

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Réseaux électriques

Présenté par
Yacine BENAKLI

Thème

ETUDE ET MODELISATION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE COUPLEE A UNE MACHINE A COURANT CONTINU.

Mémoire soutenu publiquement le 28/09/ 2015 devant le jury composé de :

Mr Mustapha BOUHERAOUA
Maitre de conférences classe A, UMMTO, Président

Mr Mustapha ZAOUIA
Maitre de conférences classe A, UMMTO, Encadreur

Mlle Kamelia HELALI
Doctorante, UMMTO, Co-Encadreur

Mr Abdelghani KIMOUCHE
Maitre-assistant classe A, UMMTO, Examineur

M^{me} Nadia RADJA
Maitre-assistante classe A, UMMTO, Examinatrice

Remerciement

Je remercie le bon Dieu qui ma permis de vivre cette journée, et de m'avoir accordé la force et la patience de finir ce travail.

Je remercie mon encadreur monsieur ZAOUIA Mustapha, maitre de conférences classe A, qui m'a fait l'honneur de m'avoir encadré pour ce mémoire.

Je remercie mademoiselle HELALI Kamelia en qualité de Co-encadreur dans ce travail, ainsi que pour sa patience et son aide tout au long de mon travail.

Je remercie les membres des jurés qui m'ont fait l'honneur de leur présence et de jugé mon travail.

Je remercie aussi toute ma famille et mes amis pour leur soutien et leur encouragement.

Ainsi que toutes personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes parents, à mes très chères sœurs, mes oncles et mes tantes, ainsi qu'à tous mes amis.

Yacine Benakli

Sigles et Abréviations

GPV : Générateur photovoltaïque.

PV : Photovoltaïque.

MCC : Machine à courant continu.

CC : courant continu.

PPM : Le point de fonctionnement optimal.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

P&O : Perturbation et Observation.

DC : Courant Continu (Direct Current).

FF : facteur de forme .

CS : convertisseur statique.

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Généralité Sur les générateurs photovoltaïques

1. Introduction.....	4
2. Rayonnement solaire dans l'espace.....	4
2.1. Compositions.....	4
2.2. Rayonnement sur la Terre.....	5
3. Conversion d'énergie les différentes technologies solaires.....	6
3.1. Solaire passif.....	6
3.2. Solaire à concentration thermodynamique.....	6
3.3. Solaire thermique.....	7
3.4. Solaire photovoltaïque.....	8
4. Cellule photovoltaïque.....	8
4.1. Histoire de la cellule photovoltaïque.....	8
4.2. Les Propriétés des Semi-conducteurs.....	9
4.3. Principe de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque.....	9
5. Matériaux utilisés dans les cellules PV.....	10
5.1. Différents type de cellule photovoltaïque.....	11
5.2. Rendements des différents types de cellule photovoltaïque.....	12
6. Générateur photovoltaïque.....	13
6.1. Constitution d'un module photovoltaïque.....	13
6.2. Mise en série.....	14
6.3. Mise en parallèle.....	14
7. Paramètres d'une cellule photovoltaïque.....	15
8. Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	17
9. Influence de la température et de l'éclairement.....	21
10. Influence de la résistance série.....	22
11. Conclusion.....	23

Chapitre II : Modélisation et simulation d'un PV avec un convertisseur DC/DC

1. Introduction.....	25
2. Introduction d'un étage d'adaptation.....	25

Sommaire

3. Le Convertisseurs DC-DC.....	26
4. Le Principe de fonctionnement du hacheur BOOST.....	26
5. Principe de la recherche du point de puissance maximal	30
5.1. Généralités.....	30
5.2. Les commandes MPPT à algorithmes performants	31
5.3. Principe des commandes “Perturb and Observe” (P&O)	32
6. Simulation d’un panneau PV avec MPPT et convertisseur DC-DC.....	35
7. Résultats de la simulation.....	36
8. Interprétation des résultats	42
9. Conclusion	42

Chapitre III : Simulation de l’ensemble chaine de conversion PV- machine à CC

1. Introduction.....	43
2. Machine à courant continu MCC	43
2.1. Présentation et histoire de la MCC.....	43
2.2. Constitution	44
3. Modélisation de la machine à courant continu	45
3.1. Equations de la machine à courant continu.....	46
3.2. Simulation d’un moteur à courant continu à excitation constante	48
3.3. Paramètres de la machine à courant continu utilisée.....	48
4. Visualisation des résultats	49
4.1. Moteur à courant continu sans couple résistant.....	49
4.1.1. Interprétation des courbes.....	50
4.2. Moteur à courant continu avec couple résistant.....	51
4.2.1. Interprétation des résultats.....	52
5. Schéma bloc.....	53
5.1. Interprétation des résultats.....	56
6. Conclusion	57

Conclusion générale	58
---------------------------	----

Références et bibliographie	59
-----------------------------------	----

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Comparatif des rendements des différents types de cellules.....	11
Tableau I-2 : Caractéristiques du module BP585F.....	17
Tableau III-1 : Paramètres d'une MCC à excitation indépendante.....	48

Liste des figures

Chapitre I : Généralité Sur les générateurs photovoltaïques

Figure I -1 : image de notre soleil depuis l'espace.....	3
Figure I -2 : Spectre du rayonnement solaire.....	4
Figure I-3 : Répartition de l'énergie solaire moyenne reçue à la surface de la Terre.....	4
Figure I-4 : Schéma de la plus grande centrale thermique du monde qui se situe en Californie aux Etats-Unis.....	6
Figure I-5 : Exemples de modules thermiques.....	6
Figure I-6 : Cellule photovoltaïque à Base de silicium monocristallin à gauche, et cellule photovoltaïque à base de silicium multi-cristallin sur la droite.....	8
Figure I-7 : Effets photoélectrique d'une cellule photovoltaïque.....	9
Figure I-8 : Schéma de montage simplifié d'un module PV.....	12
Figure I-9 : Caractéristiques résultant d'un montage en série.....	13
Figure I-10 : Caractéristiques résultant d'un montage en parallèle.....	14
Figure I-11 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	14
Figure I-12 : Panneau en silicium monocristallin BP Solar BP585F.....	17
Figure I-13 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L5P.....	18
Figure I-14 : Modèle de simulation d'un générateur PV.....	19
Figure I-15 : Evolution de la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ en fonction de l'irradiation.....	20
Figure I-16 : Evolution de la caractéristique $I(V)$ (a) et $P(V)$ (b) pour différentes températures.....	21
Figure I-17 : L'influence de la résistance shunt (R_s) sur la caractéristique $P(V)$ d'une cellule.....	21

Figure I-18 : L'influence de la résistance shunt (R_s) sur la caractéristique $I(V)$ d'une cellule..... 22

Chapitre II : Modélisation et simulation d'un PV avec un convertisseur DC/DC

Figure II-1 : étage d'adaptation entre un GPV et une charge..... 24

Figure II-2 : schéma électrique de base d'un hacheur Boost..... 26

Figure II-3 : Ondulation du courant d'inductance..... 28

Figure II-4 : Ondulation de la tension de condensateur..... 28

Figure II-5 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal a) suite à une variation d'ensoleillement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température..... 30

Figure II-6 : Schéma fonctionnel général du système P-V avec MPPT..... 31

Figure II-7 : Caractéristique PPV (VPV) d'un panneau solaire..... 32

Figure II-8 : Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation... 33

Figure II-9 : Modèle Simulink de l'algorithme P&O..... 34

Figure II-10 : Schéma bloc d'un PV munis de la MPPT..... 34

Figure II.11 : Tension de sortie du générateur photovoltaïque..... 35

Figure II-12 : Puissance de sortie du générateur photovoltaïque..... 36

Figure II.13 : Tension de sortie du convertisseur DC-DC..... 37

Figure II-14 : Puissance de sortie du convertisseur DC-DC..... 37

Figure II-15 : Evolution temporelle de la température..... 38

Figure II-16 : Evolution temporelle de la tension de sortie du convertisseur avec la variation de la température..... 38

Figure II-17 : Evolution temporelle de la puissance de sortie du convertisseur avec la variation de la température..... 39

Figure II-18 : Evolution temporelle de l'éclairement..... 39

Figure II-19 : Evolution temporelle de la tension de sortie du convertisseur..... 40

Figure II-20 : Evolution temporelle de la puissance de sortie du convertisseur.....	40
--	----

Chapitre III : Simulation de l'ensemble chaine de conversion PV-machine à CC

Figure III-1 : schéma de la conversion d'énergie d'une machine à courant continu.....	43
Figure III-2 : Représentation schématique d'une machine à courant continu bipolaire.....	44
Figure III-3 : Schéma d'une Machine à courant continu à excitation indépendante.....	46
Figure III-4 : Bloc de simulation de la MCC.....	48
Figure III.5 : Caractéristique de courant et la vitesse en fonction du temps de la machine cc sans couple résistant.....	49
Figure III.6 : Caractéristique de courant et la vitesse en fonction du temps de la machine cc avec couple résistant.....	49
Figure III.7 : Caractéristique de couple électromagnétique en fonction du temps de la machine cc sans couple résistant.....	50
Figure III.8 : Caractéristique de courant en fonction du temps de la machine cc avec couple résistant.....	51
Figure III.9 : Caractéristique de la vitesse en fonction du temps de la machine cc avec couple résistant.....	51
Figure III.10 : Caractéristique de couple électromagnétique en fonction du temps de la machine cc avec couple résistant.....	52
Figure III-11 : Le bloc de simulation du système PV alimentant une MCC sous Matlab/Simulink.....	53
Figure III-12 : Tension de sortie du générateur photovoltaïque.....	54
Figure III-13 : Puissance de sortie du générateur photovoltaïque.....	54

Figure III- 14 : Tension de sortie du convertisseur DC-DC.....	55
Figure III-15 : Puissance de sortie du convertisseur DC-DC.....	55
Figure III-16 : Vitesse de la MCC avec application de couple charge après le démarrage.....	56

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, la plus grande partie de l'énergie consommée actuellement provient de l'utilisation des combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire. ces ressources deviennent de plus en plus rares, pendant que les demandes énergétiques du monde s'élèvent continuellement. Il est estimé que les réserves mondiales seront épuisées d'ici 2030 si la consommation n'est pas radicalement modifiée, et au maximum vers 2100 si des efforts sont produits sur la production et la consommation[1].

Il s'avère nécessaire de lui trouver une alternative, sachant que cette forme d'énergie représente la majeure partie de la production énergétique actuelle. Suite aux différentes catastrophes écologique enregistrées ces 30 dernières années, comme la catastrophe nucléaire de Tchernobyl, le 4 avril 1986, dans l'ancienne URSS, ou *L'Erika*, le pétrolier qui a fait naufrage le 12 décembre 1999 au large de la Bretagne en France, lors d'un transport de 30 884 tonnes de fioul lourd, et dernièrement l'accident nucléaire de Fukushima qui a eu lieu le 11 mars 2011 au Japon dû à un séisme.

Ces exemples poussent à la réflexion et nous contraignent à utiliser une source d'énergie économique, peu polluante et respectueuse de l'environnement, car la protection de notre écosystème est devenue un point important, est c'est donc naturellement qu'on doit se tourner vers les énergies renouvelables, comme l'énergie solaire photovoltaïque, éolienne ou hydraulique, qui apparaissent comme des énergies inépuisables et facilement exploitables.

Si l'on prend l'exemple du soleil, une surface de 145000km² (4% de la surface des déserts arides) de panneaux photovoltaïques (PV) suffirait à couvrir la totalité des besoins énergétiques mondiaux [2].

L'Algérie est l'un des pays dans le monde possédant le plus fort potentiel de production et d'exportation de l'énergie électrique solaire, avec les moyens humains et financiers qu'on lui connaît, elle peut s'inspirer des programmes d'autres pays, qui grâce à des lois sur les énergies renouvelables ont permis de booster fortement le marché du photovoltaïque, pour une exploitation à grande échelle de l'énergie solaire.

Sachant que pour une installation photovoltaïque, la variation de l'éclairement, la température ou de la charge provoque une baisse de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque. c'est donc logique que la conception, l'optimisation et la réalisation des systèmes Photovoltaïques soient un problèmes d'actualité résultants nombreuses recherches afin d'inventé des systèmes permettant de récupérer le maximum d'énergie et gardant un rendement maximal tout au long de son fonctionnement, c'est le principe de recherché le point de puissance maximum.

Dans le premier chapitre nous parlerons des différentes formes d'énergie solaire et des façons de la capter, et notamment les techniques et matériaux utilisées pour récupérer cette

l'énergie, en particulier les panneaux photovoltaïques et des conditions qui favorisent son fonctionnement.

Dans le deuxième chapitre nous présenterons l'étage d'adaptation qui relie un système photovoltaïque à une charge ou un réseau, composé d'un hacheur parallèle et d'un programme de commande MPPT modélisé et exécuté sur MATLAB

Le troisième et dernier chapitre sera consacré à la simulation de l'ensemble système PV et machine à courant continu à excitation indépendante et commandé par une MPPT (Maximum Power Point Tracking), en utilisant SIMULINK dans l'environnement MATLAB. Enfin nous terminerons par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Généralité Sur les générateurs photovoltaïques

1. Introduction

Le soleil est la seule source d'énergie extra-terrestre exploitable par l'homme. Notre étoile dont le diamètre de **(1 400 000 Km)**, a une distance de **(149 597 870 Km)** de notre planète et dont l'espérance de vie est entre 5 et 10 milliards d'années, nous bombarde en permanence de 120 000 millions de millions de watts **(120 térawatts)** de lumière soit plus de 9000 fois les besoins énergétiques de l'humanité [3].

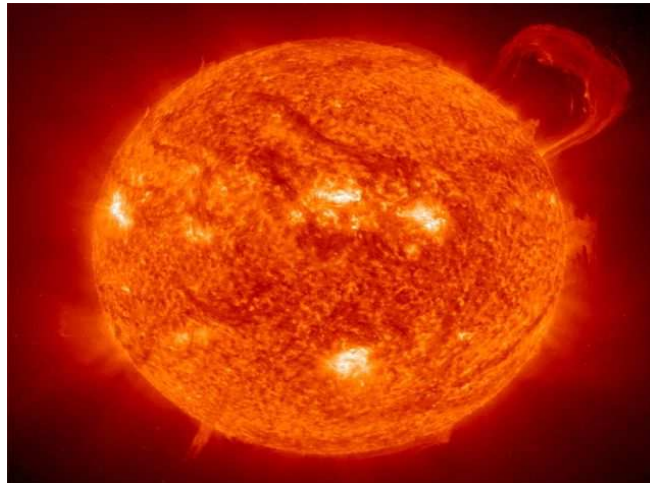


Figure I -1 : image du soleil depuis l'espace.

2. Rayonnement solaire dans l'espace

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil. Il est composé de toute la gamme des rayonnements, de l's, les rayons gamma, les ondes radio ainsi que la lumière visible. Le rayonnement solaire contient aussi des rayons cosmiques de particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées.

2.1. Compositions

L'émission d'ondes électromagnétiques par le soleil est convenablement modélisée par un corps noir à **5 800 kelvins**, et peut donc être décrit par la loi de Planck. Le maximum d'émission est dans le vert (**$\lambda=504$ nm**), et la répartition du rayonnement est à peu près de moitié-moitié pour la lumière visible et pour l'infrarouge, et seulement près de **1 %** d'ultraviolets [5].

Ayant traversé toute l'atmosphère terrestre, une partie du rayonnement solaire a été absorbée. On peut repérer notamment sur le spectre ci-dessous les bandes d'absorption de l'ozone (qui absorbe une partie importante des ultraviolets), du dioxygène, du dioxyde de carbone et de l'eau.

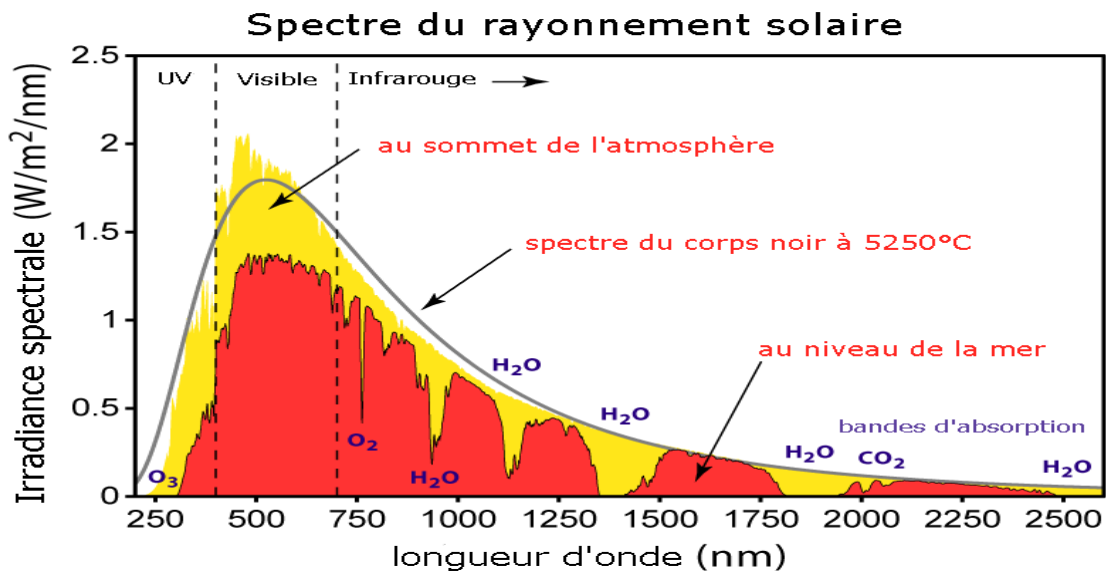


Figure I -2 : Spectre du rayonnement solaire.

2.2. Rayonnement sur la Terre

Une faible partie du rayonnement solaire parvient jusqu'à la surface de la terre, des ondes radio décamétriques aux rayons ultraviolets les plus mous, le reste étant réfléchi ou absorbé par l'atmosphère et l'ionosphère.

