الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Département du Génie Electrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Energies renouvelables
Spécialité : Energies renouvelables en électrotechnique

Contribution à la Commande MPPT d'un Convertisseur DC-DC avec Logiciels MATLAB et PROTEUS pour les Applications Photovoltaïques

---

Préparé et présenté par :

YAHIA HELLALI Abd Erraouf

BOURAHLA Toufik

Proposé et dirigé par :

Dr. MORSLI Abdelkader

Dr. AMOKRANE Zouhir

Promotion 2020

Déd icace

Nous dédions ce travail modeste :

A nos très chers parents pour leur soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont enduré, que Dieu les garde et les protège.

A nos frères et soeurs

A nos grandes familles

A tous nos collègues surtout ceux d'Electrotechnique, promotion 2020.

❖YAHIA HELLALI

❖BOURAHLA

Remerciement

Avant tous, Nous remercions Allah de nous avoir donné
le courage et la patience pour réaliser ce travail.

❖ Nous tenons tout d'abord à remercier vivement le Dr MORSLI ABD ELKADER et AMOKRANE ZOUHIR , qui a manifesté sa disponibilité
entière pour nous aider, nous orienter, aussi
pour sa confiance et son compréhension
qu'il nous a toujours prouvée.

❖ Nous voudrions également remercier les membres du jury
pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

❖ Nos vifs remerciements s'adressent également à tous les membres de nos familles notamment
nos parents pour leur aide
et pour leur soutien précieux.

❖ Nous remercions tous nos collègues et toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin, directement
ou indirectement à l'aboutissement de ce travail, nous les remercions tous.

❖ YAHIA HELLALI

❖ BOURAHLA

ملخص

يمكن تحسين عائد الأنظمة الضوئية بحلول تعتمد على تقنيات خاصة تعمل على تتبع نقطة الاستطاعة العظمى أثناء التغيرات الجوية .من اجل ذلك , ركزنا في عملنا هذا على دراسة و انجاز محولات تقوم برفع و تخفيض بحيث يمكن التحكم بهم عن طريق لوحة الكترونية تدعى (الاردوينو) التي ترتكز على تلك التقنيات الخاصة .و في الأخير , يتم عرض النتائج المتحصل عليها .

الكلمات المفتاحية : الطاقة الشمسية , النظام الكهروضوئي , محول رافع, مخفض , رافع- مخفض ,تقنية تتبع نقطة الاستطاعة العظمى , المتحكم(الأردوينو)

Résumé

Le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions à base des techniques MPPT. A cet effet et à notre travail, nous intéressons à l'étude etla simulation des convertisseurs buck,boost et buck-boost commandés par le microcontrôleur Arduino en vue d'implémenter des commandes MPPT et enfin, discuter les résultats de simulation obtenus avec les deux logiciel Matlab et Proteus.

Mots clés : Energie solaire, Système PV, Hacheur Buck ,Boost et Buck-Boost,Commande MPPT, Microcontrôleur Aduino.

Abstract

The yield of the photovoltaic system can be improved through solutions based on MPPT techniques. So for this purpose and for our work purposes, we are interested in thestudyand theSUMILATION of a buck, boost and buck-boost chopper controlled by the Arduino microcontroller in order to implement MPPT commands and to finally discus the obtained results.

Keywords : Solar energy, Photovoltaic system, Buck , Boost and Buck-boost chopper,MPPT command, Arduino microcontroller.

Symboles

V_{co} : Tension de circuit ouvert.

I_{cc},I_{sc} : Courant de court-circuit.

η_{sTc} : Rendement de la cellule photovoltaïque.

P_m : Puissance produite par le générateur PV.

$S_{cellule}$: Surface de la cellule.

N_{CS} : Nombre de cellules en séries.

N_{ssm} : Le nombre total des sous-modules connectés en série.

N_{st} : Le nombre de strings branchés e parallèle.

T_r : Transistor.

D : Diode.

L : l'inductance d'une bobine.

R : Charge résistive.

T_{on} : Durée de conduction de l'interrupteur.

T_{off} : Durée de blocage de l'interrupteur

α: : Rapport cyclique.

T : Période de découpage.

V_{PV}, V_m : Tension d'alimentation/ Tension du module.

C : Capacité du condensateur.

V_S,V_0 : Tension de sortie.

V_D : Tension aux bornes de la diode

V_{Tr} : Tension aux bornes du transistor.

i_L : Courant traversant l'inductance.

V_L : Tension aux bornes de l'inductance.

V_{bat} : Tension d'entrée.

I_{PV} : Courant d'alimentation/ Courant du module.

I_S,I_0 : Courant de sortie.

P : Puissance.

ΔI_L : Ondulation absolue du courant.

f : Fréquence de commutation.

ΔV_s : Ondulation en tension.

i_C : Courant traversant le condensateur.

Δt : Durée d'annulation du courant.

ρI_L : Taux d'ondulation du courant.

P_{PV} : Puissance du module.

G : Conductance.

I_d : Courant à travers la diode.

R_S : Résistance série.

R_{sh}, R_P : Résistance parallèle.

V_{op} : Tension de sortie du panneau photovoltaïque.

I_{op} : Courant de sortie du panneau photovoltaïque.

I_{mp} : Courant à puissance maximale.

V_{mp} : Tension à puissance maximale.

Abréviations

GPV : Générateur photovoltaïque.

PV : Photovoltaïque.

Tu : Temps universel.

TSL : Temps solaire local.

TSM : Temps solaire moyen.

MA : La masse d'air.

E_t : Equation du temps.

PV : Photovoltaïque.

DC : Direct Currant.

AC : Alternating Curent.

MPPT : Maximum Power Point Tracking

P&O : Perturb And Observe.

IncCond : incrémentation des conductances.

Liste des Figures

CHAPITRE (I) : Généralités sur les générateurs photovoltaïques

Figure I-1 : Cellule photovoltaïque **4**

Figure I-2 : Module photovoltaïque **4**

Figure I-3: Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire.....**4**

Figure I.4: Caractéristique I-V d'une cellule PV **6**

Figure I.5 : Courbe caractéristique P-V.....**8**

Figure I.6 : La courbe I-V pour différentes valeurs de Rs **9**

Figure I.7 : La courbe P-V pour différentes valeurs de Rs **9**

Figure I.8 : Les courbes I-V pour différentes valeurs de Rsh.....**10**

Figure I.9 : Les courbes P-V pour différentes valeurs de Rsh.....**10**

Figure I.10 : I(V) en fonction de l'éclairement **10**

Figure I.11: P(V) en fonction de l'éclairement **10**

Figure I.12 : I(V) en fonction de température.....**12**

Figure I.13 : P(V) en fonction de température **12**

Figure I.14 : Constitution d'un générateur photovoltaïque.....**12**

Figure I.15 : Courbe I=V(v) d'une association série de cellules photovoltaïques **13**

Figure I.16 : Courbe I=V(v) d'une association parallèle de cellules photovoltaïques...**13**

Figure I.17 : Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin **14**

Figure I.18 :Cellule photovoltaïque en silicium poly cristallin **15**

Figure I.19:Cellule photovoltaïque en silicium amorphe.....**15**

Figure I.20:Cellule photovoltaïque Tandem **16**

Figure I.21 :Cellule photovoltaïque multi jonction.....17

Figure I.22 :Les différentes technologies des cellules photovoltaïques. **17**

Figure I.23 :Système photovoltaïque autonome. **19**

CHAPITRE (II) : Poursuite du point de puissance maximale

Figure II .1 :Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur, une commande MPPT et une charge.....**21**

Figure II.2 : Principe de la commande MPPT **22**

Figure II.3 : Organigramme de la première commande MPPT.....**25**

Figure II.4 :Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O.....**26**

Figure II.5 : Organigramme de la méthode P&O **28**

Figure II.6 :Principe de la méthode HC **29**

Figure II.7 : Algorithme de la méthode HC **29**

Figure II.8 : Caractéristique de fonctionnement de la méthode IncCond **30**

Figure II.9 : Organigramme de la méthode IncCond. **31**

CHAPITRE (III) : Les convertisseurs DC-DC

Figure III.1 : Principe de base d'un hacheur **32**

Figure III.2 : Hacheur série (abaisseur) **33**

Figure III.3 :Hacheur parallèle (élévateur) **34**

Figure III.4 : Hacheur abaisseur-élévateur.....**34**

Figure III.5 :Rapport de conversion M(D) en fonction du rapport cyclique D pour un hacheur buck **35**

Figure III.6 :Rapport de conversion M(D) en fonction du rapport cyclique D pour un hacheur buck - boost.....**35**

Figure III.7 :Rapport de conversion M(D) en fonction du rapport cyclique D pour un hacheur boost **36**

Figure III.8 : Schéma de principe d'un hacheur Boost **36**

Figure III.9 : Signal de commande de l'interrupteur Tr.....**37**

Figure III.10 : Schéma équivalent du hacheur Boost durant la phase active **38**

Figure III.11 : Schéma équivalent du hacheur Boost durant la phase de roue libre **39**

Figure III.12 : Allures des tensions et courants en mode conduction continue **42**

Figure III.13 : Allure du courant traversant l'inductance en conduction discontinue ...**43**

Figure III.14 : Allure simplifiée du courant inductif pour chacun des montages élévateurs **44**

Figure III.15 : Convertisseur (DC/DC) survolteur de tension (type boost) connecté à modèle PV 46

Figure III.16 : Résultats de simulation de la puissance de sortie du hacheur survolteur et la batterie **47**

Figure (III.17) : Résultats de simulation de la valeur moyenne du courant de sortie du hacheur survolteur et la batterie **48**

Figure (III.18) : Résultats de simulation de la valeur moyenne du tension de sortie du hacheur survolteur et la batterie **48**

Figure (III.19) : Résultats de simulation de la valeur moyenne du courant de sortie en fonction de la tension du hacheur survolteur **49**

Figure (III.20) : Résultats de simulation de la valeur de la puissance de sortie en fonction de la tension du panneau alimenté avec l'hacheur survolteur **49**

Figure (III.21) : Résultats de simulation de la puissance de sortie du hacheur survolteur et la batterie **50**

Figure (III.22) : Résultats de simulation de la valeur moyenne du courant de sortie du hacheur survolteur et la batterie **51**

Figure (III.23) : Résultats de simulation de la valeur moyenne du tension de sortie du hacheur survolteur et la batterie **51**

Figure (III.24) : Résultats de simulation de la valeur de la puissance de sortie en fonction de la tension du panneau alimenté avec hacheur buck **52**

Figure (III.25) : Résultats de simulation de la valeur de courant de sortie en fonction de la tension du panneau alimenté avec hacheur buck **52**

Figure (III.26) : Résultats de simulation de la puissance de sortie de l'hacheur (élévateur- abaisseur) et du panneau solaire. **53**

Figure (III.27) : Résultats de simulation de la valeur moyenne du courant de sortie de l'hacheur (élévateur- abaisseur) et du panneau. **54**

Figure (III.28) : Résultats de simulation de la valeur moyenne de la tension de sortie de L'hacheur buck-boost et du panneau solaire. **54**

Figure (III.29): Résultats de simulation de la valeur de la puissance de sortie en fonction de la tension du panneau alimenté avec l'hacheur Buck-boost.....**55**

Figure (III.30): Résultats de simulation de la valeur moyenne du courant de sortie en fonction de la tension du hacheur Buck boost.. .....**55**

CHAPITRE(IV) : Modélisation et Simulation d'un Système PV

Figure (IV -1) : Circuit électrique de base du hacheur survolteur **57**

Figure (IV -2) : Carte Arduino UNO **58**

Figure (IV -3) : Module BP MSX 60 .....**59**

Figure (IV -4) : Capteur de courant ACS712 .....**59**

Figure (IV -5) : Capteur de tension **60**

Figure (IV -6) : Bloc de simulation de cellule solaire **60**

Figure (IV -7) : Bloc de simulation du hacheur **61**

Figure (IV -8) : Schéma bloc de simulation de système PV avec l'hacheur boost **62**

Figure (IV -9) : Schéma bloc de simulation de système PV avec l'hacheur buck. **62**

Figure (IV.10) : Schéma bloc de simulation de système PV avec l'hacheur buck boost **63**

Figure (IV.11) : Schéma Résultats de simulation de la puissance de sortie du hacheur Boost et le panneau par logiciel proteus. **64**

Figure (IV.12) : Résultats de simulation de la valeur moyenne du tension de sortie du hacheur boost et le panneau par logiciel proteus boost **64**

Figure (IV.13) : Schéma bloc Résultats de simulation de la valeur moyenne du courant de sortie du hacheur boost et le panneau par logiciel proteus **65**

Figure (IV.14) : Résultats de simulation de la puissance de sortie du hacheur Buck et le panneau par logiciel proteus **65**

Figure (IV.15) :Rapport Résultats de simulation de la valeur moyenne du tension de sortie du hacheur Buck et le panneau par logiciel proteus **66**

Figure (IV.16) : Résultats de simulation de la valeur moyenne du courant de sortie du hacheur Buck et le panneau par logiciel proteus.....**66**

Figure (IV.17) : Résultats de simulation de la puissance de sortie du hacheur Buck Boost et le panneau par logiciel proteus.....**67**
Figure (IV.18) : Résultats de simulation de la valeur moyenne du tension de sortie du hacheur Buck boost et le panneau par logiciel proteus **67**
Figure (IV.19) : Résultats de simulation de la valeur moyenne du courant de sortie du hacheur Buck Boost et le panneau par logiciel proteus.....**68**

La liste des Tableaux

CHAPITRE (II) : Poursuite du point de puissance maximale

Tableau III.1 : Principe de l'algorithme P&O **26**

CHAPITRE(III) : les hacheurs

Tableau (IVII1) :illustre ces relations linéaires.....34

Table des matières

Remercîments .....

Dédicace .....

Résumé .....

Symboles et abreviations.....

Introduction générale.....1

Chapitre (I) : Généralités sur les générateurs photovoltaïques

I.1. Introduction.....3

I.2. Définition et Historique du photovoltaïque 3

I.3. Caractéristique de la cellule photovoltaïque 4

I.4. Paramètres dune cellule photovoltaïque.....6

I.4.1. Courant en court-circuit (I_{cc}).....6

I.4.2. Tension de circuit ouvert(V_{co}).....7

I.4.3. Rendement maximal de la conversion 7

I.4.4.Facteur de Forme 7

I.4.5 Puissance maximale 8

I.5. Influence de la température et de l'éclairement et des résistances série et shunt sur une cellule photovoltaïque 9

I.5.1. Influence des résistances série 9

I.5.2. Influence des résistances shunt 10

I.5.3.Influence d'éclairement 10

I.5.4. Influence de la température 11

I.6. Association des cellules photovoltaïque ….. 12

I.6.1. Association série 13

I.6.2. Association parallèle 13

I.7. Différentes technologies des cellules solaires…..14

I.7.1Silicium monocristallin 14

I.7.2.Silicium poly cristallin 14

I.7.3. Silicium amorphe 15

I.7.4. Cellule Tandem 16

I.7.5. Cellule multi-jonction 16

I.8.Avantage et inconvenants des PV 17

I.8.1. Avantages 17
I.8.2. Inconvenants 18
I.9. Configuration des systèmes photovoltaïques …..... 18
I.9.1. Systèmes photovoltaïques autonomes.....19
I.10. CONCLUSION….. 19

Chapitre (II) : Poursuite du point de puissance maximale

II .1Introduction 21
II.2 Principe De La Commande MPPT …... 21
II.3 Classification Des Commandes MPPT …..... 22
II.3.1 Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée 22
II.3.1.1 Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée .22
II.3.1.2 Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie.23
II.3.2 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche 23
II.3.2.1 MPPT indirect.....23
II.3.2.2 MPPT Direct.....23
II.4 Les algorithmes MPPT.....24
II.4.1 Premiers types de commande MPPT 24
II.4.2 Méthode basée sur la mesure de la tension en circuit ouvert.....25
II.4.3 Algorithme de perturbation et observation.....26
II.4.4 Algorithme Hill Climbing 28
II.4.5 Algorithme d'incrémentation de la conductance..... 30
II.5 Conclusion 31

Chapitre (III) : Les convertisseurs DC-DC

III.1. Introduction. 32
III.2. Domaine d'utilisation des hacheurs. 32
III.3 .Différents types des hacheurs. 33
III.3.1. Hacheur série (Buck) 33
III.3.2. Hacheur parallèle (Boost). 33
III.3.3. Hacheur abaisseur-élévateur (Buck-Boost). 34
III.4. Gain en tension des convertisseurs 34
III.5. Fonctionnement du hacheur Boost 36
III.5. 1.Présentation de la structure 36

III.5. 2.Conduction continue 38
III.5. 3Conduction discontinue 43
III.6. Dimensionnement du hacheur 44
III.6.1. Détermination de la valeur d'inductance L 44
III.6.2. Détermination de la valeur de capacité C 45
III.7. Simulation de hacheur Boost 46
III.8. Simulation de hacheur Buck 50
III.9. Simulation de hacheur Buck-Boost 53
III.7.Conclusion 56

Chapitre(IV) : Modélisation et Simulation d'un Système PV avec logiciel Proteus

IV.1Introduction 57
IV.2 Circuit électrique de hacheur survolteur (Boost) 57
IV.3 Carte Arduino UNO 57
IV.4 Module BP MSX 60 59
IV.5 Capteur de courant AC712 59
IV.6 Capteur de tension 59
IV.7 Simulation de système PV 60
IV.8 Résultats de la simulation 63
IV.8.1 Simulation de hacheur Boost 63
IV.8.2 Simulation de hacheur Buck 65
IV.8.3 Simulation de hacheur Buck-Boost 66
IV.9 Conclusion 68
Conclusion générale 67
Annexe 68
Bibliographie 70

Introduction Générale

Introduction générale

L'industrie moderne a des besoins de plus en plus importants en énergie. Les sources classiques d'énergie, qui sont les sources fossiles telles que le charbon et les hydrocarbures, laissent progressivement la place aux énergies renouvelables. L'augmentation fulgurante du prix du pétrole ces dernières années a en effet contraint les pays développés à investir dans ce type d'énergies telles que l'énergie solaire, éolienne, marémotrice ou géothermique. Ces énergies, en plus d'être inépuisables, représentent un secteur porteur permettant un développement durable tout en préservant l'environnement [1].

L'électricité est aujourd'hui la forme d'énergie la plus aisée à exploiter, mais avant de la consommer il aura fallu la produire. La production d'électricité photovoltaïque a connu ces dernières années un accroissement d'intérêt. Cet accroissement était accompagné par une valorisation des recherches visant l'optimisation de l'énergie fournie par les cellules solaires. [2]

L'énergie solaire représente certainement la source d'énergie renouvelable la plus élégante. En plus d'être silencieuse, elle s'intègre parfaitement aux constructions (façades, toiture…), et du fait qu'elle n'intègre pas de pièces mécaniques mobiles, elle ne nécessite pas un entretien particulier et reste fiable longtemps, c'est la raison pour laquelle elle est devenue une référence dans les applications spatiales et dans les sites isolés. Elle est en train de s'imposer comme une valeur sure dans les applications à petite et moyenne consommation d'énergie, surtout depuis que les panneaux solaires sont devenus moins chers pour des rendements meilleurs [1].

Les panneaux solaires, bien qu'ils soient de plus en plus performants, ont des rendements qui restent assez faibles (autour de 20%), c'est pourquoi il faut exploiter le maximum de puissance qu'ils peuvent générer en réduisant au maximum les pertes d'énergie. Une caractéristique importante de ces panneaux est la puissance maximale disponible qui est fournie seulement en un seul point de fonctionnement appelé «Maximum Power Point »(MPP), défini par une tension et courant donnés, et ce point se déplace en fonction des conditions météorologiques (ensoleillement, température, etc.) ainsi que des variations de la charge. Extraire le maximum de puissance

nécessite donc un mécanisme de poursuite de ce point qu'on appelle «Maximum Power Point Tracking » MPPT[1].

L'objectif de ce travail est l'étude et la simulation des hacheurs buck,boost et buck-boostcommandés par le microcontrôleur Arduino-UNO en vue d'implémenter des commandes MPPT assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le module PV.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres après une introduction générale.

Dans le premier chapitre,nous présenterons une description générale sur le gisement solaire.

Dans le deuxième chapitre, une étude d'une manière générale des systèmes photovoltaïques et leurs différents types sera présentée. Ensuite, nous expliquerons le fonctionnement de la cellule photovoltaïque. Après nous étudierons l'influence de l'éclairement et de la température sur un module PV. Ainsiles caractéristiques et lesassociations.

Au troisième chapitre, nous présenterons le principe de la recherche du point de puissance maximale « MPPT » avec quelques organigrammes de chaque méthode de commande, comme l'algorithme d'Incrémentation de l'Inductance, l'algorithme de Perturbation et Observation ...ect.

Dans le quatrième chapitre,nous présentons les hacheurs, en particulier le hacheur Boost utilisé dans ce travail. Ensuite, nous présentons les différents circuits équivalant de la cellule solaire et le circuit électrique de base du hacheur Boost. Enfin, nous présentons la simulation du système PV avec le logiciel « Proteus » pour voir le fonctionnement du hacheur et vérifier la commandeMPPT.

Le chapitre présent le travail de la simulation du convertisseur survolteur et élévateur, elevateur_survolteur qui est commandé par la carte programmable ARDUINO .

A la fin, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale.

CHAPITRE I
Généralités sur Les systèmes Photovoltaïques

I.1.Introduction

Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, (étoile la plus proche de la terre). Il fournit une énergie colossale à la Terre (10 000 fois l'énergie nécessaire) sous forme d'énergie lumineuse, La plupart des utilisations sont directes comme en agriculture, à travers la photosynthèse, ou dans les diverses applications de séchage et chauffage, autant artisanale qu'industrielle. Cette énergie couvre une partie importante de la surface terrestre **[3]**.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. Bien que l'énergie photovoltaïque la plus jeune des énergies renouvelables, et devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance (disponibilité), l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre, et elle est souple et fiable**[4]**.

I.2.Définition et Historique du photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des mots « photo », un mot grec signifiant lumière, et « Volta », le nom du physicien italien Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque, c'est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. L'histoire du PV remonte en 1839, lorsque le physicien français Antoine César Becquerel découvrait le principe photovoltaïque. L'effet photovoltaïque en tant que tel a été découvert en 1887 par le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz **[5]**.

C'est Albert Einstein, qui le premier, a pu expliquer le principe du photovoltaïque en 1923.En 1955, des chercheurs américains (Chapin, Fuller, Pearson et Prince) travaillant pour les laboratoires Bell Téléphone, développèrent une cellule photovoltaïque à haut rendement de 6%. En 1959, le premier satellite alimenté par des piles PV fut lancé. La première maison avec une installation photovoltaïque a vu le jour en 1973 à l'université de Delaware aux Etats-Unis d'Amérique. Alors, en 1983, la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcouru 4000 kilomètres en Australie **[6].**

Aujourd'hui, avec l'amélioration du rendement de conversion et la réduction des coûts de production, le marché photovoltaïque s'est considérablement développé. Durant ces vingt dernières années, il a progressé de 20 % `à 25 % par an atteignant 427 MW en 2002. Néanmoins, le photovoltaïque représente moins de 0,1 % de toute la production énergétique mondiale.



Figure I-1 Cellule photovoltaïque.



Figure I-2 Module photovoltaïque.

I.3.Caractéristiques de la cellule photovoltaïque

Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque qui est largement utilisé est représenté sur la Figure II-3 :

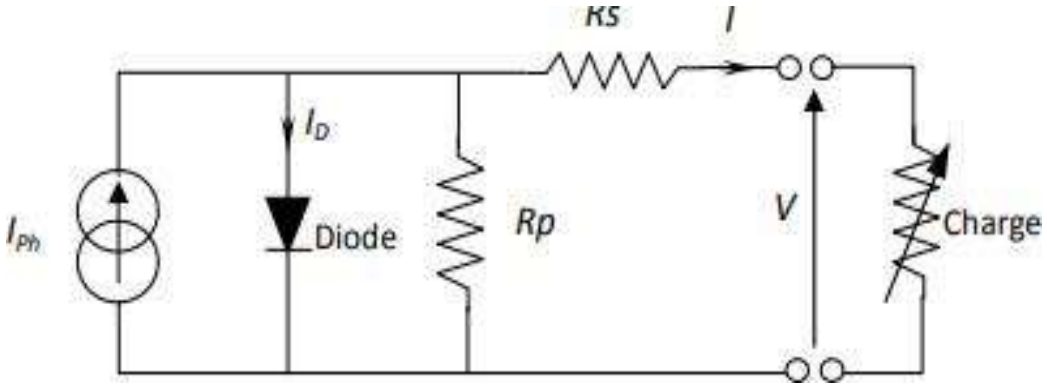


Figure I-3: Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire.

Comme montre la Figure II-3, une cellule photovoltaïque comporte en réalité une résistance série Rset une résistance shunt R_p. Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la cellule :

- La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.

- La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

D'après la figure précédente le modèle mathématique pour la caractéristique courant- tension est donné par:

$$\mathrm{I} = Iph - \mathrm{Id} - \frac{\mathrm{V+I.Rs}}{Rp} \quad \textbf{(II.1)}$$

$$\mathrm{I} = Iph - I_0(\mathrm{e}^{\frac{\mathrm{q(v+I.Rs)}}{\mathrm{m.k.Tc}}} - 1) - \frac{\mathrm{v+I.Rs}}{Rp} \quad \textbf{(II.2)}$$

Où :

V: Tension de sortie de la cellule (V),

I:Courant de sortie de la cellule (A),

I_{ph}: Courant photo-généré ou photo-courant (A),

I_s: Courant de saturation de la diode (A),

q: Charge d'électron (q =1.6.10^{-19} C),

K:Constant de Boltzmann (K =1.38.10$^{-38}JK^{-1}$),

T_c: Température absolue de fonctionnement de la jonction (c°),

m: Facteur d'idéalité de la diode m = {1,2}, La valeur typique de $m$est 1.3,

R_p: Résistance parallèle.

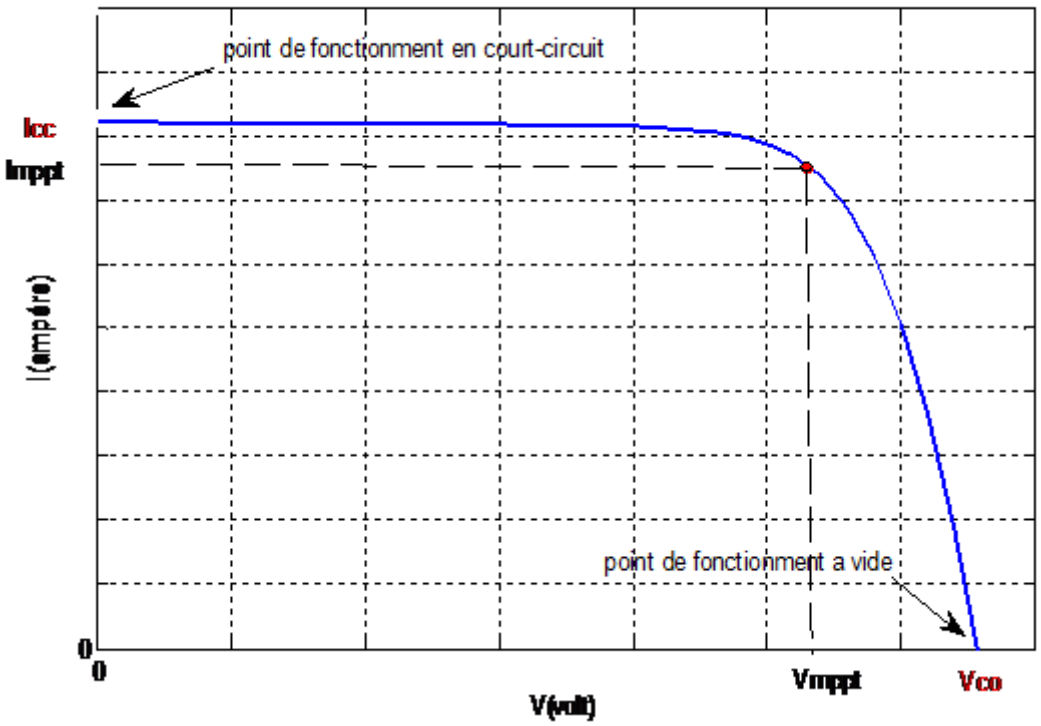
Rs: Résistance série,

Dans la pratique, l'équation(II.2) peut être simplifiée. Pour le cas d'une cellule solaire de bonne qualité, on admet que :

- La résistance parallèle $\boldsymbol{R_P}$a une valeur assez élevée. Donc le terme $\boldsymbol{\frac{V+I\cdot R_S}{R_P} = 0}$,
- L'expression$\boldsymbol{e^{\frac{q}{m\cdot k\cdot T_c}} \geq 1}$.

Par conséquent, l'équation courant-tension de la cellule s'écrit donc :

$$\mathrm{I} = Iph - I_0.\,\mathrm{e}^{\frac{\mathrm{q(v+I.Rs)}}{\mathrm{m.k.Tc}}} \quad \textbf{(II.3)}$$



Figure(I.4): Caractéristique I-V d'une cellule PV.

La Figure(II.4) montre la caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque à une température fixée $T_c$et une certaine ambiante radiance Ga.

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 W sousApproximativement 0,5 V.

