

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministre De L'enseignement Supérieure Et La Recherche Scientifique
Université 20 Aout 1955 Skikda
Faculté De Technologie
Département De Génie Electrique



Mémoire

En Vue De l'Obtention Du Diplôme De Master

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Thème

**Etude et simulation du couplage d'un moteur a
courant continue à un système Photovoltaïque**

Soutenu Publiquement le : 06 /07/2022

Présente par :

HADJOUJDI HOUSSEM EDDINE

KAREK TOUFIK

Devant le jury composé de :

Président : Pr. BOUDEBBOUZ OMAR

Université du 20 aout 1955 –Skikda

Rapporteuse : Pr. BOUKADOUM AHCENE

Université du 20 aout 1955 –Skikda

Examineur :Dr. LAKHDAR BOURAS

Université du 20 aout 1955 –Skikda

Année 2021 – 2022

Remerciements

Avant de présenter ce travail, tout d'abord, nous tenons à remercier notre grand seigneur Dieu tout puissant pour nous avoir donné la foi en lui, d'avoir éclairé notre route et de nous avoir guidé dans le meilleur et le bon chemin.

Nous remercions tout d'abord notre encadrants, Boukadoum Ahcene qui nous suivi et dirigé tout au long de la réalisation de ce travail, et qui a été d'une aide très précieuse sur le plan scientifique et moral.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à tous les enseignants de la filière Electrotechnique qui nous ont aidés tout au long de notre cursus universitaire. Nous tenons à remercier également, les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger et d'évaluer notre travail.

Nos remerciements vont également à nos collègues de promotion pour leur soutien et encouragement.

Nous remercions infiniment nos parents, nos frères et nos sœurs, qui nous a encouragé et aidé à arriver à ce stade de ma formation.

Enfin, nous tenons à exprimer nous sincères gratitude pour tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail aux plus cher à mon cœurs:

*A mes parents ma mère « Akila » et mon père « Hocine » qui
m'ont tant donné, mes parents qui m'ont tant aimée, mes parents
à qui je voue toute ma fierté.*

A mes chers frères : « Amjed » et « Mohamed » que j'aime tant.

A mes cousines : «Aymen», «Assil» et tous mes cousins.

A tous mes amies et surtout mon binôme« Toufik ».

*A mon promoteur : «Bokadoum Ahcene » , et mes professeurs, et
tous ceux qui mon aixé à l'élaboration de ce travail.*

A tous la promotion de électrotechnique industriel 2021/2022.

Hadjoudji Housseem Eddine

Dédicaces

*C'est avec une grande gratitude et des mots sincères, que je dédie
ce modeste travail à mes chers parents qui ont sacrifié leur vie
pour ma réussite.*

*A mon très cher père pour avoir toujours cru en moi et pour ses
nombreux sacrifices,*

A ma très chère mère pour son soutien et ses encouragements,

A tout ma famille et spécialement mon frère et mes sœurs,

A tous mes amis et mes proches où qu'ils soient,

*A HADJOUJI Housseem mon binôme de ce travail que je leur
souhaite le bon courage, et une belle vie.*

A toute la promotion de la spécialité électrotechnique industriel

KAREK Toufik

Liste des symboles

Chapitre I

D_s : Diamètre de soleil [m].

D_t : Diamètre de la terre [m].

L_{ts} : Distance moyenne solaire – terre [m].

E_{pht} : Energie de photon [J].

λ : La longueur d'onde [m].

h : Est la constante de Planck [JS⁻¹].

C : Étant la vitesse de propagation [mS-1].

L : latitude du lieu.

N : nombre de jour entre l'équinoxe de printemps

α : L'angle de l'inclinaison

I_{cc} : Le courant de court-circuit [V].

V_{co} : La tension en circuit ouvert [V].

η : Le rendement de conversion d'énergie

I_D : Intensité aux bornes du diode [A].

I : Intensité aux bornes du générateur [A].

I_S : Le courant de saturation de la diode [A].

V_c : Tension aux bornes du capteur [V].

I_{ph} : courant de photon [A].

R_s : Résistance série [Ω].

R_p : Résistance shunt (ou parallèle) [Ω].

q : Charge de l'électron [C].

k : Constante de Boltzmann [J/K].

P_{pv} : la puissance disponible en sortie du GPV [W].

V_{pv} : la tension à la sortie du GPV [V].

I_{pv} : le courant de sortie du GPV [A].

V_{CONS} : la somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série [V].

I_{CCNS} : courant de court-circuit de N_s cellules en série [A].

A : le facteur d'idéalité de la diode compris entre 1 et 2

I_{CCNP} : la somme des courants de court circuit de (N_p) cellule en parallèle [A].

V_{CCNP} : tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle [V].

G : l'éclairement fixe [W/m^2].

Chapitre II

α : Le rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur.

T_e : Etant la période des impulsions.

f : Fréquence de découpage.

V_0 : La tension moyenne aux bornes de la charge [V].

V : La source fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance [V].

V_L : La tension moyenne aux bornes de l'inductance [V].

P_{pvn} : La nouvelle puissance [W].

P_{pvn-1} : L'enceint puissance dans le temps (t-1) [W].

V_{pvn} : La nouvelle Tension [V].

V_{pvn-1} : L'enceint Tension dans le temps (t-1) [V].

V_{pv} : Tension du générateur PV [V].

