

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mohammed Seddik Benyahia – Jijel
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Automatique

Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme
Master en Automatique

Option : Automatique et Systèmes

Thème :

Commande non linéaire d'un système
photovoltaïque connecté au réseau

Réalisé par :

- ❖ Boulenouar Lamia
- ❖ Kahlessenane Amira

Encadré par :

- ❖ Boubakir Ahsene
- ❖ Touil Sid-Ahmed

Année Universitaire 2018/2019

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier Allah, le clément et le miséricordieux de nous avoir donné la force, le courage et la patience pour mener à bien ce travail.

*Nous voudrions aussi exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur **Dr. Boubakir Ahsene** pour sa sollicitude, disponibilité et ses précieux conseils.*

*Nous tenons également, à remercier vivement monsieur **Touil Sid-Ahmed** pour sa précieuse aide*

Nous voudrions remercier tous les enseignants de département automatique qui ont contribué à notre formation.

Nos remerciements vont également à tous ceux et celles qui, de près ou de loin, nous ont apporté aide et encouragement.

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail : A mon très cher père
NOUREDDINE, et ma chère mère ELDJOUHER que Dieu
les garde et les protège pour leurs soutien moral et financier, pour
leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.*

*A mes frères AMIR, IMADE et CHOUIBE et ma
sœur HOUDA.*

A tous mes camarades d'étude de la promotion.

A tous ce que j'aime et qui m'aiment.

Amira



Dédicace

*Je dédie ce modeste travail : A mon très cher père BELKACEM
et ma chère mère FAHIMA, que Dieu les garde et les protège pour
leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les
sacrifices qu'ils ont endurés.*

*A mes frères YUCEF et KHYREDDINE et mes sœurs
AMEL, NASSIMA, RADIA et MOUFIDA.*

Et à mes chères amies HOURIA, HAYAT et MERIEM.

A tous mes camarades d'étude de la promotion.

A tous ce que j'aime et qui m'aiment

Lamia



Table des matières

| | |
|-----------------------------------|-------------|
| <i>Table des matières</i> | <i>i</i> |
| <i>Liste des figures</i> | <i>iv</i> |
| <i>Liste des tableaux</i> | <i>viii</i> |
| <i>Introduction Générale.....</i> | <i>1</i> |

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

| | |
|---|-----------|
| <i>I.1. Introduction.....</i> | <i>3</i> |
| <i>I.2. Système photovoltaïque.....</i> | <i>3</i> |
| <i>I.2.1. Types des systèmes photovoltaïques.....</i> | <i>3</i> |
| <i>I.3. Cellule photovoltaïque.....</i> | <i>5</i> |
| <i>I.3.1. Principe de fonctionnement d'une cellule PV.....</i> | <i>5</i> |
| <i>I.3.1. Types des cellules PV.....</i> | <i>6</i> |
| <i>I.3.3. Modélisation d'une cellule PV.....</i> | <i>7</i> |
| <i>I.3.4. Caractéristiques d'une cellule PV.....</i> | <i>8</i> |
| <i>I.4. Module photovoltaïque.....</i> | <i>9</i> |
| <i>I.4.1. Modélisation d'un module PV.....</i> | <i>9</i> |
| <i>I.4.2. Description du module photovoltaïque BP 3165.....</i> | <i>10</i> |
| <i>I.4.3. Caractéristiques électriques typiques du module photovoltaïque BP 3165.....</i> | <i>10</i> |
| <i>I.4.4. Caractéristiques I(V)et P(V)du module aux conditions STC (25°C,1000W/m2).....</i> | <i>10</i> |
| <i>I.4.5. Effets des variations climatiques sur le module photovoltaïque.....</i> | <i>11</i> |
| <i>I.5. Générateur photovoltaïque.....</i> | <i>12</i> |
| <i>I.6. Conclusion.....</i> | <i>13</i> |

Chapitre II : Convertisseurs DC-DC et commande MPPT

| | |
|---|-----------|
| <i>II.1. Introduction.....</i> | <i>14</i> |
| <i>II.2. Convertisseurs DC-DC.....</i> | <i>14</i> |
| <i>II.2.1. Généralités sur les convertisseurs DC-DC.....</i> | <i>14</i> |
| <i>II.2.2 Types des convertisseurs DC-DC.....</i> | <i>15</i> |
| <i>II.3. Convertisseur Cuk.....</i> | <i>16</i> |
| <i>II.3.1. Principe de fonctionnement de convertisseur Cuk.....</i> | <i>16</i> |
| <i>II.3.2. Formes d'ondes.....</i> | <i>18</i> |

| | |
|---|----|
| II.3.3. Détermination des composants | 19 |
| II.3.4. Principe du PWM..... | 20 |
| II.3.5. Résultats de Simulation | 20 |
| II.4. Commande MPPT | 22 |
| II.4.1. Principe de La Commande MPPT | 23 |
| II.4.2. Classification des Commandes MPPT | 24 |
| II.4.3. Algorithmes MPPT..... | 24 |
| II.4.4. Autres méthodes de commande MPPT..... | 24 |
| II.5. Méthode perturbation et observation (P&O) | 24 |
| II.5.1. Résultats de simulation | 26 |
| II.6. Commande MPPT avec correcteur PI | 28 |
| II.6.1. Résultats de simulation | 28 |
| II.7. Conclusion | 30 |
| Chapitre III : Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau | |
| III.1. Introduction | 31 |
| III.2. Généralités sur les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau..... | 31 |
| III.2.1. Classifications des centrales photovoltaïques connectées au réseau (CPCR)..... | 31 |
| III.2.2. Structure générale d'un système photovoltaïque connecté au réseau..... | 32 |
| III.2.2.1. Systèmes à connexion directe au réseau | 32 |
| III.2.2.2. Systèmes avec hacheur | 34 |
| III.3. Modélisation et description du système PV connecté au réseau..... | 34 |
| III.3.1. Système photovoltaïque proposé | 34 |
| III.3.2. Présentation de la structure du système PV connecté au réseau :..... | 34 |
| III.3.2.1. Générateur photovoltaïque | 35 |
| III.3.2.2. Bus continu | 35 |
| III.3.2.3. Onduleur triphasé | 37 |
| III.3.3. Commande MLI de l'onduleur | 38 |
| III.3.4. Transformation de Park | 41 |
| III.3.5. Modèle du réseau dans le repère de Park | 42 |
| III.3.6. Modèle d'état équivalent | 43 |
| III.4. Simulation de la cascade sans application de la commande..... | 44 |
| III.4.1. Fonctionnement sous des conditions climatiques stables | 44 |
| III.4.2. Fonctionnement sous des changements climatiques..... | 47 |
| III.5. Conclusion | 50 |

Chapitre IV : Commandes Non linéaires appliquées au Système PV

| | |
|--|----|
| <i>IV.1. Introduction</i> | 51 |
| <i>IV.2. Commande linéarisante</i> | 51 |
| <i>IV.2.1. Géométrie différentielle</i> | 51 |
| <i>IV.2.1.1. Difféomorphisme</i> | 51 |
| <i>IV.2.1.3. Champ de vecteur</i> | 52 |
| <i>IV.2.1.4. Gradient</i> | 52 |
| <i>IV.2.1.5. Jacobien</i> | 52 |
| <i>IV.2.1.6. Dérivée de Lie</i> | 52 |
| <i>IV.2.2. Linéarisation entrée-sortie</i> | 52 |
| <i>IV.2.2.1. Procédure de linéarisation entrée-sortie</i> | 53 |
| <i>IV.2.3. Application de la commande linéarisante sur le système PV</i> | 53 |
| <i>IV.2.3.1. Rappel sur le modèle d'état de système</i> | 53 |
| <i>IV.2.3.2. Détermination de la commande</i> | 54 |
| <i>IV.2.3.3. Résultats de Simulation</i> | 57 |
| <i>IV.2.4. Etude de la robustesse</i> | 59 |
| <i>IV.3. Commande Backstepping</i> | 61 |
| <i>IV.3.1. Principe de la commande Backstepping</i> | 61 |
| <i>IV.3.2. Fonction de Lyapunov</i> | 61 |
| <i>IV.3.3. Méthode récursive de conception de backstepping</i> | 61 |
| <i>IV.3.4. Exemples</i> | 64 |
| <i>IV.3.5. Backstepping appliquée au système PV</i> | 67 |
| <i>IV.3.5.1. Commande backstepping pour le système PV</i> | 68 |
| <i>IV.3.5.2. Résultats de simulation</i> | 70 |
| <i>IV.3.6. Etude de la robustesse</i> | 72 |
| <i>IV.4. Conclusion</i> | 74 |
| <i>Conclusion Générale</i> | 75 |
| <i>Bibliographie</i> | 77 |

Liste des figures

| | |
|--|-----------|
| <i>Figure I. 1. Système photovoltaïque autonome</i> | <i>4</i> |
| <i>Figure I. 2. Système photovoltaïque hybride.....</i> | <i>4</i> |
| <i>Figure I. 3. Système photovoltaïque connecté au réseaux.</i> | <i>5</i> |
| <i>Figure I. 4. Structure d'une cellule photovoltaïque.....</i> | <i>6</i> |
| <i>Figure I. 5. Cellule mono-cristallines</i> | <i>6</i> |
| <i>Figure I. 6. Cellule poly-cristallines</i> | <i>6</i> |
| <i>Figure I. 7. Cellule amorphe.....</i> | <i>6</i> |
| <i>Figure I. 8. Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.....</i> | <i>7</i> |
| <i>Figure I. 9. Caractéristiques courant-tension d'une cellule solaire photovoltaïque.....</i> | <i>8</i> |
| <i>Figure I. 10. Caractéristiques I(V) (A) et P(V) (B) d'une cellule PV à $G=1000W/m^2$, $T=25^{\circ}C$.....</i> | <i>11</i> |
| <i>Figure I. 11. Influence de la température sur les caractéristiques I(V) (A) et P(V) (B) à $G=1000W/m^2$</i> | <i>12</i> |
| <i>Figure I. 12. Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I(V) (A) et P(V) (B) à $T=25^{\circ}C$</i> | <i>12</i> |
| <i>Figure I. 13. Puissance fournie par un générateur PV.....</i> | <i>13</i> |
| | |
| <i>Figure II. 1. Circuit électrique d'un convertisseur DC-DC de type Cuk.....</i> | <i>16</i> |
| <i>Figure II. 2. Circuit équivalent du convertisseur Cuk avec K fermé</i> | <i>17</i> |
| <i>Figure II. 3. Circuit équivalent du convertisseur Cuk avec K ouvert</i> | <i>17</i> |
| <i>Figure II. 4. Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Cuk</i> | <i>18</i> |
| <i>Figure II. 5. Circuit électrique d'un convertisseur DC-DC de type Cuk.....</i> | <i>21</i> |
| <i>Figure II. 6. Courant (A), tension (B) et puissance (C) d'entrée de convertisseur Cuk</i> | <i>21</i> |
| <i>Figure II. 7. Courant (A), tension (B) et puissance (C) de sortie de convertisseur Cuk.....</i> | <i>22</i> |
| <i>Figure II. 8. Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT.....</i> | <i>23</i> |
| <i>Figure II. 9. Principe de la commande MPPT.....</i> | <i>23</i> |
| <i>Figure II. 10. Algorithme de la méthode P&O.....</i> | <i>25</i> |
| <i>Figure II. 11. Tension (A), courant (B) et puissance (C) d'entrée de convertisseur Cuk (P&O).....</i> | <i>26</i> |
| <i>Figure II. 12. Tension (A), courant (B) et puissance (C) de sortie de convertisseur Cuk (P&O).....</i> | <i>27</i> |
| <i>Figure II. 13. Evolution du rapport cyclique</i> | <i>27</i> |
| <i>Figure II. 14. Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT à base régulateur PI.....</i> | <i>28</i> |

| | |
|---|----|
| Figure II. 15. courant d'entrée (A), tension d'entrée avec tension de référence (B) de convertisseur Cuk..... | 29 |
| Figure II. 16. Courant(A) et tension (B) de sortie de convertisseur Cuk..... | 29 |
| Figure II. 17. Puissance d'entrée et de sortie de convertisseur Cuk | 29 |
| Figure II. 18. Evolution du rapport cyclique | 30 |
| | |
| Figure III. 1. Générateur photovoltaïque connecté directement au réseau | 32 |
| Figure III. 2. Différents types d'onduleurs couplés au réseau..... | 33 |
| Figure III. 3. Générateur photovoltaïque relié au réseau par l'intermédiaire d'un hacheur et d'un onduleur | 34 |
| Figure III. 4. Composants de système photovoltaïque connecté au réseau | 34 |
| Figure III. 5. Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque..... | 35 |
| Figure III. 6. Caractéristiques courant-tension (A) et puissance-tension (B) du champ PV à $G=1000 \text{ W/m}^2$ | 36 |
| Figure III. 7. Caractéristiques courant-tension (A) et puissance-tension (B) du champ PV à $T=25^\circ\text{C}$ | 36 |
| Figure III. 8. Schéma de l'onduleur de tension..... | 37 |
| Figure III. 9. Technique de MLI sinus-triangle..... | 39 |
| Figure III. 10. Différents signaux de la stratégie triangulo-sinusoïdale ($m=7$) | 40 |
| Figure III. 11. Tension de phase V_a (A) et son spectre d'harmoniques (B) ($m = 7$) | 40 |
| Figure III. 12. Différents signaux de la stratégie triangulo-sinusoïdale ($m=14$) | 40 |
| Figure III. 13. Tension de phase V_a (A) et son spectre d'harmoniques (B) ($m = 14$)..... | 41 |
| Figure III. 14. Système triphasé. | 42 |
| Figure III. 15. Référentielle fixe. | 42 |
| Figure III. 16. Référentielle tournant | 42 |
| Figure III. 17. Courant (A) et la tension (B) fournis par le générateur PV..... | 45 |
| Figure III. 18. Puissance fournie par le générateur PV..... | 45 |
| Figure III. 19. Tension e_a et courant i_a de la phase (a) du réseau..... | 45 |
| Figure III. 20. Tension de phase à la sortie de l'onduleur (A), le courant de la phase (a) (B) et les composantes i_d (C), i_q (D) du courant du réseau | 46 |
| Figure III. 21. Forme de variation de l'irradiation solaire | 47 |
| Figure III. 22. Effet du rayonnement sur la tension V_{dc} (A), le courant i_{pv} (B), les composantes i_d (C), i_q (D) du réseau et la puissance P_{pv} (E)..... | 48 |
| Figure III. 23. Forme de variation de la température..... | 48 |

| | |
|--|-----------|
| <i>Figure III. 24. L'effet de la température sur la tension V_{dc} (A), le courant i_{pv} (B), les composantes i_d (C), i_q (D) du réseau et la puissance P_{pv} (E).....</i> | <i>49</i> |
| <i>Figure IV. 1. Intégrateurs équivalentes aux sous-systèmes linéaires.....</i> | <i>56</i> |
| <i>Figure IV. 2. Schéma de la commande linéarisante appliquée au système PV.....</i> | <i>57</i> |
| <i>Figure IV. 3. Composants i_q (A) et i_d (B) du courant du réseau.</i> | <i>58</i> |
| <i>Figure IV. 4. Courant I_{pv} (A) et puissance P_{pv} (B) de champ photovoltaïque</i> | <i>58</i> |
| <i>Figure IV. 5. Tension continue à l'entrée de l'onduleur V_{dc} et sa référence.</i> | <i>58</i> |
| <i>Figure IV. 6. Tension et courant de phase de réseau.....</i> | <i>59</i> |
| <i>Figure IV.7. Composants I_q (A) et I_d (B) du courant du réseau avec le test de robustesse</i> | <i>60</i> |
| <i>Figure IV.8. Courant i_{pv} (A) et puissance p_{pv} (B) de champ PV avec le test de robustesse</i> | <i>60</i> |
| <i>Figure IV.9. Tension continue à l'entrée de l'onduleur v_{dc} et sa référence avec le test de robustesse</i> | <i>60</i> |
| <i>Figure IV. 10. Tension e_a et courant i_a de phase de réseau avec le test de robustesse</i> | <i>61</i> |
| <i>Figure IV.11. Evolution de x_1 (A) et x_2 (B).....</i> | <i>65</i> |
| <i>Figure IV.12. Signal de commande (A) et erreur de poursuite (B).....</i> | <i>65</i> |
| <i>Figure IV. 13. Evolution de x_1 (A) et x_2 (B).....</i> | <i>66</i> |
| <i>Figure IV. 14. Signal de commande (A) et erreur de poursuite (B).....</i> | <i>66</i> |
| <i>Figure IV.15. Schéma de la commande backstepping appliquée au système PV.....</i> | <i>70</i> |
| <i>Figure IV. 16. Composants I_q (A) et I_d (B) du courant de réseau</i> | <i>71</i> |
| <i>Figure IV. 17. Courant i_{pv} (A) et puissance p_{pv} (B) du champ photovoltaïque</i> | <i>71</i> |
| <i>Figure IV. 18. Tension continue à l'entrée de l'onduleur et sa référence</i> | <i>71</i> |
| <i>Figure IV. 19. Tension e_a et courant i_a de phase de réseau.....</i> | <i>72</i> |
| <i>Figure IV. 20. Composants I_q (A) et I_d (B) du courant du réseau avec le test de robustesse</i> | <i>73</i> |
| <i>Figure IV. 21. Courant i_{pv} (A) et puissance p_{pv} (B) de champ PV avec le test de robustesse</i> | <i>73</i> |
| <i>Figure IV. 22. Tension continue à l'entrée de l'onduleur v_{dc} et sa référence avec le test de robustesse</i> | <i>73</i> |

Figure IV. 23. Tension e_a et courant i_a de phase de réseau avec le test de robustesse74

Liste des tableaux

| | |
|---|-----------|
| <i>Tableau I. 1. Caractéristiques électriques typiques du module BP3165</i> | <i>11</i> |
| <i>Tableau II. 1. Fonctionnement et les rapports de transformation des principaux convertisseurs DC-DC.....</i> | <i>15</i> |

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie est la préoccupation essentielle pour l'homme dans le monde actuel, ses sources, est la question que le futur va poser à l'homme. Cependant, l'histoire réserve parfois des surprises. Avec la diminution du stock mondial d'hydrocarbures d'origine fossile (pétrole, gaz et charbon), la demande énergétique sans cesse croissante, et la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante. Les énergies renouvelables (solaire, marine, éolienne, etc.) reviennent au premier plan de l'actualité, surtout que leur exploitation arrange beaucoup l'environnement [1].

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables les plus utilisées. Elle trouve son avantage dans des applications de petite et moyenne consommation dans des régions isolées et loin des lignes de distributions électrique. Cette énergie trouve aussi ses applications dans le domaine de l'espace (satellites, sondes...) [2].

Les panneaux solaires sont l'élément de base de tout système photovoltaïque. Ils sont constitués de cellules photosensibles reliées entre elles. Chaque cellule convertit les rayons provenant du soleil en électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Une caractéristique importante des panneaux solaires est que la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement défini par une tension et un courant connus, appelé point de puissance maximale. En outre, la position de ce point n'est pas fixe mais elle se déplace en fonction de l'irradiation et de la température des cellules solaires ainsi que de la charge utilisée. A cause du coût relativement onéreux de ce genre d'énergie, on doit extraire le maximum de puissance des panneaux solaires. Cela nécessite un mécanisme de poursuite de ce point afin que la puissance maximale soit générée en permanence ce qui est connu sous le nom de commande MPPT « The maximum power point tracking » [3].

Les installations PV raccordées aux réseaux électriques peuvent utiliser les onduleurs classiques à deux niveaux. Ce dernier doit être commandé de manière que non seulement il

injecte un courant avec la basse déformation harmonique total (THD), mais laisse également commander la puissance réactive injectée dans le réseau [2].

Dans ce mémoire, nous nous intéressons au problème de la recherche du point de puissance maximale et le réglage de puissance réactive du réseau électrique en utilisant deux techniques de commande non linéaires à savoir : la commande linéarisante et la commande Backstepping.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres, réparti comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présenterons le principe de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque, sa modélisation mathématique et ses caractéristiques ainsi que les différents types des systèmes photovoltaïques. Une simulation numérique des caractéristiques d'un module est réalisée sous Matlab.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons une étude préliminaire des principaux convertisseurs DC-DC utilisés dans les chaînes de conversion photovoltaïques, une modélisation de ces convertisseurs sera présentée aussi dans ce chapitre. Nous parlons également des principaux algorithmes de recherche du point de puissance maximale de la source photovoltaïque. Enfin, nous étudierons deux structures de commande MPPT (direct et indirect) d'un système PV associé à un convertisseur de type Cuk.

Dans le chapitre III, nous présenterons des généralités sur les systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique ainsi que les différentes cascades et convertisseurs utilisés. Puis nous présenterons une modélisation et une description détaillée des éléments de notre système. A la fin de chapitre, nous simulerons la cascade sous les conditions climatiques stables et variables.

Dans le chapitre IV, on va présenter notre travail principal de ce mémoire sur la commande non linéaire appliquée à un système PV connecté au réseau. Deux techniques de commande non linéaire seront abordées : la commande linéarisante et la commande backstepping. Premièrement, nous présenterons leurs fondements théoriques ensuite nous les utiliserons pour concevoir deux régulateurs non linéaires performants. L'objectif de commande est d'assurer la poursuite de point de puissance maximale et la commande de la puissance réactive.

Enfin, on terminera par une conclusion générale discutant les résultats obtenus.

Chapitre I.

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Chapitre I. Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie, malgré qu'il y a une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la qualité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol.

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 par le moyen dit cellule photovoltaïque.

En effet le terme « photovoltaïque » vient du Grec et qui signifie lumière, il est composé de deux parties : « photos » (lumière) et du nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta), qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité.

Dans ce chapitre nous allons voir un bref rappel sur la cellule, le module et le générateur photovoltaïque et ses performances, le système photovoltaïque et ses types. Une étude en simulation des caractéristiques d'un système photovoltaïque sera présentée à la fin de ce chapitre avec l'étude de l'effet du changement climatique

I.2. Système photovoltaïque

Le système photovoltaïque est composé de trois parties essentielles qui sont :

- **Partie production d'énergie** : cette partie est composée d'un ou plusieurs modules qui se comporte comme un générateur à courant continu.
- **Partie contrôle de l'énergie** : les convertisseurs statiques DC-DC et DC-AC.
- **Partie utilisant l'énergie produite** : elle se compose d'un ou plusieurs récepteurs qui utilisent l'énergie produite et qui est contrôlée [4].

I.2.1. Types des systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques sont actuellement divisés en trois catégories : Autonome, hybride et raccordé au réseau électrique [5].

a) Système autonome

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autres sources d'énergies, ils servent habituellement à alimenter des utilisations en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi que le pompage de l'eau. Un système autonome exige des batteries pour stocker l'énergie.

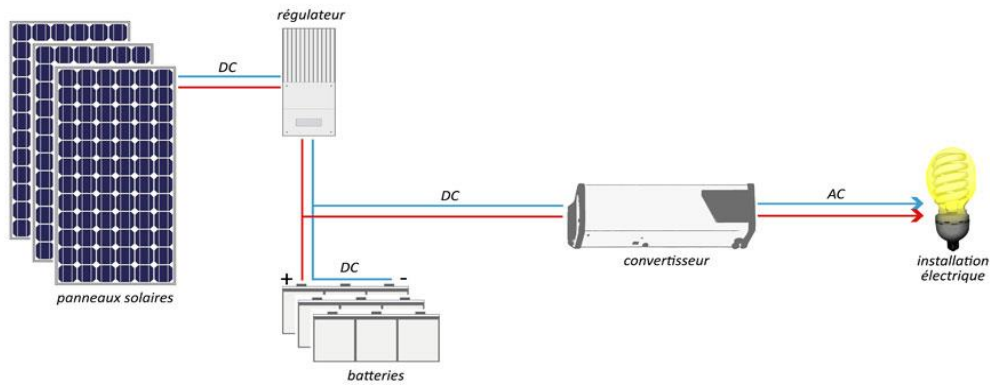


Figure I. 1 .Système photovoltaïque autonome

b) Système hybride

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible. Ce type de système s'applique particulièrement bien à des sites éloignés où il est important d'avoir de l'électricité à tout moment, où les coûts de transport du carburant sont élevés

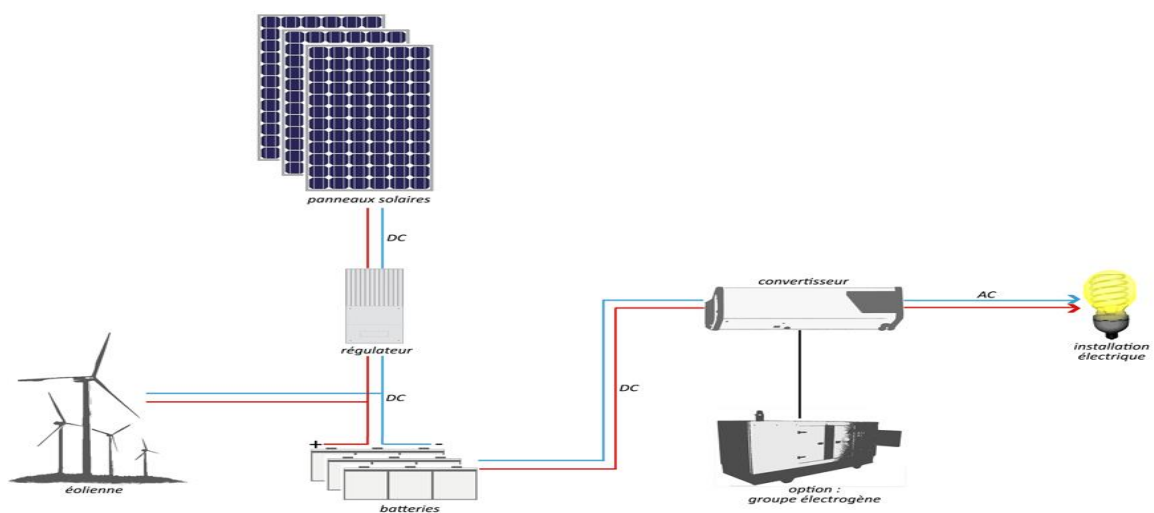


Figure I. 2. Système photovoltaïque hybride

c) Système connecté au réseau

Le système photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur Courant Continu/Courant Alternatif (DC-AC). Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même. L'avantage du raccordement est de se dispenser du problème de stockage de l'électricité.

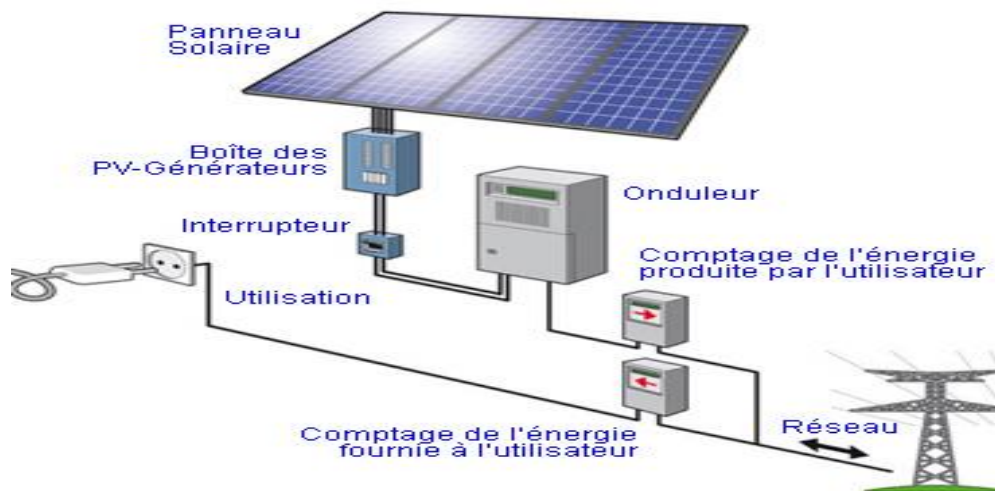


Figure I. 3. Système photovoltaïque connecté au réseau.

I.3. Cellule photovoltaïque

La cellule PV est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs de type P-N qui produisent un courant électrique sous l'effet des photons lumineux. Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (SI) [4].

I.3.1. Principe de fonctionnement d'une cellule PV

La structure la plus simple de ce dispositif est assimilable à une diode photosensible basée sur des matériaux semi-conducteurs qui exploite l'effet photovoltaïque, un phénomène physique permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité. Le principe de fonctionnement se résume comme suit :

Lorsque la cellule est exposée au rayonnement solaire, les photons d'énergie ($E_{ph} = h.v$) pénétrant dans la cellule solaire transmettent leur énergie aux atomes de la jonction. Si cette énergie est suffisamment élevée, elle peut faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur et créer ainsi des paires « électron-trou ». Les électrons (charges N) et les trous (charges P), sont alors maintenus séparés par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel.

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel et un courant électrique [6].

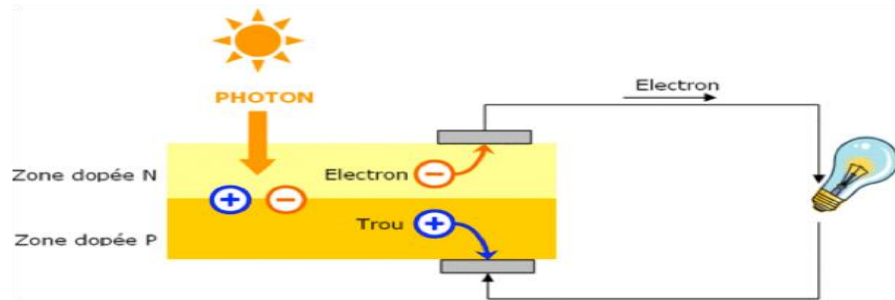


Figure I. 4. Structure d'une cellule photovoltaïque

I.3.2. Types des cellules PV

Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle [7] :

a) Cellules mono-cristallines :

Ce sont celles qui ont le meilleur rendement (12-16%), mais aussi celles qui ont le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée.

b) Cellules poly-cristallines :

Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible : (11% -13%).

c) Cellules amorphes :

Elles ont un faible rendement (8% - 10%), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans les produits de petite consommation tels que les calculatrices solaires ou encore les montres.



Figure I. 5. Cellule mono-cristallines



Figure I. 6. Cellule poly-cristallines

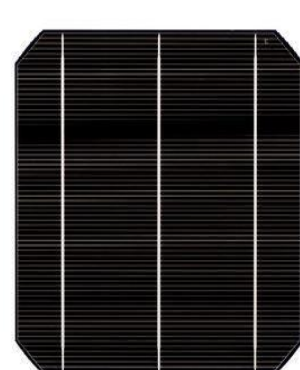


Figure I. 7. Cellule amorphe

I.3.3. Modélisation d'une cellule PV

Une cellule PV peut être représentée par le circuit électrique équivalent illustré sur la figure I.8. Ce circuit est constitué de :

Un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode qui représente la jonction P-N, et deux résistances :

R_{sh} : résistance parallèle caractérisant le courant de fuite à la surface de la cellule dûe au non idéalité de la jonction P-N et des impuretés près de la jonction.