Si une résistance variable Rconnectée à la terminale de la cellule, le point defonctionnement est détermine par l'intersection de la courbe I-V et la caractéristique I-V de lacharge.La caractéristique de la charge résistive est une droite avec I/V. Si la résistanceest petite la cellule fonctionne comme une source decourant constant et si la résistance est large, la cellule fonctionne comme une source de tension constante.

I.4.Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus utiles sont les suivantes:

I.4.1.Courant de court-circuit(Icc)

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal ($R_S$nulle et $R_P$infinie), ce courant se confond avec le

photo-courant I_{ph}dans le cas contraire, en annulant la tension *V* dans l'équation, on obtient:

$$\mathrm{I_{cc}} = I_{ph} - I_{sat}\left[exp^{(\frac{e^{(Icc.Rs)}}{nKT})} - 1\right] - \frac{(\mathrm{Icc.R})}{\mathrm{Rp}} \quad \textbf{(I.4)}$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme:

$$\mathrm{I_{sat}}\left[\exp^{(\frac{e^{(Ipv\times Rser)}}{nKT})} - 1\right] - \frac{(I_{cc}\times R_s}{R_p} \quad \textbf{(I.5)}$$

Devant I_{ph}, l'expression approchée du courant de court-circuit est alors:

$$\mathrm{I_{cc}} \cong \frac{I_{ph}}{(1+\frac{Rs}{Rp})} \quad \textbf{(I.6)}$$

I.4.2.Tension de circuit-ouvert (Vco)

C'est latension*Vco* pour laquelle le courant débité par legénérateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{cc} - I_{sat}\left[\exp(\frac{eVpv}{nkT}) - 1\right] - \frac{\mathrm{V_{pv}}}{\mathrm{Rp}} \quad \textbf{(I.7)}$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieur à Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieur à :

$$\mathrm{V_{co}} = V_T Ln\left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1\right] \quad \textbf{(I.8)}$$

I.4.3.Rendement maximale de conversion

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule Pmax, Vopt, Iopt et la puissance solaire incidente. Il est donné par:

$$\mathrm{n} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{opt}\times I_{opt}}{S\times Ga} = \frac{V_{oc}\times I_{sc}\times FF}{S\times P_{in}} \quad \textbf{(I.9)}$$

I.4.4.Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage(fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule Pmax, Vopt, Ioptet leproduit du courant de court-circuit $\mathrm{I_{cc}}$ par la tension de circuit-ouvert $\mathrm{V_{co}}$(c'est-à-dire la

puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour lescellules performantes ; et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistan*cesparasitesR*$_s$ et R_p*ilestdéfinipar*:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc}V_{co}} = \frac{V_{opt}\times I_{opt}}{I_{cc}V_{co}} \quad \textbf{(I.10)}$$

I.4.5. Puissance maximale

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairement, température, etc..), la puissance électrique (P) disponible aux bornes d'une cellule PV est égale au produit du courant continu fourni (I) par une tension continue donnée (V):

$$P = I \times V \quad \textbf{(I.11)}$$

P : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV (Watt) ;
V : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV (Volt) ;
I : Intensité mesurée aux bornes de la cellule PV (Ampère).

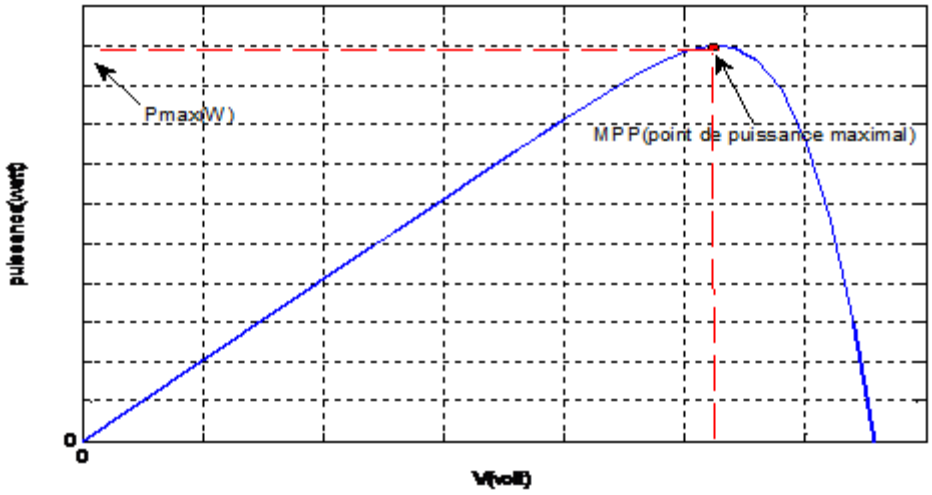


Figure I.5 : Courbe caractéristique P-V.

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximum $Pmax_idéale$ correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{co} multipliée par le courant de court-circuit Icc:

$$P_{\max_idéale} = V_{co} \times I_{cc} \quad \textbf{(I.12)}$$

$P_{\max_idéale}$: Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV idéale (Watt) ;

V_{co} : Tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV(Volt) ;

I_{cc} : Intensité de court-circuit mesurée aux bornes de la cellulePV(Ampère).

Par simplification, les professionnels caractérisent un module PV par sa puissance nominale aux conditions de fonctionnement standard (STC). Ce paramètre n'est autre que la puissance maximale mesurée sous ces conditions (en général un ensoleillement de 1000W/m² et une température de25°C).

I.5.Influences de la température et de l'éclairement et des résistances série et shunt sur une cellule photovoltaïque

Plusieurs articles ont été élaborés afin de connaitre l'influence des paramètres externes sur le fonctionnement d'un PV. Dans notre exposé de l'année passé présenté un modèle de simulation pour prédire la performance d'un système PV fonctionnant dans les conditions météorologiques d'un site d'installation, sous l'influence des différentes irradiations solaires, des différentes températures et pour des variables résistances séries et parallèles. Elles ont examiné aussi le fonctionnement d'un PV sous l'influence detempérature.

I.5.1.Influence des résistances série

La valeur de la résistance série est très faible, et dans certains cas, elle peut être négligée [7].Cependant, pour rendre le modèle approprié pour n'importe quelle module photovoltaïque donné, il est possible de faire varier cette résistance et prédire l'influence de sa variation sur les sorties du module PV. Comme on le voit dans les figuresII.6 et II.7, la variation de Rs affecte l'angle de la courbe I-V en résultant une déviation de la pente du point de puissance maximale.

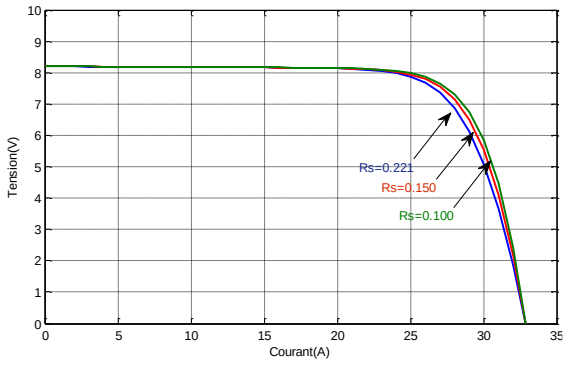


Figure I.6 : La courbe I-V pour différentes valeurs de Rs.

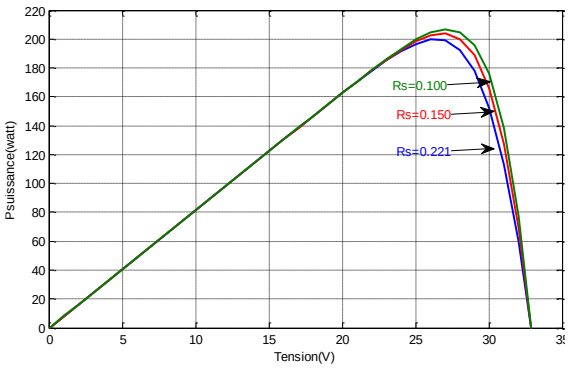


Figure I.7 : La courbe P-V pour différentes valeurs de Rs.

La simulation a été effectuée pour trois valeurs différentes de Rs, à savoir 0.1Ω, 0.150 Ω et 0.221Ω. Nous avons montré que Les valeurs plus élevées de Rs réduisent la puissance de sortie. Le facteur de remplissage, diminue au fur et à mesure que Rs augmente.

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc}\ V_{co}} \qquad \textbf{(I.13)}$$

I.5.2. Influence des résistances shunt

La résistance shunt doit être suffisamment grande pour une meilleure puissance de sortie et un bon facteur de remplissage. En effet, pour une faible résistance shunt, le courant s'effondre plus fortement ce qui signifie que la perte de puissance est élevée et le facteur de remplissage est faible (figures II.8 et II.9).

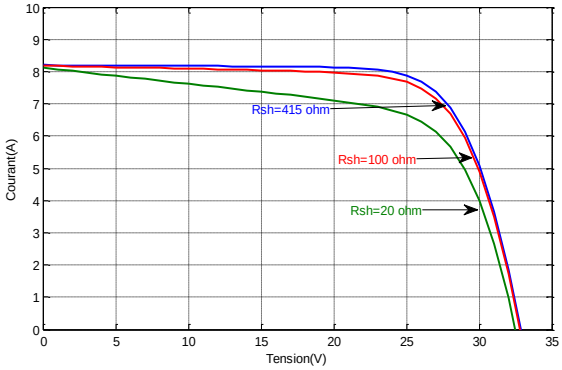


Figure I.8 : La courbe I-V pour différentes valeurs de Rsh.

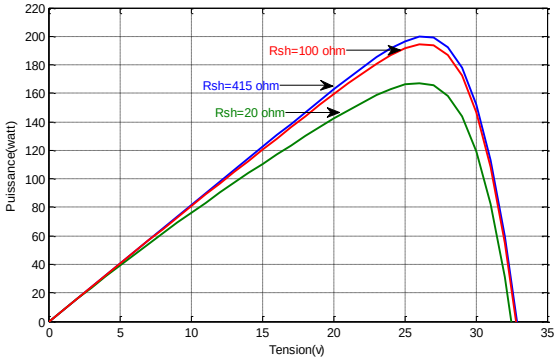


Figure I.9 : La courbe P-V pour différentes valeurs de Rsh.

I.5.3.Influence de l'éclairement

Les figures II.10 et II.11 montrent respectivement la caractéristique I-V et P-V d'un module PV en fonction de l'éclairement incident et à température ambiante. Nous constatons que les variations de courant de court-circuit (c'est à dire pratiquement le photo-courant crée dans le module PV est proportionnel au flux solaire incident). D'où le forte influence de l'éclairement sur le courant débité par le module PV. Cette influence se traduit par une augmentation de la puissance disponible dans les modules PV chaque fois l'éclairement augmente et à chacune des valeurs du flux lumineux correspond à une puissance électrique maximale que pourrait fournir un module PV **[8]**.

$$I_{cc} = I_{cc}^{*}\left(\frac{G}{G^{*}}\right) + a_1(T - T^{*}) \qquad \textbf{(I.14)}$$

I_{cc}^{*} : Représente le courant de court-circuit ;

a_1 : $(\frac{A}{C°})$ Coefficient obtenu empiriquement ;

G^* :Irradiation de référence vaut $_2\, 1kW/m^2$;

T^*: Température ambiante égale à 25 C°.

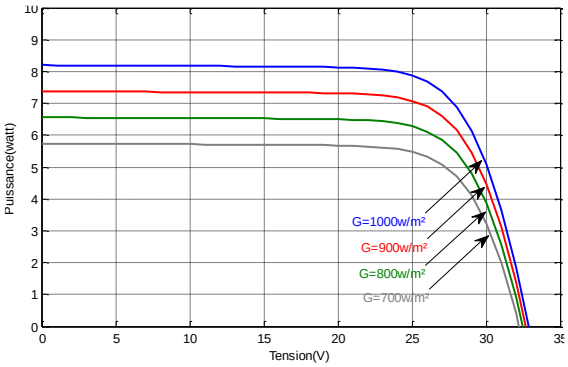


Figure I.10 : I(V) en fonction de l'éclairement

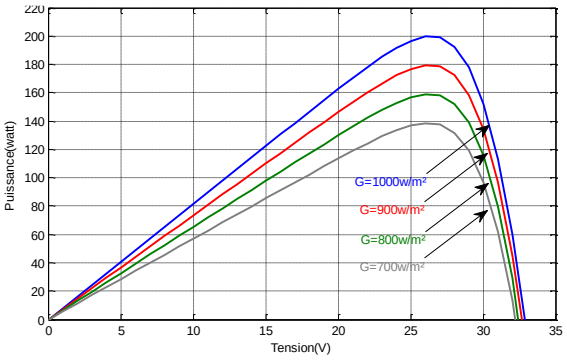


Figure I.11 : P(V) en fonction de l'éclairement.

I.5.4.Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement d'un module PV. Nous constatons à la figure II.12, qui représente la caractéristique *I(V)* pour un éclairement constant et pour diverses valeurs de la température, que le courant de court-circuit *Icc*varie peu en fonction de température. Par contre, l'augmentation de la température engendre undiminution de la tension en circuit ouvert et se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible dans les modules PV (figureII.13). D'où l'influence de la température sur le comportement du module PV **[9]**.

La tension à vide d'un module PV en fonction de la température et de l'éclairement est donnée par la relation suivante:

$$V_{co} = I^*_{co} + \alpha_2(T - T^*) - (I_{cc} - I^*_{cc}).R_S* \qquad \textbf{(I.15)}$$

V^*_{co}etI^*_{cc} : représentent respectivement la tension de court-circuit et le courant de court-circuit à T= 25^0 C et G=$1kW/m^2$.

$a_2(\frac{V}{°C})$: Coefficient obtenu empiriquement.

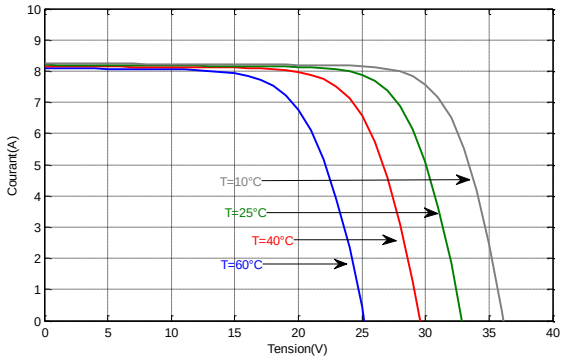


Figure I.12 : I(V) en fonction de température.

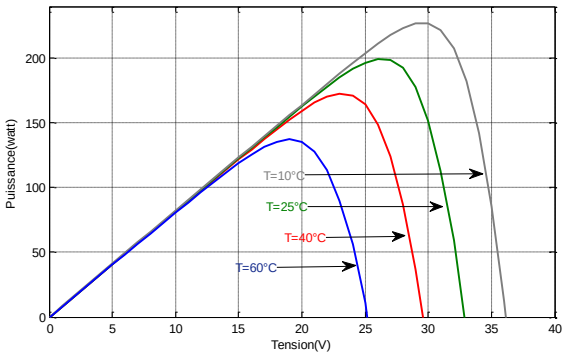


Figure I.13 : P(V) en fonction de température.

I.6.Association des cellules photovoltaïques

A partir de l'association en série et/ou en parallèle en obtient un module photovoltaïque. La connexion en série augmente la tension pour un même courant alors que la connexion en parallèle augmente le courant pour une tension identique**[10]**.

Pour que l'électricité générée soit utilisable pour nos applications, il est donc nécessaire d'associer entre elles un grand nombre de cellules. La figure suivante montre le passage d'une cellule à un module photovoltaïque.

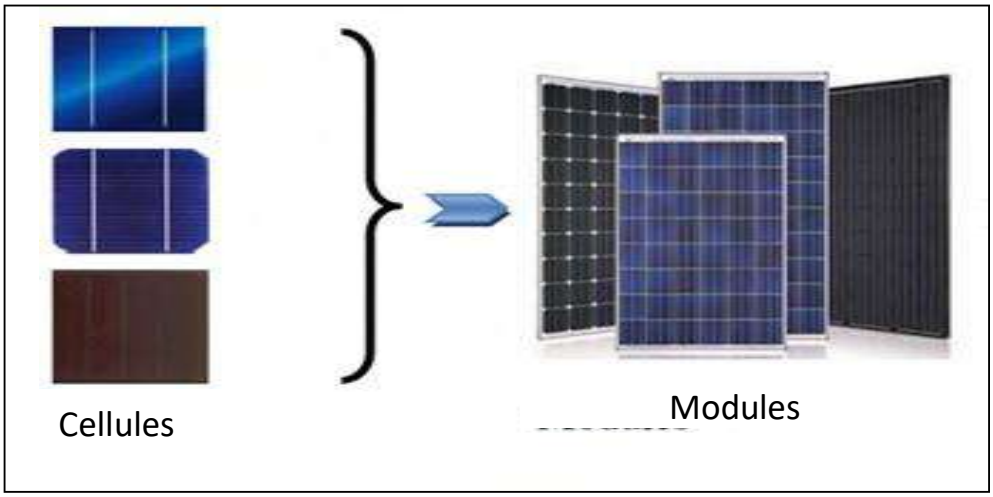


Figure I.14 : Constitution d'un générateur photovoltaïque.

I.6.1.Association série

Par association en série (appelée "String"), les cellules sont traversées par le même courant et la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules**[9]**.

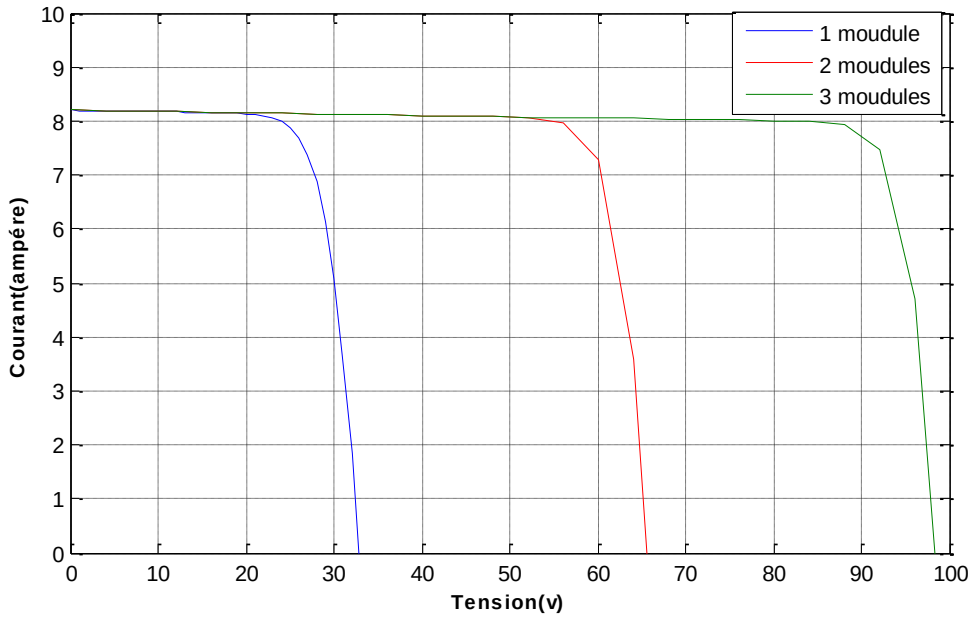


Figure I.15 : Courbe I-V d'une association série de cellules photovoltaïques.

I.6.2.Association parallèle

En additionnant des modules photovoltaïques identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module, alors que leur courant s'ajoute pour donner un courant plus important à la sortie ce qui donne naissance à un champ photovoltaïque de même tension ça caractéristique est représenté ci-dessous **[11]**.

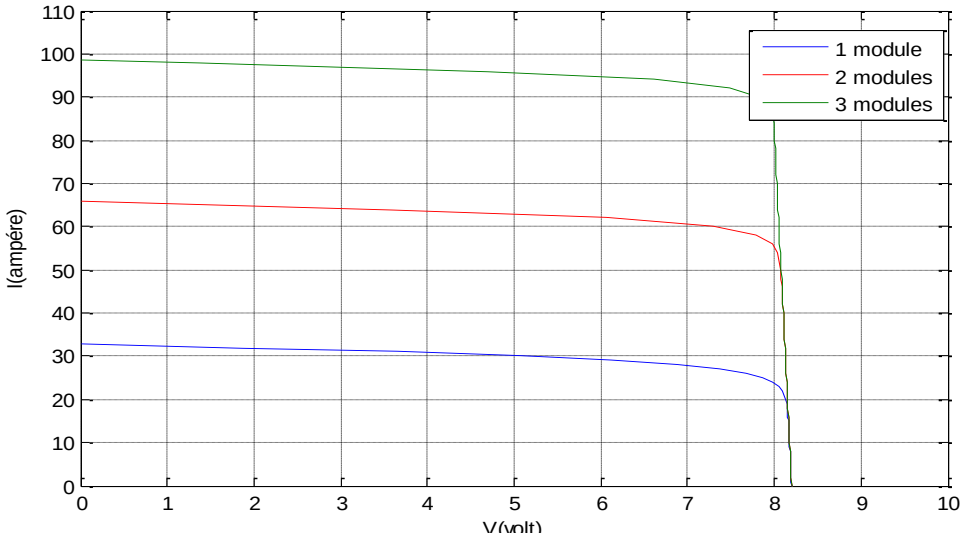


Figure I.16 Courbe I-V d'une association parallèle de modules photovoltaïques.

I.7.Différentes technologies des cellules solaires

Plusieurs techniques permettant la conversion directe de la lumière solaire enélectricité, et cela à l'aide de matériaux semi-conducteurs tel que le silicium (Si), legermanium (Ge), le sélénium (Se) ou les composés semi-conducteurs tel que l'arséniure degallium (GaAs), ou le tellurure de cadmium (CdTe). Les cellules solaires de type GaAs sonttrès coûteuses dans leur fabrication et leur utilisation est en général limitée aux applicationsspatiales, mais le matériau le plus utilisé reste le silicium.

I.7.1.Silicium monocristallin

Elles sont considérées comme la première génération de photopile, elles ont un taux derendement excellent **[12]** (12 – 16% et jusqu'a 24 % en laboratoire) mais leur méthode deproduction est laborieuse et délicate, et donc, très chère; il faut une grande quantité d'énergiepour obtenir du cristal pur. Il présente l'inconvénient d'avoir un mauvais rendement en soleildiffus (temps nuageux...).



Figure I.17 Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin.

I.7.2.Silicium poly cristallin

Elles ont un coût de production moins élevé et un rendement qui varie entre 11 – 13%(autour de 18 % en laboratoire) **[12]**.Comme le monocristallin il présente l'inconvénientd'avoir un mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...).

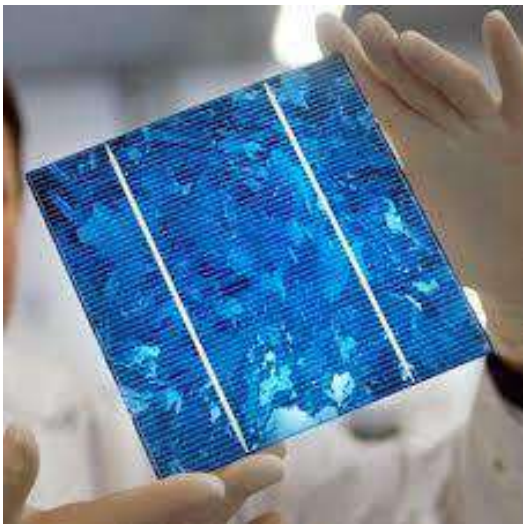


Figure I.18. Cellule photovoltaïque en silicium poly cristallin.

I.7.3.Silicium amorphe

Leur coût de production bien plus bas, mais malheureusement aussi, ont un rendementplus bas qui varie **[12]** entre 8 –10 % (autour de 13 % en laboratoire pour une cellule nondégradée).

Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium de 0.3 a 1.0nanomètre seulement (500 nanomètres pour les deux autres types). On peut donc appliquer detrès fines couches de silicium amorphe sur des vitres, du métal, voir du plastique souple par un procède de vaporisation sous vide. C'est le silicium amorphe que l'on trouve le plussouvent dans les petits produits de consommation comme les calculatrices, les montres,…

Les cellules amorphes ont besoin d'environ deux fois plus de surface (comparé auxcellules cristallin) pour produire la même quantité d'électricité, et semblent se dégrader plusrapidement, mais ils ont l'avantage de mieux réagir a la lumière diffuse et a la lumièrefluorescente et d'être plus performants à des températures élevées **[12]**.



Figure I.19. Cellule photovoltaïque en silicium amorphe.

I.7.4.Cellule Tandem

Empilement monolithique de deux cellules simples. En combinant deuxcellules(couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin par exemple) absorbantesdans des Domaines spectraux se chevauchant, on améliore le rendement théorique par rapport à desCellules simples distinctes, qu'elles soient amorphes, cristallines ou microcristallines.

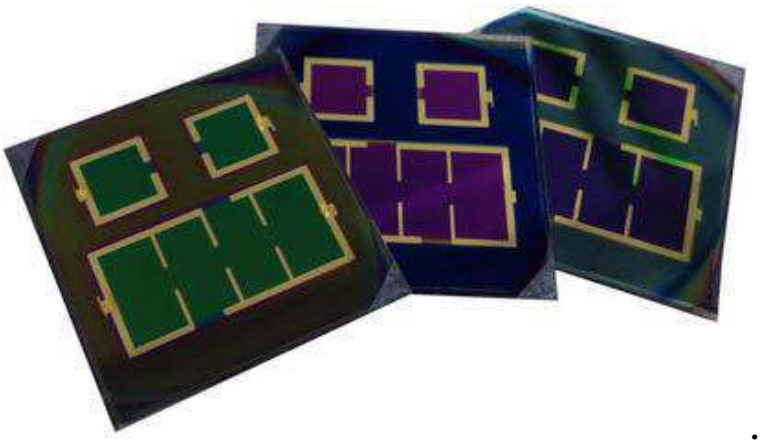


Figure I.20. Cellule photovoltaïque Tandem.

I.7.5.Cellule multi-jonction

Les cellules multi jonctions sont constituées de plusieurs couchesminces.

Chaque type de semi-conducteur est caractérisé par une longueur d'onde maximale au-de laquelle il est incapable de convertir le photon en énergie électrique. D'un autre côté, en deçà de cette longueur d'onde, le surplus d'énergie véhiculé par le photon est perdu. D'où l'intérêt de choisir des matériaux avec des longueurs aussi proches les unes des autres quepossible(en multipliant leur nombre d'autant) de manière à quelqu'une majorité du spectre solaire soit absorbé, ce qui génère un maximum d'électricité à partir du flux solaire**[12]**.

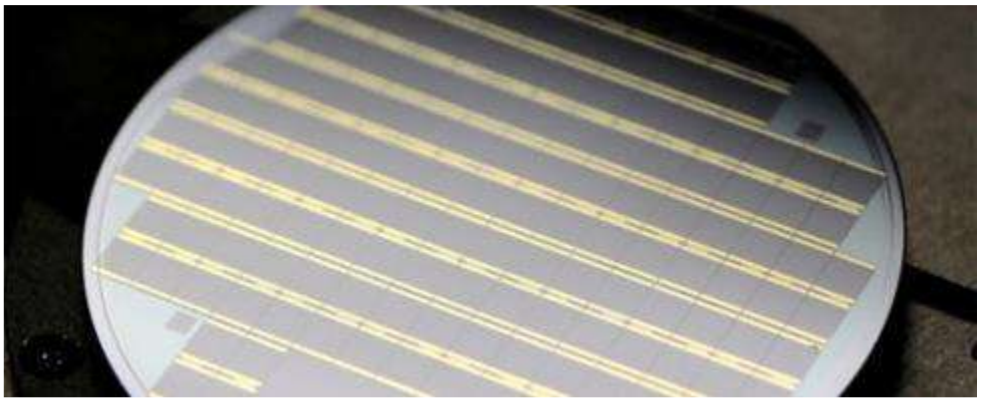


Figure I.21. Cellule photovoltaïque multi jonction.

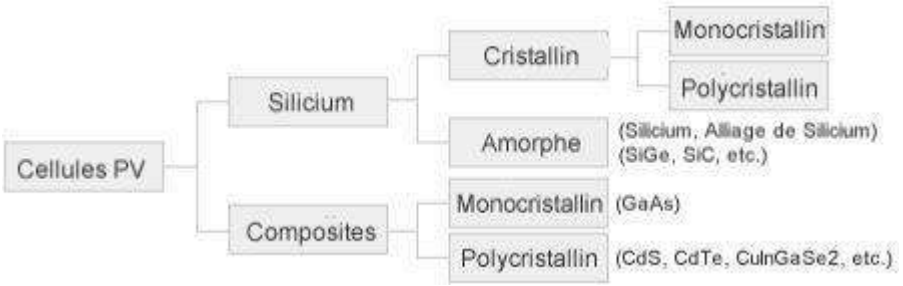


Figure I.22. Les différentes technologies des cellules photovoltaïques.

I.8.Avantage et inconvenants des PV

I.8.1. Les Avantage

Les avantages des photovoltaïques sont plusieurs et leur application se développe d'un moment à l'autre, parmi eux on site **[13]**:

• une haute fiabilité ou l'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

• leur montage est simple et ses installations sont adaptables aux besoins de chaque projet.

• le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits. il ne nécessite ni combustible, ni un transport, ni un personnel hautement spécialisé.

