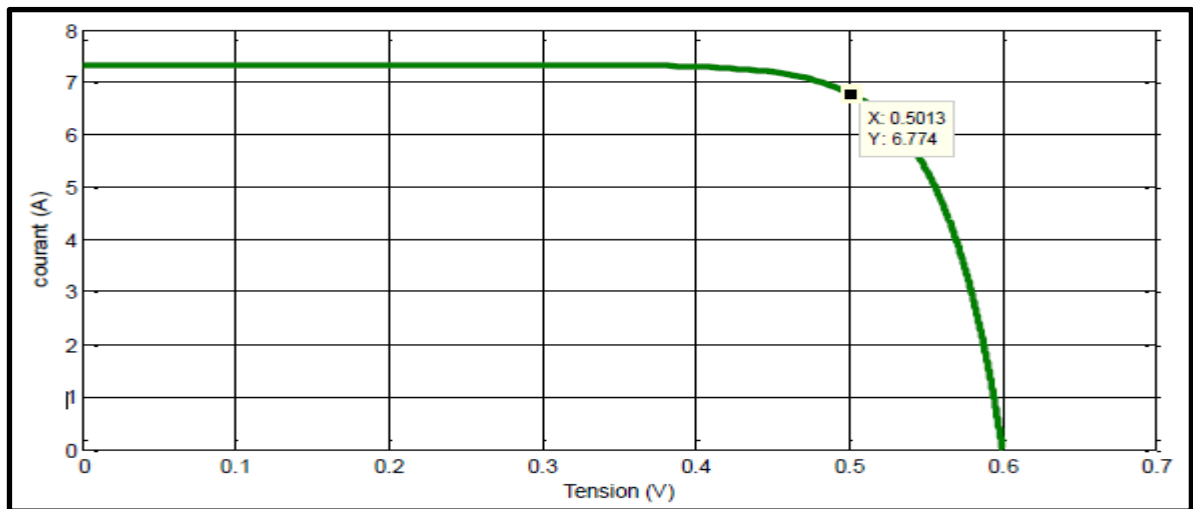
Eclairement standard	G = 1000 W/m <sup>2</sup>
Température standard	T = 25°C
Facteur d'idéalité A	A = 1.6
Energie de la bande interdite	E <sub>g</sub> ≈ 1.1eV
Courant de court-circuit I <sub>cc</sub>	7.34 A
Tension à circuit ouvert V <sub>oc</sub>	0.6 V

### II.3.2 Caractéristiques I(V) et P(V)

Les résultats obtenus de la simulation (programmation en utilisant le logiciel MATLAB) des caractéristiques courant –tension I(V) et puissance -tension P(V) de la cellule photovoltaïque dans les conditions standards (T=25°C, G=1000 W/m<sup>2</sup>) sont représentés dans les figures (II.9) et (II.10) :

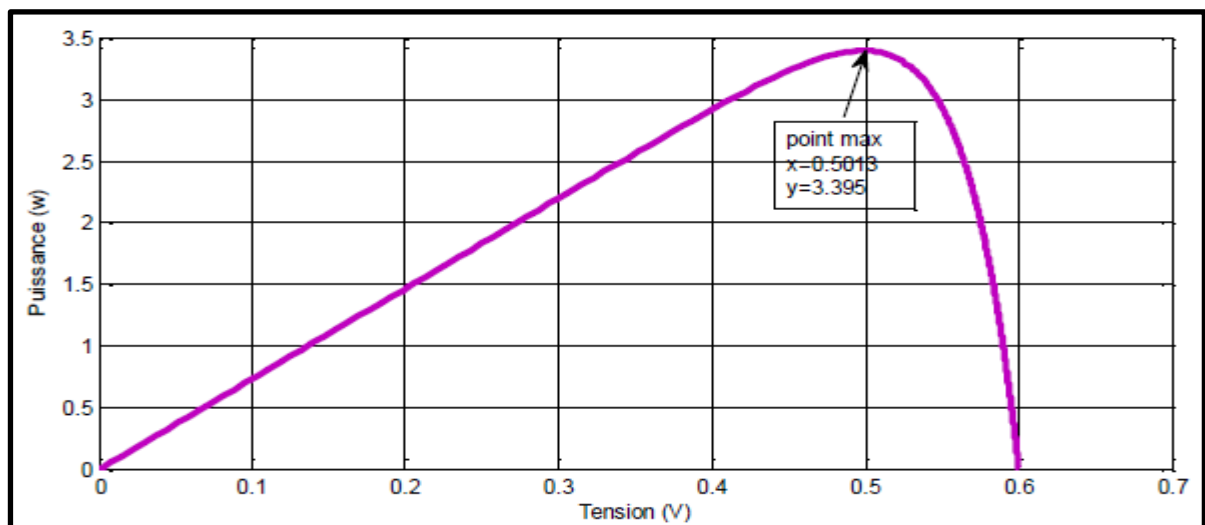
La figure (II.9) représente la caractéristique courant – tension d’une cellule solaire dans les conditions de  $G=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ . Le courant de court-circuit est égale  $7.34\text{A}$  et la tension de circuit ouvert est  $0.6 \text{ V}$ .

On observe que la caractéristique  $I(V)$  d’une cellule photovoltaïque est identique à celle d’une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l’axe du courant d’une quantité directement proportionnelle à l’éclairement.



**Figure II.9** Caractéristique  $I(V)$  d’une cellule ( $T=25^\circ\text{C}$ ,  $G=1000\text{W/m}^2$ )

La figure (II.10) représente la caractéristique puissance – tension d’une cellule solaire dans les conditions de  $G=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ . La puissance maximale est  $P_{\max}= 3.395 \text{ W}$ . On remarque que, lorsque la tension augmente la puissance augmente aussi jusqu’à atteindre la valeur optimale ( $P_{\max}$ ) ensuite elle décroît [16].



**Figure II.10** Caractéristique  $P(V)$  d’une cellule ( $T=25^\circ\text{C}$ ,  $G=1000\text{W/m}^2$ )

### II.3.3 Effets climatiques sur la cellule PV

#### II.3.3.1 Influence de la température sur la cellule

Les figures (II.11) et (II.12) représentent la caractéristique courant – tension  $I(V)$  et puissance-tension  $P(V)$  dans les mêmes conditions de l'éclairement ( $G=1000 \text{ W/m}^2$ ) et pour différents température ( $T=0^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$ ,  $60^\circ\text{C}$ ) :

##### II.3.3.1.1 Caractéristique (I-V)

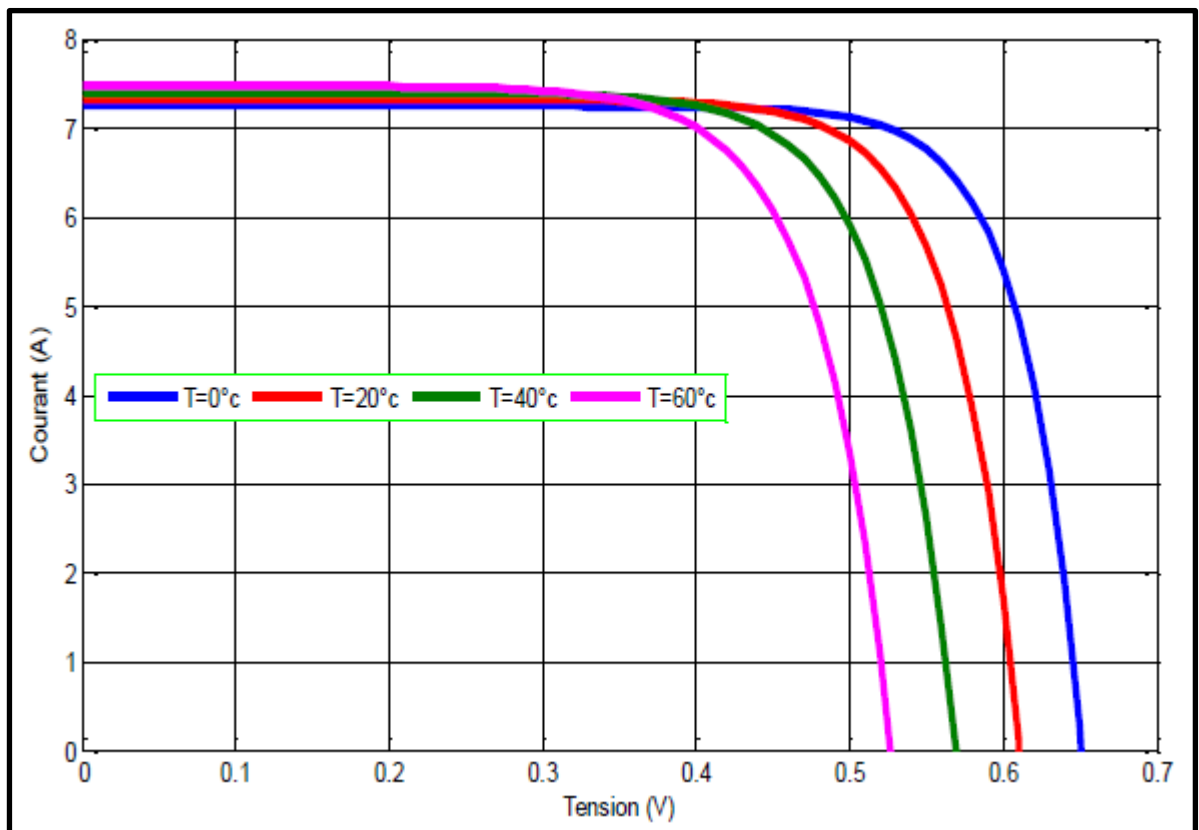


Figure II.11 Caractéristique  $I(V)$  pour différentes températures.

La tension de circuit ouvert est diminuée avec l'augmentation de la température, par contre le courant de court-circuit augmente légèrement avec l'augmentation de la température et la puissance maximale diminue. On constate que la température influence négativement sur la tension de circuit ouvert.

### II.3.3.1.2 Caractéristique (P-V)



**Figure II.12** Caractéristique P(V) pour différentes températures.

On remarque des variations importantes de la tension ; la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue.

Le courant gagne un peu d'intensité lorsque la température augmente ; ceci peut être expliqué par une meilleure absorption de la lumière.

L'accroissement du courant peut être négligé au point de puissance maximale et le comportement global de la cellule.

On peut conclure que pour une meilleure performance des cellules PV dans un environnement froid avec ciel dégagé.

### II.3.3.2 Influence de l'éclairement sur la cellule

Les figures (II.13) et (II.14) représentent les caractéristiques (I-V) et (P-V) d'une cellule en fonction de la variation de l'éclairement ( $G=200 \text{ W/m}^2$ ,  $400 \text{ W/m}^2$ ,  $600 \text{ W/m}^2$ ,  $800 \text{ W/m}^2$ ,  $1000 \text{ W/m}^2$ ) à température constante ( $T=25^\circ\text{C}$ ).

II.3.3.2.1 Caractéristique (I-V)

Le courant de court-circuit est directement proportionnel au rayonnement incident. Par contre, la tension de circuit ouvert augmente rapidement pour des faibles niveaux d'éclairement, puis lentement pour des niveaux plus élevés (Voir figure (II.13)).

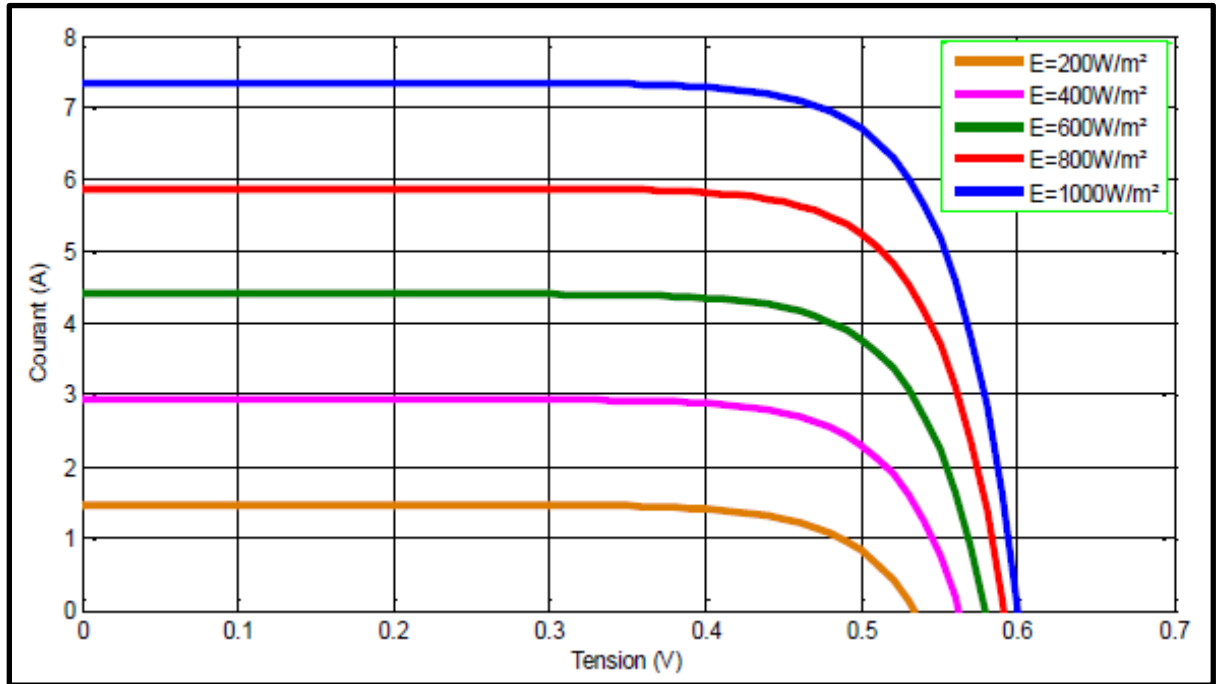


Figure II.13 Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement.

II.3.3.2.2 Caractéristique (P-V)

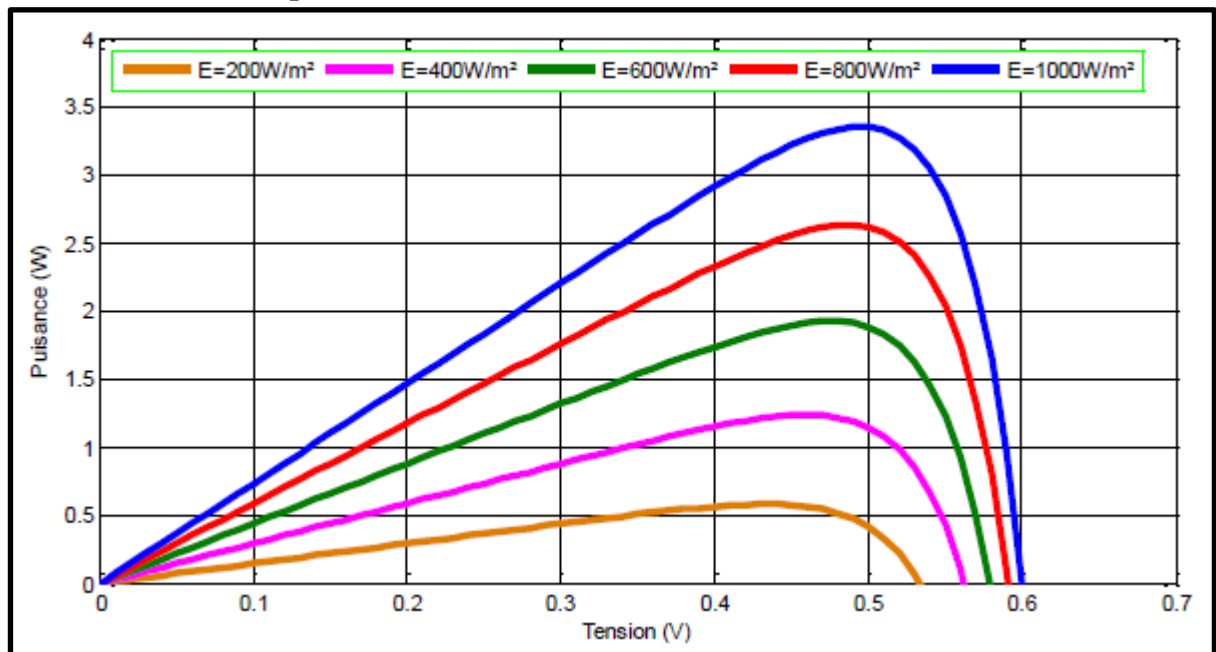


Figure II.14 Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement.

La figure (II.14) illustre la variation de la puissance délivrée par la cellule en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V).

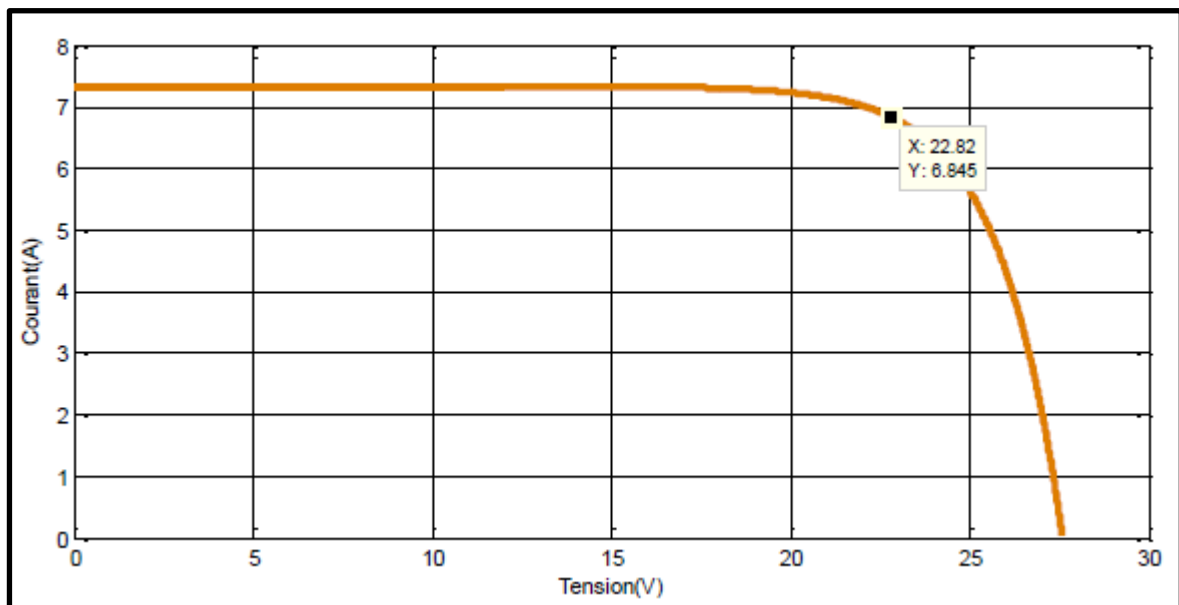
Pour différents niveaux d'éclairement on remarque que le courant est directement proportionnel à l'irradiation à ces niveaux d'éclairement, la tension par contre n'est pas très dégradée lorsque l'irradiation baisse.

## II.4 Simulation du générateur photovoltaïque

### II.4.1 Modèle de simulation

Nous avons pris un générateur composé de 46 cellules connectées en série et est considéré dans les conditions standards.  $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ .

### II.4.2 Caractéristique (I-V)

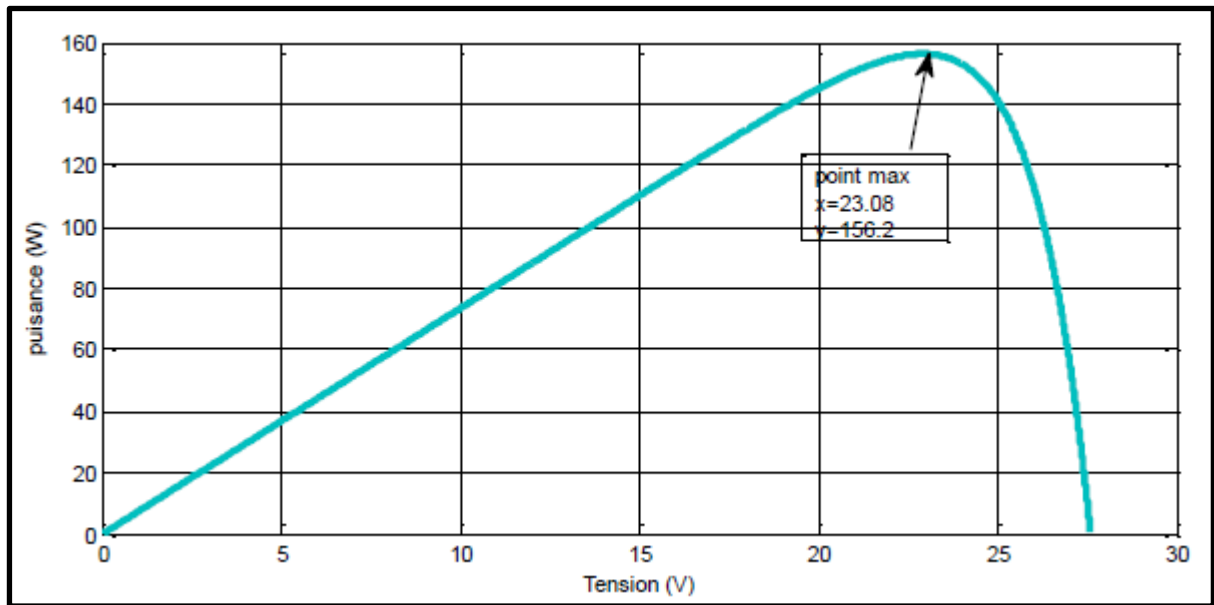


**Figure II.15** Caractéristique I(V) d'un générateur PV ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ )

Le courant de court-circuit est  $I_{cc}=7.34\text{ A}$ , la tension de circuit ouvert est  $V_{oc}=27.6\text{ V}$  (figure II.15). Ce résultat peut être expliqué par le fait que le générateur est composé de 46 cellules connectées en série ce qui donne :

$$V_{ocNcs} = 46 \times 0.6 = 27.6\text{V}$$

### II.4.3 Caractéristique (P-V)



**Figure II.16** Caractéristique P(V) d'un générateur PV ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ )

La puissance débitée par le générateur photovoltaïque dépend du point de fonctionnement du générateur comme montré par la figure (II.16). Le point max représente la puissance maximale débitée par le générateur.

A ce point  $P_{\text{max}}=156.2\text{W}$ , ce qui est vérifiée par :

$$P_{\text{max}}=22.82 \times 6.845 =156.20\text{W}$$

### II.4.4 Influence de l'association des cellules PV sur le GPV

La cellule tout de seule ne produit qu'une très faible puissance avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance les cellules sont assemblées pour former un générateur. Dans cette partie on va étudier l'influence de l'association série et /ou parallèle des cellules.

#### II.4.4.1 Influence de l'association série des cellules PV

Les figures (II.17) et (II.18) représentent les caractéristiques (I-V) et (P-V) d'une association de cellule en série :

La tension de circuit ouvert augmente quand le nombre de cellule en série augmente, la valeur de courant de court-circuit n'influe pas par l'augmentation du nombre de cellule en série alors que la puissance augmente.

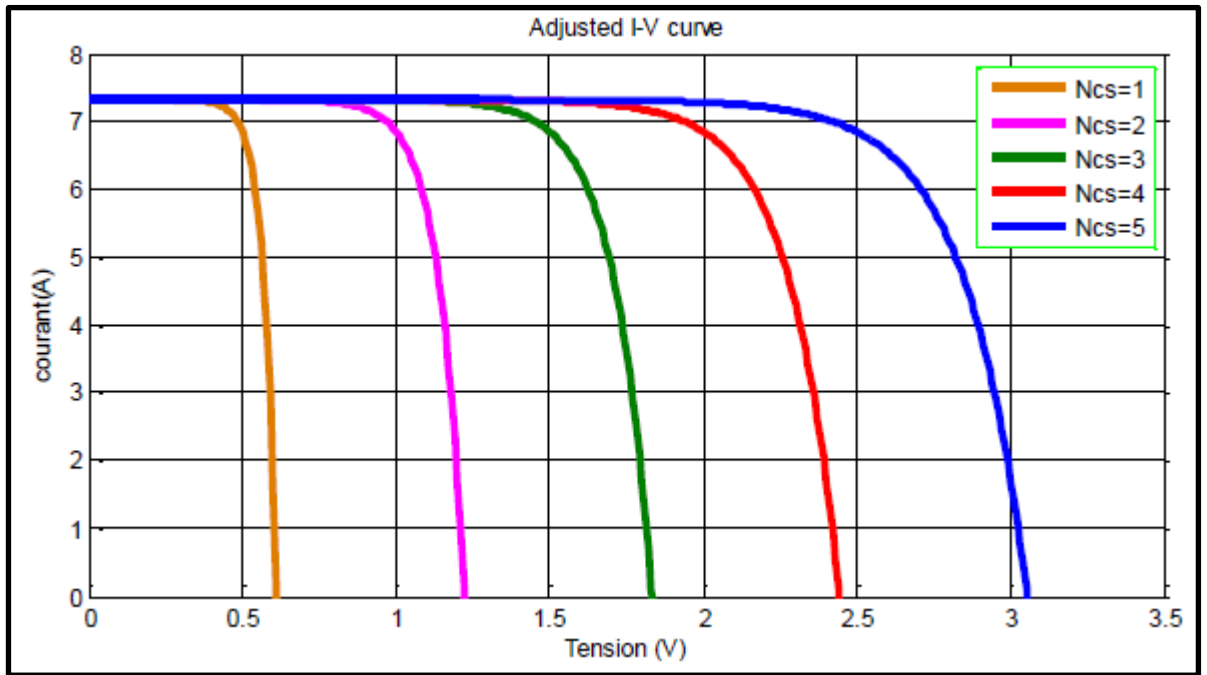


Figure II.17 Caractéristique I(V) pour différentes nombre de cellule en série.

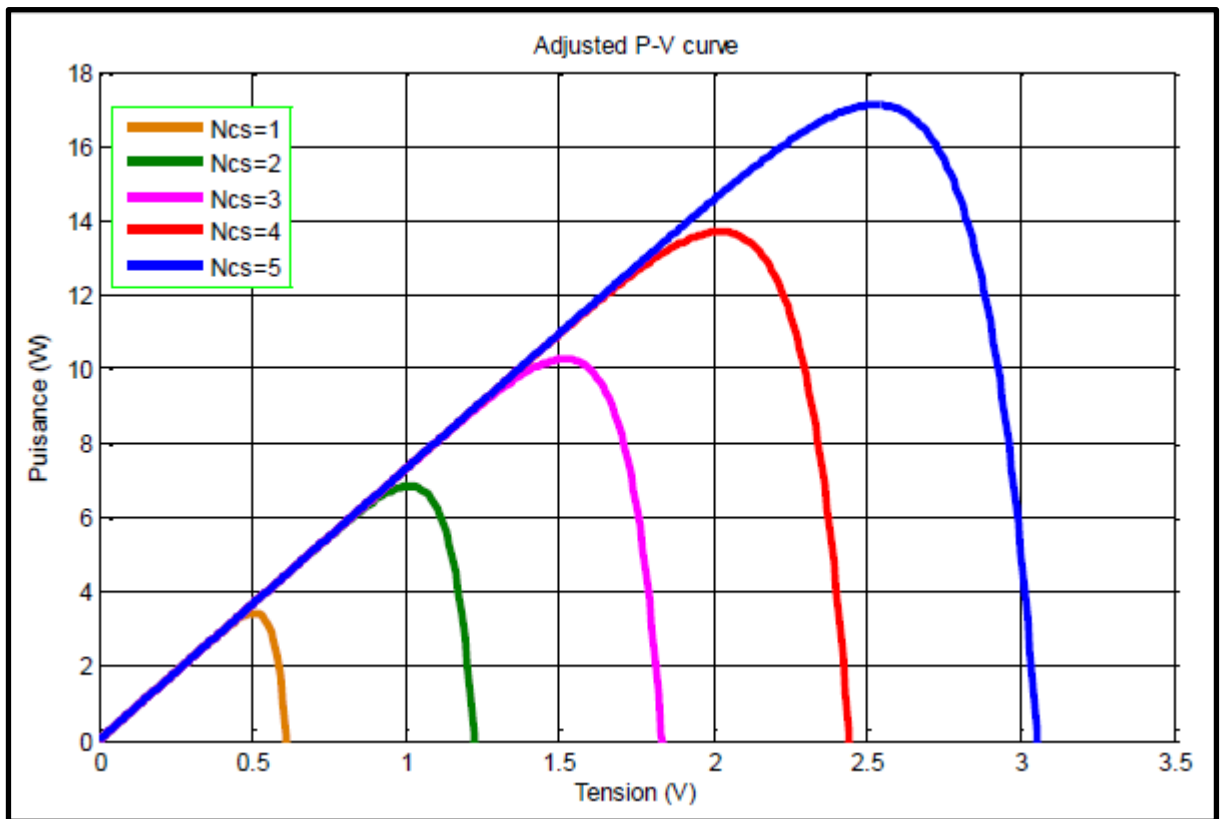


Figure II.18 Caractéristique P(V) pour différentes nombre de cellule en série.