R_s : résistance série représentant les diverses résistances de contact et la résistance du semi-conducteur [8].

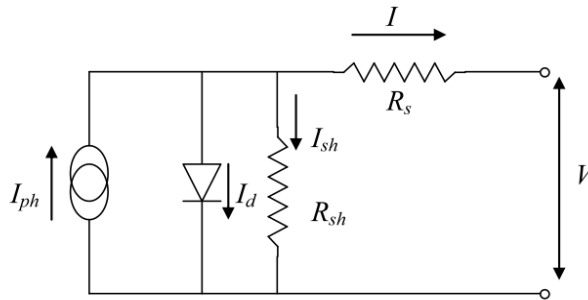


Figure I. 8. Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

Le courant de sortie fourni par la cellule est obtenu en appliquant la loi de Kirchhoff, dans le circuit équivalent ci-dessus

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{I.1})$$

avec :

$$I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{V}{n.v_T}\right) - 1 \right] \quad (\text{I.2})$$

$$v_T = \frac{k.T}{q} \quad (\text{I.3})$$

donc (I.1), devient :

$$I = I_{ph} - \left[\exp\left(\frac{v}{n.v_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s.I}{R_{sh}} \quad (\text{I.4})$$

Généralement, l'effet de la résistance parallèle du circuit électrique équivalent est négligé, car son influence n'est prépondérante que pour des niveaux d'éclairement très bas.

Donc, le courant de sortie fourni par la cellule est :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V}{n.v_T}\right) - 1 \right] \quad (I.5)$$

où :

I_{ph} : Photo-courant en A

I_d : Courant de la diode en A

V : Tension aux la bornes de la cellule en V

I_s : Courant de saturations de polarisation inverse de la diode en A

I : Courant de sortie de la cellule en A

n : Facteur d'idéalité de la diode

K : Constante de Boltzmann en J/K ($1,381.10^{-23}$)

q : Charge de l'électron en C ($1,602.10^{-23}$)

v_T : Tension thermique en V

T : Température de la cellule en K

I.3.4. Caractéristiques d'une cellule PV

Sous un éclairement et une température donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension figure I.9 représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule, ses caractéristiques sont spécifiées par le fabricant : Le courant de court-circuit (I_{SC}), la tension à circuit ouvert (V_{OC}), la puissance maximale (P_{mpp}), le facteur de forme (FF) [2].

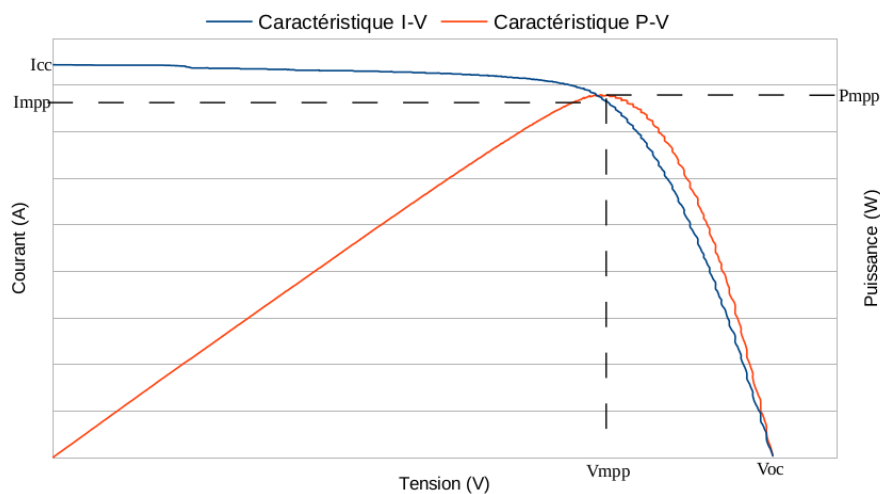


Figure I. 9. Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule solaire photovoltaïque

- **Courant de court-circuit (I_{SC}) :**

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir.

- **Tension à circuit ouvert (V_{OC}) :**

Pour une charge infiniment grande (circuit ouvert), le courant de sortie est nul et la tension aux bornes de la cellule est maximale. Cette tension est appelée tension de circuit ouvert V_{OC}

- **Puissance maximale (P_{mpp}) :**

Il existe un point particulier sur la courbe caractéristique (I/V), pour lequel la puissance $P = I.V$ fournie par la cellule est maximale. Ce point est appelé, Point de Puissance Maximum (en anglais Maximum Power Point, MPP).

- **Facteur de forme (FF)**

On appelle facteur de forme FF , le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite (V_{mpp}, I_{mpp}) et le produit (V_{OC}, I_{SC}).

$$FF = \frac{V_{mpp} \cdot I_{mpp}}{V_{OC} \cdot I_{sc}} \quad (I.6)$$

d'où :

V_{mpp} : Tension de point de puissance maximale de la photopile en V

I_{mpp} : Courant de point de puissance maximale de la photopile en A

I.4. Module photovoltaïque

Rappelons tout d'abord qu'un module photovoltaïque est un convertisseur d'énergie lumineuse en électricité. Le module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles en série, afin d'élever la tension d'utilisation, et en parallèle, dans le but d'augmenter l'intensité d'utilisation.

I.4.1. Modélisation d'un module PV

Le modèle que nous avons utilisé pour simuler le comportement du module PV est basé sur le modèle électrique équivalent simplifié représenté sur la figure I.8 et dont l'expression du courant délivré par le module est donnée par [9] :

$$I_{module} = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{q \cdot (v_{module} + N_s \cdot I \cdot R_s)}{N_s + n \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right] \quad (I.7)$$

avec :

$$I_{ph} = I_{SC} + k_0 (T - T_{ref}) G / G_{ref} \quad (I.8)$$

$$I_s = I_{rs} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{n}} \exp \left(\frac{-q.E_g}{n.k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right) \quad (I.9)$$

$$I_{rs} = \frac{I_{SC}}{\exp \left(\frac{v_{OC}}{n.v.T} \right) - 1} \quad (I.10)$$

Où :

K_0 : coefficient de température de courant court-circuit ;

T_{ref} : température de référence (298 K) ;

I_{rs} : courant de saturation de diode pour T_{ref} ;

E_g : énergie de gap de cellule en eV ;

N_s : nombre de cellule en série.

I.4.2. Description du module photovoltaïque BP 3165

Le BP 3165 est un module avancé de 165 W qui utilise des cellules poly-cristallines. Le BP3165 a été spécialement conçu pour les applications connectées aux réseaux tels que les grands toits commerciaux, les systèmes résidentiels, les centrales photovoltaïques, les télécommunications, les systèmes de pompage d'eau et les systèmes domestiques.

Ce module de 72 cellules offre un rapport qualité-prix supérieur avec une feuille de polyester blanche et cellules innovantes à haute efficacité [10].

I.4.3. Caractéristiques électriques typiques du module photovoltaïque BP 3165

Le tableau I.1 résume les caractéristiques électriques du module PV fournies par le constructeur [10].

I.4.4. Caractéristiques I(V) et P(V) du module aux conditions STC (25°C, 1000W/m²)

La simulation des caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'un module solaire sous des conditions particulières d'ensoleillement et de température, est donnée par figure I.10

On remarque que dans un premier temps la tension augmente, le courant quant à lui reste stable. Dans un second temps, le courant baisse légèrement et la tension augmente peu (nous

sommes dans la zone du point de puissance maximal PPM) dans un troisième temps, le courant baisse fortement et la tension augmente très peu

On remarque que la puissance augmente linéairement jusqu'à la valeur maximal (165W) puis diminue rapidement.

| | |
|--|---|
| Puissance maximal (P_{mpp}) | 165W |
| Tension à puissance maximal | 35.2 V |
| Courant à puissance maximal | 4.7 A |
| Courant de court-circuit (I_{sc}) | 4.8 A |
| Tension à circuit ouvert (V_{oc}) | 44.2 V |
| Coefficient de température de Courant de court-circuit | $(0.065 \pm 0.015)\%/^{\circ}\text{C}$ |
| Coefficient de température de Tension à circuit ouvert | $-(160 \pm 20)\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ |
| Coefficient de température de la puissance | $-(0.5 \pm 0.05)\%/^{\circ}\text{C}$ |

Tableau I. 1. Caractéristiques électriques typiques du module BP3165

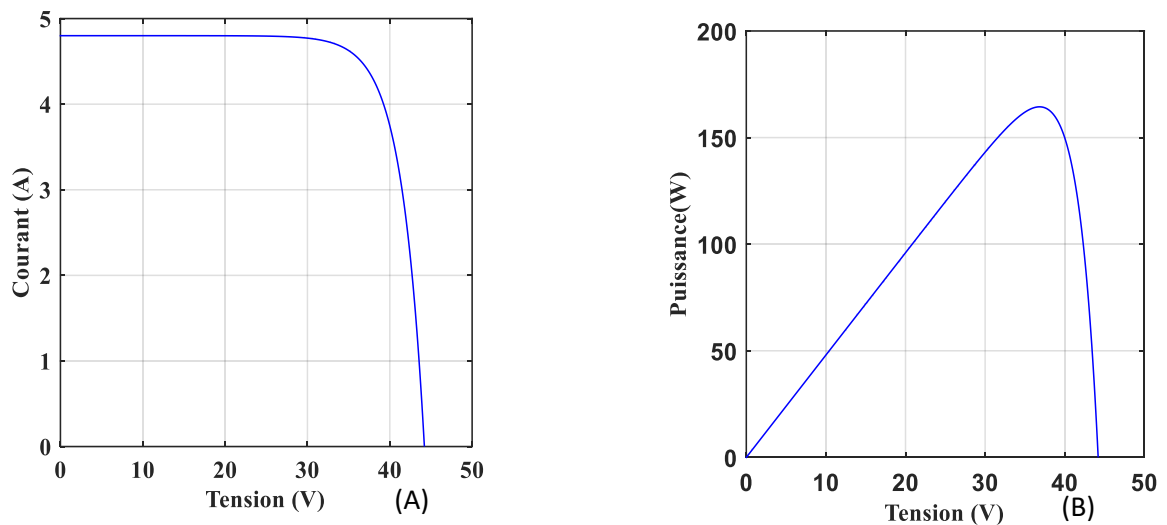


Figure I. 10. Caractéristiques I(V) (A) et P(V) (B) d'une cellule PV à $G=1000\text{W}/\text{m}^2$, $T=25^{\circ}\text{C}$

I.4.5. Effets des variations climatiques sur le module photovoltaïque

a) Variation de la température

On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue.

A partir de la figure I.12, il est clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement.

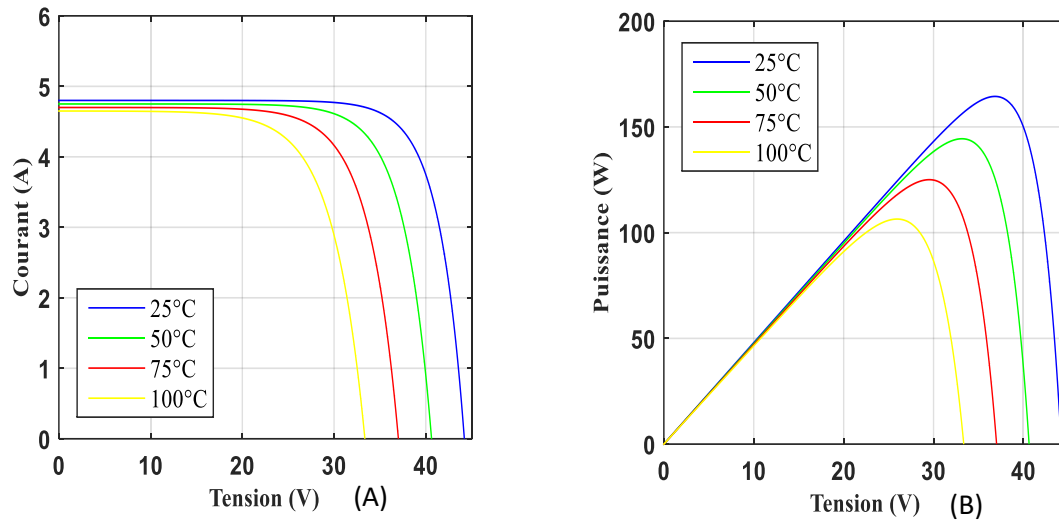


Figure I. 11. Influence de la température sur les caractéristiques $I(V)$ (A) et $P(V)$ (B) à $G=1000\text{W/m}^2$

b) Variation de l'éclairement

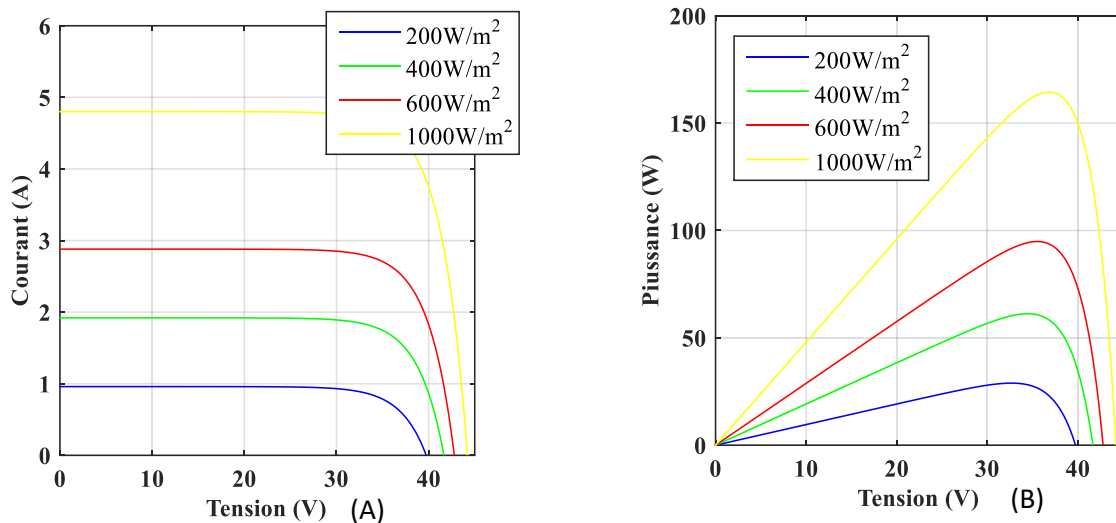


Figure I. 12. Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I(V)$ (A) et $P(V)$ (B) à $T=25^\circ$

La puissance délivrée par le module PV dépend de l'éclairement qu'il reçoit. En effet, pour l'influence de l'éclairement, on peut dire que :

- La puissance maximale du module PV est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

I.5. Générateur photovoltaïque

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules

interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel. Les modules PV sont habituellement en série-parallèle branchés pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur.

Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules. Dans ce travail, nous avons simulé un GPV qui comporte 5 modules monté on parallèles et chaque module comporte 72 cellules solaires de silicium poly-cristallin connectées en série. C'est-à-dire que la puissance fournie est importante (au voisinage de 822W).

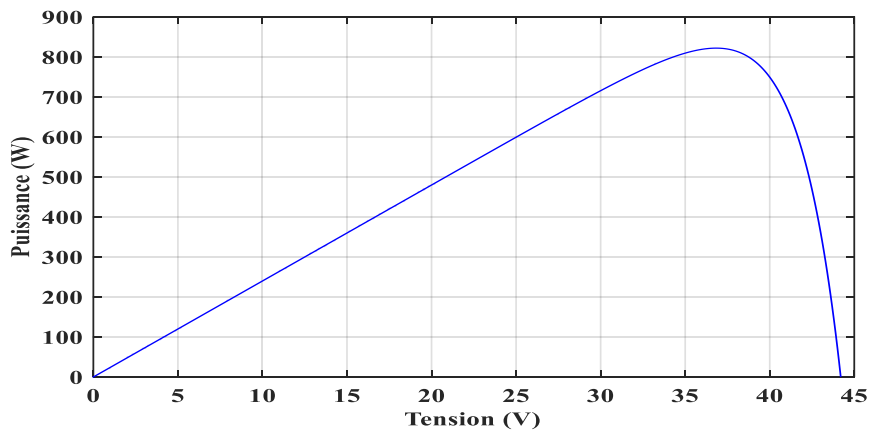


Figure I. 13. Puissance fournie par un générateur en fonction de tension

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïques et ses différents composants, ensuite on a fait un rappel sur la cellule photovoltaïque, le principe de fonctionnement, et les différents types de cellules existants, et aussi un rappel sur le module et le générateur photovoltaïque. En plus, on a donné une modélisation mathématique de la cellule basée sur un modèle électrique équivalent. Une simulation numérique sous Matlab d'un système photovoltaïque est présentée pour mettre en évidence ses caractéristiques. On a étudié aussi l'effet des changements climatiques sur l'énergie produite par le module photovoltaïque.

Dans le prochain chapitre, nous allons présenter une association d'un système PV avec un convertisseur DC-DC afin de commander sa puissance en se basant sur l'algorithme MPPT.

Chapitre II.
Convertisseurs DC-DC et commande
MPPT

Chapitre II. Les convertisseurs DC-DC et la commande MPPT

II.1. Introduction

Dans le chapitre précédent on a étudié les caractéristiques d'un module solaire qui montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température. En plus de ces dépendances, le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement, la position de ce point de fonctionnement dépendant à son tour de l'ensoleillement et de la température ainsi que de la charge. Pour que le module fournisse sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque.

Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur) contrôlé par un mécanisme de poursuite « Maximum Power Point Tracking » (MPPT).

Le but de ce chapitre est de présenter quelques types de convertisseurs DC-DC utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Ainsi, on montre leurs principes de fonctionnement et nous étudierons le dimensionnement des composants d'un convertisseur abaisseur-élevateur de type Cuk, et ceci, pour assurer le fonctionnement au point maximum de la puissance. Nous étudierons aussi dans ce chapitre deux techniques de la commande MPPT, à savoir : la commande MPPT directe (méthode P&O) et la méthode MPPT à base d'un régulateur PI. Des résultats de simulation seront présentés pour chaque cas.

II.2. Convertisseurs DC-DC

II.2.1. Généralités sur les convertisseurs DC-DC

Le hacheur est un convertisseur continu\continu permettant de convertir une énergie à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue.

Ils sont souvent utilisés comme une interface d'adaptation qui assure la poursuite du point de puissance maximale selon des stratégies de contrôle spécifiques.

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs [3].

II.2.2. Types des convertisseurs DC-DC

Les convertisseurs DC-DC sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. Les trois configurations de base sont [5] :

- Abaisseurs (Buck),
- Elévateurs (Boost),
- Elévateurs - Abaisseurs (Buck-Boost).

Il existe d'autres types de convertisseur DC-DC plus complexes. Le tableau II.1 résume les principaux rapports de transformation en fonction du rapport cyclique de chaque type de convertisseur, où D désigne le rapport cyclique du convertisseur et K le rapport de transformation du transformateur d'isolement [1] [11].

| Convertisseur | Rapport de transformation en fonction de (D) | Fonction |
|---------------|--|----------------------|
| Buck | D | Abaisseur |
| Boost | $\frac{1}{1-D}$ | Elévateur |
| Buck-Boost | $\frac{-D}{1-D}$ | Abaisseur/ Elévateur |
| Cuk | $\frac{-D}{1-D}$ | Abaisseur/ Elévateur |
| Flyback | $K \frac{D}{1-D}$ | Abaisseur/ Elévateur |
| Push Pull | KD | Abaisseur/ Elévateur |

Tableau II. 1. Fonctionnement et les rapports de transformation des principaux convertisseurs DC-DC

Dans notre étude nous présentons le principe d'un convertisseur DC-DC de types Cuk, qui est utilisé dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités.

Pour ce type de convertisseur, la tension moyenne de sortie V_0 est inférieure ou supérieure à celle de l'entrée V et ceci pour un rapport cyclique D donné.

II.3. Convertisseur Cuk

Un convertisseur Cuk utilise un condensateur pour stocker l'énergie. Le convertisseur Cuk tient son nom de son inventeur et le premier à décrire cette topologie dans un article. Le Cuk est constitué de deux inductances, de deux condensateurs, d'un interrupteur (Généralement un transistor) et d'une diode. Le schéma de base d'un convertisseur Cuk est représenté par la figure II.1 [12].

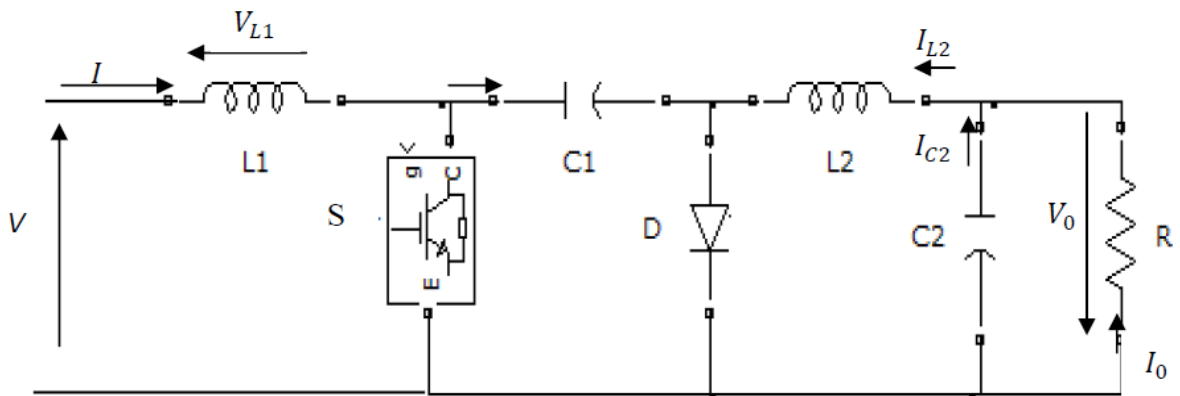


Figure II. 1. Circuit électrique d'un convertisseur DC-DC de type Cuk

Un inconvénient subsiste concernant l'inversion du signe de la tension de sortie par rapport à celle de l'entrée. Par sa structure, le convertisseur Cuk peut travailler avec des tensions de sortie plus petites ou plus grandes que la tension d'entrée.

II.3.1. Principe de fonctionnement de convertisseur Cuk

Le fonctionnement de base d'un convertisseur Cuk en mode de conduction continue est l'objet de cette section. En régime permanent, les tensions moyennes des inductances sont nulles, ainsi en appliquant la loi des mailles autour de la boucle extérieure du circuit représenté sur la figure II.1, on trouve [12] :

$$V_{C1} = V + V_0 \quad (\text{II.1})$$

A l'état initial l'interrupteur (S) est bloqué, la diode (D) est passante, et le condensateur ($C1$) est chargé. L'opération du circuit peut être divisée en deux modes :

Mode 1 : Quand l'interrupteur est fermé, le circuit est représenté sur la figure II.2. La tension du condensateur (C1) bloque la diode (D) par polarisation en inverse.

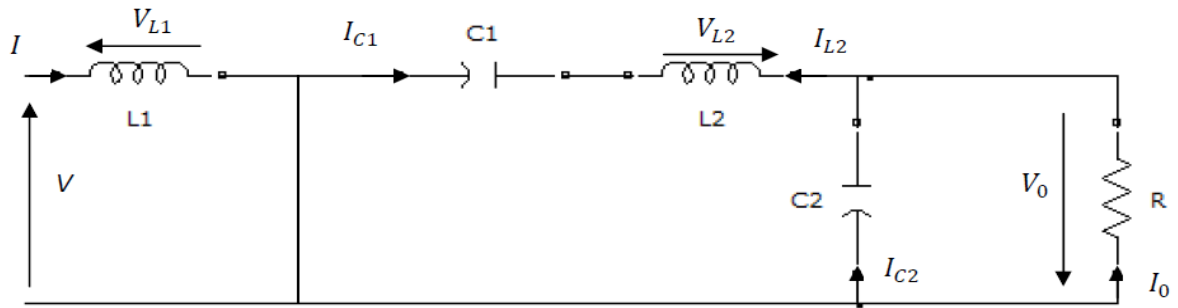


Figure II. 2. Circuit équivalent du convertisseur Cuk avec K fermé

Le condensateur (C1) décharge son énergie dans la charge à travers la boucle formée par L'interrupteur (K), C2, R et L2. Les inductances sont supposées assez grandes, ainsi que les ondulations de leurs courants sont négligeables. Ce qui donne :

$$-I_{C1} = I_{L2} \tag{II.2}$$

Mode 2 : Quand l'interrupteur est ouvert, le circuit est représenté sur la figure II.3

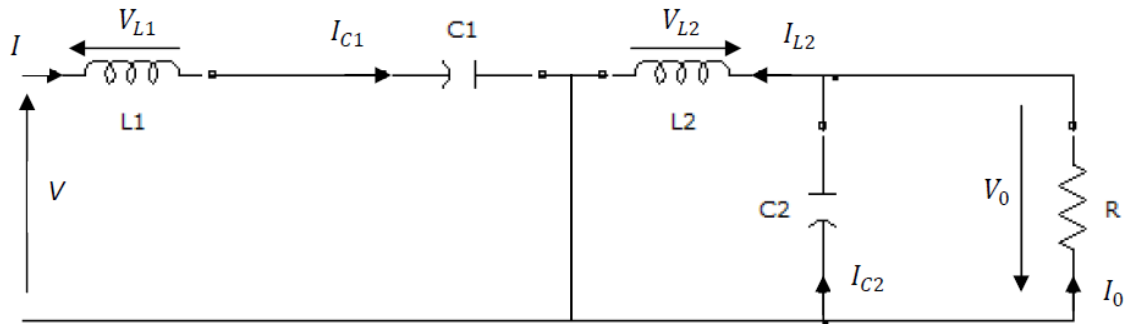


Figure II. 3. Circuit équivalent du convertisseur Cuk avec K ouvert

Le condensateur (C1) se charge par la tension d'entrée (V) à travers l'inductance (L1). L'énergie stockée dans l'inductance (L2) est transférée à la charge par la boucle constituée par D, C2, L2 et R. On peut écrire donc :

$$I_{C1} = I_{L1} \quad \text{avec} \quad I_{L1} = I \tag{II.3}$$

Comme le phénomène est périodique, le courant moyen du condensateur (C1) est nul. Ainsi, des équations (II.2) et (II.3), il vient :

$$[I_{C1} /_{Kon}]DT + [I_{C1} /_{Koff}](1-D)T = 0 \tag{II.4}$$

où D est le rapport cyclique, et T est la période de commutation. L'équation (II.4) est simplifiée comme suit :

$$-I_{L2}DT + I_{L1}(1-D)T = 0 \tag{II.5}$$

Donc :

$$\frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \frac{-D}{1-D} \tag{II.6}$$

En supposant que le convertisseur est idéal, la puissance moyenne fournie par la source doit être égale à la puissance moyenne absorbée par la charge.

$$P = P_0 \tag{II.7}$$

Ce qui donne :

$$VI_{L1} = V_0 I_{L2} \tag{II.8}$$

Il vient donc :

$$\frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \frac{V_0}{V} \tag{II.9}$$

A partir des équations (II.6) et (II.9), la tension de sortie du convertisseur Cuk est :

$$V_0 = \frac{-D}{1-D}V \tag{II.10}$$

II.3.2. Formes d'ondes

La figure suivante donne les formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Cuk sur une période de commutation [11].

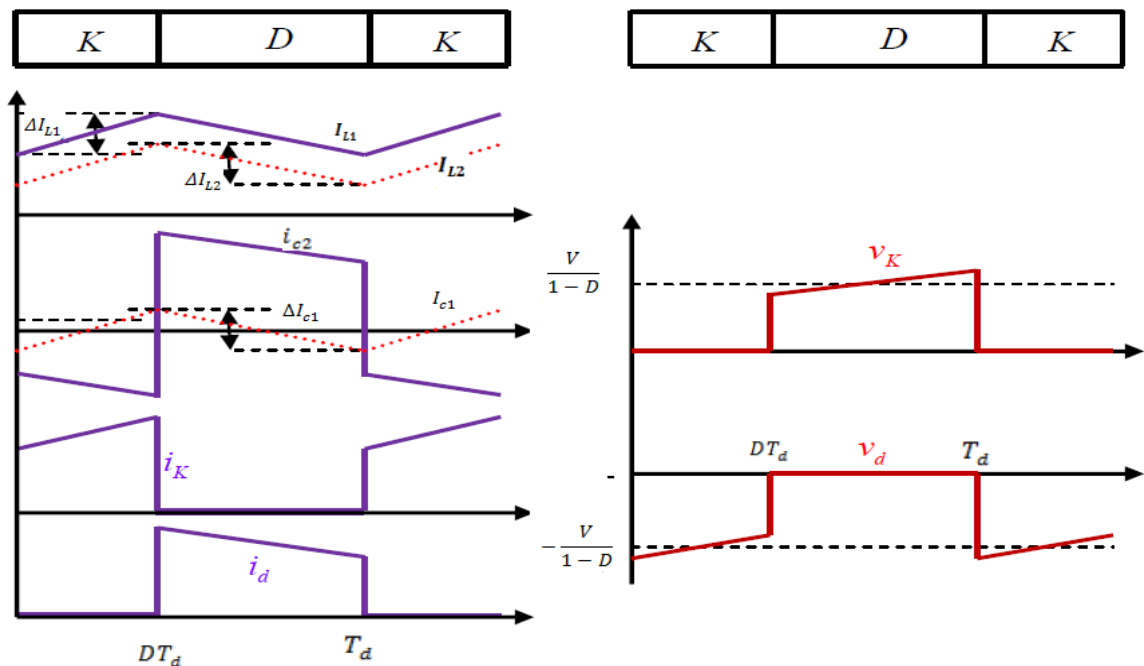


Figure II. 4. Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Cuk

Les ondulations de courant dans les deux inductances :

$$\Delta I_{L1} = \frac{V \cdot D}{f L_1} \quad (\text{II.11})$$

$$\Delta I_{L2} = \frac{VD}{f L_2} \quad (\text{II.12})$$

L'ondulation de la tension de sortie :

$$\Delta V_0 = \frac{\Delta I_{L2}}{8C_2 f} = \frac{DV}{8C_2 L_2 f^2} \quad (\text{II.13})$$

L'ondulation de la tension aux bornes de $C1$:

$$\Delta V_{C1} = \frac{VD^2}{(1-D)C_1 fR} \quad (\text{II.14})$$

II.3.3. Détermination des composants

Le dimensionnement de chaque composant du convertisseur Cuk est en fonction de l'application et du type du générateur PV utilisé [12].