• ils sont recyclables, les matériaux utilisés pour leur production peuvent être réutilisés. Le recyclage n'est pas seulement bénéfique pour l'environnement, il contribue également à réduire l'énergie nécessaire pour produire plus de matériaux.

• L'énergie solaire photovoltaïque peut être intégrée de manière esthétique dans les bâtiments. Les modules solaires peuvent être en façades, contribuant ainsi à l'autonomie énergétique des bâtiments.

• Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse.

• L'énergie solaire captée par la terre pendant une heure pourrait suffire à la consommation mondiale pendant une année. Au total, ce rayonnement représente 1.6 milliards de TWh, soit huit mille fois la consommation énergétique annuelle mondiale.

I.8.2. Les Inconvenants

Malgré les avantages que les générateurs photovoltaïques présentent, des points faibles peuvent se manifester au niveau de fonctionnement et de la fabrication **[13]**:

• une fabrication d'un module photovoltaïque relève une haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

• le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %, avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesels.

• restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulation associés soient judicieusement choisis.

• La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps.

• Le niveau de production d'électricité n'est pas stable. Il n'est pas prévisible, il dépend du niveau d'ensoleillement. Cependant la production d'électricité n'est pas constante.

I.9. Configuration des systèmes photovoltaïques

Il existe plusieurs configurations de systèmes photovoltaïques (PV) sont actuellement en service **[14]**:

- Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau (On-grid) ont le vent en poupe car ils bénéficient à l'heure actuelle de tarifs préférentiels de rachat de l'énergie dans de nombreuxpays.

- Les systèmes photovoltaïques non connectés au réseau (Off-grid) sont employés lorsque le réseau de distribution est inexistant ou lorsque les couts de connexion a ce

réseau dontprohibitifs.

I.9.1. Systèmes photovoltaïques autonomes[15]

La seule production électrique de ce type de systèmes est d'origine photovoltaïque. Un schéma d'un système photovoltaïque autonome est représenté figure II.24, du fait de la dé- corrélation entre production photovoltaïque et alimentation des charges du consommateur, un système de stockage est utilisé en tampon, celui-ci étant rechargé en cas de surplus de production et déchargé en cas de surconsommation, en raison de sa maturité technologique et de son faible cout d'investissement, le moyen de stockage universellement répandu pour de telles applications et de type électrochimique Plomb-Acide, cependant, de nouvelles technologies sont actuellement envisagées comme celles au Lithium.

Les performances de ce type de systèmes sont directement liées a son dimensionnement, un sous-dimensionnement a notamment pour conséquences un vieillissement prématuré de système de stockage ainsi qu'un accroissement des délestages de consommation et de production. Alors qu'un surdimensionnement peut conduire a un surcout économique.

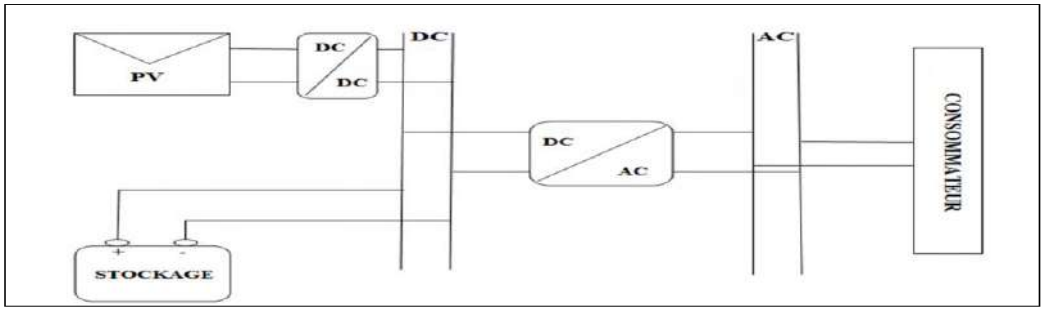


Figure I.23. Système photovoltaïque autonome.

I.10.Conclusion

Dans les paragraphes précédents

- Nous avons faire exposer une vue Historique sur l'énergie photovoltaïque et donner une définition de la façon plus détaillée et expliquer la méthode de raccordement (série et parallèle).
- On a également donné une vue générale sur la caractéristique de la cellule photovoltaïque ainsi que des différents relations et formules sur les paramètres (Icc ,Vco ; FF) et le rendement maximale.

- Nous avons présenté l'influence du couplet (Ensoleillement, Température) sur la cellule photovoltaïque.
- Il existe plusieurs configurations de systèmes photovoltaïques (PV) sont actuellement en service.
- Donné Les différents types de cellules solaires, ainsi le Principe de fonctionnement d'une cellule,également les différentes applications photovoltaïques, que soit pour des applications autonome ou raccordée au réseau public.et nous avons identifié les avantage et inconvenants des PV.

CHAPITRE II
Poursuite du point de puissance maximale

II.1. Introduction

Les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque dépendent de l'éclairement solaire et de la température, Comme on a vu dans le chapitre précédent. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. À cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur photovoltaïque et le récepteur un convertisseur statique DC-DC (hacheur) commandé permettant de poursuivre le point de puissance maximale. Ces commandes sont connues sous le nom de MPPT *(Maximum Power Point Tracking)* associées à un étage d'adaptation permettant de faire fonctionner un générateur électrique non linéaire de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Un générateur photovoltaïque est un générateur, dont la caractéristique Courant-Tension est fortement non linéaire **[16]**.

II.2. 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 (VPPM et IPPM). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé parune MPPT **[17]**. Il peut être représenté par le schéma de la Figure III.1.

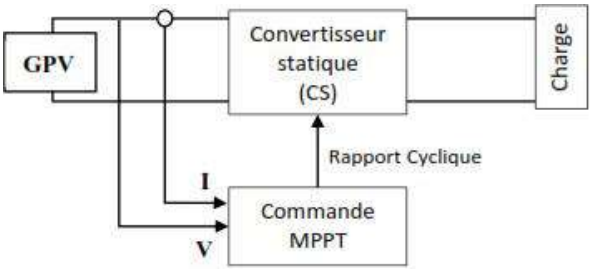


Figure II .1: Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur, une commande MPPT et une charge.

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 MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS 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 MPP **[18].**

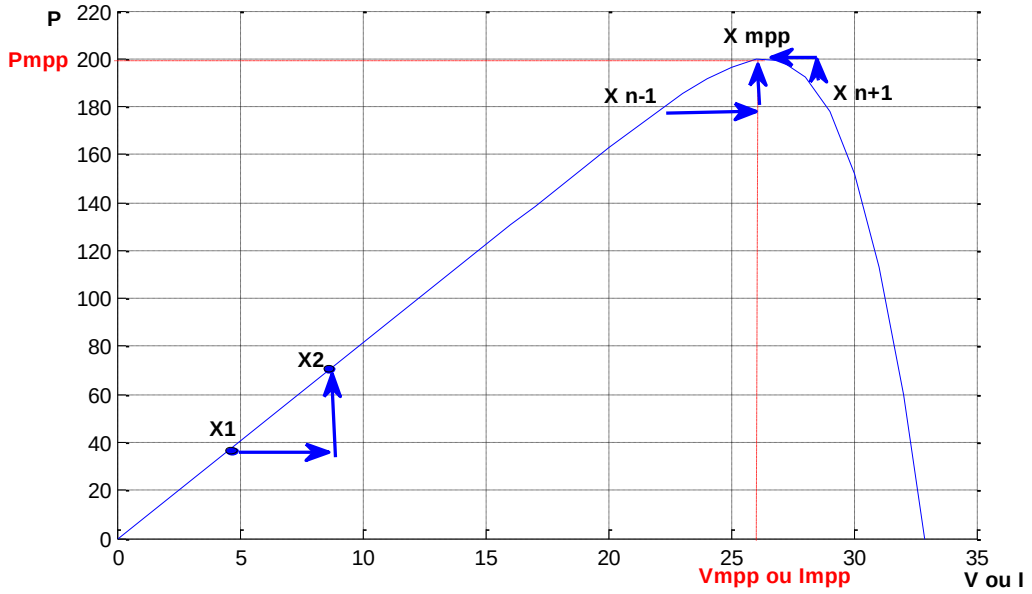


Figure II.2. Principe de la commande MPPT.

II.3. 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 **[19]**.

II.3.1. Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée

II.3.1.1 Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée

Il y a un certain nombre de commandes MPPT qui effectue une recherche du PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Comme la méthode de Perturb & Observe, les algorithmes d'incrément de conductance qui utilisent la valeur de la puissance fournie par le GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM ou bien Les commandes qui sont basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (V_{opt} et I_{opt}) et les paramètres caractéristiques du module PV (V_{co} et I_{cc}). Notamment, les MPPT inspirées des réseaux de neurones. Dans ces commandes, soit on fait appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant stocké tous les cas possibles, soit les commandes sont encore une fois de plus approximatives. Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité de réaction .

II.3.1.2 Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie

Dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des CS. Par exemple Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie qui sont principalement utilisées quand la charge est une batterie. Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de P_{max} est faite à travers le rendement du convertisseur. En somme, plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, en général, tous les systèmes avec un seul capteur sont par essence, non précis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial **[19]**.

II.3.2 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche

III.3.2.1. MPPT indirect

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (ou), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur .Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques **[19-20]**.

II.3.2.2. MPPT Direct

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent

survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction **[19-20]**.

II.4. Les algorithmes MPPT

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse des principaux modes de recherche du PPM existants dans ce chapitre nous a permis de bien identifier l'existant et les points qu'il restait à améliorer. Ceci a constitué la base théorique pour nos travaux concernant les simulations dans le chapitre suivant.

II.4.1. Premiers types de commande MPPT

BOEHRINGER a appliqué la première commande MPPT au PV en 1968 **[21]**. C'est un algorithme simple pouvant être implanté numériquement (Figure 3.3). Il est destiné aux applications spatiales qui avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres.

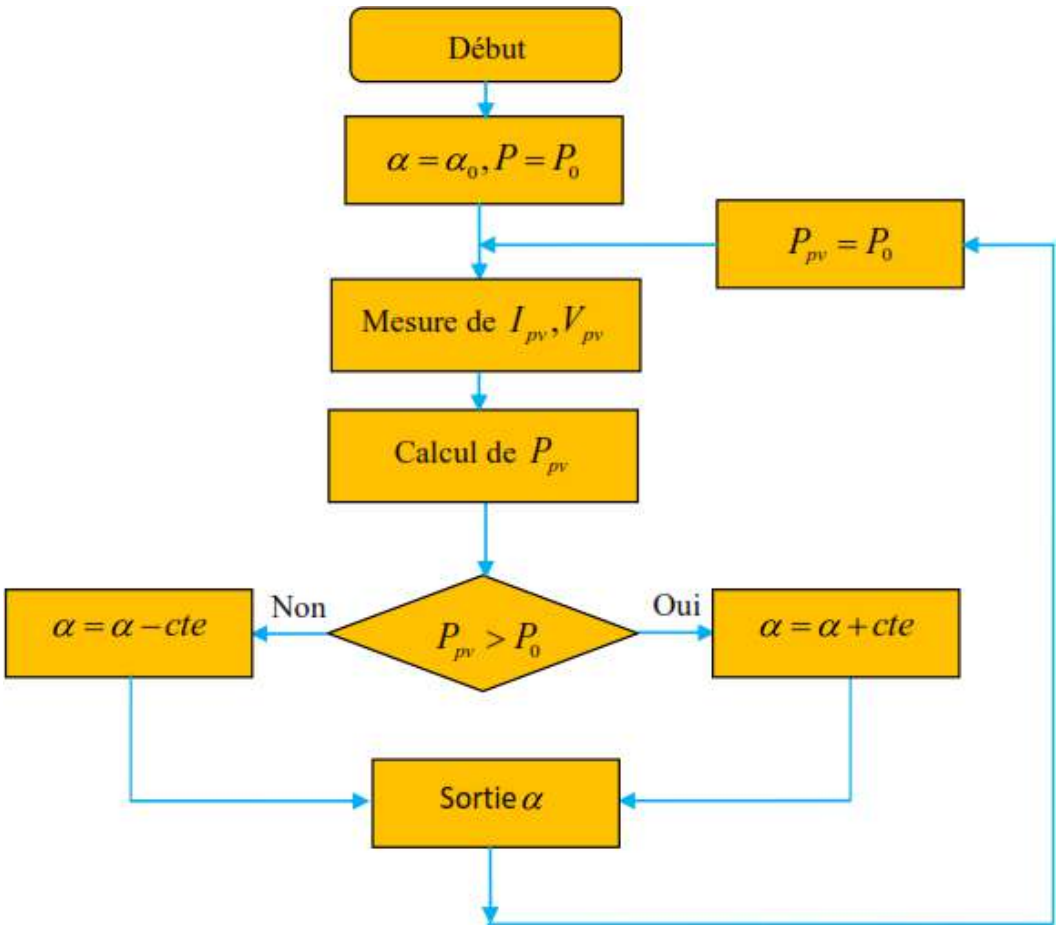


Figure II.3. Organigramme de la première commande MPPT.

II.4.2. Méthode basée sur la mesure de la tension en circuit ouvert

Cette méthode se base sur l'utilisation d'une cellule PV comme consigne étalon. Cette cellule étalon, non chargée, placée à côté des modules PV, mesure en temps réel la valeur de la tension en circuit ouvert qui permettra de déterminer la tension de référence. Pour déterminer le point de fonctionnement correspondant au point de puissance maximale en fonction de la tension, on trace le graphe$V_{opt} = (V_{oc})$ Cette fonction obtenue n'est pas linéaire. Pour faciliter le calcul, on doit la rendre linéaire. Ce qui donne **[22]**:

$$V_{opt} = 0.7V_{OC} + 0.328 \qquad \textbf{(II.1)}$$

Avec V_{opt} la tension PV correspondant au PPM Malgré que le point de fonctionnement soit proche de la puissance maximale, quelques reproches à cette méthode sont soulevés:

- Dépendance totale de la cellule étalon qui peut subir des modifications et des anomalies ;
- Non prise en compte des dérives de caractéristiques des modules photovoltaïques ;
- La tension V_{opt} représente 75 à 95% de la , donc la linéarisation réduit la précision

II.4.3. Algorithme de perturbation et observation

L'algorithme de perturbation et observation (communément désignée par P&O) est de type « hill climbing » (mot anglais qui veut dire « grimper une colline »). Il est le plus utilisé dans la littérature et surtout dans la pratique en raison de sa facilité de mise en œuvre. Cet algorithme a pour objectif de faire fonctionner le système à sa puissance maximale par l'incrémentation ou décrémentation de la tension du point de fonctionnement et l'observation de l'effet de cette perturbation sur la puissance débitée par le GPV. Selon cette observation, l'algorithme décide sur l'acte à faire pendant la prochaine itération. Quatre cas de situation pour P&O sont envisagés par la figure III.4 et récapitulés dans le Tableau III.1.

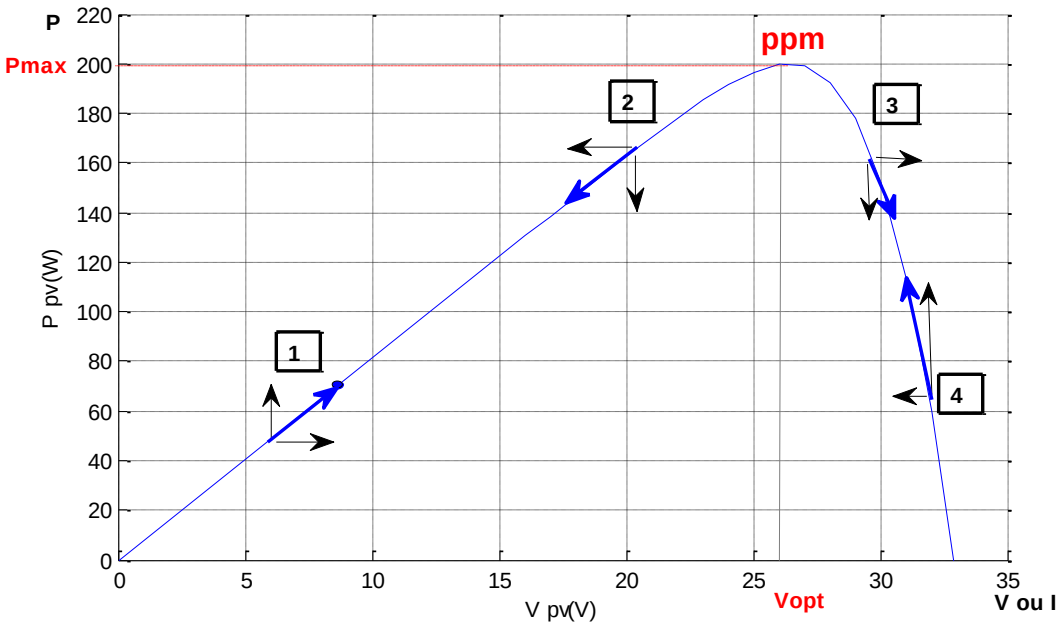


Figure II.4 : Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O.

Tableau II.1 : Principe de l'algorithme P&O

Cas n°	ΔV	ΔP	$\frac{\Delta P}{\Delta V}$	Sens de la poursuite	Action de contrôle
1	+	+	+	**Bon**	**Incrémenter** $V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$
2	-	-	+	**Mauvais**	**Incrémenter** $V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$
3	+	-	-	**Mauvais**	**Décrémenter** $V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$
4	-	+	-	**Bon**	**Décrémenter** $V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$

L'algorithme P&O (Figure III.4) a comme avantage la précision et la rapidité de réaction. Il permet de déterminer le point de puissance maximale pour un ensoleillement et une température ou un niveau de dégradation des caractéristiques. Le problème avec cet algorithme est:

- l'oscillation autour du PPM dans les conditions de fonctionnement normales.
- la mauvaise convergence de l'algorithme dans le cas des variations brusques de la température et/ou de l'ensoleillement.

Il faut noter que ces oscillations peuvent être réduites si on fixe un faible pas d'incrémentation mais au détriment du temps de convergence. Alors, un compromis doit être fait entre précision et rapidité lors du choix de ce pas de mise à jour.

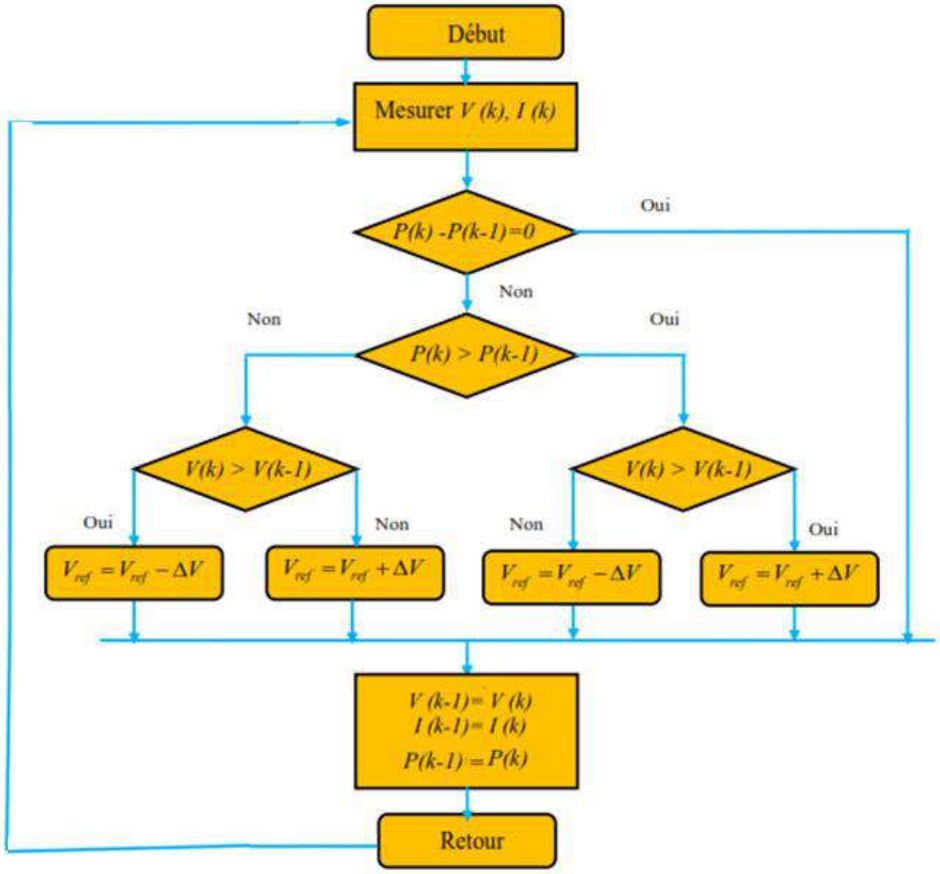


Figure II.5 : Organigramme de la méthode P&O.

II.4.4. Algorithme Hill Climbing

La technique Hill Climbing (HC) **[23, 24]** est une méthode mathématique d'optimisation. Comme son nom l'indique, elle fait monter le point de fonctionnement le long d'une caractéristique pour atteindre le maximum de la fonction puissance du GPV contre le rapport cyclique du convertisseur α (Figure III.6). La perturbation est appliquée pour plusieurs itérations sur le paramètre α en l'incrémentant ou en le décrémentant de $\Delta\alpha$ jusqu'à avoir la dérivée $d\alpha/dP$nulle.

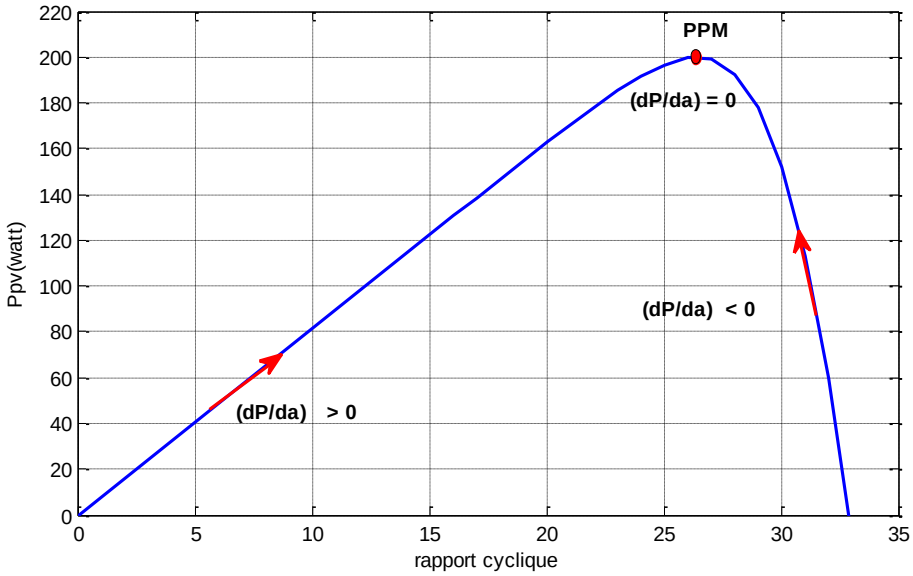


Figure II.6 : Principe de la méthode HC.

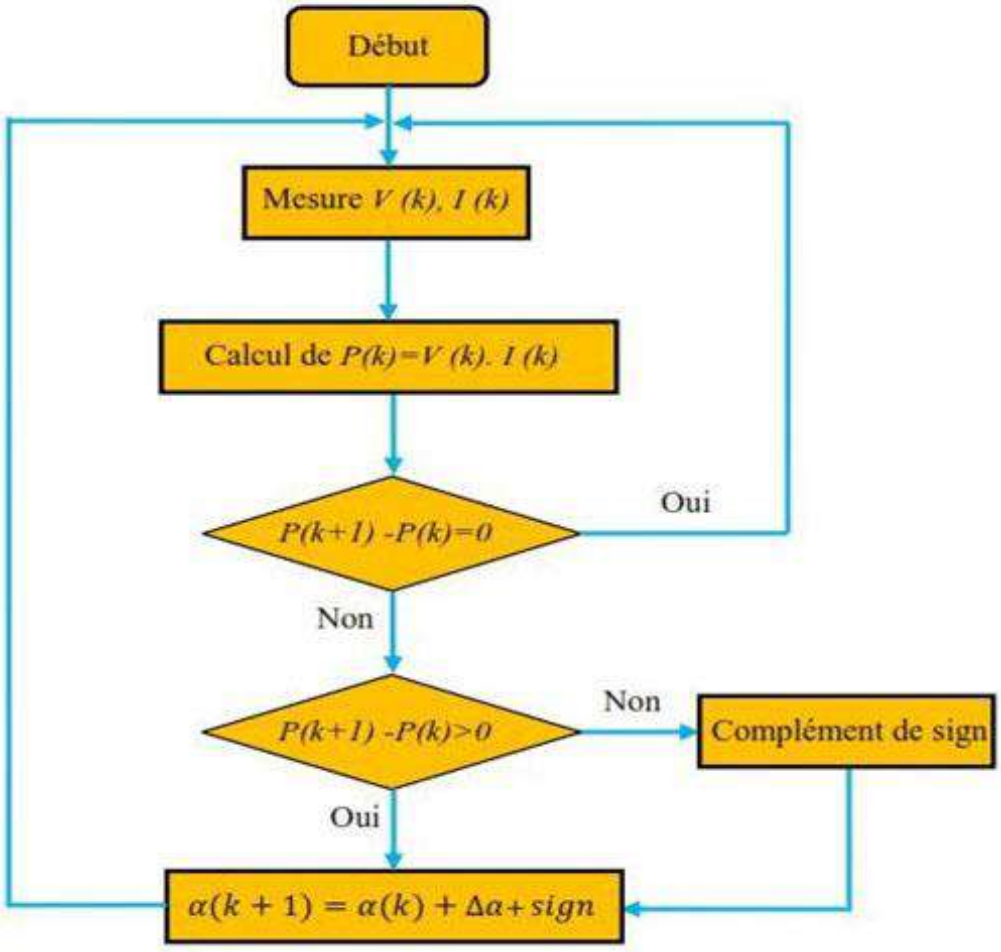


Figure II.7 : Algorithme de la méthode HC.

II.4.5. Algorithme d'incrémentation de la conductance

L'algorithme d'incrémentation de conductance (IncCond), appelée dans la littérature anglo-saxonne « Incrémental Conductance », est aussi l'une des techniques de « HC». Où la commande MPPT essaye de faire monter le point de fonctionnement (PF) du GPV le long de la caractéristique P-V jusqu'à atteindre le PPM. Elle permet la recherche du PPM en se basant sur l'égalité de la conductance $(G = I/V)$ et de l'incrémentation de la conductance $(\Delta G = \Delta I/\Delta V)$ (voire la figure III.8) Cet algorithme nécessite la connaissance de la valeur initiale du PFV_{ref} et le pas de mise à jour de la tension de référence (ΔV) (Figure III.9).

La puissance maximale est obtenue lorsque la dérivée de la puissance du GPV par rapport à la tension s'annule:

$$\frac{dP}{dV} = V\frac{dI}{dV} + I \approx V\frac{\Delta I}{\Delta V} + \qquad \textbf{(II.2)}$$

En comparant la conductance et l'incrément de la conductance, trois positions du PF peuvent être distinguées :

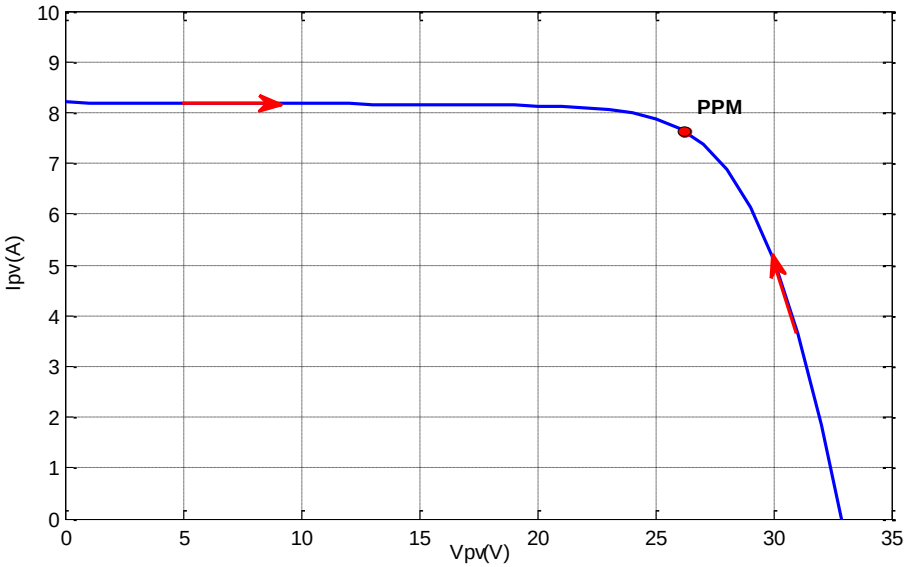


Figure II.8 : Caractéristique de fonctionnement de la méthode IncCond.

$$Si \quad \frac{dP}{dV} = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \quad \text{, le PF est sur le PPM}$$

$$Si \quad \frac{dP}{dV} > 0 \quad \rightarrow \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \quad \text{, le PF est à gauche du PPM} \qquad \textbf{(II.3)}$$

$$Si \quad \frac{dP}{dV} < 0 \quad \rightarrow \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \quad \text{, le PF est à droite du PPM}$$

L'avantage de cet algorithme est la précision et la vitesse de recherche du PPM quand les conditions atmosphériques changent rapidement. Ceci peut être un remède au problème de l'algorithme P&O. Cet algorithme présente des difficultés de mise en œuvre due à la complexité du circuit de commande et le calcul en temps réel de la dérivée nécessite un processeur de calcul rapide **[25]**. Autrement dit, l'exécution de la commande IncCond nécessite plus de temps par rapport P&O. Pratiquement, même IncCond présente des oscillations autour du PPM. Une comparaison sur le rendement MPPT entre les deux techniques les plus utilisées P&O et IncCond est faite par la référence **[26]**. Le résultat trouvé est de 89,9% pour IncCond contre 81,5% pour P&O.