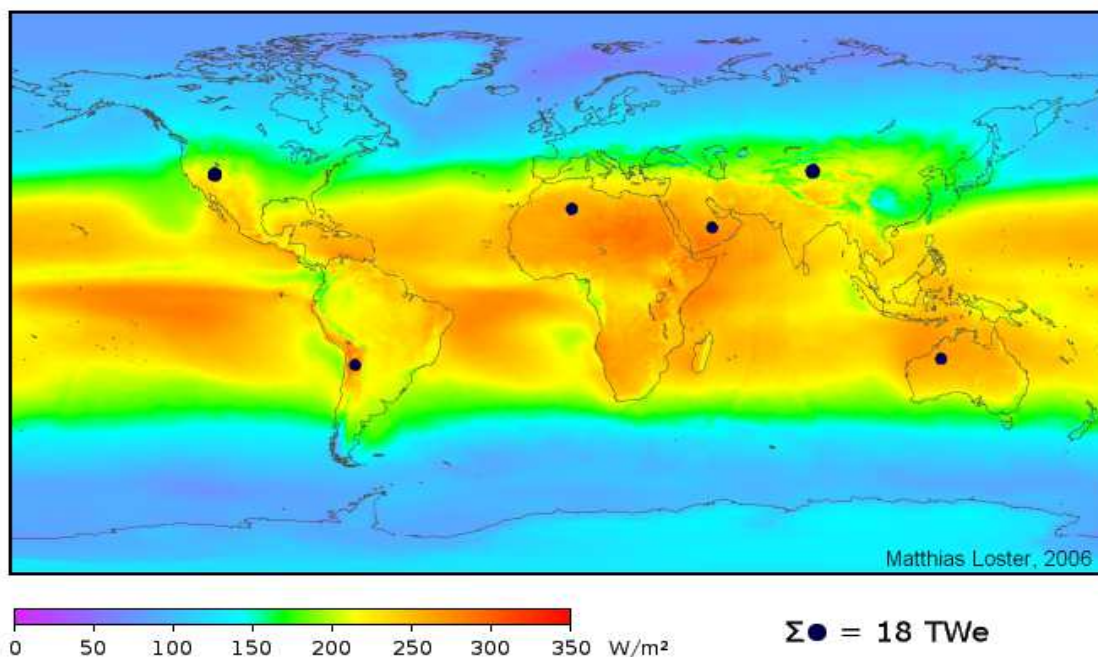


Figure I-3 : Répartition de l'énergie solaire moyenne reçue à la surface de la Terre.

Lorsqu'il atteint la surface de la terre, en fonction de l'albédo de la surface frappée, une partie plus ou moins importante du rayonnement est réfléchi. L'autre partie de ce rayonnement est absorbée par la surface de la terre (convertie en chaleur) ou par les êtres vivants qui y vivent, en particulier les végétaux (photosynthèse). Cette source d'énergie, appelée énergie solaire, est à la base de la vie, Mais cette dernière ne peut être exploitée par l'homme pour le moment.

3. Conversion d'énergie les différentes technologies solaires

Afin d'exploiter ces énergies on utilise un dispositif destiné à récupérer le rayonnement solaire pour le convertir en énergie électrique ou en énergie thermique utilisable par l'homme, et ce dispositif est le panneau solaire. Ces derniers sont les composants de base de la plupart des équipements de production d'énergie solaire, et ils sont constamment améliorés. Et si l'énergie émise par le soleil et reçue par la terre durant environ une heure était récupérée en totalité, cela devrait permettre de pourvoir aux besoins énergétiques de l'humanité pendant un an. Mais pour l'instant on ne peut capter qu'une partie de cette énergie, on peut distinguer le solaire passif, le solaire à concentration thermique, le solaire thermique, et le solaire photovoltaïque.

3.1. Solaire passif

La plus ancienne et certainement la plus importante, quoique discrète, consiste à bénéficier de l'apport direct du rayonnement solaire, c'est-à-dire l'énergie solaire passive. Pour qu'un bâtiment bénéficie au mieux des rayons du soleil, on doit tenir compte de l'énergie solaire lors de la conception architecturale (façades doubles, surface vitrée orientée vers le Sud, etc.). L'isolation thermique joue un rôle important pour optimiser la proportion de l'apport solaire passif dans le chauffage et l'éclairage d'un bâtiment. Ainsi une maison solaire passive, construite selon les normes allemandes d'isolation thermique de 1995, l'apport solaire lui permettrait de faire des économies d'énergie importantes [6].

3.2. Solaire à concentration thermodynamique

Le solaire thermodynamique est une technique qui capte les rayonnements solaires qui l'utilise ensuite pour produire :

- soit de l'électricité, sur le même principe qu'une centrale électrique classique, en piégeant la chaleur des rayons du soleil et la transférant à un fluide caloporteur qui produit de la vapeur à haute pression qui entraîne une turbine comme on peut le voir sur la figure (I-4).
- soit directement un travail mécanique en transformant un liquide en gaz ou en chauffant directement une partie du moteur comme dans le moteur Stirling [7].

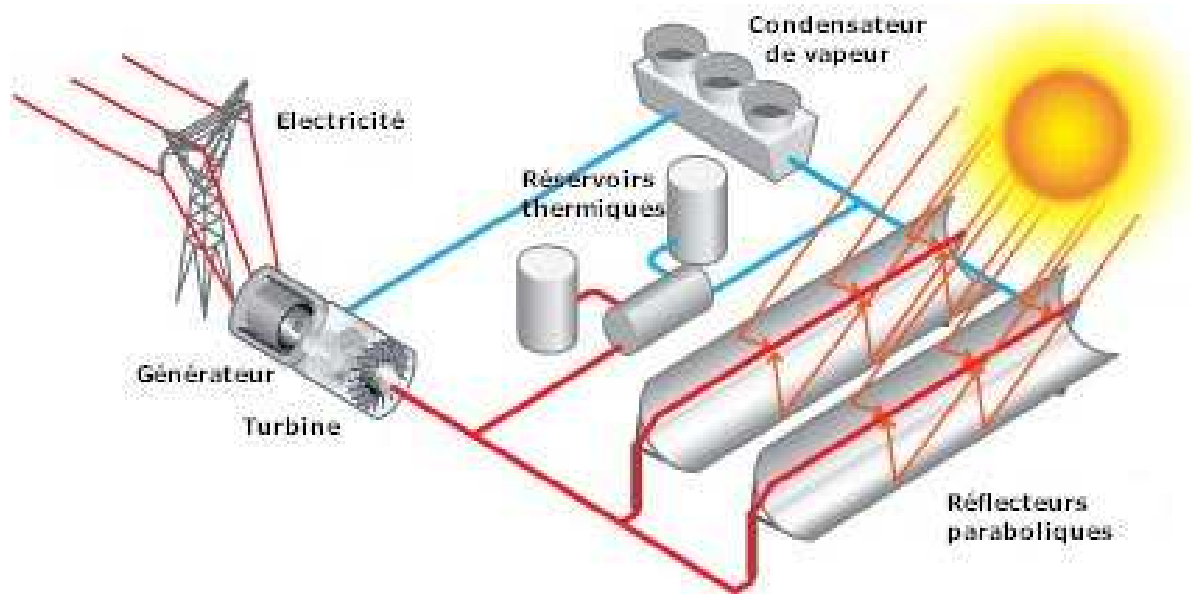


Figure I-4 : Schéma de la plus grande centrale thermique du monde qui se situe en Californie au Etats-Unis.

3.3. Solaire thermique

Le principe de l'énergie thermique consiste à transformer le rayonnement solaire en énergie thermique grâce à un fluide qui circule dans des panneaux exposés au soleil, figure (I-5). Cette forme de conversion d'énergie peut être directe si on veut uniquement chauffer de l'eau sanitaire. Par contre, si on veut générer de l'électricité, il faudra utiliser des moteurs qui convertissent l'énergie thermique générée en électricité (par exemple, moteurs à air chaud).



Photo d'un cuiseur thermique (four solaire) pour cuire les aliments

Capteur solaire thermique plan



Capteur solaire thermique



Figure I-5 : Exemples de modules thermiques.

3.4. Solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est la production d'énergie électrique à partir du rayonnement solaire. La cellule photovoltaïque est le composant électronique de base, utilisant l'effet photoélectrique. Ainsi, plusieurs cellules reliées entre elles forment un module solaire photovoltaïque et plusieurs modules regroupés forment une installation solaire produisant de l'électricité qui peut être utilisée sur place, ou pour alimenter un réseau de distribution.

4. Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. Le courant obtenu est proportionnel à la puissance lumineuse incidente. La cellule photovoltaïque délivre une tension continue.

4.1. Histoire de la cellule photovoltaïque

L'histoire de la cellule photovoltaïque est en fait l'histoire d'une réaction qui se déroule à l'échelle atomique. Cette réaction est appelée l'effet photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque a été découvert pour la première fois en 1839 par **Antoine César Bequerel**, un physicien français. Il a constaté que certains matériaux pouvaient produire de petites quantités d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière. Mais c'est Albert Einstein qui était le premier à pouvoir expliquer le principe photovoltaïque.

En 1913, **William Coblentz** a posé le premier brevet pour une cellule solaire, mais il n'a jamais pu la faire fonctionner. En 1916, **Robert Millikan** a été le premier à produire de l'électricité avec une cellule solaire. Pendant les quarante années suivantes, personne ne fit beaucoup de progrès en énergie solaire car les cellules photovoltaïques avaient un trop mauvais rendement pour transformer la lumière du soleil en énergie.

Le premier panneau solaire a été construit en 1954 par les laboratoires Bell, et Grâce aux quêtes spatiales, ils ont approuvé leur fiabilité. Le coût de production des cellules solaires a également diminué. L'énergie solaire a eu un second élan au cours de la crise de l'énergie dans les années 1970 alors l'énergie solaire devient une priorité pour de plus en plus de pays. Des centrales

solaires sont en cours de construction dans le monde entier. Les entreprises d'électricités et les gouvernements ont offert des subventions et des réductions pour encourager les propriétaires à investir dans les panneaux solaires pour leur maison [8].

De nos jours les panneaux photovoltaïques ont tendance à se généraliser et sont maintenant utilisés dans la production d'électricité en masse, dans des fermes solaires construites dans une optique de développement durable. On estime la production mondiale actuelle d'électricité d'origine photovoltaïque à plus de **21 000MW** (Mégawatt). Les nombreuses recherches et améliorations apportées dans ce domaine ont permis d'obtenir un rendement de **12%** en moyenne selon la composition des panneaux (monocristallin ; poly-cristallin ; amorphe).

4.2. Les Propriétés des Semi-conducteurs

Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais dont la probabilité, même faible, qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, existe. En d'autres termes, la conductivité électrique d'un semi-conducteur est intermédiaire entre celle des métaux (conducteurs) et celle des isolants.



Figure I-6 : Cellule photovoltaïque à Base de silicium monocristallin à gauche, et cellule photovoltaïque à base de silicium multi-cristallin sur la droite.

4.3. Principe de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque

Dans un semi-conducteur exposé à la lumière, un photon d'énergie suffisante arrache un électron, créant au passage un « trou ». Normalement, l'électron trouve rapidement un trou pour se replacer, et l'énergie apportée par le photon est ainsi dissipée. Le principe d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du

matériau au lieu de se recombiner en son sein, et ainsi apparaîtra une différence de potentiel et donc une tension entre les deux faces, comme dans une pile.

L'une des solutions utilisée, pour extraire sélectivement les électrons et les trous, est d'utiliser un champ électrique au moyen d'une jonction PN, entre deux couches dopées respectivement P et N :

- La couche supérieure de la cellule est composée d'un semi-conducteur dopé N, Dans laquelle, il existe une quantité d'électrons libres supérieure à celle du matériau intrinsèque (non dopé), d'où l'appellation de dopage N, négatif comme la charge de l'électron. Le matériau reste électriquement neutre, c'est le réseau cristallin qui supporte globalement une charge négative.
- La couche inférieure de la cellule est composée d'un semi-conducteur dopé P. Cette couche possédera donc en moyenne une quantité d'électrons libres inférieure à celle du matériau intrinsèque (non dopé), les électrons sont liés au réseau cristallin qui est chargé positivement. La conduction électrique est assurée par des trous positifs.

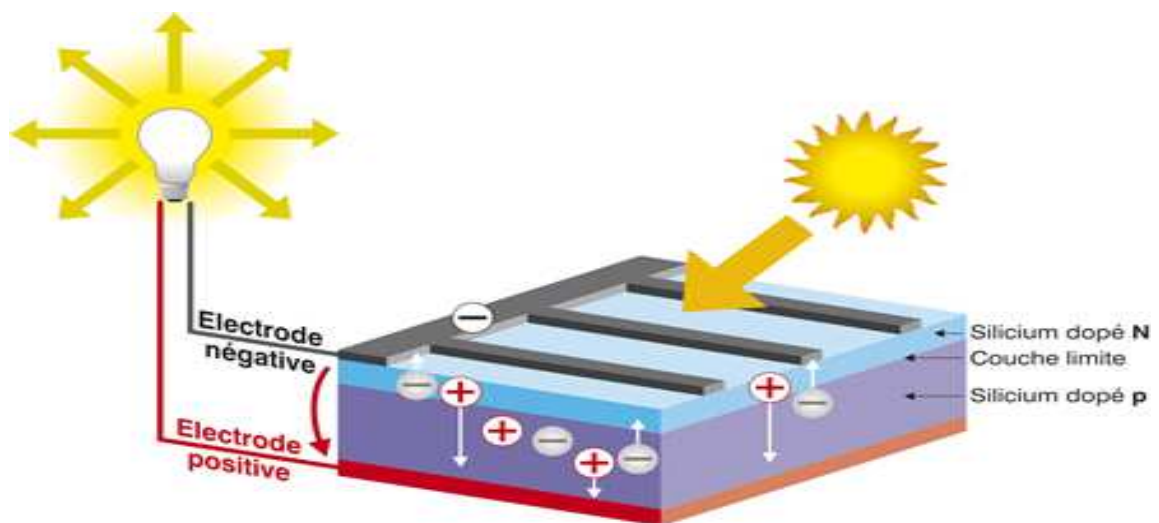


Figure I-7 : Effets photoélectrique d'une cellule photovoltaïque.

5. Matériaux utilisés dans les cellules PV

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. On l'obtient par réduction à partir de silice, aussi appelé dioxyde de silicium (SiO_2), composé le plus abondant dans la croûte terrestre et notamment dans le sable ou le quartz. Ce dernier doit être purifié jusqu'à plus de **99,999 %**, afin d'obtenir un silicium de qualité

photovoltaïque. Il est ensuite produit sous forme de barres nommées « lingots » de section ronde ou carrée. Ces lingots sont sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur et sont appelés **wafers** (disque très fin de matériau semi-conducteur) [9].

Après un traitement pour enrichir en éléments dopants telle que le Phosphore, l'Arsenic, l'Antimoine et en atomes de Bore. Ainsi on obtient du silicium semi-conducteur de type P ou N, les wafers sont métallisés, en incrustant des rubans de métal en surface et reliés à des contacts électriques. Une fois métallisés les wafers seront devenus des cellules photovoltaïques.

5.1. Différents type de cellule photovoltaïque

Il existe plusieurs technique de fabrication, ainsi que plusieurs type de cellule comme on peut le voir [10] :

- **Cellule photovoltaïque en silicium amorphe** : Les cellules photovoltaïques en silicium amorphe sont fabriquées par dépôts sous vide, à partir de plusieurs gaz, la technique utilisée est Le dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma ou la PECVD (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition en anglais). La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et autres appareils portatifs.
- **Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin** : Le silicium fondu se solidifie lors du refroidissement, en ne formant qu'un seul et grand cristal. Il est ensuite découpé en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont généralement d'un bleu uniforme.
- **Cellule photovoltaïque en silicium polycristallin** : Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.
- **Cellule photovoltaïque tandem** : Empilement monolithique de deux cellules simples se fait, en combinant deux cellules (par exemple ; une couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin) absorbant dans des domaines spectraux connexes, on améliore le rendement théorique par rapport à des cellules simples, qu'elles soient amorphes, cristallines ou microcristallines.
- **Cellule photovoltaïque organique** : Ce sont des cellules photovoltaïques dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques, mais dont le rendement et la durée sont insatisfaisante pour le moment.

- **Cellule photovoltaïque multi-jonction** : Pas encore commercialisée, ces cellules ayant une grande efficacité ont été développées pour des applications spatiales. Les cellules multi-jonctions sont constituées de plusieurs couches minces qui utilisent l'épitaxie (une technique chimique de croissance des cristaux) par jet moléculaire.
- **Cellule photovoltaïque CIGS (pour : Cuivre, Indium, Gallium et Sélénium)** : Une technique qui consiste à déposer un matériau semi-conducteur à base de cuivre, d'indium, de gallium et sélénium sur un support.

5.2. Rendements des différents types de cellule photovoltaïque

Chacune de ces cellules photovoltaïques, a un rendement bien spécifique à elle comme est montré dans le tableau (I-1) ci-dessus :

Type de cellule photovoltaïque	Rendement en laboratoire	Rendement (en plein soleil)	Durée de vie
Cellule photovoltaïque en silicium amorphe	environ 13,4%	5 % à 7 %	+/- 10 ans
Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin	environ 25%	14 % à 20 %	+/- 30 ans
Cellule photovoltaïque en silicium polycristallin	environ 20%	9% à 11 %	+/- 30 ans
Cellule photovoltaïque tandem		10% à 12%	
Cellule photovoltaïque organique	10,7 %	5% à 8,5%	Aléatoire
Cellule photovoltaïque multi-jonction	+ de 40%	/	/
Cellule photovoltaïque CIGS	environ 19%	17%	

Tableau I-1 : Comparatif des rendements des différents types de cellules.

6. Générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque ou panneau solaire, est un dispositif technologique énergétique à base de capteurs solaires photovoltaïques et destiné à convertir le rayonnement solaire en énergie électrique.

6.1. Constitution d'un module photovoltaïque

Les cellules ou capteurs solaires sont reliées électriquement, en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque, ces derniers sont ensuite interconnectés puis, sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu pour former un générateur PV produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique à courant continu. Et pour toute connexion au réseau électrique, il faut impérativement un onduleur pour passer en courant alternatif.