Rappelons que le point de puissance maximale du générateur PV pour le modèle BP3165 considéré dans ce mémoire et extrait de la figure I.13 dans le chapitre précédent est défini par : $P_{\max} = 822.10 \text{ W}$ avec la tension $V_{\max} = 36.8 \text{ V}$ et le courant $I_{\max} = 22.33 \text{ A}$. La fréquence choisie est $f = 5 \text{ KHz}$. Sachant que la résistance de charge est $R = 5 \Omega$.

- **Calcul de la tension de sortie du convertisseur**

La puissance consommée par la charge est : $P_0 = \frac{v_0^2}{R}$, la puissance P_0 doit être égale à la puissance maximale fournie par le panneau photovoltaïque *i.e.* $P_0 = 822.107$. La tension de sortie est : $V_0 = 64.11 \text{ V}$.

- **Calcul du courant de sortie**

À partir de l'équation (II.6), le courant de charge est $I_0 = 13.11 \text{ A}$

- **Calcul du rapport cyclique**

À partir de l'équation (II.10), le rapport cyclique est : $D = 0.63$.

- **Calcul des inductances**

La taille de l'inductance dépend de l'ondulation du courant de l'inductance fixée généralement à 5% du courant moyen de l'inductance. À partir de l'équation (II.11), on trouve

que l'inductance L_1 est égale à : $L_1 = 4.15 \times 10^{-4} H$, et à partir de l'équation (II.12), on trouve que l'inductance L_2 est égale à : $L_2 = 7.07 \times 10^{-4} H$.

- **Calcul des capacités**

Les capacités des condensateurs sont calculées en supposant que les ondulations de tension ne dépassent pas 5% de leurs valeurs moyennes. Donc, à partir de l'équation (II.14), on trouve : $C_1 = 8.591 \times 10^{-5} F$, et à partir de l'équation II.13, on trouve que : $C_2 = 5.108 \times 10^{-7} F$.

II.3.4. Principe du PWM

Dans les convertisseurs DC-DC, la tension de sortie doit être régulée pour être constamment égale à une tension de référence, du fait que la tension d'alimentation V et les caractéristiques de la charge peuvent varier [12].

Une méthode pour réguler la tension de sortie V_0 afin d'obtenir une tension moyenne V_{0moy} fixe consiste à ajuster en permanence le rapport cyclique de commande de l'interrupteur D . Cette méthode qui consiste à faire varier la largeur des impulsions de commande de l'interrupteur est appelée méthode de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) ou encore PWM (Pulse Width Modulation).

Le signal de contrôle de l'interrupteur K devra être élaboré par comparaison entre le rapport cyclique D et une tension en dents de scie V_{DS} comme suit :

- Lorsque $D > V_{DS}$: $K=1$, l'interrupteur K est commandé à la fermeture (état ON).
- Lorsque $D < V_{DS}$: $K=0$, l'interrupteur K est commandé à l'ouverture (état OFF).

II.3.5. Résultats de Simulation

La figure II.5 représente le schéma de simulation que nous avons fait d'un convertisseur Cuk relié à la sortie du panneau photovoltaïque (PV) avec une irradiation $G=1000 W/m^2$ et une température $T=25^\circ$. Les paramètres du Cuk utilisés sont ceux calculés précédemment.

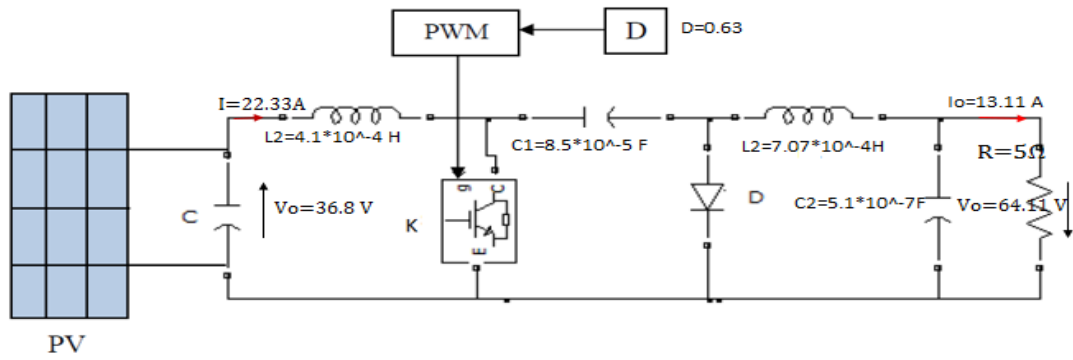


Figure II. 5. Circuit électrique d'un convertisseur DC-DC de type Cuk

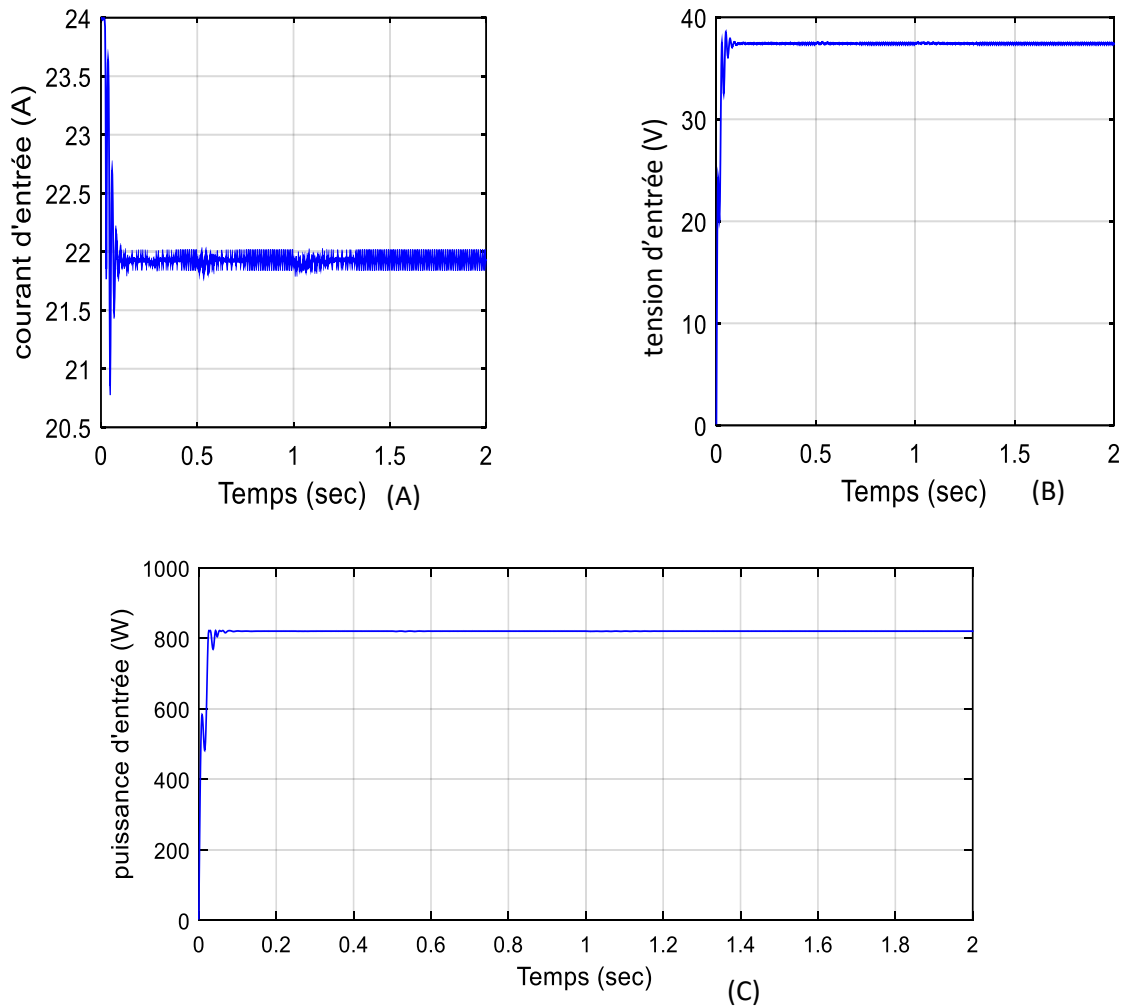


Figure II. 6. Courant (A), tension(B) et puissance (C) d'entrée de convertisseur Cuk

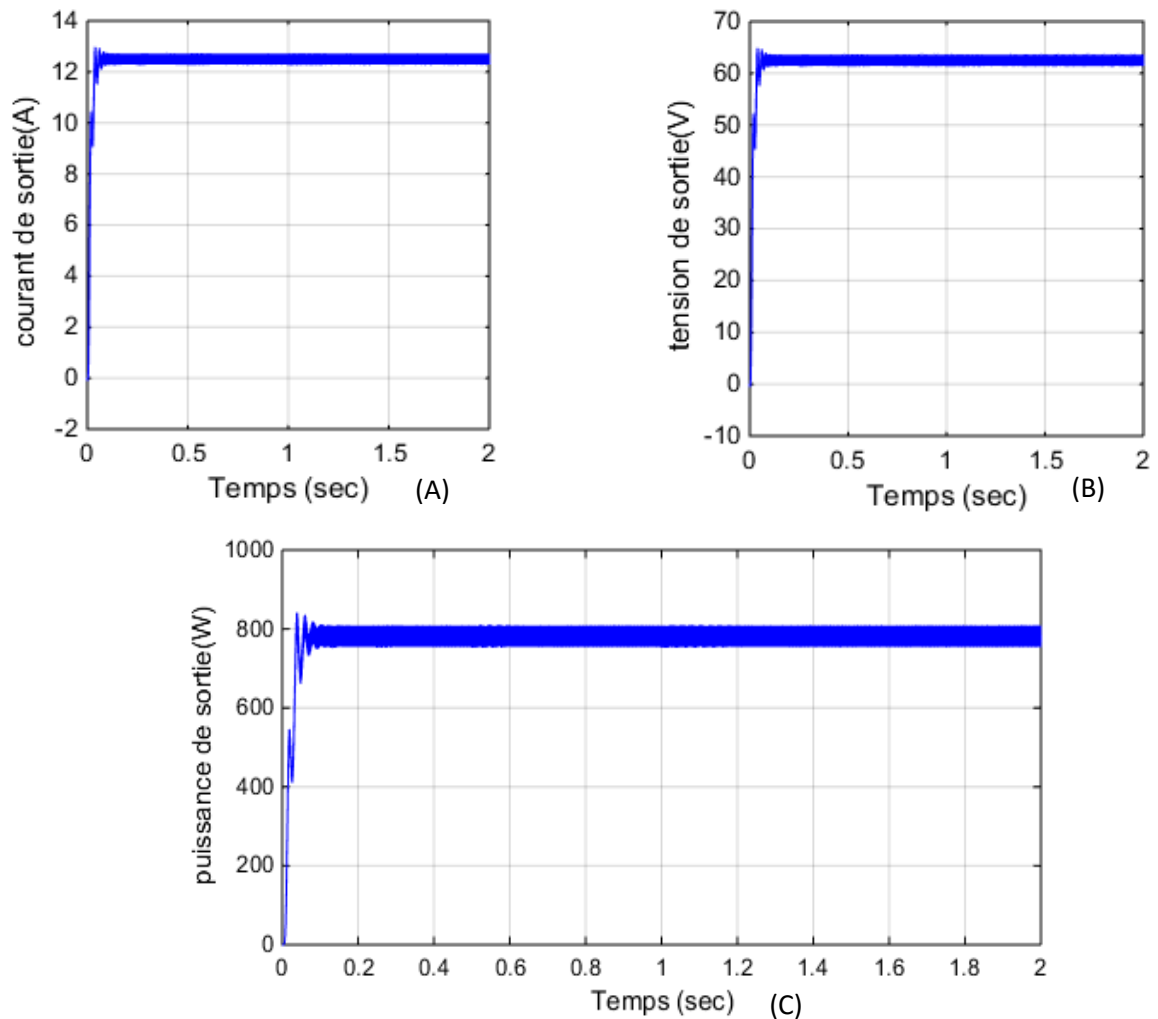


Figure II. 7. Courant (A), tension (B) et puissance (C) de sortie de convertisseur Cuk

Les résultats de simulation montrent que :

- La tension et le courant de sortie sont très proches des valeurs calculées théoriquement.
- La tension et le courant d'entrée sont proches des valeurs indiquées par la courbe caractéristique du générateur.
- La puissance de sortie est proche au point de puissance maximale 822 W .

II.4. Commande MPPT

Le générateur PV transforme directement l'énergie solaire en énergie électrique. Cette énergie varie en fonction de l'éclairement et de la température. La fonction caractéristique du courant fourni par le générateur en fonction de sa tension autrement dit la caractéristique $I-V$ du générateur passe par un point appelée Point de Puissance Maximale ou MPP (Maximum Power Point) qui est le point optimum où la puissance du générateur est maximale [2].

II.4.1. Principe de La Commande MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{mpp} et I_{mpp}). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique commandé par une MPPT. Il peut être représenté par la figure II.8 [1].

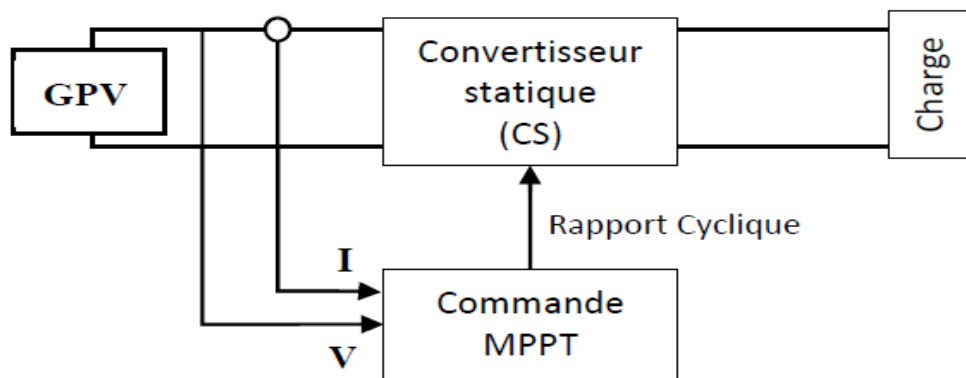


Figure II. 8. Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT.

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le PPM.

En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du convertisseur en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le PPM.

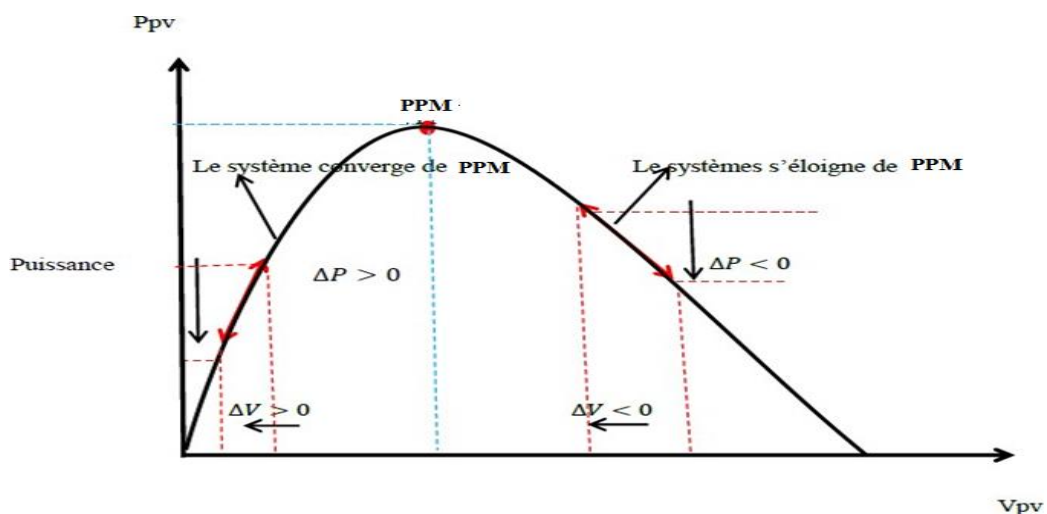


Figure II. 9. Principe de la commande MPPT

II.4.2. Classification des Commandes MPPT

Nous pouvons classifier d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte.

Il est cependant plus intéressant de les classifier selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT, comme cela sera expliqué ci-dessous [13] :

- Selon les paramètres d'entrée il y a :
 - ✓ Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du convertisseur ;
 - ✓ Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur.
- Selon le type de recherche il y a :
 - ✓ MPPT direct ;
 - ✓ MPPT indirect.

II.4.3. Algorithmes MPPT

Dans la littérature il existe plusieurs algorithmes MPPT. Les plus utilisés sont [1] :

- Algorithme de la Tension Constante (CV, Constant Voltage),
- Algorithme du Courant constant (Constant Current),
- Perturbation et Observation (P&O, Perturb and Observe),
- Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance).

II.4.4. Autres méthodes de la commande MPPT

Il existe dans la littérature d'autres algorithmes et méthodes de MPPT qui font parfois appel à des techniques nouvelles. On peut citer [1] [14] :

- La commande MPPT flou,
- La commande MPPT avec correcteur PI,
- Les algorithmes à base de réseau de neurones,
- L'algorithme de la capacité parasite (Parasitic Capacitance),
- La méthode de balayage du courant (Current Sweep).

II.5. Méthode perturbation et observation (P&O)

Le principe de la commande MPPT de type perturbation et observation (P&O) consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte. Ainsi, on peut déduire que si

une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du point de puissance maximale (MPP).

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le MPP. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au MPP, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande [15].

La figure II.10 représente l'algorithme associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

A cause de la facilité de son implémentation, la méthode P&O est fréquemment utilisée malgré qu'elle présente des problèmes d'oscillations autour du PPM car la recherche doit être répétée périodiquement pour obliger le système à osciller autour du PPM.

En plus, et pour des variations brusques des conditions climatiques ou/et de la charge, cette méthode présente parfois des erreurs d'interprétation dans la direction qu'il faut suivre pour atteindre le PPM.

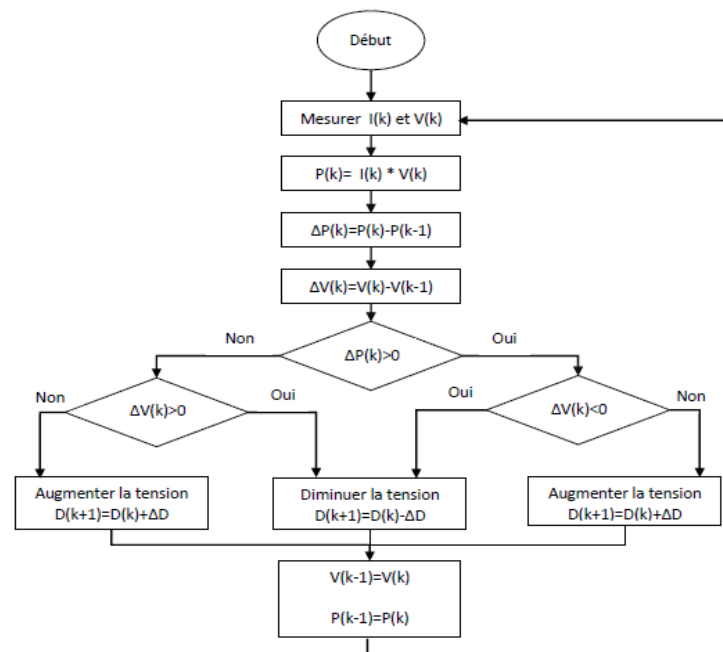


Figure II. 10. Algorithme de la méthode P&O

II.5.1. Résultats de simulation

Dans cette partie, nous présentons les résultats de simulation d'une association d'un générateur PV et d'un convertisseur Cuk commandé par un algorithme MPPT de type P&O, avec une irradiation de $G=1000 \text{ W/m}^2$ et d'une température de $T=25^\circ$. Le convertisseur alimente une charge résistive de $R=5 \Omega$.

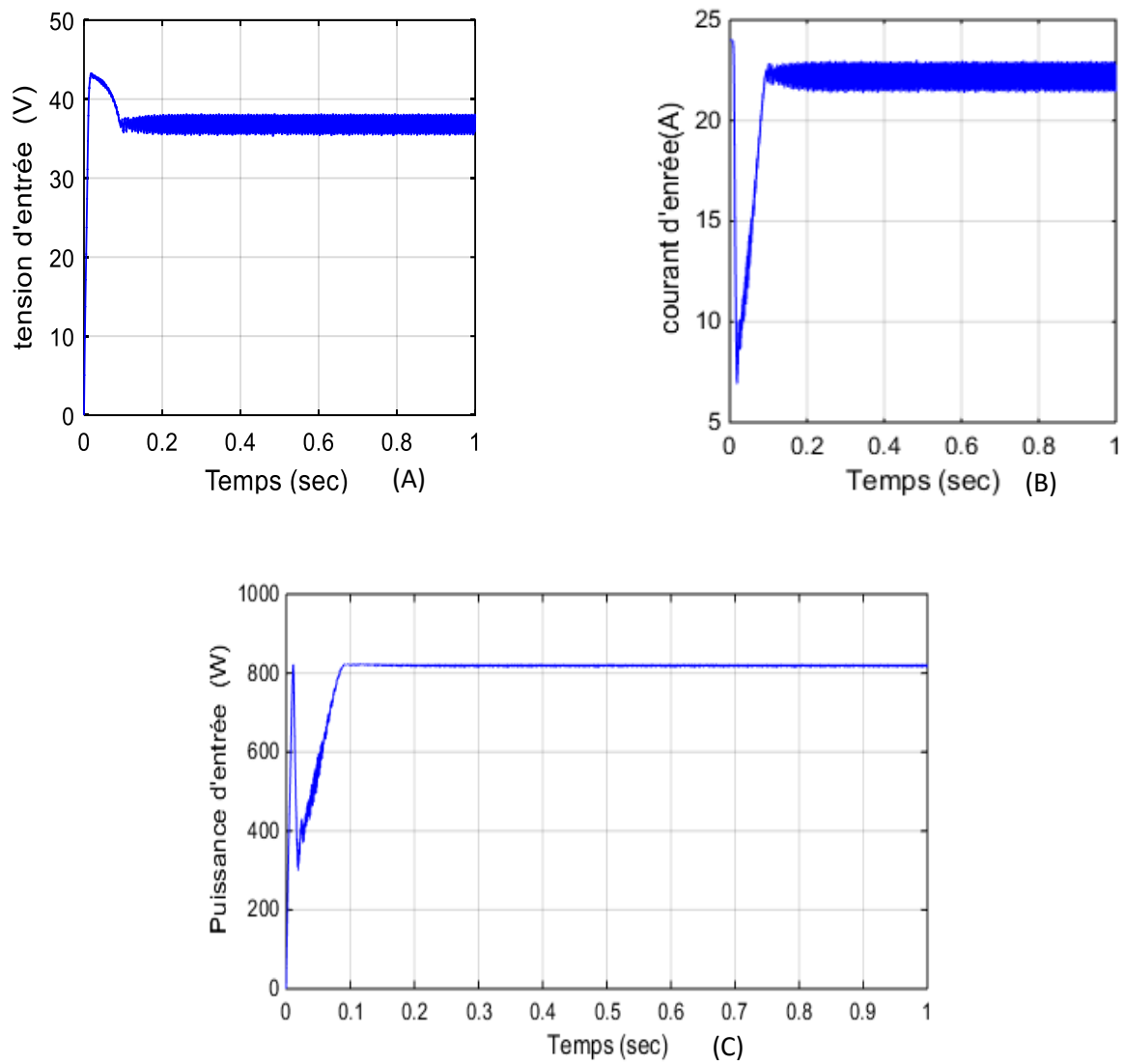


Figure II. 11. Tension (A), courant (B) et puissance(C) d'entrée de convertisseur Cuk (P&O)

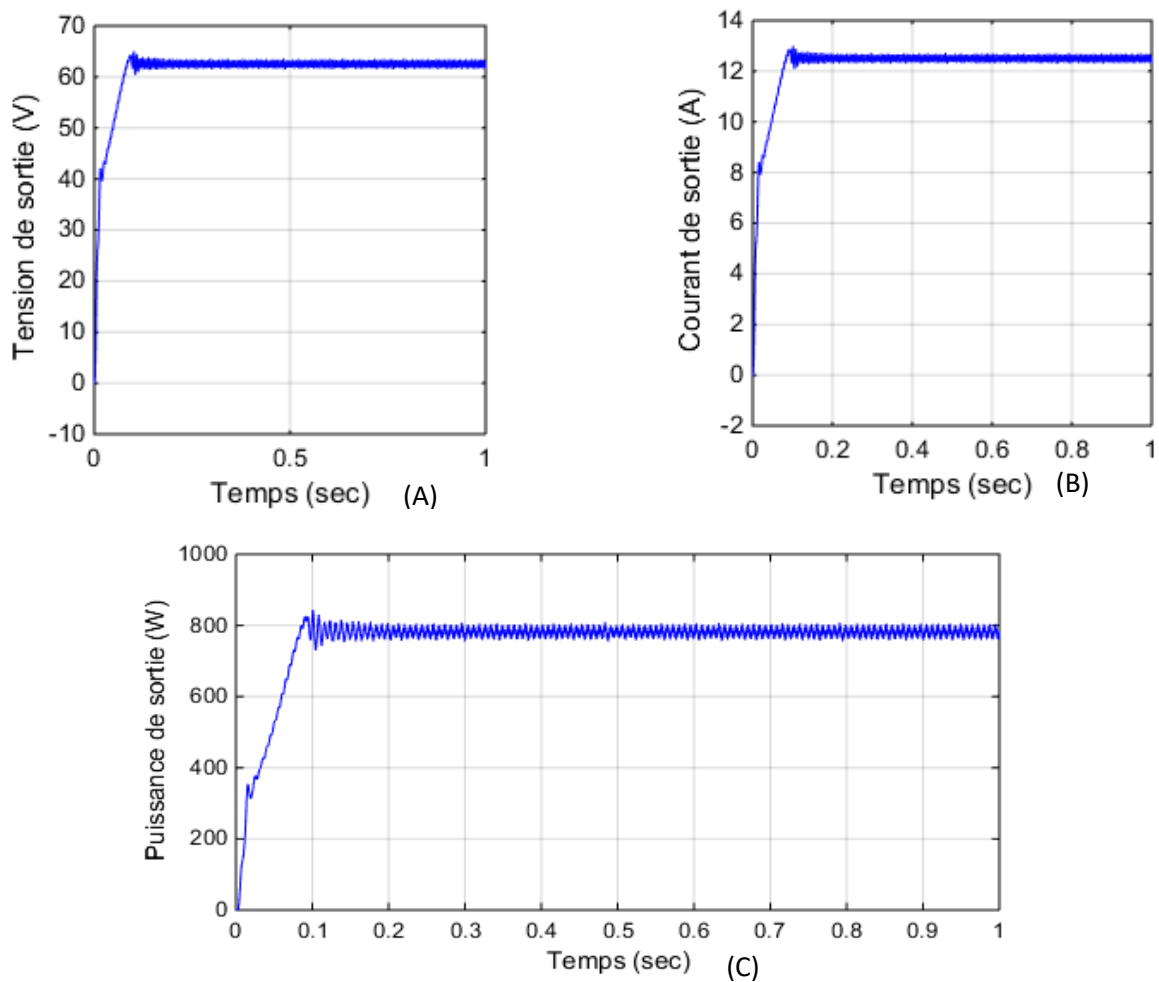


Figure II. 12. Tension (A), courant (B) et (C) et puissance de sortie de convertisseur Cuk (P&O)

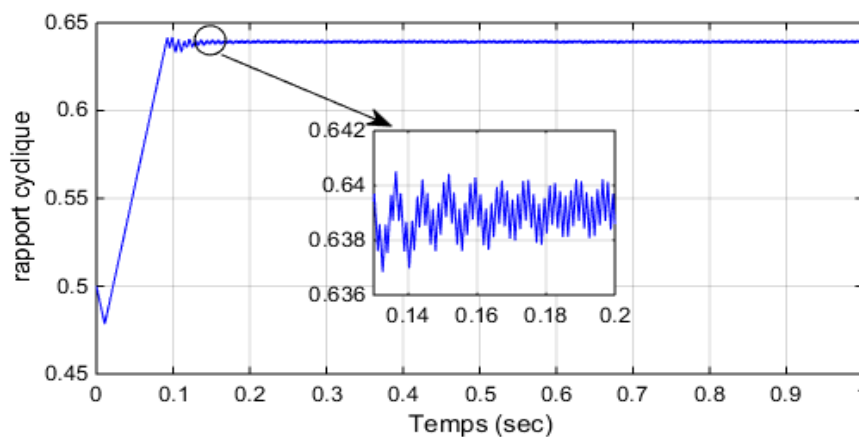


Figure II. 13. Evolution du rapport cyclique

Les résultats de simulation du système photovoltaïque associé à un convertisseur Cuk commandé par la commande MPPT « perturbation et observation » montrent que :

- Le convertisseur commandé par le MPPT fournit à la charge résistive la valeur maximale de la puissance (822 W) ;

- Le rapport cyclique calculé par l'algorithme P&O oscille autour de sa valeur optimale calculée précédemment : $D = 0.63$.

II.6. Commande MPPT avec correcteur PI

Maintenant, nous présentons un schéma de commande MPPT à base d'un régulateur PI. L'entrée du régulateur PI est l'erreur entre la tension de référence V_{ref} donnée par l'algorithme MPPT et la tension de sortie du générateur PV.

Pour régler la tension d'entrée du convertisseur on a introduit le correcteur proportionnel et intégral (PI). Ses parties sont [14] :

- Le gain proportionnel K_p est efficace pour réduire le temps de réponse mais ce n'est pas une solution exacte pour éliminer l'erreur en régime permanent.
- Le gain intégral K_i est efficace pour éliminer les erreurs en régime permanent.

La tâche de correcteur (PI) est de réduire l'erreur au minimum entre V_{ref} et la tension mesurée par l'ajustage du rapport cyclique.