I_{pv} : Courant du générateur PV [A].

P_{pv} : Puissance du générateur PV [W].

Chapitre III

E : La force électromotrice **FEM** [V]

F : La force de Laplace

L : Longueur du conducteur [m]

B : L'intensité du champ magnétique [Weber]

P : Nombre de pair de pôles de la machine

N : Nombre de conducteurs actifs de la périphérie de l'induit

a : Nombre de paires de voies de l'enroulement entre les deux balais

n : Fréquence de rotation de l'induit [t/s]

Φ : Flux sous un pôle de la machine [Webers]

K : Constante de la force contre électromotrice [V/rad.s⁻¹]

P_{em} : Puissance électromagnétique [W]

I_n : Courant nominal [A]

I_a : Courant d'induit [A]

I_f : Courant d'excitation [A]

V_f : Tension d'alimentation du circuit inducteur [V]

R_a : Résistance de l'induit [Ω]

- R_f : Résistance de l'inducteur [Ω]
- L_a : Inductance propre de l'induit [H]
- L_f : Inductance propre de l'inducteur [H]
- Ω : Vitesse de rotation [rad/sec]
- Ω_r : Vitesse de rotation [rad /s]
- Ω_n : Vitesse nominale de rotation [rad/sec]
- K_m : Constante de couple du moteur [V/rad.s-1]
- Φ : Flux de l'induit
- C_{em} : Couple électromagnétique de la machine [Nm]
- C_m : Couple mécanique [Nm]
- C_r : Couple résistant [Nm]
- K : La constante de la F.C.E.M [V/rad.s⁻¹]
- P_a : La puissance absorbée [W]
- P_u : La puissance utile [W]
- P_f : Les pertes fer [W]
- P_{je} : Les pertes joules [W]
- P_m : Les pertes mécaniques [W]
- M_{fd} : Inductance mutuelle entre induit et inducteur [H]
- J : Moment d'inertie [Kg.m²]
- f : Coefficient de frottement [Nm.s/rad]
- K_p : Gain proportionnel du correcteur PI
- K_i : Gain intégral de correcteur PI
- Ω_r : Vitesse de rotation [rad /s]
-

Liste des abréviations

PV : photovoltaïque.

GPV : générateur photovoltaïque.

FF : Le facteur de forme.

PPM : Le point de puissance maximal.

RS : La réponse spectrale.

IQE : Le rendement quantique interne.

EQE : Le rendement quantique externe.

PPM : Point de Puissance Maximale.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

P&O : Perturbation et Observation.

IncCond : Incrémentation de Conductance.

DC: Courant Continu.

D : la diode de roue libre.

FEM : Force électromotrice

MCC : Moteur à courant continue

PI : proportionnel, intégrale

Liste des figures

Figure I-1: Les types d'énergie solaire.....	4
Figure I-2: Le spectre du rayonnement solaire [3].....	5
Figure I-3: Les types de rayonnement solaire [6].....	6
Figure I-4 : Orientation du panneau solaire.....	7
Figure I-5 : Angle d'inclinaison des modules photovoltaïques.....	8
Figure I-6 : Structure basique d'une cellule photovoltaïque.....	9
Figure I-7 : Jonction de type NP.....	10
Figure I-8 : Structure (à gauche) et diagramme de bande (à droite) d'une cellule photovoltaïque.....	11
Figure I-9 : Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule PV.....	15
Figure I-10 : Modèle simple d'une cellule PV.....	17
Figure I-11 : Modèle de la cellule PV à une diode.....	18
Figure I-12 : Mise en série des cellules PV.....	20
Figure I-13 : Caractéristique courant-tension de Ns cellule série.....	20
Figure I-14 : Mise en parallèle des cellule PV.....	21
Figure I-15 : Caractéristique courant-tension de NP cellule parallèle.....	22
Figure I-16 : Effet de la résistance série R_s sur la caractéristique P(V).....	23
Figure I-17 : Effet de la résistance série R_s sur la caractéristique I(V).....	24
Figure I-18 : Effet de la résistance parallèle R_p sur la caractéristique I(V).....	25
Figure I-19: Effet de la résistance parallèle R_p sur la caractéristique P(V).....	25
Figure I-20 : (a) Influence de L'ensoleillement sur les courbes I(V). (b) Influence de L'ensoleillement sur les courbes P(V).....	26
Figure I-21: (a) Influence de la température sur les courbes I(V). (b) Influence de la température sur les courbes p(V).....	27
Figure II-1 : Schéma électrique d'un hacheur buck.....	31
Figure II-2 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck.....	31
Figure II-3 : Schéma électrique d'un hacheur buck fermé.....	32
Figure II-4 : Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert.....	32
Figure II-5 : Le convertisseur boost.....	33
Figure II-6 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.....	34
Figure II-7 : Schéma électrique d'un hacheur boost fermé.....	34
Figure II-8 : Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert.....	35
Figure II-9: schéma électrique d'un hacheur buck-boost.....	36
Figure II-10 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck-boost.....	36
Figure II-11: Schéma électrique d'un hacheur buck- boost fermé.....	37
Figure II-12: Schéma électrique d'un hacheur buck- boost ouvert.....	37
Figure II-13: La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM.....	38
Figure II-14: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.....	39