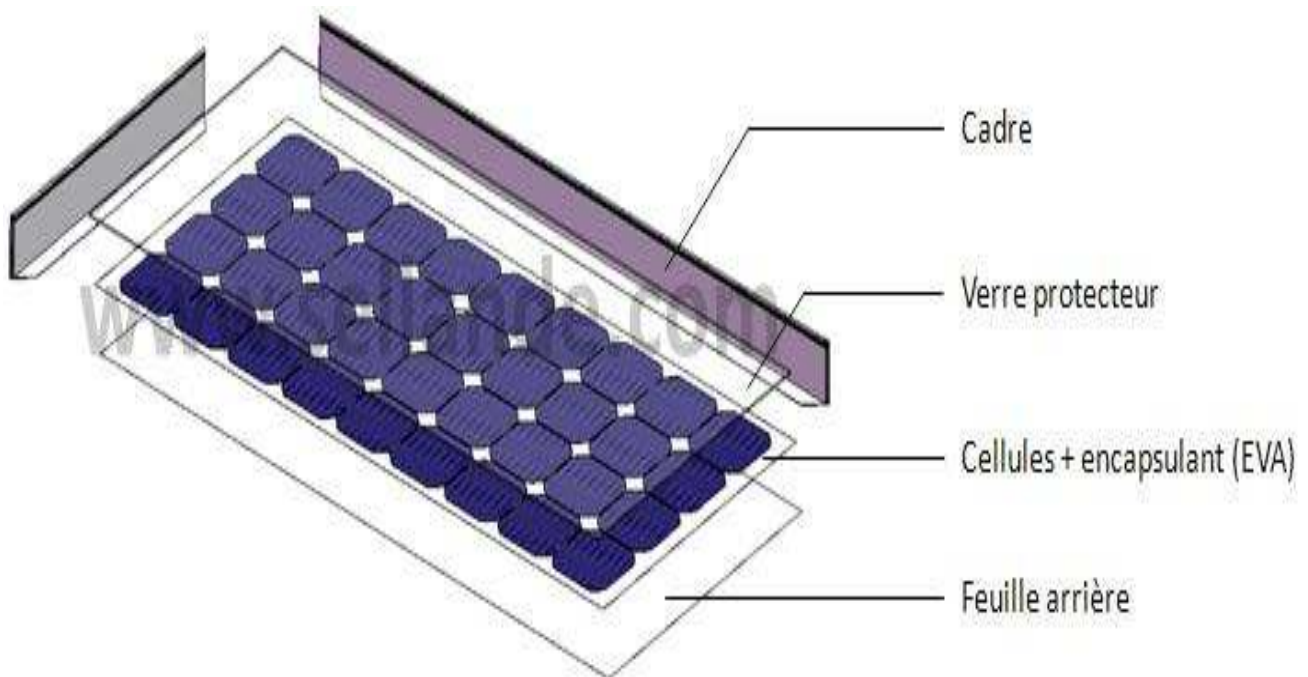


Figure I-8 : Schéma de montage simplifié d'un module PV.

6.2. Mise en série

Le branchement en série des cellules solaire et module PV, est réalisé afin d'augmenter la tension la sortie du générateur. En reliant le connecteur négatif (-) du premier composant au connecteur positif (+) du second, leur tension est ainsi additionnée, et plus on aura de composants et plus la tension sera élevée. Cependant l'intensité du courant reste la même et ne change pas.

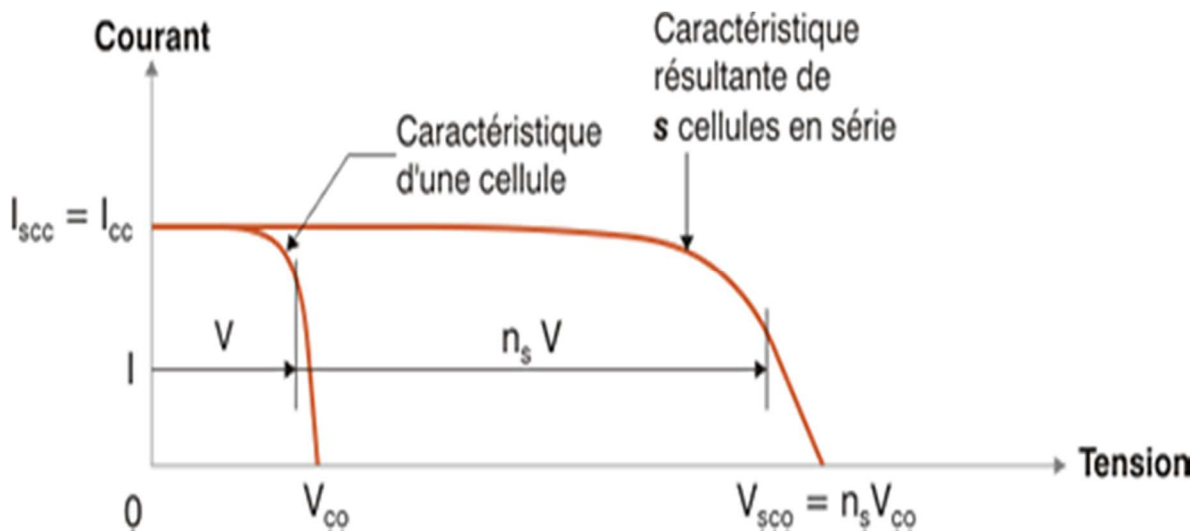


Figure I-9 : Caractéristiques résultant d'un montage en série.

Avec :

n_s : nombre de cellules en série.

I_{cc} : courant de court-circuit d'une cellule.

I_{sc} : courant de court-circuit des (n_s) cellules en série.

V_{co} : tension en circuit ouvert d'une cellule.

V_{sco} : somme des tensions en circuit ouvert de (n_s) cellules en série.

6.3. Mise en parallèle

Le branchement en parallèle se fait en connectant l'ensemble des connecteurs positifs (+) entre eux ainsi que l'ensemble des connecteurs négatifs (-) entre eux, et ceci afin d'additionner les courants résultants des cellules, et plus il y'aura de composant parallèle plus l'intensité du courant sera élevée. Mais ces cellules seront toutes soumises à une même la tension

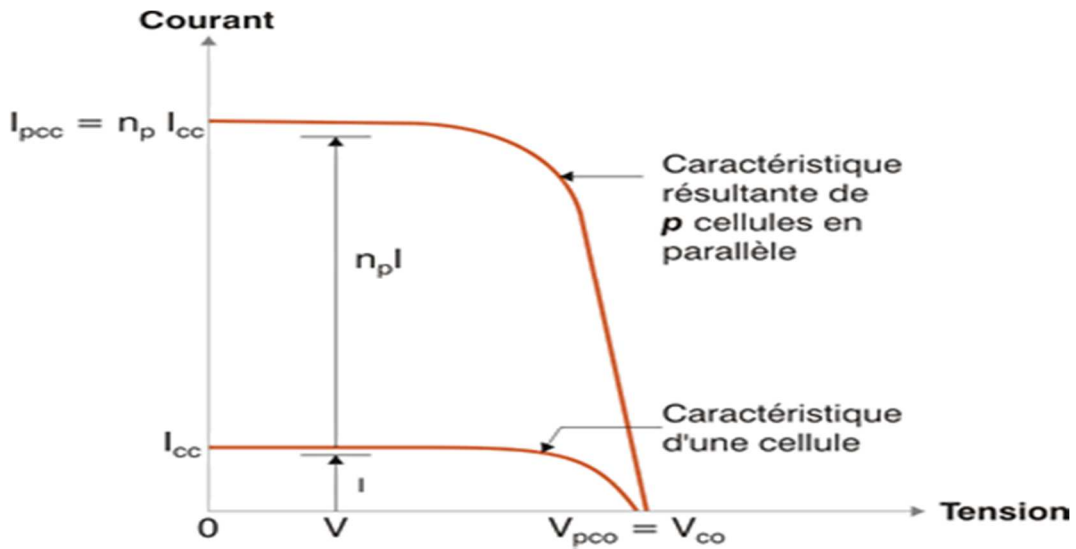


Figure I-10 : Caractéristiques résultant d'un montage en parallèle.

Avec :

n_p : nombre de cellules en parallèle.

I_{cc} : courant de court-circuit d'une cellule.

I_{scc} : somme des courants de court-circuit des (n_p) cellules en parallèle.

V_{co} : tension en circuit ouvert d'une cellule.

V_{sco} : tensions en circuit ouvert de (n_p) cellules en parallèle.

7. Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque a un comportement équivalent à une source de courant shuntée par une diode (fig-11). Le modèle est complété par une résistance série R_s due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière et une résistance parallèle (ou shunt) R_{sh} , qui provient des contacts métalliques et des résistances de fuite sur la périphérie de la cellule [11].

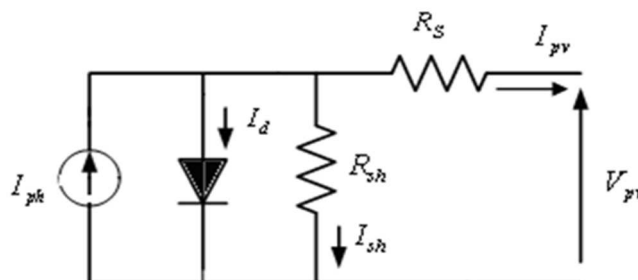


Figure I-11 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Du schéma de la figure (I-11) on aura l'équation suivante du courant :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (I-1)$$

$I = I_{ph}$; dans les conditions idéal, ou il n y aurai pas de pertes.

Avec :

I : courant de sortie du module PV (unité : Ampère),

V : tension de sortie du module PV (unité : Volt).

I_{ph} : courant photonique, reçu par la cellule sans aucune perte dans les conditions idéal.

I_D : courant de la diode.

I_{sh} : courant dans passant dans la résistance parallèle.

R_s : Résistance en série, (unité : Ohm).

R_{sh} : Résistance parallèle ou shunt, (unité : Ohm).

Ce modèle simple, et utilisable dans bon nombre de simulateurs, et permet aussi d'obtenir le comportement statique d'une cellule PV sous polarisation. Ainsi que le montre le schéma de la figure (I-11), une photopile se compose en réalité une résistance série et une résistance en dérivation (parallèle). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique tension-courant (V, I) à la sortie de la cellule, mais ces dernières ne seront pas les seules caractéristiques interne de la cellule, et ces paramètres sont définis par la technique de fabrication et le matériau utilisé par constructeur, ainsi ce dernier nous renseignera sur le rendement et le facteur de qualité de la photopile.

- **la résistance série** : résistance interne de la cellule PV qui dépend principalement de la résistivité au niveau des grilles collectrices, et qui accumule la somme des résistances en séries, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur de courant de court-circuit (I_{cc}).
- **La résistance parallèle (shunt)** : résistance due au courant de fuite au niveau de la jonction PN d'une cellule PV.
- **le rendement (η)** : Le rendement d'une cellule ou d'un module photovoltaïque est le rapport entre l'énergie électrique produit aux bornes de cette cellule ou module et l'énergie lumineuse reçue sur sa surface (ou énergie incidente).

Et il est donné par l'équation suivante :

$$\eta = \frac{P_{Max}}{P_i} = \frac{I_{Max} * V_{Max}}{G * S}$$

(1-2)

Le rendement est défini dans des conditions de test bien précises, qui sont STC (STC = Standard Test Conditions), et qui sont :

Emission lumineuse, **G = 1 000 W/m²**

Température, **T = 25 °C**

Conditions spectrales Air Mass 1.5 (composition du spectre identique au spectre solaire lorsqu'il traverse l'atmosphère, qui correspond à un angle d'incidence de 41.8° par rapport à l'horizontale)

Avec :

I_{max} et **V_{max}** : tension et courant maximum, aux bornes de la cellule PV.

P_i : puissance incidente produite par l'éclairement sur la cellule photovoltaïque.

P_{max} : puissance maximum potentiellement disponible à la sortie de la cellule PV.

- **Le facteur de forme** : celui-ci indique le degré d'idéalité de la photopile, soit le rapport :

$$FF = \frac{P_{Max}}{V_{co} * I_{cc}} \quad (1-3)$$

8. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

La modélisation mathématique des cellules solaires est indispensable pour toute opération d'optimisation du rendement ou de diagnostic du générateur photovoltaïque. Le module photovoltaïque est représenté généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés expérimentalement en utilisant la caractéristique courant-tension.

La modélisation de ces dernières s'impose comme une étape cruciale et a conduit à une diversification dans les modèles proposés par les différents chercheurs. Leurs différences se situent principalement dans le nombre de diodes, la résistance shunt finie ou infinie, le facteur d'idéalité constant ou non, ainsi que les méthodes numériques utilisées pour la détermination des différents paramètres inconnus.

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles que leurs précisions restent tributaire à la modélisation mathématiques des différents phénomènes physiques intrinsèques intervenant dans le processus de production d'électricité. Dans la plupart des travaux de la littérature, on trouve

principalement le modèle équivalent à quatre paramètres basé sur la modélisation mathématique de la courbe tension-courant.

Nous avons étudié un module en silicium monocristallin BP Solar BP585F présenté sur la figure (I-12) et dont les caractéristiques sous les conditions standards (1000 W/m², masse optique : AM 1.5, Température de cellule : 25 °C) sont données dans le Tableau (I-2) [12].



Figure I-12 : Panneau en silicium monocristallin BP Solar BP585F.

Grandeurs	valeur
Puissance nominale	80 W
Tension au MPP (V_{mp})	18,00 V
Courant au MPP (I_{mp})	4,72 A
Courant de court-circuit (I_{cc})	5.00 A
Tension de circuit ouvert (V_{co})	22.03 V
Facteur de forme (FF)	0.771
Nombre de cellules en série (N_s)	36
Nombre de cellules en parallèle (N_p)	4
Coefficient de sensibilité de la tension à la température μ_{co}	-0.086 V/K
Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température μ_{cc}	+0,0025 A/K

Tableau I-2 : Caractéristiques du module BP585F sous les conditions standards.

La cellule photovoltaïque est représenté par un circuit électrique figure (I-13) qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, les pertes sont modélisées par deux résistances, une résistance shunt, une résistance série, Le modèle fait donc intervenir les cinq

paramètres inconnus suivants : n , I_{ph} , R_s , R_{sh} et I_s , il est connu sous le nom L5P (Lumped, 1 Mechanism, Parameter) [13].

La résistance série R_s est due à la résistivité des différentes couches de la cellule émetteur, base et contacts métalliques (en particulier leur interface avec le semi-conducteur). Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. Ceci peut être réalisé en optimisant le contact métal/semi-conducteur, et en diminuant la résistivité du matériau utilisé. Cependant, un dopage trop élevé entraîne une augmentation de la recombinaison des porteurs.

La résistance parallèle (shunt) ou de court-circuit R_{sh} traduit quant à elle, la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur, causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible [14].

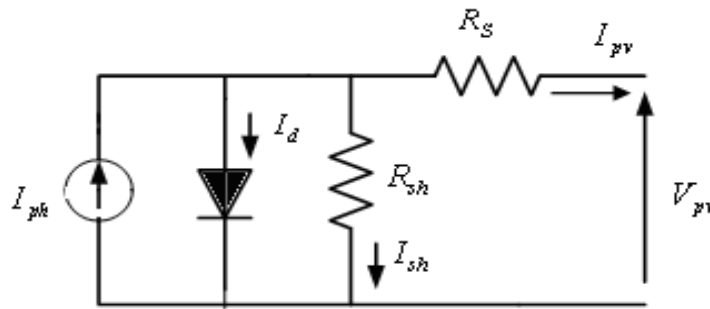


Figure I-13 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L5P.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{I-4}$$

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[\exp \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{V_t \cdot n} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \tag{I-5}$$

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \tag{I-6}$$

Avec :

$V_t = \frac{KT_c}{q}$: Représentant la potentielle thermodynamique

T_c : Est la température absolue

q : La constante de charge d'électron, $1.602 \cdot 10^{-23} C$

K : La constante de Boltzmann, $1.38 \cdot 10^{-23} J/k$

I_{sh} : Est le courant de résistance de shunt

Le courant photonique lié à l'éclairement, à la température et au courant photonique mesuré aux conditions de référence est donné par [15] :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} [I_{ph_ref} - \mu_{cc}(T_c - T_{c_ref})] \tag{I-7}$$

Avec :

I_{ph_ref} : Le courant photonique sous condition de référence [A]

μ_{cc} : Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température [A/K]

G, G_{ref} : L'éclairement réels et à la condition de référence [W/m²]

T_c, T_{c_ref} : La température de cellules, réelles et à la condition de référence [K]

E_{gap} : Énergie nécessaire a l'électron pour aller de la bande de valence à la bande de conduction [eV]

Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression [16] :

$$I_s = I_{s_ref} \cdot \left(\frac{T_c}{T_{c_ref}}\right)^3 \exp \left[\left(\frac{q \cdot E_{gap}}{n \cdot K}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_{c_ref}}\right) - \left(\frac{1}{T_c}\right) \right] \tag{I-8}$$

Dans les modèles photovoltaïques, on suppose généralement que $I_{ph} = I_{cc}$ parce que dans la photopile réelle, la résistance série est faible et la résistance parallèle est élevée [17].

Donc l'équation devienne :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[\exp \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{V_t \cdot n} - 1 \right] \tag{I-9}$$

Pour réaliser cette modélisation, nous avons utilisé MATLAB comme outil de tests et de simulation, figure (I-14).

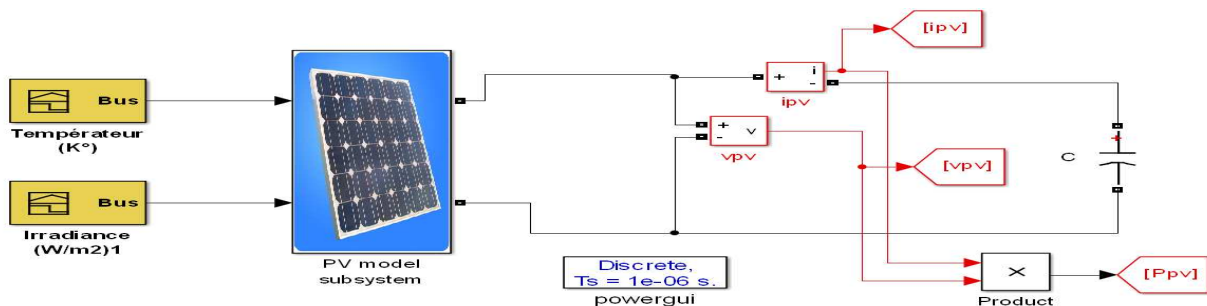


Figure I-14 : Modèle de simulation d'un générateur PV.