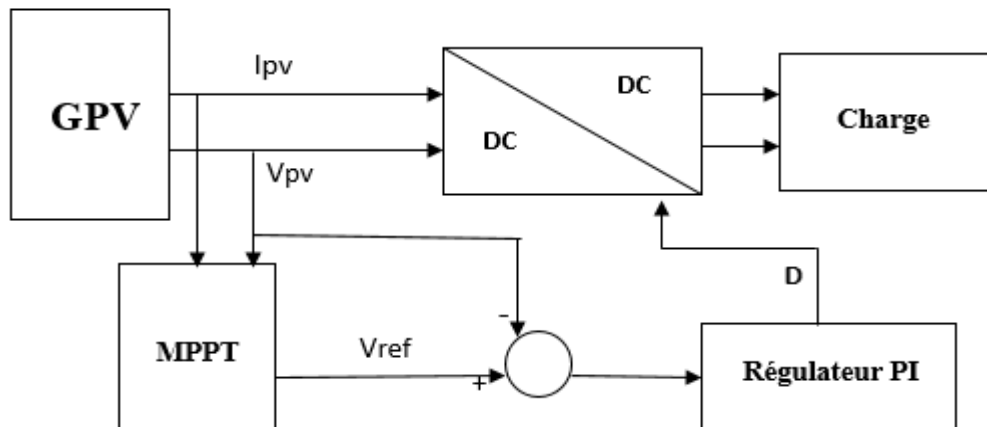


Figure II. 14. Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT à base du régulateur PI

II.6.1. Résultats de simulation

Les résultats de simulation montrés prochainement sont obtenus avec un éclairement fixe de $G=1000 \text{ w/m}^2$ et d'une température de $T=25^\circ\text{C}$. Les paramètres du régulateur PI utilisés sont adoptés comme suit : $K_i = 5$ et $K_p = 0.05$.

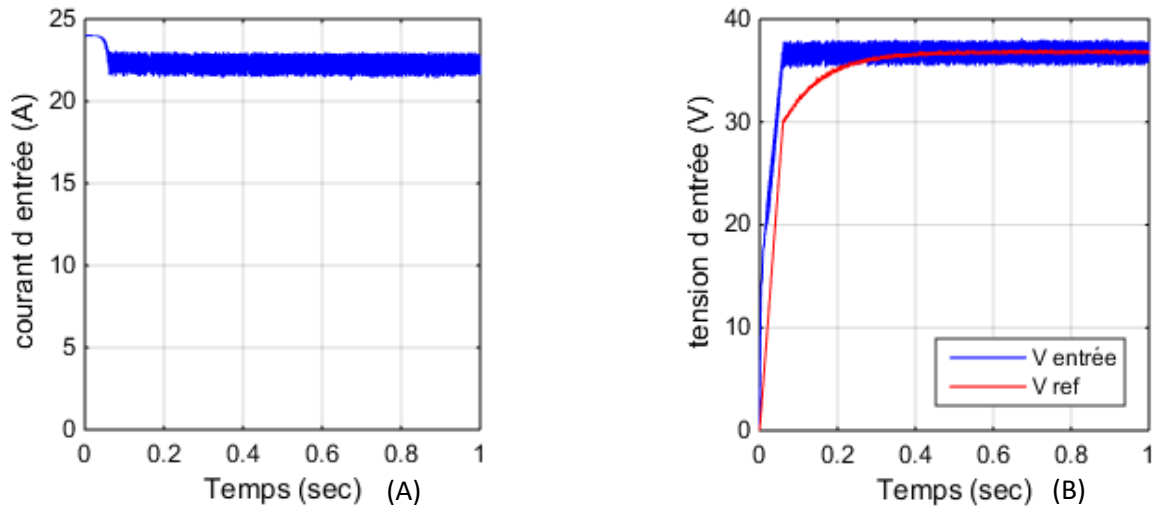


Figure II. 15. Courant d'entrée (A), tension d'entrée avec tension de référence (B) de convertisseur Cuk.

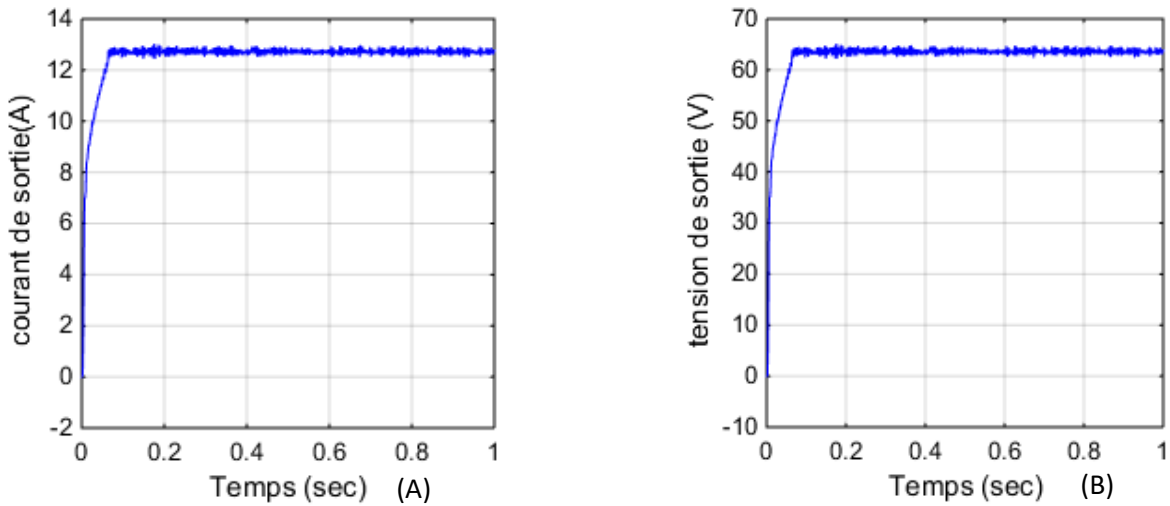


Figure II. 16. Courant (A) et tension (B) de sortie de convertisseur Cuk

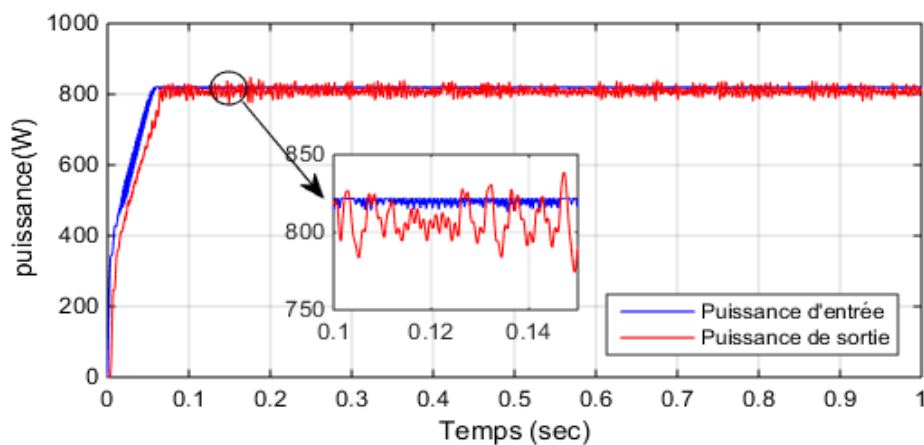


Figure II. 17. Puissance d'entrée et de sortie de convertisseur Cuk

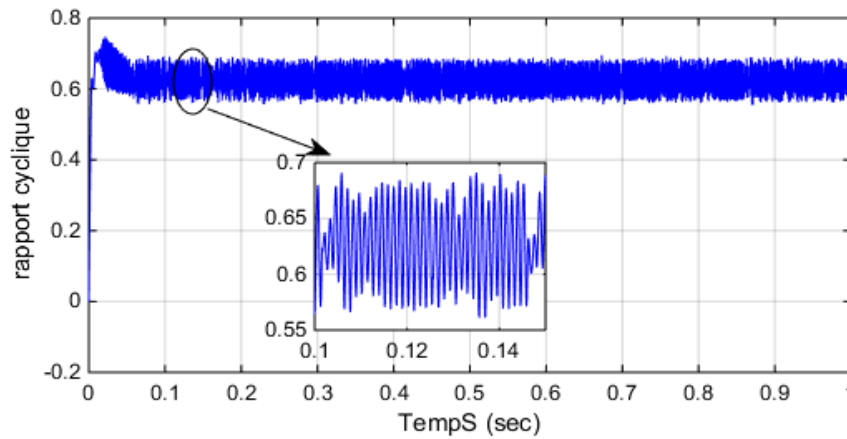


Figure II. 18. Evolution de rapport cyclique

Les résultats de simulation obtenus montrent que la poursuite du point de puissance maximale est très performante. Du coup, la charge reçoit la puissance maximale. Nous constatons aussi que le rapport cyclique varie autour de sa valeur idéale. Les oscillations présentes sur les sorties (tension, courant et puissance) sont dues essentiellement à la commutation du transistor.

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, on a exposé brièvement quelques types des convertisseurs continus-continus, suivi d'une présentation de principe de fonctionnement et le dimensionnement des composants d'un convertisseur de type Cuk. On a présenté aussi le principe de la recherche du point de puissance maximale tout en donnant les différentes méthodes de commande MPPT rencontrées le plus souvent dans la littérature. Nous avons étudié trois associations d'un générateur PV avec un convertisseur Cuk qui alimente une charge résistive. La première concerne l'association d'un générateur PV avec un convertisseur Cuk dont les paramètres sont calculés préalablement. Deuxièmement, nous avons utilisé un algorithme de commande MPPT de type P&O. Finalement, nous avons présenté une association avec un convertisseur Cuk commandé par un algorithme MPPT à base d'un régulateur PI.

Dans le prochain chapitre, nous allons modéliser et simuler les différents composants constituant une installation photovoltaïque raccordée au réseau.

Chapitre III.

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau

Chapitre III. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau

III.1. Introduction

La participation des systèmes photovoltaïques dans la génération d'énergie de grande échelle est augmentée à cause des effets environnementaux défavorables des sources conventionnelles d'énergie. Les installations photovoltaïques peuvent être raccordées au réseau, ce qui représente une économie importante en investissement et en fonctionnement. Elles transforment la totalité de l'électricité produite en courant alternatif de 220 V ou 380V, ainsi que le photovoltaïque est la seule filière qui peut être installée n'importe où.

Dans ce chapitre on va décrire, modéliser et simuler les différents composants constituant l'installation photovoltaïque raccordée au réseau.

III.2. Généralités sur les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau

Les systèmes photovoltaïques couplés au réseau injectent l'énergie issue des modules sur le réseau de distribution. On distingue deux types d'installations [2] :

- **Installation centralisée** : génération de la puissance Photovoltaïque à grand –échelle centralisée dans les stations de puissance Photovoltaïque.
- **Installation décentralisée** : forme alternative de génération de puissance distribuée dans les unités situées directement dans le lieu du consommateur.

III.2.1. Classifications des centrales photovoltaïques connectées au réseau (CPCR)

Une première classification des CPCR en fonction de leur taille peut être faite de la manière suivante [16] [17] :

- **Petite taille avec des puissances allant de 1 à 10 kW** : pour des applications sur les toits de maisons individuelles ou d'institutions publiques telles que les écoles, parkings, connectée au réseau basse tension.
- **De taille moyenne avec des puissances allant de 10 kW à 100 kW** : Ce type de système peut se trouver installé et intégré sur un édifice, sur un toit ou une façade.

Il peut être connecté à la basse ou à la moyenne tension du réseau de distribution électrique selon sa taille.

- **De grande taille avec des puissances allant de 500 kW et plus :** Ce sont des systèmes centralisés et sont des propriétés de compagnies d'électricité.

On peut également classer ces systèmes selon qu'ils soient munis de batteries de stockage ou non [18] :

- **Les systèmes PV connectés au réseau sans batterie de stockage :** Ces systèmes sont ainsi conçus pour fonctionner en parallèle et en interconnexion avec le réseau public d'électricité.
- **Les systèmes PV connectés au réseau avec batterie :** Ce type de système est utilisé généralement lorsqu'une puissance supplémentaire est nécessaire pour alimenter des charges critiques telles que la réfrigération, les pompes à eau, l'éclairage ou autres.

III.2.2. Structure générale d'un système photovoltaïque connecté au réseau

Il existe deux types de structures de système photovoltaïque [16] [17] :

III.2.2.1. Systèmes à connexion directe au réseau :

Cette installation est constituée d'un générateur photovoltaïque connecté directement, à l'aide d'un onduleur au réseau électrique.

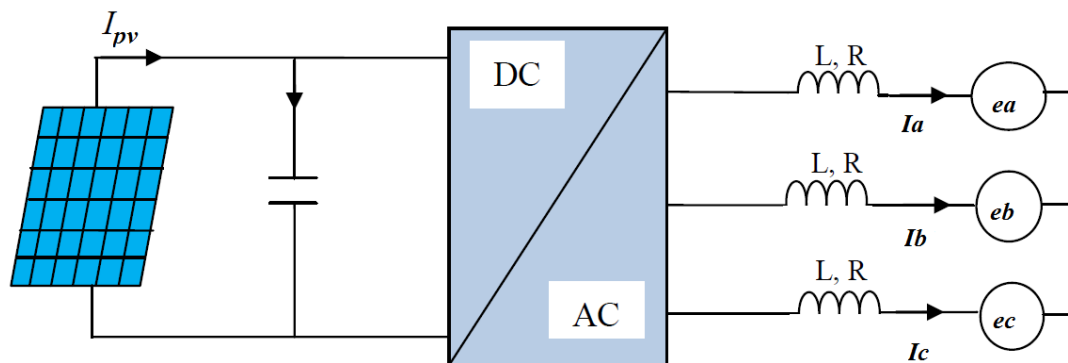


Figure III. 1. Générateur photovoltaïque connecté directement au réseau

L'onduleur d'une CPCRC a pour rôle principal la conversion de la puissance continue en puissance alternative en synchronisation avec le réseau, auquel on peut ajouter quelques fonctions supplémentaires de contrôle nécessaires au fonctionnement de l'ensemble de la centrale connectée au réseau qui seront :

- Suivi du point de puissance maximale du générateur PV.
- Connexion et déconnexion du réseau en fonction des conditions de celui-ci et du rayonnement incident sur le générateur.

- Détection des pertes d'isolement.
- Mesure d'énergie, etc.

Les types d'onduleurs connectés au réseau sont [16] :

a) **Onduleurs modulaires ou module photovoltaïque AC** : Suivant ce concept, chaque module solaire dispose d'un onduleur individuel. Pour des installations plus importantes, tous les onduleurs sont connectés en parallèle côté courant alternatif. Les onduleurs modulaires sont montés à proximité immédiate du module correspondant, très souvent sous le module.

b) **Onduleurs centralisés** : Un onduleur centralisé de forte puissance transforme l'ensemble du courant continu produit par un champ de modules en courant alternatif.

Le champ PV est en règle générale, constitué de plusieurs rangées connectées en parallèle. Chaque rangée est elle-même constituée de plusieurs modules connectés en série. Pour éviter les pertes dans les câbles et obtenir un rendement élevé, on connecte le plus possible de modules en série.

c) **Onduleur "String " ou "de branche"** : C'est l'ondeur le plus utilisé. Un certain nombre de modules sont connectés en série, pour chacune des séries de ce genre est connecté un seul onduleur. C'est ainsi qu'en cas d'ombrage partiel des modules, il n'y a de perte que pour la rangée ombragée. L'emploi de diodes by-pass est nécessaire. On peut utiliser un seul et même onduleur string pour des installations jusqu'à 3kW de puissance. Pour des puissances plus importantes, il est parfaitement possible de connecter plusieurs onduleurs string en parallèle, côté courant alternatif. L'intérêt dans ce concept est d'utiliser un plus grand nombre d'onduleurs du même type. Cela réduit le coût de production et apporte un intérêt supplémentaire : si un onduleur tombe en panne, la production de la seule rangée concernée est défaillante.

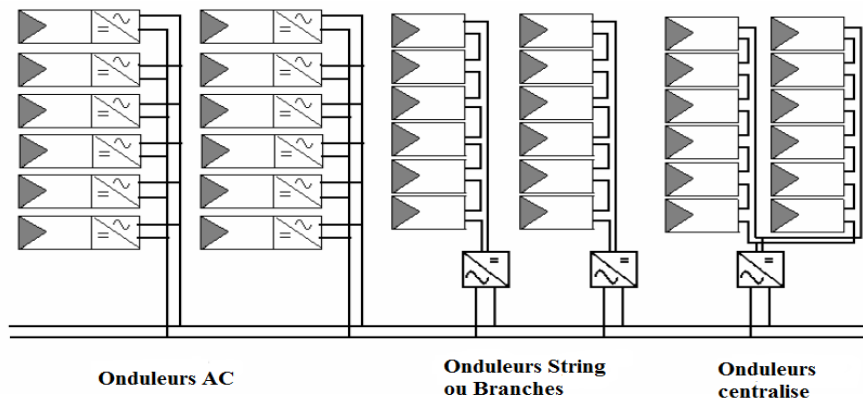


Figure III. 2. Différents types d'onduleurs couplés au réseau

III.2.2.2. Systèmes avec hacheur :

Ce type de systèmes est constitué essentiellement d'un hacheur à la sortie du panneau et un onduleur au côté réseau pour convertir la tension continue en alternatif. L'utilisation du hacheur permet le contrôle de la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé [16].

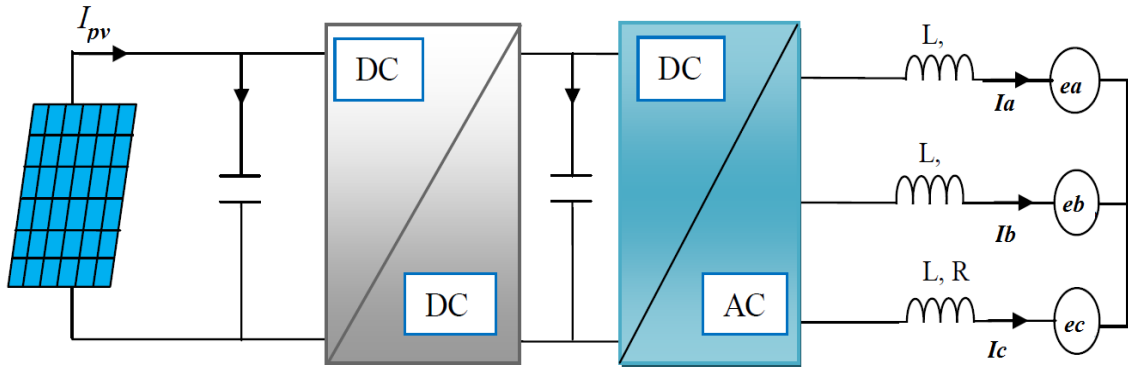


Figure III. 3. Générateur photovoltaïque relié au réseau par l'intermédiaire d'un hacheur et d'un onduleur

III.3. Modélisation et description du système PV connecté au réseau

III.3.1. Système photovoltaïque proposé :

Le système que nous proposons pour l'étude est schématisé par la figure III.4

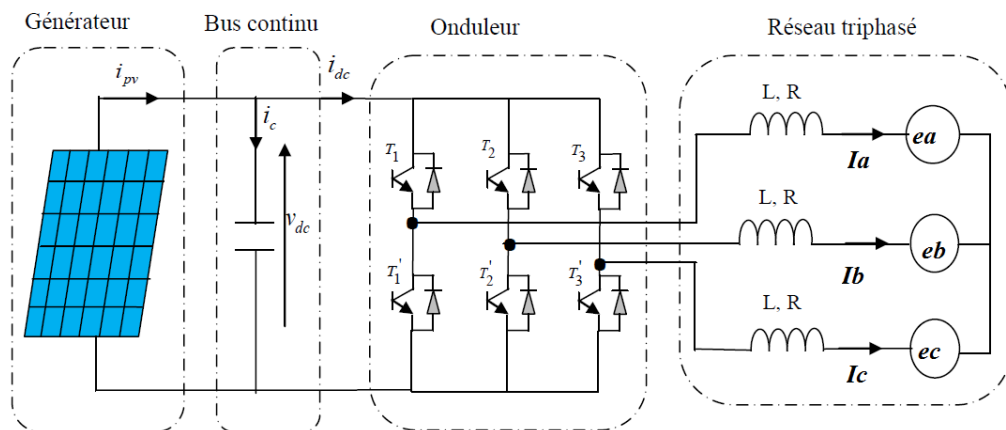


Figure III. 4. Composants de système photovoltaïque connecté au réseau

III.3.2. Présentation de la structure du système PV connecté au réseau :

Le modèle général de la structure du système PV relié au réseau présenté par la figure III.4. est constitué par un générateur PV constitué de plusieurs modules, une capacité à l'entrée du convertisseur, un onduleur triphasé à deux niveaux, et un réseau triphasé.

III.3.2.1. Générateur photovoltaïque :

Le module utilisé dans le chapitre I est choisi pour le reste de notre étude pour former le générateur photovoltaïque que nous allons relier au réseau.

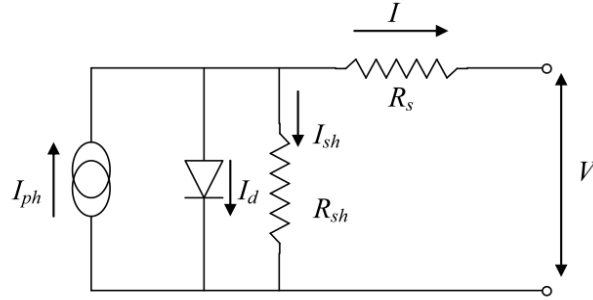


Figure III. 5. Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

Pour augmenter la puissance délivrée par le générateur PV, on choisit un groupement mixte formé de la mise en série de $n_s = 30$ modules et $n_p = 5$ en parallèle.

Rappelons l'équation de la caractéristique I (V) de la cellule de base

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V}{n \cdot v_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (\text{III.1})$$

L'expression du courant délivré par le module PV est donnée par

$$I_{\text{module}} = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{q \cdot (V_{\text{module}} + N_s \cdot I \cdot R_s)}{N_s \cdot n \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (\text{III.2})$$

Le courant et la tension de sortie de ce champ photovoltaïque sont donnés par :

$$V_{pv} = n_s \cdot V_{\text{module}} \quad (\text{III.3})$$

$$I_{pv} = n_p \cdot I_{\text{module}} \quad (\text{III.4})$$

L'effet de changement climatique sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension de champ PV est illustré dans les figures III.6 et III.7.

III.3.2.2. Bus continu :

Le découplage de la puissance et la réduction de l'ondulation de tension à l'entrée de l'onduleur est accompli en insérant un condensateur électrolytique. Ce condensateur est habituellement relié au côté continu de l'onduleur, et il doit être aussi petit que possible afin de compromettre la fiabilité du système [18].

En appliquant la loi des nœuds figure III.4, la tension aux bornes de ce condensateur est régie par l'équation suivante :

$$C \frac{dv_{dc}}{dt} = I_{pv} - I_{dc} \quad (\text{III.5})$$

Le condensateur d'entrée de l'onduleur a un rôle très important pour les onduleurs photovoltaïques dans le maintien d'un point de fonctionnement stable. Il a une fonction d'accumulateur d'énergie et une fonction de filtrage des fluctuations de tension dues aux commutations. Il assure ainsi un écoulement homogène du courant du générateur PV vers le réseau en maintenant la tension constante.

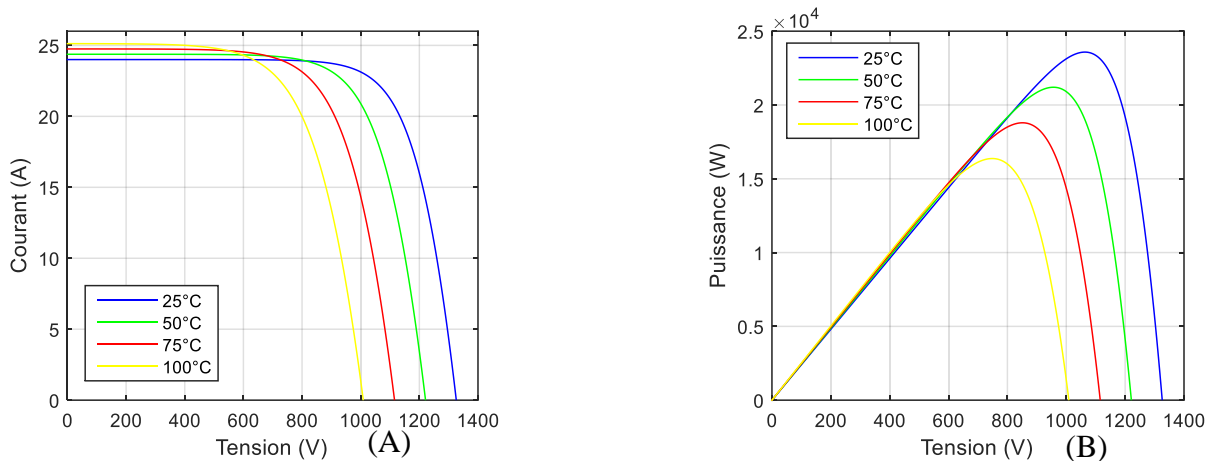


Figure III. 6. Caractéristiques courant-tension (A) et puissance-tension (B) du champ PV à

$G=1000 \text{ W/m}^2$

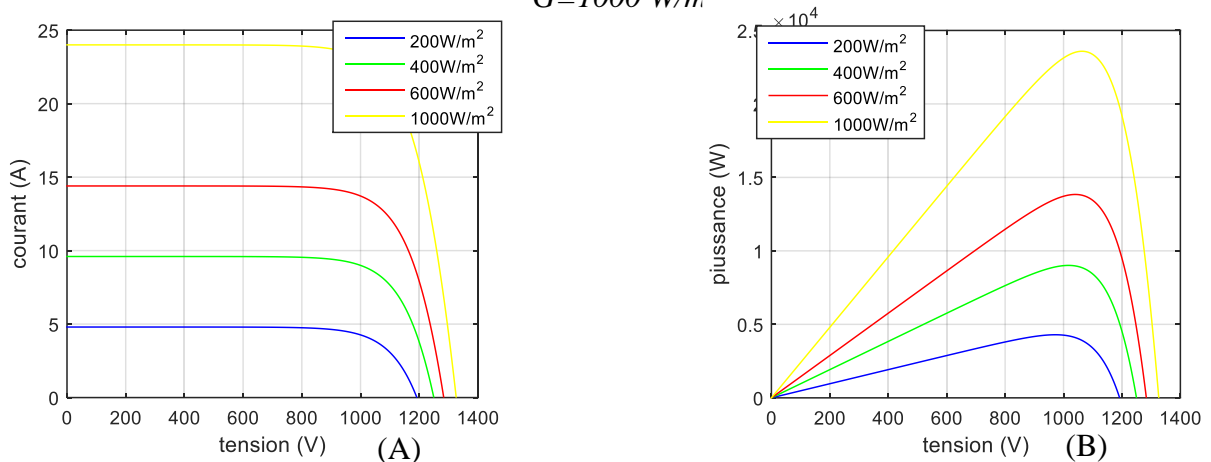


Figure III. 7. Caractéristiques courant-tension (A) et puissance-tension (B) du champ PV à

$T=25^\circ\text{C}$

Une tension satisfaisante au côté continu est une condition préalable pour réaliser une bonne qualité de puissance de sortie de l'onduleur. Si la tension continue devient plus basse que la tension de ligne, la direction du flux de puissance sera du réseau vers la partie continu (ce qui n'est pas souhaitable). Ceci également aura comme conséquence l'apparition d'un flux de puissance réactif et la déformation harmonique deviennent excessive. Pour avoir un flux

de puissance correct avec une puissance réactive et une déformation harmonique de l'onduleur minimale, la tension continue doit toujours être plus grande que la tension de ligne.

III.3.2.3. Onduleur triphasé :

L'onduleur triphasé à deux niveaux a pour but de convertir la tension continue à la sortie des panneaux en tension alternative afin d'alimenter le réseau triphasé. Cet onduleur est commandé en modulation de largeur d'impulsions.

Le schéma de base d'un onduleur à transistors de puissance est illustré par la figure III.8. Il est composé de six transistors ($T_1, T_2, T_3, T'_1, T'_2, T'_3$) shuntés en antiparallèle par des diodes de récupération ($D_1, D_2, D_3, D'_1, D'_2, D'_3$) pour renvoyer le courant négatif vers le condensateur de filtrage mis à l'entrée de l'onduleur, les transistors de puissance sont surtout utilisés pour avoir une bonne commutation [19] [2]

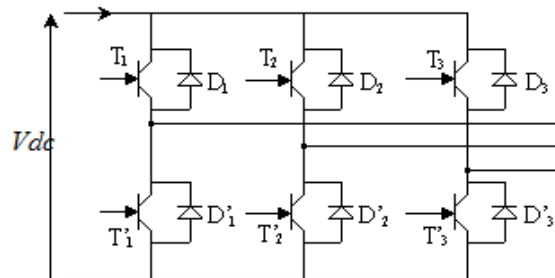


Figure III. 8. Schéma de l'onduleur de tension

Les états de commutation de l'onduleur sont définis par les fonctions logiques suivantes :

$$\begin{aligned}
 F_a & \begin{cases} 0 & \text{si } T_1 \text{ conduit et } T'_1 \text{ bloqué} \\ 1 & \text{si } T'_1 \text{ conduit et } T_1 \text{ bloqué} \end{cases} \\
 F_b & \begin{cases} 0 & \text{si } T_2 \text{ conduit et } T'_2 \text{ bloqué} \\ 1 & \text{si } T'_2 \text{ conduit et } T_2 \text{ bloqué} \end{cases} \\
 F_c & \begin{cases} 0 & \text{si } T_3 \text{ conduit et } T'_3 \text{ bloqué} \\ 1 & \text{si } T'_3 \text{ conduit et } T_3 \text{ bloqué} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{III.6}$$

Par rapport au neutre fictif de la source O, les potentiels des points a, b et c peuvent être exprimés par :

$$\begin{pmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{pmatrix} = V_{dc} \begin{pmatrix} F_a \\ F_b \\ F_c \end{pmatrix} \tag{III.7}$$

On peut écrire les relations des tensions V_{ao}, V_{bo} et V_{co} comme suit :

$$\begin{aligned}
 V_{ao} &= V_{an} + V_{no} \\
 V_{bo} &= V_{bn} + V_{no} \\
 V_{co} &= V_{cn} + V_{no}
 \end{aligned}
 \tag{III.8}$$

Avec : V_{an}, V_{bn} et V_{cn} sont les tensions de phase de la charge. Le système V_{an}, V_{bn} et V_{cn} étant équilibré, il en découle :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \tag{III.9}$$

On déduit les tensions des phases en fonction des variables logiques F_a, F_b et F_c

$$\begin{pmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{pmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_a \\ F_b \\ F_c \end{pmatrix}
 \tag{III.10}$$

III.3.3. Commande MLI de l'onduleur :

La modulation des largeurs d'impulsion (MLI) est une technique de commande qui permet d'une part de réduire les harmoniques de tension et d'autre part de contrôler son amplitude.

La MLI consiste à multiplier le nombre des commutations des interrupteurs de l'onduleur, en gardant la tension d'entrée continue fixe, et en variant les largeurs des impulsions de la tension [20] [21].

Il existe plusieurs stratégies de modulation de largeur d'impulsion :

- MLI triangulo-sinusoïdale,
- MLI à hystérésis,
- MLI vectorielle ... etc.