Figure II-15: Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à un variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température.	40
Figure II-16: Caractéristique PPV (VPV) d'un panneau solaire.....	41
Figure II-17: Algorithme type de la méthode P&O.	42
Figure II-18: Algorithme de la méthode Incrément de conductance.	43
Figure III-1 : Type de fonctionnement d'une machine à courant continu.	45
Figure III-2 : Les symbole d'une MCC.	46
Figure III-3 : Constitution d'une MCC.....	46
Figure III-4 : Collecteur de moteur à courant continu [35].	48
Figure III-5 : Schéma de branchement de balais [36].....	48
Figure III-6: Schéma équivalent du MCC à aimant permanent.....	49
Figure III-7: Schéma du MCC à excitation série.	50
Figure III-8 : Schéma équivalent du MCC à excitation série.	50
Figure III-9 : Schéma de MCC à excitation shunt.	51
Figure III-10: Schéma de MCC à excitation composée.....	51
Figure III-11 : Schéma équivalent du MCC à excitation séparée.....	51
Figure III-12: Principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu [38].	52
Figure III-13 : Bilan de puissance.	55
Figure III-14 : Les quadrants de fonctionnement.	55
Figure III-15 : Caractéristique électromécanique du moteur série.	57
Figure III-16 : Caractéristique de vitesse en fonction du courant (moteur série).....	57
Figure III-17 : Caractéristique mécanique du moteur série.	57
Figure III-18 : Caractéristique mécanique du moteur shunt.	58
Figure III-19 : Caractéristique électromécanique du moteur shunt.	58
Figure III-20 : Caractéristique de vitesse en fonction du courant (moteur shunt).....	58
Figure III-21 : Caractéristique mécanique du moteur composé.	59
Figure III-22: Caractéristique de vitesse en fonction du courant.....	59
Figure III-23 : Caractéristique électromécanique du moteur composé.....	59
Figure III-24 : Caractéristique mécanique du moteur séparée.....	60
Figure III-25 : Caractéristique électromécanique du moteur.....	60
Figure III-26 : Caractéristique de vitesse en fonction du courant (moteur séparée).....	60
Figure III-27 : Schéma électrique du modèle de moteur choisi.....	61
Figure III-28 : Structure générale de la commande en boucle fermée.....	62
Figure III-29 : Schéma bloc de la boucle du courant.....	64
Figure III-30 : Schéma bloc de la boucle du couple.....	64
Figure III-31 : Schéma bloc de la boucle de vitesse.....	65
Figure III-32 : Schéma bloc de vitesse de rotation en fonction de la force Contre électromotrice.	65
Figure III-33 : Schéma fonctionnel du moteur à excitation séparée.....	65
Figure III-34 : Schéma de commande utilisant la structure PI.	66
Figure IV-1 : Chaîne de conversion photovoltaïque.	68
Figure IV-2: Simulation du GPV avec MPPT et convertisseur DC-DC.....	69

Figure IV-3: Le signal de l'MPPT P&O.....	69
Figure IV-4: Tension à la sortie du GPV.	70
Figure IV-5: Courant à la sortie du GPV.	70
Figure IV-6: Puissance à la sortie du GPV.	71
Figure IV-7: Tension à la sortie du convertisseur DC-DC.....	71
Figure IV-8: Courant à la sortie du convertisseur DC-DC.....	72
Figure IV-9: Puissance à la sortie du convertisseur DC-DC.....	72
Figure IV-10: Signal d'irradiation appliqué.....	73
Figure IV-11: Signal de température appliqué.....	73
Figure IV-12: Tension à la sortie du générateur photovoltaïque.	74
Figure IV-13: Courant à la sortie du générateur photovoltaïque.	74
Figure IV-14: Puissance à la sortie du générateur photovoltaïque.....	75
Figure IV-15: Caractéristique I(V).....	75
Figure IV-16: Caractéristique P(V).....	76
Figure IV-17: Tension à la sortie du convertisseur DC-DC.....	76
Figure IV-18: Courant à la sortie du convertisseur DC-DC.....	77
Figure IV-19: Puissance à la sortie du convertisseur DC-DC.....	77
Figure IV-20: Signal d'irradiation appliqué.....	78
Figure IV-21: Signal de température appliqué.....	79
Figure IV-22: Tension à la sortie du générateur photovoltaïque.	79
Figure IV-23: Courant à la sortie du générateur photovoltaïque.	80
Figure IV-24: Puissance à la sortie du générateur photovoltaïque.....	80
Figure IV-25: Caractéristique I(V).....	81
Figure IV-26: Caractéristique P(V).....	81
Figure IV-27 : Tension à la sortie du convertisseur DC-DC.....	82
Figure IV-28 : Courant à la sortie du convertisseur DC-DC.....	82
Figure IV-29 : Puissance à la sortie du convertisseur DC-DC.....	83
Figure IV-30 : Bloc de Simulation global.	84
Figure IV-31: Schéma bloc de simulation de régulateur PI.	84
Figure IV-32: Vitesse de référence.	85
Figure IV-33: Le couple résistant.....	85
Figure IV-34: Vitesse référence et vitesse Réelle.	86
Figure IV-35: L'évolution du courant d'induit.....	86
Figure IV-36: L'évolution du couple électromagnétique.....	87
Figure IV-37 : Courbe tension à la sortie de convertisseur DC-DC.	88