9. Influence de la température et de l'éclairement

La caractéristique d'une cellule PV (ou d'un générateur PV) est directement dépendante de l'éclairement et de la température.

Les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairements à température maintenue constante 25°C, figure (I-15), montrent clairement l'existence de maxima sur les courbes de puissance correspondant aux Points de Puissance Maximale P_{max} . Lorsque l'irradiation varie pour une température donnée, le courant de court-circuit I_{cc} varie proportionnellement à l'irradiation. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert V_{co} (à vide) varie très peu.

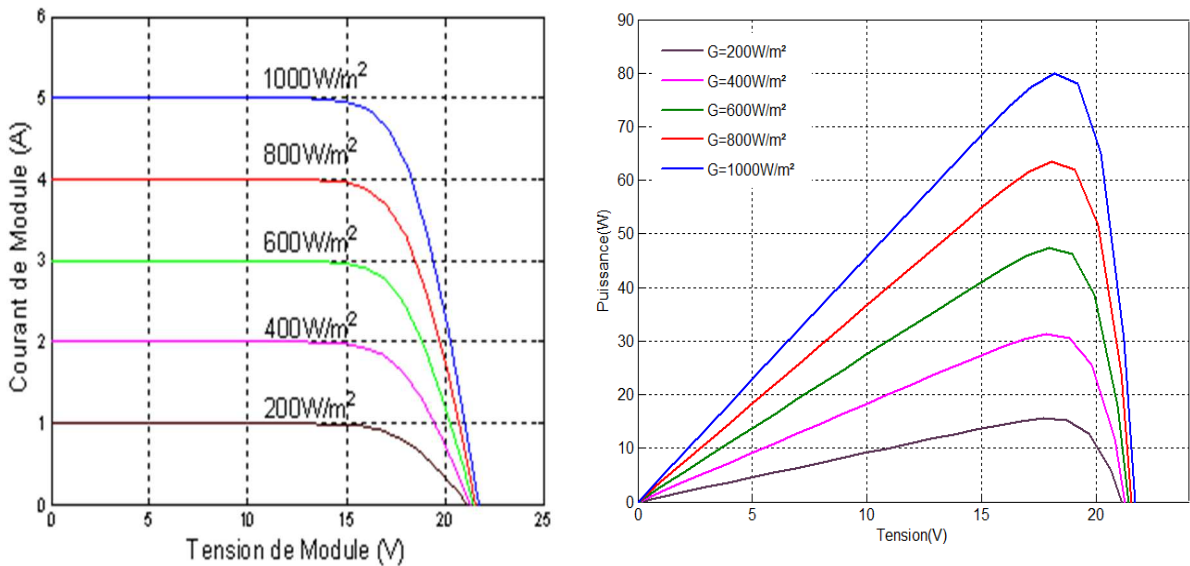


Figure I-15 : Evolution de la caractéristique I(V) et P(V) en fonction de l'irradiation.

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires. La température a également une influence sur la caractéristique d'un générateur PV. La figure (I-16) présente la variation des caractéristiques d'une cellule PV en fonction de la température à un éclairement donné. L'éclairement est ici fixé à 1000W.m⁻².

Par contre, si la température croît à irradiation constante, la tension à vide V_{co} décroît avec la température. Plus la température est élevée plus V_{co} est faible et le courant de court-circuit I_{cc} augmente avec la température. Cette hausse est nettement moins importante que la baisse de tension. L'influence de la température sur I_{cc} peut être négligée dans la majorité des cas.

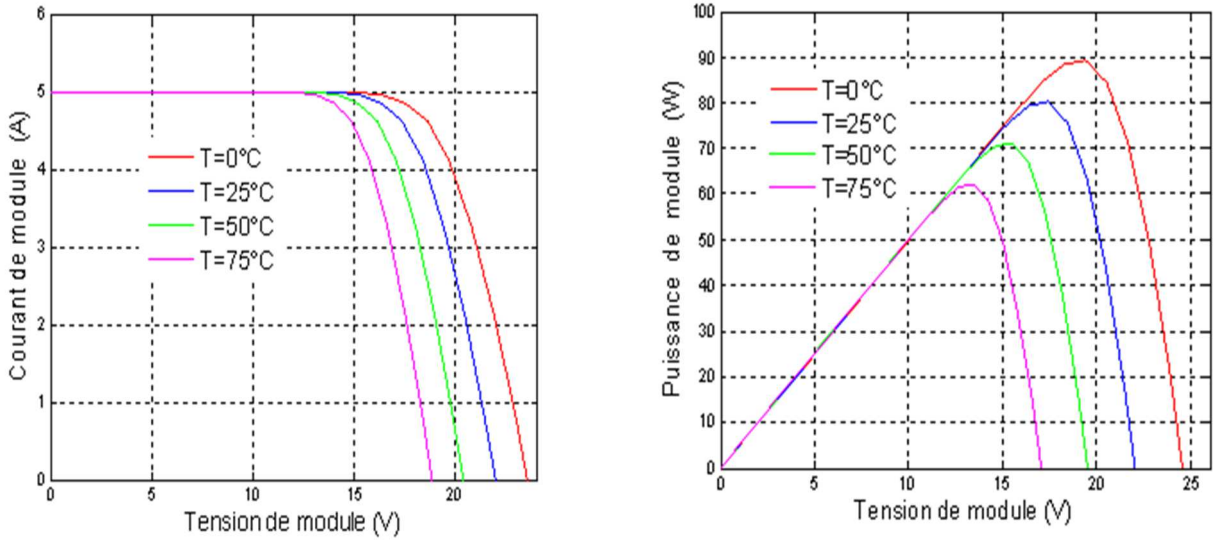


Figure I-16 : Evolution de la caractéristique I(V) (a) et P(V) (b) pour différentes températures.

La température et l'éclairement sont donc les deux principaux paramètres qui vont modifier la caractéristique d'un générateur PV. Ces deux paramètres devront donc être étudiés avec soin lors de la mise en place d'une installation PV.

10. Influence de la résistance série

Les figures (I-17et I-18) montrent l'influence de la résistance série sur la caractéristique I(V) et P(V) de la cellule photovoltaïque. La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension. Elle ne modifie pas la tension du circuit ouvert, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur de courant de court-circuit. L'augmentation de la résistance série se traduit par une diminution de pente de la courbe de puissance.

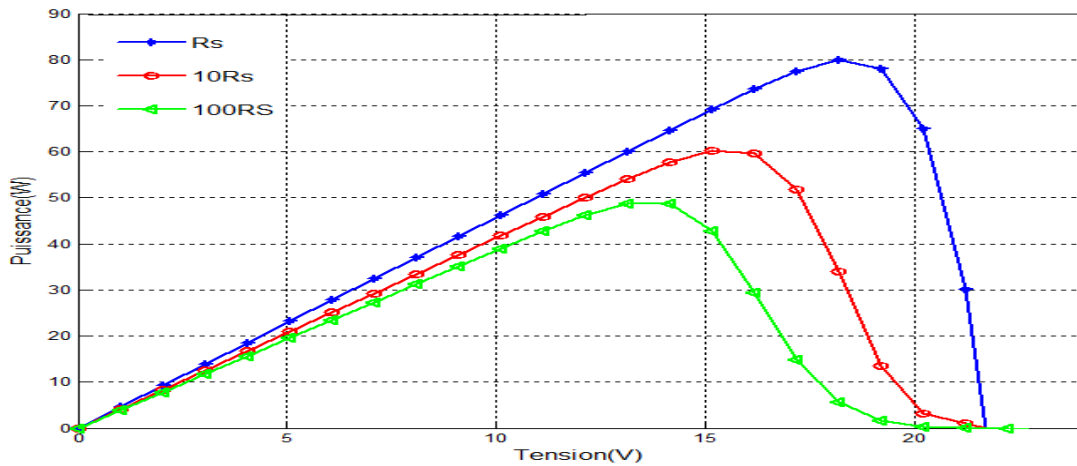


Figure I-17 : L'influence de la résistance shunt (R_s) sur la caractéristique P(V) d'une cellule.

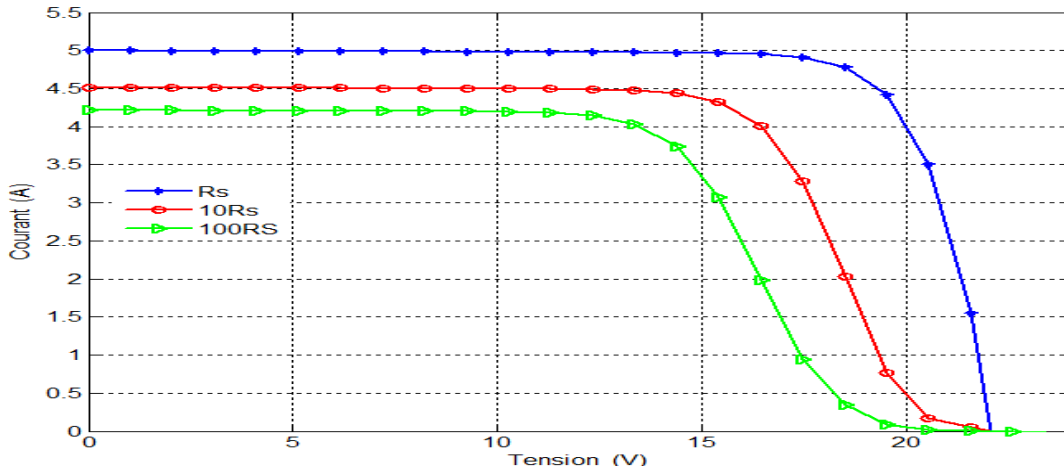


Figure I-18 : L'influence de la résistance shunt (R_s) sur la caractéristique I(V) d'une cellule.

11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une présentation des différentes méthodes de conversion de l'énergie solaire, qu'elle soit thermique, thermodynamique ou photovoltaïque, toutes ces méthodes ont un point commun lors de leur fonctionnement. C'est le fait de recevoir les rayonnements du soleil sur une surface spécialement faite pour cela, et la transformé ensuite en énergie (thermique ou électrique), mais c'est peut être bien la leur unique point commun, car beaucoup de paramètre, de constante et autres perturbations, influence cette opération, qu'elle soit interne ou externe. Nous avons ensuite présenté le fonctionnement d'une cellule en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque (L'effet photovoltaïque). Nous avons vu que la cellule PV présente une caractéristique I(V) non linéaire, présente un point de puissance maximal (PPM) caractérisé par un courant (I_{max}) et une tension (V_{max}) et qu'elle peut être modélisée par un circuit électrique simple. Nous avons présenté l'influence des différents paramètres extérieurs sur cette caractéristique.

Les caractéristiques d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température. Le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement.

CHAPITRE II

Modélisation et simulation d'un PV avec un convertisseur DC/DC

1. Introduction

Le générateur photovoltaïque est une source continue d'électricité. L'énergie délivrée varie en fonction de la température et de l'ensoleillement. Il est donc nécessaire d'utiliser un étage d'adaptation à base de convertisseurs de puissance pour adapter cette énergie avec les deux types de système auxquels ils seront raccordés (autonome ou connecté au réseau de distribution). Selon le besoin, ce convertisseur peut être soit un hacheur ou soit un onduleur.

Les systèmes photovoltaïques devraient être conçus pour fonctionner à leurs niveaux de puissance maximum de rendement pour n'importe quelle température et niveau solaire d'irradiation à tout moment. Le dernier facteur significatif qui détermine la puissance de sortie PV est l'impédance de la charge. Cependant, on devrait noter qu'une telle impédance n'est pas constante. Quand un générateur PV est directement relié à la charge, le système fonctionnera à l'intersection de la ligne de courbe et de la charge I-V qui peut être loin du point maximum de puissance (MPP). La production de puissance maximale est basée sur l'ajustement de ligne de charge sous changement de conditions atmosphériques. D'ailleurs, la charge, dans beaucoup de cas, exige un niveau de puissance qui est maintenue constante.

Le but de ce chapitre est l'étude d'un convertisseur DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques, Nous nous intéresserons plus spécifiquement au hacheur de type BOOST. Ainsi, on va décrire différentes commandes de MPPT d'un convertisseur DC/DC.

2. Introduction d'un étage d'adaptation

Afin de surmonter les effets peu désirés sur la puissance de sortie P-V et dessiner sa puissance maximale, il est possible d'insérer un convertisseur DC/DC entre le générateur PV et la charge comme on peut le voir sur la figure II-1, qui peuvent commander le suiveur du MPP, sans compter d'inclure les fonctions typiques assignées aux contrôleurs.

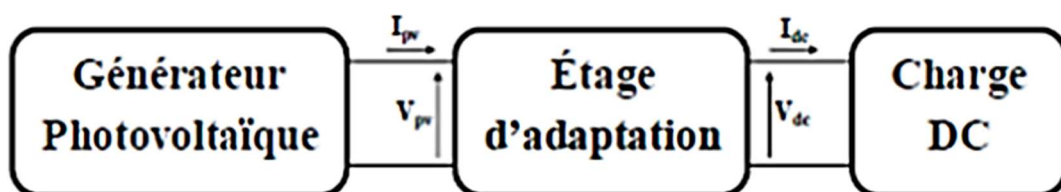


Figure II-1 : étage d'adaptation entre un GPV et une charge.

3. Le Convertisseurs DC-DC

Le convertisseur (continue-continue) est un convertisseur statique qui permet de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant).

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé, pour la conversion de puissance, afin d'éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques.

Pour cette raison, toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs), qui, dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement. Les convertisseurs DC-DC peuvent être vus comme des transformateurs DC-DC.

Les trois types de convertisseurs DC-DC utilisés le plus fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités sont les convertisseurs (Buck, Boost et Buck-Boost), appelé aussi [20] :

- Abaisseurs (Buck)
- Elévateurs (Boost)
- Elévateurs - Abaisseurs (Buck-Boost)

- Le convertisseur (Buck) est **Hacheur dévolteur** employé pour les faibles tensions. Dans les applications PV est employé comme chargeur de batteries et dans des systèmes de pompage de l'eau.

- Le convertisseur(Boost) est **hacheur survolteur** employé pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie l'emploient pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur.

- Le convertisseur (buck-boost) est capable d'augmenter et de diminuer la tension, tout comme le Cuk, et le Sepic, autres type de convertisseurs.

4. Le Principe de fonctionnement du hacheur BOOST

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur plus élevée. La figure (II-2) présente le schéma de principe du convertisseur survolteur. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure.

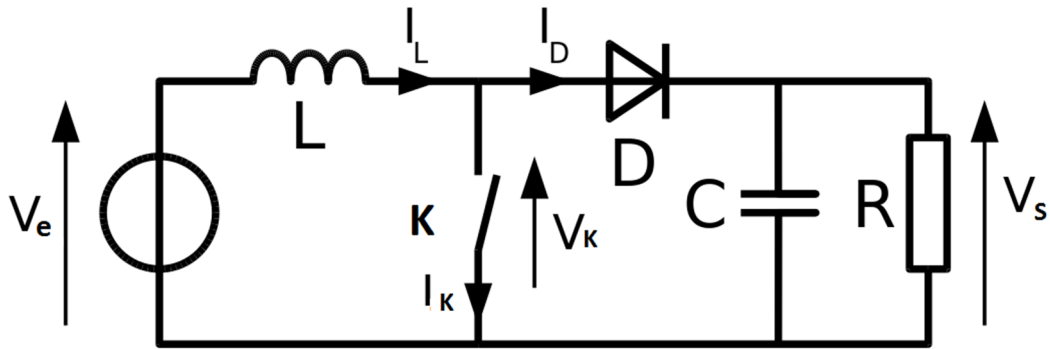


Figure II-2 : schéma électrique de base d'un hacheur Boost.

Déterminer le comportement réel de ce convertisseur, nécessite de connaître en détail son modèle mathématique.

Ce hacheur possède deux phases de fonctionnement bien distinctes, selon l'état de l'interrupteur K , comme on peut le voir sur la figure (II-2), on a ces deux phénomènes que voici [18] :

- **la phase active** lorsque l'interrupteur T est fermé et l'interrupteur D est ouvert. Durant cette séquence, le courant traversant l'inductance L va augmenter, linéairement, ce qui va créer une énergie, celle-ci sera stockée dans L . Le condensateur C fournit de l'énergie à la charge R , l'équation (II-1) et (II-2).

$$V_e = V_l \quad (\text{II-1})$$

$$I_c = I_l = -\frac{V_s}{R} \quad (\text{II-2})$$

- **la phase de roue libre** lorsque l'interrupteur T est ouvert et 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, dû aux deux tensions qui s'additionne.

$$V_l = V_e - V_s \quad (\text{II-3})$$

$$I_c = I_l - I_s = I_l - \frac{V_s}{R} \quad (\text{II-4})$$

Pour des analyses simplifiées, les prétentions suivantes sont faites :

- Tous les éléments sont idéals.
- Le temps de commutation est beaucoup plus court que la constante électrique de temps du circuit, donc une approximation linéaire peut être employée. Des formes

dans un convertisseur bien conçu dans l'état d'équilibre il devrait n'y avoir aucun entraînement significatif sur l'intensité et la tension pendant une période de commutation. Par conséquent, il est supposé que l'ondulation de commutation est beaucoup plus petite que le DC composantes du courant et de la tension. Cela signifie que le courant et la tension sont les mêmes au début et à la fin d'une période de commutation. C'est la petite approximation d'entraînement et il mène aux suivantes expressions de la tension de l'inducteur et le courant condensateur pendant une période de commutation T .

$$\begin{cases} \int_0^T V_l dt = 0 \\ \int_0^T I_c dt = 0 \end{cases} \quad (II-5)$$

Les expressions de la tension d'inductance et le courant du condensateur dans les deux cas de commutation sont évaluées et considéré sur une période de commutation.

$$\begin{aligned} \int_0^{\alpha T} I_c dt &= 0 \\ \int_0^T \frac{-V_s}{R} dt + \int_{\alpha T}^T I_c - \frac{V_s}{R} dt &= 0 \end{aligned} \quad (II-6)$$

$$I_l = \frac{V_s}{R} \cdot \frac{1}{1-\alpha}$$

Avec cette formule, le courant de l'inductance peut être calculée, et l'ondulation du courant d'inductance est un pourcentage de I_L .

$$\begin{aligned} \int_0^{\alpha T} V_l dt &= 0 \\ \int_0^T V_e dt + \int_{\alpha T}^T V_e - V_s dt &= 0 \end{aligned} \quad (II-7)$$

$$V_s = V_e \cdot \frac{1}{1-\alpha}$$

- **Ondulation du courant d'inductance**

Cependant il est important de dimensionner l'inductance et la capacité pour obtenir les performances données par la figure (II-3) afin de calculer la valeur de l'inductance.