Chacune d'elle doit obéir à un algorithme bien défini, mais toutes sont conçues pour générer une source de tension la plus sinusoïdale possible à la sortie de l'onduleur. Dans notre étude, on va appliquer la modulation triangulo-sinusoïdale.

Le principe de fonctionnement de la MLI consiste à comparer trois tensions de références sinusoïdales avec un signal triangulaire nommé (porteuse). À chaque intersection des deux signaux, la commande électrique envoie un ordre d'allumage ou d'extinction aux transistors constituant une phase d'onduleur qui produit le signal MLI

Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres : l'indice de modulation m , et le taux de modulation r tel que :

$$m = \frac{f_p}{f_{ref}}, \quad r = \frac{V_{mref}}{V_m} \tag{III.11}$$

Avec : f_p : la fréquence de signal de la porteuse, $f_{réf}$: la fréquence de signal de référence, V_m : l'amplitude de la porteuse, $V_{mréf}$: l'amplitude de signal de référence.

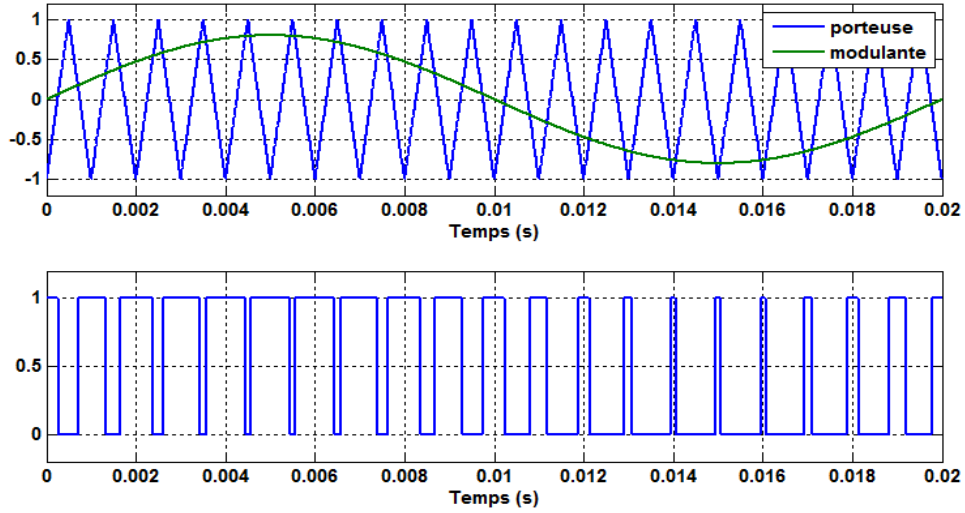


Figure III. 9. Technique de MLI sinus-triangle

Les signaux de référence sont donnés par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} V_{ref1} &= V_{mref} \sin(\omega t) \\ V_{ref2} &= V_{mref} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{ref3} &= V_{mref} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (III.12)$$

La porteuse est un signal triangulaire caractérisée par sa fréquence f_p et sa valeur crête V_m

On définit l'équation de la porteuse dans sa période $[0, T_p]$ par :

$$\begin{cases} x(t) = V_m \left(-1 + 4 \frac{t}{T_p}\right) \text{ si } t \in \left[0, \frac{T_p}{2}\right] \\ x(t) = V_m \left(3 - 4 \frac{t}{T_p}\right) \text{ si } t \in \left[\frac{T_p}{2}, T_p\right] \end{cases} \quad (III.13)$$

Les signaux de commande des interrupteurs sont générés de la manière suivante :

$$\begin{aligned} V_{refk} > V_p &\Rightarrow F_k = 1 \\ V_{refk} < V_p &\Rightarrow F_k = 0 \end{aligned} \quad (III.14)$$

Dans cette partie, nous présentons une simulation d'un onduleur commandé par MLI sinus-triangle. Les paramètres de simulation sont les suivants : La tension du bus continu : $E = 600 \text{ V}$, la fréquence des tensions de référence : $f_{ref} = 50 \text{ Hz}$, le taux de modulation : $r = 0.9$ et nous choisissons deux valeurs pour l'indice de modulation : $m = 7$ et $m = 14$.

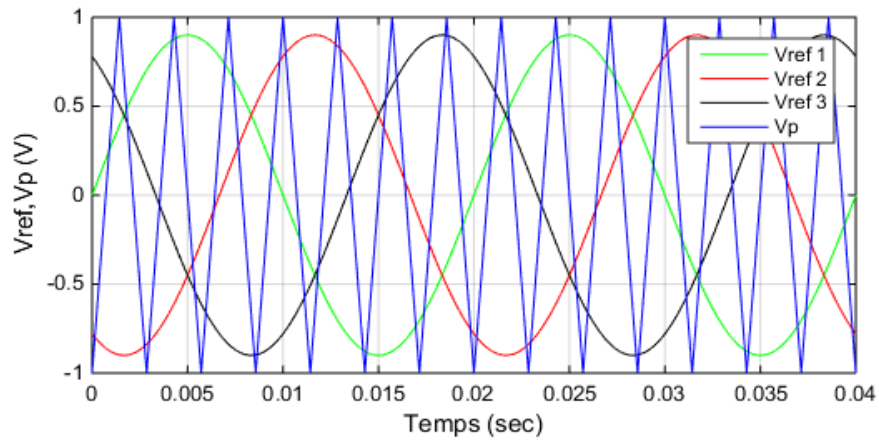


Figure III. 10. Différents signaux de la stratégie triangulo-sinusoidale ($m=7$)

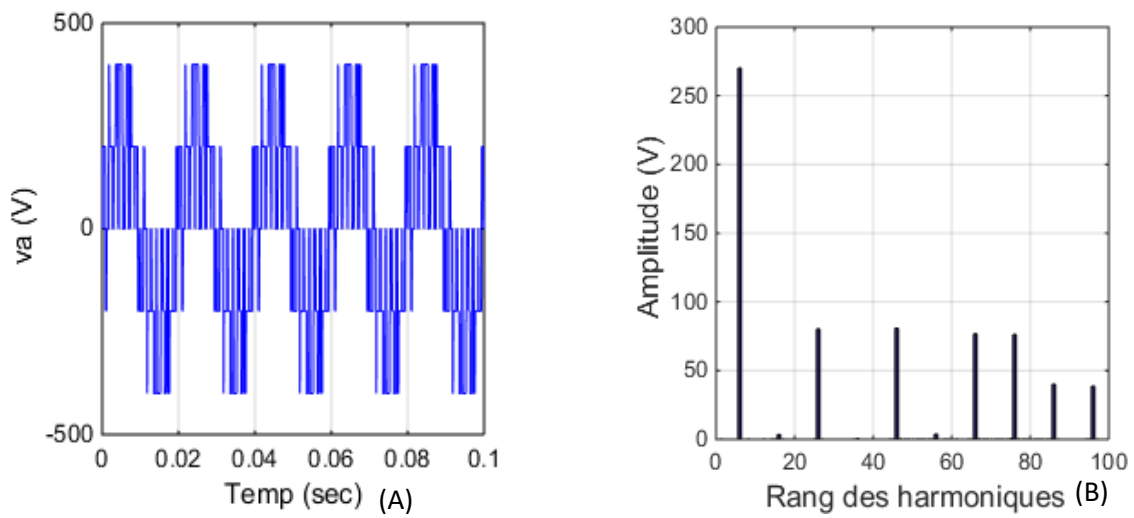


Figure III. 11. Tension de phase V_a (A) et son spectre d'harmoniques (B) ($m = 7$)

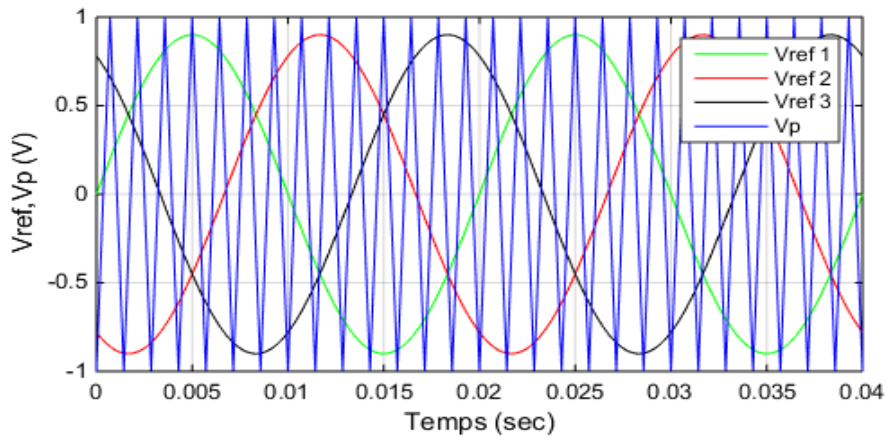


Figure III. 12. Différents signaux de la stratégie triangulo-sinusoidale ($m=14$)

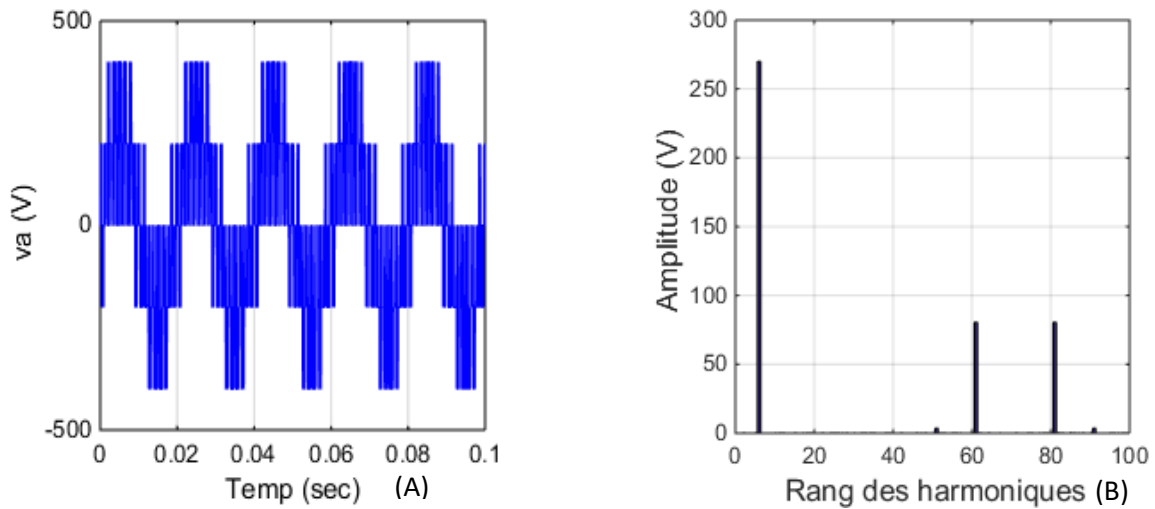


Figure III. 13. Tension de phase V_a (A) et son spectre d'harmoniques (B) ($m = 14$)

On constate pour cette stratégie de commande que :

- Les harmoniques de tension se regroupent en familles centrées autour des fréquences multiples de celle de la porteuse, les amplitudes des harmoniques diminuent avec l'augmentation de la fréquence.
- L'augmentation de l'indice de modulation m permet de pousser les harmoniques vers les fréquences élevées et donc facilement à filtrer.

III.3.4. Transformation de Park

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée biphasée suivie d'une rotation, elle permet de passer du repère abc vers le repère dq tournant. Une matrice $p(\theta)$ de Park permet le passage des composantes X_{abc} du système triphasé aux composantes X_{dq} [18] [21].

$$\text{et} \quad \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.15})$$

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = P^{-1}(\theta) \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \quad (\text{III.16})$$

avec

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \sin wt & \sin(wt - \frac{2\pi}{3}) & \sin(wt + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos wt & \cos(wt - \frac{2\pi}{3}) & \cos(wt + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \quad (\text{III.17})$$

et

$$P^{-1}(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \sin \omega t & \cos \omega t \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \quad (\text{III.18})$$

a) Choix du référentiel

Le référentiel est le système d'axe (d, q) associé à la vitesse de rotation choisie pour lui, c'est-à-dire à ω . Dans l'application de la transformation sur le réseau électrique il y'a deux types de référentiels intéressants :

- **Référentiel tournant à la pulsation ω_s**

Dans ce cas : $\theta = \omega_s * t$ (ω_s : La pulsation des tensions du réseau).

- **Référentiel fixe (stationnaire)**

C'est le référentiel le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées. Il se traduit par la condition : $\theta = 0$, avec : θ : angle entre l'axe de la phase a du système triphasé et l'axe d du système biphasé. $\omega_s = \frac{d\theta}{dt}$: vitesse angulaire des axes (d, q) par rapport aux axes (abc) .

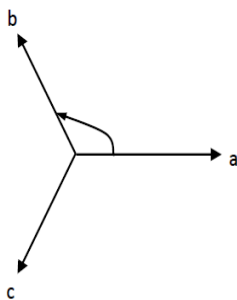


Figure III. 14. Système triphasé.

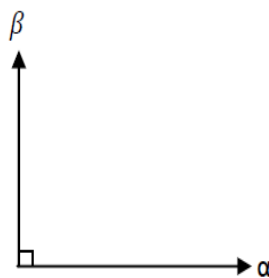


Figure III. 15. Référentiel fixe.

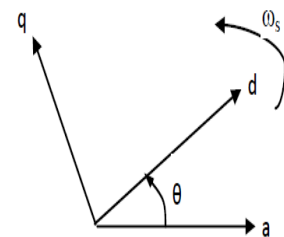


Figure III. 16. Référentiel tournant

III.3.5. Modèle du réseau dans le repère de Park

Les équations triphasées du réseau électrique lié au côté alternatif de l'onduleur a deux niveaux ont données par [21] [2] [18] :

$$\begin{cases} v_a = R.i_a + L.\frac{di_a}{dt} + e_a \\ v_b = R.i_b + L.\frac{di_b}{dt} + e_b \\ v_c = R.i_c + L.\frac{di_c}{dt} + e_c \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

On applique la transformation de Park (III.18) sur l'équation (III.19), on obtient le système suivant dans le repère tournant :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_q \\ -i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} \quad (\text{III.20})$$

avec : e_d, e_q : Les tensions biphasées de ligne du réseau, v_d, v_q : Les tensions biphasées à la sortie de l'onduleur et i_d, i_q : Les courants biphasés du réseau.

III.3.6. Modèle d'état équivalent

En négligeant les pertes de puissance dans les interrupteurs de l'onduleur, le principe de la conservation de la puissance entre le côté continu et le côté alternatif permet d'écrire [21] [2] [18]

$$e_d.i_d + e_q.i_q = v_{dc}.i_{dc} \quad (\text{III.21})$$

En appliquant la loi de Kirchhoff au côté continu de l'onduleur, on obtient

$$c \frac{dv_{dc}}{dt} = i_{pv} - i_{dc} = i_{pv} - \frac{e_d.i_d + e_q.i_q}{v_{dc}} \quad (\text{III.22})$$

Les équations différentielles (III.20) et (III.21) forment le modèle d'état de l'onduleur connecté à la capacité d'entrée et le réseau. On peut grouper ces équations dans la forme d'état suivante :

$$\dot{X} = f(x) + g(x).U \quad (\text{III.23})$$

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L}i_d + \omega.i_q - \frac{e_d}{L} \\ -\frac{R}{L}i_q - \omega.i_d - \frac{e_q}{L} \\ \frac{i_{pv}}{c} - \frac{e_d.i_d + e_q.i_q}{v_{dc}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} .U \quad (\text{III.24})$$

avec,

$$U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} : \text{Vecteur d'entrée et } X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ v_{dc} \end{bmatrix} : \text{Vecteur d'état.}$$

III.4. Simulation de la cascade sans application de la commande

Dans le but de montrer la nécessité de conception d'une commande, on utilise le logiciel Matlab/Simulink pour simuler la cascade (générateur PV, bus continu, onduleur, réseau) sans régulateur. On présente l'évolution temporelle des deux composantes du courant de réseau i_d, i_q , la tension au côté continu de l'onduleur V_{dc} et le courant fourni par le générateur PV i_{pv} , le courant de phase i_a avec la tension de phase e_a du réseau, ainsi que la tension de phase à la sortie de l'onduleur et la puissance fournie par le générateur PV.

Le schéma de l'association générateur PV, l'onduleur et le réseau est illustré par la figure III.4. Les paramètres du circuit de puissance simulé sont les suivants : La tension de ligne : $E = 220\sqrt{2}$ V, la fréquence du réseau : $f = 50$ Hz, l'inductance de phase du réseau : $L = 8$ mH, la résistance de phase du réseau : $R = 0.1$ Ω, la capacité d'entrée de l'onduleur : $C = 5$ mF. Les paramètres de la commande MLI sont les suivants : l'indice de modulation $m = 28$, le taux de modulation : $r = 0.9$. Les paramètres du générateur PV sont donnés comme suit : Le module PV : BP 3165 avec $N_s = 72$ et $N_p = 1$, le générateur PV : $n_s = 30$, $n_p = 5$, la puissance du point de puissance maximale : $P_{mpp} = 23584$ W, tension à puissance maximale : $V_{mpp} = 1066$ V, courant à puissance maximale : $I_{mpp} = 22.13$ A.

III.4.1. Fonctionnement sous des conditions climatiques stables (T=25 °C et G=1000W/m²)

Les résultats de simulation sous des conditions climatiques stables (à T=25 °C et G=1000W/m²) sont indiqués sur les figures suivantes :

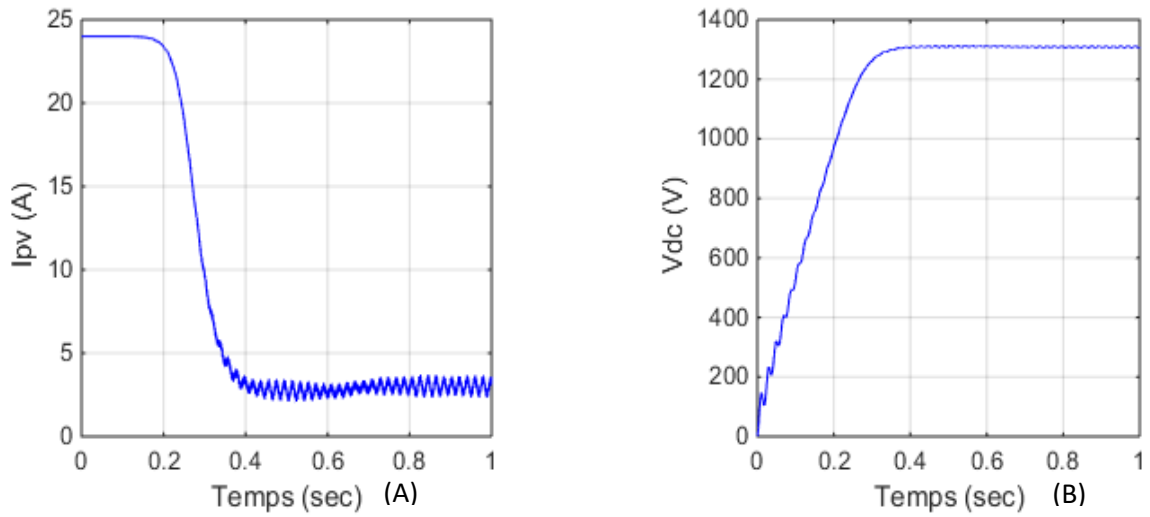


Figure III. 17. Courant (A) et tension (B) fournis par le générateur PV

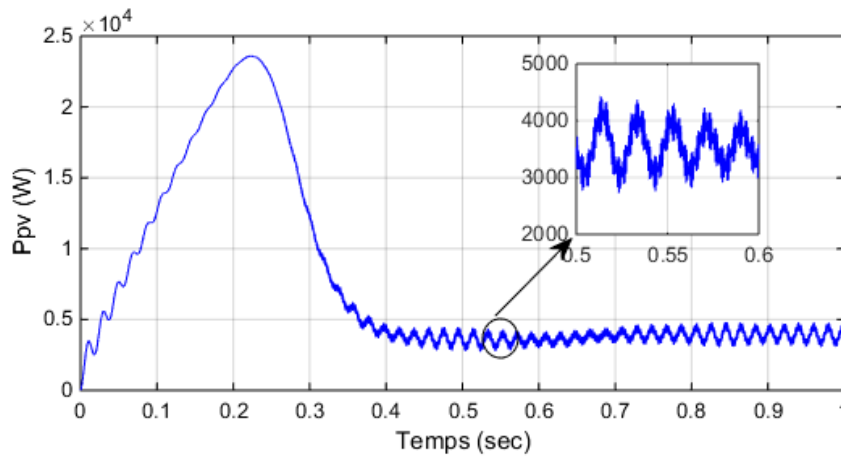


Figure III. 18. Puissance fournie par le générateur PV

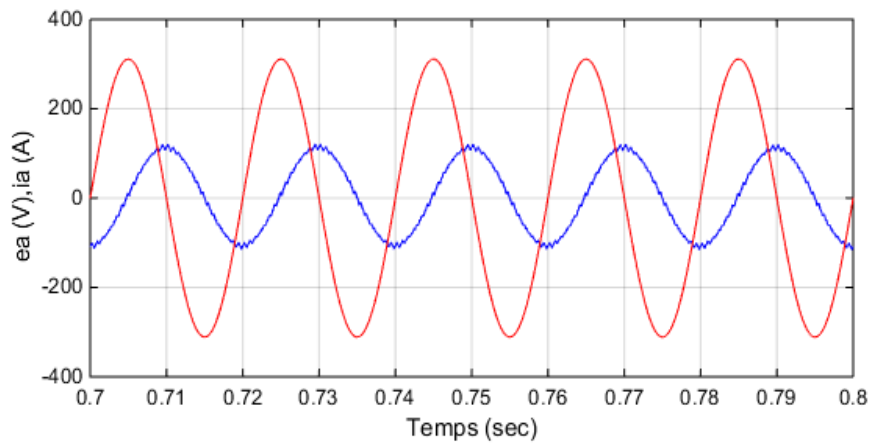


Figure III. 19. Tension e_a et courant i_a de la phase (a) du réseau

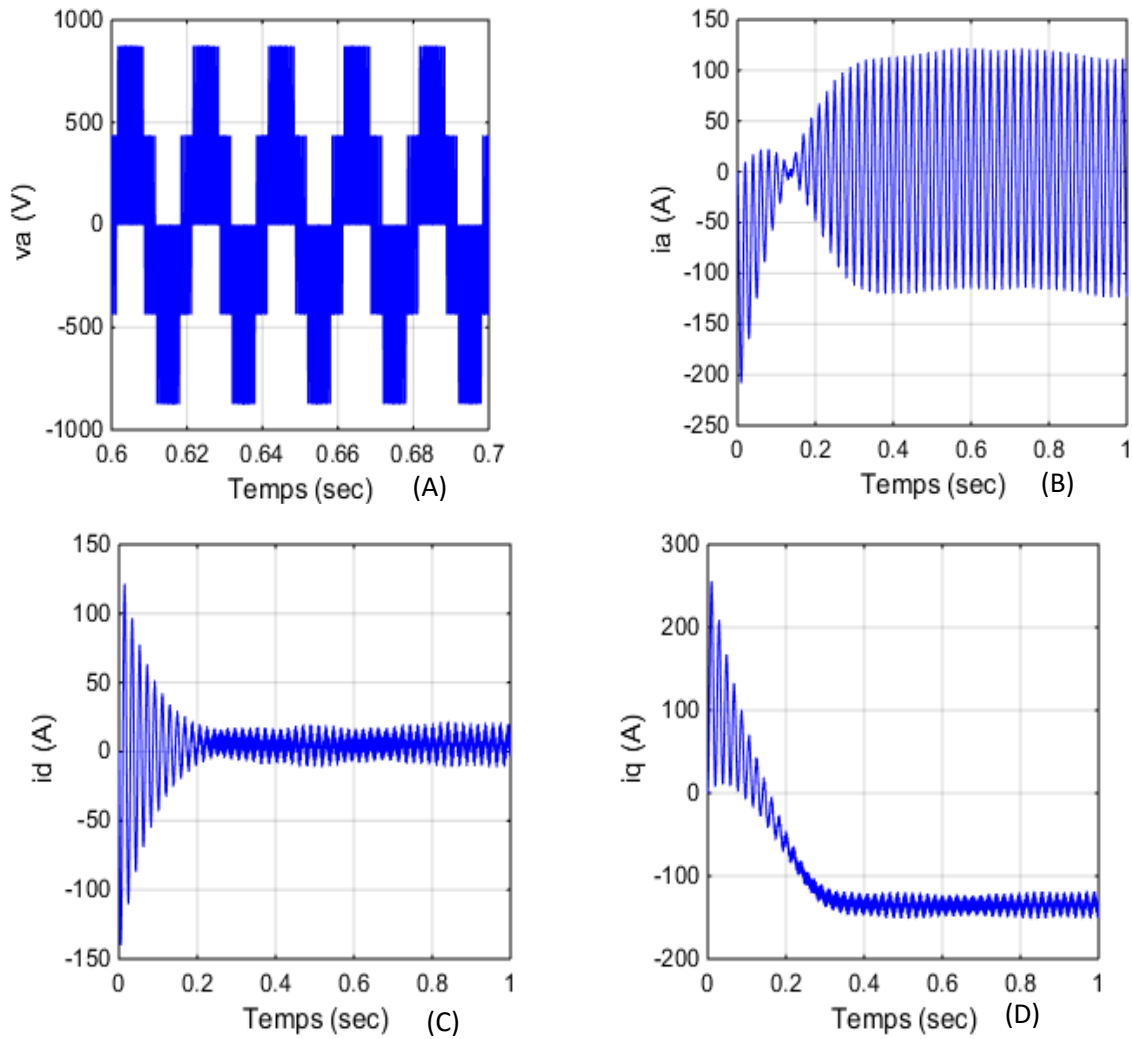


Figure III. 20. Tension de phase à la sortie de l'onduleur (A), courant de phase (a) (B) et les composantes i_d (C), i_q (D) du courant du réseau

La figure III.17 et III.18 représentent la tension aux bornes du bus continu, le courant et la puissance fournie par le générateur PV. On remarque que la tension aux bornes du bus continu tend vers 1310 V, le courant fourni par le générateur diminué jusqu'à 2.9A et la puissance converge vers 3700W. Donc, le générateur ne fonctionne pas au point de puissance maximale (à P_{mpp} , I_{mpp} , V_{mpp}).

On remarque aussi, d'après la figure III.20, que la tension de sortie de l'onduleur est d'une forme alternative, et les composantes de courant du réseau i_d et i_q ne sont pas nulles. La figure III.19 montre qu'il existe un déphasage entre la tension et le courant de phase.

III.4.2. Fonctionnement sous l'effet des changements climatiques

a) Changement brusque du niveau du rayonnement à ($T=25^{\circ}\text{C}$)

On simule la cascade avec une variation progressive de l'éclairement de $t=0\text{s}$ à 0.3s , l'éclairement est constante $G=1000\text{ W/m}^2$, de $t=0.3\text{s}$ à $t=0.4\text{s}$, l'éclairement diminue progressivement jusqu'à $G=600\text{ W/m}^2$, de $t=0.4\text{s}$ à $t=0.8\text{s}$, l'éclairement reste constante $G=600\text{ W/m}^2$, de $t=0.8\text{s}$ à $t=0.9\text{s}$, l'éclairement augmente progressivement jusqu'à $G=1000\text{ W/m}^2$ et reste constant jusqu'à $t=1\text{s}$. Comme le montre la figure III.21.

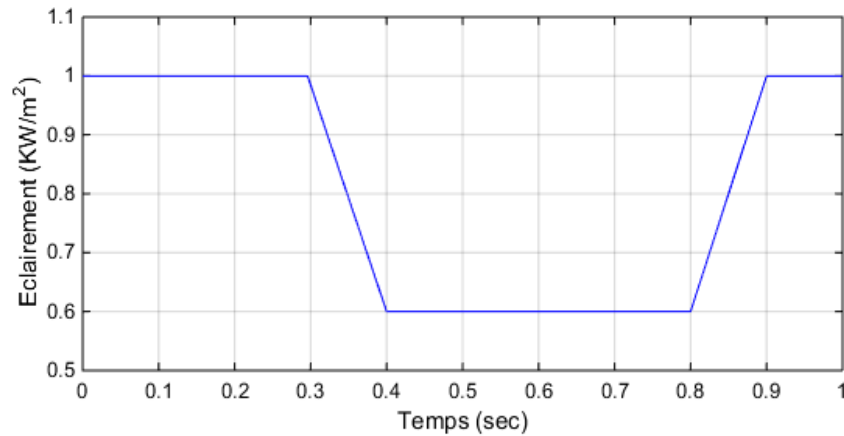
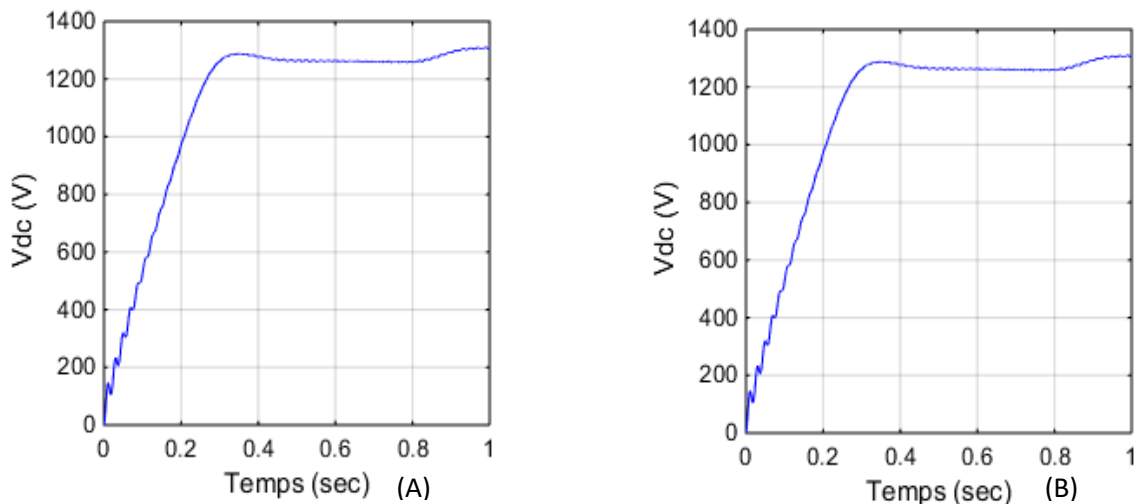


Figure III. 21. Forme de variation de l'irradiation solaire

La figure III.22 montre les résultats de simulation pour un changement brusque et croissant du niveau du rayonnement. La tension V_{dc} , la puissance P_{pv} , le courant i_{pv} et la composant i_d augmentent avec l'augmentation brutale de l'éclairement, par contre le courant i_q diminue.