#### II.4.4.2 Influence de l'association parallèle des cellules PV

Les figures (II.19) et (II.20) représentent les caractéristiques (I-V) et (P-V) d'une association de cellule en parallèle :

Le courant de court-circuit augmente quand le nombre de cellule en parallèle augmente, la valeur de la tension de circuit ouvert n'influe pas par l'augmentation du nombre de cellule en parallèle alors que la puissance augmente.

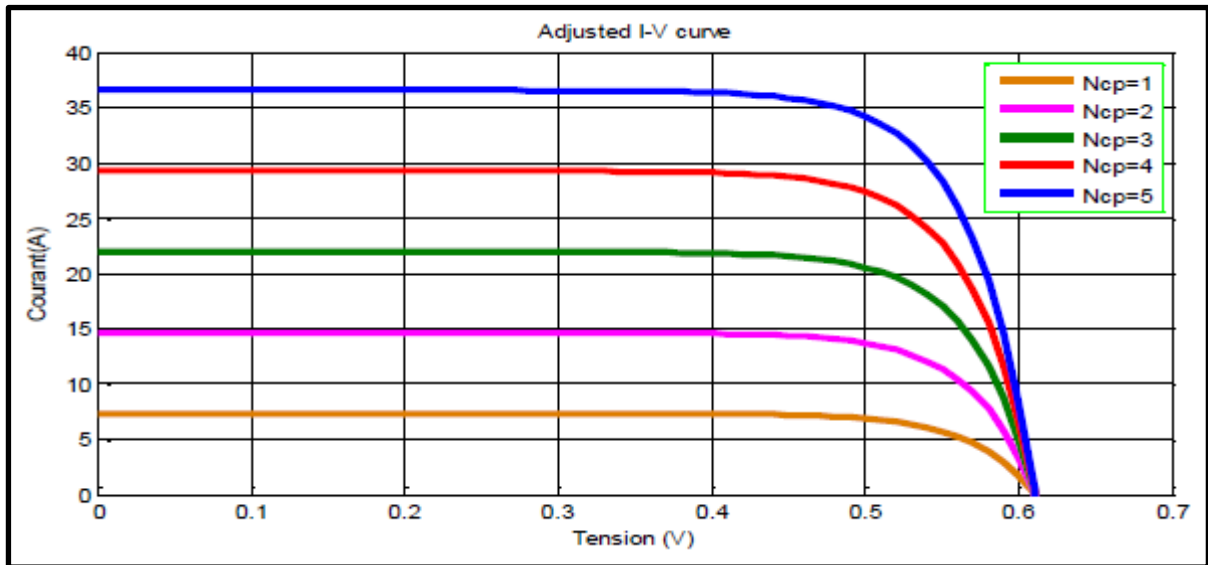


Figure II.19 Caractéristique I(V) pour différentes nombre de cellule en parallèle.

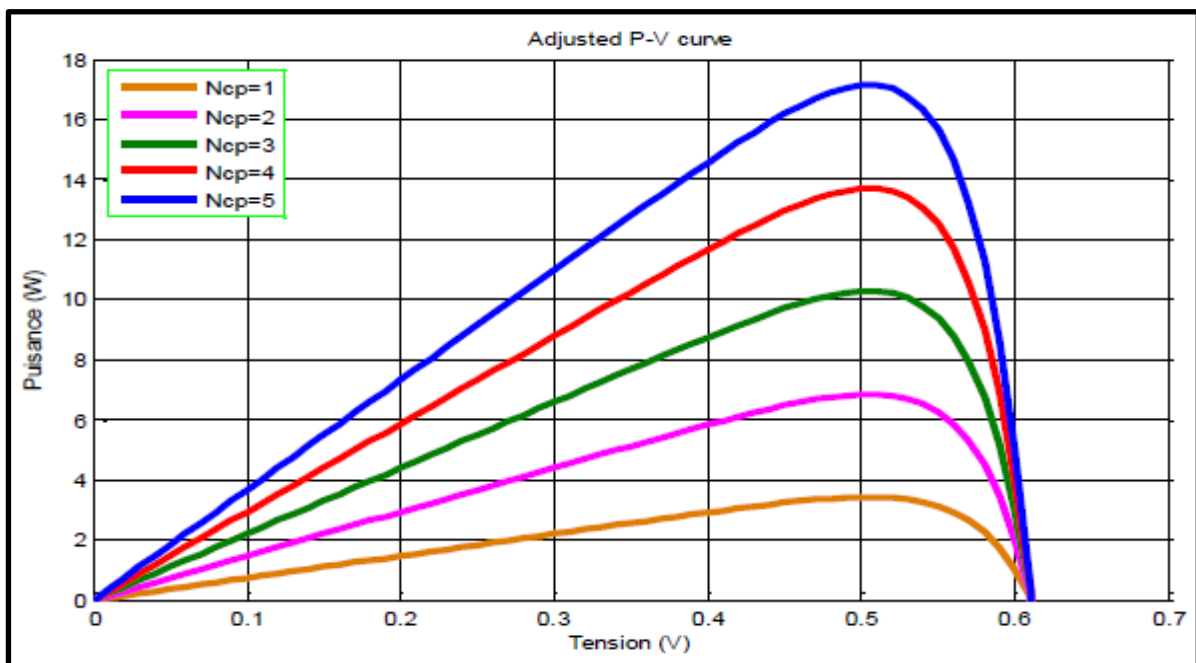


Figure II.20 Caractéristique P(V) pour différentes nombre de cellule en parallèle.

II.4.4.3 Influence de l'association série / parallèle des cellules PV

Les figures (II.21) et (II.22) représentent la caractéristique (I-V) et (P-V) d'une association de cellule en série/parallèle :

Le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert augmente relativement quand le nombre de cellule en série/parallèle augmente, alors la puissance augmente aussi.

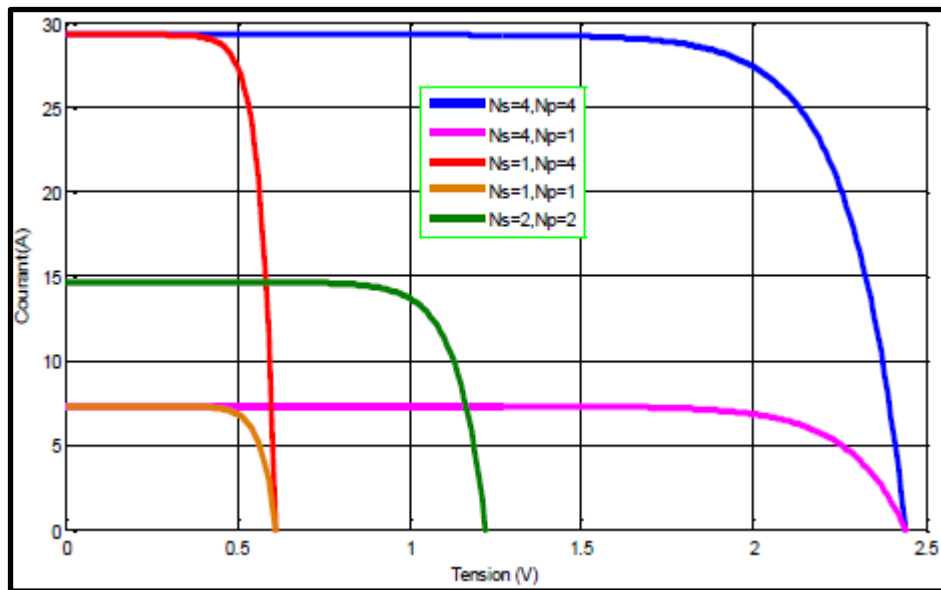


Figure II.21 Caractéristique I(V) pour différentes nombre de cellule en série / parallèle.

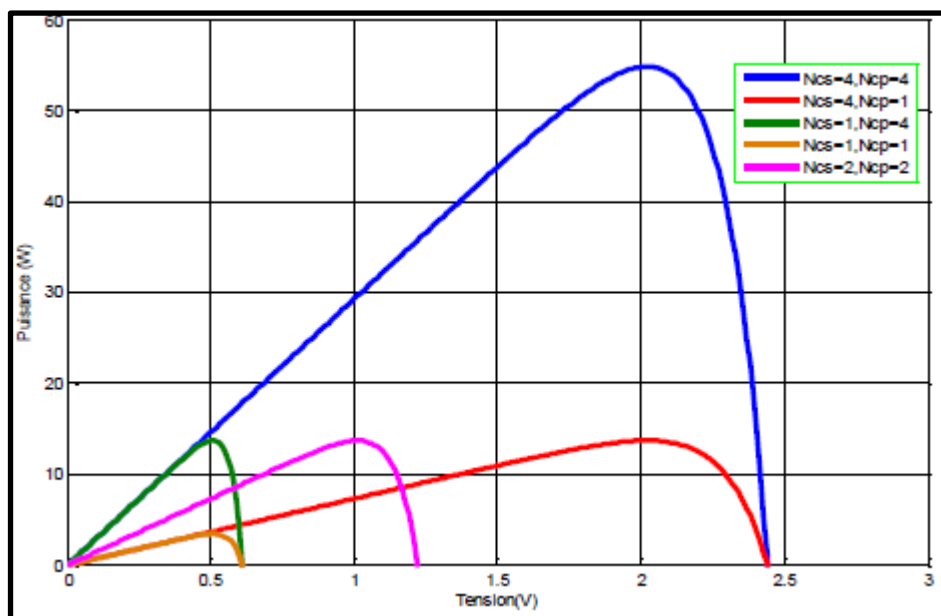
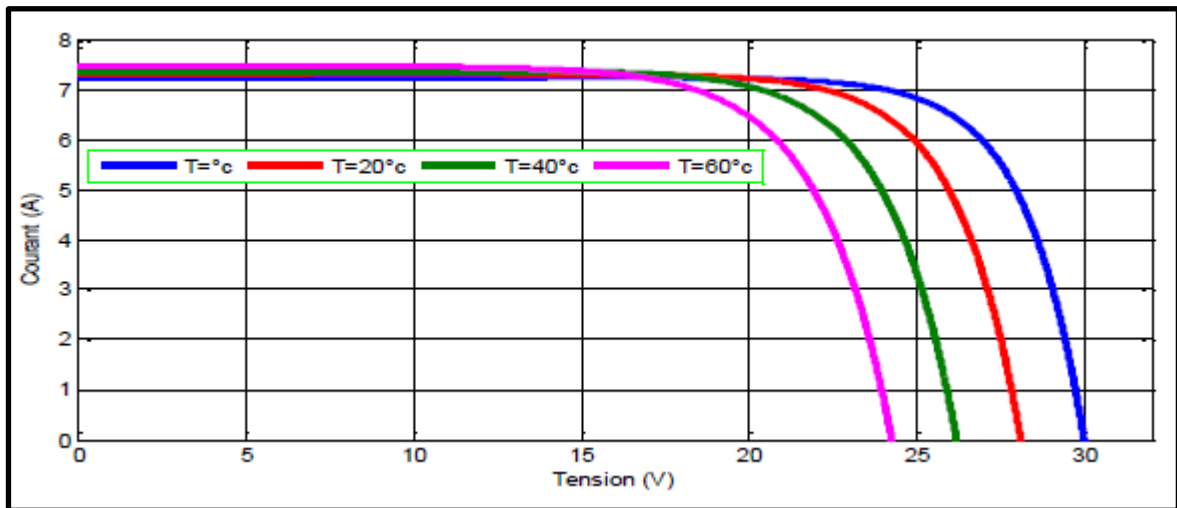


Figure II.22 Caractéristique P(V) pour différentes nombre de cellule en série / parallèle.

### II.4.5 Effets climatiques sur le générateur PV

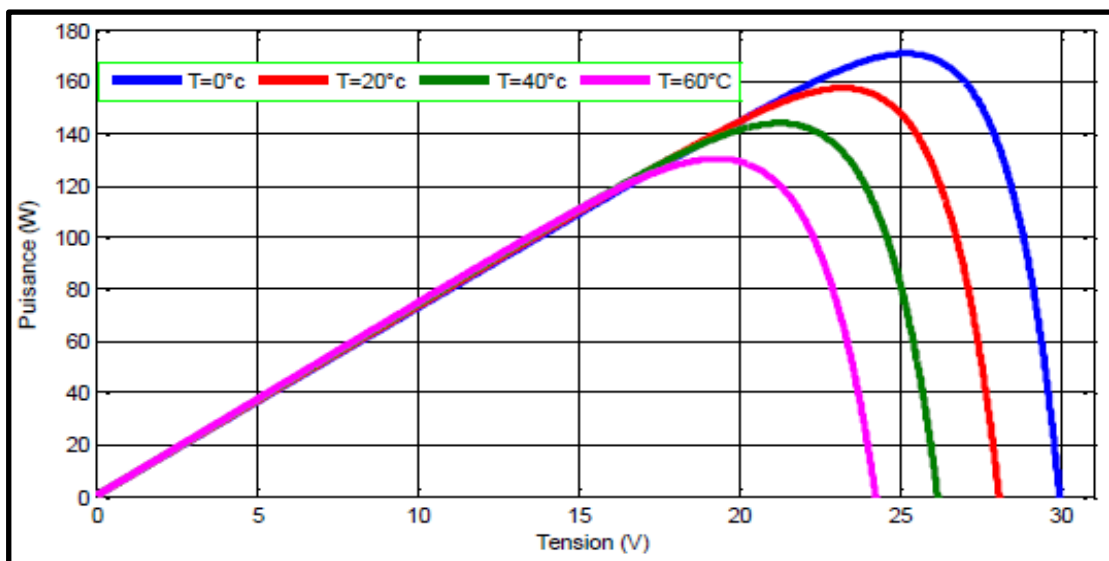
Les figures (II.23), (II.24), (II.25) et (II.26) représentent les caractéristiques (I-V) et (P-V) d'un générateur PV pour différentes températures et différents éclairagements, on n'obtient aucune différence par rapport à la simulation d'une cellule :

#### II.4.5.1 Influence de la température sur le générateur PV



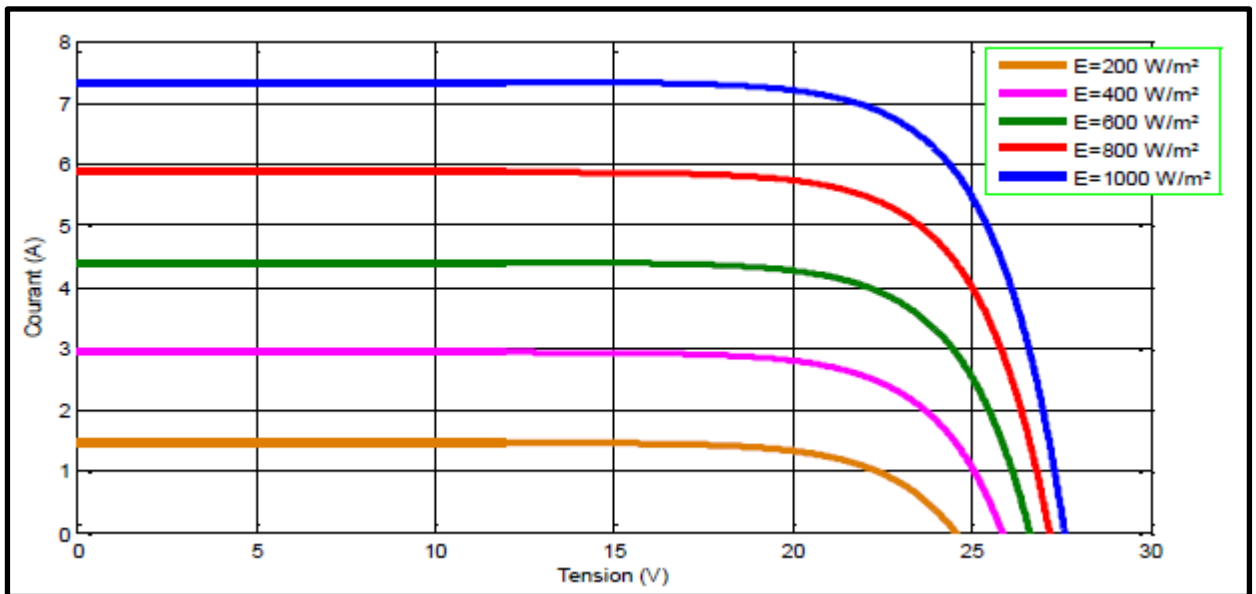
**Figure II.23** Caractéristique I(V) d'un générateur pour différentes températures

La figure (II.23) montre l'influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$ . Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique  $I=f(V)$ . Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influence négativement sur la tension de générateur.



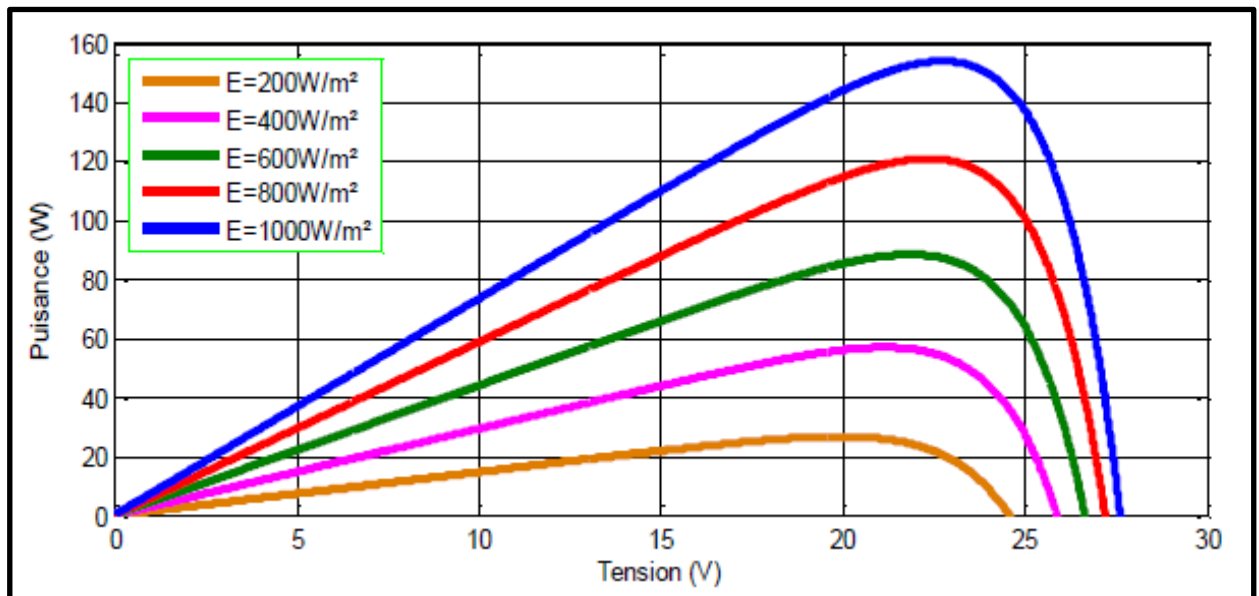
**Figure II.24** Caractéristique P(V) d'un générateur pour différentes températures

## II.4.5.2 Influence de l'éclairement sur le générateur PV



**Figure II.25** Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement.

La figure (II.25) montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I=f(V)$ . A une température constante ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ), on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.



**Figure II.26** Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement

## II.5 Rendement énergétique

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule  $P_{\max}$  ( $I_{\text{opt}}$ ,  $V_{\text{opt}}$ ) et la puissance solaire incidente. Il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{inc}}} = \frac{I_{\text{opt}} \times V_{\text{opt}}}{P_{\text{inc}}} \quad [\text{II.14}]$$

Avec  $P_{\text{inc}}$  est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique [17].

## II.6 Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (Fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule  $P_{\max}$  ( $I_{\text{opt}}$ ,  $V_{\text{opt}}$ ) et le produit du courant de court-circuit  $I_{\text{cc}}$  par la tension de circuit-ouvert  $V_{\text{co}}$  (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites  $R_s$  et  $R_{sh}$ . Il est défini par [17] :

$$\text{FF} = \frac{P_{\max}}{I_{\text{cc}} V_{\text{co}}} = \frac{I_{\text{opt}} V_{\text{opt}}}{I_{\text{cc}} V_{\text{co}}} \quad [\text{II.15}]$$

## II.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation mathématique de la cellule et le générateur photovoltaïque, Ensuite Nous avons utilisé le logiciel MATLAB/Simulink pour étudier dans un premier temps le comportement d'une cellule photovoltaïque puis un générateur photovoltaïque (composé de 46 cellules connectées en série) dans les conditions standards ( $G=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ). Nous avons étudié aussi l'influence de la température et de l'éclairement sur l'énergie produite par la cellule PV, ainsi l'influence de l'association de cellule (série, parallèle et mixte).

Le rendement du GPV dépend du point de fonctionnement optimal de la puissance produite à la sortie (PPM), le prochain chapitre est basé sur l'adaptation et la commande du convertisseur Boost pour la poursuite du point maximum de puissance MPPT.

---

# **Chapitre III :**

# **Étage d'adaptation &**

# **commande MPPT**

---

### III.1 Introduction

La conception d'un étage d'adaptation permet aujourd'hui de relier aisément un générateur photovoltaïque (GPV) à une charge de type continue (DC) avec un rendement de conversion très élevé. En outre, les panneaux PV utilisés pour former un GPV ont une faible tension de sortie. Alors, un convertisseur DC-DC est nécessaire pour augmenter cette tension, pour la compatibilité en respectant les exigences de raccordement au réseau. En fait, le concept de cet étage correspond à la modélisation des fonctions basiques idéalisées d'un convertisseur à découpage continu-continu (DC/DC). L'utilisation de ces convertisseurs permet le contrôle de la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse qui dans notre cas va nous permettre de poursuivre le point de fonctionnement optimum. Les hacheurs sont des convertisseurs directs du type continu-continu, dont le rôle primordial est de transformer une puissance d'entrée  $P_i = V_i \cdot I_i$  en une puissance de sortie  $P_o = V_o \cdot I_o$ , avec un rendement de conversion  $\eta = P_o / P_i = V_o \cdot I_o / V_i \cdot I_i$  proche de 100 % [18,19].

Dans ce chapitre un convertisseur survolteur (Boost) est utilisé pour la recherche du point de fonctionnement de puissance maximale du GPV (Commande MPPT).

### III.2 Étage d'adaptation

Un générateur photovoltaïque présente des caractéristiques I-V non linéaires avec un point de puissance maximum PPM. Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur photovoltaïque et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge comme présenté dans la figure (III.1).

Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de puissance maximale disponible.

Le rôle du convertisseur DC-DC fait fonctionner les modules à leur point de puissance optimale, quelques soient l'éclairément et la charge pour délivrer cette puissance à l'utilisation [20].

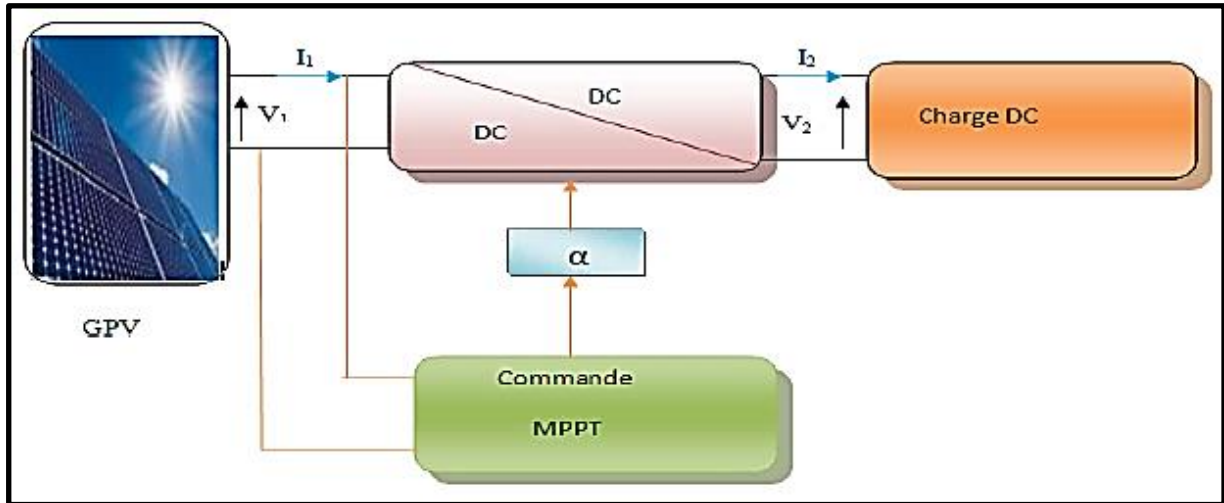


Figure III.1 Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

### III.3 Convertisseur DC/DC (Boost)

Le convertisseur (Boost) est connu par le nom d'élevateur de tension. Le schéma de la figure III.2 représente le circuit électrique du Boost. Au premier temps  $DT_s$ , le transistor  $S$  est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement jusqu'à la fin de la première période. Ensuite, le transistor  $S$  s'ouvre et l'inductance  $L$  s'opposant à la diminution de courant  $I_L$ , et génère une tension, qui s'applique sur la charge  $Z$  à travers la diode  $D$  [21,22].

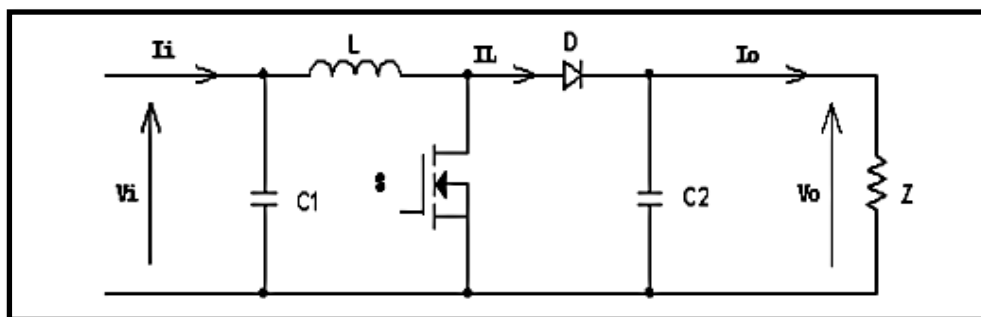


Figure III.2 Circuit électrique du convertisseur Boost

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement est donnée ci-dessous :

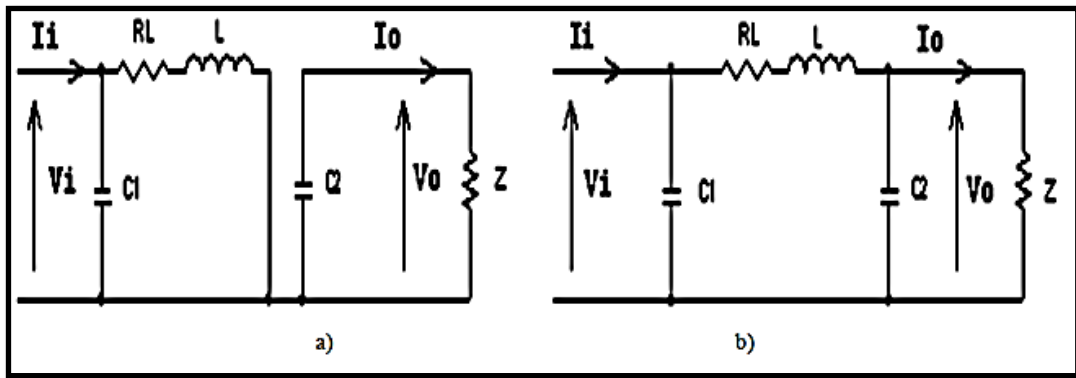


Figure III.3 Circuits équivalents du convertisseur Boost pour, (A) : S fermé, (B) : S ouvert

Durant la première période  $DT_s$  :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1} = C_1 \frac{dvi}{dt} = i_i - i_L \\ i_{c2} = C_2 \frac{dvo}{dt} = -i_o \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_i - R_L i_L \end{array} \right. \quad [III.1]$$

Durant la deuxième période  $(1-D) T_s$  :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1} = C_1 \frac{dvi}{dt} = i_i - i_L \\ i_{c2} = C_2 \frac{dvo}{dt} = i_L - i_o \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_i - v_o - R_L i_L \end{array} \right. \quad [III.2]$$

En arrangeant les termes des équations précédentes (pour qu'on puisse interconnecter le Boost avec les autres blocs de simulation), on obtient la modélisation dynamique du convertisseur Boost :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_L = i_i - C_1 \frac{dvi}{dt} \\ i_o = (1 - D)i_L - C_2 \frac{dvo}{dt} \\ v_i = (1 - D)v_o + R_L i_L + L \frac{di_L}{dt} \end{array} \right. \quad [\text{III.3}]$$

### III.4 Algorithmes MPPT

La puissance électrique produite par un générateur photovoltaïque dépend fortement de l'ensoleillement et de la température des cellules. Les panneaux photovoltaïques ne peuvent fournir une puissance maximale que pour une tension particulière et un courant bien déterminé. À cet effet, un dispositif de contrôle devra être intégré dans le circuit de commande de l'étage d'adaptation (convertisseur Boost). Ce dernier doit être capable de faire fonctionner le panneau PV à sa puissance maximale [23].