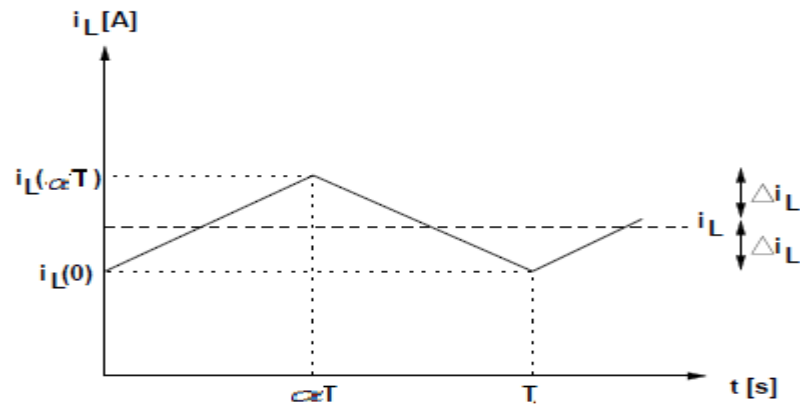


Figure II-3 : Ondulation du courant d'inductance.

L'ondulation peut être calculée comme suit :

$$\Delta I_l = \frac{1}{2} (I_l(\alpha T) - I_l(0)) \quad (\text{II-8})$$

De la définition de la tension d'inductance de la pente dans le premier sous-intervalle peut être calculée :

$$V_l = L \frac{dI_l(t)}{dt} \quad (\text{II-9})$$

$$I_l(\alpha T) = I_l(0) + \frac{V_e}{L} (\alpha T) \quad (\text{II-10})$$

$$\Delta I_l = \frac{1}{2} \frac{V_e}{L} (\alpha T) \quad (\text{II-11})$$

$$L = \frac{V_e}{2\Delta I_l} (\alpha T) \quad (\text{II-12})$$

- **Ondulation de la tension de condensateur**

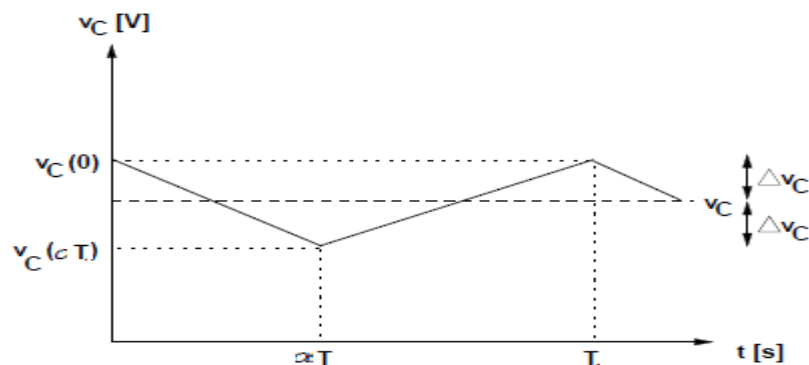


Figure II-4 : Ondulation de la tension de condensateur.

$$I_c = C \frac{dV_c(t)}{dt} \quad (\text{II-13})$$

$$\int_{\Delta V_c}^{-\Delta V_c} V_c dt = \frac{1}{C} \int_0^{\infty T} I_c dt \quad (\text{II-14})$$

$$-2\Delta V_c = \frac{1}{C} \frac{V_s}{R} \propto T \quad (\text{II-15})$$

$$C = \frac{V_s}{2\Delta V_c \cdot R} \propto T \quad (\text{II-16})$$

5. Principe de la recherche du point de puissance maximal

5.1. Généralités

Il existe des lois de commandes spécifiques nommées dans la littérature « commande extrême », pour des dispositifs physiques devant fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques même si, a priori ces points ne sont pas connus à l'avance, ces derniers pouvant même à n'importe quel moment se modifier pour diverses raisons. Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par la présence d'un à plusieurs Points de Puissance Maximum (PPM). Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (MPPT), lorsqu'il est appliqué aux systèmes énergétiques. Le principe de ces systèmes de gestion est d'effectuer à la fois une recherche du PPM tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance produite vers la charge.

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment.

La figure (II-5) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Pour une variation d'ensoleillement (cas -a-), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Pour une variation de charge (cas -b-), on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Dans une

moindre mesure, un dernier cas de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas c). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande, cette dernière n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents. En résumé, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV.

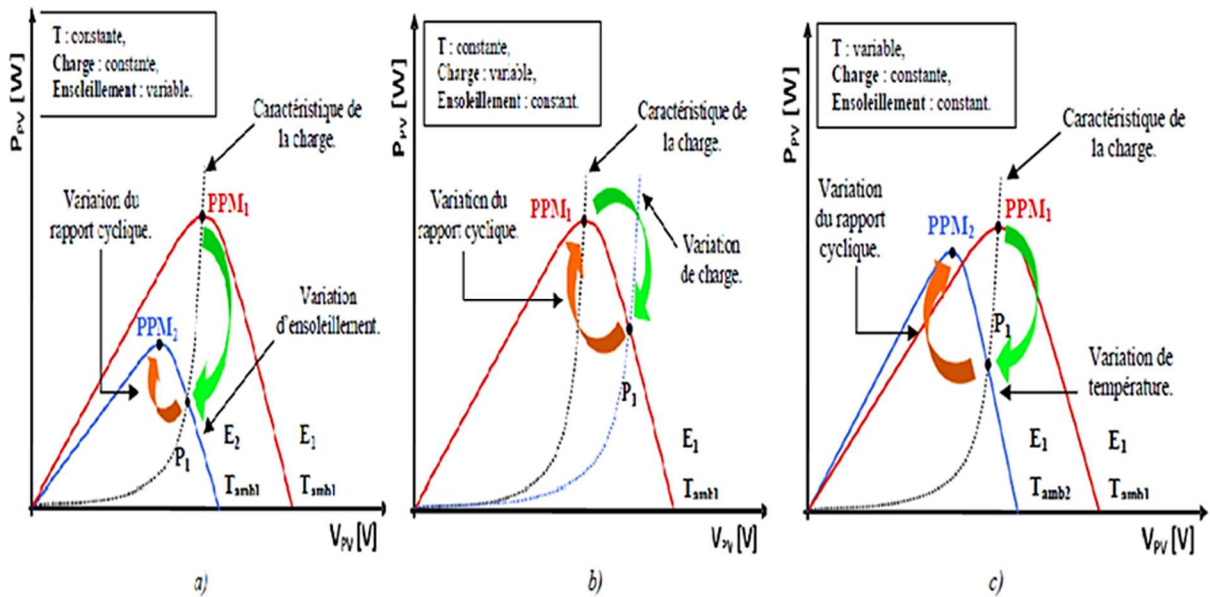


Figure II-5 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal a) suite à une variation d'insolation, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température.

5.2. Les commande MPPT à algorithmes performants

Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types d'algorithmes effectuant la recherche du PPM. Les trois méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement '*Hill Climbing*, *Perturb & Observ (P&O)*' et '*l'incrément de conductance (IncCond)*'. Pour une meilleure compréhension des performances de ces commandes, nous rappelons brièvement leurs différents principes dans les paragraphes suivants.

Comme montré sur la figure (II-6), la MPPT est relié à la sortie du GPV et à l'entrée du convertisseur DC/DC. Et son rôle est d'assurer le fonctionnement du générateur P-V à son MPP, en extrayant le maximum de puissance disponible.

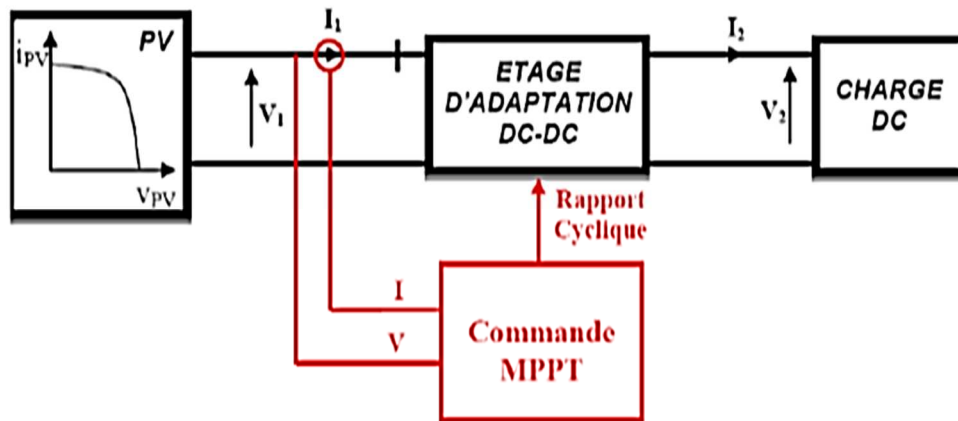


Figure II-6 : Schéma fonctionnel général du système P-V avec MPPT.

Dans le cadre de ce travail, on analyse la conception et la simulation d'une commande MPPT numérique « perturbation-observation » qu'on applique aux convertisseurs DC-DC survolteur.

5.3. Principe des commandes "Perturb and Observe" (P&O)

Le principe des commandes MPPT de type **P&O** consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte ainsi, comme l'illustre la figure II-6 on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre à convergence vers le nouveau PPM.

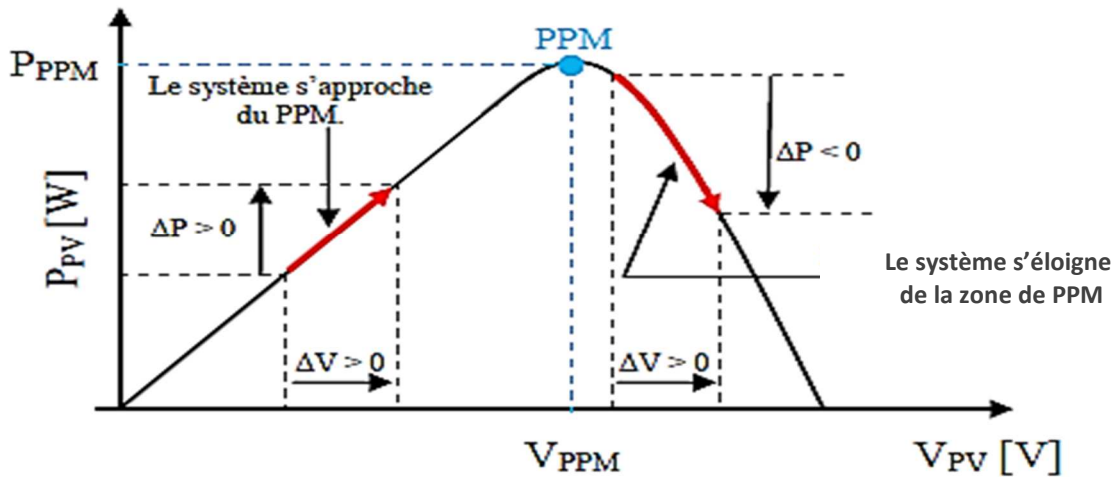


Figure II-7 : Caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$ d'un panneau solaire.

La figure (II-8) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser.

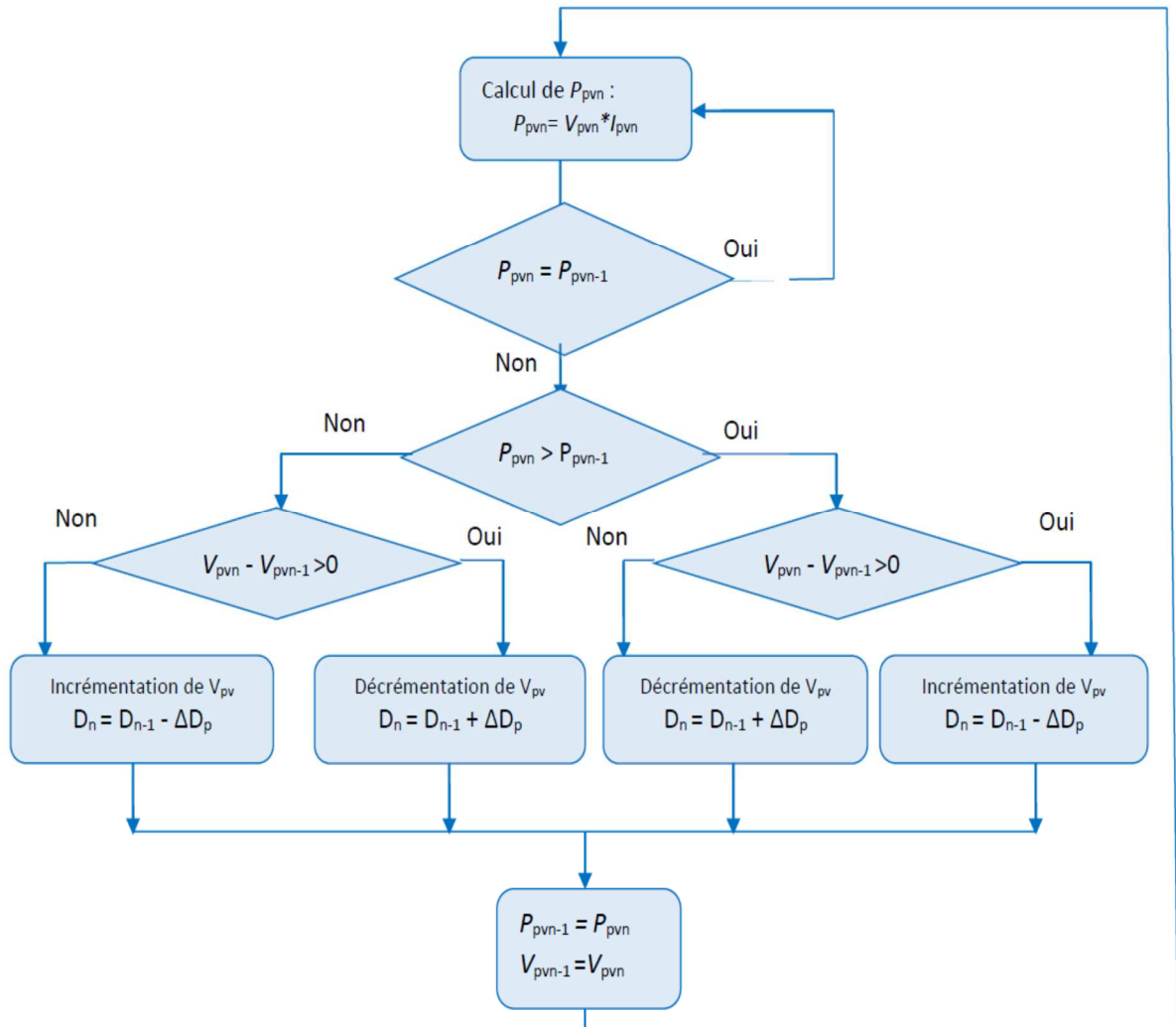


Figure II-8 : Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation.

7. Résultats de la simulation

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation » sont représentés de la figure (II-11) jusqu'à la figure (II-20).

Les figures (II-11, II-12, II-13, II-14) représentent les tensions et puissances de sortie du générateur et convertisseur :

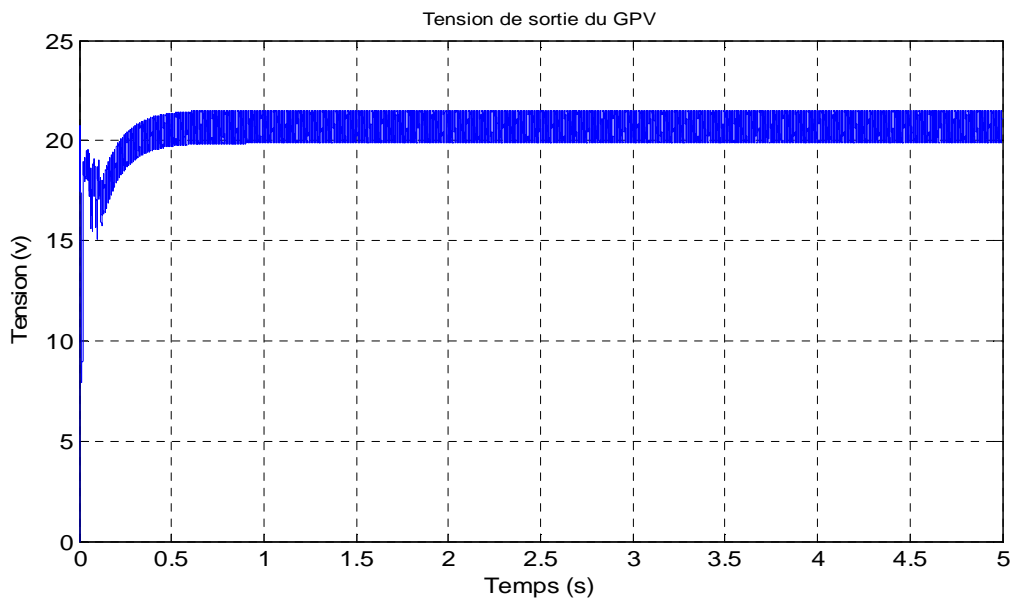


Figure II.11 : Tension de sortie du générateur photovoltaïque.