Tableau I-1:tableau récapitulatif des différents types des cellules PV 13

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : GENERALITE SURE LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES.....	3
I.1 INTRODUCTION.....	3
I.2 ÉNERGIE SOLAIRE.....	3
I.2.1 L'énergie solaire thermique.....	3
I.2.2 L'énergie solaire thermodynamique.....	3
I.2.3 L'énergie solaire photovoltaïque.....	3
I.3 RAYONNEMENT SOLAIRE.....	4
I.3.1 Spectre de rayonnement.....	5
I.3.2 Différents types de rayonnement.....	5
I.3.3 Orientation et inclinaison.....	7
I.3.3.1 Orientation du panneau solaire.....	7
I.3.3.2 L'angle d'inclinaison.....	7
I.4 LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	8
I.4.1 Définition de la cellule photovoltaïque.....	8
I.4.2 Constitution d'une cellule photovoltaïque.....	8
I.4.3 Propriétés des semi-conducteurs.....	9
I.4.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	10
I.5 DEFERENTE TYPES TECHNOLOGIES DE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	12
I.5.1 Technologie de la 1ère génération à base de silicium cristallin.....	12
I.5.2 Technologie de la 2ème génération à base de couche-mince.....	12
I.6 PARAMETRES DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	14
I.6.1 Courant de court-circuit I_{CC}	14
I.6.2 La tension de circuit ouvert.....	14
I.6.3 Facteur de forme FF	14
I.6.4 Rendement de conversion η	15
I.6.5 Point de puissance maximal PPM	15
I.6.6 Repense spectrale d'une cellule solaire.....	16
I.7 GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE (GPV).....	16
I.7.1 Modélisation d'un générateur photovoltaïque.....	16
I.7.1.1 Générateur photovoltaïque idéal.....	16
I.7.1.2 Générateur photovoltaïque réel.....	17
I.8 CONSTITUTION D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE.....	19
I.8.1 Mise en série.....	19
I.8.2 Mise en parallèle.....	21
I.8.3 Regroupement (série et parallèle).....	22
I.9 INFLUENCE DES PARAMETRES INTERNES ET EXTERNES.....	22
I.9.1 Paramètres internes.....	23
I.9.1.1 Influence de la résistance série.....	23
I.9.1.2 Influence de la résistance parallèle R_p	24
I.9.2 Paramètres externes.....	25
I.9.2.1 Influence de l'éclairement.....	25

I.9.2.2	Influence de la température.....	27
I.10	AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE	28
I.10.1	<i>Avantages</i>	28
I.10.2	<i>Inconvénients</i>	28
I.11	CONCLUSION.....	28
CHAPITRE II :LES HACHEURS ET LE PRINCIPE DE LA RECHERCHE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMAL		30
II.1	INTRODUCTION.....	30
II.2	LES HACHEURS	30
II.2.1	<i>Différents types d'hacheurs</i>	30
II.2.1.1	Convertisseur Buck.....	30
Fonctionnement.....		31
II.2.1.2	Le convertisseurs BOOST	33
Fonctionnement.....		33
II.2.1.3	Hacheur Buck-Boost.....	35
Fonctionnement.....		36
II.3	PRINCIPE DE LA RECHERCHE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMAL	38
II.3.1	<i>Généralités</i>	38
II.3.2	<i>Gestion de la MPPT</i>	39
II.3.3	<i>Les techniques de commandes MPPT</i>	40
II.3.3.1	La méthode Perturbe & Observe (P&O)).....	41
II.3.3.2	La méthode Incrémentation des conductances (INC).....	42
II.4	CONCLUSION :	44
CHAPITRE III: LES MACHINES A COURANT CONTINU		45
III.1	INTRODUCTION.....	45
III.2	DEFINITION	45
III.2.1	<i>Symboles</i>	45
III.3	LES PRINCIPAUX ELEMENTS CONSTITUANT LA MACHINE A COURANT CONTINU	46
III.3.1	<i>Partie fixe d'une machine à courant continue</i>	46
III.3.1.1	Inducteur.....	46
III.3.1.2	La carcasse (culasse).....	47
III.3.1.3	Les pièces polaires.....	47
III.3.2	<i>Partie mobile d'une machine à courant continue</i>	47
III.3.2.1	L'induit (le rotor).....	47
III.3.2.2	Le collecteur	47
III.3.2.3	Les balais	48
III.4	DIFFERENTS TYPES DU MOTEUR A COURANT CONTINU	49
III.4.1	<i>Les moteurs à inducteur à aimant permanent</i>	49
III.4.2	<i>Moteurs à inducteur bobiné</i>	49
III.4.2.1	Moteur à excitation série	49
III.4.2.2	Moteur à excitation shunt	50
III.4.2.3	Moteur à excitation Composée	51
III.4.2.4	Moteur à excitation séparée.....	51