Pour obtenir la puissance maximale du GPV, la technique MPPT (Maximum Power Point Tracking) est utilisée pour contrôler les variations des caractéristiques courant-tension (I-V) des cellules solaires [24].

Le principe de la MPPT est d'ajuster la tension (ou le courant) réels de fonctionnement du GPV de façon à ce que la puissance réelle s'approche le plus possible, de la valeur optimale  $P_{\max}$  [21].

Le problème est l'obtention du PPM et l'adaptation de la tension du GPV à celle de la charge. La commande MPPT est donc utilisée pour des objectifs suivants :

- Forcer le système à fonctionner au voisinage du PPM malgré les changements de l'environnement.
- Fournir un bon rendement de conversion.
- Maintenir la poursuite dans une large gamme de variation des conditions de l'environnement.
- Fournir une interface en sortie compatible avec le besoin de changement de la charge.

En outre, le suivi du point PPM est essentiel pour la réussite de l'installation d'un système PV car il détermine la quantité maximale d'énergie qui peut être injectée dans le réseau ou bien utilisée directement dans les sites isolés.

Les algorithmes MPPT varient entre classique comme la technique perturbation et observation (P&O) jusqu'aux techniques intelligentes basées sur la logique floue et les réseaux neuronaux.

### III.4.1 Algorithme perturbation et observation (P&O)

C'est l'algorithme de poursuite du PPM le plus utilisé. Comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système à travers l'augmentation ou la diminution de  $V_{ref}$  ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis par l'observation des effets de ces perturbations sur la puissance de sortie du panneau. Si la valeur de la puissance actuelle  $P(k)$  du panneau est supérieure à la valeur précédente  $P(k-1)$  alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent. Avec cet algorithme la tension de fonctionnement  $V$  est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le PPM sera atteint,  $V$  oscillera autour de la tension idéale de fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple.

- Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues relativement aux conditions stables ou lentement changeantes.
- Si la largeur du pas est très petite les pertes dans les conditions de stabilité ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

La valeur pour la largeur idéale du pas  $\Delta D$  dépend du système, elle doit être déterminée expérimentalement.

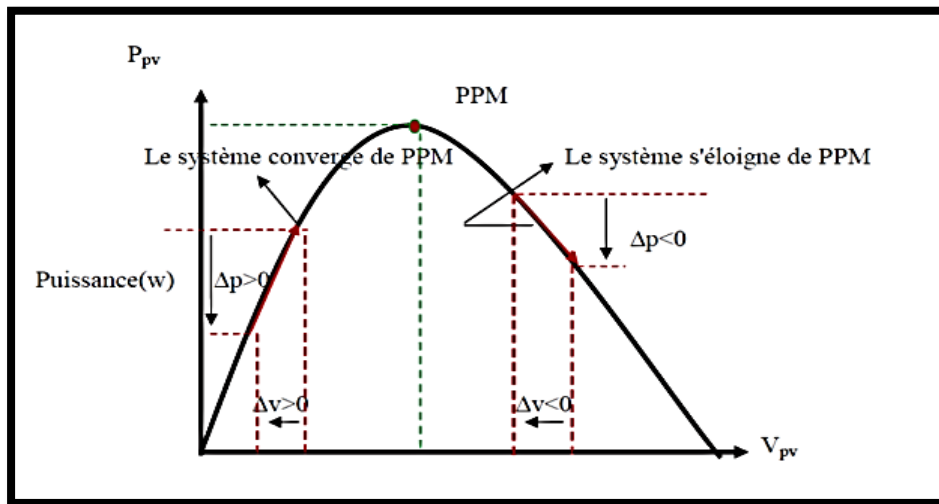


Figure III.4 Différentes zones de fonctionnement

Le diagramme de l'algorithme de cette méthode est représenté sur la figure III.5 [25] :

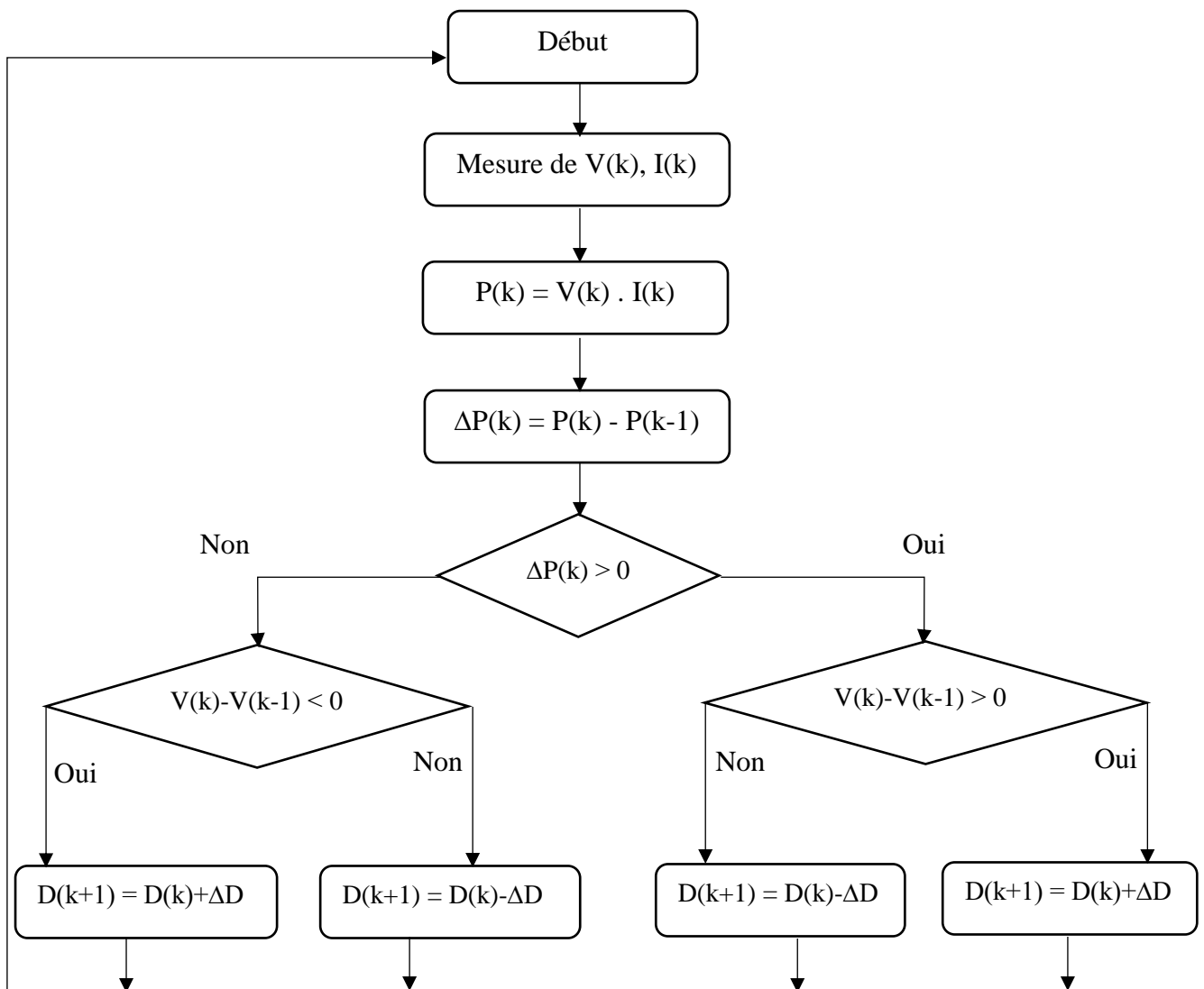


Figure III.5 Organigramme de la méthode P&O

On peut conclure, les cas possibles d'après l'organigramme comme suit :

- Si  $\Delta P = 0$ , la tension pour l'échantillon suivant  $V(k+1)$  ne sera pas modifiée puisque le système fonctionne au PPM;
- Si  $\Delta P > 0$  et  $\Delta V > 0$ ,  $V(k)$  est sur la gauche du PPM et le  $V(k+1)$  sera situé sur un point avec une valeur de tension plus élevée de façon à atteindre le PPM.
- Si  $\Delta P > 0$  et  $\Delta V < 0$ ,  $V(k)$  est sur la droite du PPM et le  $V(k+1)$  sera situé sur un point avec une valeur de tension inférieure de manière à atteindre le PPM.
- Si  $\Delta P < 0$  et  $\Delta V > 0$ ,  $V(k)$  est sur la droite du PPM et le  $V(k+1)$  sera situé sur un point avec une valeur de tension inférieure de manière à atteindre le PPM.
- Si  $\Delta P < 0$  et  $\Delta V < 0$ ,  $V(k)$  est sur la gauche du PPM et le  $V(k+1)$  sera situé sur un point avec une valeur de tension plus élevée de façon à atteindre le PPM.

L'algorithme "P&O" a des limitations qui réduisent son efficacité. Quand l'intensité de la lumière solaire diminue, il est difficile au MPPT de discerner l'emplacement du MPP. Un autre inconvénient de l'algorithme "P&O" quand il atteint le point MPP, le point de fonctionnement oscille autour de ce dernier. En outre, il a été montré que l'algorithme "P&O" peut avoir un comportement erratique sous un changement rapide du niveau de l'ensoleillement.

### III.4.2 Technique de l'incrémental de la conductance (InCond)

La méthode InCond, d'abord introduite par Hussein et al., a été mise en œuvre pour résoudre ces problèmes. Elle détermine le mode de recherche par comparaison de la conductance instantanée  $I/V$  avec la conductance incrémentale  $dI/dV$  du dispositif photovoltaïque.

La technique InCond[26] a un avantage lorsque la pente de la courbe puissance-tension ( $dI/dV$ ) est nulle au PPM, comme représenté en figure III.5 par l'équation III.4. La pente est positive à gauche du PPM et négative à droite de la PPM comme indiqué par l'équation III.5.

$$\frac{d(P)}{dv} = \frac{d(vi)}{di} = v \frac{di}{dv} + i = 0 \quad \text{[III.4]}$$

$$\frac{di}{dv} = -\frac{i}{v} \approx -\frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad \text{[III.5]}$$

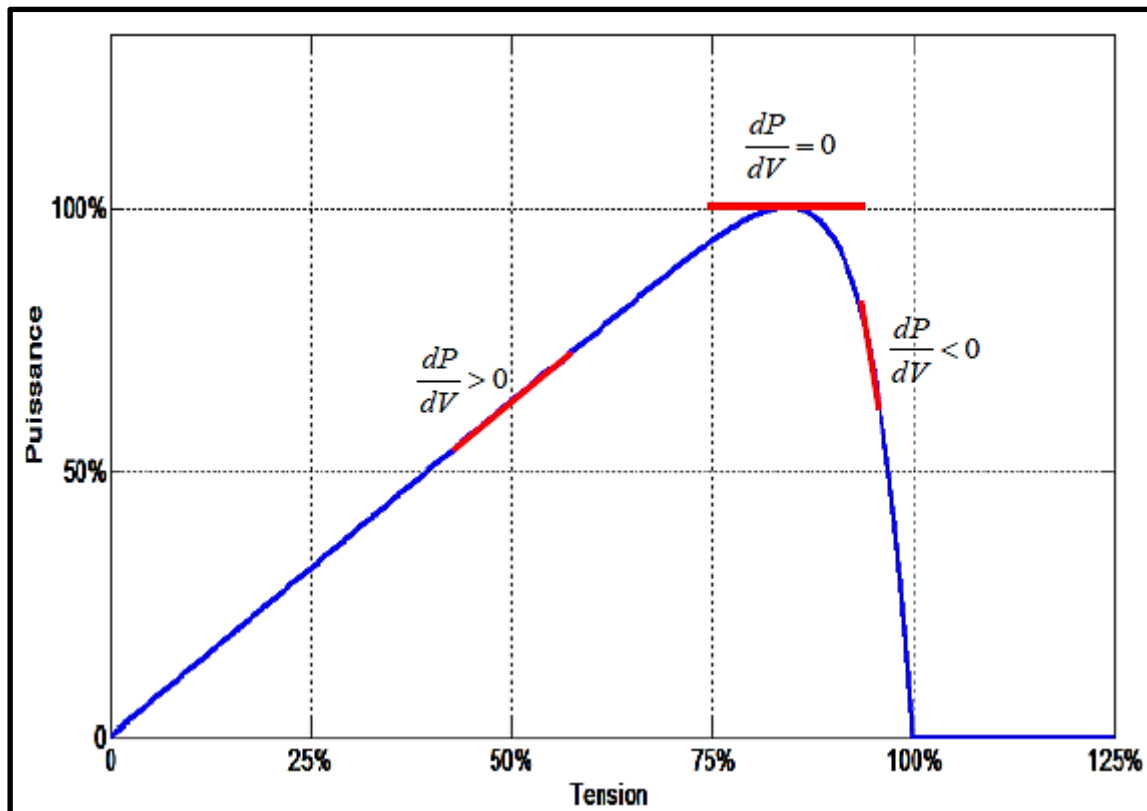


Figure III.6 Différentes zones de fonctionnement

Le diagramme de l'algorithme InCond est représenté sur la figure III.7. Le PPM est déterminée en comparant la conductance instantanée ( $I / V$ ) à la conductance incrément ( $\Delta I / \Delta V$ ). Une fois le PPM déterminé, le système maintiendra ce point de fonctionnement sans aucune fluctuation jusqu'à ce que le changement de  $\Delta I / \Delta V$  se produise et le système commence à chercher un nouveau PPM. Par conséquent, la technique InCond résout le problème de la technique P&O par l'obtention du PPM avec de faibles oscillations à l'état d'équilibre tout en étant capable de résister à des changements rapides d'irradiation. Toutefois cette technique est plus compliquée à mettre en œuvre que la technique de P&O [25].

Bien que la méthode InCond prenne en compte les facteurs de l'environnement, la plupart des inconvénients liés, comme l'oscillation et d'invalidité des conditions d'ombrage partiel, limitent son application [27].

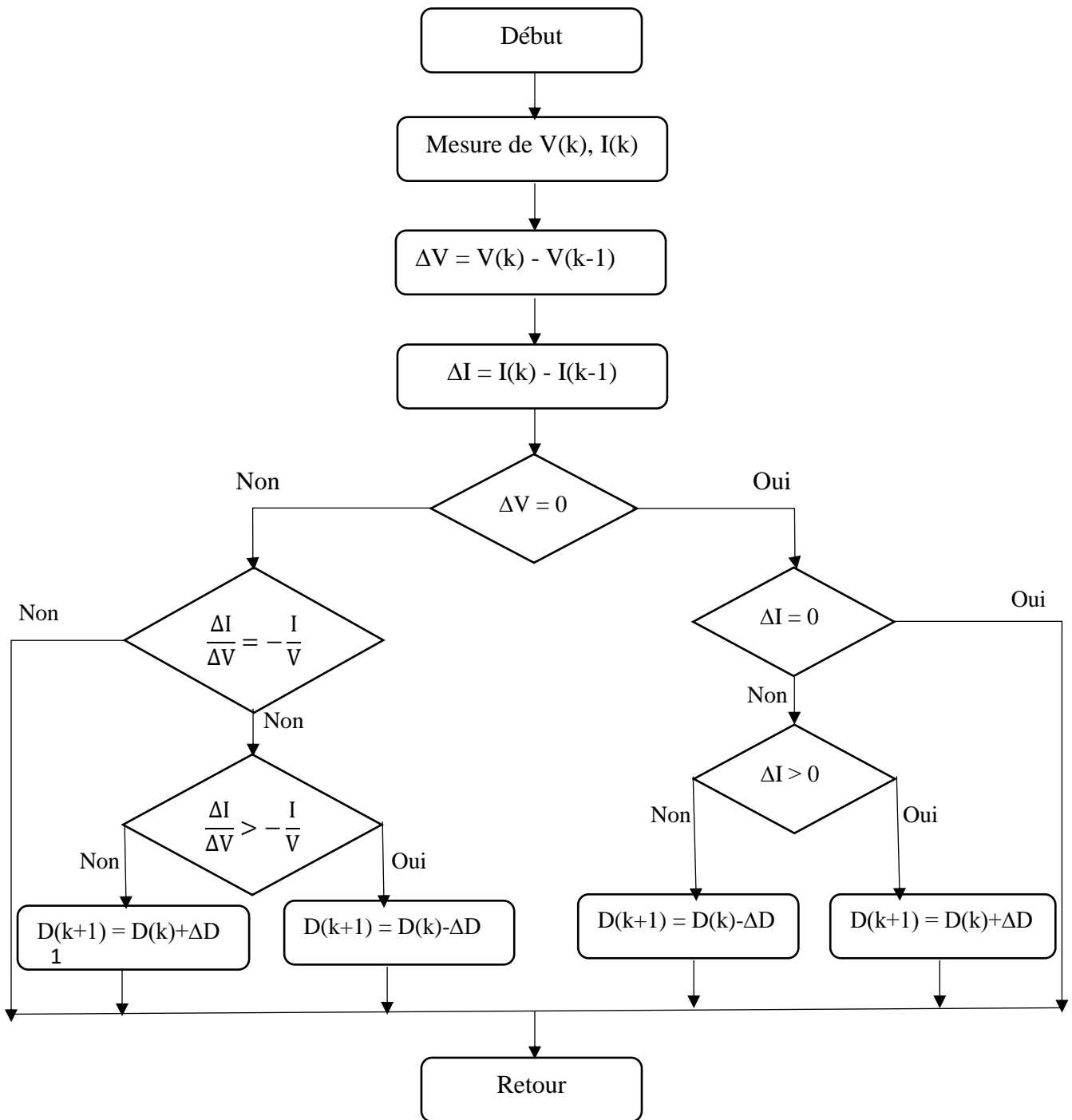


Figure III.7 Organigramme de l'algorithme l'incrémentation de la conductibilité

### III.5 Résultats de simulation

#### III.5.1 Modèle de simulation pour la commande MPPT P&O

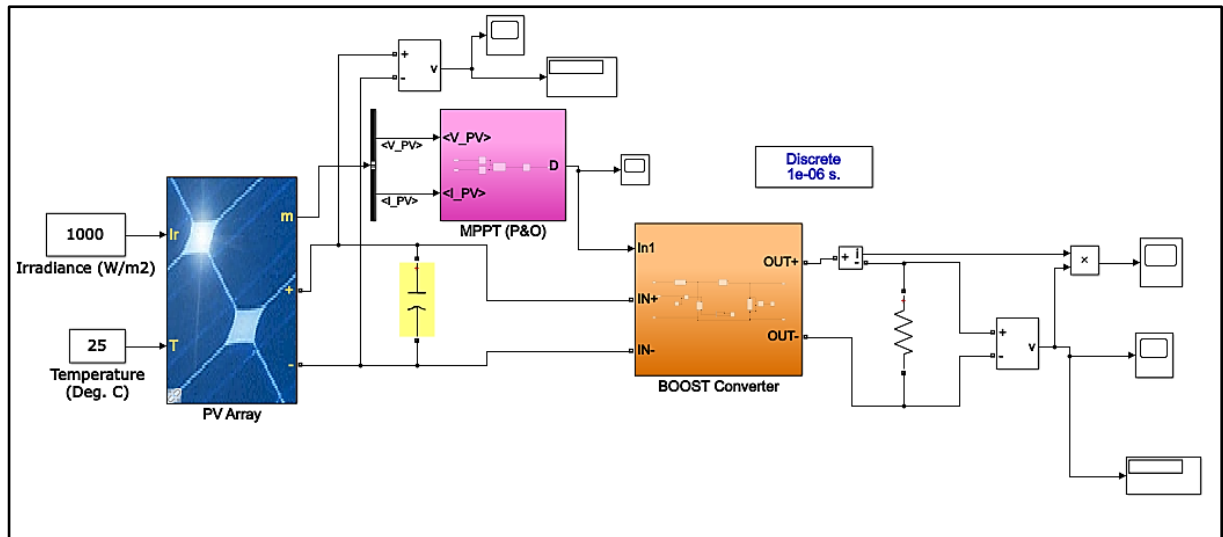


Figure III.8 Schéma bloc de la commande MPPT (P&O)

Pour les conditions standards d'une température  $T=25^{\circ}\text{C}$  et d'un éclairement  $G=1000\text{ W/m}^2$ , la figure III.8 représente la puissance à la sortie du convertisseur Boost.

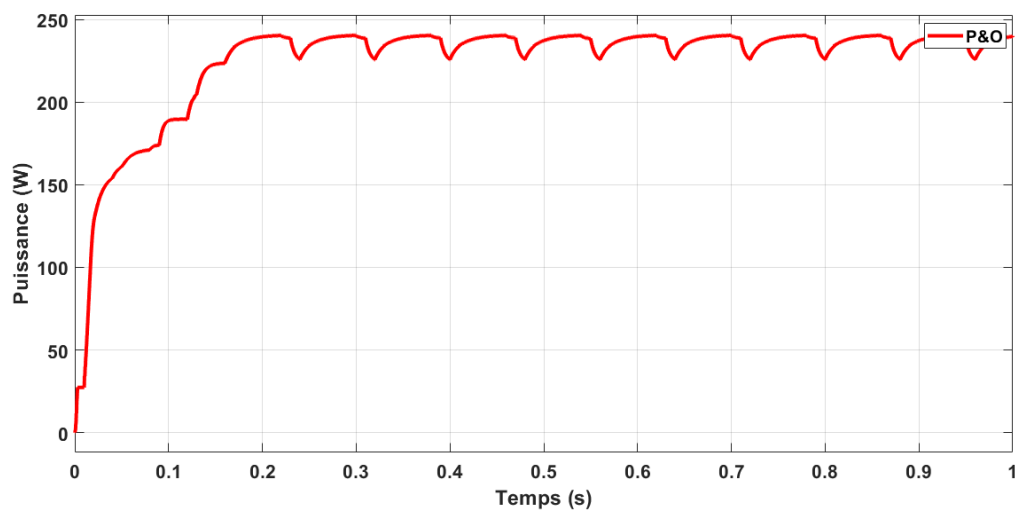
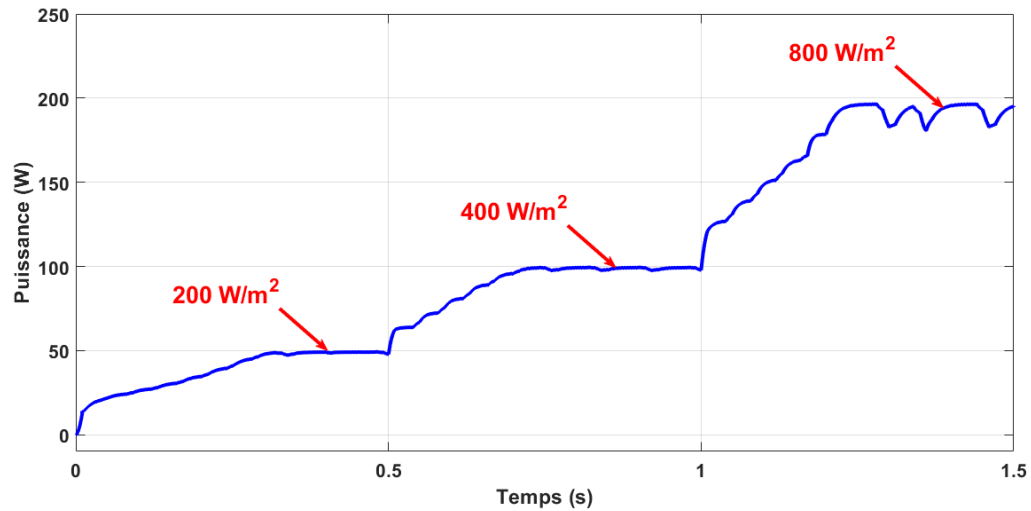


Figure III.9 Poursuite de la puissance avec la technique P&O

Cette puissance croit jusqu'à un niveau où elle se stabilise après quelque oscillation avec une rapidité légère.

- **Variation de l'irradiation**

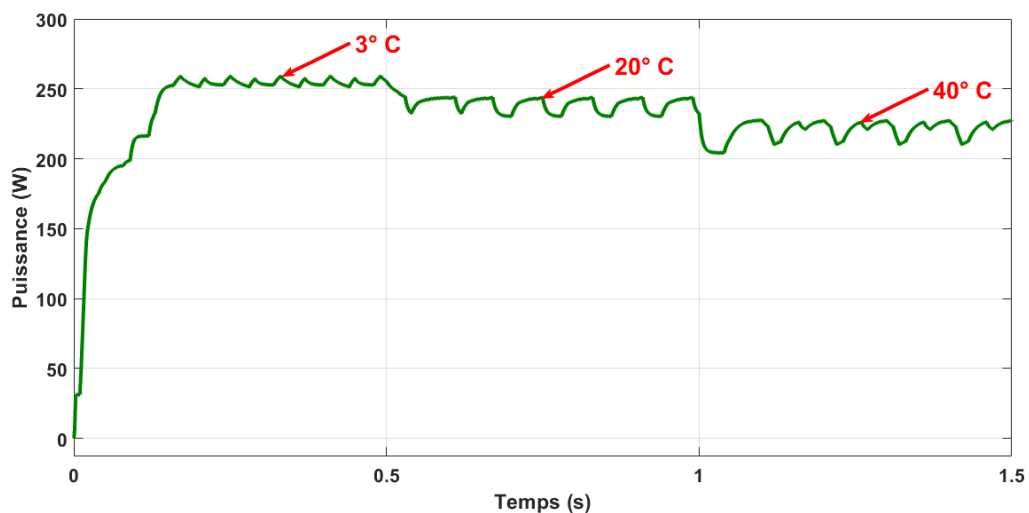
La Figure III.10 représente la poursuite de la puissance avec un profil variable d'irradiation (P&O)



**Figure III.10** Variation de la puissance avec variation de l'irradiation (P&O)

- **Variation de la température**

La Figure III.11 représente la poursuite de la puissance avec un profil variable de température (P&O).



**Figure III.11** Variation de la puissance avec variation de la température (P&O)

### III.5.2 Modèle de simulation pour la commande MPPT InCond

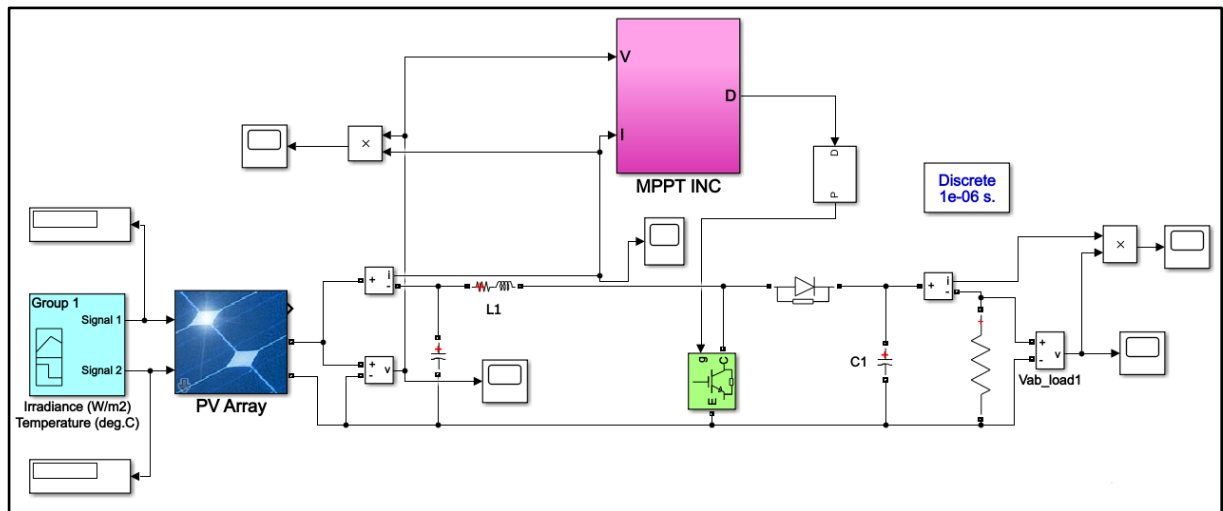


Figure III.12 Schéma bloc de la commande MPPT (InCond)

Pour les conditions standards d'une température  $T=25^{\circ}\text{C}$  et d'un éclairement  $G= 1000 \text{ W/m}^2$ , la figure III.13 représente la puissance à la sortie du convertisseur Boost.