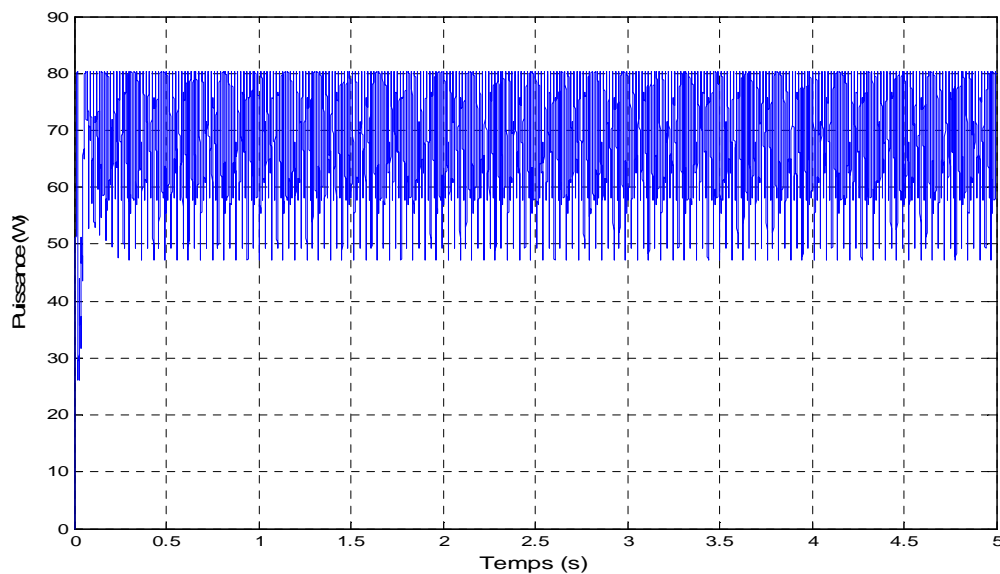


Figure II-12 : Puissance de sortie du générateur photovoltaïque.

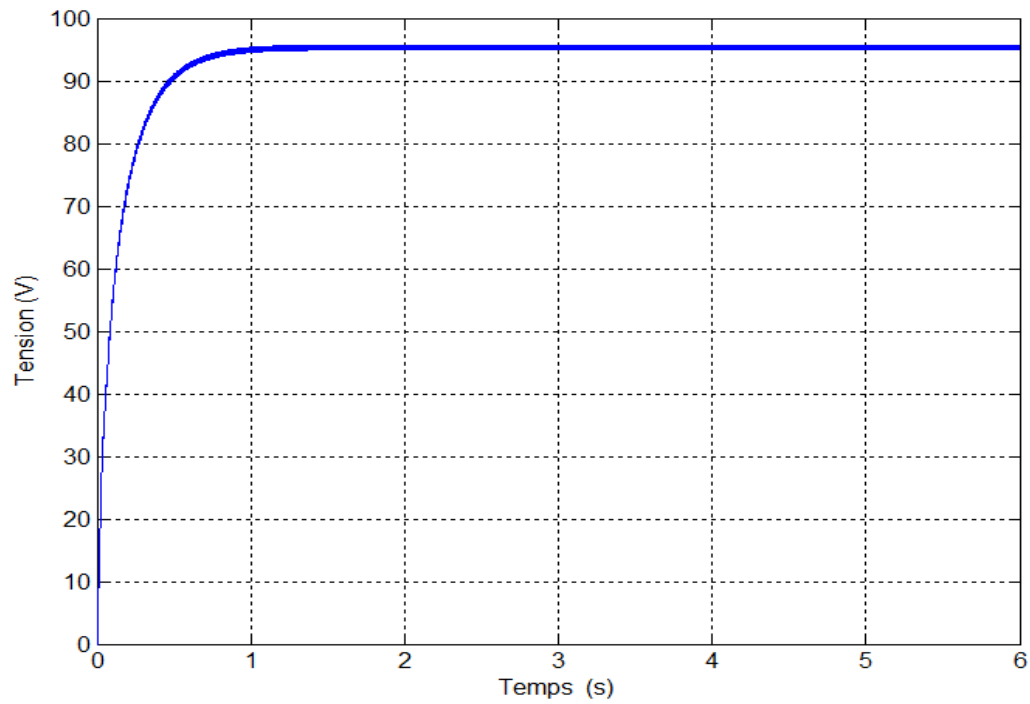


Figure II.13 : Tension de sortie du convertisseur DC-DC.

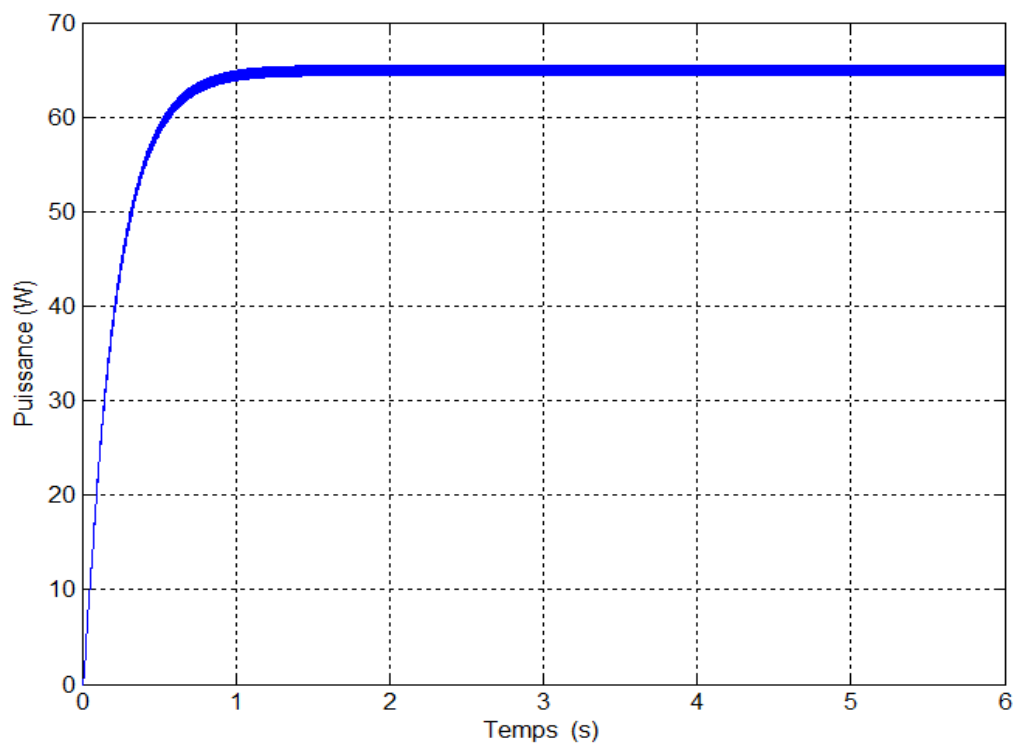


Figure II-14 : Puissance de sortie du convertisseur DC-DC.

Les figures (II-16, II-17) représentent l'évolution de la tension et de la puissance à la sortie du convertisseur selon l'évolution de la température montré dans la figure (II-15) :

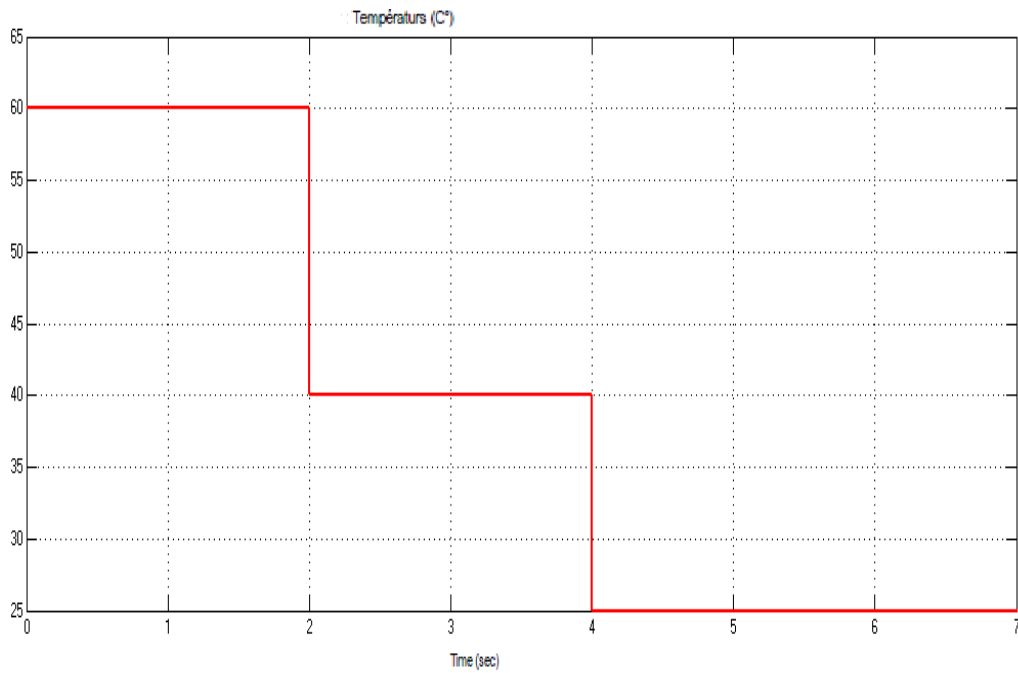


Figure II-15 : Evolution temporelle de la température.

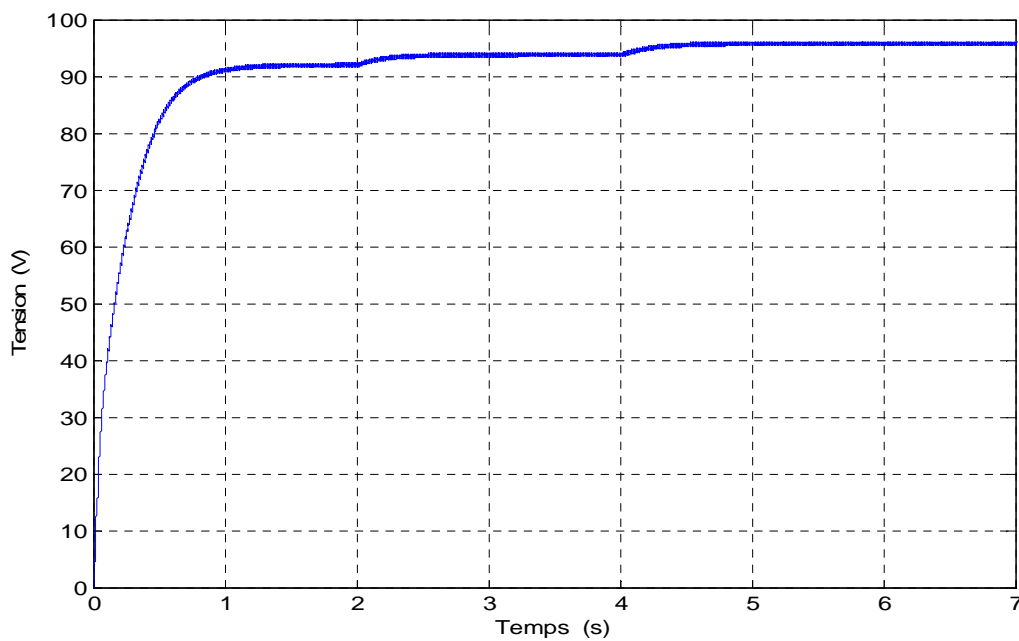


Figure II-16 : Evolution temporelle de la tension de sortie du convertisseur avec la variation de la température.

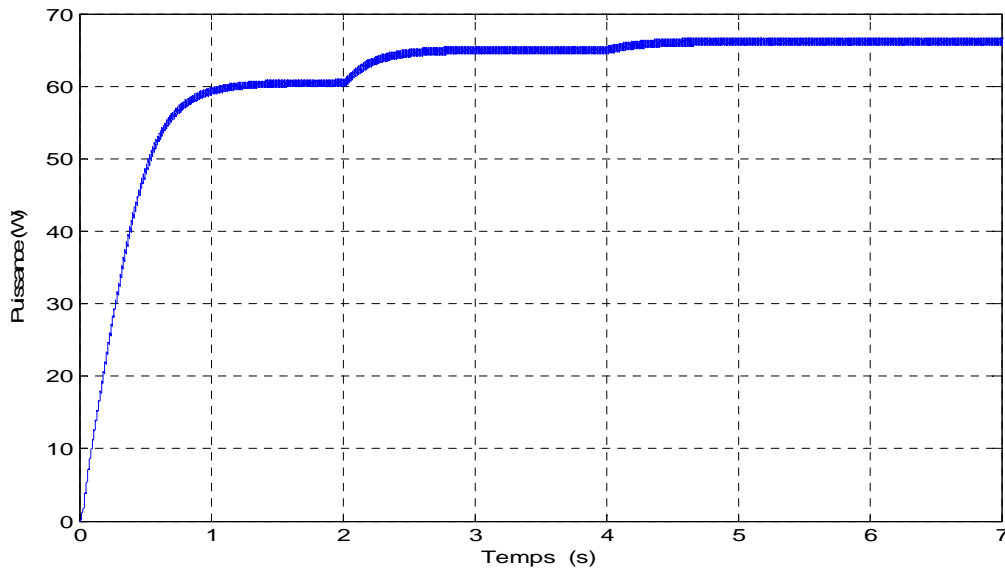


Figure II-17 : Evolution temporelle de la puissance de sortie du convertisseur avec la variation de la température.

Les figures (II-19, II-20) représentent l'évolution de la tension et de la puissance à la sortie du convertisseur selon l'évolution de l'éclairement montré dans la figure (II-15) :

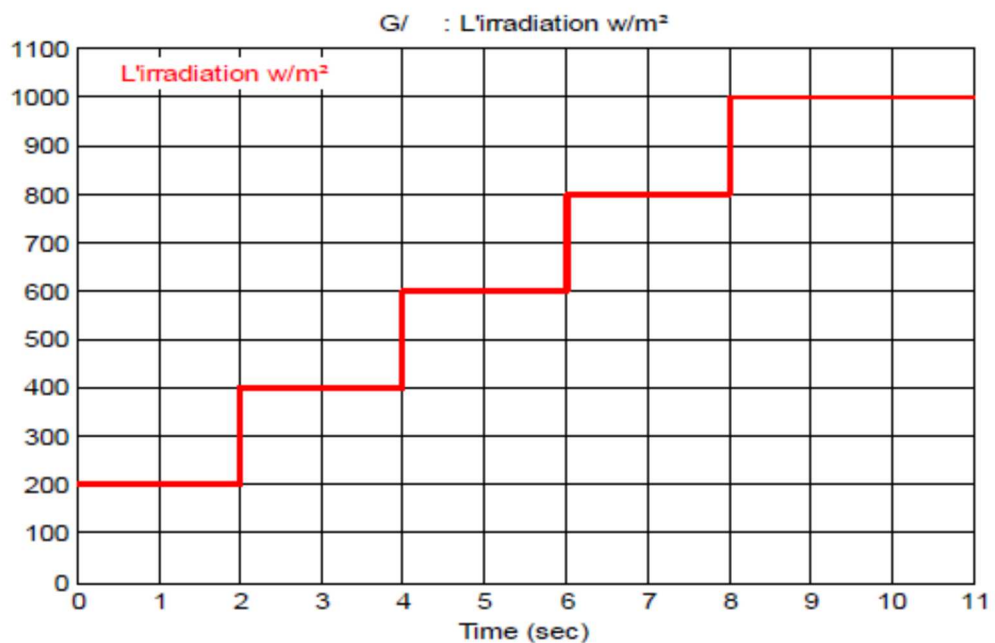


Figure II-18 : Evolution temporelle de l'éclairement.

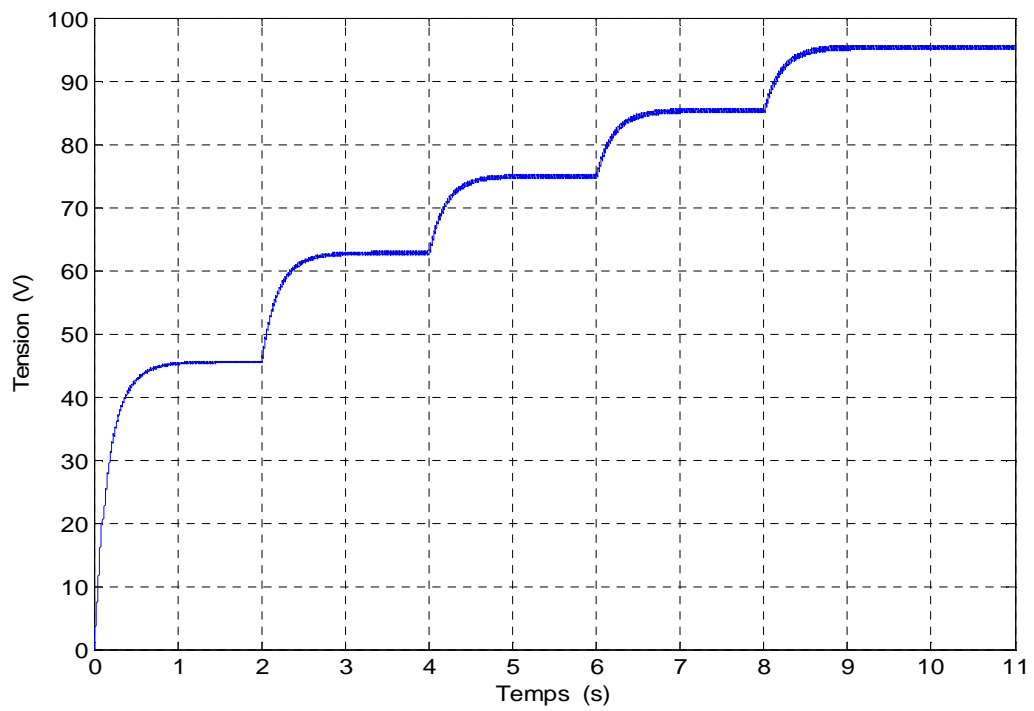


Figure II-19 : Evolution temporelle de la tension de sortie du convertisseur.