III.5	PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	52
III.5.1	<i>Bilan de puissance.....</i>	54
III.5.1.1	<i>Rendement de la machine à courant continu.....</i>	55
III.5.2	<i>Les quatre quadrants de fonctionnement et la notion de la réversibilité.....</i>	55
III.6	CARACTERISTIQUE DES MOTEURS A COURANT CONTINU.....	56
III.6.1	<i>Moteur série.....</i>	56
III.6.2	<i>Moteur shunt.....</i>	57
III.6.3	<i>Moteur composé.....</i>	58
III.6.4	<i>Moteur séparé.....</i>	59
III.7	MODELISATION DU MOTEUR A COURANT CONTINU.....	60
III.7.1	<i>Equations électriques.....</i>	61
III.7.2	<i>Equations mécaniques.....</i>	61
III.8	COMMANDE EN VITESSE DE LA MACHINE.....	62
III.8.1	<i>Système de commande.....</i>	62
III.8.2	<i>Choix de régulateur.....</i>	63
III.8.3	<i>Expression du régulateur PI.....</i>	63
III.8.4	<i>Fonction de transfert de la machine.....</i>	63
III.8.5	<i>Structure de la commande PI.....</i>	65
III.9	CONCLUSION.....	67
CHAPITRE IV : FONCTIONNEMENT ET SIMULATION DU SYSTEME : PV-HACHEUR-MCC.....		68
I.12	INTRODUCTION.....	68
I.13	SIMULATIONS ET INTERPRETATIONS.....	68
I.14	SIMULATION DU GENERATEUR PV AVEC MPPT ET CONVERTISSEUR DC/DC.....	68
I.14.1	<i>Résultats de la simulation à la sortie du générateur photovoltaïque.....</i>	69
I.14.2	<i>Résultats à la sortie du convertisseur DC-DC.....</i>	71
I.15	INFLUENCE DU CHANGEMENT D'ECLAIREMENT.....	73
I.15.1	<i>Résultats à la sortie du générateur photovoltaïque.....</i>	74
I.15.2	<i>Résultats à la sortie du convertisseur DC-DC.....</i>	76
I.16	INFLUENCE DU CHANGEMENT DE LA TEMPERATURE.....	78
I.16.1	<i>Résultats à la sortie du générateur photovoltaïque.....</i>	79
I.16.2	<i>Résultats à la sortie du convertisseur.....</i>	81
I.17	SIMULATION GLOBAL DU SYSTEME (GPV + MPPT + HACHEUR + REGULATEUR PI + MCC) 83	
I.18	CONCLUSION.....	88
CONCLUSION GENERALE.....		89

Résumé

Après le grand développement dans le domaine des énergies renouvelables, en particulier des panneaux photovoltaïques, nous avons choisi d'étudier et de simuler des systèmes d'énergie photovoltaïque connectés à un convertisseur DC-DC contrôlé par la technologie de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Ce système alimente le moteur à courant continu commandé par un régulateur PI.

Abstract

After the great development in the field of renewable energies, especially photovoltaic panels, we chose to study and simulate photovoltaic energy systems connected to a DC-DC converter controlled by the maximum power point tracking (MPPT) technology. This system feeds the DC motor controlled by a PI regulator.

ملخص

بعد التطور الكبير في مجال الطاقات المتجددة، وخاصة الألواح الكهروضوئية، اخترنا دراسة ومحاكاة أنظمة الطاقة الكهروضوئية متصلة بمحول التيار المستمر (DC-DC) المتحكم فيه عن طريق تقنية تتبع النقطة الاعظمية للاستطاعة (MPPT) ويقوم هذا النظام بتغذية محرك التيار المستمر المتحكم فيه بمنظم PI.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

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 vers 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

Face à l'épuisement des ressources fossiles et les problèmes environnementaux causés par l'émission de gaz à effet serre lors de l'exploitation de ces ressources, il s'avère nécessaire de trouver d'autres sources d'énergie qui répondent au besoin du monde et assurent la protection de l'environnement. Des progrès technologiques ont démontré que la sécurité dans les approvisionnements en énergie est assurée par les sources d'énergie renouvelable.

On entend Par énergie renouvelable des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. À la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée, inépuisables et facilement exploitables. En effet, le secteur des énergies renouvelables est le seul qui se distingue par sa capacité à réduire les émissions de gaz à effet de serre et la pollution et à exploiter des sources d'énergie locales et décentralisées. Ces sources d'énergie ne sont pas touchées par la volatilité des marchés des combustibles fossiles et présentent l'avantage supplémentaire de stimuler l'emploi.

De grands efforts ont été consacrés par plusieurs pays afin de développer ces ressources, en particulier l'énergie solaire photovoltaïque (PV). Elle repose sur la transformation des rayons lumineux provenant du soleil en électricité, cette transformation est assurée par un composant électronique qui est la cellule photovoltaïque, élément de base de tout système PV.

D'autre part, le monde industriel a été dominé pendant longtemps par les machines à courant continu. Grâce à leurs avantages relatifs qu'elles présentent par rapport à d'autres types de machines (machines à courant alternatif), elles sont largement employées dans plusieurs domaines de l'industrie.

Mais parfois nous sommes dans un endroit isolé ou sans électricité, nous avons donc besoin d'une autre source d'électricité pour alimenter ce moteur et à partir de là nous utilisons l'énergie photovoltaïque comme source d'alimentation pour ce dernier.

L'objectif de ce travail étant de simuler un système photovoltaïque qui alimente un moteur à courant continu (MCC) et cela à travers un étage d'adaptation Hacheur survolteur commandé par un algorithme de recherche du point de puissance maximale (MPPT). Sachant que la vitesse du moteur est contrôlée par un hacheur dévolteur commandé par un régulateur PI.

Dans le premier chapitre nous avons introduit des généralités sur la technologie photovoltaïque. En commençant par des notions sur le rayonnement solaire, ensuite nous avons montré le principe de l'effet photovoltaïque, puis on a expliqué l'influence des paramètres internes et externes sur la puissance fournie par la cellule PV.