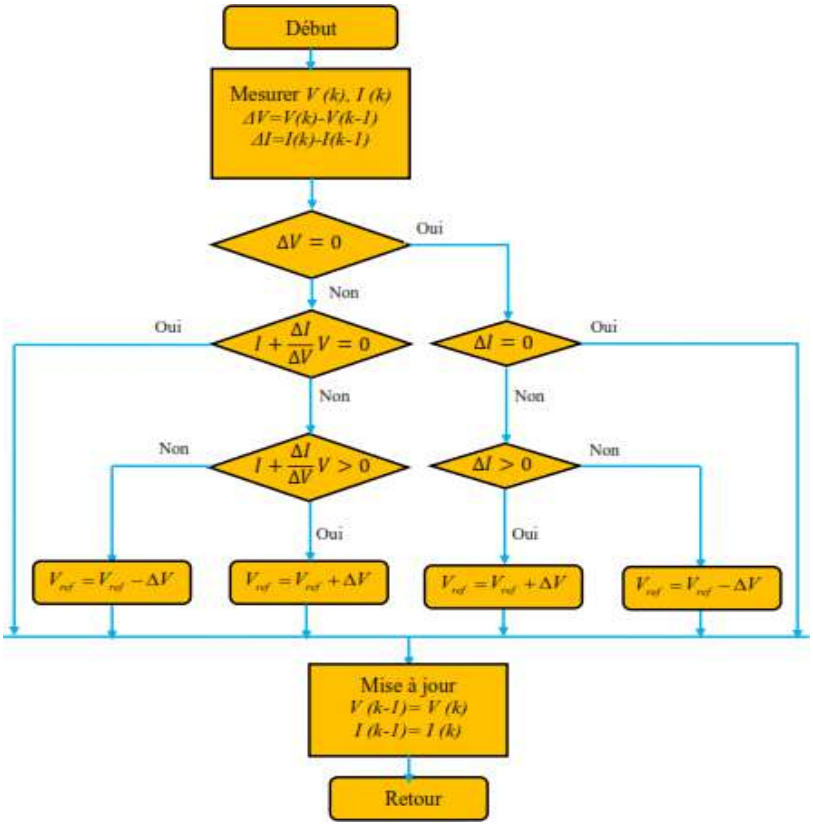


Figure II.9 : Organigramme de la méthode IncCond.

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, l'intérêt de l'étage d'adaptation dans la chaine de conversion PV a été abordé. Cet étage consiste en un convertisseur DC/DC avec un algorithme de commande. Différentes topologies de convertisseurs DC/DC non isolés ont été comparées. Quelques méthodes de poursuite de la puissance maximale citées dans la littérature depuis 1968 sont présentées. Des améliorations sur les méthodes Perturbation et observation P&O et l'incrémentation de la conductance IncCond, pour corriger la divergence en cas de changement brusque d'éclairement, ont été présentées.

Chapitre III

Les convertisseurs DC-DC

III.1. Introduction

Avec une tension alternative, un simple transformateur permet de changer la tension d'un niveau à un autre niveau. Mais dans le cas d'une tension continue, on doit avoir recours à une approche bien différente, en utilisant un convertisseur DC-DC **[27]**.

Les convertisseurs de type DC-DC convertissent un niveau de tension, à un autre niveau par action de commutation. Ils sont populaires en raison de leur petite taille et leur efficacité par rapport aux régulateurs linéaires. Les convertisseurs DC-DC ont un très grand domaine d'application. Ils sont largement utilisés dans les ordinateurs personnels, des périphériques informatiques et adaptateurs d'appareils électroniques pour fournir des tensions continues **[28]**.

La grande variété de topologie de circuit de convertisseurs varie entre une configuration à un transistor unique ; abaisseur (Buck), élévateur (Boost) et abaisseur élévateur (Buck-Boost) et des configurations complexes comportant deux ou plus d'interrupteurs et qui emploient la commutation douce ou les techniques de résonance pour contrôler les pertes de commutation **[29]**.

Les convertisseurs DC-DC de type Buck et Boost, sont utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités. Ce type de convertisseurs n'est constitué que par des éléments réactifs (selfs, capacités) qui, dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement **[30]**.

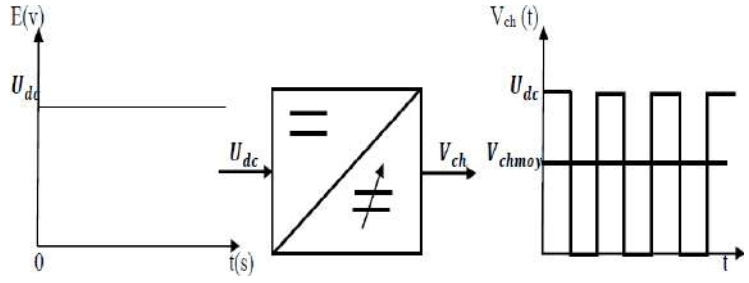


Figure III.1 : Principe de base d'un hacheur.

III.2. Domaine d'utilisation des hacheurs

Un des gros domaines d'utilisation des hacheurs est la variation de vitesse du moteur à courant continu (MCC), Ils équipent par exemple la majorité des engins de moyenne traction, tels que ceux utilisés pour le métro. La première génération de TGV (TGV Sud Est en FRANCE) est équipée d'ensembles hacheurs-moteurs à courant continu **[31]**.

On trouve aussi des hacheurs dans tous les équipements destinés à l'utilisation de l'énergie éolienne ou solaire.

III.3. Différents types des hacheurs

On distingue plusieurs types des hacheurs :

- Hacheur abaisseur « Buck converter » ;
- Hacheur élévateur « Boost converter » ;
- Hacheur abaisseur-élévateur « Buck-Boost converter ».

III.3.1. Hacheur série (abaisseur ou buck)

Le hacheur série, hacheur abaisseur ou bien dévolteur est un appareil qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant **[32]**.

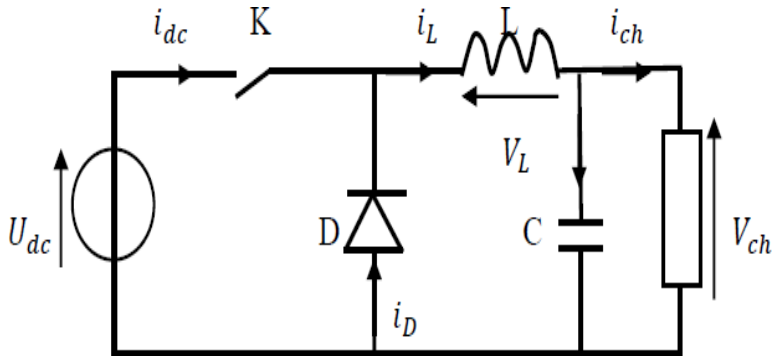


Figure III.2 : Hacheur série (abaisseur).

III.3.2. Hacheur parallèle (parallèle ou boost)

Le hacheur parallèle est appelé aussi hacheur élévateur, hacheur survolteur ou hacheur de type Boost. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur « K » peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) **[33]**.

Le commutateur peut être un transistor MOSFET ou un IGBT qui peuvent se commuter sur deux positions, marche ou arrêt rapidement.

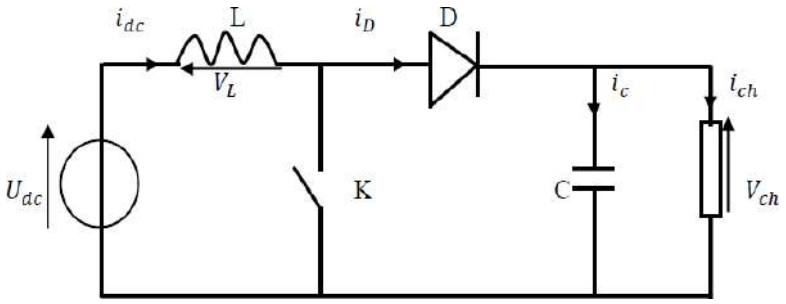


Figure III.3 : Hacheur parallèle (élévateur).

III.3.3 Hacheur série-parallèle (abaisseur-élévateur ou buck-boost)

Hacheur abaisseur-élévateur est aussi appelé dévolteur-survolteur ou de type Buck-Boost. Le hacheur abaisseur-élévateur est un convertisseur indirect DC–DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents **[34]**.

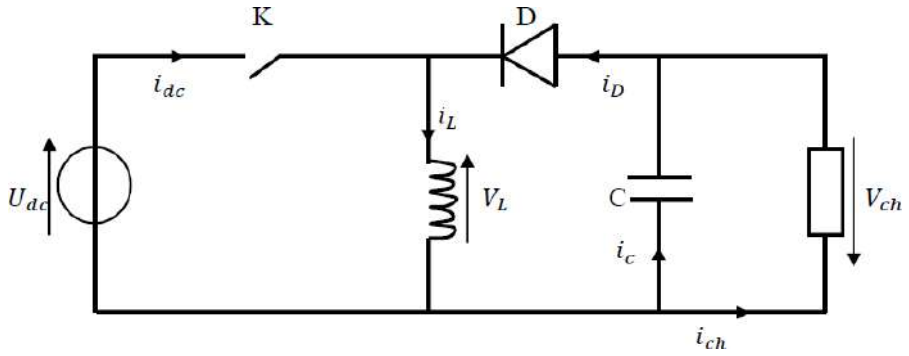


Figure III.4 : Hacheur abaisseur-élévateur.

III.4. Gain en tension des convertisseurs

Le tableau ci-dessous représente les gains en tension des différents convertisseurs continu-continu.

Tableau (III.1) illustre ces relations linéaires.

Parameters / convertisseurs	**BOOST**	**BUCK**	**BUCK-BOOST**
Gain en tension	$\frac{1}{1-D}$	D	$\frac{\mathrm{D}}{1-D}$
Courant de source	Continu	Discontinu	Discontinue

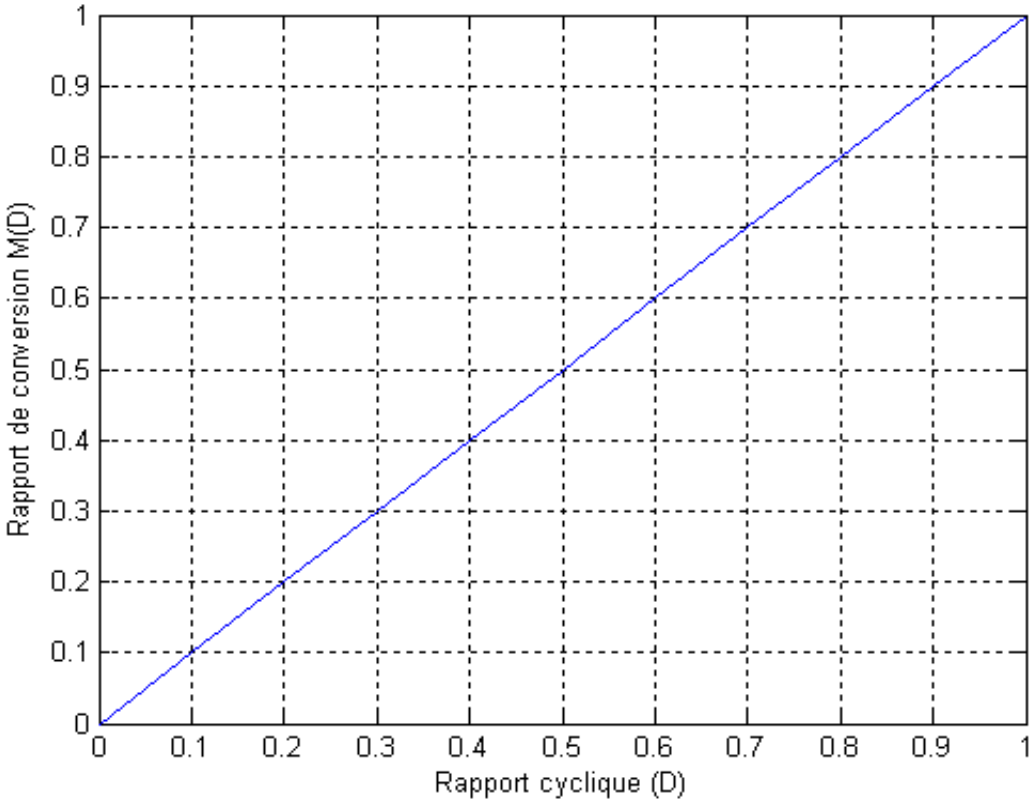


Figure III.5 : Rapport de conversion M(D) en fonction du rapport cyclique D pour un hacheur buck.

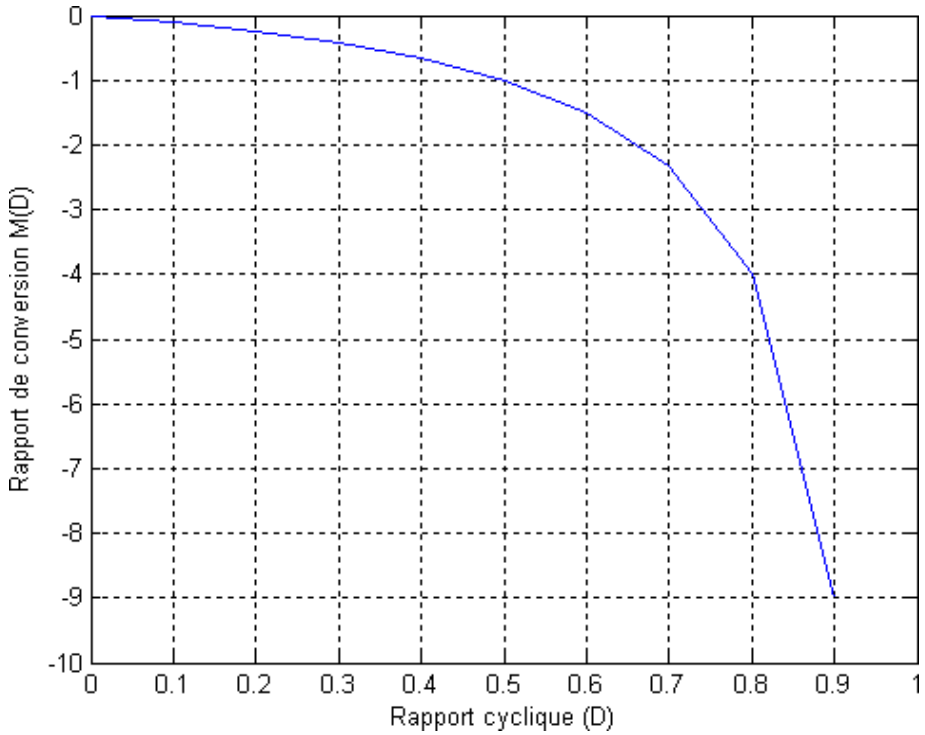


Figure III.6 : Rapport de conversion M(D) en fonction du rapport cyclique D pour un hacheur buck - boost.

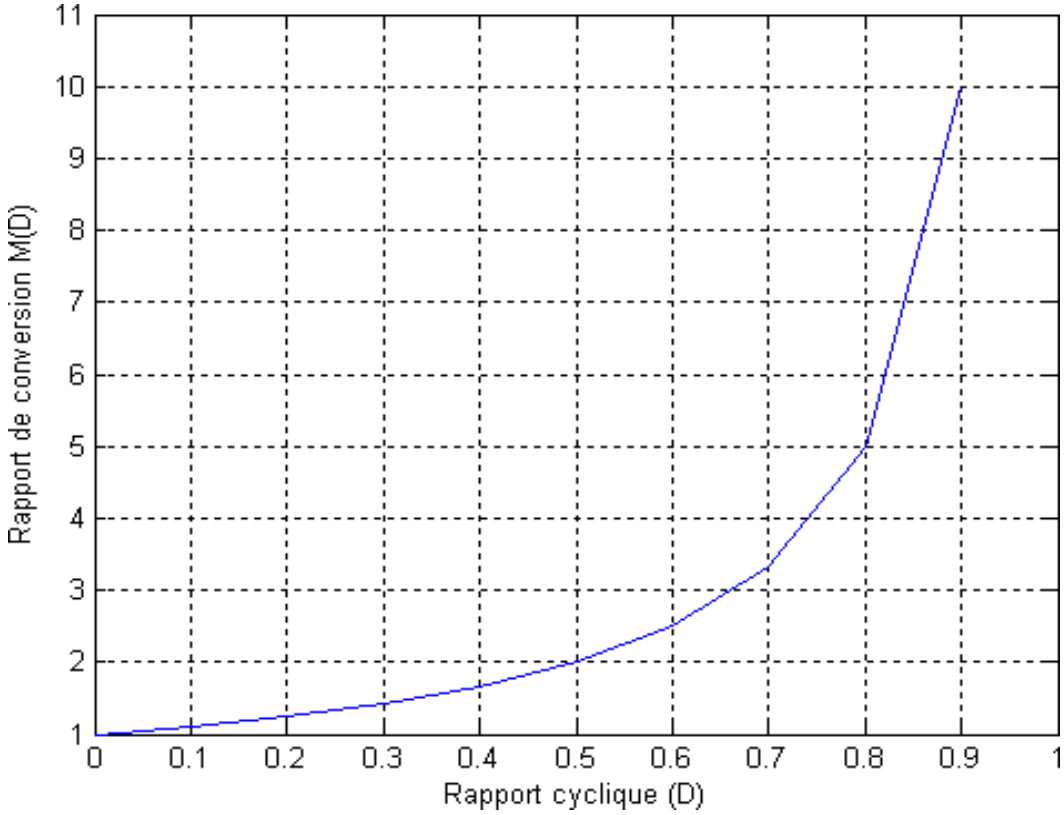


Figure III.7 : Rapport de conversion M(D) en fonction du rapport cyclique D pour un hacheur boost.

III.5. Fonctionnement du hacheur Boost

Dans ce qui suit nous allons étudier le hacheur Boost.

III.5.1. Présentation de la structure

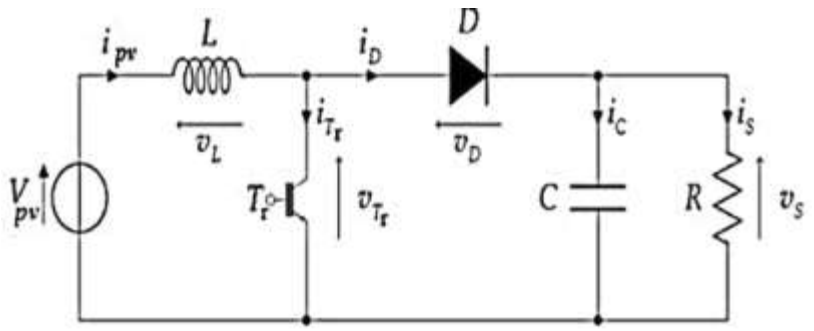


Figure III.8 : Schéma de principe d'un hacheur Boost.

Le schéma de principe d'un hacheur Boost est donné par la figure ci-dessus. Cette structure est composée principalement d'une inductance L et de deux interrupteurs et D selon l'état de ces deux interrupteurs, on peut distinguer deux phases de fonctionnement :

-**La phase active :** lorsque l'interrupteur est fermé et l'interrupteur D st ouvert. Durant cette séquence, le courant traversant l'inductance L va augmenter linéairement et une énergie est stockée dans L. Le condensateur. Fournit de l'énergie à la charge R.

-**La phase de roue libre :** lorsque l'interrupteur est ouvert, l'interrupteur D est fermé. Durant cette séquence, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est restituée au condensateur et à la charge R. Lors de cette phase, le fait que l'inductance L soit en série avec la source de tension d'entrée permet d'obtenir un montage survolteur.

La figure (**IV.9**) présente l'allure du signal de commande appliqué à l'interrupteur . C'est un signal rectangulaire de fréquence f dont la durée est à l'état haut (durée de conduction de l'interrupteur, notée) est ajustée par le paramètre α. Ce paramètre, appelé rapport cyclique, est défini comme étant le rapport entre la durée de conduction de l'interrupteur et la période de découpage T de celui-ci **[35]** :

$$\alpha = \frac{T_{ON}}{T} \text{ , on a: } T = T_{ON} + T_{OFF} \qquad \textbf{(III.1)}$$

Où T_{OFF} correspond à la durée de blocage de l'interrupteur T_r .

La durée de conduction T_{ON} est comprise entre 0 et T donc, le rapport cyclique est compris entre 0 et 1. On peut exprimer la durée de conduction et de blocage de l'interrupteur. T_r en fonction de α et T:

- Durée de conduction : $T_{ON} = \alpha . T$
- Durée de blocage : $T_{OFF} = (1 - \alpha)T$

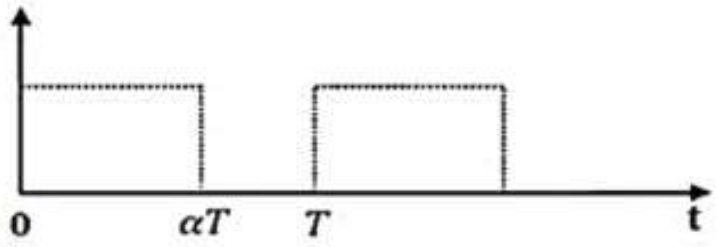


Figure III.9 : Signal de commande de l'interrupteur Tr.

Dans l'étude qui suit, nous ferons les hypothèses suivantes :

- La tension d'alimentation est continue et constante.

- La valeur du condensateur *C* est suffisamment grande afin de pouvoir considérer la tension de sortie comme continue.

- Les composants sont idéaux.

On peut distinguer deux régimes de conduction :

- La conduction continue qui correspond au cas où le courant i_L traversant l'inductance ne s'annule jamais.

- La conduction discontinue qui correspond au cas où le courant i_L traversant l'inductance s'annule avant la prochaine phase active.

Dans la suite on explique le comportement de la structure en fonction de ces deux régimes de conduction. L'objectif principal est de déterminer les relations reliant les grandeurs électriques d'entrée et de sortie du convertisseur ainsi que les formules permettant de dimensionner les différents composants **[35]**.

III.5.2. Conduction continue

· **Séquence 1 :** Phase active, $0 < t < \alpha T$

À l'instant t=0, on ferme l'interrupteur T_r pendant une durée αT. La tension aux bornes de la diode D est égale à $V_D = V_{Tr} - V_S$. Comme l'interrupteur $T_r$est fermé, on a $V_{Tr} = 0$, Ce qui implique $V_D = -V_S$. La diode est donc bloquée puisque $V_S > 0$. Dans ces conditions, On obtient alors le schéma équivalent de la figure ci-dessous **[35]**:

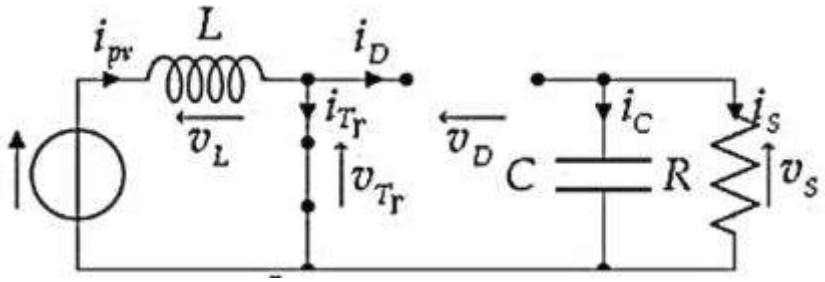


Figure III.10 : Schéma équivalent du hacheur Boost durant la phase active.

La tension aux bornes de l'inductance est alors :

$$V_L = V_{PV} = L.\frac{d_i}{d_t} > 0 \qquad \textbf{(III.2)}$$

En résolvant cette équation différentielle, on obtient l'expression suivante qui exprime l'évolution du courant traversant l'inductance :

$$i_L = \frac{V_{PV}}{L}.\text{t}+I_{L_{min}} \qquad \textbf{(III.3)}$$

· **Séquence 2 :** Phase de roue libre ; $\alpha T < t < T$

À l'instant $= \alpha T$, on ouvre l'interrupteur $T_r$pendant une durée $(1-\alpha)T$. Pour assurer la continuité du courant, la diode D entre en conduction. On obtient alors le schéma équivalent de la figure ci-dessous **[35]**:

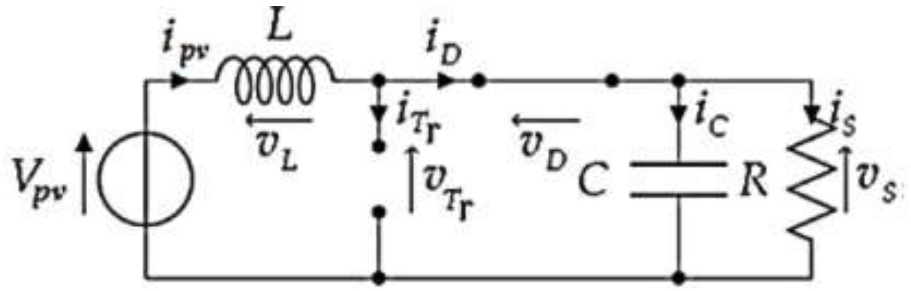


Figure III.11 : Schéma équivalent du hacheur Boost durant la phase de roue libre.

La tension aux bornes de l'inductance est alors: $V_L = V_{PV} - V_S = L.\frac{d_{i_L}}{dt}$, En résolvant cette équation différentielle, on obtient la formule suivante qui exprime l'évolution du courant traversant l'inductance :

$$i_L = \frac{V_{PV}-V_S}{L}.(t-\alpha.T) + I_{L_{max}} \qquad \textbf{(III.4)}$$

- **Expression de V_S et I_S** :

Par définition :$\langle V_L \rangle \frac{1}{T}\int_0^T V_L.dt = \frac{1}{T}.\left(\int_{\alpha T}^T V_{PV}.dt + \frac{1}{T}\int_{\alpha T}^T (V_{PV}-V_S)dt\right)$ **(III.5)**

Comme la tension moyenne aux bornes d'une inductance en régime permanent est nulle, on peut écrire :

$$\langle V_{PV} \rangle = \alpha.V_{PV} + (V_{PV}-V_S)(1-\alpha) = 0 \qquad \textbf{(III.6)}$$

Et finalement, on obtient la relation suivante :

$$V_S = \langle V_S(t) \rangle = \frac{V_{PV}}{1-\alpha} \qquad \textbf{(IV.7)}$$

Le rapport cyclique α est compris entre 0 et 1 donc la tension de sortie V_S est nécessairement supérieure à la tension d'entrée V_{bat}(montage survolteur).

Si on suppose que le courant d'entrée est parfaitement continu, on peut écrire :

$$I_S = \langle i_S(t) \rangle = \frac{1}{T}\int_{\alpha T}^T I_{PV}.dt \qquad \textbf{(III.8)}$$

Ce qui conduit à :

$$I_S = I_{PV}(1-\alpha) \qquad \textbf{(III.9)}$$

Cette expression montre bien que le hacheur Boost est un abaisseur de courant. Au regard de ces différentes expressions, on peut remarquer que le rapport cyclique α permet de régler la tension moyenne de sortie (respectivement le courant moyen de sortie) pour une tension moyenne d'entrée donnée (respectivement un courant moyen d'entré). Il est donc possible de régler le transfert moyen de puissance entre l'entrée et la sortie de la structure à partir du rapport cyclique α **[35]**.

Le transfert moyen de puissance est :

$$P = \langle p \rangle = (1 - \alpha) V_S \, . I_{PV} \qquad \textbf{(III.10)}$$

- **Expression de ΔI_L**

L'ondulation absolue du courant $i_L$est défini par $\Delta I_L = I_{L_{max}} - I_{L_{min}}$. A partir des relations précédentes, à t=αT, on peut écrire $I_{L_{max}} = \frac{V_{PV}}{L} \alpha T + I_{L_{min}}$. on en déduit l'expression de ΔI_L suivante; $\Delta I_L = \frac{\alpha . V_{PV}}{L . f}$Cette expression nous montre que l'ondulation en courant diminue lorsque la fréquence de commutation ou la valeur de l'inductance L augmente.