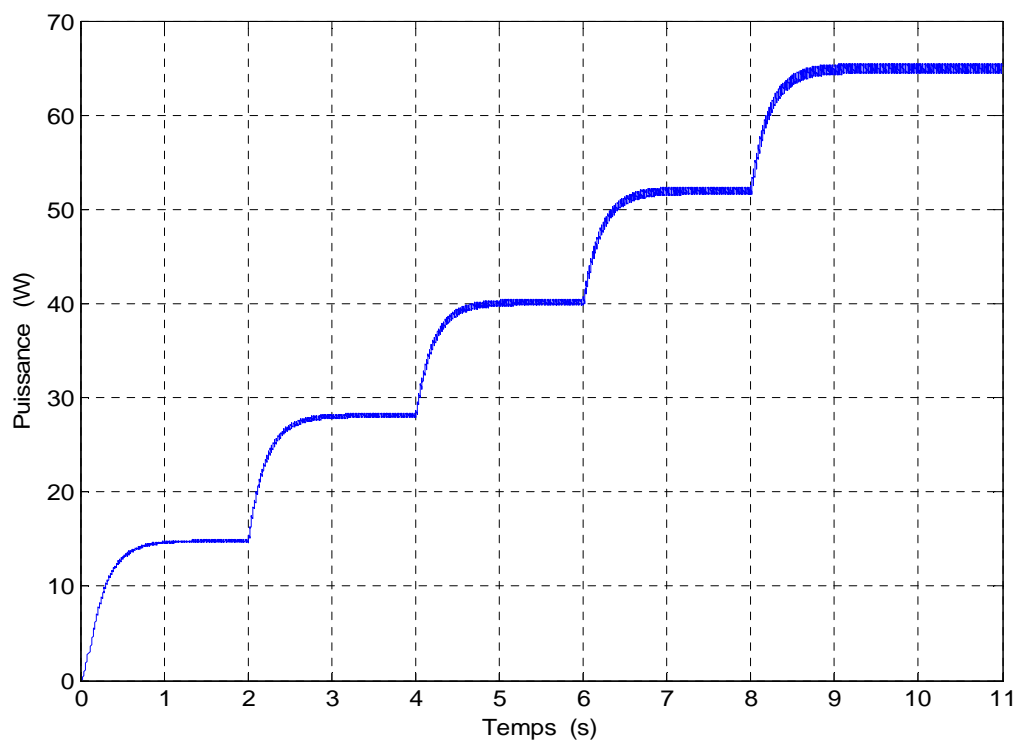


Figure II-20 : Evolution temporelle de la puissance de sortie du convertisseur.

8. Interprétation des résultats

On remarque que la tension à la sortie du convertisseur est environ quatre fois supérieure à celle de la sortie du panneau et cela grâce au hacheur boost qui a le rôle d'élever de tension tout en gardant la même puissance avec une faible diminution à cause des pertes au niveau des composants et le hacheur boost est abaisseur en courant.

La valeur de la tension a un lien direct et proportionnelle à l'intensité du rayonnement elle diminue avec la diminution de cette dernière. De même pour la puissance puisque elle dépend de la tension avec une diminution des ondulations.

On remarque bien l'influence de la température sur la tension de sortie du convertisseur, plus la température augmente plus la tension délivrée est faible cela implique que même la puissance délivrée diminue avec une augmentation de température.

Les résultats obtenus montrent que la commande MPPT fait osciller le point de fonctionnement du module photovoltaïque autour du point de puissance maximal (PPM), indépendamment à des variations de l'éclairement et de la température, ce qui implique le bon fonctionnement du contrôleur P&O. Plus la température augmente plus la tension délivrée est faible. Lorsque l'éclairement augmente traduit une augmentation de la tension.

9. Conclusion

Ce chapitre présente la modélisation, la commande et l'analyse d'un générateur Photovoltaïque avec un étage d'adaptation relié à une charge continue (DC). Le système d'adaptation se compose d'un hacheur fonctionnant comme contrôleur du point de puissance maximale. L'information fournie par le système MPPT basé sur l'algorithme de perturbation et d'observation P&O, ce système étant simulé dans l'environnement Matlab/Simulink. Ce modèle permet d'avoir l'influence des conditions climatiques sur les caractéristiques électriques (V-I) et (V-P). Les résultats de simulation obtenus démontrent la dépendance des grandeurs électriques d'un GPV aux changements climatiques. Montrant ainsi que les différentes grandeurs électriques (puissance, tension) à la sortie du générateur photovoltaïque sont ramenées à un nouveau point de fonctionnement optimal. Ce qui montre le bon fonctionnement du système d'adaptation MPPT basé sur la méthode P&O.

CHAPITRE III

Simulation de l'ensemble chaîne de conversion PV- machine à CC

3.2. Simulation d'un moteur à courant continu à excitation constante

La figure (III-4) montre le bloc de la MCC simulé sous MATLAB/SIMULINK, si on considère comme grandeur d'entrée la tension appliquée aux bornes de l'induit et comme grandeur de sortie la vitesse du moteur, nous obtenons le schéma bloc tension – vitesse.

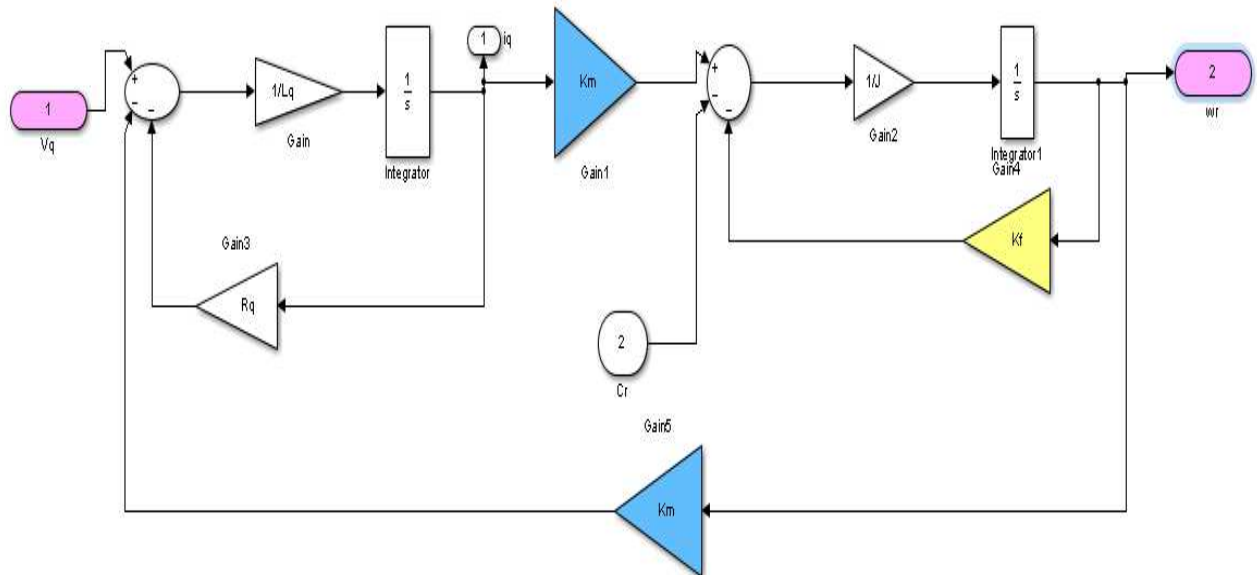


Figure III-4 : Bloc de simulation de la MCC.

3.3. Paramètres de la machine à courant continu utilisée

Les paramètres et caractéristiques de la MCC sont représenté dans le tableau (III-1) suivant :

Paramètres d'une machine à courant continu à excitation indépendante Fonctionnant à excitation constante $K_m = M_{fd} \cdot i_f$	
$V_q = 220 \text{ V}$	Tension d'induit
$R_q = 0.26 \text{ } \Omega$	Résistance de l'induit
$K_f = 0.001$	Coefficient de frottement
$J = 0.001$	Inertie des masses tournantes
$K_m = 0.6 ;$	Coefficient du couple
$L_q = 0.0078 \text{ H}$	Inductance propre de l'induit
$T_r = 1 \text{ N.M}$	Couple de pertes résistant constant

Tableau III-1 : Paramètres d'une MCC à excitation indépendante.

4. Visualisation des résultats

4.1. Moteur à courant continu sans couple résistant

Sur les figures (III.5, III.6 et III.7) nous avons les caractéristiques courant, vitesse et couple électromagnétique de la MCC sans couple résistant (à vide) en fonction du temps.

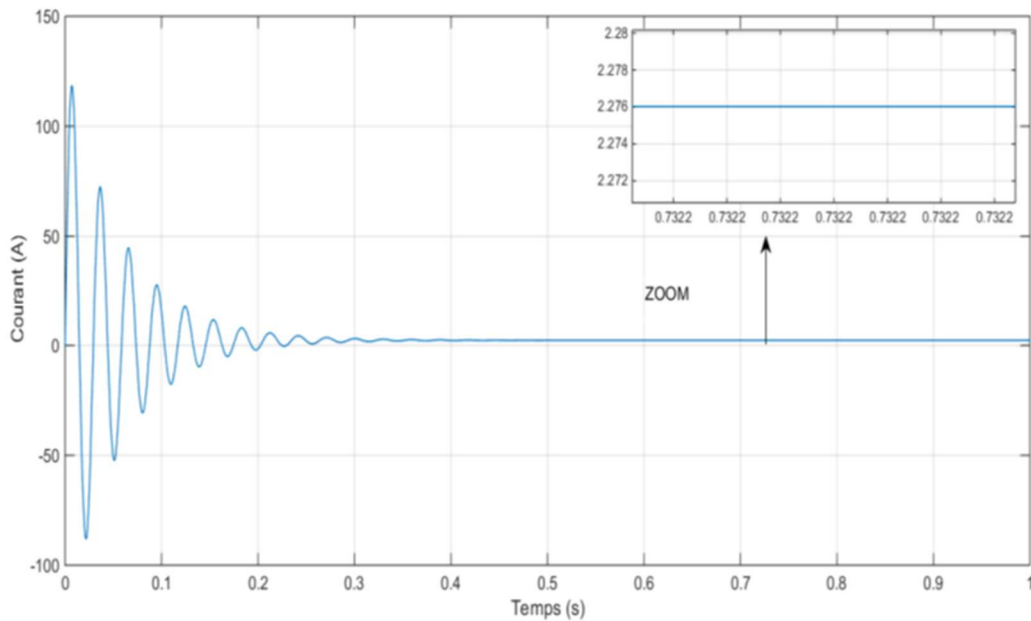


Figure III.5 : Caractéristique de courant en fonction du temps de la machine à cc sans couple résistant.

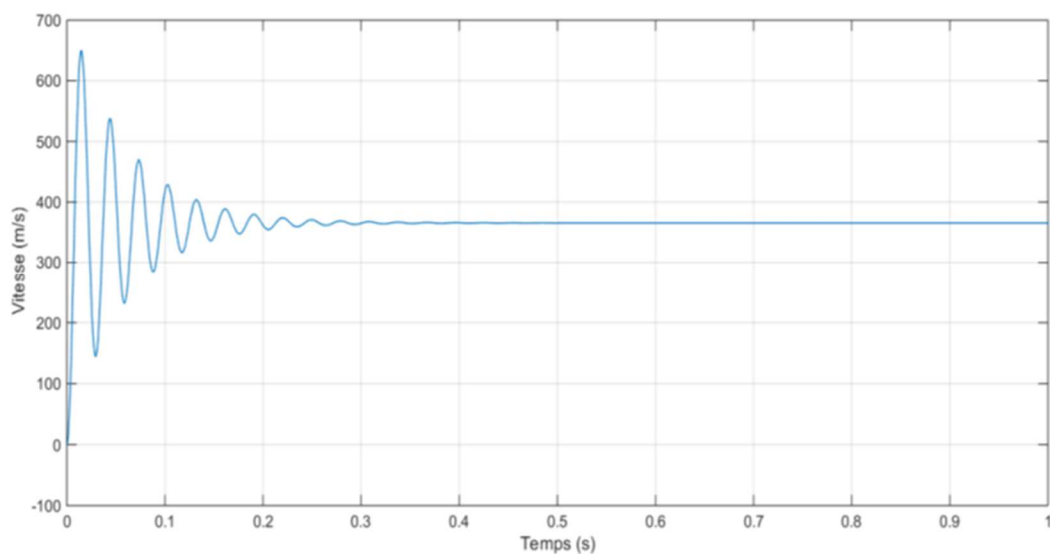


Figure III.6 : Caractéristique de la vitesse en fonction du temps de la machine à cc sans couple résistant.

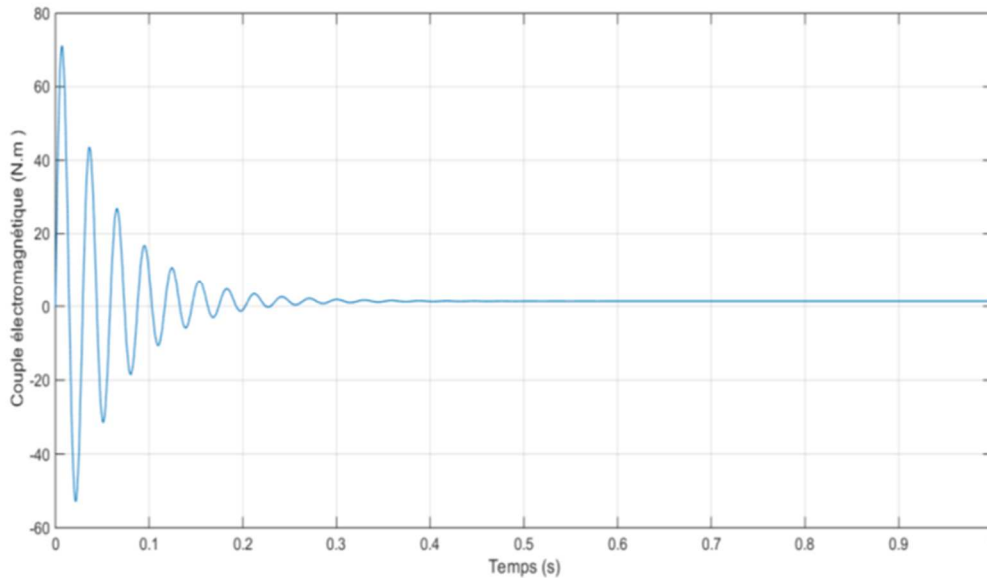


Figure III.7 : Caractéristique de couple électromagnétique en fonction du temps de la machine à cc sans couple résistant.

4.1.1. Interprétation des résultats

- Le moteur a fait à un appel de courant au démarrage pour lancer la machine en régime transitoire, par la suite il se stabilise en régime permanent à ($t= 0.3s$).
- En régime permanent le moteur tourne à une vitesse constante (le moteur fonctionne à vide), à cet instant la valeur du couple est très faible donc le courant d'induit est aussi faible : $I_q = 2.276 A$
- le couple électromagnétique évolue de la même manière qu'avec le courant d'induit, d'après le tableau (III-1), nous avons :

$$T_{em} = K_m \cdot I_q$$

$$T_{em} - T_r = J \frac{dw(t)}{dt} + K_f \cdot w(t)$$

Puisque ; $T_r = 0$ et $W(t) = cst$ donc ; $\frac{dw(t)}{dt} = 0$

$$T_{em} = K_f \cdot W(t) = K_m \cdot i_q = 0,6 \times 2.276 = 1.3656 N.m$$

- La vitesse augmente en fonction du temps puis se stabilise à une valeur constante, à cet instant le couple résistant est négligeable.

$$W(t) = 366.65 \text{ rd/s}$$

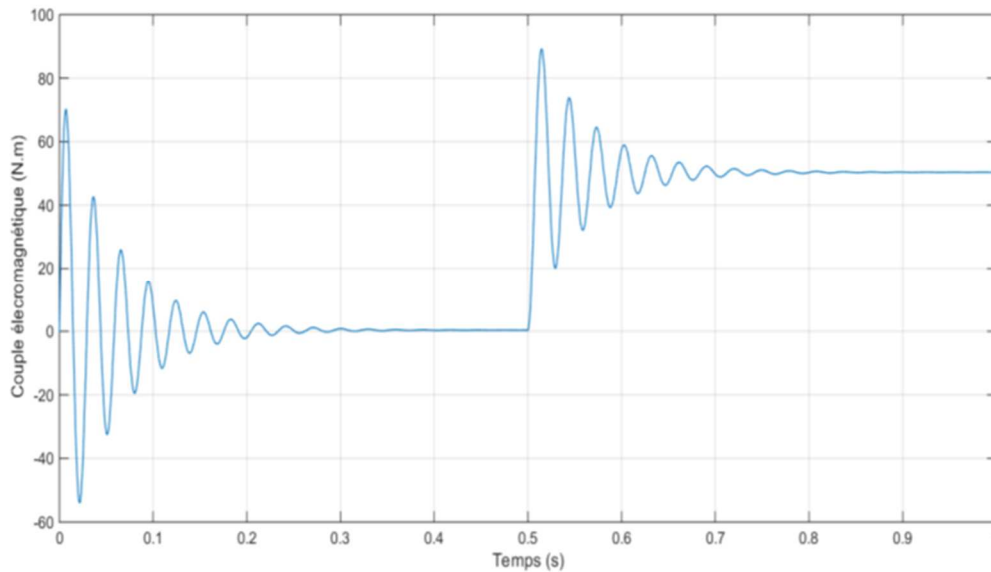


Figure III.10 : Caractéristique de couple électromagnétique en fonction du temps de la machine à cc avec couple résistant.

4.2.1. Interprétation des résultats

- Sur la figure (III-8) le moteur se stabilise à son régime permanent à l'instant ($t=0.3s$), puis fait un appel de courant quand on connecte la charge (couple résistant) à l'instant ($t=0.5s$) afin de revenir à un nouveau régime permanent, ce qui nous donne une nouvelle valeur du courant plus important qui est : $I_q = 83.8117$ A.
- Sur la figure (III-9), la vitesse du moteur diminue après la mise en connexion du couple résistant à ($t=0.5s$), et se stabilise à nouveau à une vitesse constante de : $W(t) = 351.13$ rd/s.
- Le couple électromagnétique évolue de la même manière qu'avec le courant d'induit, et nous avons : $T_{em} = 50.290$ N.m

3.2. Simulation d'un moteur à courant continu à excitation constante

La figure (III-4) montre le bloc de la MCC simulé sous MATLAB/SIMULINK, si on considère comme grandeur d'entrée la tension appliquée aux bornes de l'induit et comme grandeur de sortie la vitesse du moteur, nous obtenons le schéma bloc tension – vitesse.