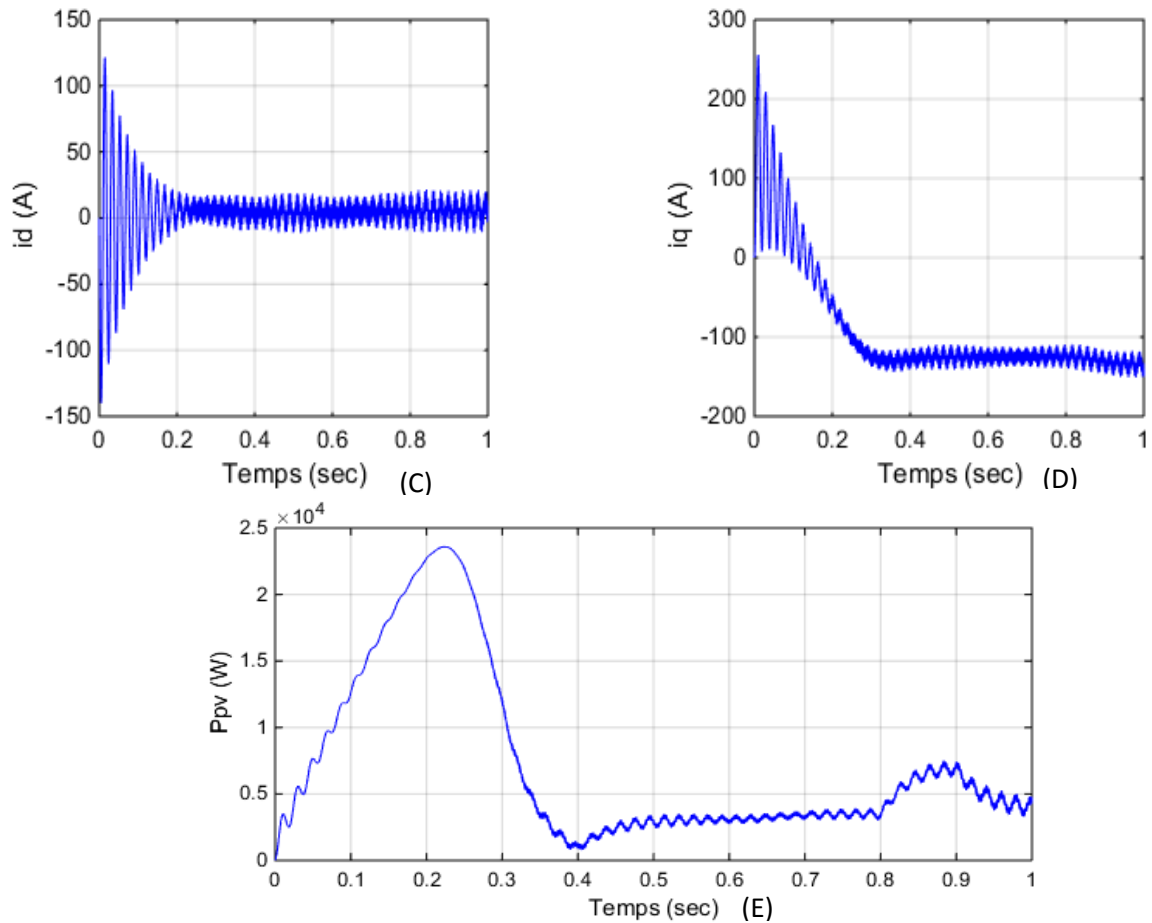


Figure III. 22. Effet du rayonnement sur la tension V_{dc} (A), le courant i_{pv} (B), les composantes i_d (C), i_q (D) du réseau et la puissance P_{pv} (E)

b) Changement progressive du niveau de la température à ($G=1000 \text{ W/m}^2$)

On simule la cascade avec une variation progressive de la température : de $t=0\text{s}$ à 0.3s , la Température est constante $T=25^\circ\text{C}$, de $t=0.3\text{s}$ à $t=0.4\text{s}$, la température augmente progressivement jusqu'à $T=70^\circ\text{C}$, de $t=0.4\text{s}$ à $t=0.8\text{s}$ la température reste constante $T=70^\circ\text{C}$, de $t=0.8\text{s}$ à $t=0.9\text{s}$, la température diminue progressivement jusqu'à $T=25^\circ\text{C}$ est reste constante jusqu'à $t=1\text{s}$, comme il est illustré par la figure III.23.

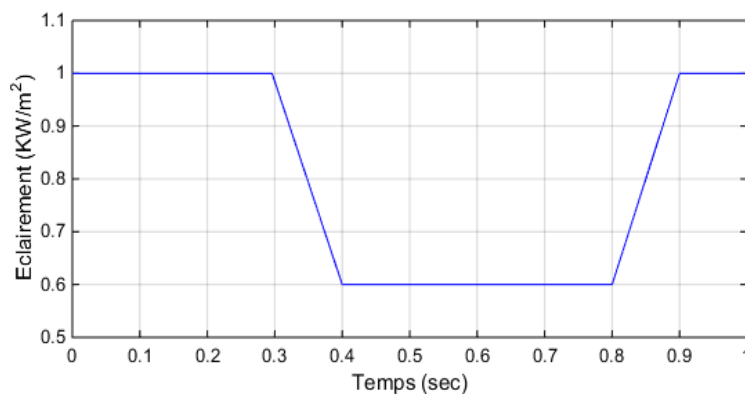


Figure III. 23. Forme de variation de la température

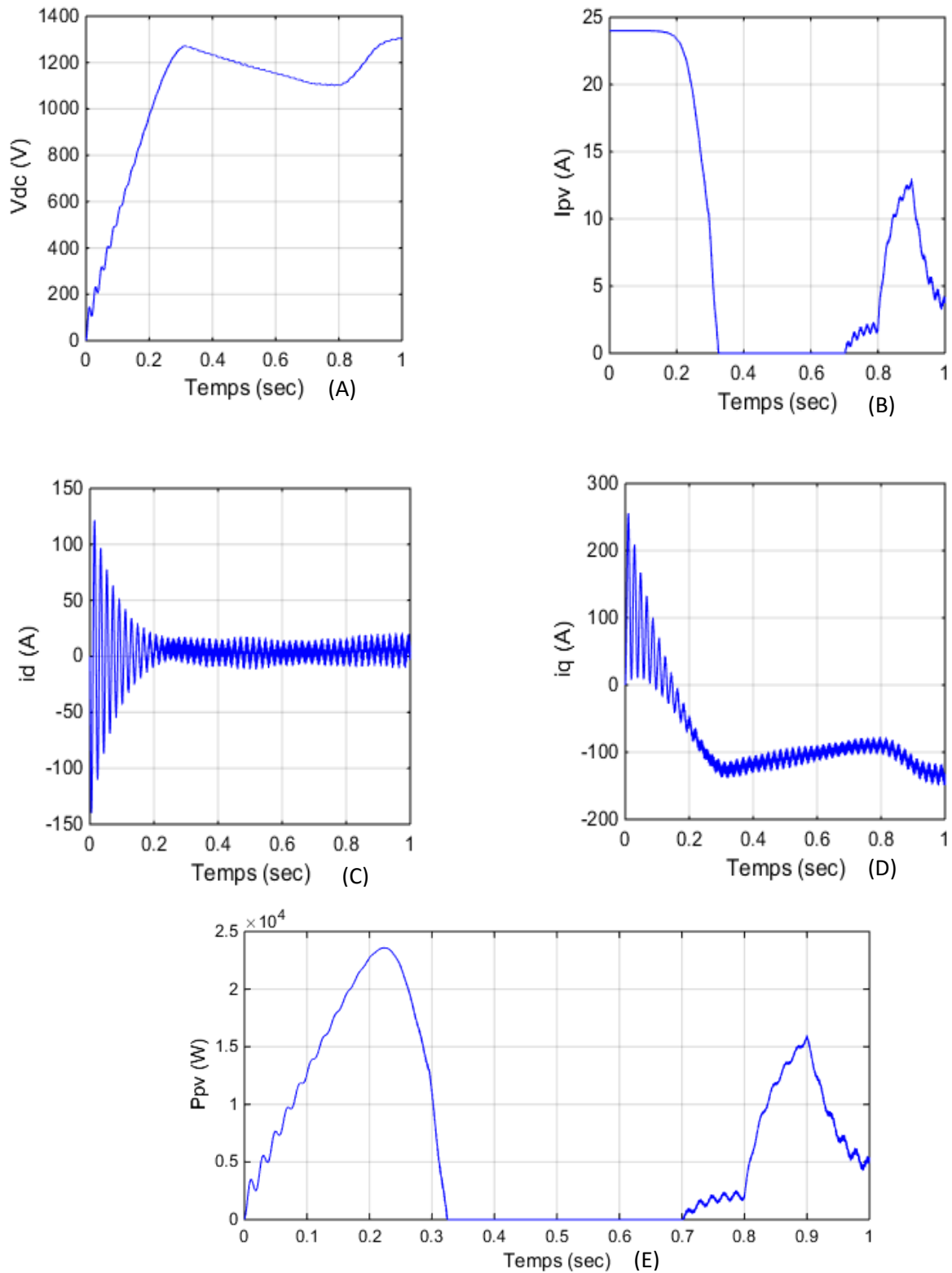


Figure III. 24. Effet de la température sur la tension V_{dc} (A), le courant i_{pv} (B), les composantes i_d (C), i_q (D) du réseau et la puissance P_{pv} (E)

La figure III.24 montre les résultats de simulation pour un changement progressif du niveau de la température et l'éclairement reste constant et égale à 1000 W/m². Ce changement de la

température provoque des changements sur la tension V_{dc} , le courant i_{pv} , i_q , i_d et la puissance fournie par le générateur PV.

Ces résultats montrent que le générateur PV ne fonctionne pas dans le point de puissance maximal. Ainsi, il existe un déphasage entre la tension et le courant de phase du réseau (un mal facteur de puissance) soit avec la présence des changements climatiques ou non.

Ces résultats montrent alors qu'on doit appliquer une commande en amont de l'onduleur pour la recherche du point de puissance maximale du générateur PV, et en aval de l'onduleur pour l'amélioration du facteur de puissance du réseau électrique.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique ; on a commencé par les différentes tailles des systèmes photovoltaïques connectées au réseau, puis on a donné les différentes configurations des raccordements de ces centrales au réseau : raccordement directe avec onduleurs à plusieurs topologies, et raccordement par l'intermédiaire d'un hacheur. Ensuite, nous avons vu la modélisation et la simulation de chaque composante du système étudié, en commençant par le générateur PV et l'influence des changements climatiques sur ses caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$. Par la suite, on a présenté et simulé l'onduleur à deux niveaux commandé en MLI.

Nous avons simulé la cascade avec et sans changements climatiques. Nous avons bien remarqué que le générateur PV ne fonctionne pas au point de puissance maximale, et qu'il existe un déphasage entre la tension et le courant du réseau.

Dans le prochain chapitre, nous allons appliquer deux techniques de commande non linéaires à savoir : la commande linéarisante et la commande backstepping, et ceci dans le but d'assurer le fonctionnement au point de puissance maximale et de minimiser l'énergie réactive.

Chapitre IV.

Commandes non linéaires appliquées au système PV

Chapitre IV. Commandes Non linéaires appliquées au Système PV

IV.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté la modélisation et la simulation d'un système PV connecté au réseau. Les résultats de simulation ont montré la nécessité d'appliquer une commande à ce système pour assurer la poursuite du point de puissance maximale et le contrôle de l'énergie réactive, et ceci, pour garder le facteur de puissance unitaire côté réseau et d'extraire la puissance maximale possible du panneau photovoltaïque. Pour réaliser cet objectif, nous avons opté pour la commande non linéaire. Ce choix est justifié par les avantages de la commande non linéaire, en particulier en termes de stabilité et de robustesse

Dans ce chapitre, nous allons appliquer la commande linéarisante et la commande backstepping sur le système PV connecté au réseau. En premier lieu, des notions de base sur la commandes linéarisante seront abordées, après nous développons une loi de commande linéarisante. Dans la deuxième partie, après la présentation des concepts de base de la technique de commande récursive backstepping, nous synthétisons une loi de commande stabilisante à base de cette technique. Des résultats de simulation seront présentés pour les deux algorithmes.

IV.2. Commande linéarisante

IV.2.1. Géométrie différentielle

IV.2.1.1. Difféomorphisme

Soit p un point de \mathbb{R}^n et ϕ une application d'un ouvert $U \in \mathbb{R}^n$ dans un ouvert $V \in \mathbb{R}^n$, on dit que ϕ est un difféomorphisme local dans un voisinage U de P si ϕ est inversible de U dans un voisinage V du point $\phi(P)$ de V , et si ϕ^{-1} et ϕ est continue [22].

Remarque IV.1: $\phi(x)$ est un difféomorphisme si est seulement si $\frac{d\phi}{dx}$ est inversible pour

tout $x \in \Omega$ si $\Omega = \mathbb{R}^n$ est $\lim_{\|x\| \rightarrow \infty} \|\phi(x)\| = \infty$, on parle de difféomorphisme global.

IV.2.1.3. Champ de vecteur

Un champ de vecteur sur \mathbb{R}^n est une fonction dérivable $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, donnée par [22] :

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix} \quad (\text{IV.1})$$

IV.2.1.4. Gradient

Etant donnée une fonction scalaire $h(x)$ de l'état x , le gradient de h est donné par [18] :

$$\nabla h = \frac{\partial h}{\partial x} \quad (\text{IV.2})$$

∇h : représente un vecteur colonne d'élément : $\nabla h_i = \frac{\partial h}{\partial x_i}$.

IV.2.1.5. Jacobien

Le Jacobien d'un champ de vecteur $f(x)$ est donné par [18] :

$$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial x} \quad (\text{IV.3})$$

∇f : représente une matrice d'élément : $\nabla f_{i,j} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j}$.

IV.2.1.6. Dérivée de Lie

Soit une fonction scalaire $h(x)$ et un champ de vecteur $f(x)$, la dérivée de Lie de $h(x)$ par rapport à $f(x)$ ou le long de $f(x)$, est une fonction scalaire donnée par [18] :

$$L_f h(x) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial h}{\partial x_i} f_i(x) \quad (\text{IV.4})$$

Les dérivées de Lie d'ordre supérieur sont données par :

$$\begin{cases} L_f^0 h = h \\ L_f^1 h = L_f h \\ L_f^i h = L_f(L_f^{i-1} h), i \geq 1 \end{cases} \quad (\text{IV.5})$$

IV.2.2. Linéarisation entrée-sortie

C'est une technique de commande où la sortie y du système est dérivée plusieurs fois jusqu'à l'apparition de l'entrée de commande u dans la dérivée d'ordre r . Ensuite, l'entrée de commande U est utilisée pour avoir une relation linéaire de la forme : $y^{(r)} = v$, où v est

une nouvelle entrée de commande, et r est appelé le degré relatif du système. Si $r = n$, on obtient une linéarisation complète de la dynamique du système, et si $r < n$, on a une linéarisation partielle de la dynamique du système. Dans ce dernier cas, on aura une dynamique interne ou dynamique des zéros.

IV.2.2.1. Procédure de linéarisation entrée-sortie

Considérons le système :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (\text{IV.6})$$

1) Dériver la sortie y jusqu'à l'apparition de l'entrée u .

$$\begin{aligned} y &= h(x) \\ \dot{y} &= L_f h(x), L_g h(x) = 0 \\ \ddot{y} &= L_f^2 h(x), L_g L_f h(x) = 0 \\ y^{(r-1)} &= L_f^{(r-1)} h(x), L_g L_f^{(r-2)} h(x) = 0 \\ y^{(r)} &= L_f^r h(x) + L_g L_f^{(r-1)} h(x)u, L_g L_f^{(r-1)} h(x) \neq 0 \end{aligned} \quad (\text{IV.7})$$

Alors, le degré relatif du système est égal à r .

2) Si le degré relatif $r < n$, vérifier la stabilité asymptotique de la dynamique des zéros.

3) Choisir une loi de commande linéarisant de la forme

$$u = \frac{1}{L_g L_f^{r-1} h(x)} \left(-L_f^r h(x) + v \right) \quad (\text{IV.8})$$

On obtient ainsi le modèle linéaire : $y^{(r)} = v$

4) Suivant les objectifs de commande, calculer la loi de commande linéaire v du système : $y^{(r)} = v$.

On peut utiliser tous les outils de synthèse des systèmes linéaires

IV.2.3. Application de la commande linéarisante sur le système PV

IV.2.3.1. Rappel sur le modèle d'état de système

On rappelle le modèle d'état du système en cascade dans le repère de Parck obtenu dans le troisième chapitre (III. 24) :

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} i_d + \omega i_q - \frac{e_d}{L} \\ -\frac{R}{L} i_q - \omega i_d - \frac{e_q}{L} \\ \frac{i_{pv}}{c} - \frac{e_d i_d + e_q i_q}{v_{dc}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} U \quad (\text{IV.9})$$

$$\text{où } U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} : \text{vecteur d'entrée et } X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ v_{dc} \end{bmatrix} : \text{vecteur d'état.}$$

L'équation (IV.9) peut être écrite sous la forme

$$\dot{X} = F(x) + G(x)U \quad (\text{IV.10})$$

F(x) et G(x) : deux champs de vecteur définis par :

$$F = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L}x_1 + w x_2 - \frac{e_d}{L} \\ -\frac{R}{L}x_2 - w x_1 - \frac{e_q}{L} \\ \frac{i_{pv}}{c} - \frac{e_d \cdot x_1 + e_q \cdot x_2}{c \cdot x_3} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.11})$$

$$G = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.12})$$

Les sorties du système sont la composante i_q du courant de réseau, et la tension d'entrée continue v_{dc} .

Ces sorties sont choisies suivant l'objectif de la commande, qui est le réglage de la tension continue à la sortie du panneau pour la poursuite du point de puissance maximale et le réglage de l'énergie réactive dans le réseau pour donner un facteur de puissance unitaire.

IV.2.3.2. Détermination de la commande

a) Calcul de degré relatif

On calcule le degré relatif associé à chacune des sorties i_q et v_{dc} :

- Pour la sortie y_1 :

$$\dot{y}_1 = L_f h_1(x) = \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L}(v_q - e_q - Ri_q + wLi_d) \quad (\text{IV.13})$$

On remarque que l'entrée v_q apparaît dans la première dérivée de y_1 , donc le degré relatif de y_1 est $r_1 = 1$.

- la sortie y_2 :

$$\dot{y}_2 = L_f h_2(x) = \frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{i_{pv}}{c} - \frac{e_d i_d + e_q i_q}{c.v_{dc}} \quad (IV.14)$$

Les entrée v_{dc} et v_q n'apparaissent pas dans la première dérivée, donc il faut dériver y_2 une deuxième fois

$$\ddot{y}_2 = L_f^2 h_2(x) = \dot{f}_3 = \frac{i_{pv}}{cx_3} \left[e_d \left(f_1 + \frac{1}{L} u_1 \right) + e_q \left(f_2 + \frac{1}{L} u_2 \right) \right] + \frac{e_d i_d + e_q i_q}{c.v_{dc}^2} \quad (IV.15)$$

Les entrées v_{dc} et v_q apparaissent dans la deuxième dérivée de y_2 donc le degré relatif de y_2 est $r_2 = 2$.

Les degrés relatifs est égale à l'ordre du système $r_1 + r_2 = 3$, donc avec ce choix des sorties, le modèle est exactement linéarisable et non associé avec aucune dynamique interne.

b) Boucle de linéarisation

On effectue le changement de coordonnées suivant

$$\begin{aligned} z_1 &= \phi_1 = h_1(x) \\ z_2 &= \phi_2 = h_2(x) \\ z_3 &= \phi_3 = L_f h_3(x) \end{aligned} \quad (IV.16)$$

Dans ces nouvelles coordonnées, le modèle d'état du système s'écrit :

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L} (v_q - e_q - Ri_q + wLi_d) \\ \dot{z}_2 &= \frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{i_{pv}}{c} - \frac{e_d i_d + e_q i_q}{c.v_{dc}} = z_3 \\ \dot{z}_3 &= \ddot{z}_2 = \frac{i_{pv}}{c} - \frac{1}{c.x_3} \left[e_d \left(f_1 + \frac{1}{L} u_1 \right) + e_q \left(f_2 + \frac{1}{L} u_2 \right) \right] + \frac{e_d i_d + e_q i_q}{c.v_{dc}^2} f_3 \end{aligned} \quad (IV.17)$$

La première et la troisième équation qui sont dépendantes des entrées peuvent être écrites sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} \dot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} + E(X) \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad (IV.18)$$

où

$$\begin{cases} b_1 = f_2 \\ b_2 = \frac{i_{pv}}{c} - \frac{1}{cx_3} (e_d f_1 + e_q f_2) + \frac{(e_d x_1 + e_q x_2)}{cx_3^2} f_3 \end{cases} \quad (IV.19)$$

et

$$E(x) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ \frac{-e_d}{L.c.x_3} & \frac{-e_q}{L.c.x_3} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.20})$$

$E(X)$: c'est la matrice de commande du système, cette matrice doit être non singulière afin de faire le retour d'état linéarisant. Le déterminant de la matrice $E(X)$ est :

$$\det E(X) = \frac{e_d}{L^2.c.x_3} \quad (\text{IV.21})$$

Les composants e_d et e_q de tension du réseau sont toujours différentes de zéro. Par conséquent, le déterminant est non nul et la matrice $E(X)$ est non singulière, donc on applique le retour d'état comme suit :

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = E^{-1}(X) \begin{pmatrix} v_1 - b_1 \\ v_2 - b_2 \end{pmatrix} \quad (\text{IV.22})$$

L'application de ce retour d'état permet d'obtenir deux sous-systèmes linéaires d'ordre 1 et 2 respectivement

$$\begin{pmatrix} \dot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} \quad (\text{IV.23})$$

Ces deux sous-systèmes sont équivalents à deux intégrateurs comme indiqué dans la figure (IV.1).

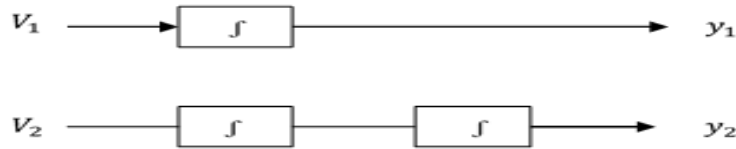


Figure IV. 1. Intégrateurs équivalentes aux sous-systèmes linéaires

c) Boucle de réglage

Les entrées v_1 et v_2 sont obtenues en faisant une boucle de réglage linéaire pour assurer la poursuite des références de la tension v_{dc} et du courant i_q .

$$\begin{aligned} v_1 &= k_{11}(y_{1ref} - y_1) + k_{12} \int (y_{1ref} - y_1) dt + \dot{y}_{1ref} \\ v_2 &= k_{21}(y_{2ref} - y_2) + k_{22}(\dot{y}_{2ref} - \dot{y}_2) + k_{23} \int (y_{2ref} - y_2) dt + \ddot{y}_{2ref} \end{aligned} \quad (\text{IV.24})$$

Le terme intégrateur est ajouté pour améliorer les performances de poursuite au régime établi. Les coefficients k_{11} , k_{12} , k_{21} , k_{22} , k_{23} sont choisis de sorte que les polynômes $k_{12} + k_{11}s + s^2$ et $k_{23} + k_{22}s + k_{21}s^2 + s^3$ sont des polynômes d'HURWITZ (racines à parties réelles négatives).

IV.2.3.3. Résultats de Simulation

Le schéma bloc de la commande du système global est indiqué à la figure IV.2. Le bloc de la commande du point de puissance maximale (MPPT) fournit la tension de référence v_{dref} au régulateur à base de la commande linéarisante. Ce dernier fournit les signaux de commande v_{qref} et v_{dref} . Ces deux signaux de commande sont employés pour produire les tensions de référence de phase, en appliquant la transformation de Park. Les tensions de références de phase sont employées pour la commande en MLI de l'onduleur.

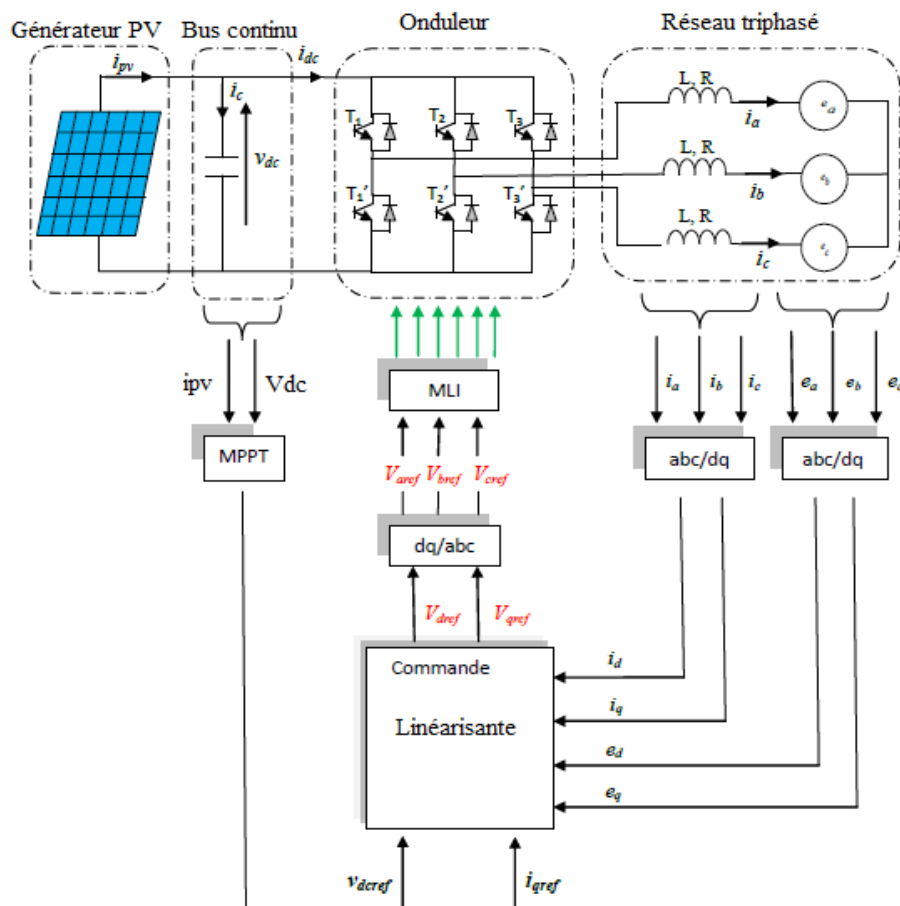


Figure IV. 2. Schéma de la commande linéarisante appliquée au système PV

On a simulé la cascade dans les conditions standards ($G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25\text{ }^\circ\text{C}$) avec les paramètres du circuit de puissance précédent. Les paramètres du régulateur utilisés dans cette étude en simulation sont les suivants : $k_{11} = 10^4$, $k_{12} = 10^3$, $k_{21} = 10^5$, $k_{22} = 10^4$, $k_{23} = 3.10^5$. Les résultats de simulations sont indiqués aux figures suivantes :

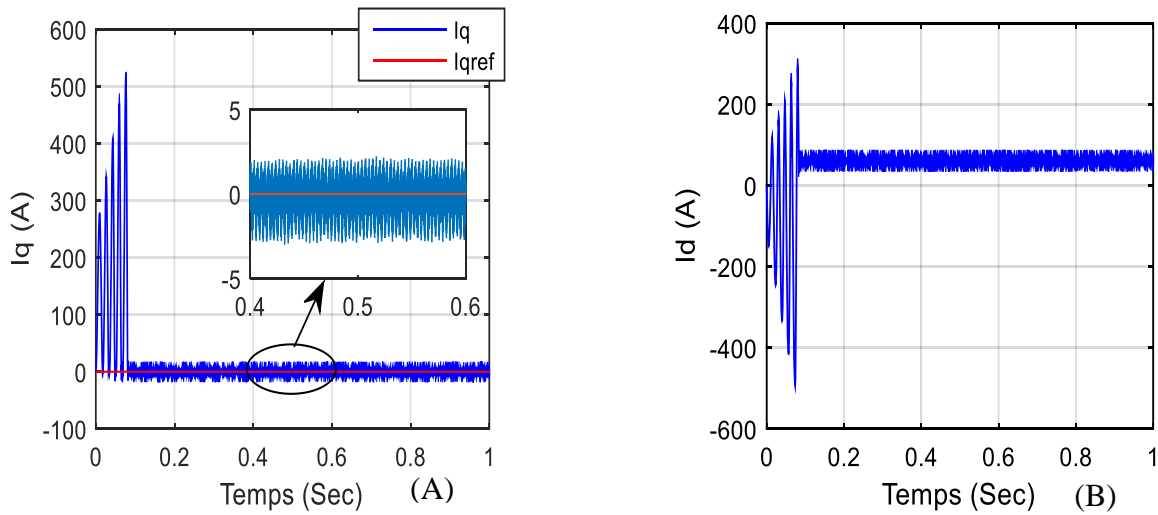


Figure IV.3. Composants i_q (A) et i_d (B) du courant du réseau.