Comme $V_{PV} = V_S(1 - \alpha)$, on peut écrire :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha(1-\alpha).V_S}{L.f} \qquad \textbf{(III.11)}$$

En résolvant $\frac{d\Delta I_L}{d\alpha} = 0$, on trouve que l'ondulation en courant ΔI_Lest maximale pour $\alpha = \frac{1}{2}$dimensionnement de l'inductance L, à partir d'une ondulation en courant donnée, s'effectue à l'aide l'inéquation suivante :

$$L \geq \frac{V_S}{4.f.\Delta I_{L_{max}}} \qquad \textbf{(III.12)}$$

- **Ondulation de tension :**

Pour déterminer l'expression de l'ondulation en tension ΔV_S **,** on fait l'hypothèse que le courant I_S est parfaitement constant. On a la relation suivante $i_c = C . \frac{dV_S}{dt}$, pour $0 < t < aT$:

On a $i_C = -I_S$. La résolution de cette équation différentielle nous donne **[35]**:

$$V_S = -\frac{I_S}{c} . t + V_{S_{max}} \qquad \textbf{(III.13)}$$

A $t = \alpha T, on\ a$:

$$V_S(aT) = V_{S_{min}} = -\frac{I_S}{c}.aT + V_{S_{max}} \quad \textbf{(III.14)}$$

Et par suit on a :

$$\Delta V_S = V_{S_{max}} - V_{S_{min}} = \frac{I_S}{c} \cdot aT \quad \textbf{(III.15)}$$

Finalement :

$$\Delta V_S = \frac{aV_S}{R \cdot c \cdot f} \quad \textbf{(III.16)}$$

Cette expression nous montre que l'ondulation en tension diminue lorsque la fréquence de commutation f ou la valeur du condensateur *C* augmente **[35]**.

Le dimensionnement du condensateur *C*, à partir d'une ondulation en tension donnée, s'effectue à l'aide l'inéquation suivante :

$$C \geq \frac{a_{max} \cdot V_S}{R.\Delta V_S.f} \quad \textbf{(III.17)}$$

Les formes d'ondes des principaux signaux sont données à la figure (III.12). A partir de ces formes d'ondes, on peut exprimer les valeurs moyennes et efficaces des courants qui traversent la diode *D* et l'interrupteur T_r. Nous pouvons également en déduire les contraintes maximales en tension et courant sur les interrupteurs. Ces relations seront utilisées lors du dimensionnement des différents composants de la structure **[35]**.

- **Courant moyen traversant la diode D:**

$$I_D = \langle i_D \rangle = I_S \quad \textbf{(III.18)}$$

- **Courant efficace traversant la diode D :**

$$\boldsymbol{I_{D_{eff}} = \sqrt{\left(\left(\frac{I_S}{1-\alpha}\right)^2 + \frac{\Delta I_L^2}{12}\right)} \cdot (1-\alpha)} \quad \textbf{(III.19)}$$

- **Courant moyen traversant l'interrupteur T_r :**

$$\boldsymbol{I_{Tr_{eff}} = \langle i_{Tr}(i) \rangle = \frac{I_S}{1-\alpha} = I_{PV}} \quad \textbf{(III.20)}$$

- **Courant efficace traversant l'interrupteur T:**

$$I_{Tr_{eff}} = \sqrt{\left(\left(\frac{I_S}{1-\alpha}\right)^2 + \frac{\Delta I_L^2}{12}\right)} \cdot (1-\alpha) \quad \textbf{(III.21)}$$

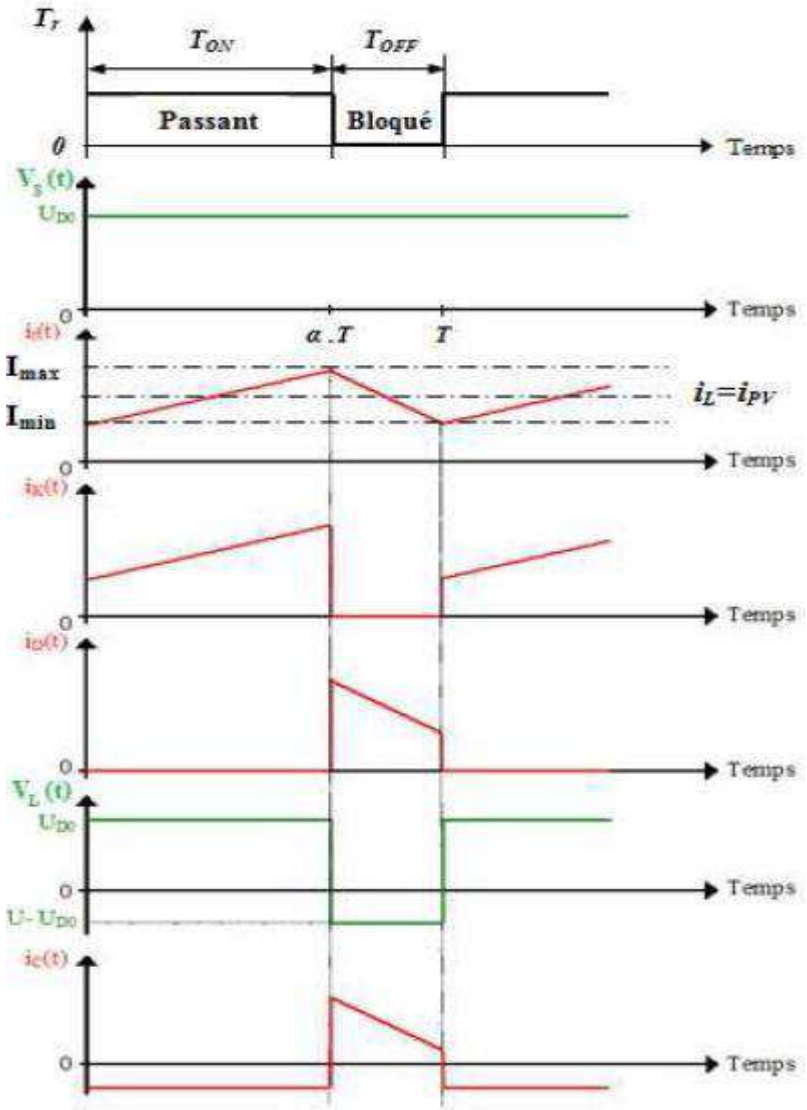


Figure III.12 : Allures des tensions et courants en mode conduction continue .

Les contraintes en tension et courant sur l'interrupteur commandé T_r et la diode D sont les mêmes.

- **Contraintes maximales en tension :**

$$v_{Tr_{max}}=|v_{D_{max}}|=v_{s_{max}}=\frac{V_{PV}}{1-\alpha}+\frac{\Delta V_S}{2} \quad \textbf{(III.22)}$$

- **Contraintes maximales en courant :**

$$i_{Tr_{max}}=i_{D_{max}}=i_{L_{max}}=\frac{I_S}{1-\alpha}+\frac{\Delta I_L}{2} \quad \textbf{(III.23)}$$

Le dimensionnement de la cellule de commutation s'effectue dans le cas le plus défavorable. Pour calculer les contraintes en tension et courant dans le pire des cas, il nous faut remplacer dans les expressions ci-dessus $par\ a_{max}$.

III.5. 3. Conduction discontinue

En conduction discontinue, on rajoute une phase pendant laquelle la diode D ne conduit pas $(i_L = 0)$**[35]**.

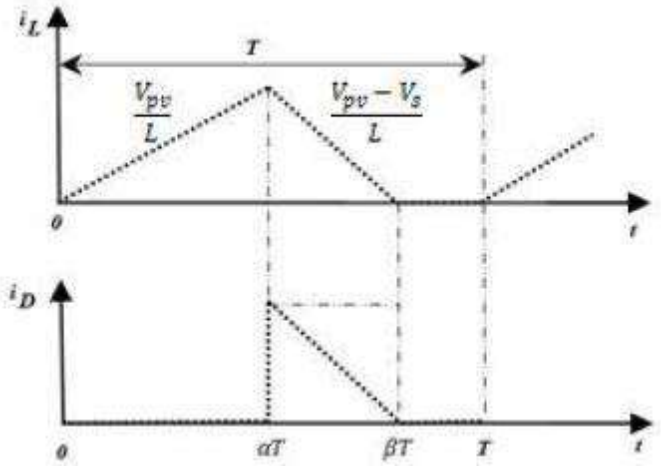


Figure III.13 : Allure du courant traversant l'inductance en conduction discontinue.

A partir de l'allure de i_L(Figure ci-dessus), on peut déduire Δt la durée d'annulation du ce courant :

$\Delta t = \beta T\ ; \forall aT \leq t \leq \beta T\ donc\ i_L(t) = \frac{V_{PV}-V_S}{L}(t-\alpha T) + I_{L_{aT}}\ \ donc\ \ i_L(\beta T) = 0$ **(III.24)**

Et avec $i_L(aT) = \frac{V_{PV}}{L} aT$ on a : $\Delta t = \frac{V_{PV}}{V_S - V_{PV}} . aT$

Le courant moyen de sortie est :

$$I_S = \langle i_S \rangle = \langle i_D \rangle = \frac{1}{T}\int_{\alpha T}^{\beta T} i_L(t).dt \ \rightarrow\ I_S = \frac{1}{2} i_L(aT)\left(\frac{\beta T - aT}{T}\right) \quad \textbf{(III.25)}$$

Ce qui conduit à :

$$I_S = \frac{1}{2}\frac{a^2 \cdot V_{PV}^2 \cdot T}{2L(V_S - V_{PV})} \quad \textbf{(III.26)}$$

Ou bien :

$$V_S = V_{PV}\left(1 + a^2 \frac{V_{PV}}{2Lf.I_S}\right) \quad \textbf{(III.27)}$$

Dans ce régime de fonctionnement, la tension de sortie est donc dépendante de la charge pour un rapport cyclique fixe.

Ceci implique qu'en conduction discontinue, il est nécessaire de mettre en œuvre une boucle de régulation **[35]**.

- **Puissance disponible ou échangée :**

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T V_S \langle I_S(t) \rangle \cdot dt \rightarrow P = \frac{1}{2}\frac{a^2 \cdot T}{L}\ \frac{V_S \cdot V_{PV}^2}{(V_S - V_{PV})} \quad \textbf{(III.28)}$$

III.6. Dimensionnement du hacheur

Un dimensionnement « sizing » d'un système est la procédure de trouver les expressions donnant les valeurs des paramètres associés aux composants physiques constituant ce système et cela pour un cahier des charges bien déterminé.

Pour un certain régime de fonctionnement et un certain point de fonctionnement, les valeurs numériques de ces paramètres seront déduites autour d'un cas d'application bien déterminée.

Par sécurité de dimensionnement, on applique un coefficient de sécurité (de 1,2 à 2) aux valeurs calculées des paramètres. C'est avec ces valeurs que le choix du composant soit réalisé **[36]**.

III.6.1. Détermination de la valeur d'inductance L

Vu la fréquence de commutation élevée, l'allure du courant de rechargement et de décharge de la bobine est presque linéaire. Le long d'une période et en régime permanent, l'ondulation Δi_Lest la valeur moyenne IL est constante (figure IV.12).

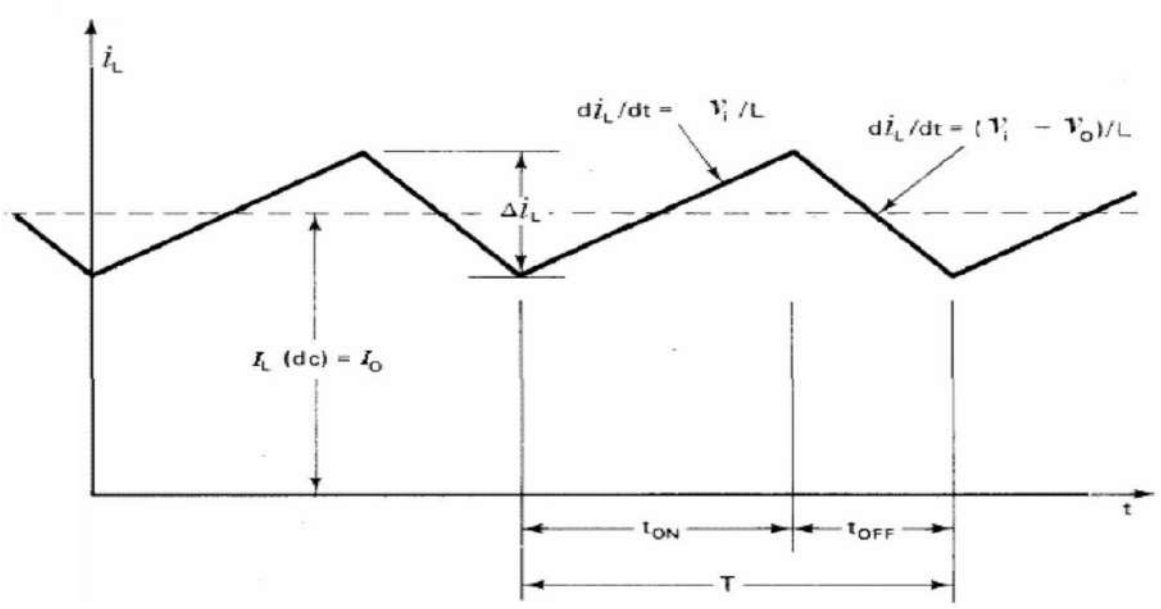


Figure III.14 : Allure simplifiée du courant inductif pour chacun des montages élévateurs.

A l'état ON, l'équation différentielle d'entrée devient:

$$V_m = L \cdot \frac{d_{iL}}{dt} + V_0 \rightarrow \frac{\Delta_{iL}}{t_{on}} = \frac{V_m - V_0}{L} \leftrightarrow \Delta i_{Lon} = \frac{V_0(1-d)}{f.L} \qquad \textbf{(III.29)}$$

Si on veut imposer un taux d'ondulation fixe: $\rho I_L = {}^{\Delta i_L}/_{I_L}$pour un point de

fonctionnement nominal (d, IL, Vo), on peut déduire l'inductance correspondante comme suit:

$$\Delta i_L = \frac{V_0(1-d)}{f} \cdot T \rightarrow L = \frac{c(1-d)}{f \cdot \rho I_L \cdot I_L} = \frac{V_0(1-d)}{f \cdot \rho I_L \cdot I_0} \quad \textbf{(III.30)}$$

Cette inductance est calculée dans le cas d'un hacheur idéal et elle ne correspond qu'au point de fonctionnement nominal. Pour un point flottant, un intervalle de cette inductance doit être trouvé.

Pour assurer un mode de conduction continue CCM, il faut que :

$$I_L - \frac{\Delta I_L}{2} > 0 \leftrightarrow \Delta I_L < 2I_L \quad \textbf{(III.31)}$$

En remplaçant dans l'équation d'ondulation,

$$L > \frac{V_0 \cdot \left(1 - \frac{V_0}{V_m}\right)}{2 \cdot I_0 \cdot f} \quad \textbf{(III.32)}$$

L'intervalle des points de fonctionnement du hacheur est déterminé par les bornes limites des intervalles de la tension et du courant de charge Vo et Io respectivement. L'intervalle de l'inductance minimale sera déduit comme suit :

$$L_{min} = Max\left\{\frac{V_0 \cdot \left(1 - \frac{V_0}{V_m}\right)}{2 \cdot I_0 \cdot f}\right\} \rightarrow L_{min} = \frac{V_{min}}{8 \cdot I_{0\,min} \cdot f_{min}} \quad \textbf{(III.33)}$$

La taille de l'inductance diminue avec l'augmentation de la fréquence de commutation **[37]**.

III.6.2. Détermination de la valeur de capacité C

L'équation différentielle décrivant le rechargement de condensateur C'est la même qui décrit sa décharge.

$$i_l = c \cdot \frac{d_{v_{out}}}{dt} + i_{out} \quad \textbf{(III.34)}$$

Par conséquent, une simple valeur de la capacité suffit pour garder la tension de sortie Vo parfaitement lisse voire constante. La détermination de la capacité du condensateur devient plus difficile. Pour cela, on utilise des méthodes autres que celle relative à l'inductance L.

La plus simple est de fixer une capacité C de valeur assez grande et connue pour les montages de type "hacheurs de base". Elle peut prendre comme capacité entre 100µF et

4700µF. Cette valeur imposée est utilisée comme base de calcul pour l'analyse et le dimensionnement du reste des composants.

Une deuxième méthode consiste à considérer la tension de sortie comme alternative avec une composante continue qui est sa valeur moyenne. Ce signal composé est issu de l'oscillateur RLC **[38]**.

La capacité sera exceptionnellement donnée en fonction de l'inductance L.

$$C = \frac{d\cdot(1-d)}{8\cdot L\cdot f^2.\frac{\Delta V_{out}}{V_{out}}} \qquad \textbf{(III.35)}$$

Pour un mode de conduction continue, la capacité doit dépasser un certain minimum ;

$$\widetilde{V_{out}} > \frac{\Delta V_{out}}{2} \rightarrow C > \frac{d\cdot(1-d)}{16\cdot L\cdot f^2} \qquad \textbf{(III.36)}$$

III.7. Simulation de l'hacheur Boost

Le circuit simulé et entraîner sous Matlab / Simulink :

La Figure(IV.12) montre le circuit qui a été simulé à l'état de consigne (T = 25 ° et G = 1000 W/m^2).

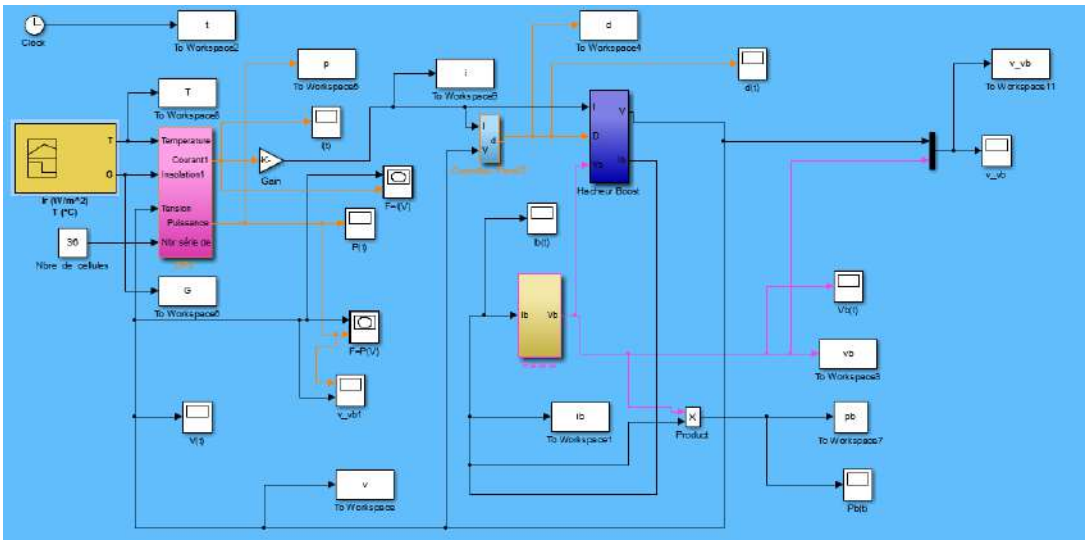


Figure III.15 : Convertisseur (DC/DC) élévateur de tension (type boost) connecté à modèle PV.

Les résultats de simulation du convertisseur survolteur représentent par les figures Suivants. Ces figures représentent la tensions de sortie de de l'hacheur et d'un panneau solaire ainsi le courant et puissance de temps . Ces résultats montrent que la tension de sortie d'hacheur bosost est supérieur à celle de panneau. Donc le hacheur boost effectue correctement son rôle.

La Figure (III.16) représente la courbe de la puissance en fonction du temps de panneau et la sortie hacheur. On peut remarquer que le contrôleur « P and O » recherche le point de puissance maximale et quand il l'atteint garde cette valeur par rapport la sortie de panneau.

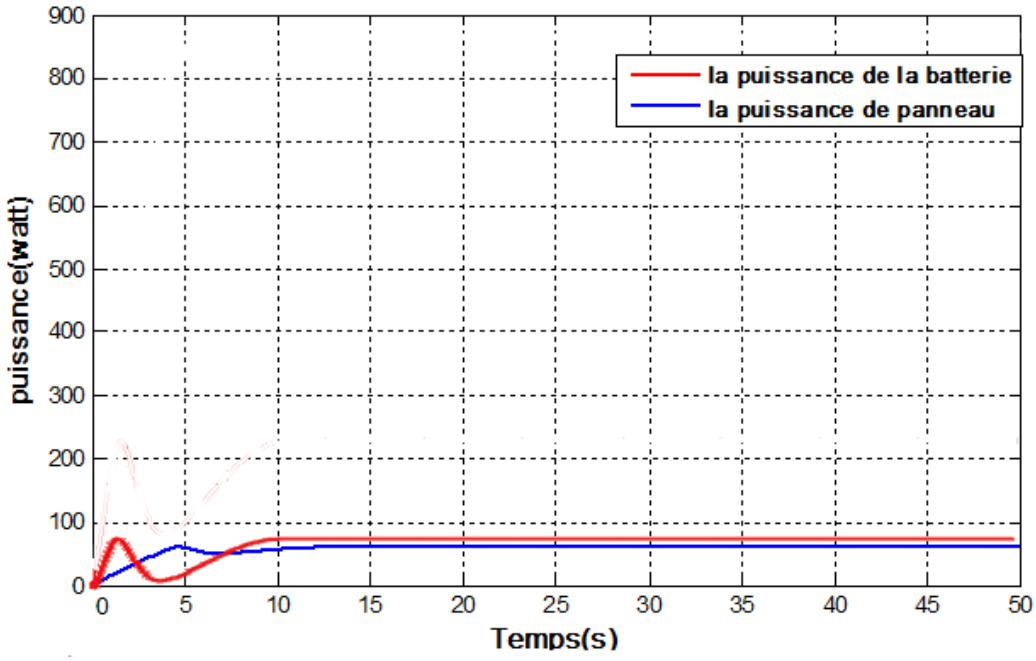


Figure (III.16) : Résultats de simulation de la puissance de sortie du hacheur Boost et le panneau solaire.

La figure (III.17) représente la courbe du courant en fonction du temps avec la sortie de panneau solaire et la sortie de hacheur. On remarque que le courant chute d'hacheur puis reprend sa valeur *Impp* et cela se produit grâce au contrôleur « P and O »et il est inferieur par rapport la sortie de panneau.

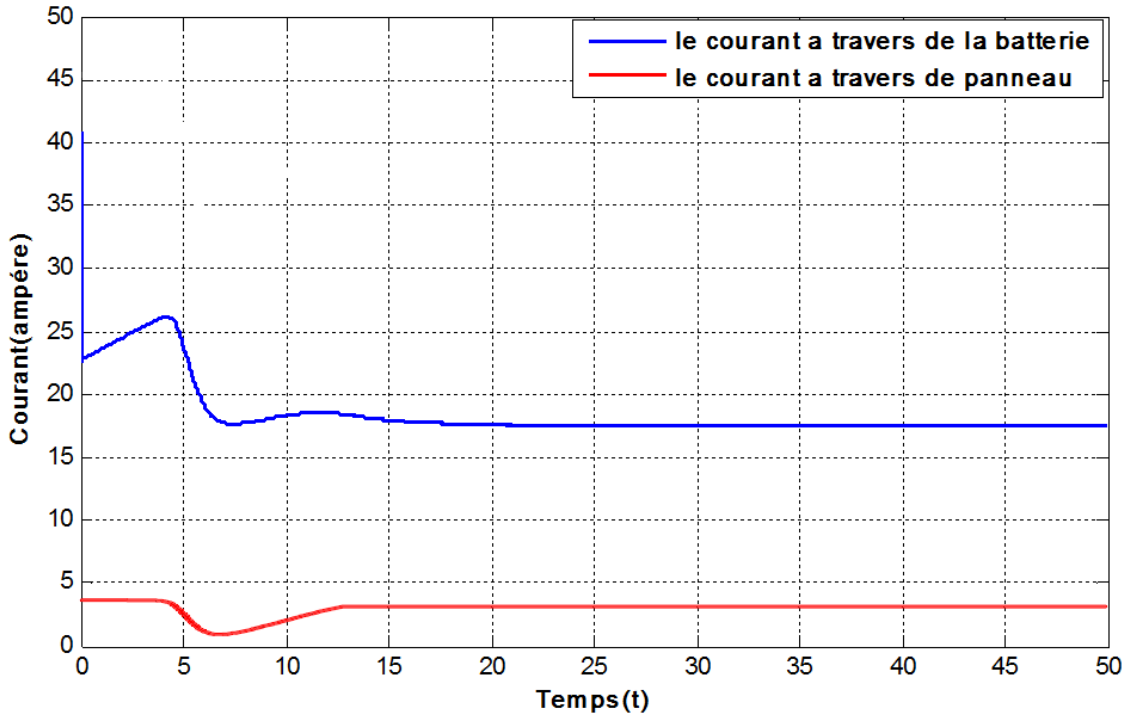


Figure (III.17) : Résultats de simulation de la valeur moyenne du courant de sortie du hacheur Boost et le panneau solaire.

La **Figure (III.18)** représente la courbe de la tension en fonction du temps. On remarque que le contrôleur « P and O » cherche la valeur *Vmpp* et que la tension de sortie d'hacheur reste constante à cette valeur et supérieur par rapport le panneau.

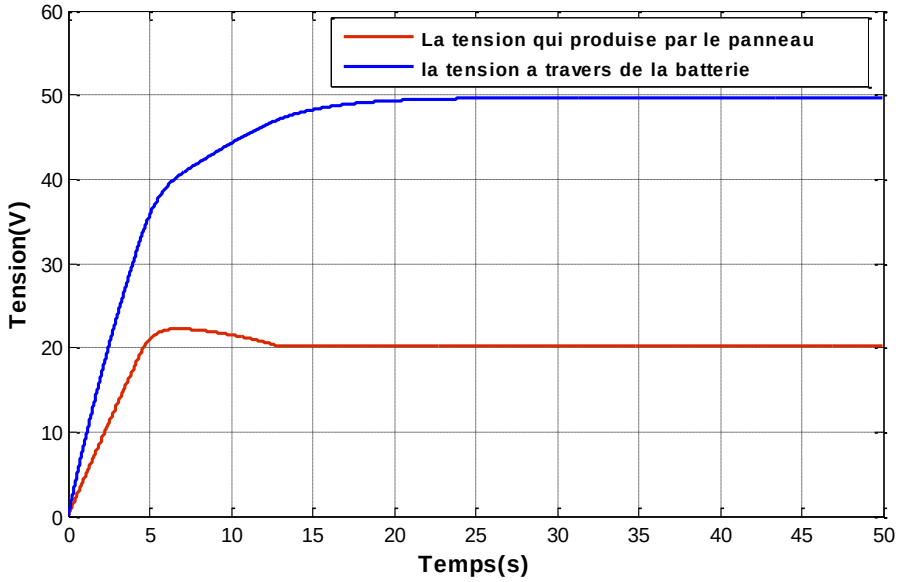


Figure (III.18) : Résultats de simulation de la valeur moyenne de la tension de sortie du hacheur Boost et du panneau solaire.

La **Figure (III.19)** montre l'évolution du courant en fonction de la tension avec le système « P and O ».

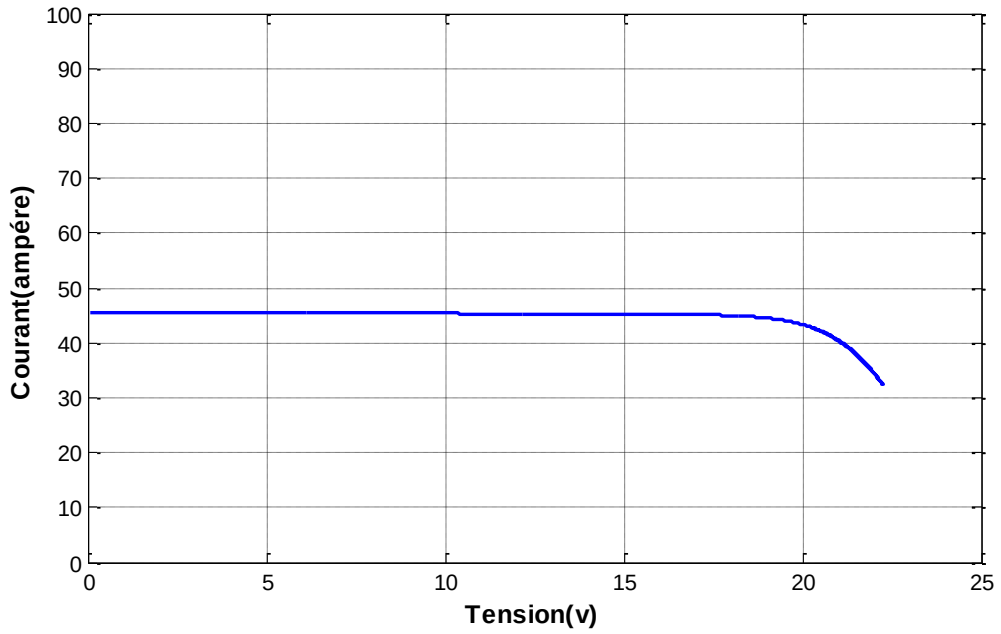


Figure (III.19) : Résultats de simulation de la valeur moyenne du courant de sortie en fonction de la tension du panneau alimenté avec l'hacheur Boost.

La **Figure (III.20)** représente la courbe de la puissance en fonction de la tension. On peut remarquer que le contrôleur « P and O » recherche le point de puissance maximal MPPT.