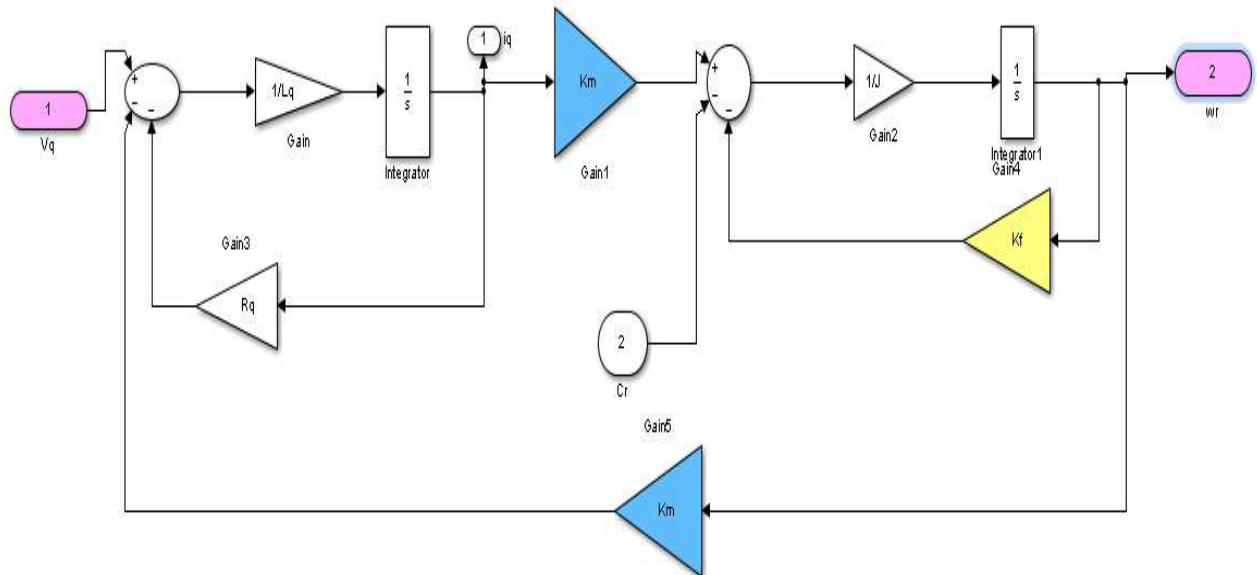


Figure III-4 : Bloc de simulation de la MCC.

3.3. Paramètres de la machine à courant continu utilisée

Les paramètres et caractéristiques de la MCC sont représenté dans le tableau (III-1) suivant :

Paramètres d'une machine à courant continu à excitation indépendante Fonctionnant à excitation constante $K_m = M_{fd} \cdot i_f$	
$V_q = 220 \text{ V}$	Tension d'induit
$R_q = 0.26 \text{ } \Omega$	Résistance de l'induit
$K_f = 0.001$	Coefficient de frottement
$J = 0.001$	Inertie des masses tournantes
$K_m = 0.6 ;$	Coefficient du couple
$L_q = 0.0078 \text{ H}$	Inductance propre de l'induit
$T_r = 1 \text{ N.M}$	Couple de pertes résistants constant

Tableau III-1 : Paramètres d'une MCC à excitation indépendante.

4. Visualisation des résultats

4.1. Moteur à courant continu sans couple résistant

Sur les figures (III.5, III.6 et III.7) nous avons les caractéristiques courant, vitesse et couple électromagnétique de la MCC sans couple résistant (à vide) en fonction du temps.

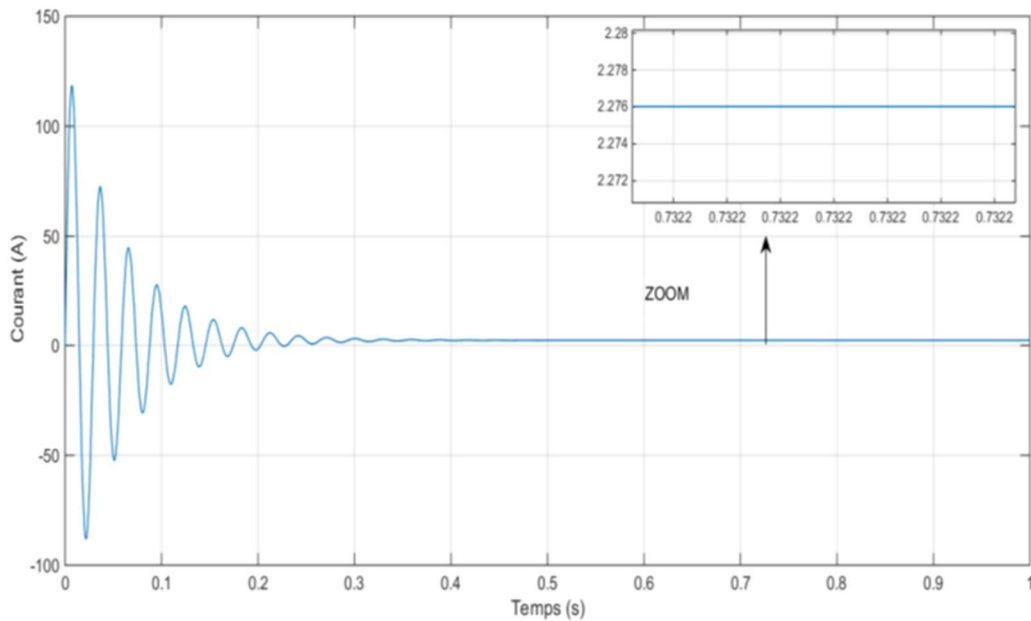


Figure III.5 : Caractéristique de courant en fonction du temps de la machine à cc sans couple résistant.

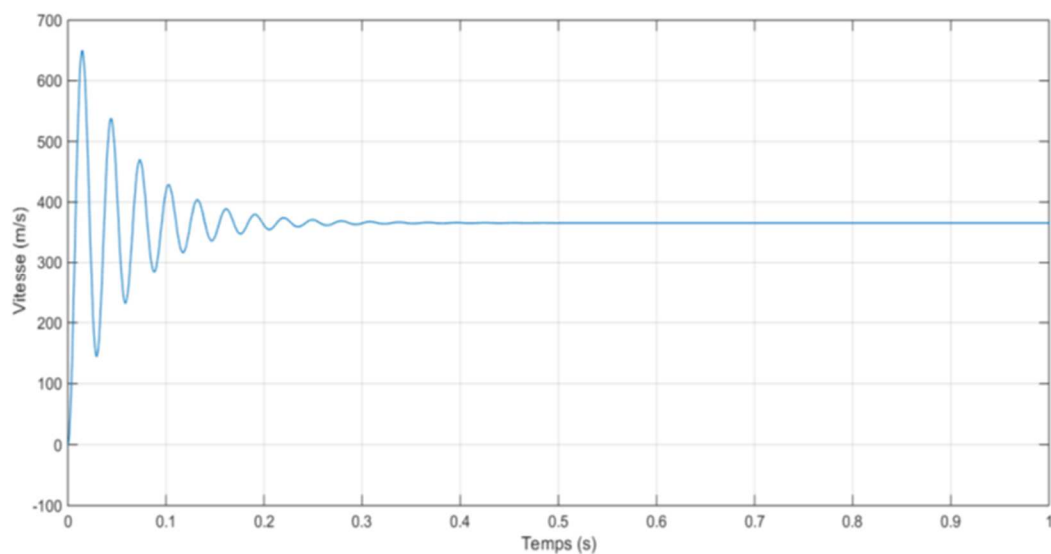


Figure III.6 : Caractéristique de la vitesse en fonction du temps de la machine à cc sans couple résistant.

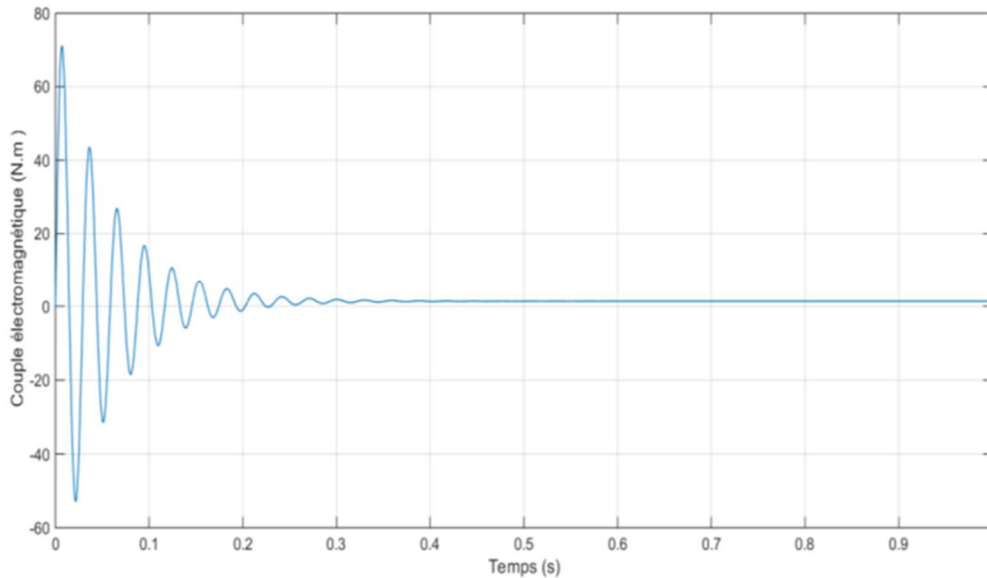


Figure III.7 : Caractéristique de couple électromagnétique en fonction du temps de la machine à cc sans couple résistant.

4.1.1. Interprétation des résultats

- Le moteur a fait à un appel de courant au démarrage pour lancer la machine en régime transitoire, par la suite il se stabilise en régime permanent à ($t= 0.3s$).
- En régime permanent le moteur tourne à une vitesse constante (le moteur fonctionne à vide), à cet instant la valeur du couple est très faible donc le courant d'induit est aussi faible : $I_q = 2.276 A$
- le couple électromagnétique évolue de la même manière qu'avec le courant d'induit, d'après le tableau (III-1), nous avons :

$$T_{em} = K_m \cdot I_q$$

$$T_{em} - T_r = J \frac{dw(t)}{dt} + K_f \cdot w(t)$$

Puisque ; $T_r = 0$ et $W(t) = cst$ donc ; $\frac{dw(t)}{dt} = 0$

$$T_{em} = K_f \cdot W(t) = K_m \cdot i_q = 0,6 \times 2.276 = 1.3656 N.m$$

- La vitesse augmente en fonction du temps puis se stabilise à une valeur constante, à cet instant le couple résistant est négligeable.

$$W(t) = 366.65 \text{ rd/s}$$

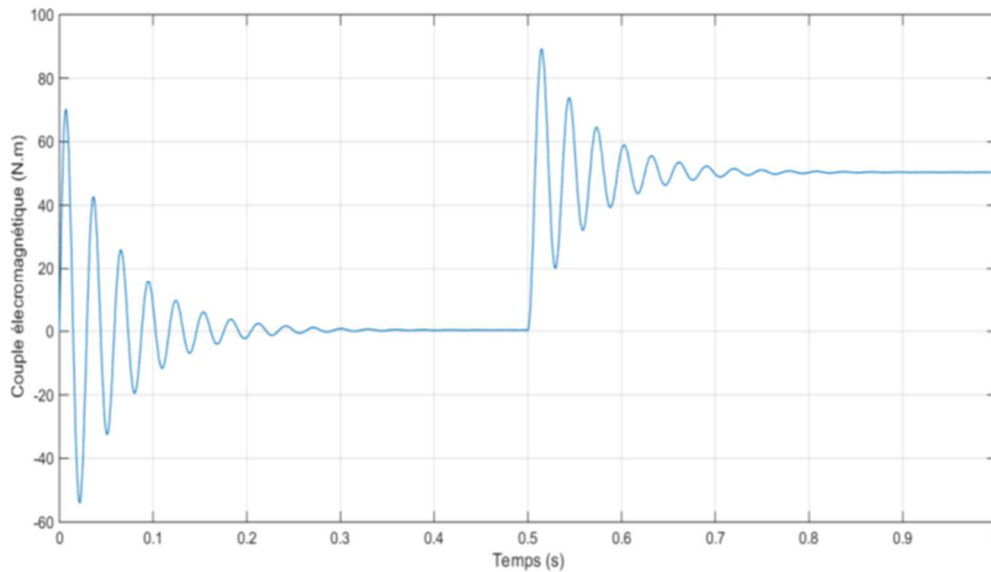


Figure III.10 : Caractéristique de couple électromagnétique en fonction du temps de la machine à cc avec couple résistant.

4.2.1. Interprétation des résultats

- Sur la figure (III-8) le moteur se stabilise à son régime permanent à l'instant ($t=0.3s$), puis fait un appel de courant quand on connecte la charge (couple résistant) à l'instant ($t=0.5s$) afin de revenir à un nouveau régime permanent, ce qui nous donne une nouvelle valeur du courant plus importante qui est : $I_q = 83.8117$ A.
- Sur la figure (III-9), la vitesse du moteur diminue après la mise en connexion du couple résistant à ($t=0.5s$), et se stabilise à nouveau à une vitesse constante de : $W(t)=351.13$ rd/s.
- Le couple électromagnétique évolue de la même manière qu'avec le courant d'induit, et nous avons : $T_{em} = 50.290$ N.m

CONCLUSION GENERALE

L'utilisation de l'énergie solaire dans les sites isolés pour différentes applications tel que le pompage d'eau présente un intérêt très important, néanmoins les générateurs photovoltaïques possèdent des inconvénients qui sont un rendement faible, un coût élevé et une dépendance au climat (température et ensoleillement).

La modélisation du système PV consiste à la mise en relations des différentes parties le constituant, la source primaire (température et ensoleillement) et le convertisseur statiques (le hacheur survolteur dit ; Boost) permettant la commande en tension du panneau photovoltaïque. Il s'agit donc d'optimiser le traitement et le transfert de l'énergie électrique au sein du système et en particulier au niveau du générateur, en faisant en sorte que celui-ci soit à chaque instant à son point optimal de fonctionnement. Cela est possible grâce à la méthode de poursuite du point maximum (MPPT).

Cette méthode assure une constance et une fiabilité du système photovoltaïque a assuré en permanence la production de l'énergie électrique, tout en négligeant la variation des facteurs naturels.

Dans ce travail nous avons opté pour une composition d'un panneau à quatre modules en série avec un Hacheur Boost. Les modules connectés en série assurent au système son besoin en courant, et le hacheur parallèle rehausse la tension selon les besoin de la machine à CC toutes en puisant dans le courant disponible.

Les résultats obtenus démontrent que la composition choisie (panneau a quatre modules en série avec hacheur parallèle) est parfaitement capable de subvenir aux besoins de la machine à courant continu. Et la commande MPPT assure la fiabilité et la constance de cet approvisionnement en énergie.

Références bibliographiques

- [1] K. Kassmi et M. Hamdaoui et F. Olivié 'Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique', université de Maroc, revue des énergies renouvelables, pp 451 – 462, 2007.
- [2] A. T.SINGO ' Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome' Thèse de doctorats, université Henri Poincaré, Nancy-I,2010.
- [3] On guidelines for the designations and specifications of optical and infrared - astronomical photometric passbands, by IAU Commission 25, in May 2013, http://www.iau.org/static/resolutions/IAU2012_English.pdf
- [4] CNRS, « Le rayonnement solaire », sur www.cnrs.fr, 4 novembre 2014, http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim/contenu/alternative/alter_etape1_1.html
- [5] Hubert Roussel 'rayon découvert et composition' archive <http://hubert.roussel.pagesperso-orange.fr/photologielivre/chapitre2/rayondecouvert/compositionray.html>
- [6] Charles Chauliaguet, Pierre Baratsabal et Jean-Pierre Batellier, 'L'énergie solaire dans le bâtiment' ; Édition Eyrolles, 1978, 202 p.
- [7] Énergie solaire, solaire passif et solaire a concentration thermodynamique, https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire#cite_note-13
- [8] Histoire des énergies solaire, http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=L%27histoire_des_%C3%A9nergies_solaires#cite_note-9
- [9] (En) « NPD Solarbuzz predicts hard times for thin-film PV », photon-international.com, 2013 août.
- [10] Romain Guillo, Master Communication & Multimédia - l'ICOM (institut de la communication) Université Lumière Lyon 2, 2008, http://www.ecosources.info/dossiers/Types_de_cellules_photovoltaiques
- [11] Les caractéristiques électriques des cellules et modules, <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16696>

- [12] T.U. Townsend « A Method for Estimating the Long Term Performance of Direct-Coupled Photovoltaic Systems ». MS Thesis, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 1989.
- [13] J.A. Gow and C.D. Manning « Development of a Photovoltaic Array Model for Use in Power Electronics Simulation Studies ». IEE Proceedings on Electric Power Applications, Vol. 146, N°2, pp. 193 - 200, 1999.
- [14] Petibon Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [15] Nikhil J.Anthony « Thermal analysis of a solar water distillation and electricity generation system ». A Thesis submitted to the Department of Mechanical Engineering in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science Degree Awarded: Fall Semester, 2008.
- [16] Salima. Kebaili. Achour. Betka « Efficiency Model Of DC/DC PWM Converter Photovoltaic Applications ». GREEDER, Amman-Jordan, March 31 – April 2, pp1-5, 2009.
- [17] A. Oi, Design and simulation of photovoltaïque water pumping système, université de Californie, USA, Septembre 2005.
- [18] Benoît Issartel - Projet P10AB04, 'Conception d'un convertisseur DC/DC de type boost' p4.
- [19] Robert Chauprade, Commande électronique des moteurs à courant continu – À l'usage de l'enseignement supérieur, écoles d'ingénieurs, maîtrise, IUT, Paris, éd. Eyrolles, coll. « EEA », 1975, 243 p., p. 15-32 et 148-150.
- [20] Jean NIARD, Jean-Claude GALLOIS. Electricité : Machines électriques et électronique, Paris Nathan 1995. 271p.