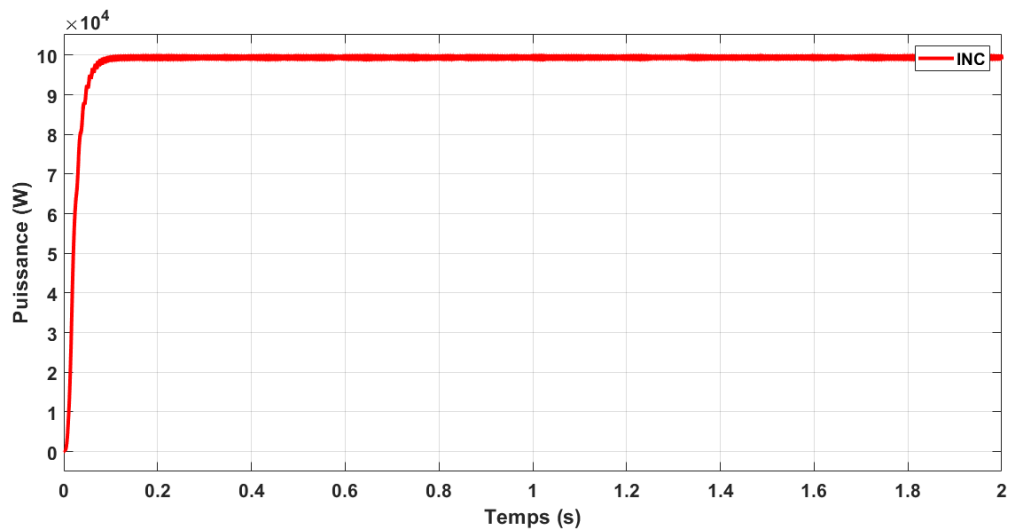
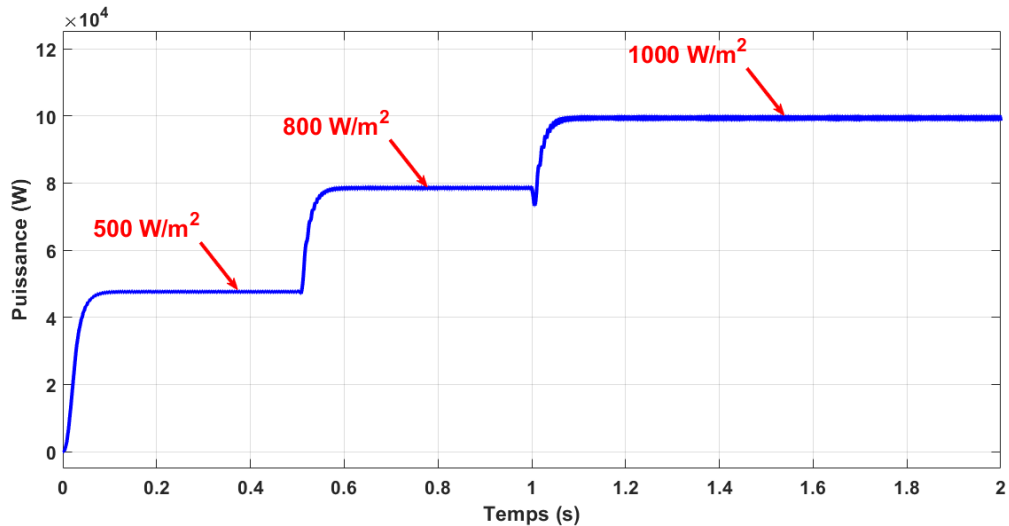


Figure III.13 Poursuite de la puissance avec la technique InCond

Cette puissance croit jusqu'à un niveau où elle se stabilise avec une rapidité très importante.

- **Variation de l'irradiation**

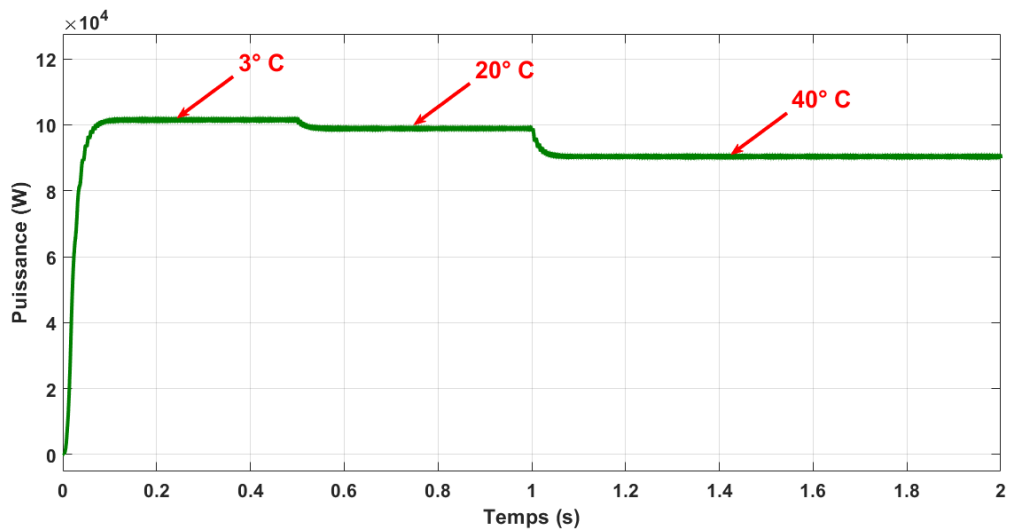
La Figure III.14 représente la poursuite de la puissance avec un profil variable d'irradiation (InCond).



**Figure III.14** Variation de la puissance avec variation de l'irradiation (InCond)

- **Variation de la température**

La Figure III.15 représente la poursuite de la puissance avec un profil variable de température (InCond).



**Figure III.15** Variation de la puissance avec variation de la température (InCond)

D'après les résultats obtenus, on remarque que la puissance est proportionnelle à l'irradiation ce qui confirme ce qu'on a vu avant. Des oscillations importantes autour de la puissance maximale lorsqu'on utilise le contrôleur P&O contrairement au contrôleur InCond qui présente moins d'oscillations.

On observe aussi que la puissance est inversement proportionnelle à la température ce qui confirme ce qu'on a vu avant. On conclut que l'InCond est plus rapide que la technique P&O pour d'atteindre le PPM.

### **III.6 Conclusion**

Ce chapitre est destiné à l'adaptation et la commande du convertisseur Boost pour la poursuite du point maximum de puissance PPM, nous avons constatés dans cette partie que la technique de l'incrémentation de la conductance (InCond) à des meilleures performances que celle de la perturbation et observation (P&O) et cela a été confirmé par la simulation sur le logiciel MATLAB/*Simulink*. Néanmoins, ces deux méthodes restent classiques et le travail sur les techniques avancées comme la logique floue et le mode glissant peut donner des résultats encore meilleurs.

Dans le prochain chapitre, l'étude sera basée sur la connexion du GPV au réseau (Micro-grid).

---

**Chapitre IV :**  
**Connexion Du**  
**Systeme GPV**  
**Au Réseau**  
**« Micro-Grid »**

---

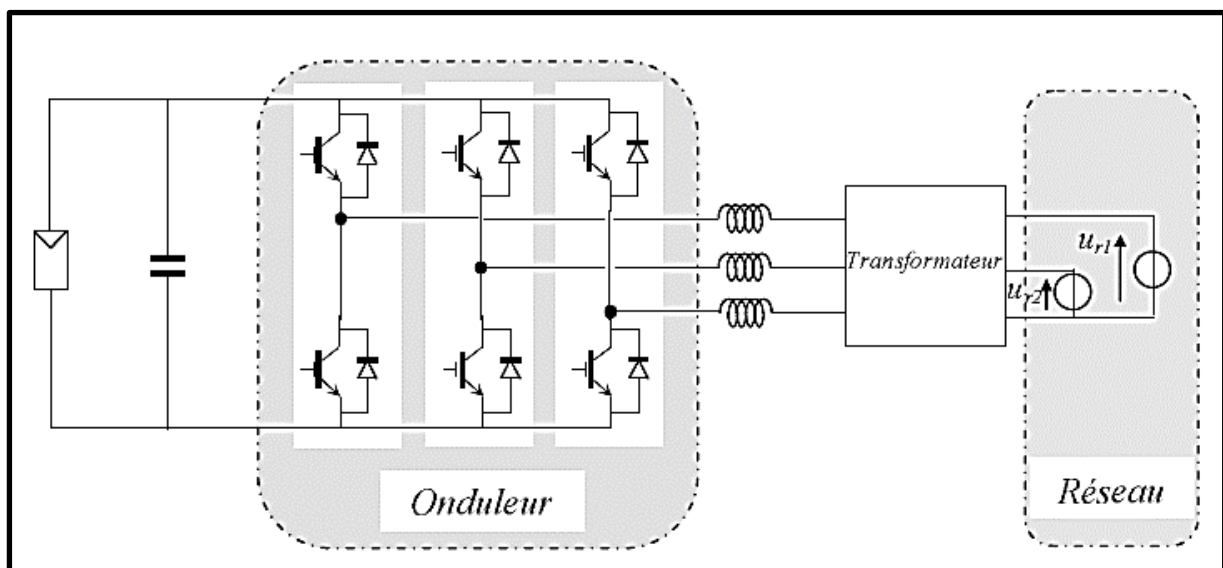
## IV.1 Introduction

Les onduleurs de tension peuvent être pilotés suivant plusieurs stratégies. A fréquence élevée, ils sont pilotés en modulation de largeur d'impulsion. Cette stratégie permet de régler à la fois l'amplitude et la fréquence en gardant la source continue constante. Afin de produire une tension de sortie proche de la sinusoïde, différentes stratégies de commande ont été proposées par différents auteurs [35]. Nous étudierons dans ce chapitre deux stratégies de commandes : la MLI sinus-triangle qui basé sur la bande de réglage et le taux d'harmonique des tensions de sorties et la MLI vectorielle (SVM).

Le principe de la commande MLI SVM est la détermination des portions de temps (durée de modulation) qui doivent être allouées à chaque vecteur de tension durant la période d'échantillonnage [34]. Cette commande rapprochée (SVM) permet de déterminer les séquences des allumages et des extinctions des composants du convertisseur et de minimiser les harmoniques [36].

## IV.2 Structure de connexion avec un Onduleur triphasé unique

Le dispositif présenté dans la figure (IV.1) est le plus simple, car il comporte le moins de composants possibles. L'association de plusieurs modules photovoltaïques en série a pour but de l'obtention d'une tension continue suffisamment grande. Cette solution est une alternative à un hacheur élévateur de tension.



**Figure IV.1** Mise en série de plusieurs modules PV à un seul onduleur

La tension continue obtenue alimente directement un onduleur, qui fournit la tension sinusoïdale désirée. On pourra aussi insérer un transformateur pour isoler le système photovoltaïque du réseau.

### IV.3 Connexion de générateur PV avec le réseau

Dans une installation raccordée au réseau, l'appareil de conditionnement de la puissance est un onduleur qui représente l'élément clé le plus délicat de l'installation. Situé à l'interface entre le champ PV et le réseau, il doit être adapté aux impératifs techniques et doit assurer la sécurité de deux sous-systèmes électriques très différents. Notre travail présentera la modélisation et la commande de ce convertisseur. Notons que la simulation s'effectuera sous l'environnement MATLAB/Simulink.

#### IV.3.1 Modélisation de l'onduleur triphasé

C'est un dispositif destiné à convertir le courant continu généré par le générateur PV en courant alternatif. Utilise des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortie présente, dans le plus simple des cas, une forme carrée qui peut s'adapter à quelques types de charges (Figure IV.2).

Les onduleurs sont utilisés en électrotechnique pour :

- Soit fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables ;
- Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes.

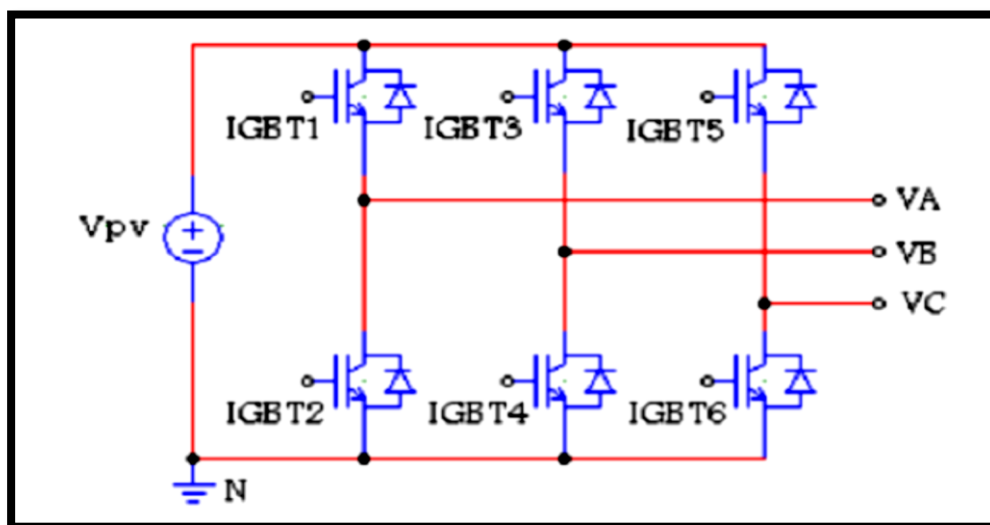


Figure IV.2 Circuit équivalent d'un onduleur triphasé.

### IV.3.2 Qualité du signal de sortie et paramètres de performances de l'onduleur

Le spectre d'un signal rectangulaire inclut une onde fondamentale et des ondes harmoniques d'amplitudes plus au moins importantes. Dans ce qui suit, on comparera les performances de l'onduleur au cas idéal (onde de tension de sortie sinusoïdale pure) pour chaque type de commande, en calculant le spectre généré. On cherchera à diminuer, le plus possible, l'amplitude des harmoniques de rangs faibles car [28] :

- Les harmoniques de rangs élevés sont faciles à filtrer ou atténués par l'effet de présence d'inductances dans le circuit. Un onduleur est toujours suivi d'un filtre passe bas LC. Le rôle du condensateur est de supprimer les variations brusques de la tension d'alimentation durant les commutations ainsi que la restitution de l'énergie électrique des diodes de récupération. D'un autre côté, la self a pour fonction de lisser le courant.
- Sur une charge inductive, ce sont les harmoniques de rangs faibles qui génèrent les courants les plus importants.
- Pour la détermination des performances de l'onduleur et de la qualité du signal de sortie, il est nécessaire de citer quelques paramètres. Parmi ceux-là, le facteur de distorsion harmonique totale THD.

Ce facteur, ou bien ce taux, de distorsion harmonique totale THD est une mesure de similitude de forme c'est-à-dire de proximité et de ressemblance de la forme d'onde avec sa composante fondamentale. Ce paramètre, qui définit globalement la déformation de la grandeur alternative, représente le rapport de la valeur efficace des harmoniques à la valeur efficace de fondamental.

La qualité de l'onde de la tension sera évaluée par le THD ou taux d'harmonique ramené au fondamental. On pourrait aussi calculer le THD de courant, mais celui-ci dépend également de la charge.

$$THD = \frac{1}{U'} \left( \sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} U_n'^2 \right)^{1/2}$$

$$THD = \sqrt{\frac{U_{eff}^2 - U_1'^2}{U_1'^2}}$$

Avec

$U_1'$  : Valeur efficace du fondamental de la tension.

$U_n'$  : Valeur efficace de la tension harmonique de rang  $n$  ( $n^{\text{ième}}$  tension harmonique)

$U_{\text{eff}}$  : Valeur efficace de la tension de sortie.

## IV.4 Stratégies de commande

Les onduleurs de tension peuvent être pilotés suivant plusieurs stratégies. A fréquence élevée, ils sont pilotés en modulation de largeur d'impulsion. Cette stratégie permet de régler à la fois l'amplitude et la fréquence en gardant la source continue constante. Afin de produire une tension de sortie proche de la sinusoïde, différentes stratégies de commande ont été proposées par différents auteurs. Nous étudierons dans ce chapitre deux stratégies de commandes [29,30] :

- MLI sinus-triangle.
- MLI vectorielle (SVM).

### IV.4.1 Commande MLI sinus-triangle

La modulation de largeur d'impulsion sinus triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante, la fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. En triphasé, trois références sinusoïdale déphasées de  $2\pi/3$  à la même fréquence  $f_s$ . Comme la sortie de l'onduleur de tension n'est pas purement sinusoïdale, l'intensité de courant ne l'est pas aussi, donc elle comporte des harmoniques [29,30].

Cette MLI sert à remédier ces problèmes précédents et elle a comme avantages :

- Variation de la fréquence de la tension de sortie,
- Elle repousse les harmoniques vers des fréquences plus élevées.

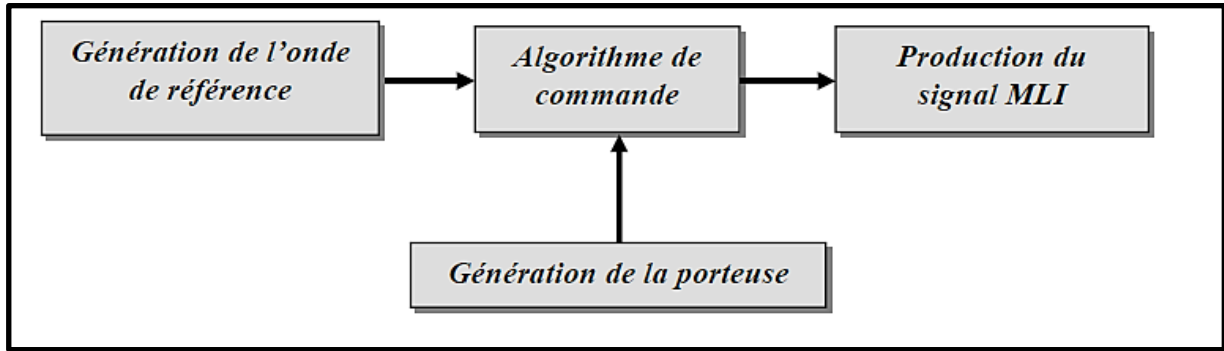


Figure IV.3 Principe de la commande sinusoïdale

Le principe de cette stratégie peut être résumé par l’algorithme suivant :

$$\begin{cases} U_r \geq U_p \Rightarrow S(t) \\ \text{Si non } S(t) = 0 \end{cases}$$

$U_r$  : tension référence,  $U_p$  : tension porteuse et  $S(t)$  : le signal MLI résultant.

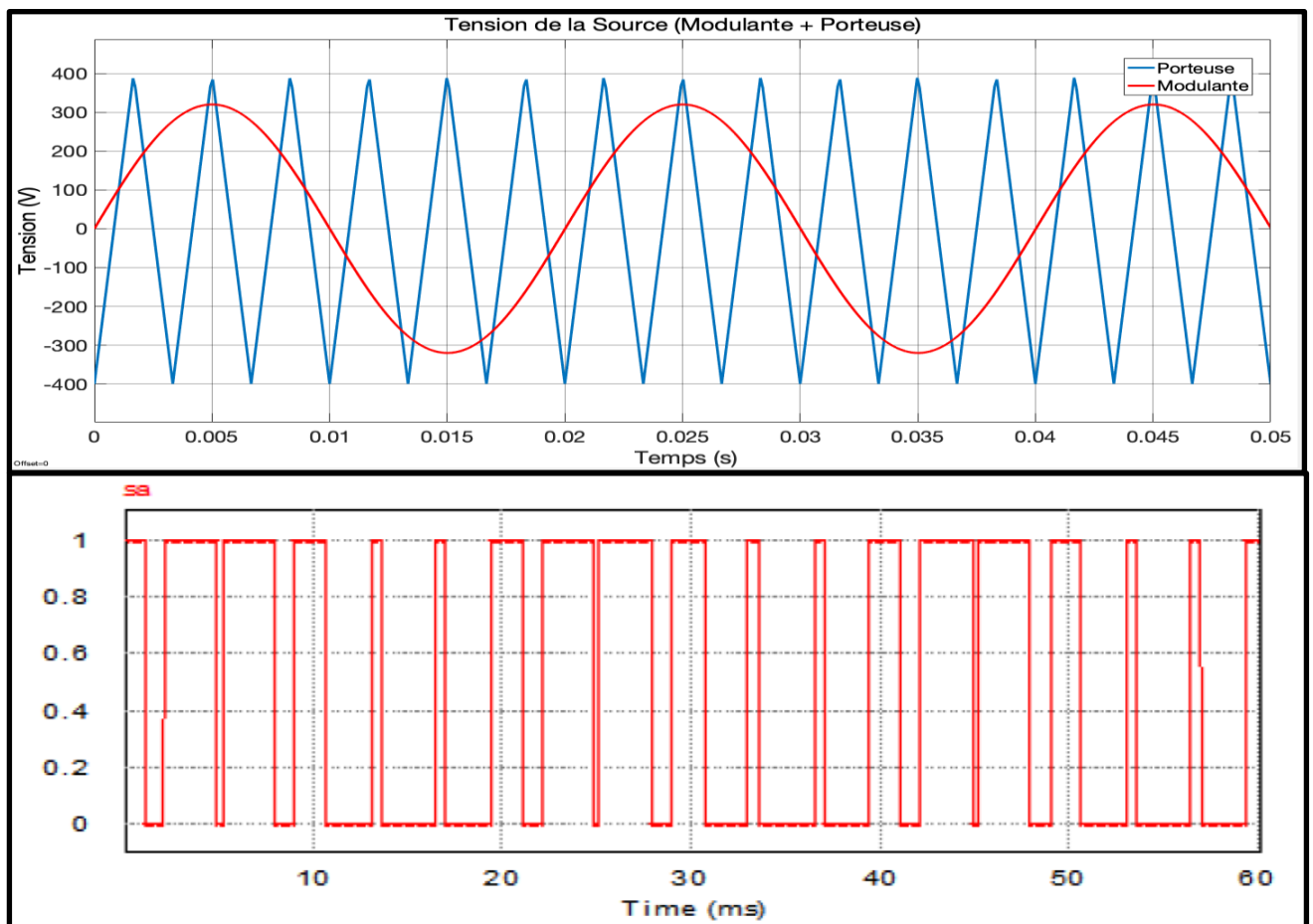


Figure IV.4 Modulation de largeur d’impulsion MLI (onduleur monophasée)

La technique MLI est caractérisée par :

- Le rapport de modulation  $m$  qui représente le rapport entre la fréquence de la porteuse et celle de la référence (modulante)  $m = \frac{f_p}{f_r}$  ;
- Le taux de modulation  $r$  qui représente le rapport entre l'amplitude de la référence et celle de la porteuse  $r = \frac{V_p}{V_r}$ .

Les tensions de référence de l'onduleur triphasé permettent de générer un système de tension triphasé équilibré directe sont :

$$\begin{cases} V_{ref1} = \frac{E}{2} \sin(\omega t) \\ V_{ref2} = \frac{E}{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{ref3} = \frac{E}{2} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases}$$

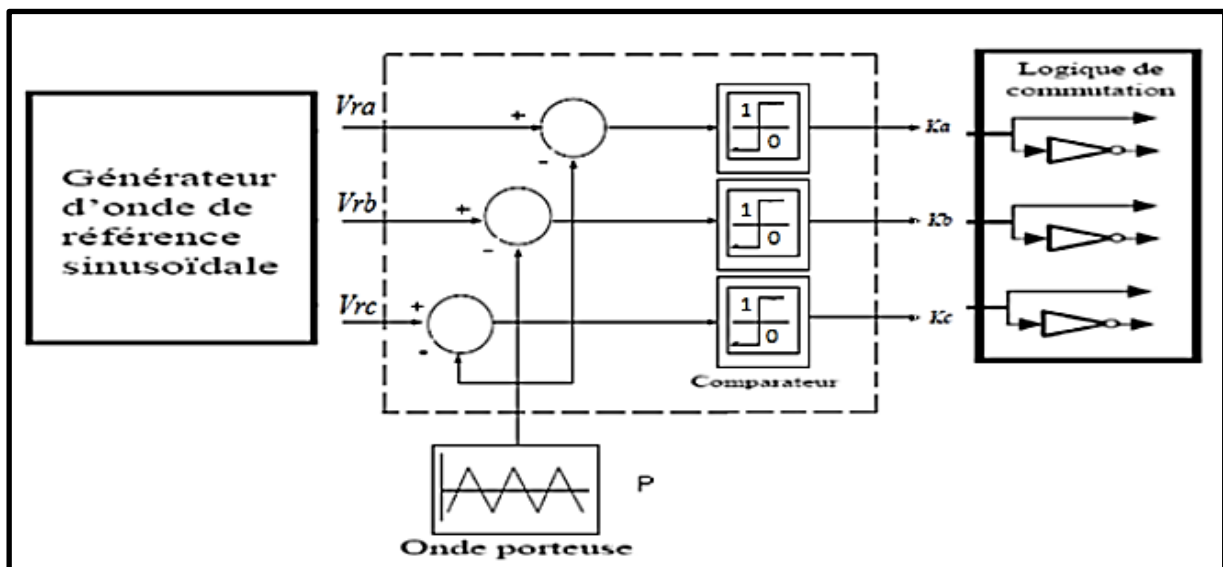


Figure IV.5 Principe de la technique MLI sinusoïdal (sinus-triangle).

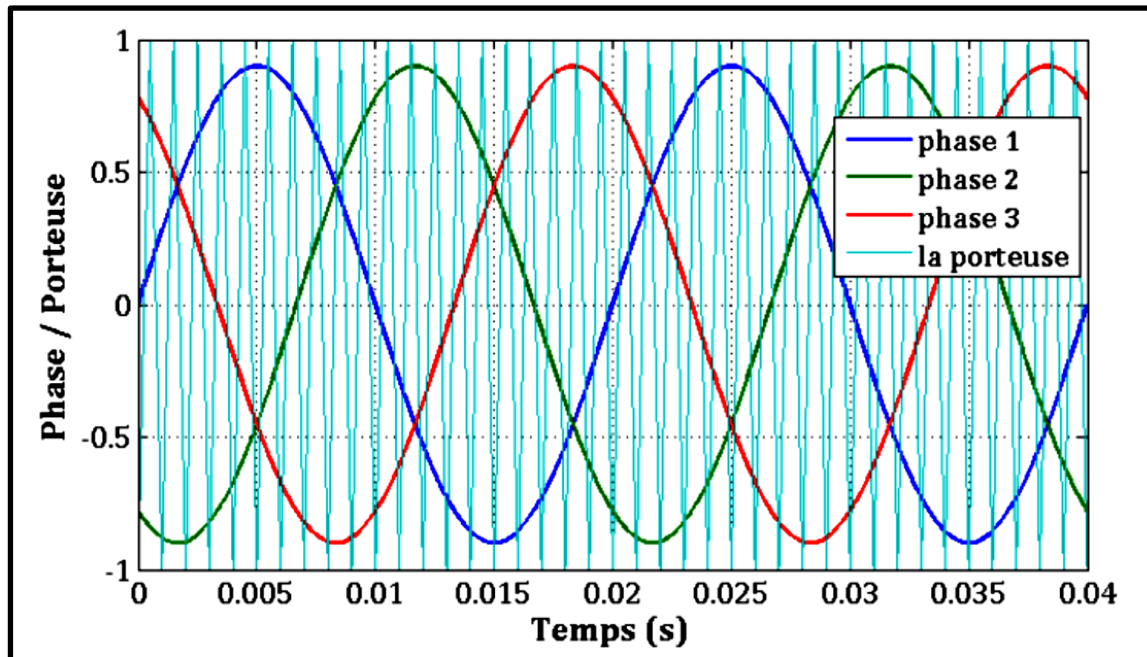


Figure IV.6 Modulation de largeur d'impulsion MLI pour l'onduleur triphasé.