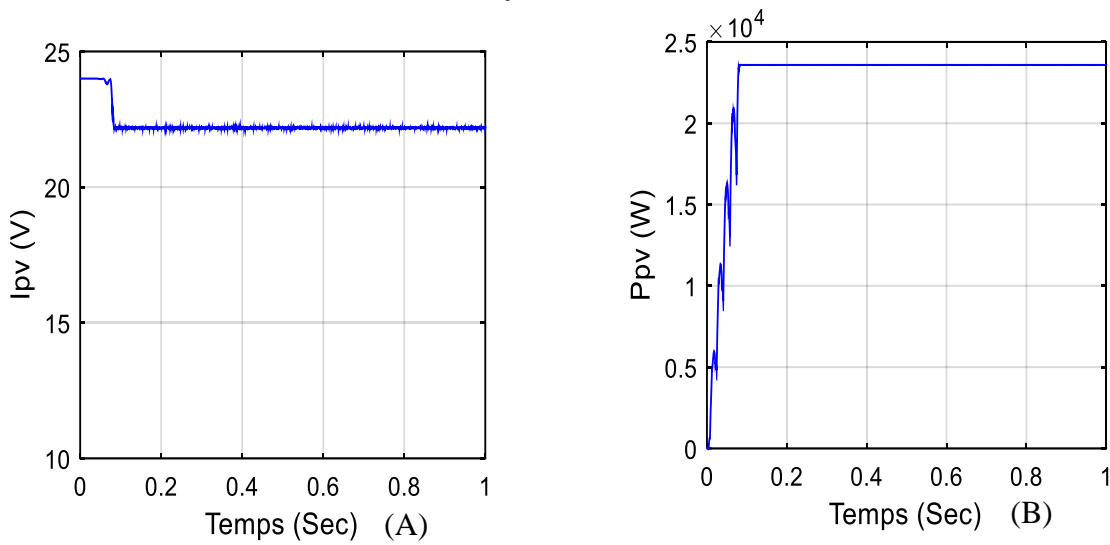


Figure IV.4. Courant I_{pv} (A), puissance P_{pv} (B) de champ photovoltaïque

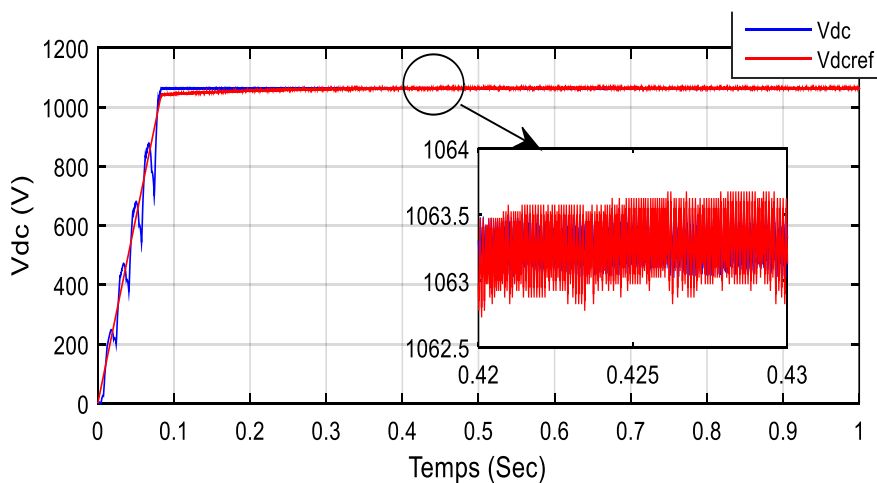


Figure IV.5. Tension continue à l'entrée de l'onduleur V_{dc} et sa référence.

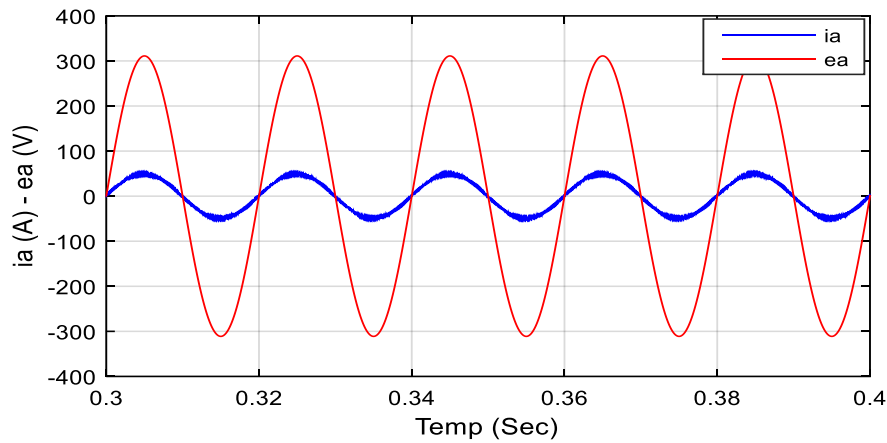


Figure IV.6. Tension e_a et courant i_a de phase de réseau

La figure IV.3 montre les deux composantes i_d et i_q du courant de réseau, où la composante i_d prend une valeur constante dépendante du niveau de puissance du champ photovoltaïque, et la composante i_q tend à sa référence qui est zéro dans ce cas.

Les figures IV.4, IV.5 prouvent que la puissance de sortie, la tension et le courant du panneau photovoltaïque convergent vers le point de puissance maximale, caractérisé par une puissance de 23584 W, une tension continue $V_{dc}=1064.7$ V et un courant $I_{pv}=24$ A, comme peut être déduit des caractéristiques du champ photovoltaïque. La figure IV.6 montre que le courant de ligne de réseau est en phase avec la tension de ligne et cela montre bien que le facteur de puissance dans le réseau est unitaire.

IV.2.4. Etude de la robustesse

Afin de tester la robustesse de la commande proposée, on a étudié l'influence des variations Climatiques (irradiation) sur les performances de réglage. On a fait une variation de l'irradiation solaire comme il est présenté dans le chapitre précédent (figure III.21). Les résultats de simulation indiqués sur les figures IV.7-IV.10

Les figures IV.7-IV.10 montrent que la tension V_{dc} suit sa référence malgré les variations de l'éclairage, et que ces variations n'affectent pas la composante du courant du réseau i_q et par conséquent le facteur de puissance n'est pas affecté aussi.

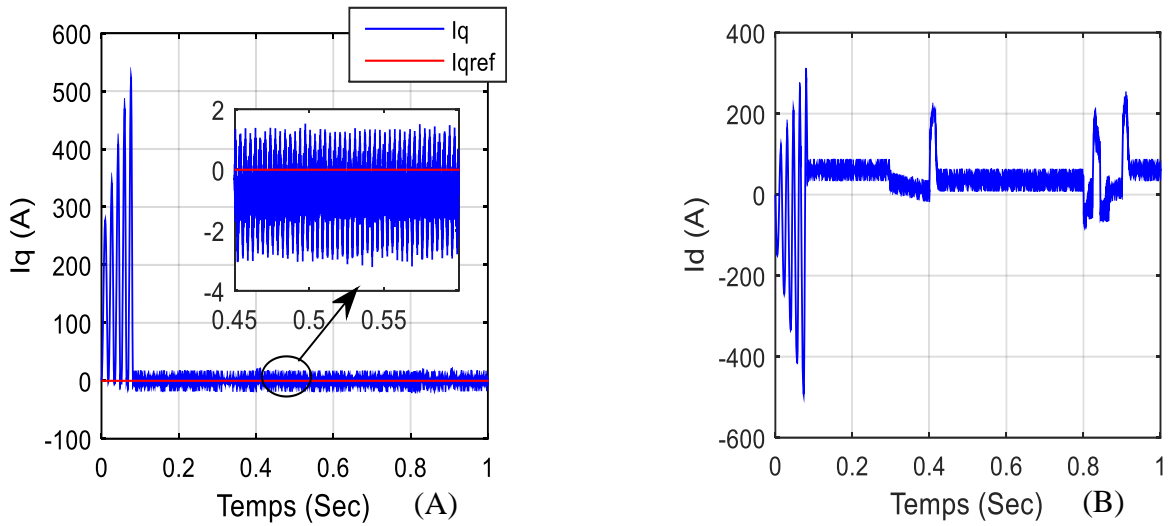


Figure IV. 7. Composants I_q (A) et I_d (B) du courant du réseau avec le test de robustesse

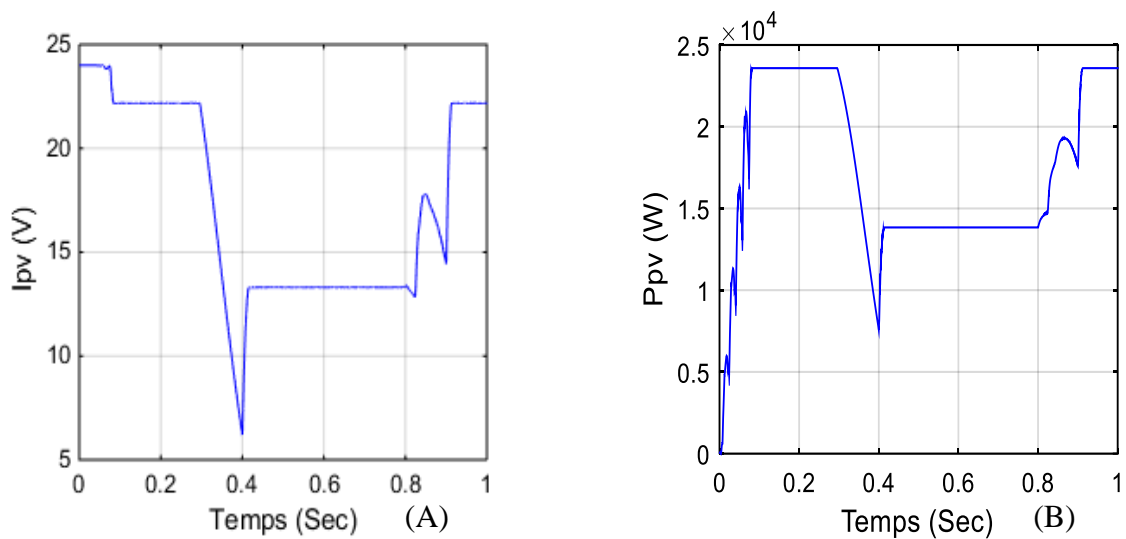


Figure IV. 8. Courant i_{pv} (A) est puissance p_{pv} (B) de champ PV avec le test de robustesse

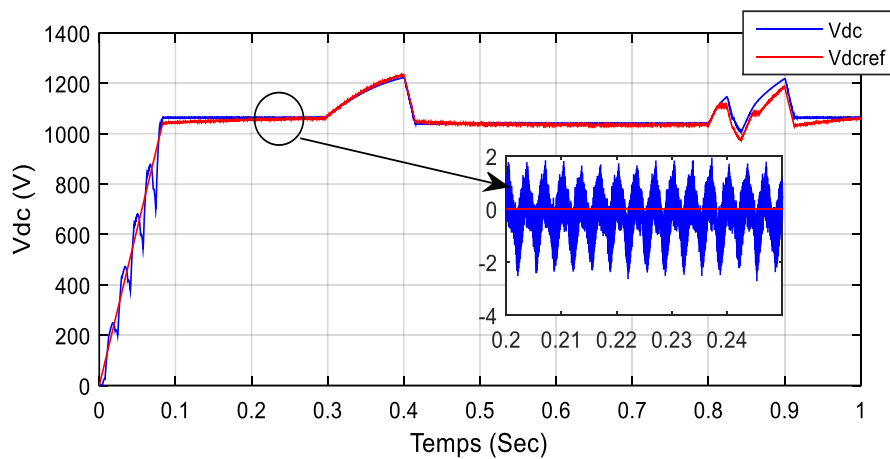


Figure IV. 9. Tension continue à l'entrée de l'onduleur v_{dc} et sa référence avec le test de robustesse

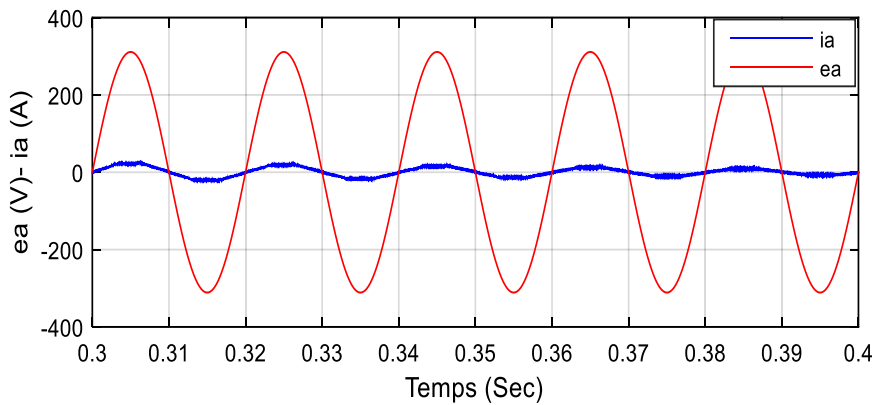


Figure IV. 10. Tension e_a et courant i_a de phase de réseau avec le test de robustesse

IV.3. Commande Backstepping

IV.3.1. Principe de la commande Backstepping

La commande Backstepping propose une méthode de synthèse systématique destinée à la classe des systèmes non linéaires ayant une forme triangulaire. Elle est basée sur la décomposition du système entier de commande, qui est généralement multi variables et d'ordre élevé, en une cascade de sous-systèmes du premier ordre. Pour chaque sous-système, une loi de commande dite virtuelle est calculée. Cette dernière servira comme référence pour le sous-système suivant jusqu'à l'obtention de la loi de commande pour le système complet. Par ailleurs, cette technique a l'avantage de conserver les non linéarités utiles pour la performance et la robustesse de la commande, contrairement aux méthodes de linéarisation. La détermination des lois de commande qui découle de cette approche est basée sur l'emploi des fonctions de Lyapunov de commande [24].

IV.3.2. Fonction de Lyapunov

La commande des systèmes non linéaire s'appuie sur deux approches de Lyapunov

- La première méthode : Cette méthode permet d'analyser la stabilité d'un système à partir de l'étude de la stabilité locale par linéarisation de la dynamique autour d'un point d'équilibre.
- La deuxième méthode : Cette méthode est basée sur le concept d'énergie dans un système. Le principe de cette méthode consiste à analyser la stabilité du système, sans même résoudre les équations différentielles non linéaires qui le régissent.

IV.3.3. Méthode récursive de conception de backstepping

Cette méthode s'applique à des systèmes ayant une forme dite triangulaire donnée par la forme générale suivante [24] :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_n = f_n(x_1, \dots, x_n) + g_n(x_1, \dots, x_n)u \end{cases} \quad (\text{IV.25})$$

avec $x = [x_1, \dots, x_n] \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}$

On désire faire suivre à la sortie $y = x_1$ le signal de référence y_{ref} supposée connu. Le système étant d'ordre n , la conception s'effectue en n étapes.

- **Étape 1 : Calcul de la première commande virtuelle**

On considère d'abord le premier sous-système, la variable d'état est traitée comme une commande virtuelle et l'on définit la première valeur désirée

$$x_{1d} = \alpha_0 = y_{ref} \quad (\text{IV.26})$$

où : x_{1d} est l'état désiré.

La première valeur d'erreur est définie par

$$z_1 = x_1 - \alpha_0 \quad (\text{IV.27})$$

et

$$\dot{z}_1 = \dot{x}_1 - \dot{\alpha}_0 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 - \dot{\alpha}_0 \quad (\text{IV.28})$$

Pour un tel sous-système nous construisons une fonction de Lyapunov V_1 sous une forme quadratique

$$V_1(z_1) = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (\text{IV.29})$$

Sa dérivé temporelle est donnée par :

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = z_1 [f_1 + g_1 x_2 - \dot{\alpha}_0] \quad (\text{IV.30})$$

Afin d'assurer la stabilité du premier sous-système d'après Lyapunov, il faut que V_1 soit négative pour cela on choisit

$$\dot{V}_1 = -k_1 z_1^2 \leq 0 \quad (\text{IV.31})$$

où : k_1 est une constante positive de conception.

En substituant (IV. 30) dans (IV.31), on trouve

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = z_1 [f_1 + g_1 x_2 - \dot{\alpha}_0] = -k_1 z_1^2 \quad (\text{IV.32})$$

Cela donne la commande virtuelle x_2

$$\alpha_1 = x_2 = \frac{1}{g_1(x_1)} [-k_1 z_1 + \dot{\alpha}_0 - f_1(x_1)] \quad (\text{IV.33})$$

D'où la stabilité asymptotique de l'origine.

Cette dernière sera la nouvelle référence désirée x_{2d} du système suivant.

• **Etape 2 : Calcul de la deuxième commande virtuelle**

On considère les deux premières équations du système défini en (IV.25)

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3\end{aligned}$$

où la nouvelle référence désirée α_1 sera la variable de commande pour le sous-système précédant x_{2d} telle que

$$x_{2d} = \alpha_1 \quad (\text{IV.34})$$

La nouvelle variable de l'erreur est

$$z_2 = x_2 - \alpha_1 \quad (\text{IV.35})$$

$$\dot{z}_2 = f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 - \dot{\alpha}_1$$

De la même manière, on définit la fonction de Lyapunov pour assurer la stabilité du sous-système suivant

$$\dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 \quad (\text{IV.36})$$

Ces fonctions dépendent forcément des états précédents du sous-système défini par

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \quad (\text{IV.37})$$

On choisit une fonction de Lyapunov étendue pour le sous-système (IV. 36)

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}z_2^2 = \frac{1}{2}[z_1^2 + z_2^2] \quad (\text{IV.38})$$

La dérivé de cette dernière est donnée par

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + z_2\dot{z}_2 = -k_1z_1^2 + z_2[f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 - \dot{\alpha}_1] \quad (\text{IV.39})$$

Afin d'assurer la stabilité du sous-système d'après Lyapunov, il faut que \dot{V}_2 soit négative. Pour cela on choisit \dot{V}_2 sous la forme

$$\dot{V}_2 = -k_1z_1^2 - k_2z_2^2 \leq 0 \quad (\text{IV.40})$$

où k_2 est une constante positive de conception.

En substituant (IV.40) dans (IV. 39), on trouve

$$\dot{V}_2 = k_1z_1^2 + z_2[f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 - \dot{\alpha}_1] = -k_1z_1^2 - k_2z_2^2 \quad (\text{IV.41})$$

Cela donne la commande virtuelle x_3

$$x_3 = \frac{1}{g_2(x_1, x_2)}[-k_2z_2 + \dot{\alpha}_1 - f_2(x_1, x_2)] \quad (\text{IV.42})$$

avec

$$\dot{\alpha}_1 = \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} = \frac{g_1(x_1)[-k_1\dot{z}_1 + \ddot{\alpha}_0 - \dot{f}_1(x_1)] - [-k_1x_1 + \dot{\alpha}_0 - \dot{f}_1(x_1)]\dot{g}_1(x_1)}{g_1^2(x_1)} \quad (\text{IV.43})$$

Cette dernière sera la nouvelle référence désirée du sous-système qui suit.

On pose $x_{3ref} = \alpha_2$ et on continue jusqu'à la dernière expression du sous-système (IV. 25) où on trouve la loi de commande réelle.

- **Étape n : Calcul de la loi de commande finale**

Le système (IV. 25) est maintenant considéré dans sa globalité. De la même façon, pour cette étape la référence à suivre sera

$$(x_n)_d = \alpha_{n-1} \quad (IV.44)$$

La variable d'erreur est

$$z_n = x_n - \alpha_{n-1} \quad (IV.45)$$

Sa dérivée est

$$\dot{z}_n = \dot{x}_n - \dot{\alpha}_{n-1} \quad (IV.46)$$

$$\dot{z}_n = [f_n(x_1, \dots, x_n) + g_n(x_1, \dots, x_n)u] - \dot{\alpha}_{n-1}$$

La fonction de Lyapunov

$$V_n = V_1 + \dots + \frac{1}{2}z_n^2 = \frac{1}{2}[z_1^2 + \dots + z_n^2] \quad (IV.47)$$

Sa dérivée devient

$$\dot{V}_n = \dot{V}_1 + \dots + z_n [f_n(x_1, \dots, x_n) + g_n(x_1, \dots, x_n)u - \dot{\alpha}_{n-1}] \quad (IV.48)$$

Ce qui garantit la négativité de la dérivée de la fonction de Lyapunov étendue

$$\dot{V}_n = -k_1 z_1^2 - \dots - k_n z_n^2 \leq 0 \quad (IV.49)$$

Dans cette dernière étape, on est arrivé à déduire la loi de commande réelle u qui permet d'atteindre les objectifs de commande pour le système globale. Un bon choix de celle-ci doit satisfaire

$$f_n(x_1, \dots, x_n) + g_n(x_1, \dots, x_n)u - \dot{\alpha}_{n-1} = -k_n z_n^2 \quad (IV.50)$$

où k_n est une constante positive de conception.

Ainsi, la loi de commande pour le système entier est donnée par

$$u = \frac{1}{g_n(x_1, \dots, x_n)} [-k_n z_n + \dot{\alpha}_{n-1} - f_n(x_1, \dots, x_n)] \quad (IV.51)$$

IV.3.4. Exemples

a) Exemple 1

On considère le système non linéaire du 2^{ème} ordre suivant

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + 2x_1^3 \\ \dot{x}_2 = u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (IV.52)$$

L'algorithme de la commande backstepping pour ce première exemple est donnée par

$$\begin{cases} e_1 = x_1 - \alpha_0 \\ \alpha_1 = -k_1 e_1 - 2x_1^3 + \dot{\alpha}_0 \\ e_2 = x_2 - \alpha_1 \\ u = -e_1 - k_2 e_2 + \dot{\alpha}_1 \end{cases} \quad (IV.53)$$

La trajectoire de référence est : $x_{ref}(t) = \sin(t)$. Les conditions initiales sont : $x(0) = [0, 1]$.

Les paramètres de conception sont : $k_1 = k_2 = 50$.

Les résultats de simulation sont donnés sur les figures IV. 11 et IV. 12.

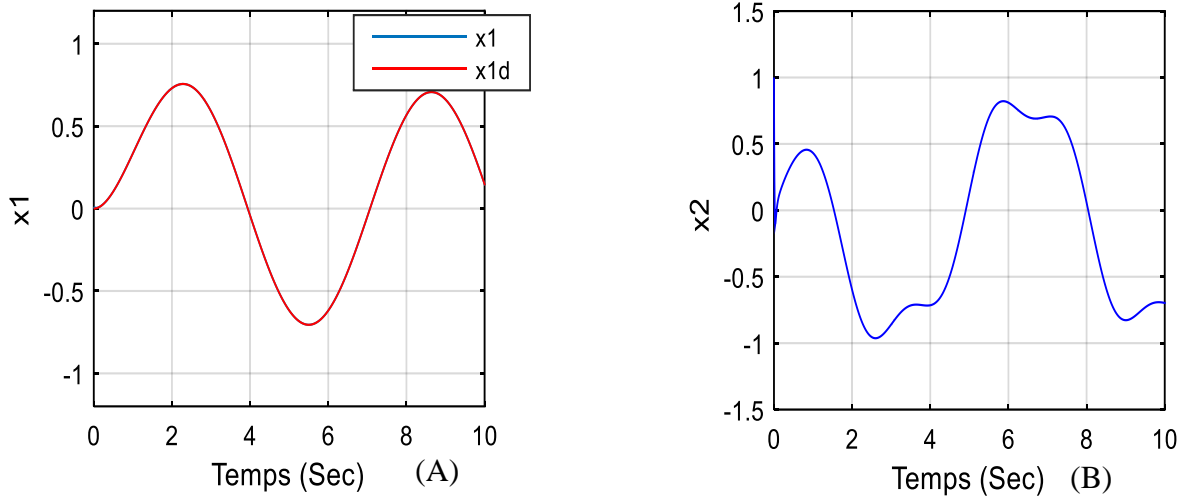


Figure IV.31. Evolution de x_1 (A) et x_2 (B).

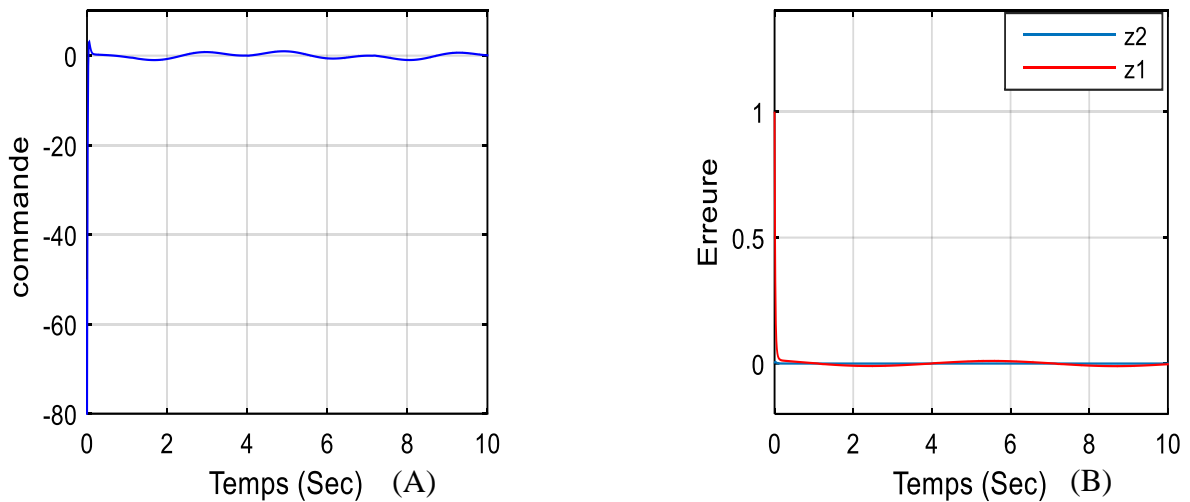


Figure IV.42. Signal de commande (A) et erreur de poursuite (B).

b) Exemple 2

Considérons un système non linéaire comme suite

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + 0.1x_1^2 + x_1 e^{-0.5x_1} \\ \dot{x}_2 = u + x_1 x_2^2 \\ y = x_1 \end{cases} \quad (\text{IV.54})$$

L'algorithme de la commande backstepping pour ce système est donné comme suite

$$\begin{cases} z_1 = x_1 - \alpha_0 \\ \alpha_1 = -k_1 z_1 - 0.1x_1^2 - x_1 e^{-0.5x_1} \\ z_2 = x_2 - \alpha_1 \\ u = -z_1 - k_2 z_2 - x_1 x_2^2 + \dot{\alpha}_1 \end{cases} \quad (\text{IV.55})$$

La trajectoire de référence est : $x_{ref}(t) = 0.5(\sin(t) + \sin(0.5t))$. Les conditions initiales sont : $x(0) = [0.2, 0]$. Les paramètres de conception sont : $k_1 = k_2 = 5$. Les résultats de simulation sont donnés sur les figures IV. 13 et IV. 14

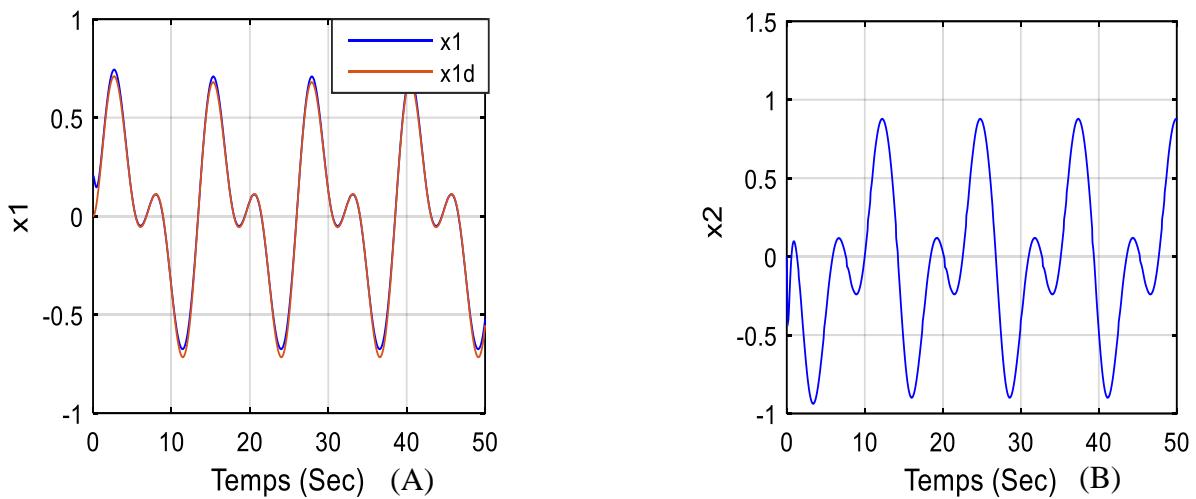


Figure IV. 53. Evolution de x_1 (A) et x_2 (B).

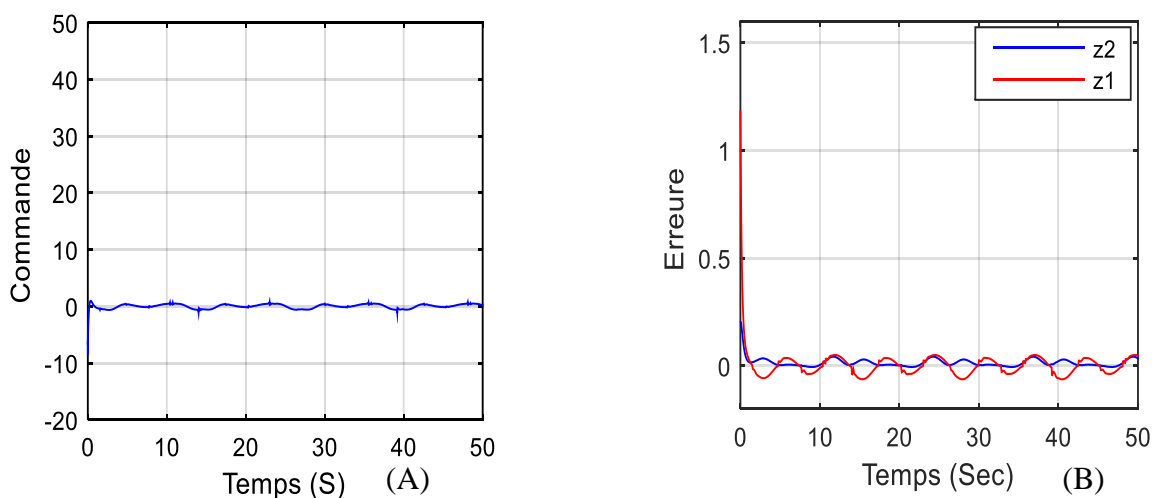


Figure IV. 64. Signal de commande (A) et erreur de poursuite (B).

Pour les deux exemples, on remarque que la technique de commande backstepping arrive à stabiliser le système avec une erreur de poursuite qui converge vers zéro.

IV.3.5. Backstepping appliquée au système PV

L'objectif de la commande ici est de régler la tension continue de l'entrée de l'onduleur et le facteur de puissance du réseau. Cet objectif peut être obtenu par le réglage des états $(x_3 : v_{dc})$ et $(x_2 : i_q)$ du modèle d'état de l'onduleur, par conséquent ces deux états sont considérés comme étant les sorties du modèle :

$$Y = (y_1, y_2)^T = (x_2, x_3)^T = (i_q, v_{dc})^T \quad (\text{IV.56})$$

On a,

$$\begin{aligned} y_1 &= x_2 \\ \dot{y}_1 = \dot{x}_2 &= -\frac{R}{L}x_2 - \omega x_1 - \frac{e_q}{L} + \frac{1}{L}u_2 \end{aligned} \quad (\text{IV.57})$$

et

$$\begin{aligned} y_2 &= x_3 \\ \dot{y}_2 = \dot{x}_3 &= \frac{i_{pv}}{c} - \frac{(e_d x_1 + e_q x_2)}{(c x_3)} \end{aligned} \quad (\text{IV.58})$$

La deuxième dérivée de y_2 est

$$\ddot{y}_2 = \frac{i_{pv}}{c} - \frac{(e_d \dot{x}_1 + e_q \dot{x}_2) c x_3 - (e_d x_1 + e_q x_2) c \dot{x}_3}{(c x_3)^2} \quad (\text{IV.59})$$

En utilisant (IV.11), on trouve

$$\ddot{y}_2 = \frac{i_{pv}}{c} - \frac{1}{c x_3} (e_d f_1 + e_q f_2) \frac{(e_d x_1 + e_q x_2)}{(c x_3)^2} f_3 \quad (\text{IV.60})$$

Donc

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = b_1 + \frac{1}{L}u_2 \\ \ddot{y}_2 = b_2 - \frac{e_d}{L c x_3}u_1 - \frac{e_q}{L c x_3}u_2 \end{cases} \quad (\text{IV.61})$$

où

$$\begin{cases} b_1 = f_2 \\ b_2 = \frac{i_{pv}}{c} - \frac{1}{c x_3} (e_d f_1 + e_q f_2) \frac{(e_d x_1 + e_q x_2)}{(c x_3)^2} f_3 \end{cases} \quad (\text{IV.62})$$

On remarque que le degré relatif de y_1 est $r_1 = 1$ et le degré relatif de y_2 est $r_2 = 2$.