Le deuxième chapitre décrit une étude sur les convertisseurs DC/DC et leur principe et les différents types existants. Dans le deuxième temps nous avons étudié le Principe de la recherche du point de puissance maximal spécialement la méthode Observation et Perturbation (P&O).

Le troisième chapitre consacré à l'étude théorique de la machine à courant continu. Il est constitué d'un rappel des généralités sur cette machine, en donnant leur structure, son principe de fonctionnement et les différents types selon le mode d'excitation.

Dans le dernier chapitre nous avons présenté une simulation complète d'un système photovoltaïque alimentant un moteur à courant continu (moteur à courant continu à excitation séparée) avec les convertisseurs continu-continu qui nous permet d'extraire les caractéristiques de ce système (la puissance du générateur photovoltaïque, la vitesse de la machine, le couple utile et le courant de la MCC...) en utilisant le programme MATLAB/SIMULINK.

Enfin, nous terminant par une conclusion générale qui présente l'intérêt de notre travail.

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, au début nous parlons de l'énergie solaire, suivi de l'énergie photovoltaïque qui est notre intérêt. Puis nous détaillons le fonctionnement des cellules photovoltaïques (PV), où nous citerons les différents types de cellules PV ainsi que les méthodes d'installation menant au module PV. A la fin nous montrons l'influences des paramètres internes et externes sur le rendement des cellules photovoltaïques.

I.2 Énergie solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kW/m²) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés :

I.2.1 L'énergie solaire thermique

Quant à elle, produit de la chaleur à partir du rayonnement solaire infrarouge du Soleil afin de chauffer de l'eau, de l'air ou un autre fluide. La technologie est plus simple que la photovoltaïque, donc moins onéreuse. Il s'agit de capter les calories grâce à des surfaces absorbantes de la chaleur, des tubes métalliques peints en noir par exemple. Cela permet de réaliser des chauffe-eaux solaires individuels ou collectifs.

I.2.2 L'énergie solaire thermodynamique

Quant à elle, concerne de grandes centrales équipées de concentrateurs des rayons solaires, sous forme de miroirs galbés, dont la fonction est de chauffer un fluide à haute température (plusieurs centaines de degrés) afin de générer de la vapeur par échange thermique pour ensuite produire de l'électricité au moyen d'une turbine à vapeur par exemple [4].

I.2.3 L'énergie solaire photovoltaïque

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

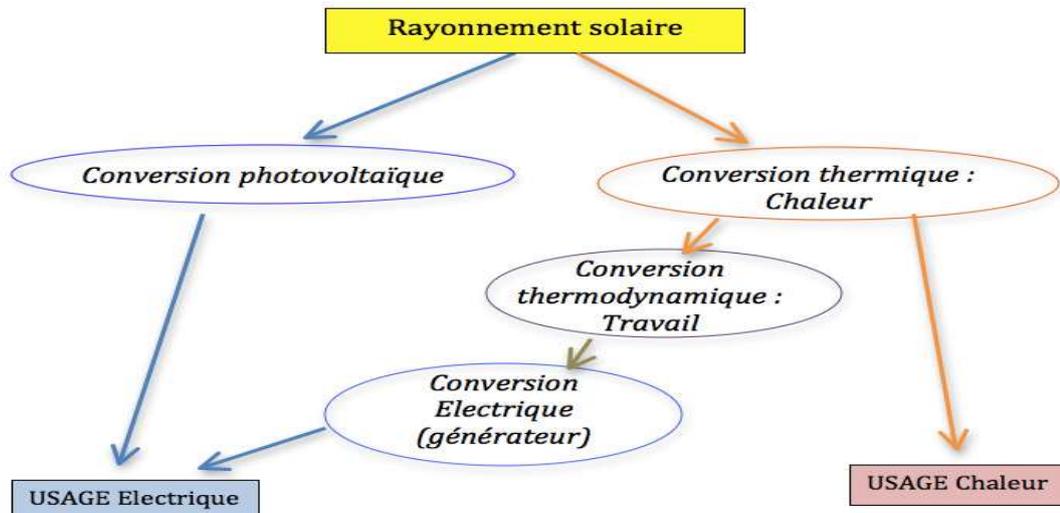


Figure 0-1: Les types d'énergie solaire.

I.3 Rayonnement solaire

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène-hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement [1].

- Sa lumière, à une vitesse de 300000km/s
- Met environ 8 minutes pour parvenir à la terre.
- Sa distribution spectrale de l'atmosphère est présentée un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5 μ m.
- La température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°k :
- Diamètre de soleil $D_s = 1.39.10^9$ m.
- Diamètre de la terre $D_t = 1.27.10^7$ m.
- Distance moyenne soleil- terre $L_{ts}=1.5.10^{11}$ m.

I.3.1 Spectre de rayonnement

Le rayonnement électromagnétique est composé de « particules » de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ [2].

L'énergie de chaque photon est donnée par la formule suivante :

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad 0-1$$

$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ JS}^1$ Est la constante de Planck.