#### IV.4.2 Commande MLI vectorielle (SVM)

Pour MLI vectorielle (SVM Space Vector Modulation en anglais), on représente par seul vecteur les trois tensions sinusoïdales de sortie que l'on désire. On approxime au mieux ce vecteur pendant chaque intervalle de modulation en agissant sur la commande des trois jeux d'interrupteur complémentaires [31].

La MLI vectorielle est la méthode de modulation la plus récente, elle génère les signaux de commutation de chaque interrupteur de l'onduleur automatiquement avec la rotation du vecteur de référence pendant une période similaire à celle du fondamentale. Suivant l'arrangement des temps de commutation (rapports cycliques) générés, on classe la MLI vectorielle en plusieurs algorithmes.

##### IV.4.2.1 Modulation par MLI Vectorielle

Dans ce qui suit, on a le schéma représentatif de la topologie d'un onduleur triphasé de tension donnée par la figure (IV.7). On considère que les interrupteurs sont idéaux et présentent deux états possibles : fermé (**off**) ou ouvert (**on**) [32].

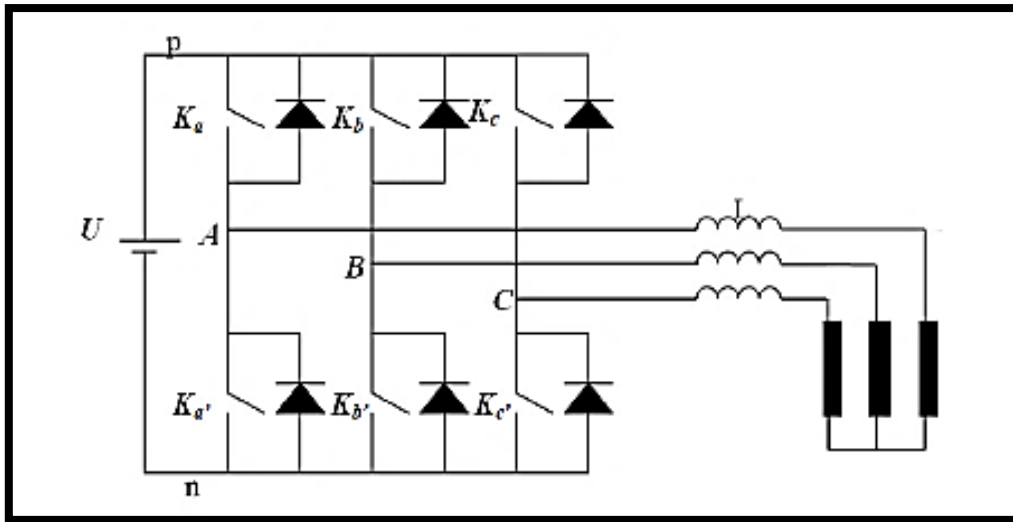


Figure IV.7 Topologie d'un onduleur triphasé de tension

On considère que les interrupteurs de chaque bras sont commandés par deux signaux complémentaires. Ainsi, on a besoin de trois signaux logiques ( $K_a$ ,  $K_b$  et  $K_c$ ) pour commander les six interrupteurs formant l'onduleur. Toutefois, dans la pratique il faut prévoir un délai entre les deux signaux pour ne pas court-circuiter la source  $U$  [33].

La figure (IV.8) fait le lien entre les différentes séquences, les vecteurs de tensions et l'état des interrupteurs formant l'onduleur :

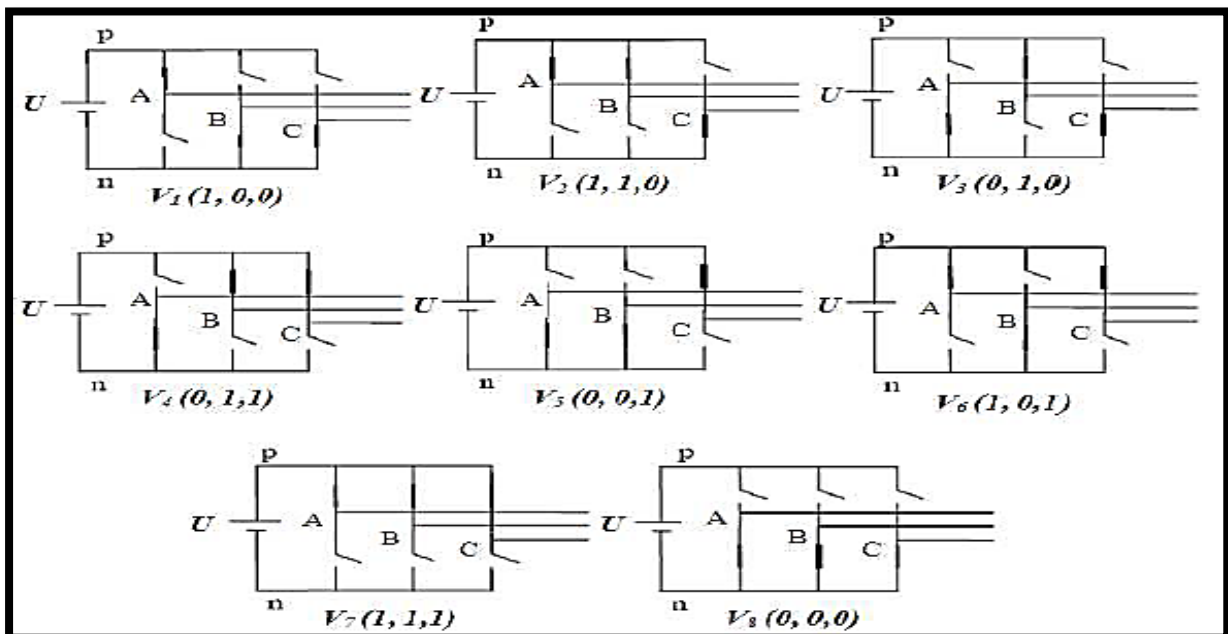
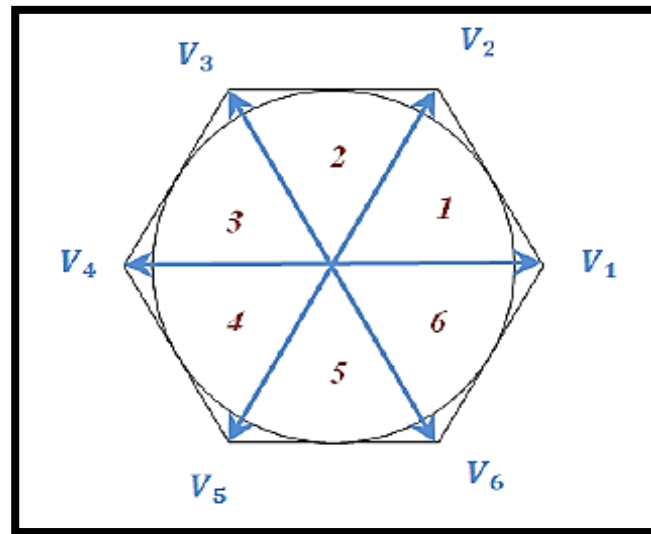


Figure IV.8 Huit états topologies de l'onduleur triphasé

Pour expliquer le principe de la modulation par la méthode vectorielle, on fait appel au schéma suivant figure (IV.9) :



**Figure IV.9** Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur

Puisque chaque interrupteur a deux états (ouvert ou fermé), ce qui donne donc  $2^3 = 8$  combinaisons possibles représentées par huit vecteurs :

- Six vecteurs principaux (1 à 6) actif, la tension est appliquée aux bornes de la charge.
- Deux vecteurs de roues libres (8 et 7) inactif, pas de tension aux bornes de la charge.

Les six vecteurs principaux sont déphasés, l'un par rapport à l'autre, de  $\left(\frac{\pi}{3}\right)$  formant ainsi six sections (triangles). Chaque vecteur correspond à une séquence bien définie composée de trois variables logiques qui pilotent instantanément les trois bras de l'onduleur [32].

#### IV.4.2.1.1 Vecteurs spatiaux de tension

La modulation des vecteurs spatiaux SVM pour un onduleur de tension est basée sur la représentation vectorielle des tensions triphasées dans un plan bidimensionnelle  $(\alpha, \beta)$ .

Considérant la topologie 1 de la figure (IV.10), qui est répétés dans la figure (IV.8) :

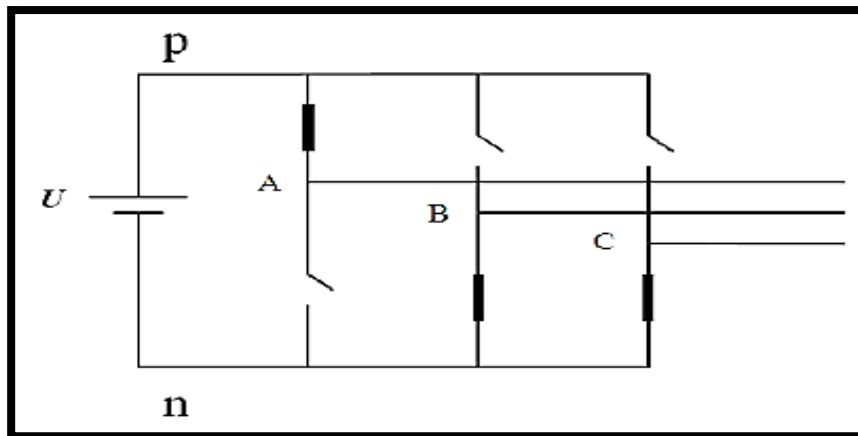


Figure IV.10 Topologie 1 –  $V_1(1,0,0)$  de l'onduleur triphasé

Les tensions composées ( $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ ) sont données par :

$$\begin{cases} U_{AB} = U \\ U_{BC} = 0 \\ U_{CA} = -U \end{cases} \quad \text{[IV.1]}$$

Ces valeurs peuvent être représentées dans le plan ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) comme elles sont montrées dans la figure (IV.11), où les tensions ( $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ ) sont les vecteurs des tensions composées décalées entre eux de  $120^\circ$  dans l'espace.

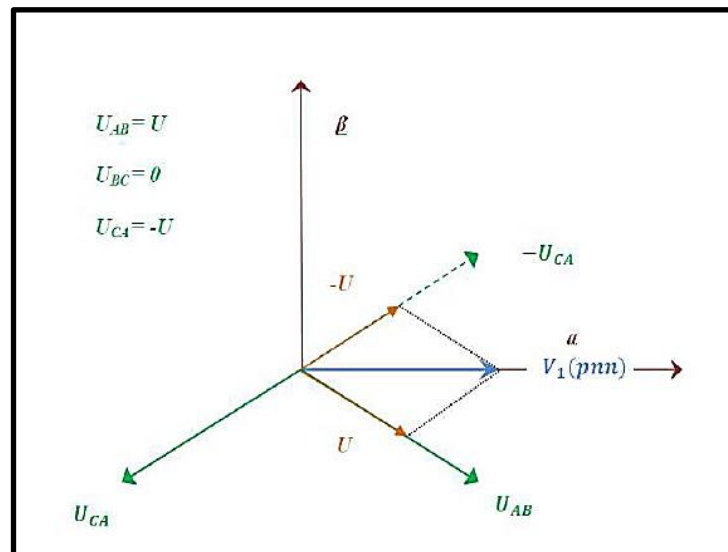


Figure IV.11 Représentation de la topologie 1 dans le plan ( $\alpha$ ,  $\beta$ )

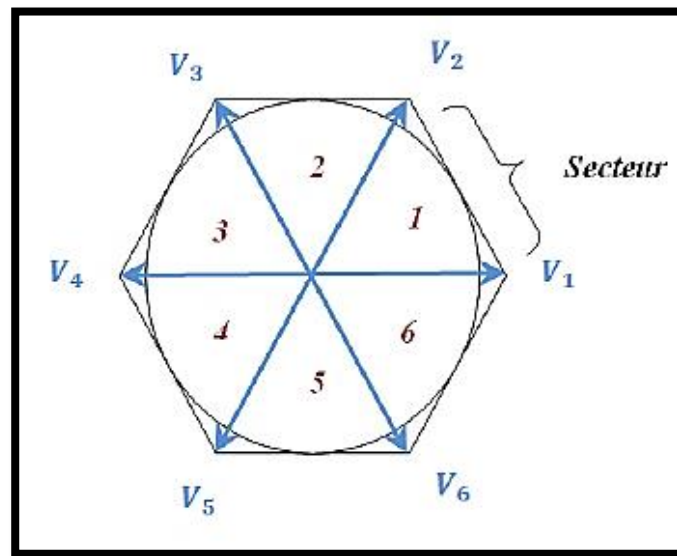
Le vecteur efficace de tension produit par cette topologie est représenté comme  $V_1(\mathbf{pnn})$  dans la figure (IV.11). Ici le  $\mathbf{pnn}$  de « notation » se rapporte aux trois bras des phases (a, b, c) étant relié à la borne positive de la source de tension continue (p) ou à la borne négative de la source de tension continue (n).

Ainsi le **pnn** indique que la phase (a) étant relié à la borne positive (p) et les phases (b et c) étant reliés à la borne négative (n).

La même méthode à suivre pour les autres topologies, les six vecteurs différents de zéro ( $V_1$  à  $V_6$ ) sont représentés sur les positions montrées dans la figure (IV.12).

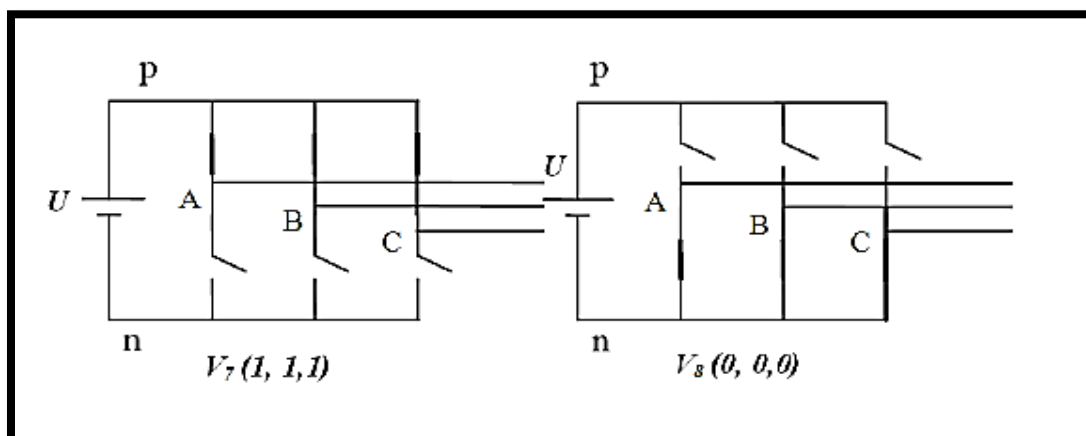
Les têtes de ces vecteurs forment un hexagone régulier (ligne pointillée dans la figure (IV.12)).

Nous définissons le secteur limité par deux vecteurs adjacents dans l'hexagone, comme secteur. Ainsi, il y a six secteurs numérotés de (1 à 6).



**Figure IV.12** Représentation des vecteurs de tension différents de zéro dans le plan ( $\alpha, \beta$ )

Considérant les deux dernières topologies de la figure (IV.8) qui sont répétées dans la figure (IV.13).



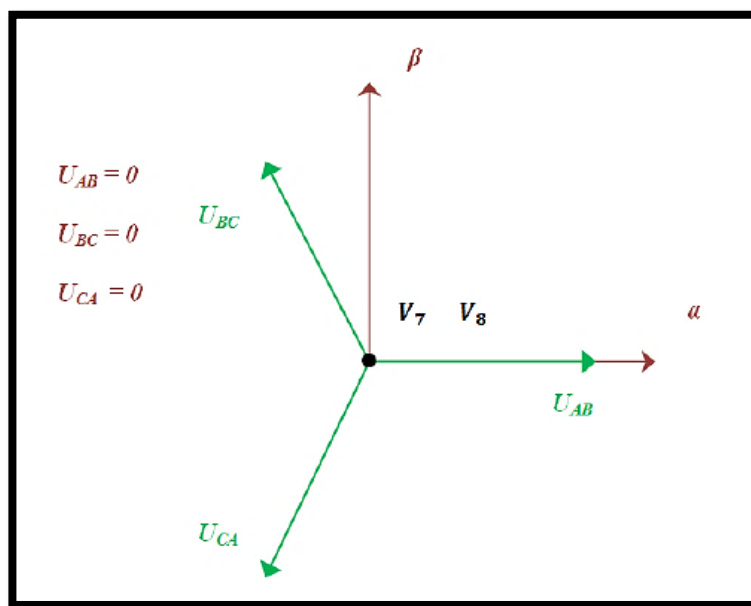
**Figure IV.13** Les deux topologies de l'onduleur  $V_7$  et  $V_8$

Les vecteurs des tensions de sortie produit par ces topologies sont donnés par :

$$\begin{cases} U_{AB} = 0 \\ U_{BC} = 0 \\ U_{CA} = 0 \end{cases} \quad \text{[IV.2]}$$

Ces vecteurs de tension sont représentés par des vecteur ayant des amplitudes nulles et par conséquents, ils sont désignés sous le nom des vecteurs de tension nulle ou des vecteurs à roues libres. Ils sont positionnés à l'origine du plan  $(\alpha, \beta)$  comme montré sur la figure (IV.14).

Les vecteurs  $(V_1 \text{ à } V_8)$  sont appelés les vecteurs d'état de commutation.



**Figure IV.14** Représentation des vecteurs de tension nulle dans le plan  $(\alpha, \beta)$ .

#### IV.4.2.1.2 Modulation du vecteur spatial

Les trois tensions désirées à la sortie de l'onduleur sont représentées par un vecteur équivalent  $V_{réf}$  tournant dans la direction antihoraire comme montré dans la figure (IV.15).

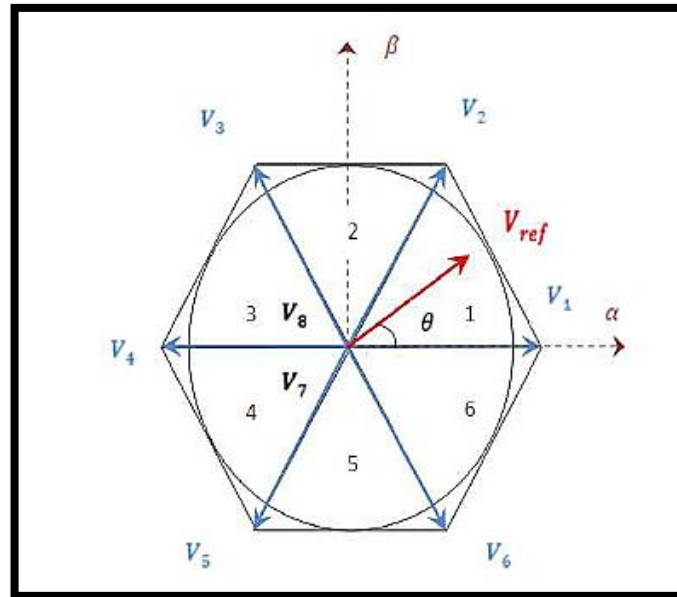


Figure IV.15 Vecteur de tension de sortie dans le plan ( $\alpha, \beta$ )

L'amplitude de ce vecteur est liée à l'amplitude de la tension de sortie figure (IV.16) et le temps que ce vecteur prend pour accomplir une rotation complète est identique au temps de la période de la tension fondamentale de sortie.

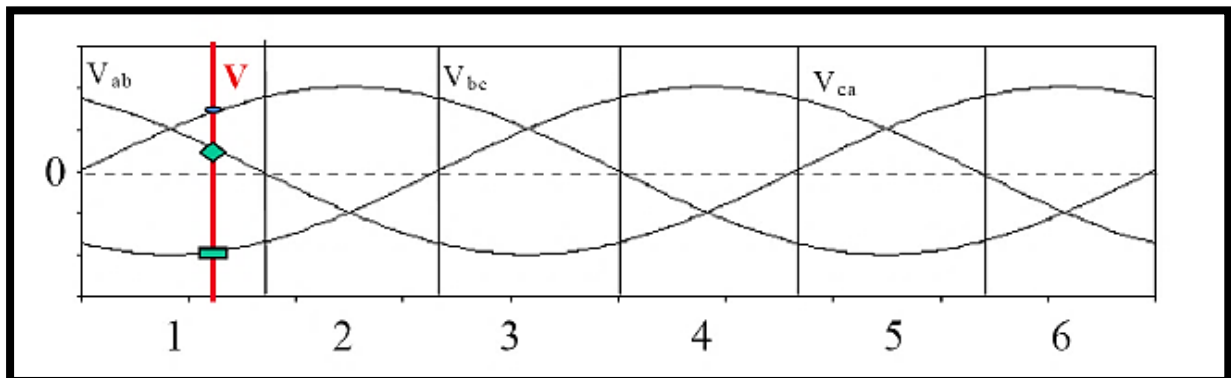


Figure IV.16 L'amplitude de la tension de sortie

Considérons la situation quand le vecteur de tension composé (tension entre phases)  $V_{réf}$  désiré à la sortie de l'onduleur est dans le secteur 1 comme illustré dans la figure (IV.17).

Les coefficients d'utilisation  $\frac{T_1}{T_m}, \frac{T_2}{T_m}, \frac{T_0}{T_m}$ , sont déterminés uniquement à partir de la figure (IV.17), et les formules (IV.3) et (IV.4).

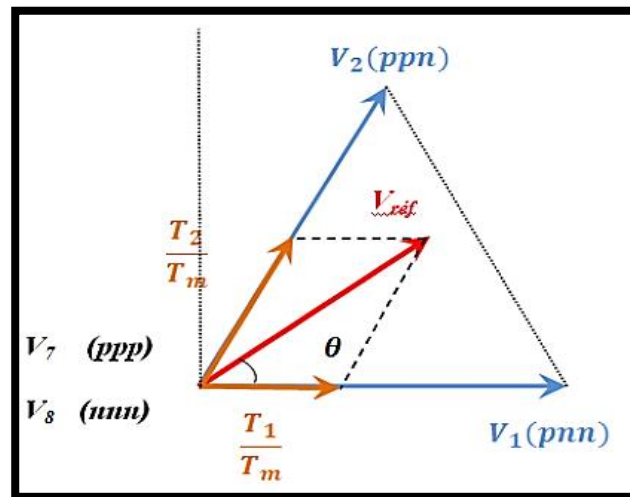


Figure IV.17 Projection du vecteur de tension dans le secteur n°1

Ce vecteur, peut être synthétisé par la modulation de largeur d'impulsions (PWM) des deux vecteurs adjacents  $V_1$  (pnn) et  $V_2$  (ppn), le temps d'utilisation de chacun étant respectivement  $T_1$  et  $T_2$ , et le vecteur nul  $V_7$  (nnn) ou  $V_8$  (ppp) ayant un temps d'utilisation  $T_0$  :

$$T_1 \times V_1 + T_2 \times V_2 + T_0 \times V_0 = T_m \times V_{\text{réf}} \quad [\text{IV.3}]$$

Avec :

$$V_{\text{réf}} = V_\alpha + jV_\beta$$

Et :

$$\frac{T_1}{T_m} + \frac{T_2}{T_m} + \frac{T_0}{T_m} = 1$$

Où :

$$T_1 + T_2 + T_0 = T_m \quad [\text{IV.4}]$$

$\theta$  : l'angle instantané du vecteur de référence

Les degrés de libertés que nous avons pour choisir un algorithme de modulation donné sont :

- Le choix du vecteur zéro : si nous voudrions employer  $V_7$  (ppp) ou  $V_8$  (nnn) ou tous les deux en même temps.

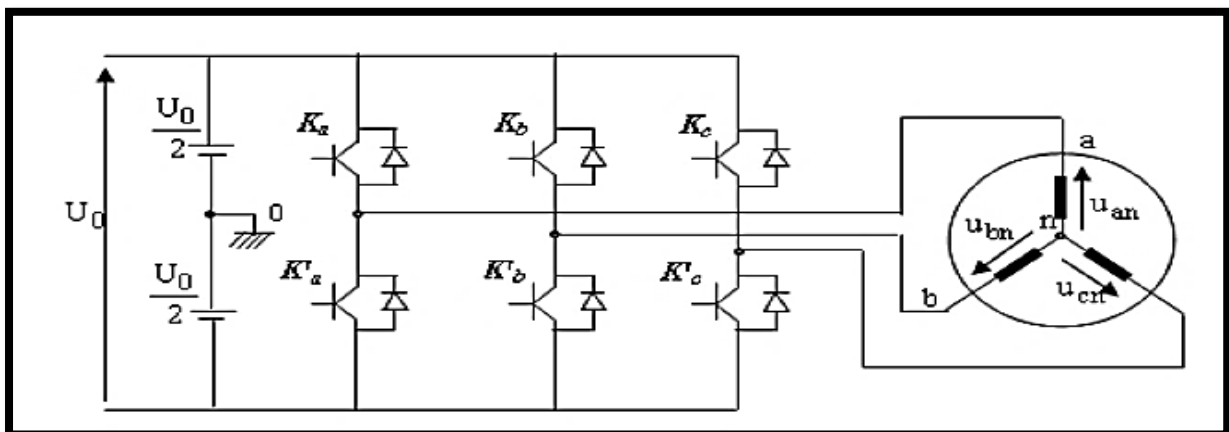
- Séquencement des vecteurs

Quatre algorithmes de modulation de la M.L.I Vectorielle (SV-PWM) sont considérés, à savoir :

- La séquence alignée à droite (SVM1) (Right aligned sequence).
- La séquence symétrique (SVM2) (Symmetric Sequence).
- La séquence alternante de vecteur nul (SVM3) (alternating Zero Vector Sequence)
- La séquence non commutée de courant le plus élevé (SVM4) (highest Current Not Switched Sequence).

#### IV.4.2.2 Théorie de l'MLI Vectorielle

La Figure (IV.18) montre le schéma d'un onduleur triphasé alimentant le MAS :



**Figure IV.18** Schéma représentatif d'un onduleur de tension triphasé

Pour simplifier l'étude, on supposera que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée ;
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable ;
- La charge triphasée est équilibrée, couplée en étoile avec neutre isolé.

Pour les tensions composées  $u_{ab}$ ,  $u_{bc}$  et  $u_{ca}$ , on a :

$$\begin{cases} u_{ab} = u_{a0} - u_{b0} \\ u_{bc} = u_{b0} - u_{c0} \\ u_{ca} = u_{c0} - u_{a0} \end{cases} \quad [\text{IV.5}]$$

$u_{a0}$ ,  $u_{b0}$  et  $u_{c0}$  peuvent être considérées comme des tensions d'entrée à l'onduleur (tensions continues).

Soit "n" l'indice du point neutre du coté alternatif. On a :

$$\begin{cases} u_{a0} = u_{an} + u_{n0} \\ u_{b0} = u_{bn} + u_{n0} \\ u_{c0} = u_{cn} + u_{n0} \end{cases} \quad [\text{IV.6}]$$

$u_{an}$ ,  $u_{bn}$  et  $u_{cn}$  sont les tensions simples de la machine et  $u_{n0}$  est la tension fictive entre le neutre de la MAS et le point fictif d'indice "0".

Sachant que la charge est équilibrée et le neutre isolé alors :

$$u_{an} + u_{bn} + u_{cn} = 0 \quad [\text{IV.7}]$$

La substitution de (IV.7) dans (IV.6) aboutit à :

$$u_{n0} = \frac{1}{3}(u_{a0} + u_{b0} + u_{c0}) \quad [\text{IV.8}]$$

En remplaçant (IV.8) dans (IV.6), on obtient :

$$\begin{cases} u_{an} = \frac{2}{3}u_{a0} - \frac{1}{3}u_{b0} - \frac{1}{3}u_{c0} \\ u_{bn} = -\frac{1}{3}u_{a0} + \frac{2}{3}u_{b0} - \frac{1}{3}u_{c0} \\ u_{cn} = -\frac{1}{3}u_{a0} - \frac{1}{3}u_{b0} + \frac{2}{3}u_{c0} \end{cases}$$

En utilisant les variables booliennes de l'état des interrupteurs on a :

$$\begin{bmatrix} u_{an} \\ u_{bn} \\ u_{cn} \end{bmatrix} = \frac{u}{3} \times \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_a \\ K_b \\ K_c \end{bmatrix} \quad [\text{IV.9}]$$

Par principe, cet onduleur a un fonctionnement discret. Il ne peut prendre que  $2^3 = 8$  état. (Combinaison des trois grandeurs  $K_a$ ,  $K_b$ ,  $K_c$ ).