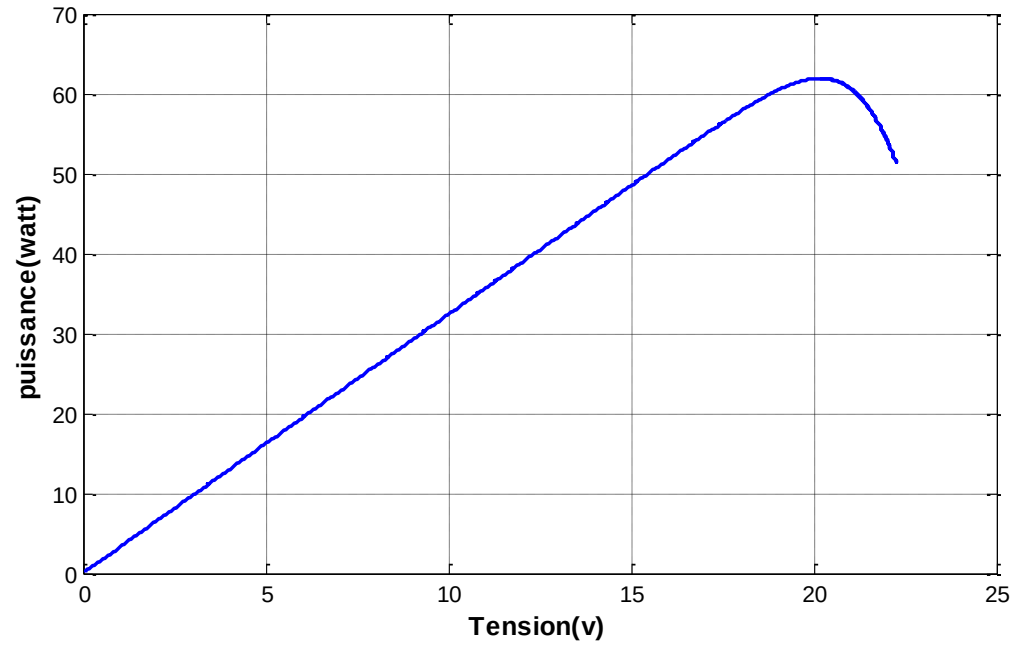


Figure (III.20) : Résultats de simulation de la valeur de la puissance de sortie en fonction de la tension du panneau alimenté avec l'hacheur Boost.

On note alors que pour le bon fonctionnement du panneau PV le point de puissance maximale doit atteindre une puissance P≈60W, et I≈45.6A.

III.8. Simulation de l'hacheur Buck

Les résultats de simulation du convertisseur Buck représentent par les figures Suivants.

Ces figures représentent la tensions de sortie de de l'hacheur et d'un panneau solaire ainsi le courant et puissance de temps . Ces résultats montrent que la tension de sortie d'hacheur élévateur est inferieur à celle de panneau.

La Figure (III.21) représente la courbe de la puissance en fonction du temps de panneau et la sortie d'hacheur. On peut remarquer que le contrôleur « P and O » recherche le point de puissance maximale et quand il l'atteint garde cette valeur et on a même courbe par rapport la sortie de panneau.

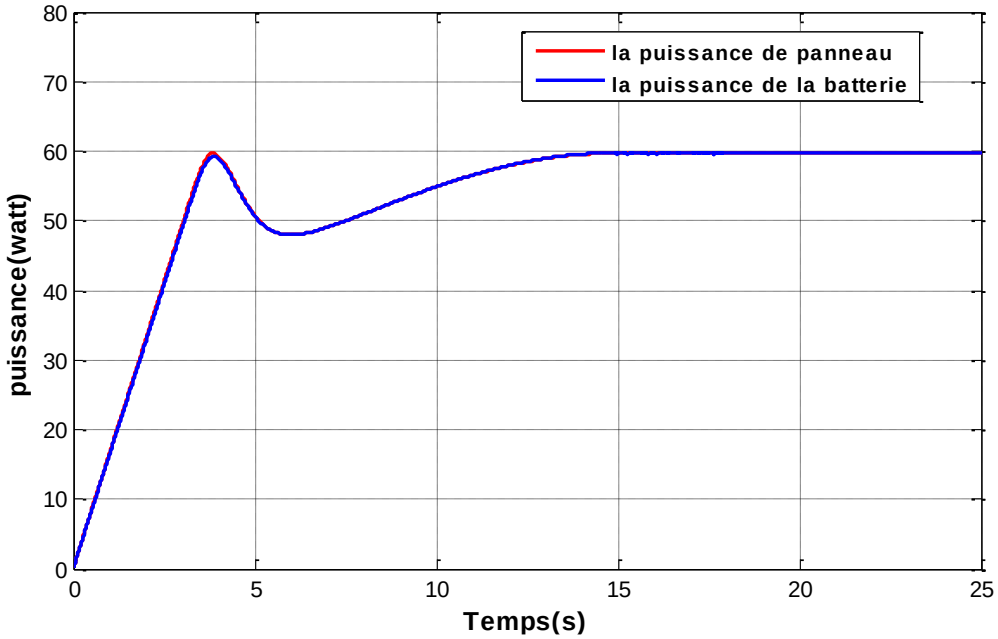


Figure (III.21) : Résultats de simulation de la puissance de sortie de l'hacheur Buck et du panneau solaire.

La figure (III.22) représente la courbe du courant en fonction du temps avec la sortie de panneau solaire et la sortie d hacheur. On remarque que le courant chute d'hacheur puis reprend sa valeur *Impp* et cela se produit grâce au contrôleur « P and O »et il est supérieur par rapport la sortie de panneau.

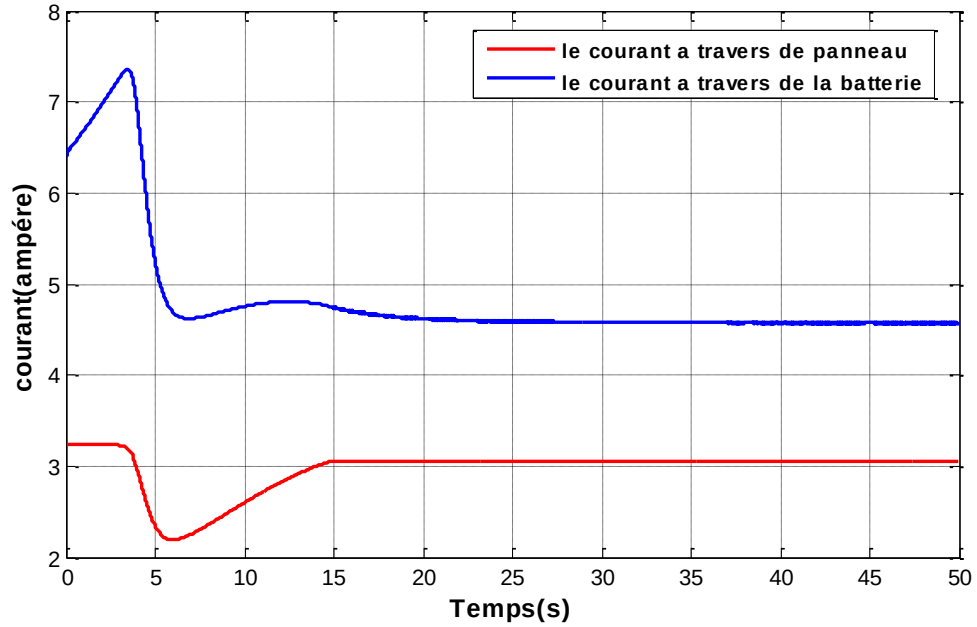


Figure (III.22) : Résultats de simulation de la valeur moyenne du courant de sortie de L'hacheur Buck et du panneau solaire.

La Figure (III.23) représente la courbe de la tension en fonction du temps. On remarque que le contrôleur « P and O » cherche la valeur *Vmpp* et que la tension de sortie d'hacheur reste constante à cette valeur et inferieur par rapport le panneau solaire.

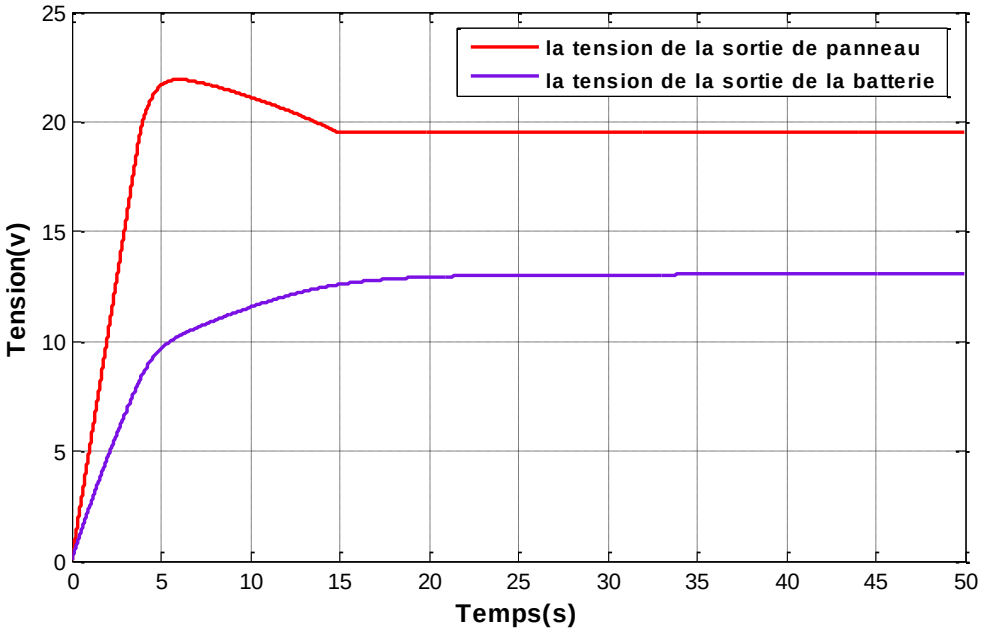


Figure (III.23) : Résultats de simulation de la valeur moyenne de la tension de sortie de l'hacheur Buck et le panneau solaire.

La Figure (III.25) représente la courbe de la puissance en fonction de la tension. On peut remarquer que le contrôleur « P and O » recherche le point de puissance maximal MPPT.

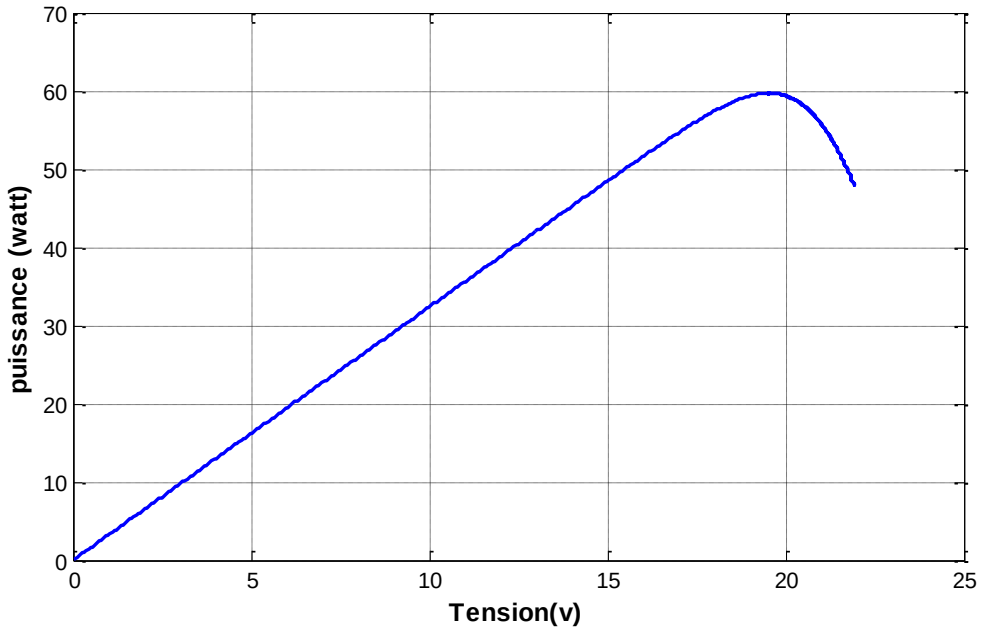


Figure (III.24) : Résultats de simulation de la valeur de la puissance de sortie en fonction de la tension du panneau alimenté avec hacheur Buck.

La Figure (III.26) montre l'évolution du courant en fonction de la tension avec le système « P and O » de l'hacheur buck.

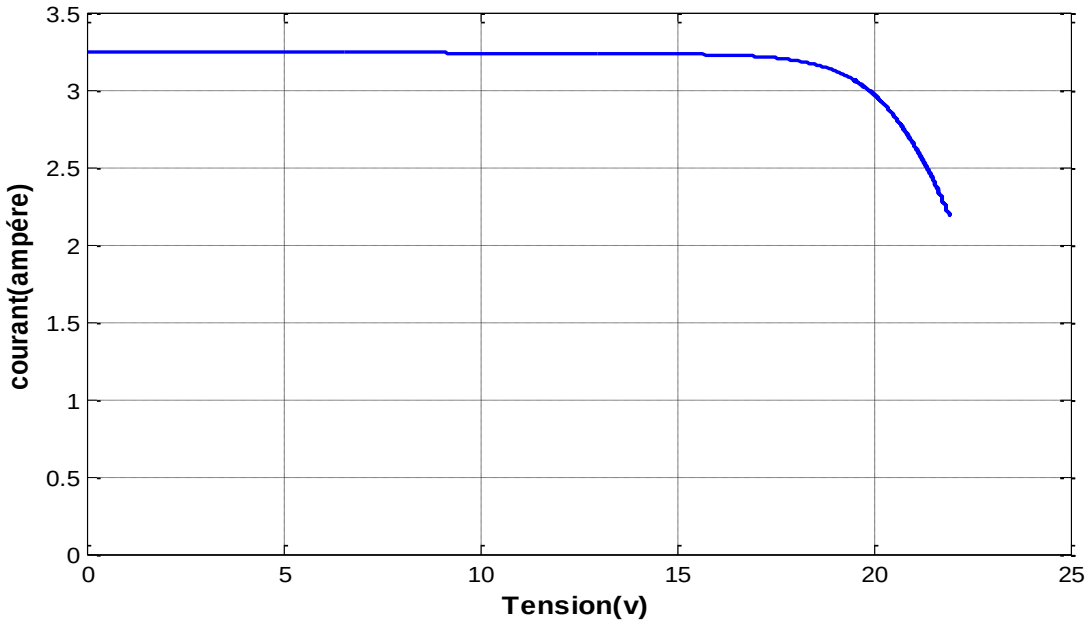


Figure (III.25) : Résultats de simulation de la valeur de la puissance de sortie en fonction de la tension du panneau alimenté avec hacheur Buck.

On note alors que pour le bon fonctionnement du panneau PV le point de puissance maximale doit atteindre une puissance P≈60W, et I≈3.25A

III.9. Simulation de hacheur BUCK-BOOST

Les résultats de simulation du convertisseur (abaisseur-élévateur) représentent par les figures Suivants.

Ces figures représentent la tension de sortie de l'hacheur et d'un panneau solaire ainsi le courant et puissance de temps. Ces résultats montrent que la tension de sortie d'hacheur (abaisseur-élévateur) est inferieur et négative à celle de panneau.

La Figure (III.27) représente la courbe de la puissance en fonction du temps de panneau et la sortie d'hacheur. On peut remarquer que le contrôleur « P and O » recherche le point de puissance maximale et quand il l'atteint garde cette valeur et on a même courbe par rapport la sortie de panneau c'est presque 60 Watt.

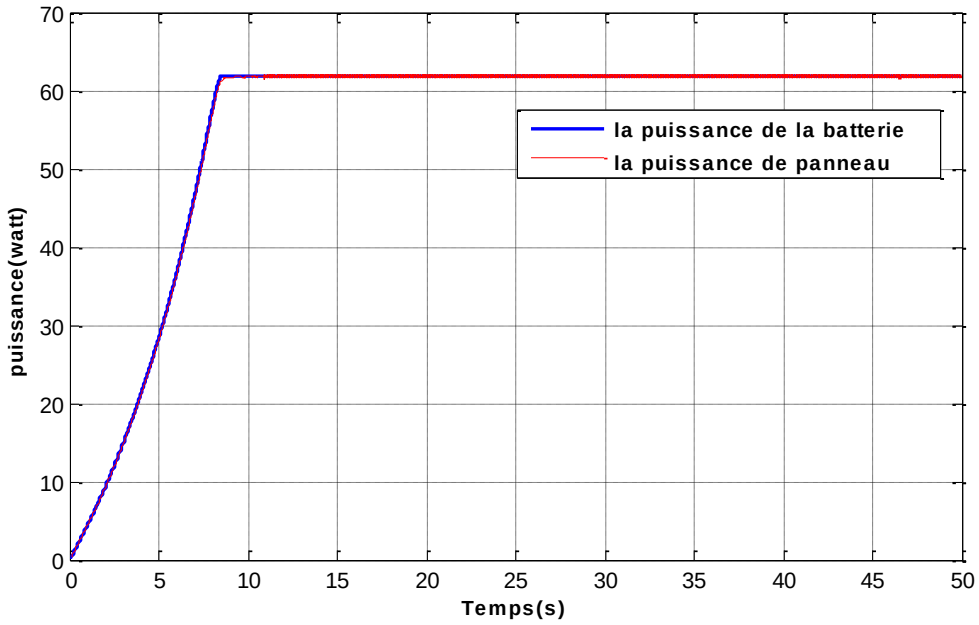


Figure (III.26) : Résultats de simulation de la puissance de sortie de l'hacheur (élévateur- abaisseur) et du panneau solaire.

La figure (III.28) représente la courbe du courant en fonction du temps avec la sortie de panneau solaire et la sortie de hacheur. On remarque que le courant chute d'hacheur buck boost puis reprend sa valeur *Impp* et cela se produit grâce au contrôleur « P and O »et il est inferieur de 0 par rapport la sortie de panneau il est stabilisé a 3 ampère.

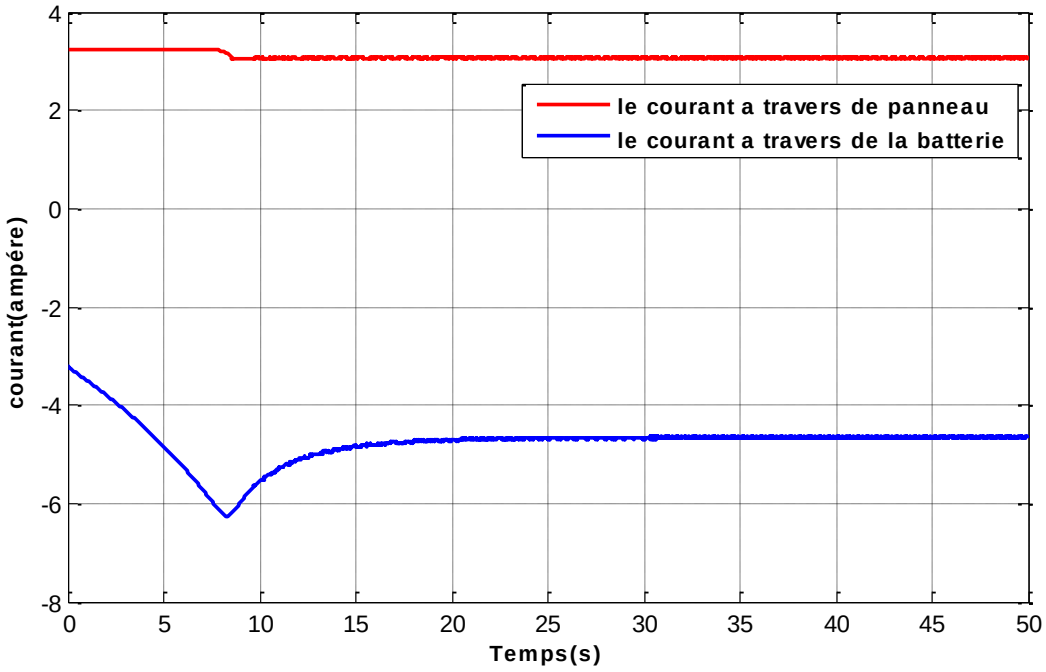


Figure (III.27) : Résultats de simulation de la valeur moyenne du courant de sortie de l'hacheur (élévateur- abaisseur) et du panneau.

La Figure (III.29) représente la courbe de la tension en fonction du temps. On remarque que le contrôleur « P and O » cherche la valeur *Vmpp* et que la tension de sortie de panneau reste constante à 20 V cette valeur et supérieur par rapport l hacheur buck-boost il est inferieur et la valeur négative de la tension.

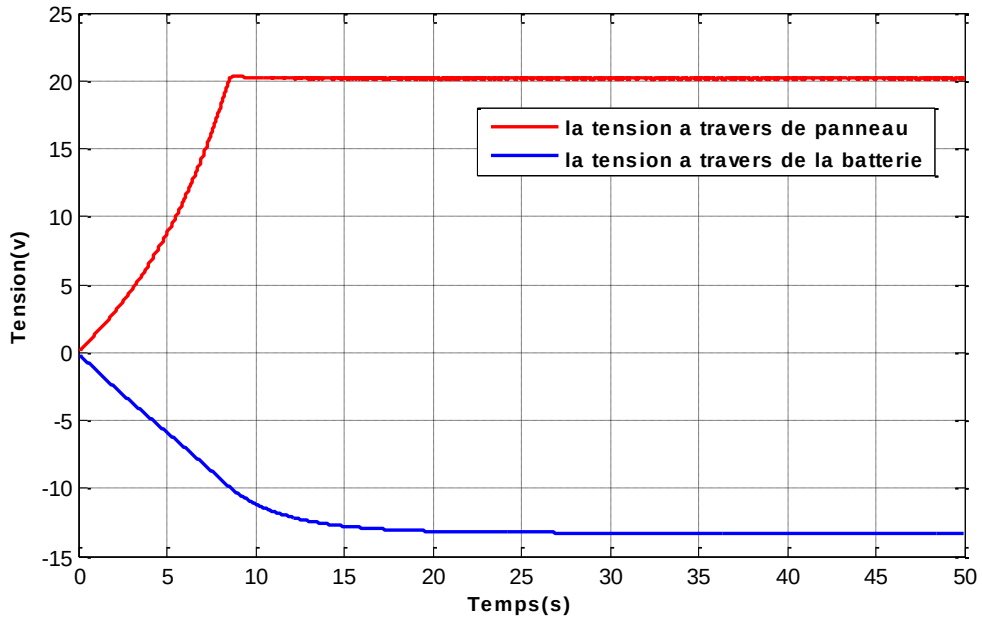


Figure (III.28) : Résultats de simulation de la valeur moyenne de la tension de sortie de L'hacheur buck-boost et du panneau solaire.

La Figure (III.30) représente la courbe de la puissance en fonction de la tension. On peut remarquer que le contrôleur « P and O » recherche le point de puissance maximal MPPT.

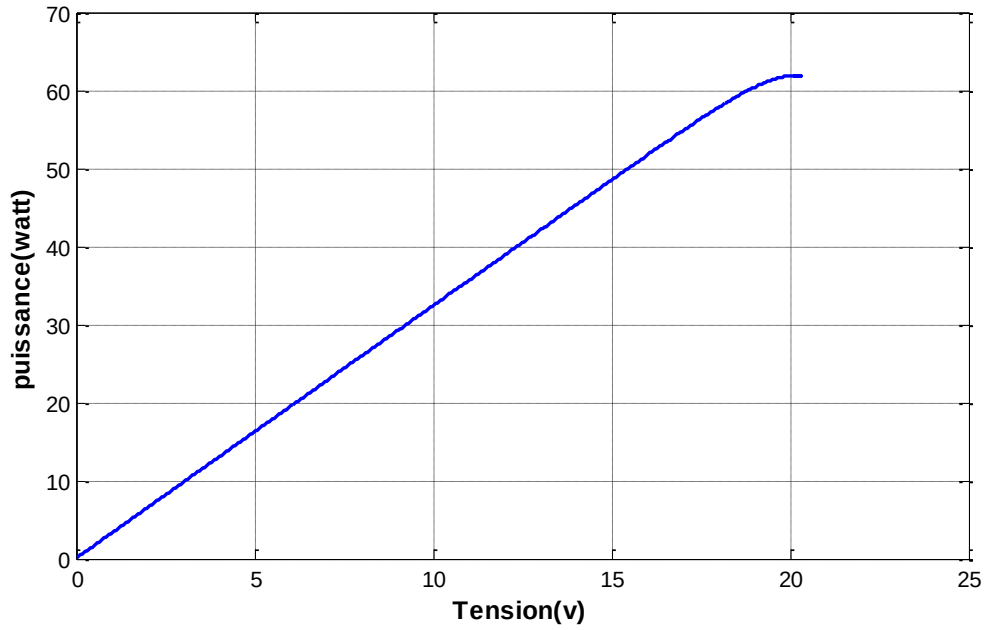


Figure (III.29) : Résultats de simulation de la valeur de la puissance de sortie en fonction de la tension du panneau alimenté avec l'hacheur Buck-boost.

Figure (III.31) montre l'évolution du courant en fonction de la tension avec le système «P and O» d'hacheur buck-boost.

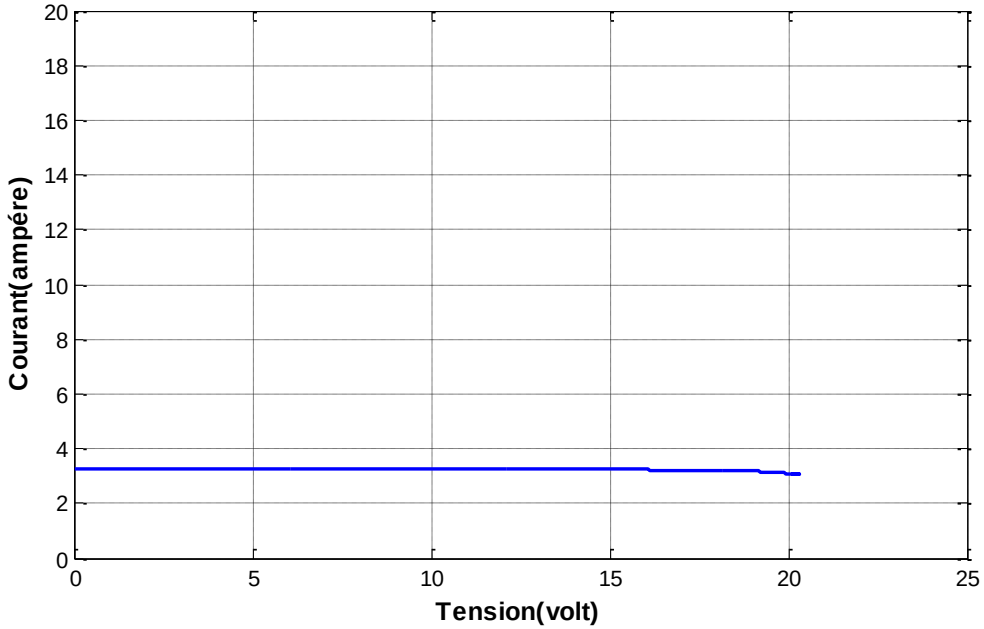


Figure (III.30) : Résultats de simulation de la valeur moyenne du courant de sortie en fonction de la tension du hacheur Buck boost.

On note alors que pour le bon fonctionnement du panneau PV le point de puissance maximale doit atteindre une puissance P≈60W, et I≈3.25A.

III.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons entamé la partie la plus importante de cette étude. Il s'agit de présenter les convertisseurs Comme le convertisseur élévateur, convertisseur abaisseur et convertisseur (abaisseur-élévateur). Tout en donnant les différents types des hacheurs avec un rappelle théorique sur chaque type.

On a exposé quelques topologies de base des ces convertisseurs continus continus.et la fin de chapitre en exprime tout les résultats de simulations des trois types d'hacheurs (Boost, buck et buck-boost).

Chapitre IV Modélisation et Simulation d'un Système PV avec logiciel Proteus

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre qui consacré à la simulation du système PV, nous présentons les étapes de simulation du hacheur BOOST en commençant par le circuit électrique et après des composant électronique. Ensuite, nous présentons la carte Arduino UNO qui utilisée dans ce travail. Ainsi, on présente les différents composants du système, tel que le module BP MSX 60, le capteur de courant et le capteur de tension. Enfin, nous faisons et des tests pratiques du système PV.

IV.2. Circuit électrique de hacheur survolteur (Boost)

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension. Le schéma de la figure (IV.1), représente le circuit électrique du Boost. Au premier temps (αT), le transistor (S) est fermé, le courant dans l'inductance croit progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin du premier intervalle. Ensuite, le transistor (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposant à la diminution de courant (IL), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D) **[39]**.

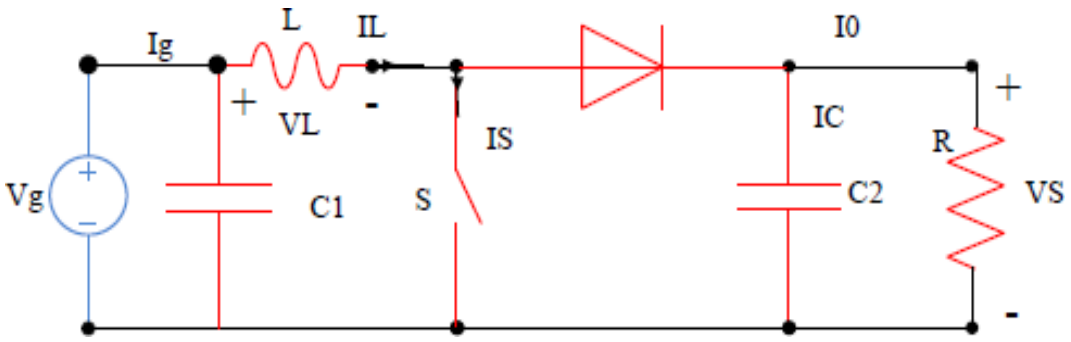


Figure IV.1 : Circuit électrique de base du hacheur survolteur.