IV.3.5.1. Commande backstepping pour le système PV

La synthèse de la loi de commande se fait en 3 étapes

- **Etape 1 :**

La variable d'état est traitée comme une commande virtuelle et l'on définit la première valeur désirée

$$x_{2d} = \alpha_0 = y_{1d} \quad (\text{IV.63})$$

La première valeur de l'erreur est définie par

$$z_1 = y_1 - y_{1d} \quad (\text{IV.64})$$

Sa dynamique est donnée par

$$\dot{z}_1 = \dot{y}_1 - \dot{y}_{1d} = b_1 + \frac{1}{L}u_2 - \dot{\alpha}_0 \quad (\text{IV.65})$$

On choisit la fonction de Lyapunov

$$V_1 = \frac{1}{2}z_1^2 \quad (\text{IV.66})$$

Sa dérivée est donnée par

$$\dot{V}_1 = z_1\dot{z}_1 = z_1\left(b_1 + \frac{1}{L}u_2 - \dot{\alpha}_0\right) \quad (\text{IV.67})$$

Afin d'assurer la stabilité du premier sous-système d'après Lyapunov, il faut que \dot{V}_1 soit négative pour cela on choisit

$$\dot{V}_1 = -k_1z_1^2 \quad (\text{IV.68})$$

de (IV.67) et (IV.68)

$$b_1 - \dot{\alpha}_0 + k_1z_1 + \frac{1}{L}u_2 = 0 \quad (\text{IV.69})$$

- **Etape 2**

La variable d'état est

$$x_3 = y_2 \quad (\text{IV.70})$$

La nouvelle variable de l'erreur est

$$z_2 = y_2 - y_{2d} \quad (\text{IV.71})$$

Sa dynamique est donnée par

$$\dot{z}_2 = \dot{y}_2 - \dot{y}_{2d} \quad (\text{IV.72})$$

On choisit la fonction de Lyapunov

$$V_2 = \frac{1}{2}z_2^2 \quad (\text{IV.73})$$

Sa dérivée est donnée par

$$\dot{V}_2 = z_2\dot{z}_2 \quad (\text{IV.74})$$

Afin d'assurer la stabilité du premier sous-système d'après lyapunov, il faut que \dot{V}_2 soit négative pour cela on choisit

$$\dot{V}_2 = -k_2 z_2^2 \quad (\text{IV.75})$$

A partir de (IV.73), (IV.74) et (IV.75) on trouve

$$\dot{y}_2 - \dot{y}_{2d} = -k_2 z_2 \quad (\text{IV.76})$$

Donc

$$\dot{y}_2 = \dot{y}_{2d} - k_2 z_2 \quad (\text{IV.77})$$

On choisit la commande virtuelle

$$\alpha_1 = \dot{y}_{2d} - k_2 z_2 \quad (\text{IV.78})$$

- **Etape 3**

La nouvelle variable de l'erreur est

$$z_3 = \dot{y}_2 - \alpha_1 \quad (\text{IV.79})$$

avec

$$\dot{z}_2 = -k_2 z_2 + z_3 \quad (\text{IV.80})$$

Sa dynamique est donnée par

$$\dot{z}_3 = \ddot{y}_2 - \dot{\alpha}_1 = b_2 - \frac{e_d}{Lc x_3} u_1 - \frac{e_q}{Lc x_3} u_2 - \dot{\alpha}_1 \quad (\text{IV.81})$$

On choisit la fonction de lyapunov

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2} z_3^2 \quad (\text{IV.82})$$

Sa dérivée est donnée par

$$\dot{V}_3 = z_2 \dot{z}_2 + z_3 \dot{z}_3 \quad (\text{IV.83})$$

Afin d'assurer la stabilité du premier sous-système d'après lyapunov, il faut que \dot{V}_3 soit négative pour cela on choisit

$$\dot{V}_3 = -k_2 z_2^2 - k_3 z_3^2 \quad (\text{IV.84})$$

De (IV.83) et (IV.84) on trouve

$$z_2 + b_2 - \frac{e_d}{Lc x_3} u_1 + \frac{e_q}{Lc x_3} u_2 - \dot{\alpha}_1 = -k_3 z_3 \quad (\text{IV.85})$$

De (IV.69) et (IV.85) on trouve

$$\begin{bmatrix} b_1 - \dot{y}_{1d} + k_1 z_1 \\ b_2 + z_2 + k_3 z_3 - \dot{\alpha}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ \frac{-e_d}{Lc x_3} & \frac{-e_q}{Lc x_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{IV.86})$$

où

$$F(x) = \begin{bmatrix} b_1 - \dot{y}_{1d} + k_1 z_1 \\ b_2 + z_2 + k_3 z_3 - \dot{\alpha}_1 \end{bmatrix}, \quad E(x) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ \frac{-e_d}{Lcx_3} & \frac{-e_q}{Lcx_3} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

Donc

$$U = E^{-1}(x)F(x) \quad (\text{IV.87})$$

IV.3.5.2. Résultats de simulation

Le schéma fonctionnel de la figure IV.15 montre le système PV connecté au réseau et sa commande backstepping développée. Le bloc de commande de point de puissance maximale (MPPT) donne la référence pour le régulateur backstepping de la tension V_{dc} . Les sorties du régulateur backstepping sont les signaux de commande u_1 et u_2 . Ces deux signaux de commande sont employés pour générer les tensions de référence de phase. Ces tensions de référence sont employées pour générer la commande MLI de l'onduleur.

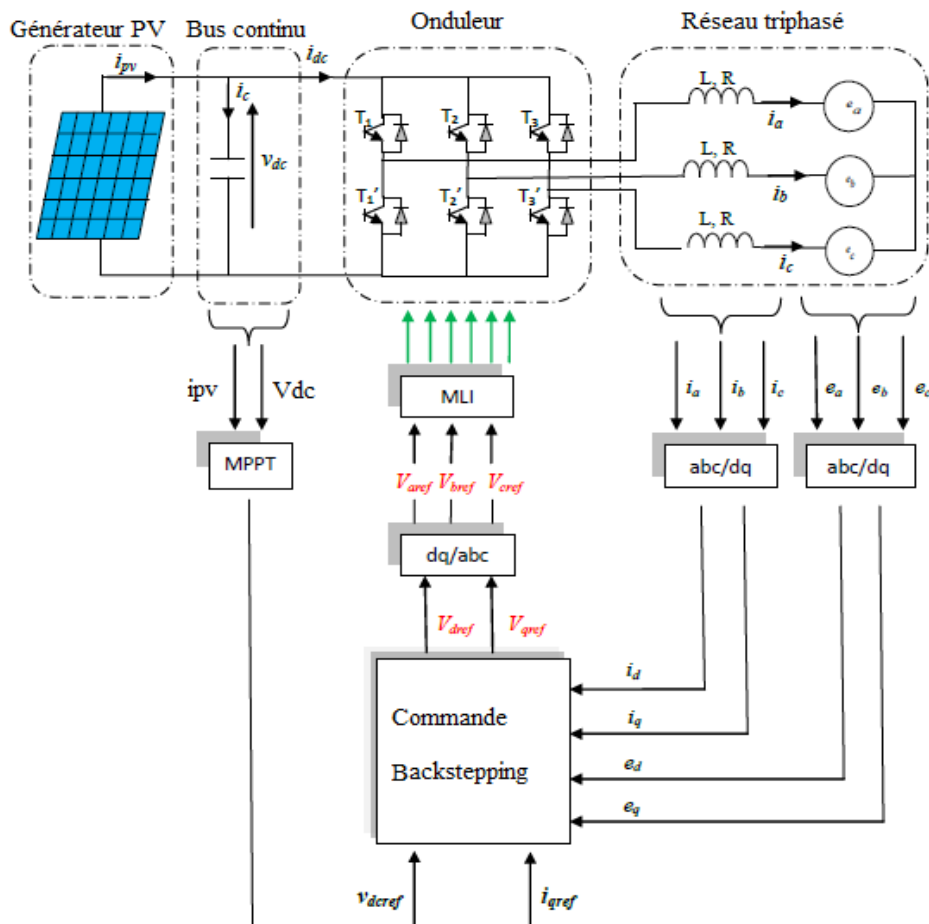


Figure IV.75. Schéma de la commande backstepping appliquée au système PV

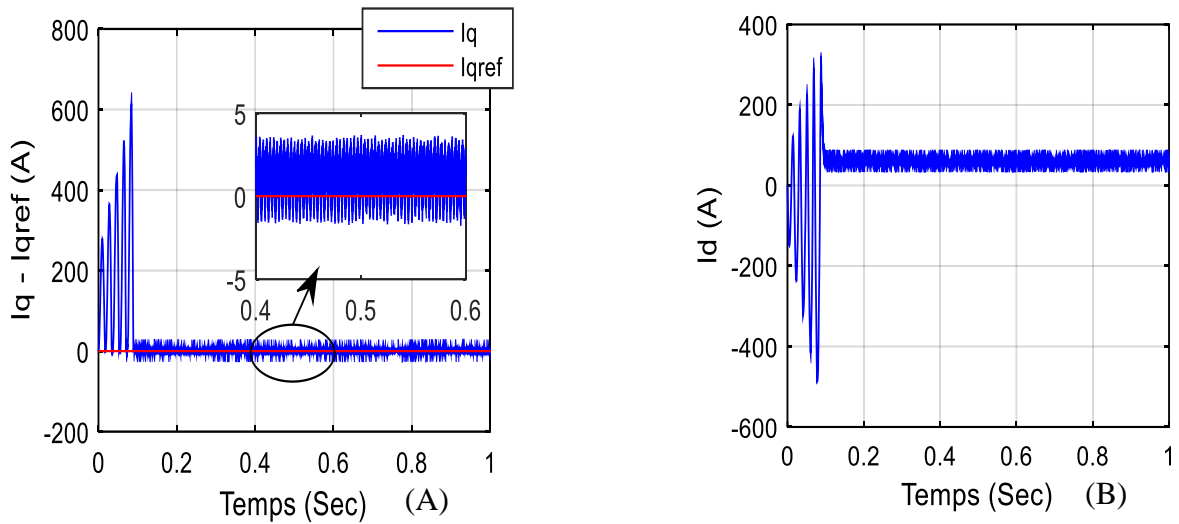


Figure IV. 86. Composants I_q (A) et I_d (B) du courant de réseau

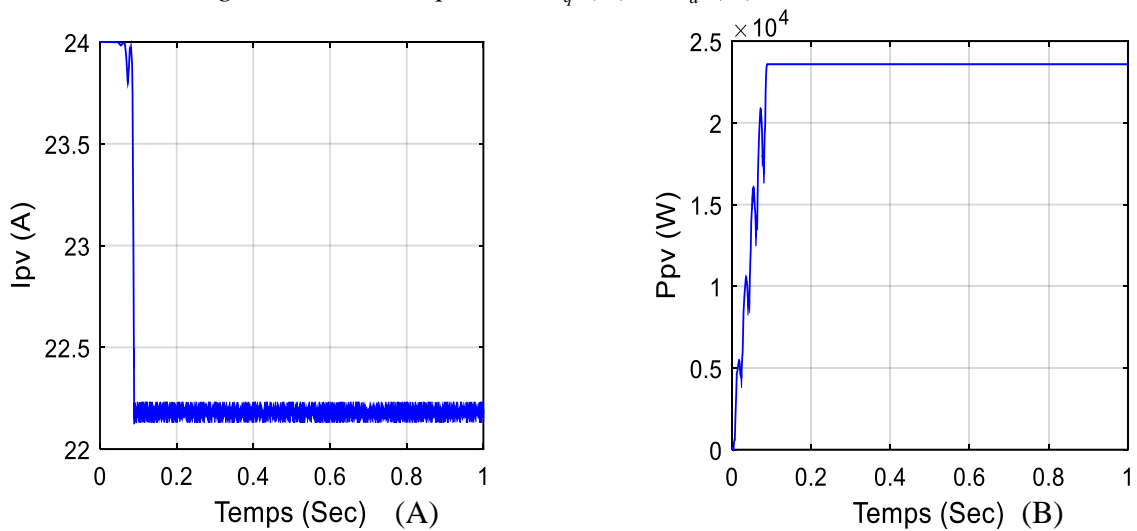


Figure IV. 97. Courant i_{pv} (A) et puissance p_{pv} (B) du champ photovoltaïque

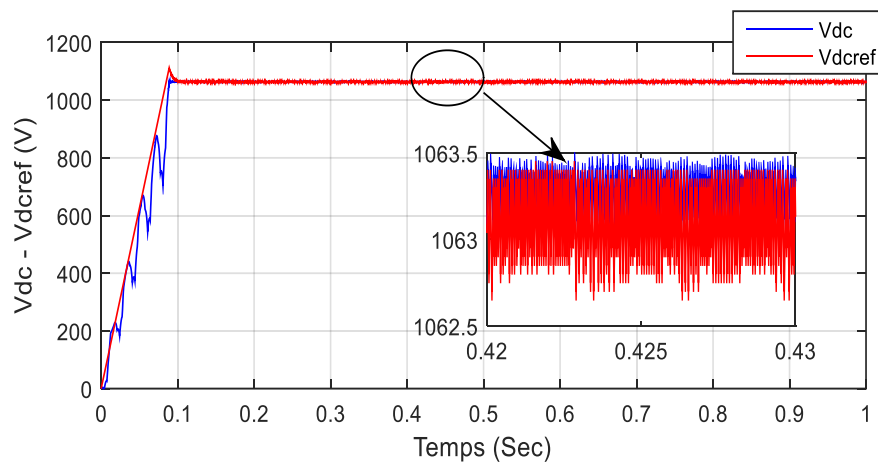


Figure IV. 108. Tension continue à l'entrée de l'onduleur et sa référence

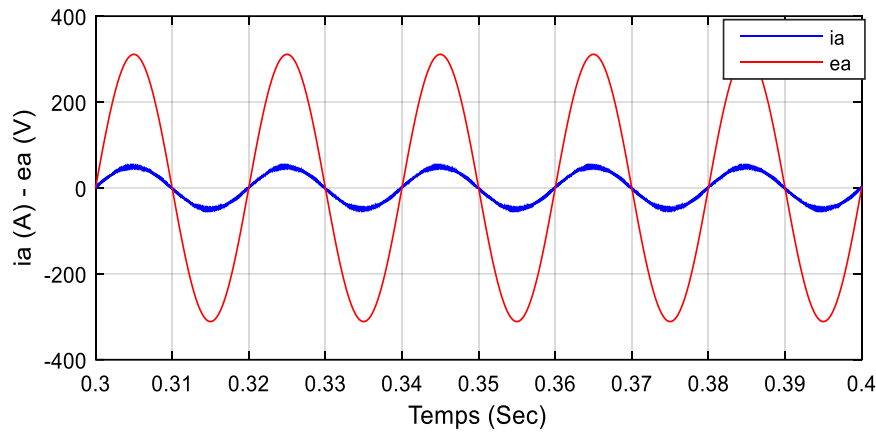


Figure IV. 19. Tension e_a et courant i_a de phase de réseau

La figure IV.16 montre les deux composantes i_d et i_q du courant de réseau. La composante i_d se stabilise à une valeur constante à partir de 0.1 sec. Le courant i_d dépend du niveau de puissance du champ photovoltaïque. On remarque aussi que la composante i_q converge vers sa référence qui est zéro dans ce cas.

La figure IV.17 prouve que la puissance de sortie converge vers le point de puissance maximale, caractérisé par une puissance de $P_{mpp}=23584$ W, une tension continue $V_{mpp}=1066$ V et un courant $I_{mpp}=24$ A, qui peuvent être déduit des caractéristiques du champ photovoltaïque.

On constate à partir de la figure IV.18 que la tension de référence prend un temps d'environ 0.1 secondes pour atteindre la tension du point de puissance maximale.

La figure IV.19 montre que le courant de ligne de réseau est en phase avec la tension de ligne et cela montre bien que le facteur de puissance dans le réseau est unitaire.

IV.3.6. Etude de la robustesse

Nous avons considéré le même test de robustesse de la variation de l'éclairement pour la commande backstepping. Les figures IV.20-IV.23 montrent que la tension V_{dc} suit sa référence même avec les variations de l'éclairement, et que ces variations n'affectent pas la composante du courant du réseau i_q , ce qui implique que le facteur de puissance n'est pas affecté. On remarque aussi d'après ces résultats que la commande backstepping est plus robuste que la commande linéarisante.

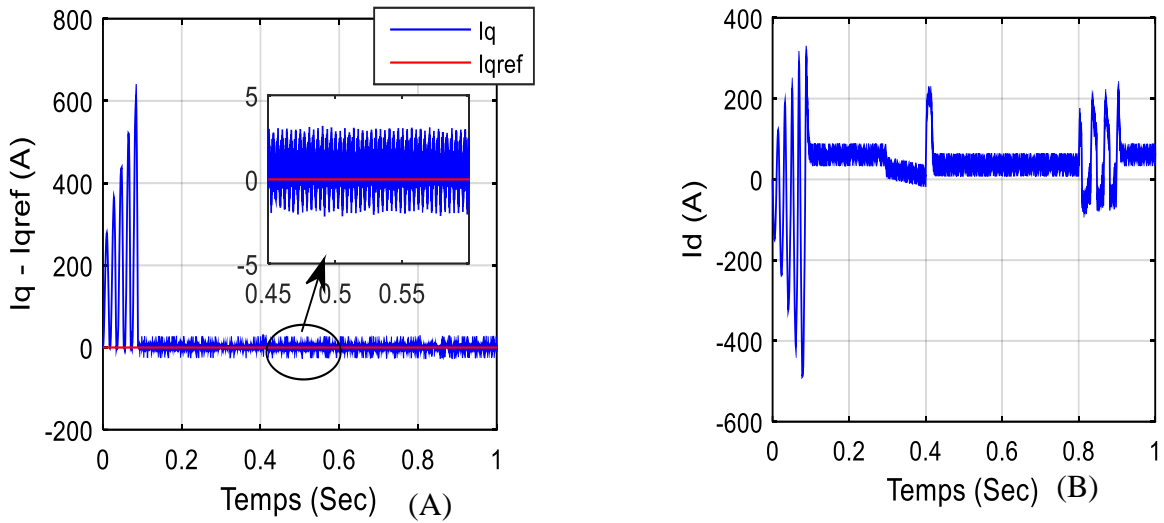


Figure IV. 110. Composants I_q (A) et I_d (B) du courant du réseau avec le test de robustesse

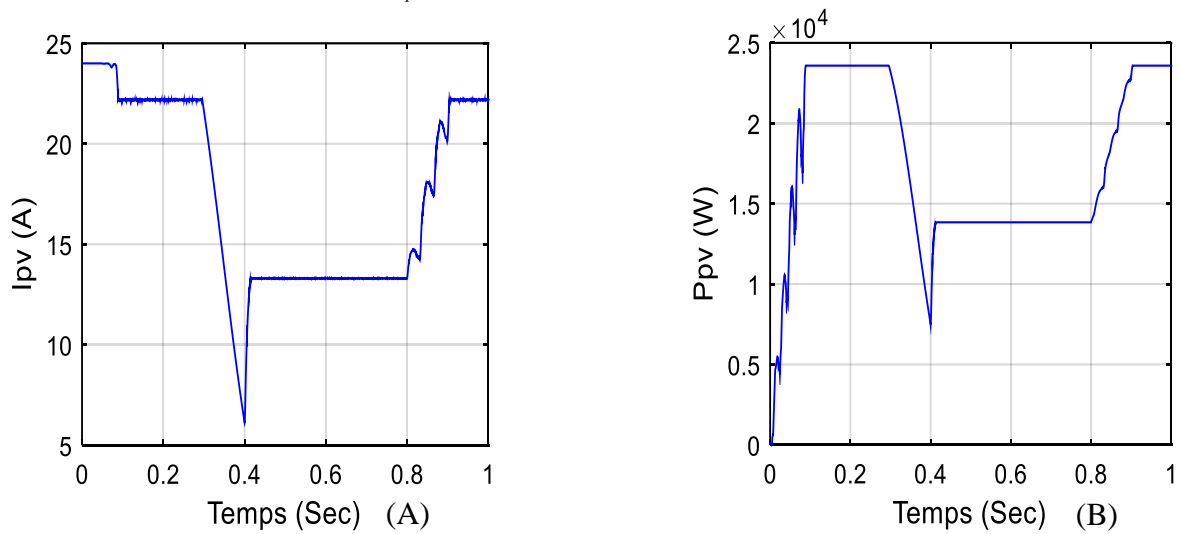


Figure IV. 121. Courant i_{pv} (A) et puissance p_{pv} (B) de champ PV avec le test de robustesse

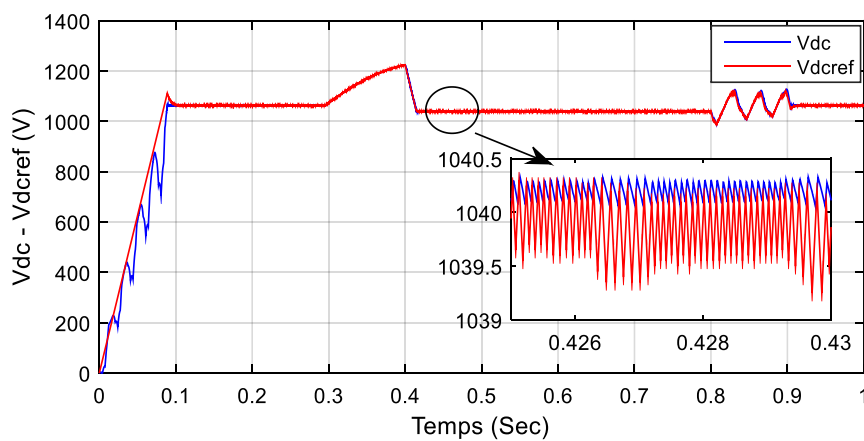


Figure IV. 132. Tension continue à l'entrée de l'onduleur v_{dc} et sa référence avec le test de robustesse

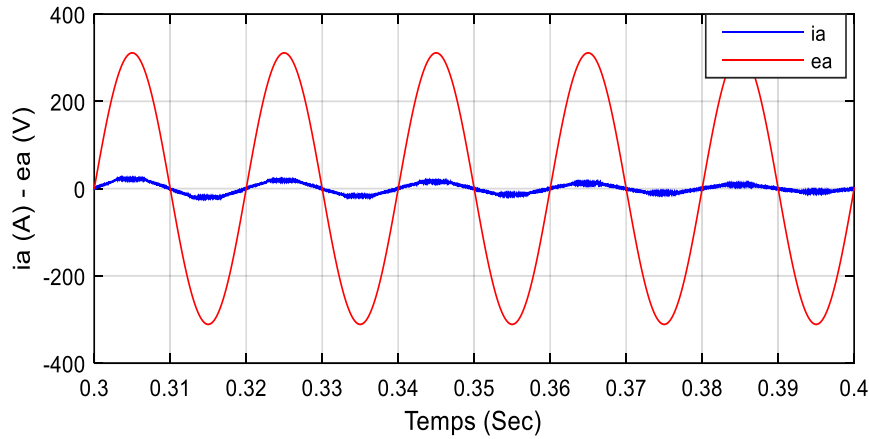


Figure IV. 143. Tension e_a et courant i_a de phase de réseau avec le test de robustesse

IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté en premier lieu les bases théoriques de la commande linéarisante. Ensuite, nous avons synthétisé un régulateur à base de cette technique pour commander un système PV connecté au réseau. L'objectif c'était d'assurer la poursuite du point de puissance maximal et la commande de la puissance réactive. Deuxièmement, après la présentation des concepts de base de la commande backstepping, nous avons procédé à la conception d'un régulateur backstepping pour commander la cascade et ceci pour le même objectif.

Les résultats de simulation obtenus pour les deux régulateurs montrent l'efficacité de ces régulateurs non linéaires. Ils permettent de commander séparément le facteur de puissance du réseau et la tension continue à l'entrée de l'onduleur et ils gardent leurs performances même pour le cas d'un changement d'éclairement.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à étudier l'application de deux stratégies de la commande non linéaire à savoir : la commande linéarisante et la commande Backstepping pour un système photovoltaïque connecté au réseau ayant un seul étage de conversion continu/alternatif. L'objectif est de contrôler le point de puissance maximale et la puissance réactive.

Dans le premier chapitre, on a donné des généralités sur les systèmes photovoltaïques. Ensuite, on a présenté la structure d'un module PV et son élément de base qui est la cellule solaire. On a discuté aussi le principe de fonctionnement et le modèle mathématique et électrique d'un module photovoltaïque ainsi que l'influence des conditions climatiques sur la caractéristique puissance tension et courant tension.

Dans le deuxième chapitre on a simulé le comportement d'un générateur photovoltaïque associé à un convertisseur DC-DC contrôlé par MPPT, afin d'extraire le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur et de la transférer à la charge. L'idée est d'utiliser un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge commandé directement par un algorithme traqueur du point de puissance maximale. Nous nous sommes intéressés particulièrement à l'application de l'algorithme basé sur la perturbation et l'observation direct et indirect (à base d'un régulateur PI). Les résultats de simulation ont montré de bonnes performances en termes de poursuite de la puissance maximale fournie par le panneau photovoltaïque.

Le troisième chapitre était consacré à l'étude de la modélisation du système photovoltaïque connecté au réseau électrique. On a commencé par des généralités sur les systèmes photovoltaïques connecté au réseau électrique et les différentes topologies des onduleurs photovoltaïques utilisées. Puis, on a présenté une description détaillée de notre système avec tous ses éléments avec une présentation du modèle d'état de système dans le repère de Park. Nous avons vu que l'association onduleur réseau peut être modélisée par un système d'équations différentielles non linéaires d'ordre trois. On a simulé également le comportement de la cascade sans commande.

Dans le dernier chapitre, on a exposé les bases théoriques de la commande linéarisante et de la commande Backstepping et l'application de ces deux commandes sur le système PV

connecté au réseau. On a étudié l'effet de la variation de l'éclairage sur les performances de la commande. Les résultats de simulation montrent bien l'efficacité de ces commandes surtout la commande backstepping en terme de robustesse vis-à-vis le changement de l'éclairage.

Comme **perspectives** pour ce travail, on propose :

- ✓ L'étude expérimentale de l'association présentée dans ce travail du mémoire ;
- ✓ Utilisation des techniques de contrôle MPPT à base d'intelligence artificielle ;
- ✓ Application des commandes robustes comme la commande par mode de glissement ;
- ✓ Conception d'un observateur pour reconstruire le vecteur d'état complet.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] F. Benadel , « Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV », Mémoire de Master, Université de Msila, 2016.
- [2] A. Chetouane, « Commande par mode de glissement d'un système photovoltaïque non autonome », Mémoire de Master, Université de Jijel, 2013.
- [3] A. Zenakhi, « Etude par simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque menu d'une commande MPPT », Mémoire de Master, Université de Tlemcen, 2016.
- [4] K. Ouabdelkader, H. Mersel, « Modélisation et Contrôle d'un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau », Mémoire de Master, Université de Bejaia, 2015.
- [5] S. Mayouf, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec une commande vectorielle », Mémoire de Master, Université de Msila, 2016.
- [6] Y. Belkhier, M. Ait Mahdi, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque », Mémoire de Master, Université de Bejaia, 2017.
- [7] F. Hananou, A. Rouabah, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque », Mémoire de Master, Université de Ouargla, 2014.
- [8] S. Latreche, K. Bouzid, « Etude et Réalisation d'un système photovoltaïque à base d'une carte Arduino uno », Mémoire de Master, Université de Ouargla, 2016.
- [9] G. Walker, « Evaluating mppt convertertopologies using a Matlab PV model », *Journal of electrical and electronics engineering*, Australia, 2001.
- [10] datasheet du module photovoltaïque 165 Watt BP 3160, bp solar, 2005.
- [11] A. Belkaid3, « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome », Thèse de Doctorat, Université de Setif, 2015.
- [12] S. Djeriou, « Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone », Mémoire de Magister, Université de Sétif, 2011.
- [13] M. Angel Cid Pastor, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2006.
- [14] M. Alayat, I. Boucetta, « Maximisation de la production d'un système photovoltaïque à base de MPPT soumis à des éclairagements différents », Mémoire de Master, Université de Annaba, 2017.

- [15] N. Goar, A. Mahmoudi, « Réalisation d'un convertisseur DC/DC dans une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque », Mémoire de Master, Université de Oum El Bouaghi, 2017.
- [16] A. Zidan, M. Sahtout, « Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau », Mémoire de Master, Université de Annaba, 2017.
- [17] A. Chebana, « Contrôle d'un système photovoltaïque connecté au réseau », Mémoire de Master, Université de Biskra, 2014.
- [18] A. Bouchetab, « Commande d'un onduleur photovoltaïque connecté au réseau électrique », Mémoire de Master, Université de Jijel, 2012.
- [19] N. Adjimi, W. Belaidi, « Modélisation et commande d'un onduleur MLI », Mémoire de Master, Université de Oum Elboughi, 2009.
- [20] F. Berrezzek, « Etude des différentes techniques de commande des onduleurs à MLI associés à une machine asynchrone », Mémoire de Master, Université de Annaba, 2006.
- [21] C. Afaki, M.Y. Ben Bait, « Commande directe de puissance d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique », Mémoire de Master, Université de Jijel, 2014.
- [22] I. Boulkaïbet, « Une étude en simulation de stratégies de commande non linéaire », Mémoire de Magistère, Université de Constantine, 2007.
- [23] D. Lalili et al., « Input output feedback linearization control and variable step size MPPT algorithm of a grid-connected photovoltaic inverter », *Renew. Energy*, **36** (12), pp. 3282–3291, 2011.
- [24] R. Bouadem, S. Mehidi, « commande linéaire adaptative d'un robot sous-marin autonome », Mémoire de Master, Université de Jijel, 2017.