Pour simplifier les calculs et représenter ces tensions. On utilise la transformation de Concordia pour transformer le vecteur de tensions triphasées ( $U_{AN}, U_{BN}, U_{CN}$ ) à un vecteur de tensions diphasées ( $U_\alpha, U_\beta$ ) [35].

### Transformation de Concordia

$$[X_{\alpha, \beta, 0}] = [C][X]$$

$$[C] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Comme notre système est équilibré, donc la composante homopolaire n'existe pas, la matrice de Concordia est donnée par :

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_{an} \\ u_{bn} \\ u_{cn} \end{bmatrix} \quad [\text{IV.10}]$$

Cette matrice est normée, elle permet la conservation de puissance. Cependant, les amplitudes des tensions et des courants, dans le système ( $\alpha, \beta$ ) sont multipliées par un coefficient  $\sqrt{\frac{2}{3}}$  donc, pour les déterminer dans le système réel, à partir du système ( $\alpha, \beta$ ) nous devons les diviser par ce coefficient.

#### IV.4.2.3 Principe de la M.L.I vectorielle

Le principe de la MLI vectorielle consiste à reconstruire le vecteur de tension  $V_{réf}$  pendant une période d'échantillonnage  $T_e$  par les vecteurs tension adjacents  $V_i$  et  $V_{i+1}$ , correspondants aux huit états possibles de l'onduleur [37].

A l'aide des expressions (IV.9) et (IV.10) on peut dresser le tableau de différents états de l'onduleur :

Tableau IV.1 Les différents états de l'onduleur

$K_a$	$K_b$	$K_c$	$V_{AN}$	$V_{BN}$	$V_{CN}$	$V_\alpha$	$V_\beta$	Vecteur
0	0	0	0	0	0	0	0	$V_8 = 0$
1	0	0	$\frac{2U}{3}$	$-\frac{U}{3}$	$-\frac{U}{3}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}U$	0	$V_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} \times U$
1	1	0	$\frac{U}{3}$	$\frac{U}{3}$	$\frac{2U}{3}$	$\sqrt{\frac{1}{6}}U$	$\sqrt{\frac{1}{2}}U$	$V_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} \times U \times e^{j\frac{\pi}{3}}$
0	1	0	$-\frac{U}{3}$	$\frac{2U}{3}$	$-\frac{U}{3}$	$-\sqrt{\frac{1}{6}}U$	$\sqrt{\frac{1}{2}}U$	$V_3 = \sqrt{\frac{2}{3}} \times U \times e^{j\frac{2\pi}{3}}$
0	1	1	$-\frac{2U}{3}$	$\frac{U}{3}$	$\frac{U}{3}$	$-\sqrt{\frac{2}{3}}U$	0	$V_4 = -\sqrt{\frac{2}{3}}U$
0	0	1	$-\frac{U}{3}$	$-\frac{U}{3}$	$\frac{2U}{3}$	$-\sqrt{\frac{1}{6}}U$	$-\sqrt{\frac{1}{2}}U$	$V_5 = \sqrt{\frac{2}{3}} \times U \times e^{j\frac{4\pi}{3}}$
1	0	1	$\frac{U}{3}$	$-\frac{2U}{3}$	$\frac{U}{3}$	$\sqrt{\frac{1}{6}}U$	$-\sqrt{\frac{1}{2}}U$	$V_6 = \sqrt{\frac{2}{3}} \times U \times e^{j\frac{5\pi}{3}}$
1	1	1	0	0	0	0	0	$V_7 = 0$

A un instant donné, l'onduleur peut générer seulement huit tensions  $V_i = (1, 2, \dots, 8)$  dans le plan de la transformée de Concordia ( $\alpha, \beta$ ) dont deux sont nuls est ( $V_7, V_8$ ) et six ont le module  $\left(\sqrt{\frac{2}{3}}U\right)$  et la direction  $\left[\frac{\pi}{3}(i - 1)\right]$ .

Ces vecteurs sont appelés vecteurs d'espace et sont donnés par la relation suivante :

$$V_i = U \times \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} \cos \frac{\pi}{3}(i - 1) \\ \sin \frac{\pi}{3}(i - 1) \end{bmatrix} \quad i = 1, \dots, 6$$

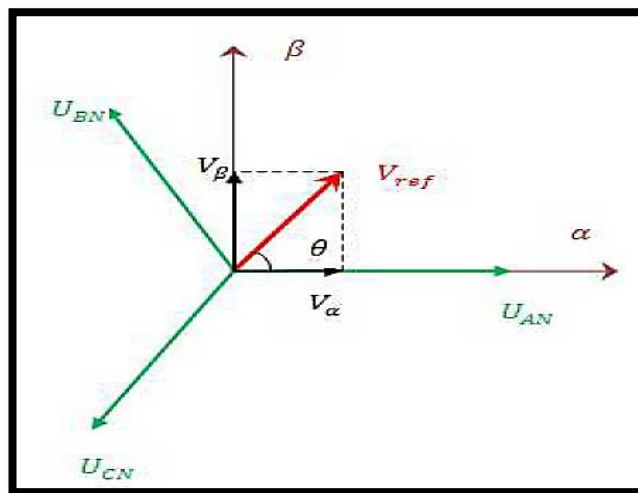
Deux vecteurs d'espace successifs  $V_i$  et  $V_{i+1}$  définissent le secteur  $i$ .

Par conséquent, le fonctionnement de la MLI vectorielle se résume par une séquence de traitement :

- Détermination de  $V_\alpha$ ,  $V_\beta$ ,  $V_{réf}$  et angle ( $\theta$ ) .
- Détermination du secteur ( $i$ ) contenant le vecteur  $V_{réf}$ .
- Détermination des durées d'utilisation des interrupteurs  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_0$ .
- Détermination de la période de commutation de chaque interrupteur ( $K_a$ ,  $K_b$ ,  $K_c$  et  $K_{a'}$ ,  $K_{b'}$ ,  $K_{c'}$ ) .

#### IV.4.2.3.1 Détermination de $V_\alpha$ , $V_\beta$ , $V_{réf}$ et l'angle $\theta$

A partir de la figure (IV.19),  $V_\alpha$ ,  $V_\beta$ ,  $V_{réf}$  et angle ( $\theta$ ) peuvent être déterminés comme suit :



**Figure IV.19** Projection des vecteurs de tension  $V_{AN}$ ,  $V_{BN}$ ,  $V_{CN}$  sur le plan ( $\alpha, \beta$ )

Avec :

$$\begin{cases} V_{AN} = r \times \frac{U}{2} \times \cos(\theta) \\ V_{BN} = r \times \frac{U}{2} \times \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{CN} = r \times \frac{U}{2} \times \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases}$$

Où :

$r$  : est le coefficient de réglage.

$$\begin{cases} V_\alpha = V_{an} - V_{bn} \cos 60^\circ - V_{cn} \cos 60^\circ = V_{an} - \frac{1}{2} V_{bn} - \frac{1}{2} V_{cn} \\ V_\beta = 0 + V_{bn} \cos 30^\circ - V_{cn} \cos 30^\circ = 0 + \frac{\sqrt{3}}{2} V_{bn} - \frac{\sqrt{3}}{2} V_{cn} \end{cases}$$

En respectant le transfert de puissance « Transformation de Concordia », On aura :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix}$$

$$V_{réf} = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{V_\alpha}{V_\beta} \right) = \omega \cdot t = 2\pi f t$$

où  $f$  : est la fréquence fondamentale

Le vecteur de référence  $V_{réf}$  est évalué sur la période de modulation  $T_m$  par la génération d'un vecteur moyen déterminé par l'application des vecteurs de commande adjacents de l'onduleur et des vecteurs nuls. En utilisant les huit vecteurs disponibles (Tableau 1). La figure (12) représente le cas où le vecteur de référence se trouve dans le secteur 1.

Le temps d'application des vecteurs adjacents est donné comme suit :

$$T_m = T_1 + T_2 + T_0$$

$$V_{réf} = \frac{T_1}{T_m} \times V_1 + \frac{T_2}{T_m} \times V_2 + \frac{T_0}{T_m} \times V_0$$

#### IV.4.2.3.2 Détermination des secteurs

Il est intéressant d'écrire la tension  $V_{réf}$  que l'on veut réaliser sous forme polaire, elle est de module  $V$  et d'angle polaire  $\theta$ .

$$V_{réf} = \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}$$

L'algorithme pour déterminer  $i$  est décrit ci-dessous :

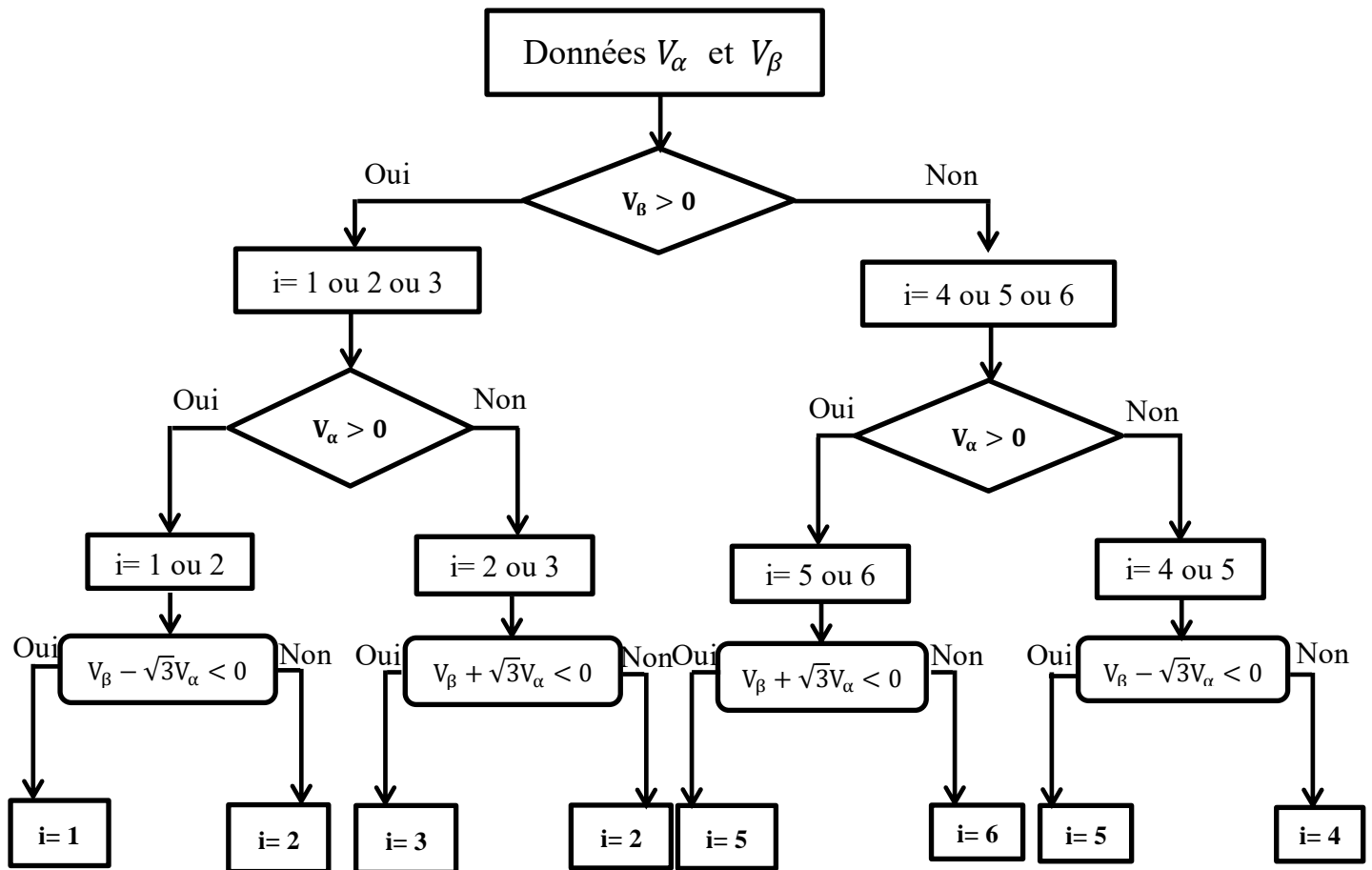


Figure IV.20 L'algorithme pour déterminer les secteurs.

#### IV.4.2.3.3 Détermination des instants $T_1$ et $T_2$

La détermination des instants  $T_1$  et  $T_2$  sont données par une simple projection sur les axes  $\alpha$  et  $\beta$  figure (IV.21) :

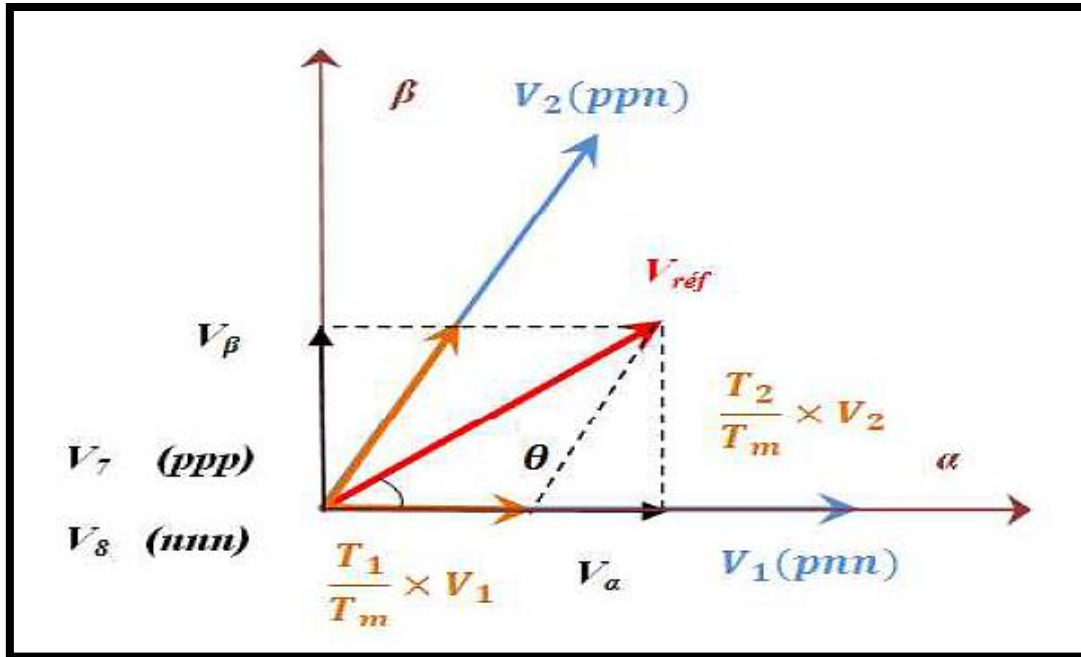


Figure IV.21 Production du vecteur de tension dans le secteur n°1.

- Durée de temps de commutation au secteur 1 :

$$\int_0^{T_Z} \bar{V}_{ref} = \int_0^{T_1} \bar{V}_1 dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} \bar{V}_2 dt + \int_{T_1+T_2}^{T_Z} \bar{V}_0$$

$$T_m = T_Z$$

$$T_Z \cdot \bar{V}_{ref} = (T_1 \cdot \bar{V}_1 + T_2 \cdot \bar{V}_2)$$

$$\Rightarrow T_Z \cdot |\bar{V}_{ref}| \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} = T_1 \cdot \frac{2}{3} \cdot U \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + T_2 \cdot \frac{2}{3} \cdot U \cdot \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

$$0 \leq \theta \leq 60^\circ$$

$$\rightarrow T_1 = T_Z \cdot a \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{3}\right)} \quad \rightarrow T_2 = T_Z \cdot a \cdot \frac{\sin(\theta)}{\sin\left(\frac{\pi}{3}\right)}$$

$$\rightarrow T_0 = T_Z - (T_1 + T_2)$$

Où :

$$T_Z = \frac{1}{f_Z}$$

Et :

$$a = \frac{|\bar{V}_{ref}|}{\frac{2}{3}U}$$

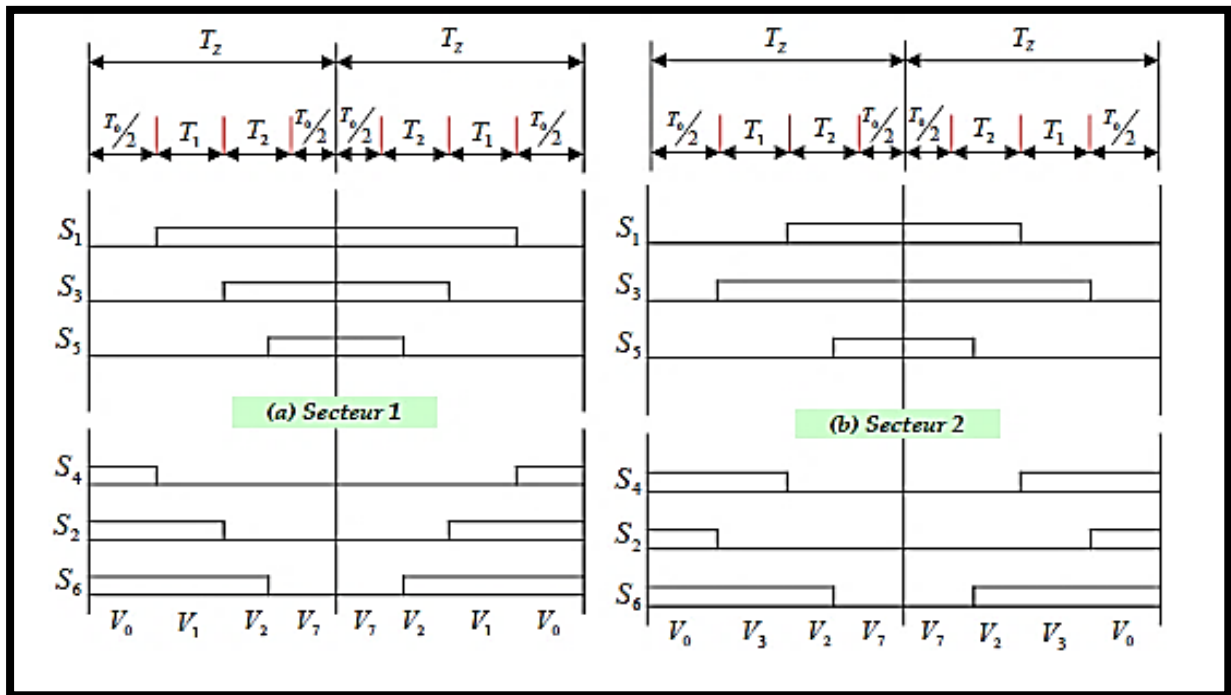
- Durée de temps de commutation à tout secteur :

$$\begin{aligned} \rightarrow T_1 &= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |\bar{V}_{ref}|}{U} \left[ \sin \left( \frac{\pi}{3} - \theta + \frac{n-1}{3} \pi \right) \right] = \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |\bar{V}_{ref}|}{U} \cdot \left[ \sin \frac{n}{3} \pi - \theta \right] \\ &= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |\bar{V}_{ref}|}{U} \cdot \left[ \sin \frac{n}{3} \pi \cos \theta - \cos \frac{n}{3} \pi \cdot \sin \theta \right] \\ \rightarrow T_2 &= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |\bar{V}_{ref}|}{U} \cdot \left[ \sin \left( \theta - \frac{n-1}{3} \pi \right) \right] \\ &= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |\bar{V}_{ref}|}{U} \left[ -\cos \theta \cdot \sin \frac{n-1}{3} \pi + \sin \theta \cdot \cos \frac{n-1}{3} \pi \right] \\ \rightarrow T_0 &= T_z - T_1 - T_2 \end{aligned}$$

Ou n=1 jusqu'à 6 (c'est-à-dire, Secteur 1 à 6)

#### IV.4.2.3.4 Détermination de la période de commutation de chaque interrupteur ( $S_1$ à $S_6$ )

Les impulsions durant une période d'échantillonnage  $T_z$  ou bien  $T_m$  est présentée dans le chronogramme de la Figure (IV.22).



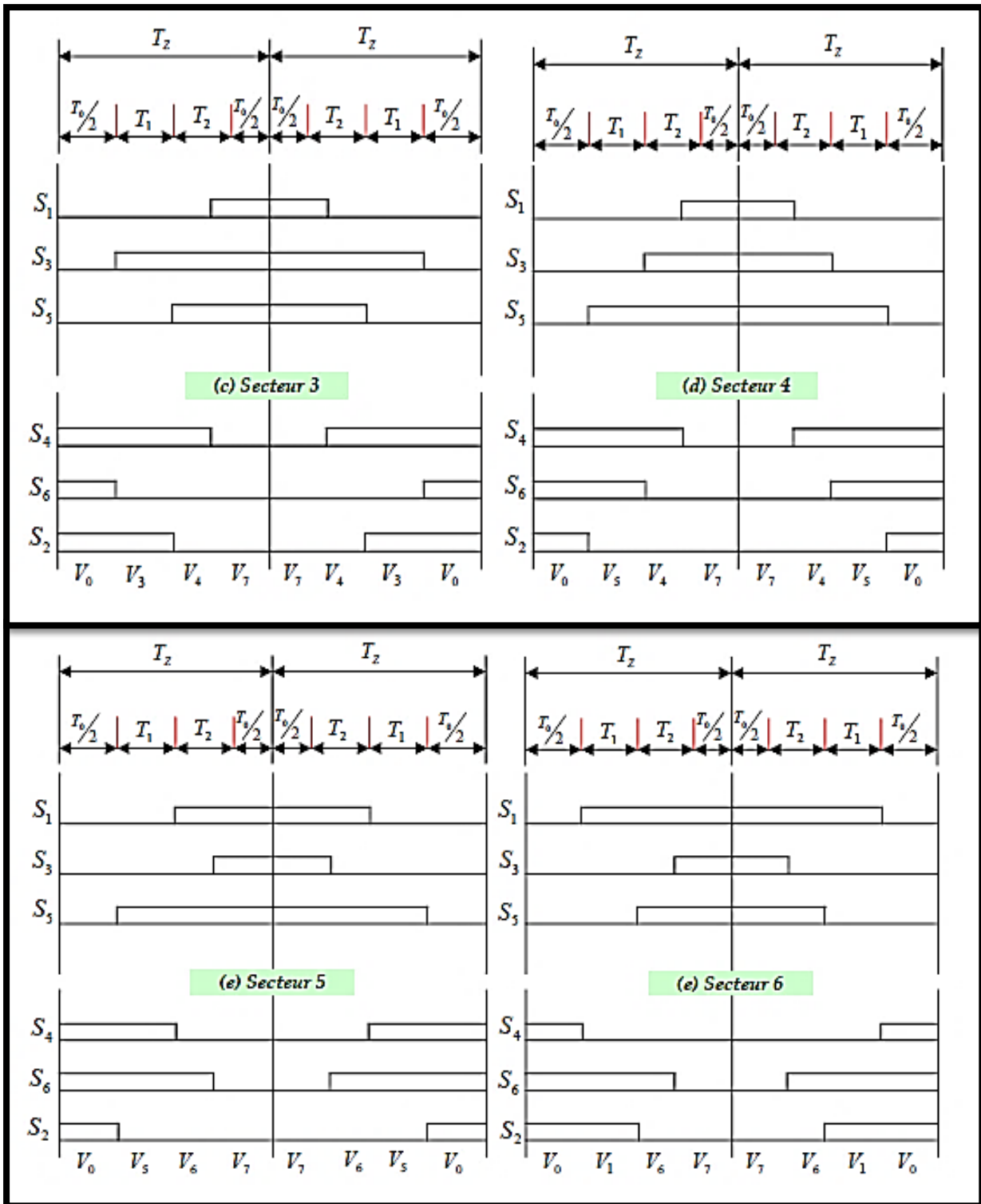


Figure IV.22 Temps de commutation pour chaque semi-conducteur dans chaque secteur.

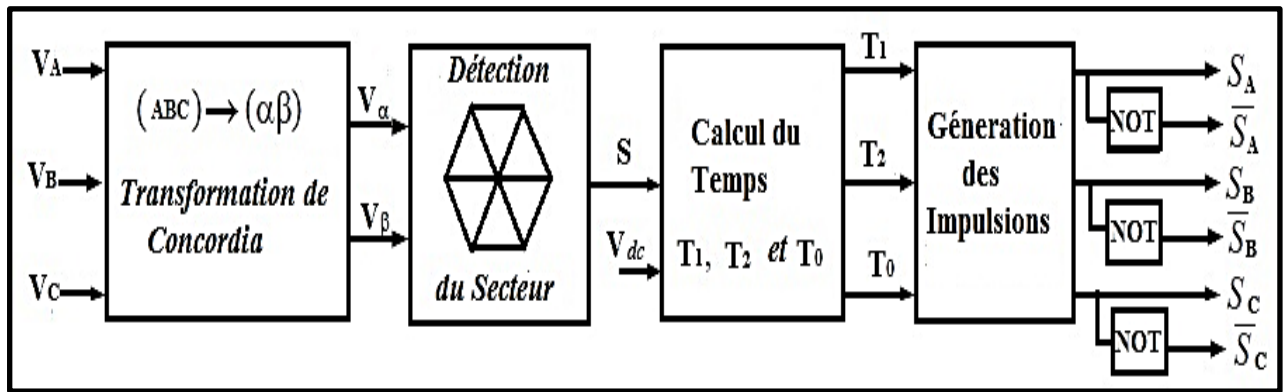


Figure IV.23 Schéma bloc de la commande MLI vectorielle.

## IV.5 Modèle de simulation

### IV.5.1 Commande MLI sinus-triangle

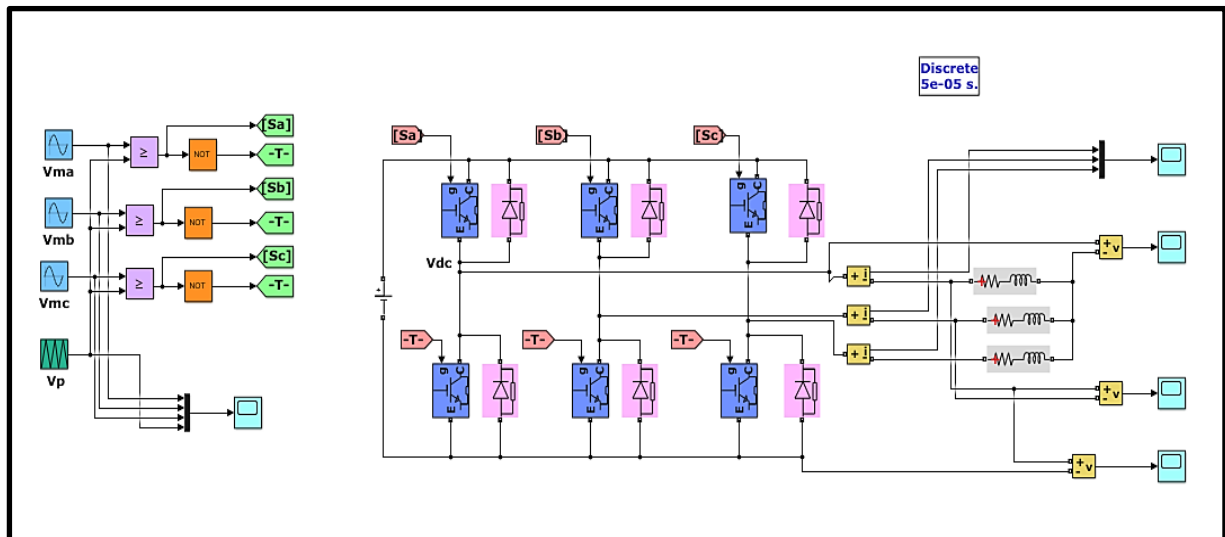


Figure IV.24 Schéma de simulation MLI sinusoidal.