IV.3. Carte Arduino UNO

Arduino est un circuit imprime en matériel libre sur lequel se trouve un microcontrôleur qui peut être programme pour analyser et produire des signaux électriques, de manière a effectué des taches très diverses. Le système Arduino donne la possibilité d'allier les performances de la programmation à celles de l'électronique. Plus précisément, pour programmer des systèmes électroniques. Le gros avantage de l'électronique programmée c'est qu'elle simplifie grandement les schémas électroniques et par conséquent, le cout de la réalisation, mais aussi la charge de travail à la conception d'une carte électronique **[40]**.

Arduino est utilisé dans beaucoup d'applications comme l'électrotechnique industrielle et embarquée ; le modélisme, la domotique mais aussi dans des domaines différents comme l'art contemporain et le pilotage d'un robot, commande des moteurs et faire des jeux de lumières, communiquer avec l'ordinateur, commander des appareils mobiles (modélisme) **[41]**.

Le modèle UNO est une carte électronique basé sur le microcontrôleur ATMEL de référence ATMega328. L'ATMega328 est un microcontrôleur 8 bits de la famille AVR. La programmation peut être réalisée en langage C/C++ [31]. Le modèle UNO contient (14-20) entrées/sorties (dont 6 fournissent la sortie PWM), 6 entrées analogiques, un cristal à 16 MHz, une connexion USB, une prise jack d'alimentation, un en-tête ICSP et une fonction reset **[42]**.

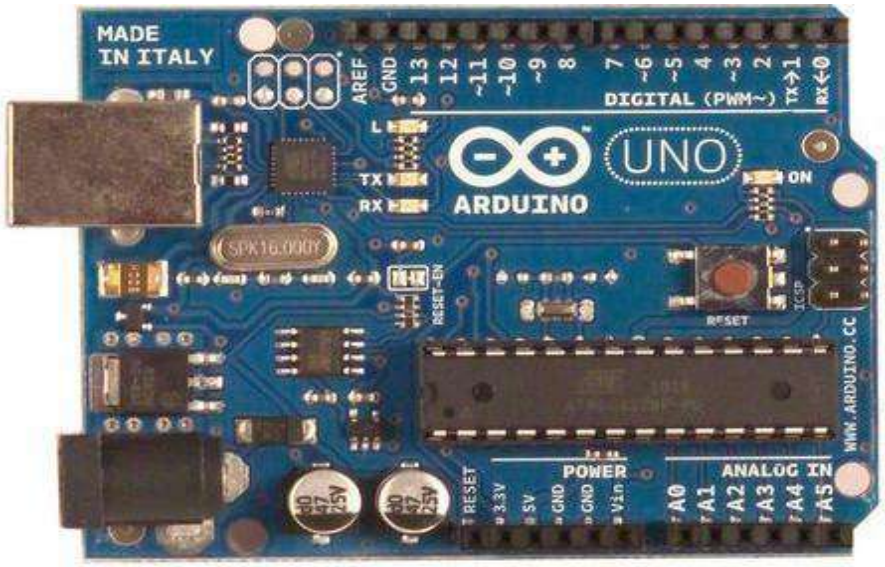


Figure IV.2 : Carte Arduino UNO**.**

IV.4. Module BP MSX 60

Dans notre réalisation, nous utilisons un module PV du type photovoltaïque BP MSX 60. Ce module PV est en silicium Multicrystalline et constitué de 36 cellules PV élémentaires. Il est fabriqué par le constructeur Rienland. Il peut délivrer dans les conditions standards de test (CST) une puissance de 60 W, un courant de 3.5A sous une tension optimale de 17.1V. Les caractéristiques électriques de ce module PV sont :

- Puissance maximale (P_{max}) : 60Wc,
- Tolérance de puissance : ± 5%,
- Courant à P_{max} (I_{mp}) : 3.5 A,

- Tension à P_{max} (V_{mp}) : 17.1 V,
- Courant en court circuit (I_{sc}) : 3.8 A,
- Tension en circuit ouvert (V_{oc}) : 21.1 V.

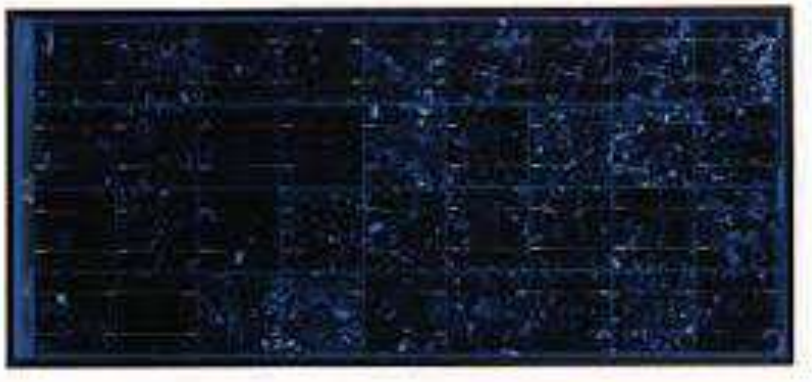


Figure IV.3 : Module BP MSX 60.

IV.5. Capteur de courant AC712

Le dispositif ACS712 Allegro offre un moyen économique et précis de détection de courants AC et DC. Ce capteur de courant Allegro ACS712 est basée sur le principe de l'effet Hall, qui a été découvert par le Dr Edwin Hall en 1879 selon ce principe, quand un conducteur de courant est placé dans un champ magnétique déposé, une tension est générée sur ses bords perpendiculaires à la direction à la fois du courant et du champ magnétique.

La sortie du dispositif a une pente positive lorsqu'un courant augmentant circule à travers le chemin de conduction de cuivre. Le ACS712ELC-05A peut mesurer le courant jusqu'à ± 5A et fournit la sensibilité de sortie de 185 mV/A (à+5V) **[43]**.

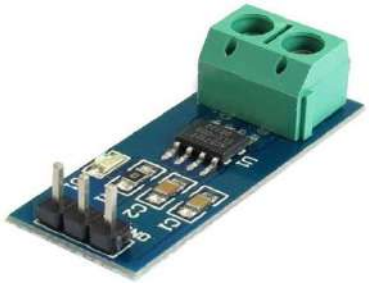


Figure IV.4 : Capteur de courant ACS712.

IV.6. Capteur de tension

Ce module est basé sur la division de tension par pont diviseur de rapport 1/5. Ce module possède 2 résistance, une de 7.5kΩ et l'autre de 30kΩ, ce qui équivalant

à un rapport de 1/5 entre la tension d'entrée et la tension de sortie.

La tension d'entrée supportée par une entrée analogique de l'Arduino ne peut pas dépasser 5V et donc la tension appliquée sur les bornes d'entrée ne peut pas dépasser 25V **[44]**.

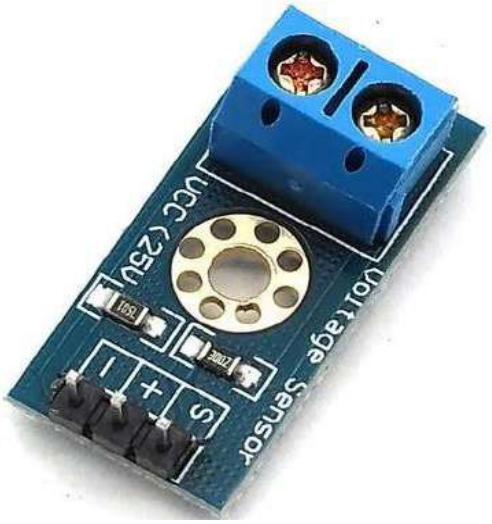


Figure IV.5 : Capteur de tension.

IV.7. Simulation de système PV

Basent sur le circuit équivalant de la cellule solaire en cas d'une cellule réelle, nous avons fait construire un bloc de simulation sous logiciel « Proteus » (par ISIS). Figure (IV.6).

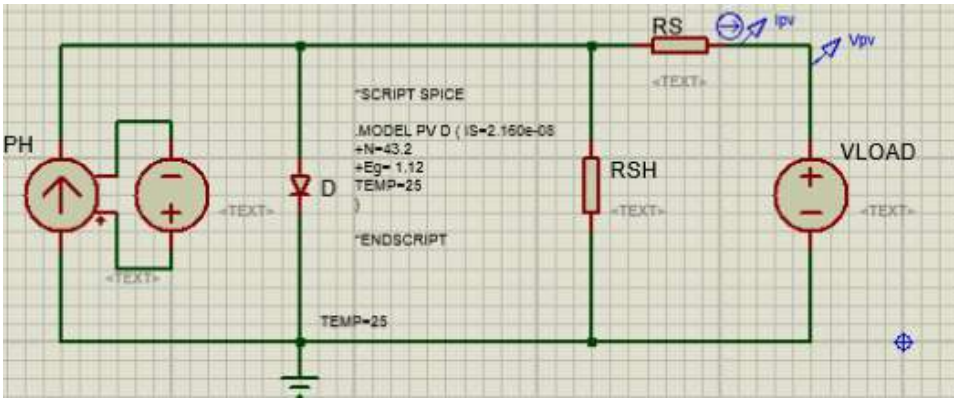


Figure IV.6 : Bloc de simulation de cellule solaire.

Et à l'aide de circuit électrique de base du hacheur Boost. Nous avons fait un bloc de simulation du hacheur (partie puissance+partie commande). (Figure (IV.7)). Dans la partie commande, nous avons utilisé le driver « IR2104».

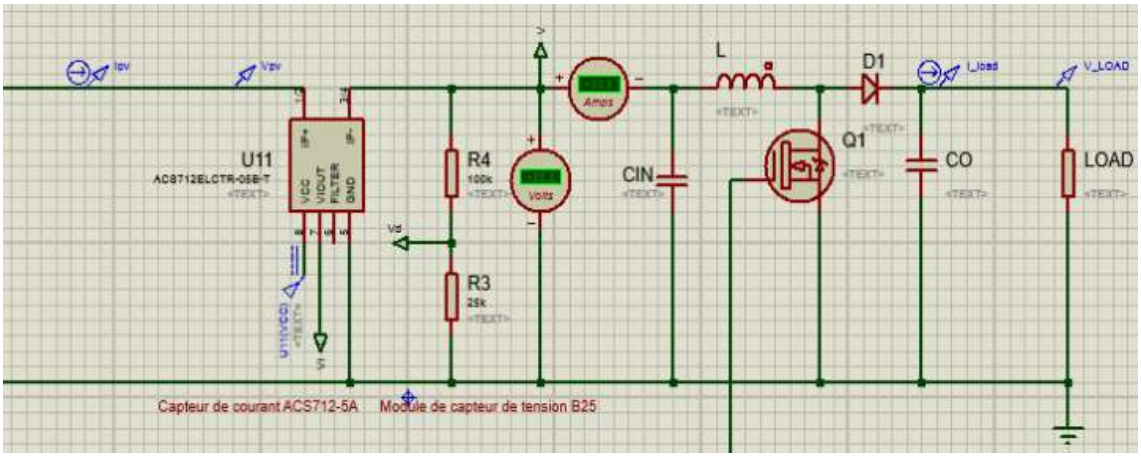


Figure IV.7 : Bloc de simulation du hacheur.

Concernant les valeurs des composants du hacheur (l'inductance et le condensateur), nous avons fait le dimensionnement de ces composants débondement des équations dans les sections (IV. 12)(IV.17) du chapitre (III).

De l'équation (IV.1), on trouve :

$$C \geq \frac{a_{max}.V_S}{R.\Delta V_S.f} \qquad (\mathbf{IV.1})$$

Nous avons chargé l'algorithme de la commande MPPT « P&O » au microcontrôleur « Arduino UNO». Les entrés de l'Arduino sont raccordés avec un capteur de courant et un diviseur de tension (capteur de tension).La charge est une résistance La simulation globale de système PV est représentée sur la figure (IV.8).

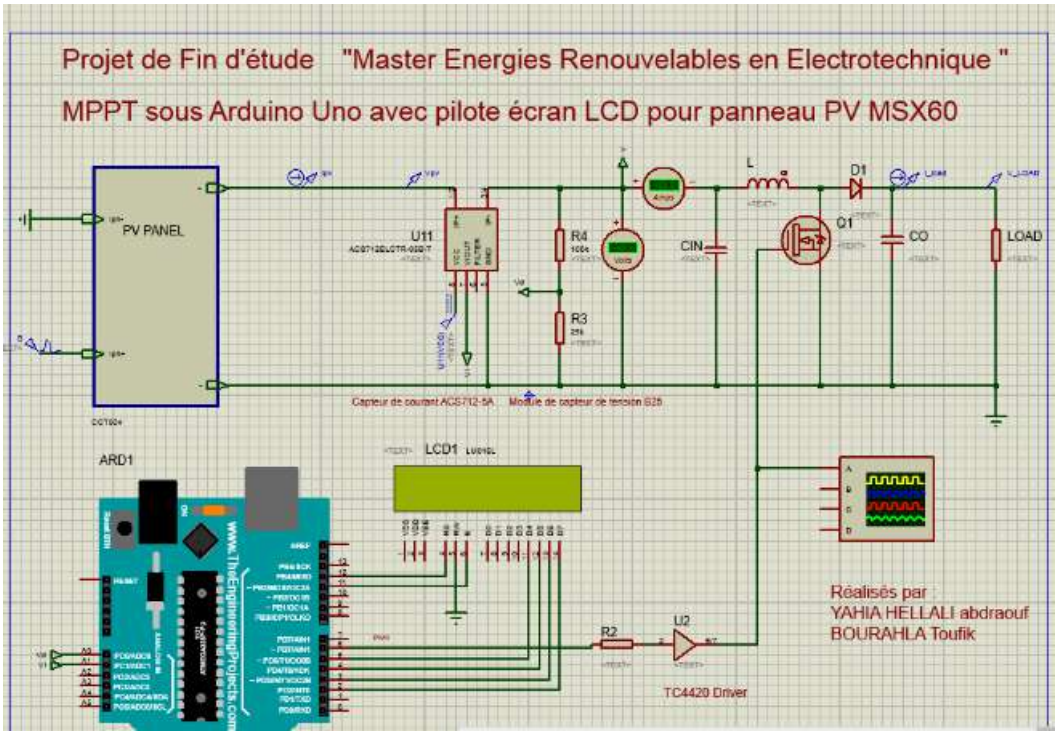


Figure IV.8 : Schéma bloc de simulation de système PV raccordé avec l'hacheur boost.

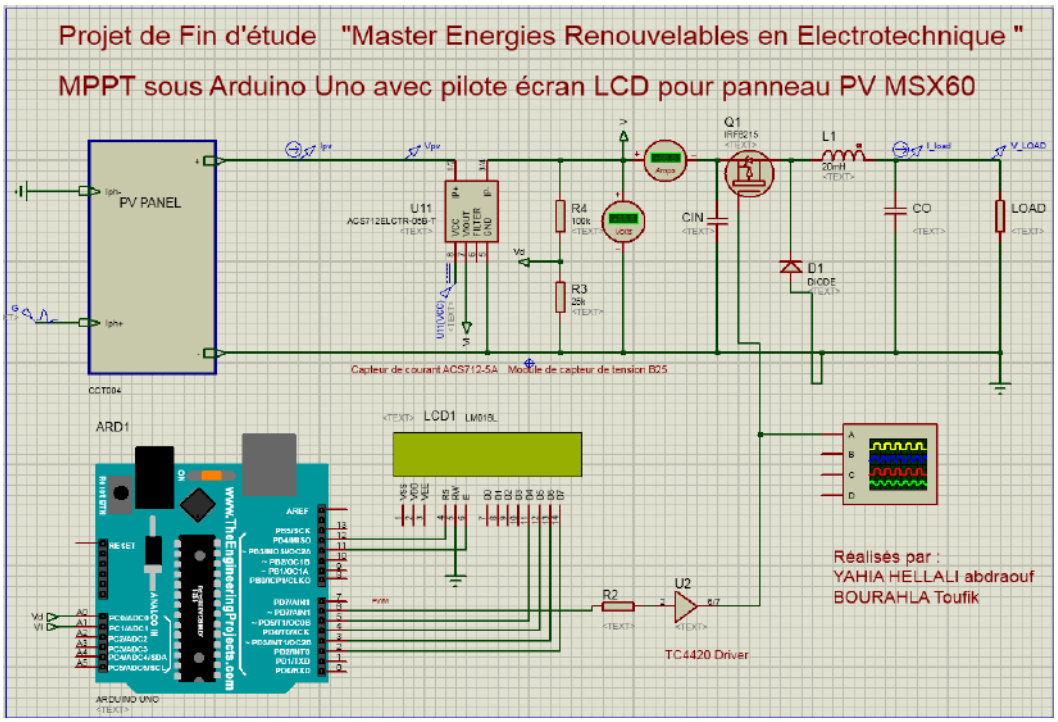


Figure IV.9 : Schéma bloc de simulation de système PV avec l'hacheur buck.

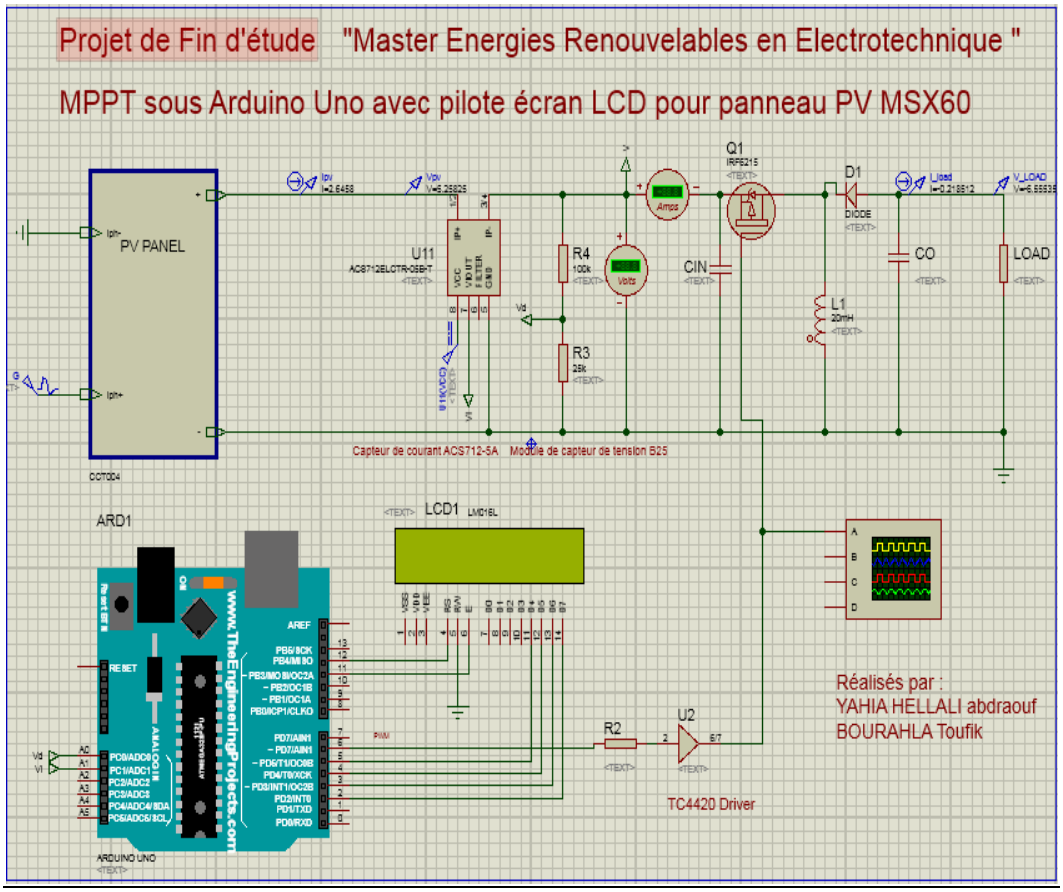


Figure IV.10 : Schéma bloc de simulation de système PV avec l'hacheur buck boost .

IV.8. Résultats de la simulation

Les figures montrent l'évolution de la puissance de sortie des trois types d'hacheur et la sortie du panneau. Par ailleurs, les figures représentent la tension, le courant et la puissance. Et on a comparé les simulations par logiciel (PROTEUS) avec les simulations par logiciel (MATLAB).

IV.8.1. Simulation de hacheur Boost

Les Figures (V.12) à (V.14) représentent les résultats simulés de tension, de puissance et du courant du système PV avec hacheur Boost pour une charge résistive de 30Ω par l'algorithme « P&O ».

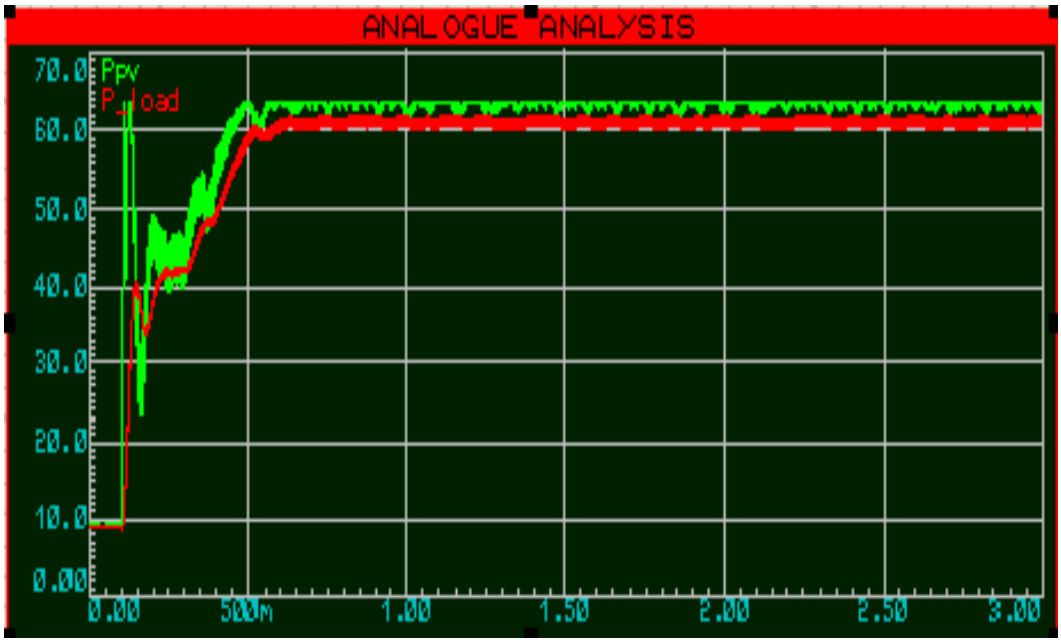


Figure (IV.11) : Résultats de simulation de la puissance de sortie du hacheur Boost et le panneau par logiciel PROTEUS.

Nous remarquons que la puissance augmente jusqu'elle atteint une valeur maximal de 65 W par rapport le hacheur il est 60 W. C'est le fait de la commande MPPT.

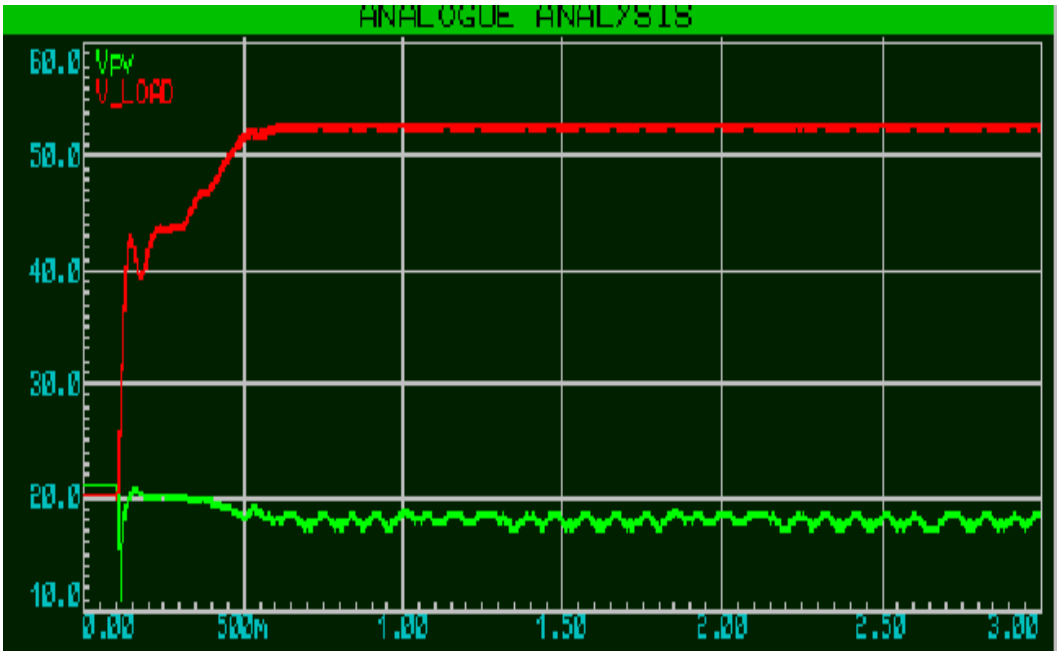


Figure (IV.12) : Résultats de simulation de la valeur moyenne de la tension de sortie du hacheur boost et le panneau par logiciel PROTEUS.

On remarque que la tension stabilise à une valeur de 53 V pour hacheur Boost et la valeur de panneau solaire de 17 V.

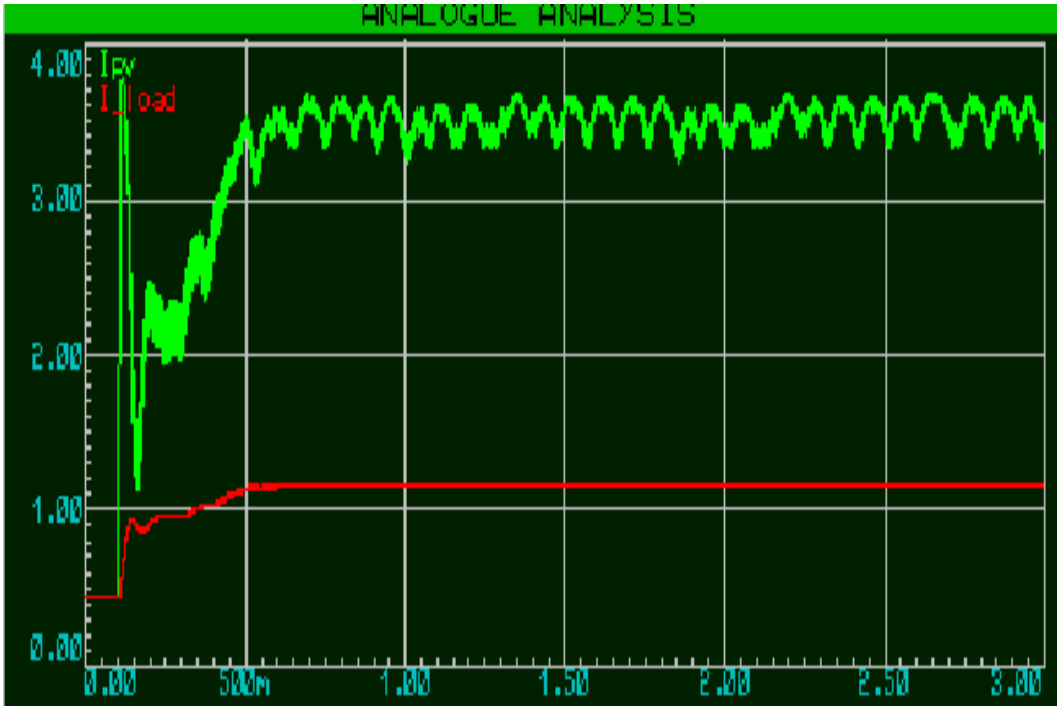


Figure (IV.13) : Résultats de simulation de la valeur moyenne du courant de sortie du hacheur boost et le panneau par logiciel PROTEUS.

IV.8.2 Simulation de hacheur Buck

Les Figures (V.16) à (V.18) représentent les résultats simulés de tension, de puissance et de courant du système PV et hacheur Boost pour une charge résistive de 30Ω par l'algorithme « P&O ».