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ mS}^{-1}$ Étant la vitesse de propagation

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K . Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0. Sa distribution en énergie est répartie en :

- Ultraviolet UV $0.20 < \lambda < 0.38 \text{ mm}$ 6.4%
- Visible $0.38 < \lambda < 0.78 \text{ mm}$ 48.0%
- Infrarouge IR $0.78 < \lambda < 10 \text{ mm}$ 45.6%

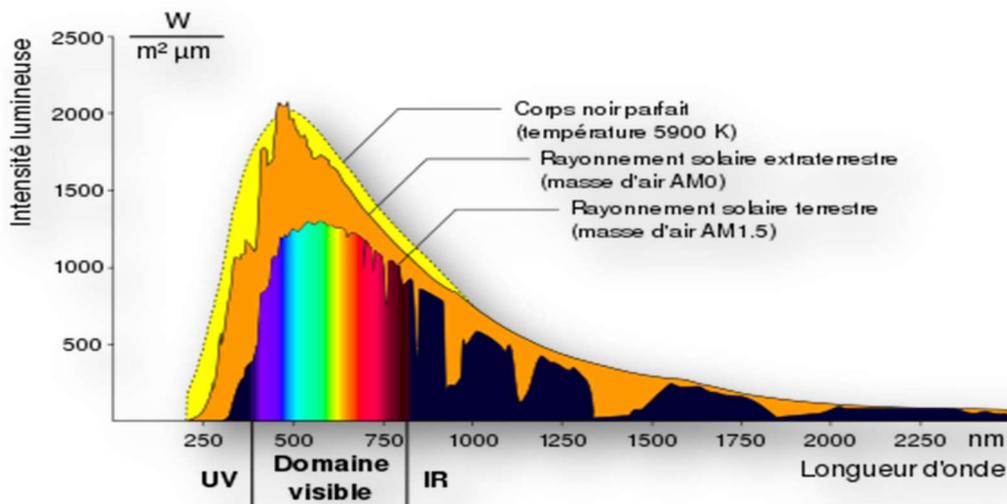


Figure 0-2: Le spectre du rayonnement solaire [3].

I.3.2 Différents types de rayonnement

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes :

- Le rayonnement direct : est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs.
- Le rayonnement diffus : est constitué des photons diffusés par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). Sa structure varie avec les conditions météorologiques. Par temps couvert, on admet qu'il est isotrope, c'est-à-dire qu'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste. Par temps clair ou voilé, outre le ciel bleu relativement isotrope (diffusion sur l'air), on a une couronne plus brillante autour du soleil (composante appelée circumpolaire) et souvent un renforcement sur l'horizon, la bande horizon.
- L'albédo : est la partie réfléchi par le sol. Il dépend de l'environnement du site, il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés [5].
- Le rayonnement Global : Il constitue un ensemble de rayons (direct, diffus et réfléchi) qui est employé pour faire fonctionner les panneaux solaires.

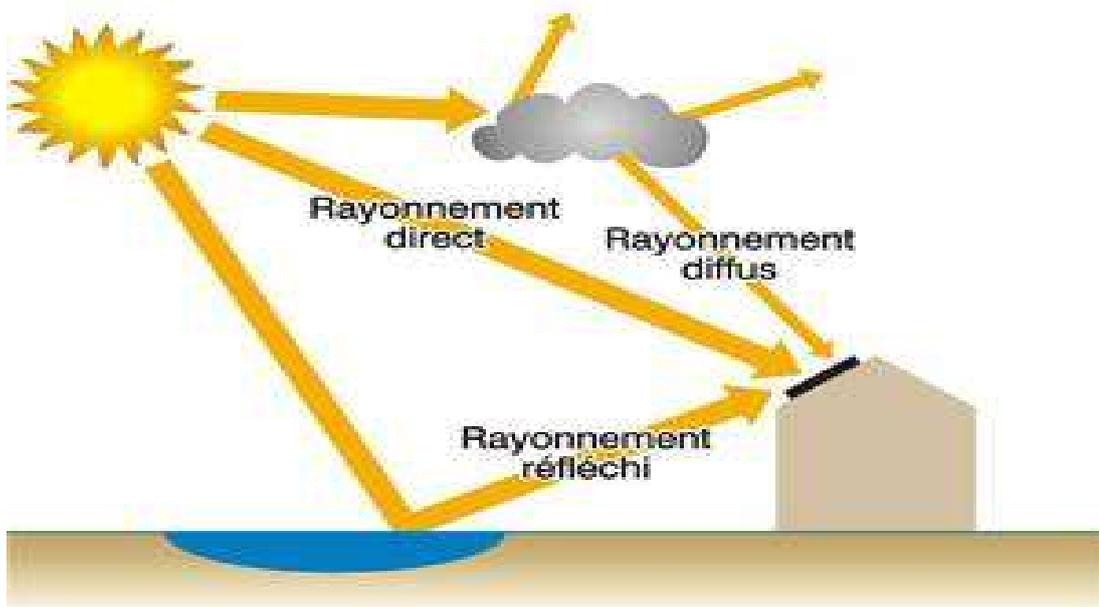


Figure 0-3: Les types de rayonnement solaire [6].