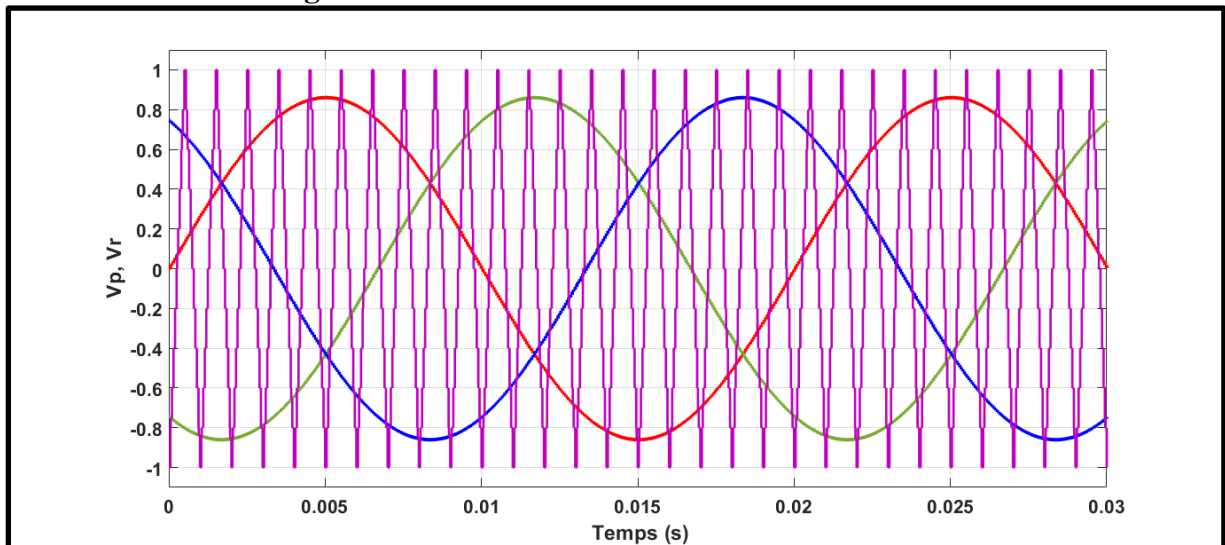


Figure IV.25 Signaux de la porteuse et des trois tensions de références.

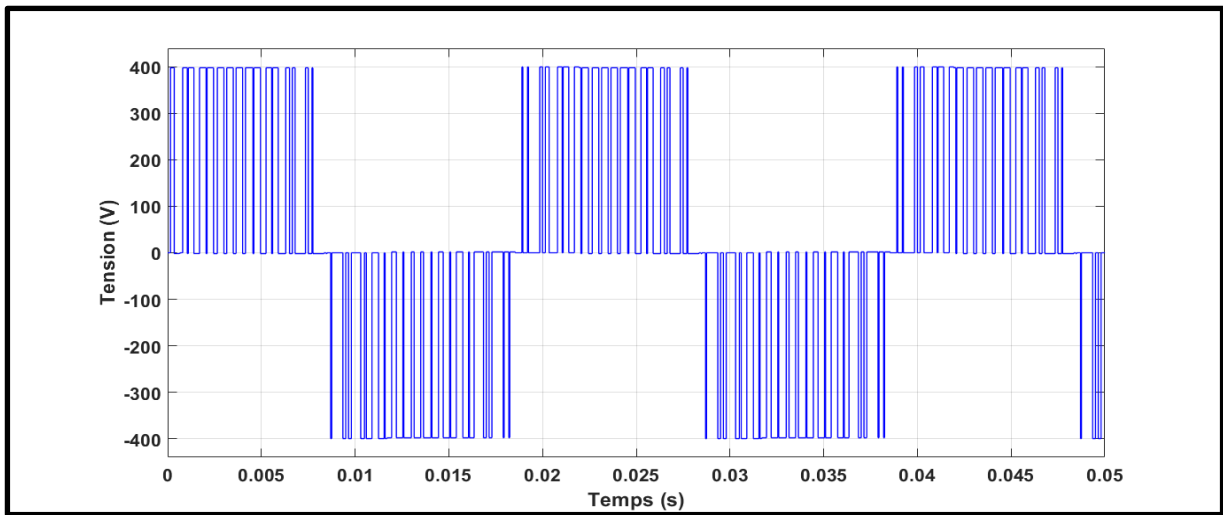


Figure IV.26 Tension composée Vab.

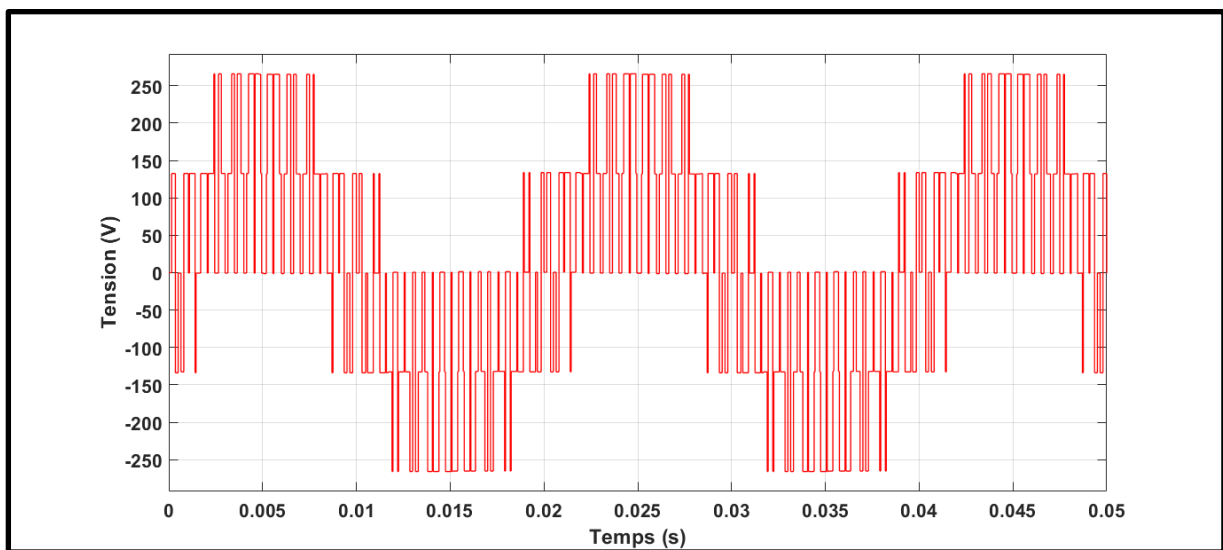


Figure IV.27 Tension simple Va.

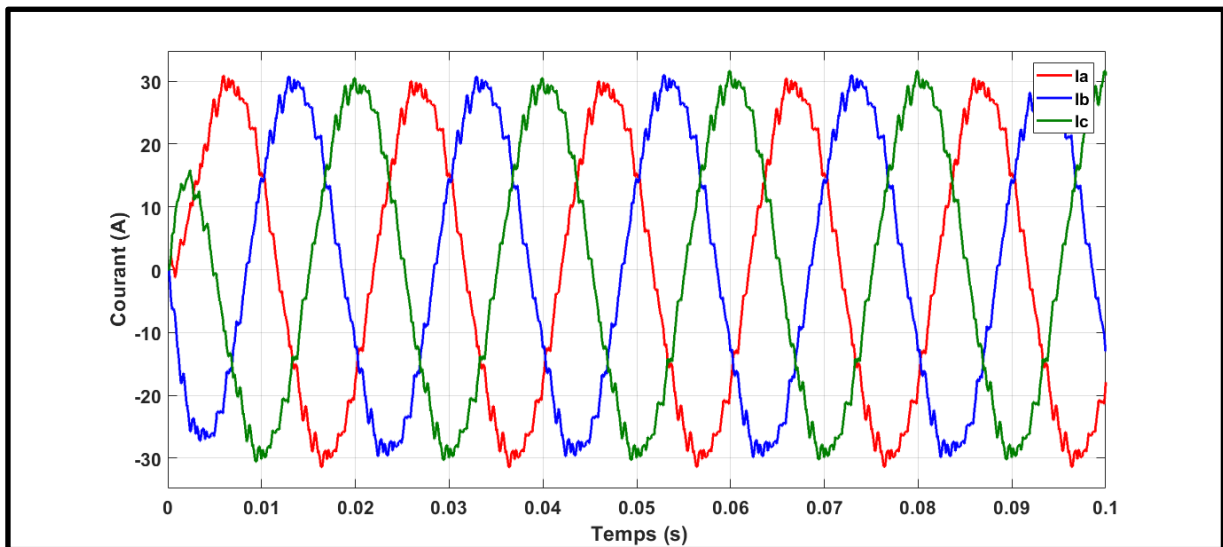


Figure IV.28 Courants Ia, Ib et Ic.

➤ Spectre harmonique du courant

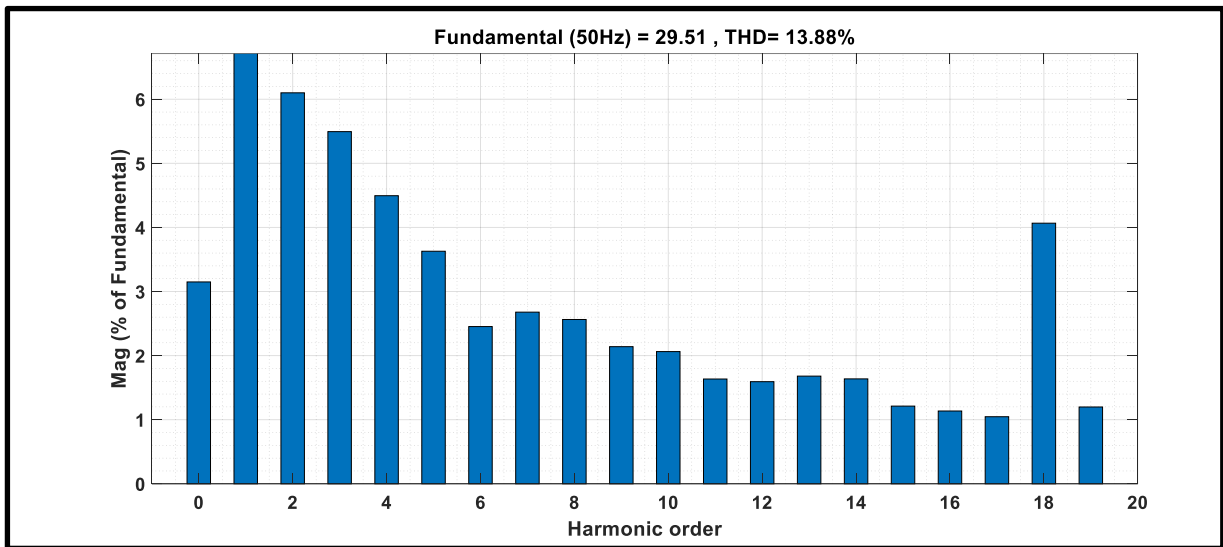


Figure IV.29 Spectre harmonique du courant en fonction d'ordre harmonique.

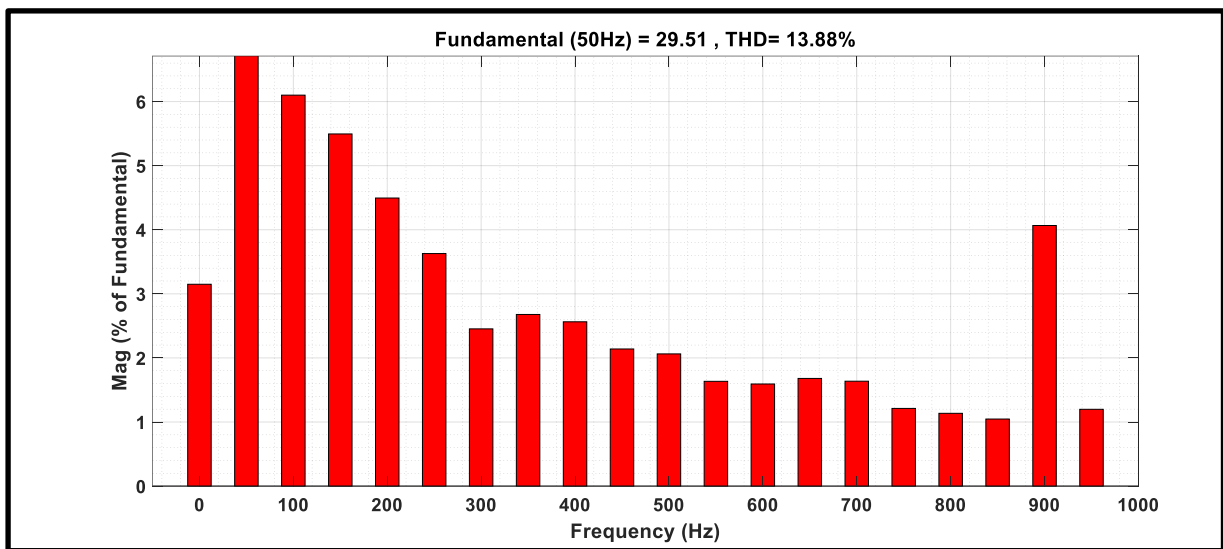


Figure IV.30 Spectre harmonique du courant en fonction de la fréquence.

IV.5 .2 Commande MLI vectorielle (SVM)

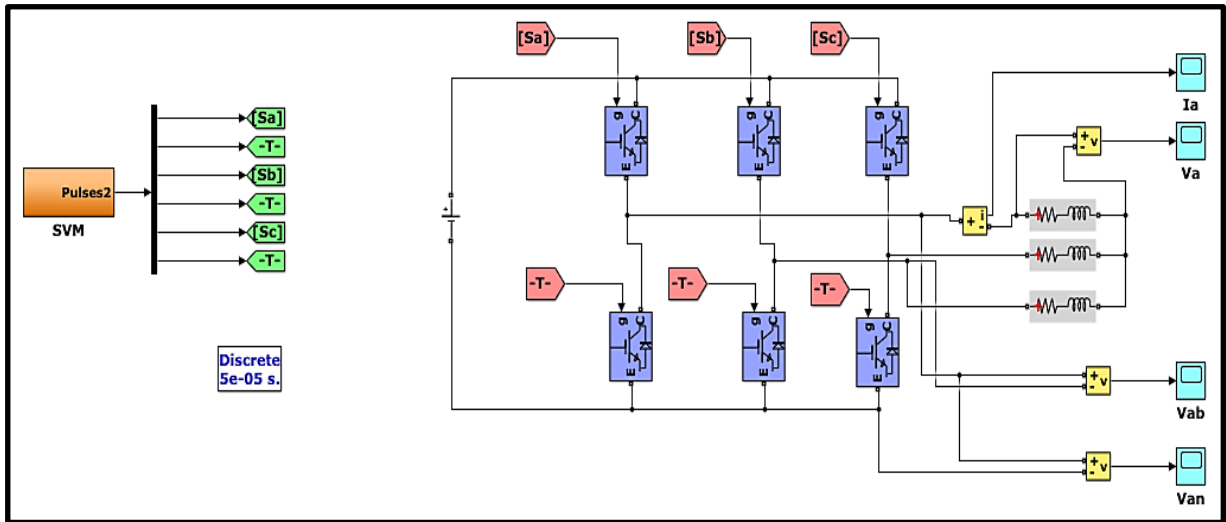


Figure IV.31 Schéma de simulation MLI vectorielle (SVM).

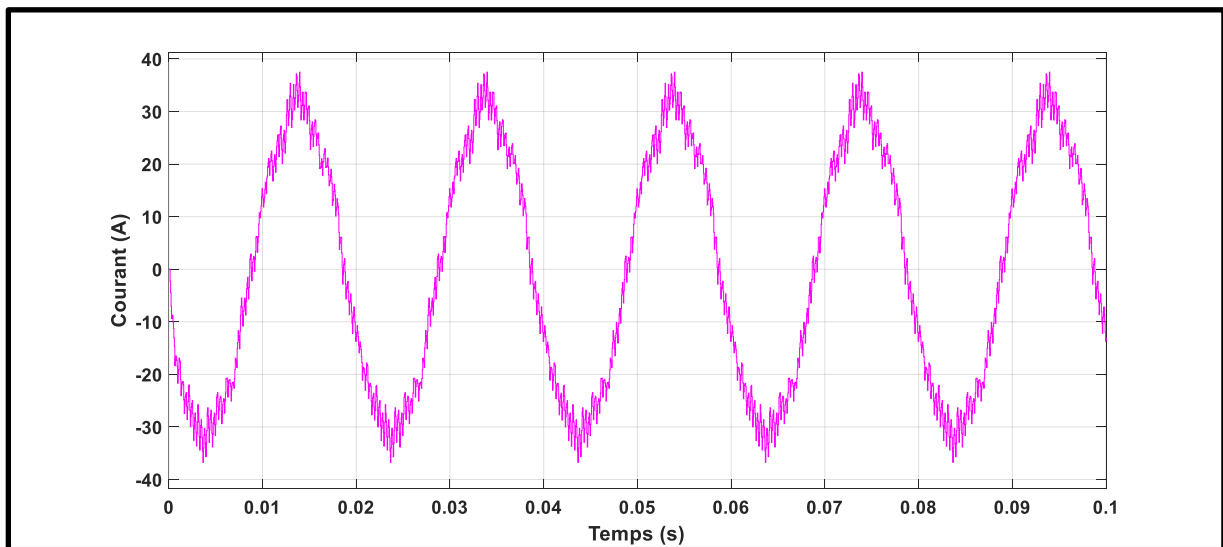


Figure IV.32 Courant de phase Ia.

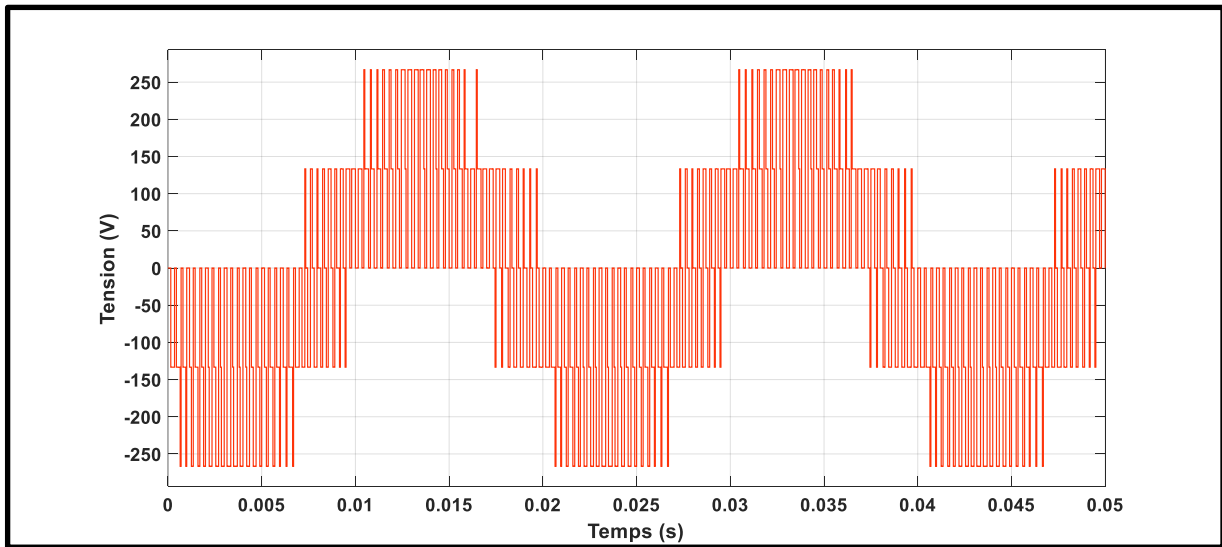


Figure IV.33 Tension simple Va.

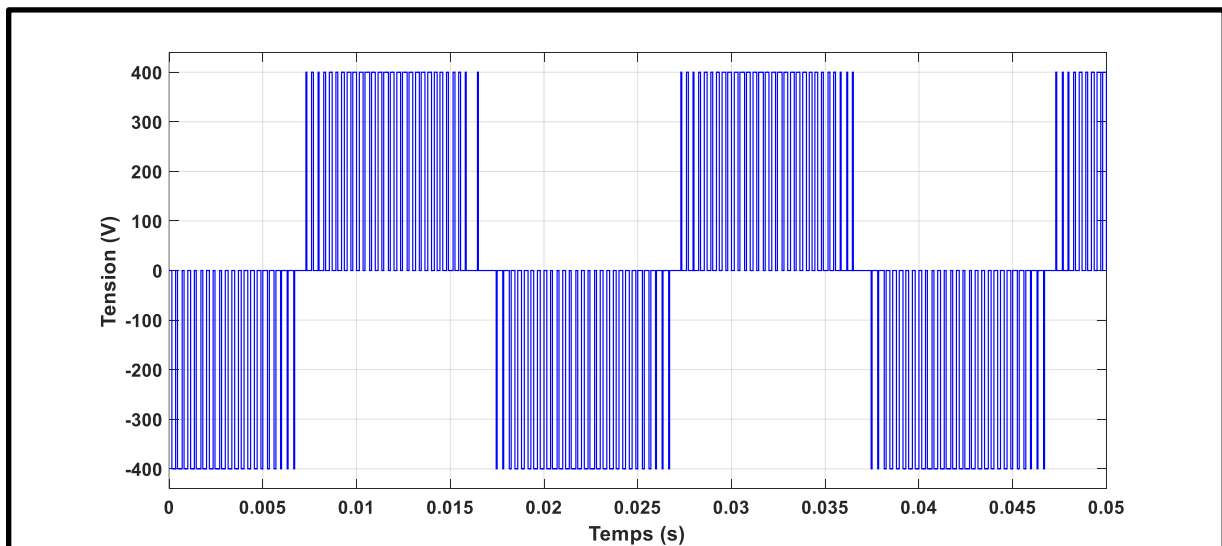


Figure IV.34 Tension composée Vab.

- Spectre harmonique du courant

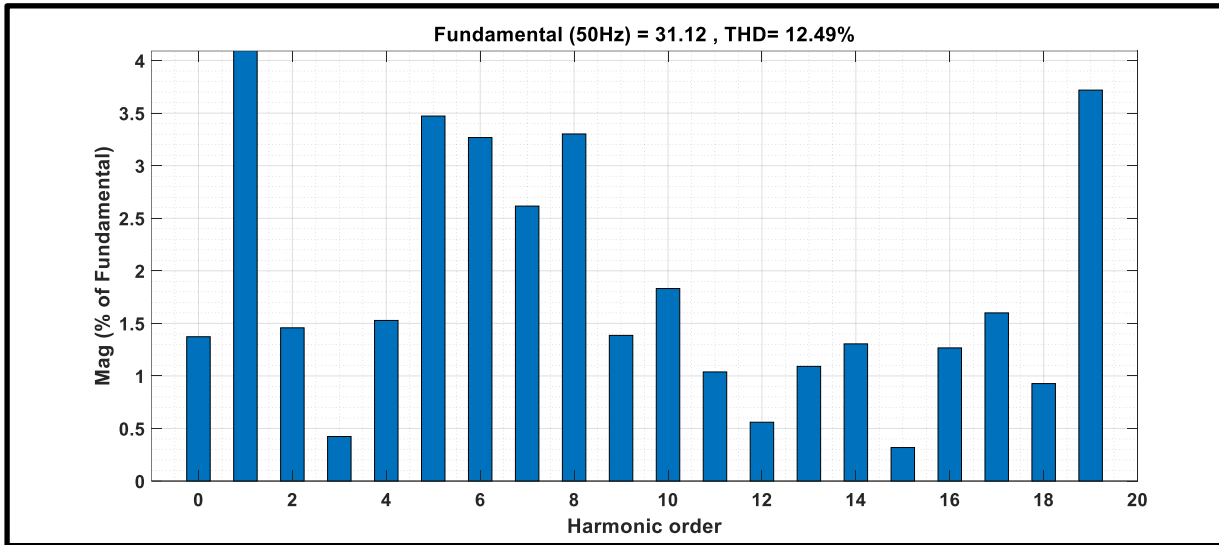


Figure IV.35 Spectre harmonique du courant en fonction d'ordre harmonique.

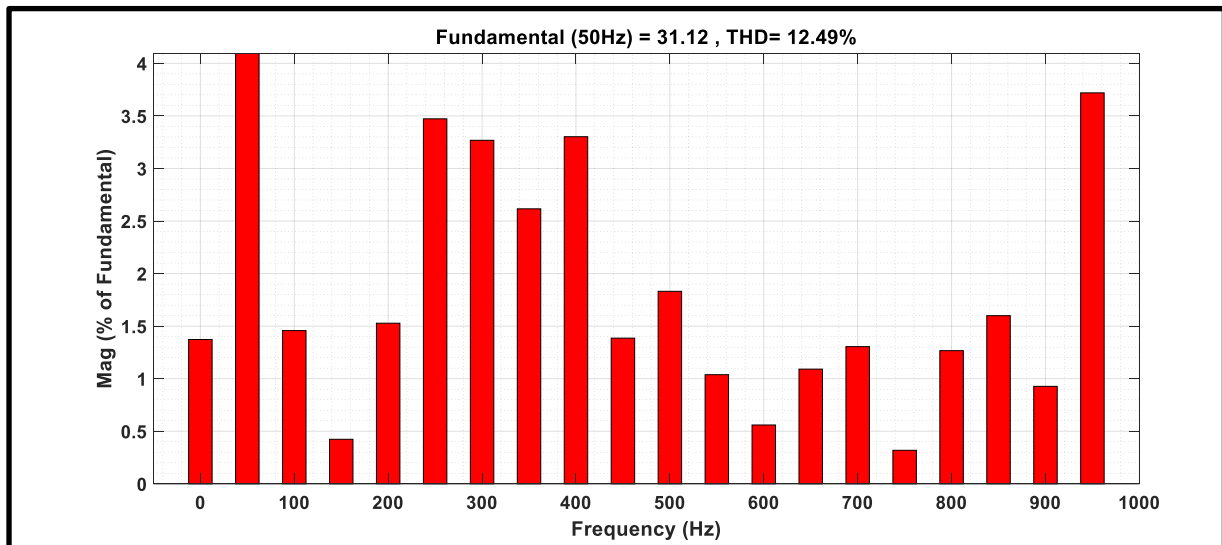


Figure IV.36 Spectre harmonique du courant en fonction de la fréquence.

Cette analyse permet d'expliquer que la variation des fréquences de commutation permet d'éliminer ou bien de minimiser les harmoniques d'ordre faible (les fréquences autour de la fréquence du fondamentale 50Hz) au niveau du courant. Une simple comparaison avec les deux stratégies citées précédemment.

En remarque que l'amplitude des harmoniques d'ordre faible est importante, ce qui provoque une augmentation du taux d'harmonique THD. On peut constater que l'amplitude des courants obtenus par la commande MLI\_ST avec (THD = 13.88 %) est grand par rapport au celle de la commande SVM avec (THD = 12.49 %), cette différence due essentiellement au harmoniques généré par l'onduleur surtout d'ordre faible ainsi la composante continu qui influe sur l'équilibre des courants triphasée. L'analyse spectrale permet d'expliqué l'utilité du contrôle SVM qui permet de minimisé l'effet des harmoniques d'ordre faible. Sans oublier de dire que la SVM permet d'avoir des courants sinusoïdaux pour les mêmes fréquences utilisées par la technique MLI\_ST. La valeur de THD obtenue par la commande SVM reste inacceptable (Il faut que le  $THD \leq 5\%$ ), donc il est important de placer un système de filtrage qui permet d'améliorer la qualité du signal de courant.

## **IV.6 Présentation du système complet**

Le système photovoltaïque global composé d'élément suivant que nous allons présenter dans cette partie :

- Panneau photovoltaïque ;
- Convertisseur Boost avec sa commande ;
- Onduleur de tension également muni de sa commande ;
- Réseau triphasé (Micro-grid).

Le schéma de la Figure IV.37 ci-dessous représente le schéma global d'un système photovoltaïque raccordé au réseau.

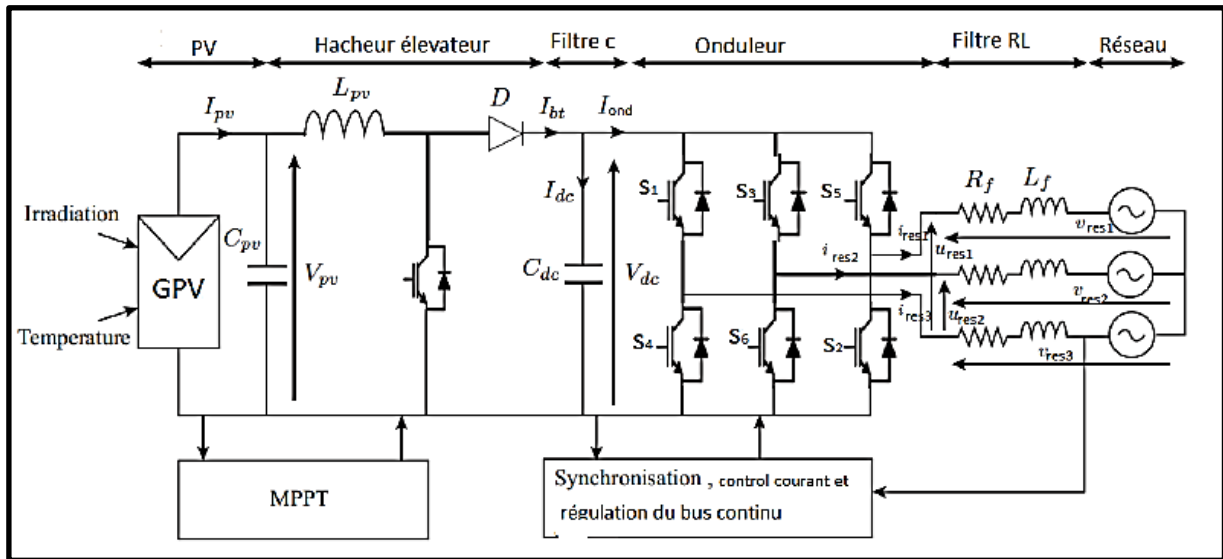


Figure IV.37 Système PV raccordé au réseau.