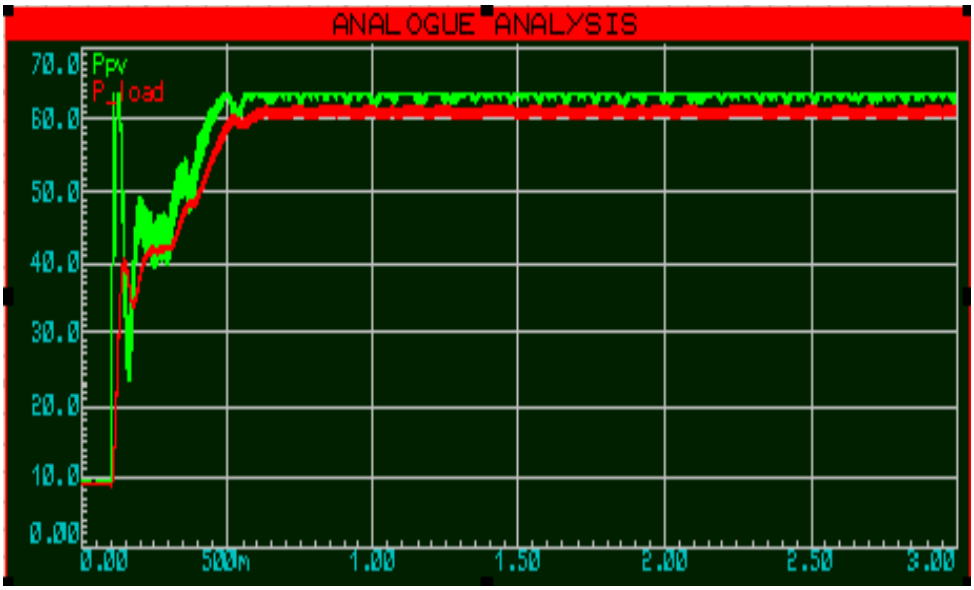


Figure (IV.14) : Résultats de simulation de la puissance de sortie du hacheur Buck et le panneau par logiciel PROTEUS.

Nous remarquons que la puissance stabilisée jusqu'elle atteint une valeur maximale de 17 W pour les deux objets.

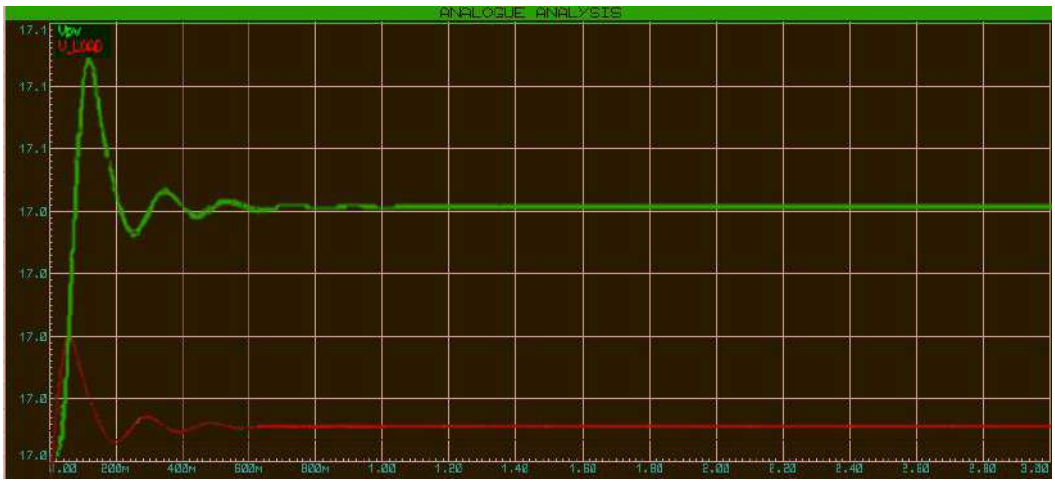


Figure (IV.15) : Résultats de simulation de la valeur moyenne de la tension de sortie du hacheur Buck et le panneau par logiciel PROTEUS.

On remarque que la tension pour les deux stabilise à une valeur 21 V.

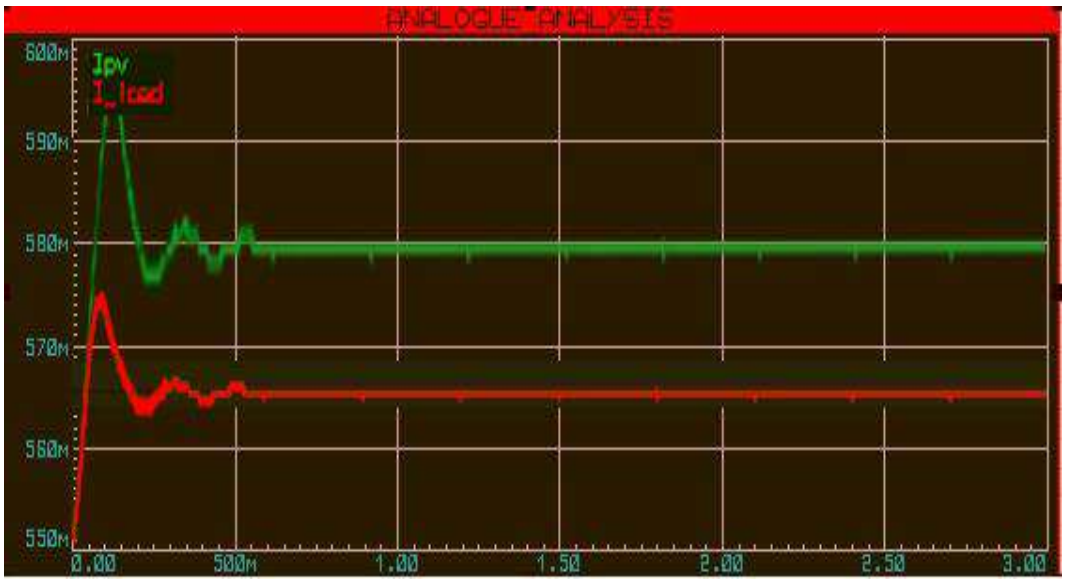


Figure (IV.16) : Résultats de simulation de la valeur moyenne du courant de sortie du hacheur Buck et le panneau par logiciel PROTEUS.

On remarque que le courant stabilise à une valeur de 0.8 A pour hacheur Boost et le panneau solaire.

IV.8.3 Simulation de hacheur Buck-Boost

Nous avons utilisé algorithmes MPPT Perturbation Et Observation « P&O».

Les Figures (V.20) à (V.22) représentent les résultats simulés de tension, puissance et de courant du système PV et hacheur buck-boost pour une charge résistive de 30Ω par l'algorithme « P&O ».

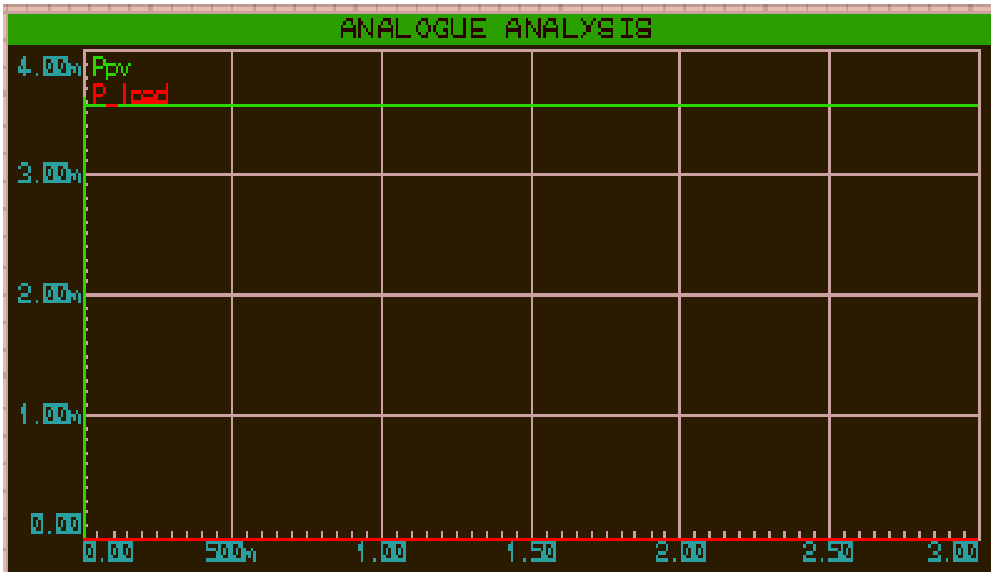


Figure (IV.17) : Résultats de simulation de la puissance de sortie du hacheur Buck-Boost et le panneau par logiciel PROTEUS

Nous remarquons que la puissance stabilisée jusqu'elle atteint une valeur maximale de 3.55 W pour hacheur buck-boost et le panneau solaire.

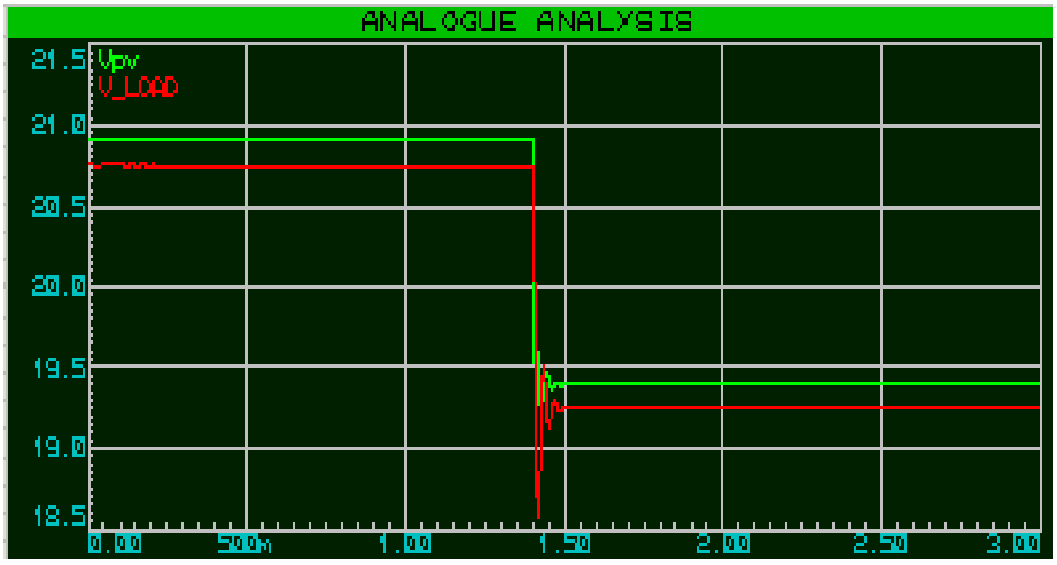


Figure (IV.18) : Résultats de simulation de la valeur moyenne du tension de sortie du hacheur Buck-boost et le panneau par logiciel PROTEUS.

On remarque que la tension pour hacheur buck-boost a 19.25 V par rapport le panneau stabilise à une valeur 19.4 V.

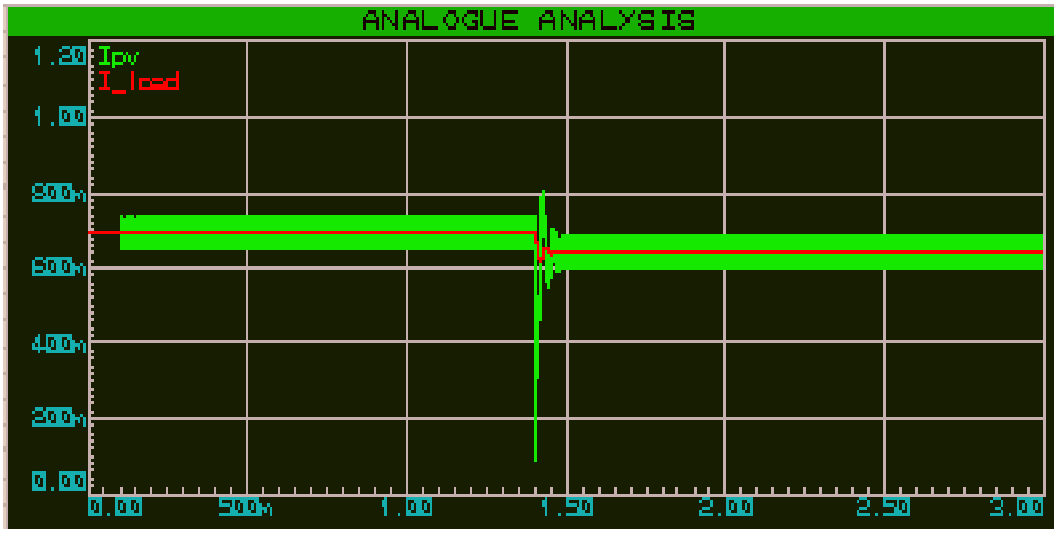


Figure (IV.19) : Résultats de simulation de la valeur moyenne du courant de sortie du hacheur Buck-Boost et le panneau par logiciel proteus

On remarque que le courant stabilise à une valeur de 0.7A pour hacheur Buck-Boost par rapport le panneau la valeur c'est 0.7 A ms le graphe n'est pas stabilisé à cette valeur exact.

IV.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé premièrement un hacheur boost, buck et buck-boost. Puis, un système photovoltaïque. Nous avons présenté la carte Arduino UNO qui utilisée dans ce travail. Ensuite, nous avons cité les différents composants du système, tel que le module MSX 60, le capteur de courant et le capteur de tension. Enfin, nous avons fait des tests sur le système PV par LA méthodes de la commande MPPT : « P&O » et en a exprimé les résultats de simulations par les logiciels (proteus).

Les résultats de tests montrent que le système PV transfert la puissance maximale fournie par le module PV à la charge. Les algorithmes donnent les résultats des trois types d'hacheur.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire, on s'est intéressé à l'étude et la simulation d'un hacheur Boost commandé par le microcontrôleur Arduino Uno en vue d'implémenter des commandes MPPT.

Dans le premier chapitre, nous avons rappelé des définitions générales sur le rayonnement solaire (caractéristique des rayonnements solaires, les coordonnées terrestres) et nous avons aussi rappelé quelques éléments de géométrie, les différents types de rayonnement, nous avons terminé par des définitions sur les notions de flux, l'intensité lumineuse, et l'éclairement.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïques. Nous avons démontré le fonctionnement de la cellule photovoltaïque ainsi que ces types. Ensuite, nous avons présenté la structure et les influences des panneaux photovoltaïques plus les différents types de systèmes photovoltaïques pour l'habitat. Enfin, nous avons présenté avantages et les inconvénients et la Configuration des systèmes photovoltaïques.

Au troisième chapitre, nous avons présenté le principe de la recherche du point de puissance maximale « MPPT » ainsi que ces différentes méthodes (algorithmes) rencontrées le plus souvent dans la littérature. Enfin, nous avons donné une étude comparative entre les techniques de commande MPPT classique « Perturbe & Observe » et «Incrément des conductances».

Dans le quatrième chapitre, une description théorique sur les hacheurs tout en donnant leurs différents types été présenté. Ensuite, nous avons présenté le circuit électrique du hacheur Boost qu'il est utilisé dans ce mémoire.

Le cinquième chapitre, nous avons présenté la simulation de système PV sous logiciel « Proteus ». Nous avons présenté la carte Arduino UNO qui utilisée dans ce travail.

Comme perspective, nous proposons à la prochaine génération de l'université de Médéa, de réaliser pratiquement à l'aide des résultats que nous avons obtenu. Malheureusement, nous n'avons pas pu faire ça à cause de la pandémie du Coronavirus de Covide-19.

Référence Bibliographie

Bibliographie

[1] BARKA Nour-Eddine, '' Amélioration des Performances de Contrôle D'un Système Photovoltaïque par les Méthodes Métaheuristques'', Mémoire de Magistère, Université d'El-oued, 2013.

[2] M. GUENOUNOU Abderrezak, « Mise au point de nouveaux procédés de mesure des caractéristiques directe et inverse des modules photovoltaïques de différents technologies », Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, 2009.

[3] Tan YT, Kirschen DS, Jenkins N. "A model of PV generation suitable for stability analysis". IEEE Transactions on Energy Conversion 2004; 19(4): 748–755.

[4] A. Cid-Pastor, "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques", l'institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2006.

[5] S. Alem-Boudjemline, "Réalisation et caractérisation des cellules Photovoltaïques plastiques", thèse de doctorat, université d'Angers, 2004.

[6] S. Berson, "Synthèse, caractérisation et nano structuration de dérivés de la photo poly thiophène pour des applications en cellules photovoltaïques organiques", thèse de doctorat, l'université Joseph Fourier – Grenoble I, 2007.

[7] Nema, S., Nema, R. K., & Agnihotri, G. (2010). Matlab/simulink based study of photovoltaic cells/modules/array and their experimental verification. International journal of Energy and Environment, 1(3), 487-500.

[8] H. Can, D. Ickilli and K. S. Parlak '' A New Numerical Solution Approach for the Real-Time Modeling of Photovoltaic Panels '', Power and Energy Engineering Conference Asia-Pacific, pp. 1-4, March 2012.

[9] M. Park and I. Yu, ''A Study on the Optimal Voltage for MPPT obtained by Surface Temperature of Solar Cell '', The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, November 2004.

[10] http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16696

[11] K.TABET «Etude, Modélisation et optimisation des systèmes Photovoltaïques ». Mémoire de Magister (2011).

[12] A. LABOURET, M. VILLOZ, Energie solaire photovoltaïque, 3ème édition, DUNOD, Paris, (2006).

[13] FEDDAOUI Omar «Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération: Application aux Energies Renouvelables». Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université de Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras2014, page.59.62.65

[14] M.LOPEZ , <<Contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolienne pour une unité de production isolée >> , thèse de doctorat université PARIS SUD11,(2008)

[15] YAEL, THIBAUT , thèse doctorat , « optimisation des profils de consommation pour minimiser les couts économique et énergétique sur cycle de vie des systèmes photovoltaïques autonomes et hybrides évaluation du potentiel de la technologie Li-ion », Ecole Normale Supérieure De Cachan ,(2010).

[16] M. L. Louazene, « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla », Mémoire de Magister, Université El Hadj Lakhdar, Batna, Algérie, 2008.

[17] Aamarouayache Mohamed, « contribution à l'optimisation d"une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque », thèse de doctorat en sciences en électrotechnique option ,2014.

[18] J. Ferrieux, f. Forest, « alimentations a découpage convertisseurs a résonance: principes composants modélisation ». Paris, France: Dunod, 1999.

[19] Angel Cid Pastor, "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques", thèse de Doctorat : Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse 2008.

[20] M. Boukli-Hacene Omar « conception et réalisation d"une génération photovoltaïque muni d"un convertisseur mppt pour une meilleure gestion énergétique » magister en automatique productique informatique 2010/2011.

[21] A. F. Boehinger, "Self-adaptive DC converter for solar spacecraft power supply", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1968, pp. 102-111.

[22] J.B.R. Enslin, M.S. Wolf, D.B. Snyman, W. Swiegers, "Integrated photovoltaic maximum power point tracking converter", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 44 (6), Dec. 1997, pp.769 -773.

[23] H. Al-Atrash, I. Batarseh, K. Rustom, "Statistical modeling of DSP-based hill-climbing MPPT algorithms in noisy environments", Conference and Exposition in Twentieth Annual IEEE Conference in Applied Power Electronics, APEC 2005,vol. 3, pp. 1773–1777.

[23] W. Xiao, W. Dunford, "A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems", IEEE 35th annual Conference in Power electronics specialists, PESC 04. 2004, vol. 3, pp. 1957–1963.

[24] T. Tafticht, "Analyse Et Commande D'un Système Hybride Photovoltaique Eolien", Thèse de Doctorat de L'université Du Québec A Trois-Rivières (Canada), décembre 2006.

[25] K. H. Hussein, I. Muta, T. Hshino, and M. Osakada, "Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions", Proc. Inst.Elect. Eng. vol. 142, n°.1, Jan. 1995, pp. 59-64.

[26] R. CHAPARDE 'Commande électronique des machines a courant continue' Eyrolles 1975.

[27] M.H. Rashid, "Power Electronics Handbook", Academic Press, 2001.

[28] M. Biswal, "Control Techniques for DC-DC Buck Converter with Improved Performance", Master Thesis, National Institute of Technology, Rourkela, March 2011.

[29] C. Chabert and A. Rufer, "Optimisation des Convertisseurs de Puissance Embarqués: Adaptation Des Cellules A Lien Alternatif MF Et Commutation Douce," 8ème Colloque Electronique de Puissance du Future, Lille, France, Novembre-Decembre 2000.

[30] V.M. Nguyen and C.Q. Lee, "Indirect Implementations of Sliding-Mode Control Law in Buck-Type Converters," in IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, vol. 1, San Jose, pp. 111-115, 1996.

[31] Henri FOCH et autres, "Electronique de Puissance", Vol. D3000 à D3233, Ed.Techniques de l'Ingénieur, 1989.

[32] A. Rufer, P. Barrade, « Cours d'électronique de puissance Conversion DC/DC », EPFL, 90 pages. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, octobre 2001.

[33] H. LEQUEU – [DIV435] – Fichier : IUT-EDP-9, 2004/2005.

[34] BENSACI Wafa, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », mémoire de master, Université de Ouargla, 2012.

[35] Seif Eddine NAFFOUTI, "Dimensionnement et commande d‟un hacheur parallèle alimenté par une source photovoltaïque", Mémoire de diplôme national d'ingénieur en Génie Electrique, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Université de Monastir, Tunisie, 2012.

[36] B. W. Williams, "Power Electronics: Devices, Drivers, Applications and Passive Components", 2 Sub-Ed, Mcgraw-Hill, 1992.

[37] Faraheddine BELKACEM, "Contribution à La Commande Des Convertisseurs DC-AC Alimenter Par Un Panneau Photovoltaïque", Thèse de Doctorat, Spécialité : Génie Électrique, Université de Picardie Jules Verne,2006.

[38] HANOUN Brahim, "Etude et réalisation d‟un hacheur Boost destiné à l‟implémentation des commandes à base DSP ", Mémoire de Master, Département de Génie Electrique, Université LARBI BEN M‟HIDI , OUM EL BOUAGHI, 2016

[39] M.Obeidi, "Commande des hacheurs MPPT par logique floue", mémoire de Magister, Ecole nationale polytechnique 2006.

[40] Arduino.odt

[41] www.arduinoHome.cc 39

[42] https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3

[43] www.openplatform.cc consulté

[44] http://e.banana-pi.fr/son-courant-lumi%C3%A8re/365-capteur-tension-25v-pour-microcotroleur-5v.html

Annexe

bp solar

BP MSX 60

60-Watt Multicrystalline Photovoltaic Module

BP Solar's MSX series is a premium line of PV modules with a 25-year performance warranty, tightly controlled electrical parameters, and labeling showing each module's tested electrical characteristics. The MSX 60 provides 60 watts of nominal maximum power, and is well-suited to traditional applications of photovoltaics such as telecommunications, remote villages and clinics, pumping, and land-based aids to navigation. Its attractive bronze-anodized frame also suits it well for architectural applications.

Proven Materials and Construction

BP Solar's quarter-century of field experience shows in every aspect of these module's construction and materials:

- 36 multicrystalline silicon solar cells configured as two 18-cell series strings;
- Cells are laminated between sheets of ethylene vinyl acetate (EVA) and high-transmissivity low-iron 3mm tempered glass;
- Frame strength exceeds requirements of certifying agencies.



Bronze Anodized Universal Frame

High-Capacity Versatile Junction Box

The junction box is raintight (IP54 rated) and accepts PG13.5 or 1/2" nominal conduit or cable fittings. Its volume (411cc, 25 cubic inches) and 6-terminal connection block enable most system array connections (putting modules in series or parallel) to be made right in the junction box. Options include:

- blocking and bypass diodes;
- an oversize terminal block which accepts conductors up to 25mm² (AWG #4); standard terminals accept up to 6mm² (AWG #10);
- a Solarstate™ charge regulator.

Shipped in 12V configuration, modules may easily be switched to 6V configuration by moving leads in the junction box. Six-volt modules are intended to support 6V loads, and are not recommended as series elements in higher voltage arrays.

Quality and Safety

- Manufactured in ISO 9001-certified factories;
- Certified by PowerMark Corporation;
- Listed by Underwriter's Laboratories for electrical and fire safety (Class C fire rating);
- Certified by TÜV Rheinland as Class II equipment;
- Approved by Factory Mutual Research for application in NEC Class 1, Division 2, Groups C & D hazardous locations;
- Compliant with the requirements of IEC 61215 including:
  - repetitive cycling between -40°C and 85°C at 85% relative humidity;
  - simulated impact of 25mm (one-inch) hail at terminal velocity;
  - a "damp heat" test, consisting of 1000 hours of exposure to 85°C and 85% relative humidity;
  - a "hot-spot" test, which determines a module's ability to tolerate localized shadowing (which can cause reverse-biased operation and localized heating);
  - static loading, front and back, of 2400 pascals (50 psf); front loading (e.g. snow) of 5400 pascals (113 psf).

Limited Warranties

- Power output for 25 years;
- Freedom from defects in materials and workmanship for 5 years.

See our website or your local representative for full terms of these warranties.



BP MSX 60

Individually Tested and Labeled

Each module tested and labeled with its actual output — voltage, current, and power at maximum power point (P_{max}) — at Standard Test Conditions and Standard Operating Conditions.

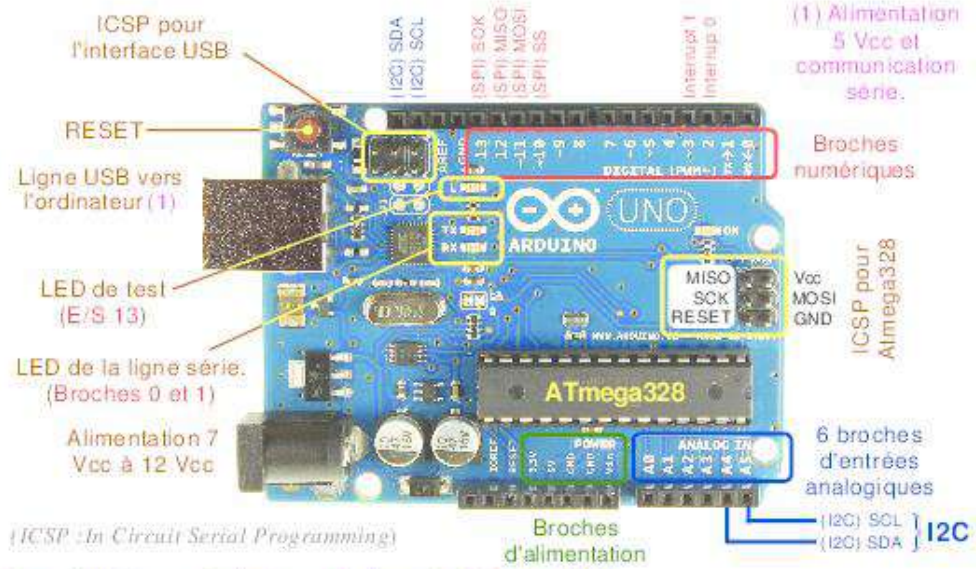
©2002 BP Solar Global Marketing

01-4001-2 2/02

Electrical Characteristics[1]

	BP MSX 60	BP MSX 64*
Maximum power (P_{max})[2]	60W	64W
Voltage at P_{max} (V_{mp})	17.1V	17.5V
Current at P_{max} (I_{mp})	3.5A	3.66A
Minimum P_{max}	58W	62W
Short-circuit current (I_{sc})	3.8A	4.0A
Open-circuit voltage (V_{oc})	21.1V	21.3V
Temperature coefficient of I_{sc}	(0.065±0.015)%/°C	
Temperature coefficient of V_{oc}	-(80±10)mV/°C	
Temperature coefficient of power	-(0.5±0.05)%/°C	
NOCT[3]	47±2°C	
Maximum system voltage	600V (U.S. NEC rating) 1000V (TÜV Rheinland rating)	
Maximum series fuse rating	20A	

ARDUINO | Présentation de la carte ARDUINO UNO. | Page 1



Caractéristiques techniques de la carte Arduino UNO :

Micro contrôleur : ATmega328.
Fréquence horloge : 16 MHz.
Tension d'alimentation interne : 5Vcc.
Tension d'alimentation externe recommandée : 7Vcc à 12Vcc. *(Limites : 6Vcc à 20 Vcc)*
Courant max sur la sortie 3,3V généré par le régulateur interne : 50mA.
Entrées/sorties binaires : 14 broches.
Courant MAX par broches en sortie : 40 mA. *(85 mA en court circuit)*
Courant MAX cumulé par les broches en sorties : 200 mA. *(Soit 14 mA en moyenne)*
Les E/S binaires 0 et 1 sont mobilisées par le dialogue sur la ligne série.
S0 pour RX et S1 pour TX. Chaque broche est reliée à une LED via une résistance de 1kΩ.
Les E/S binaires 3, 5, 6, 9, 10, et 11 sont dédiées au mode PWM.
L'E/S 13 est reliée sur la carte à la LED de test via une résistance de 1kΩ.
Entrées analogiques : 6. Le niveau logique maximal doit être de +5Vcc.
Mémoire Flash 32 KB dont 0.5 KB utilisée par le Bootloader.
Mémoire SRAM 2 KB. Mémoire EEPROM 1 KB.
La carte s'interface au PC par l'intermédiaire de sa prise USB.
La carte s'alimente par le jack d'alimentation. *(Utilisation autonome)*

Les SHIELDs (Boucliers) sont des circuits d'extension qui se connectent directement sur une carte ARDUINO pour en augmenter les fonctionnalités.

Une liaison SPI *(Serial Peripheral Interface défini par MOTOROLA)* est un bus de données série synchrone qui opère en mode Full-duplex. Les circuits communiquent selon un schéma maître-esclaves, où le maître s'occupe totalement de la communication. Le bus SPI utilise 4 signaux logiques :

- SCK : Horloge *(Généré par le maître M)*
- MOSI : Master Output, Slave Input. *(Généré par M)*
- MISO : Master Input, Slave Output. *(Généré par S)*
- SS : Slave Select, Actif à l'état bas. *(Généré par M)*



Dimanche, 2 Mars, 2014 Fichier : ARDUINO.PM5