### IV.6.1 Modèle de simulation

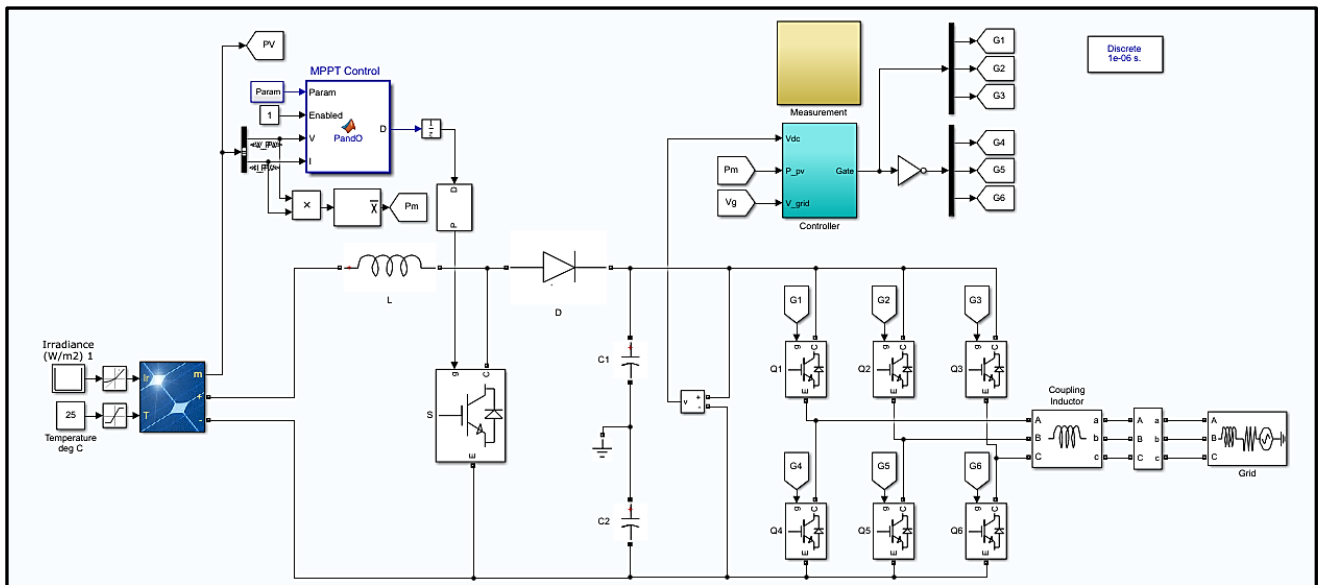


Figure IV.38 Schéma bloc du système complet.

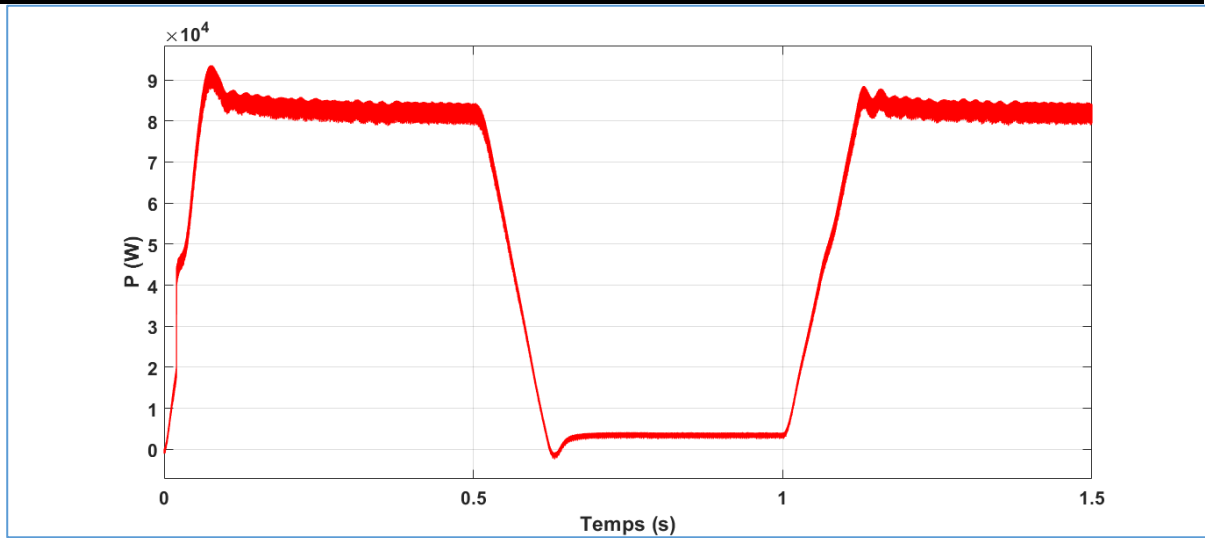


Figure IV.39 Puissance active générée par l'onduleur

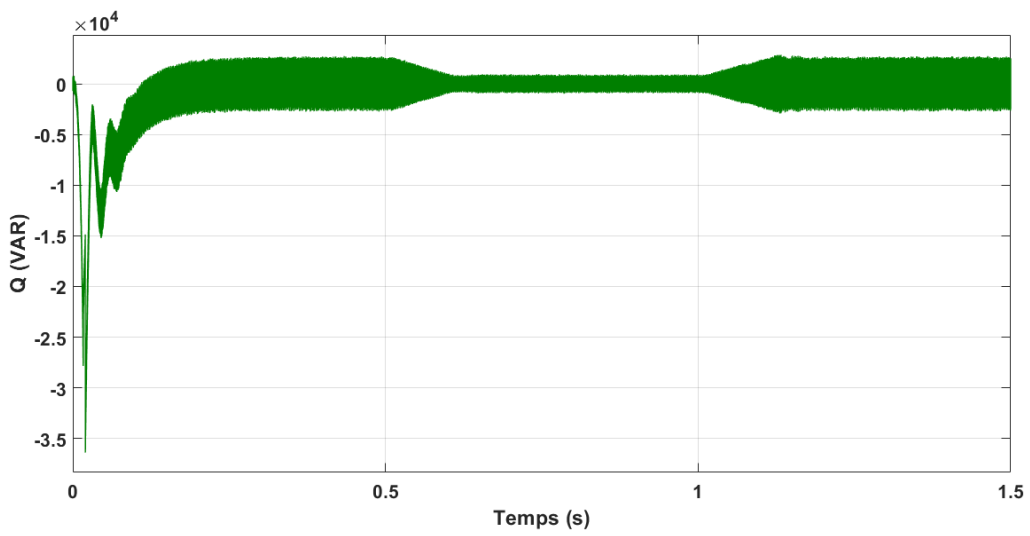


Figure IV.40 Puissance réactive générée par l'onduleur

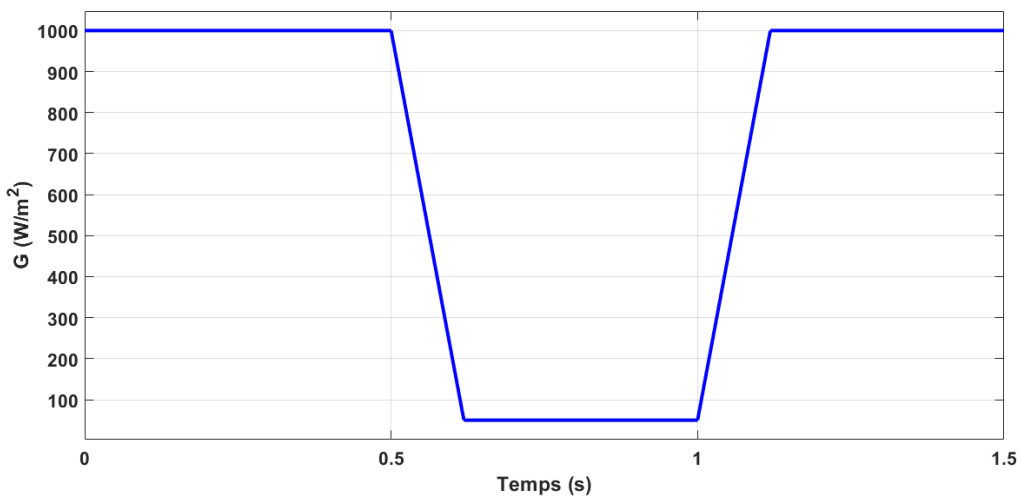


Figure IV.41 Variation de l'irradiation

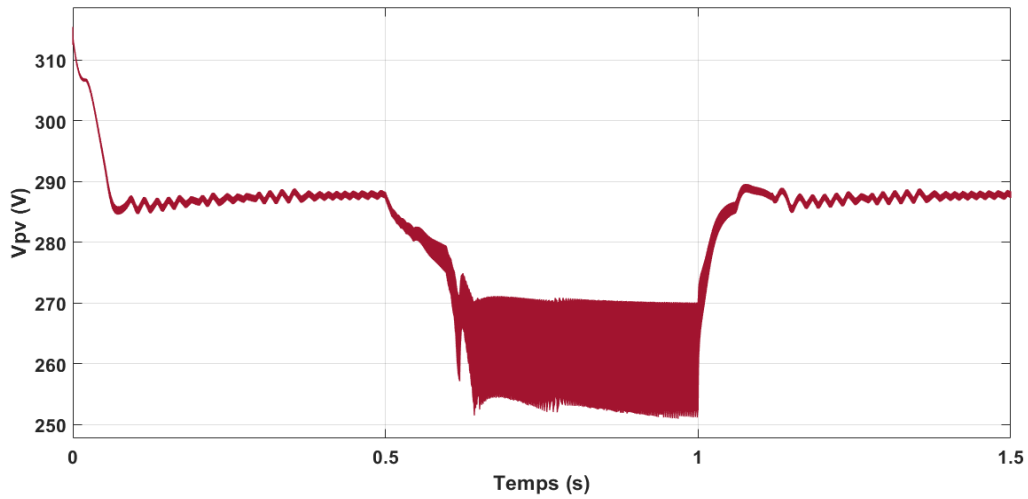


Figure IV.42 Tension du PV

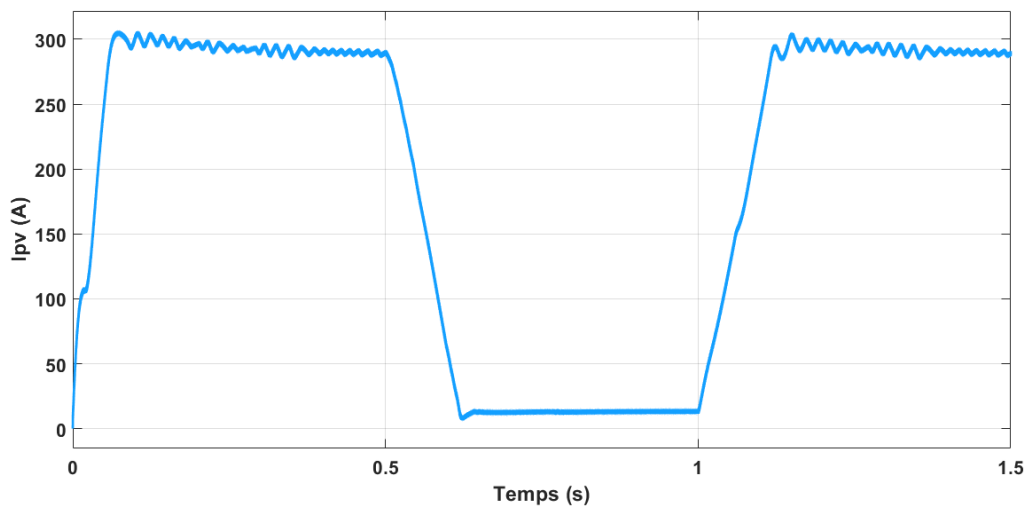


Figure IV.43 Courant du PV

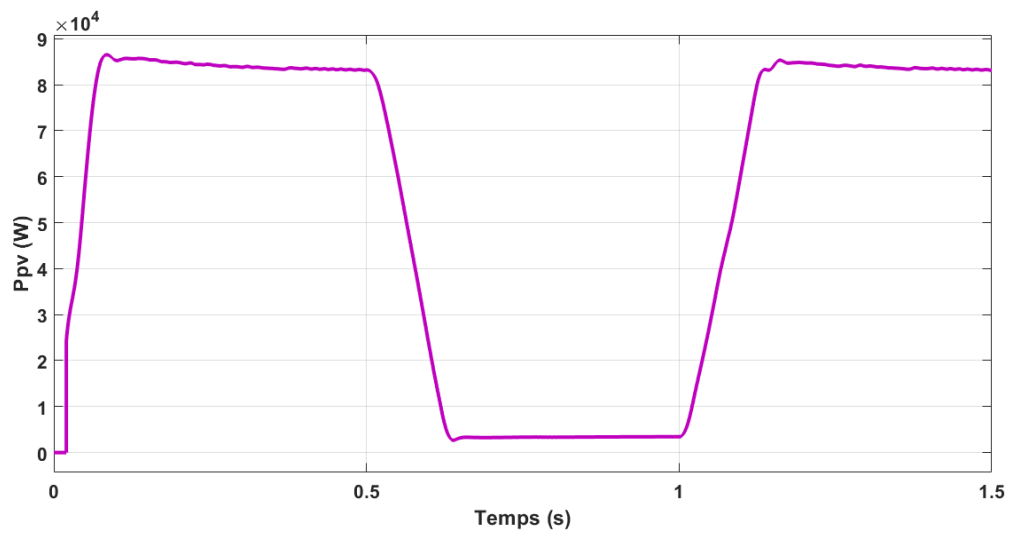


Figure IV.44 Puissance du PV

Nous avons présenté le comportement électrique du système complet avec le générateur photovoltaïque et ses caractéristiques principales, en tenant compte de la température  $T = 25 \text{ °C}$  et de l'ensoleillement  $G = [1000 \text{ W/m}^2, 50 \text{ W/m}^2, 1000 \text{ W/m}^2]$ . Cela nous a permis une estimation précise et rapide de la production d'énergie pour des conditions météorologiques (ensoleillement).

Les résultats de la simulation ont démontré l'intérêt d'un dispositif de recherche de la puissance maximale. De point de vue économique, la méthode P&O (perturbation and observation) a été choisie pour implanter un algorithme de poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale du panneau PV (MPPT) pour notre système.

Nous avons testé par simulation la méthode de poursuite du point de puissance maximale afin de visualiser le comportement de cette dernière sur un système photovoltaïque connecté au réseau (Micro-grid). Les résultats de simulation ont prouvé que la méthode de perturbation et observation est acceptable par rapport aux variations des conditions météorologiques (ensoleillement). Les résultats de simulation ont montré aussi le bon contrôle des puissances active et réactive à la sortie de l'onduleur de tension avec la variation d'irradiation.

## **IV.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons étudiés l'onduleur de tension triphasé commandé par deux stratégies de commandes : la MLI sinus-triangle et la MLI vectorielle (SVM). Ensuite nous avons exposés une étude comparative entre ces différentes stratégies. L'analyse des performances de ces techniques, nous révèle qu'en moyenne la MLI vectorielle reste la commande la plus efficace et la plus utilisée dans le cadre de la réduction des harmoniques générés par le système.

Enfin, nous avons présenté le système global à savoir l'ensemble des composants : panneau, hacheur (Boost), onduleur de tension. La connexion de GPV a été simulée à l'aide de l'environnement MATLAB/Simulink pour injecter l'énergie PV au réseau (Micro-grid).

---

# **Conclusion Générale**

---

## **Conclusion générale**

Le travail présenté dans ce mémoire concerne les systèmes photovoltaïques en fonctionnement couplé au réseau électrique (Micro-grid). Ce dispositif est amené à connaître des développements importants liés essentiellement à une volonté de plus en plus affichée de diversification des moyens de production de l'énergie et d'un meilleur respect de l'environnement. Associées à une production décentralisée, ces petites ou moyennes unités peuvent permettre une mutualisation avantageuse de ressources très répartie, très fluctuantes, et contribuer à une meilleure gestion de l'énergie électrique dans un contexte de développement durable.

L'étude de l'ensemble du système comportant le générateur photovoltaïque, et un convertisseur DC/DC de type Boost. Les résultats de simulation ont été présentés en détails afin d'illustrer le fonctionnement du système. Les résultats nous a permis de conclure que la puissance générée par le panneau PV diminue par la diminution de l'éclairement ou l'augmentation de la température. La commande des deux types d'hacheurs a été assurée par deux lois de commande lié au dispositif de poursuite de la puissance maximale (MPPT), qui sont : (P&O et InCond). Nous avons constaté que la technique de l'incrémentation de la conductance (InCond) à des meilleures performances que celle de la perturbation et observation (P&O) et cela a été confirmé par la simulation.

Après, nous avons étudiés l'onduleur de tension triphasé commandé par deux stratégies de commandes : la MLI sinus-triangle et la MLI vectorielle (SVM). L'analyse des performances de ces techniques, nous révèle qu'en moyenne la MLI vectorielle reste la commande la plus efficace et la plus utilisée dans le cadre de la minimisation des harmoniques générés par le système.

Enfin, nous avons présenté le système global à savoir l'ensemble des composants : panneau, hacheur (Boost), onduleur de tension. La connexion de GPV a été simulée à l'aide de l'environnement MATLAB/Simulink pour injecter l'énergie PV au réseau (Micro-grid). Les résultats obtenus sont satisfaisants (moins de pollution harmonique, facteur puissance unitaire), néanmoins la puissance injectée dépend des conditions climatiques.

Pour une éventuelle continuité du présent travail, il est possible d'énumérer quelques perspectives comme :

- Associé d'autres sources d'énergies pour former un système hybride pour compenser les périodes d'ensoleillement défavorables.
- Exploitation de nouveaux algorithmes MPPT.
- Introduction d'autres types de convertisseurs DC/DC.
- Le développement approfondi de la modulation de la largeur d'impulsion discontinue.
- Recherche d'autres techniques de commande qui permettent d'avoir une tension à la sortie exactement sinusoïdale telle que la MLI Hybride.
- Etude comparative entre l'onduleur triphasé à deux-niveaux et à multi-niveaux. Afin de contourner le problème lié à la limite maximale de la tension de blocage des semi-conducteurs et ainsi obtenir un spectre de tensions et de courants d'une meilleure qualité.

---

# Références

---

## **Références**

- [1] H. Afghoul, F. Krim, D. Chikouche, A. Beddar, "Robust switched fractional controller for performance improvement of single phase active power filter under unbalanced conditions", *Frontiers in Energy* (Springer 2015), DOI :10.1007/s11708-015-0381-7.
- [2] P. Boulanger, P. Malbranche, «Conversion de puissance et gestion d'énergie dans les systèmes photovoltaïques: état de l'art», colloque GEVIQ'2002, Marseille 12-13 juin 2002, pp.60-65.
- [3] C. N. KALAJDI Farah, « Commande d'un générateur photovoltaïque débitant sur une pompe (MPPT) », mémoire de master, Université ABOU BAKR BELKAID, Tlemcen, Algérie, 2014.
- [4] F. HEROGUEL, "les cellules photovoltaïques," École Normale Supérieure, Lyon Epreuve de projet, 2007.
- [5] M.C. Zahar soria, « Etude et simulation d'un générateur photovoltaïque Muni convertisseur MPPT pour une meilleur gestion énergétique », mémoire master, Université Mohamed Boudiaf, M'sila Algérie, 2017.
- [6] H. Afghoul, « Approche avancée du filtrage actif et du contrôle de puissances dans les installations photovoltaïques interconnectées au réseau », Thèse Doctorat, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2015 page 110-111.
- [7] J. Bernard, " Énergie solaire calculs et optimisation", Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [8] Y. PANKOW, "Étude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque," École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Thèse de Doctorat, 2004.
- [9] Jager A., Waldau, « PV status report 2011; research, solar cell production and market implementation of photovoltaics », European Commission - Joint Research Centre; Renewable Energy Unit, Italy, July 2011.
- [10] *Revue des Energies Renouvelables SIENR'14 Ghardaïa* (2014) 87-92.

- [11] A. Goetzberger et U. Hoffmann, Photovoltaic Solar Energy Generation, Berlin: Springer Verlag, 2005.
- [12] T. Markvart et L. Castaner, Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications, Oxford: Elsevier, 2003.
- [13] Lalouni. Optimisation de la qualité d'énergie électrique dans le cas d'un chargeur de batterie, Mémoire de magister, Université de Bejaia, 2005.
- [14] K. HELALI, " Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative", Mémoire de Magister université de MOULOU D MAMMERI de Tizi-Ouzou, 25 Juin 2012.
- [15] S. AOUIFI, " Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque", Mémoire de Magister, Université FERHAT ABBAS -SETIF-1, 28/09/2014.
- [16] S. BENSALEM, " Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires", Mémoire de Magister, Université FERHAT ABBAS-SETIF-1, 06/01/2011.
- [17] W.Bensaci. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT, Mémoire de Master, Université KASDI MERBAH OUARGLA, 2012.
- [18] Lindgren B., « Topology For Decentralised Solar Inverters With a Low Voltage AC Bus », (EPE'99) 8th European Conference on Power Electronics and Applications, Lausanne, Switzerland, pp. P.1-P.10, September 1999.
- [19] Li S., « A MPPT control strategy with variable weather parameter and no DC/DC converter for photovoltaic systems », Solar Energy, Vol. 108, pp.117-125, 2014.
- [20] A. Lyes, « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque », UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI OUZOU Mémoire de Magister, 2011.
- [21] Afghoul H., Krim F., Chikouche D., « Increase the photovoltaic conversion efficiency using Neuro-fuzzy control applied to MPPT », Renewable and Sustainable Energy Conference (IREC'13), Ouarzazate, Morocco, pp. 348 – 353, 2013.
- [22] Afghoul H., Krim F., Chikouche D., Beddar A., « A comparative study between sliding mode controller and P&O controller applied to MPPT », Renewable and Sustainable Energy Conference (IREC'13), Ouarzazate, Morocco, pp. 112-117, 2013.
-

- [23] Afghoul H., Krim F., Chikouche D., Beddar A., « A novel implementation of MPPT sliding mode controller for PV generation systems », EUROCON 2013 IEEE, Zagreb, Croatia, pp. 789 – 794, 2013.
- [24] Afghoul H., Krim F., Chikouche D., Beddar A., Babes B., « Real-time implementation of PV energy injection via single phase active power filter under variable conditions », The First National Conference on Electronics and New Technologies (NCENT'2015), M'Sila, Algeria, 2015.
- [25] Photong C., « A Current Source Inverter with Series AC Capacitors for Transformerless Grid - Tied Photovoltaic Applications », thèse de doctorat, University of Nottingham, UK, 2013.
- [26] Radjai T., Rahmani L., Mekhilef S., Gaubert J.P., « Implementation of a modified incremental conductance MPPT algorithm with direct control based on a fuzzy duty cycle change estimator using dSPACE », Solar Energy, Vol. 110, pp.325-337, 2014.
- [27] Ma J., « Optimization Approaches for Parameter Estimation and Maximum Power Point Tracking (MPPT) of Photovoltaic Systems », thèse de doctorat, University of Liverpool, UK, 2014.
- [28] Yaichi Mohammed « analyse de la technique de modulation vectorielle SVM (space vector modulation) appliquée aux onduleurs multi niveaux» mémoire magister Université Djilali liabes de Sidi-Bel-Abbès 2006.
- [29] CAPITANEANU LAURENTIU Stefan, Optimisation de la fonction MLI d'un onduleur de tension deux-niveaux, Thèse de doctorat, 2011, LEEI (Toulouse, France).
- [30] FERNANDEZ Sophie, Comparaison des performances électriques d'un onduleur triphasé deux-niveaux à commandes directes et indirectes connecté au réseau, Thèse de doctorat, 2013, Université de LILLE.
- [31] D. LALILI, N. LOURCI, E. M. BERKOUK et F. BOUDJEMA, Méthode simplifiée de la modulation vectorielle de l'onduleur a cinq niveaux, International conférence : sciences of électronique, Technologies of information and télécommunications, 2005, Setit3RD.
-

[32] GUERDA Abderrahim et AOUICHAT Houssam Eddine, Amélioration de la commande directe du couple d'une machine asynchrone par l'utilisation des convertisseurs SVM, Mémoire de master, 2016, Université KASDI MERBAH OUARGLA.

[33] Elearning univeloued, cour Master 2, Chapitre I, Les Différents Stratégies de Modulation ([http://elearning.univeloued.dz/courses/EPA01/document/Cours\\_Master2\\_ChapitreI.pdf?cidReq=EPA01](http://elearning.univeloued.dz/courses/EPA01/document/Cours_Master2_ChapitreI.pdf?cidReq=EPA01)).

[34] Amina Merhoum « optimisation des techniques de MLI pour les équipements FACTS A base d'onduleur » mémoire magister ORAN 2013.

[35] Yaichi Mohammed « analyse de la technique de modulation vectorielle SVM (space vector modulation) appliquée aux onduleurs multi niveaux » mémoire magister Université Djilali Liabes de Sidi-Bel-Abbès 2006.

[36] Kaci Yahia « étude d'une nouvelle approche MLI (PWM) en temps réel basée sur le principe des réseaux de neurones destinée aux véhicules électrique ». Mémoire magister Universités mouloud Mammary de Tizi-Ouzou 2015.

[37] Boukaroura Abdelkader « Modélisation et diagnostic d'un onduleur triphasé par l'approche Bon-graph » mémoire magister Farhat Abbas de setif 2009".

## Résumé

Dans ce travail, nous avons effectué une étude générale sur le générateur photovoltaïque et de son fonctionnement à sa puissance maximale en utilisant un hacheur Boost commandé par deux algorithmes MPPT de type (P&O et InCond). Le raccordement au réseau se fait par l'insertion d'un onduleur de tension triphasé commandé par deux stratégies de commandes : la MLI sinus-triangle et la MLI vectorielle (SVM) permettant la réduction des harmoniques générés par le système. La connexion de GPV a été simulée à l'aide de l'environnement MATLAB/Simulink afin d'injecter l'énergie PV au réseau (Micro-grid). Les résultats de simulation obtenus montrent les performances du système proposé.

### Mots clés

Photovoltaïque, MPPT, SVM, MLI, Onduleur, Boost, Micro-grid, Simulation.

## Abstract

In this work, we carried out a general study of the photovoltaic generator and its operation at its maximum power using a Boost chopper controlled by two MPPT type algorithms (P&O and InCond). The connection to the grid is made by inserting a three-phase voltage inverter controlled by two control strategies: PWM sine-triangle and PWM vector (SVM) allowing the reduction of harmonics generated by the system. The GPV connection was simulated using the MATLAB/Simulink environment to inject PV energy into the grid (Micro-grid). The simulation results obtained show the performance of the proposed system.

### Keywords

Photovoltaic, MPPT, SVM, MLI, Inverter, Boost, Micro-grid, Simulation.

## ملخص

في هذا العمل، قمنا بإجراء دراسة عامة حول مولد الخلايا الضوئية وتشغيله بأقصى طاقة باستخدام محول رافع بحيث يتم التحكم فيه بواسطة خوارزميات من نوع MPPT (P&O و InCond). يتم الاتصال بالشبكة الكهربائية عن طريق إدخال محول جهد ثلاثي الأطوار يكون التحكم فيه بواسطة استراتيجيتين : MLI sinus-triangle و MLI vectorielle (SVM) مما يسمح بتقليل التوافقيات الناتجة عن النظام. تمت محاكاة اتصال المولد الكهروضوئي GPV باستخدام بيئة MATLAB/Simulink وذلك لحقن الطاقة الكهروضوئية في الشبكة الكهربائية الصغيرة. تظهر نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها فعالية أداء النظام المقترح.

### الكلمات المفتاحية

الكهروضوئية، MPPT، SVM، MLI، محول جهد، محول رافع، شبكة كهربائية صغيرة، محاكاة.