I.3.3 Orientation et inclinaison

I.3.3.1 Orientation du panneau solaire

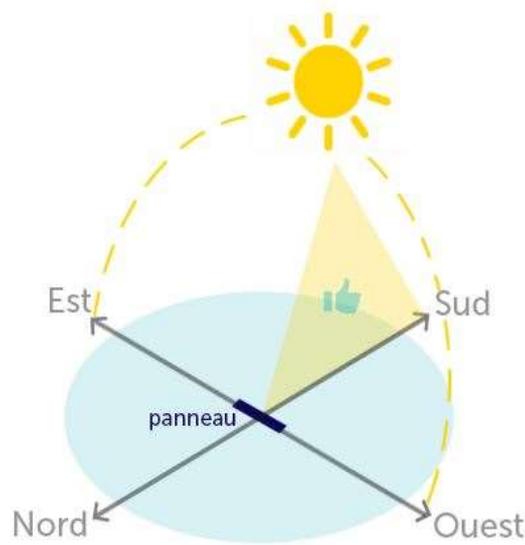


Figure 0-4 : Orientation du panneau solaire.

La meilleure exposition **en théorie, il est conseillé d'orienter ses panneaux solaires au Sud (Sud-Est ou Sud-Ouest éventuellement).**

Pourquoi ? Car le soleil se lève à l'Est et se couche à l'Ouest, quel que soit l'hémisphère et la latitude. En revanche, le soleil est à son zénith au Sud dans l'hémisphère Nord. Une orientation du panneau solaire photovoltaïque au Sud permet de capter le maximum de lumière tout au long de la journée [19].

I.3.3.2 L'angle d'inclinaison

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

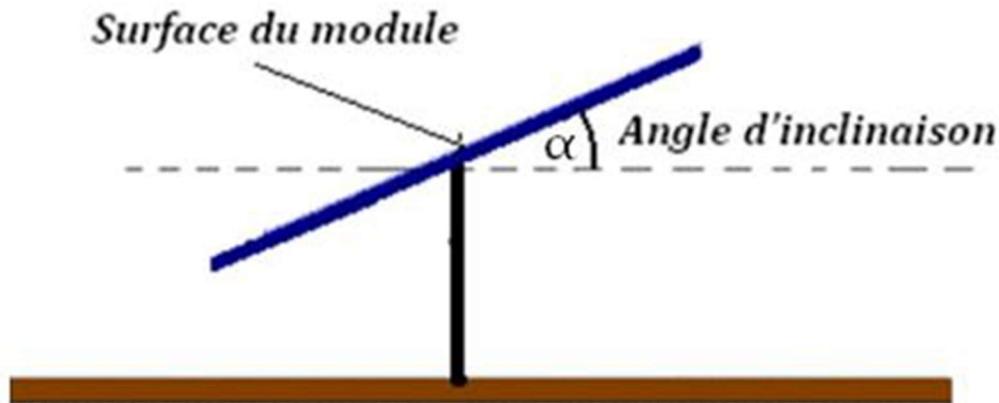


Figure 0-5 : Angle d'inclinaison des modules photovoltaïques.

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

$$\alpha = L - \sin^{-1} \left(0.4 \times \left(\frac{N \times 360}{365} \right) \right) \quad 0-2$$

Avec, L , latitude du lieu, N , nombre de jour entre l'équinoxe de printemps (21 mars de chaque année) et le jour considéré. Cette relation permettant un rendement supérieur n'est valable que lorsque le module solaire en question est muni d'un système qui lui permet de s'incliner. Or on ne trouve ce système que très rarement [7].

I.4 La cellule photovoltaïque

I.4.1 Définition de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque, ou cellule solaire, est un composant électronique qui, exposé à la lumière, produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. La puissance obtenue est proportionnelle à la puissance lumineuse incidente et dépend du rendement de la cellule. Celle-ci délivre une tension continue et un courant la traverse dès qu'elle est connectée à une charge électrique (en général un onduleur, parfois une simple batterie électrique) [9].

I.4.2 Constitution d'une cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont constituées

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne,
- D'une couche anti-reflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires, d'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode,
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement [10].

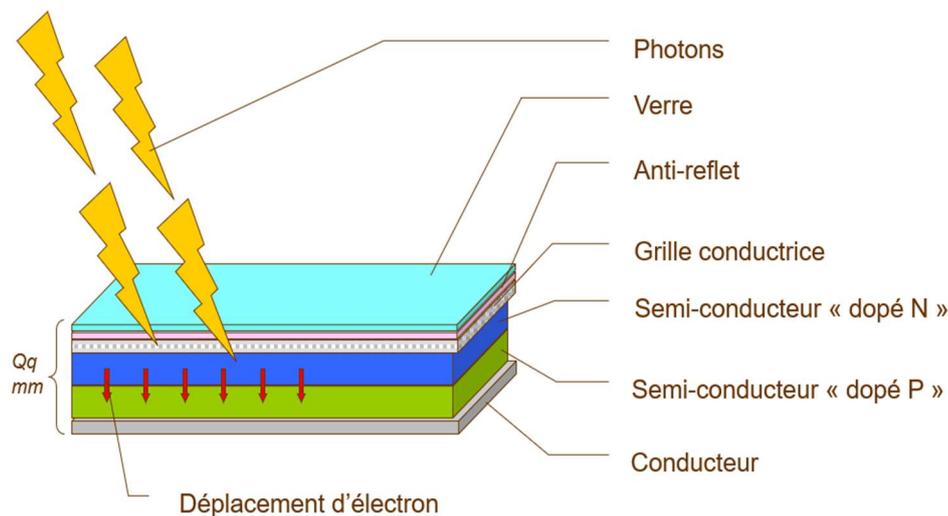


Figure 0-6 : Structure basique d'une cellule photovoltaïque.

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [11].

I.4.3 Propriétés des semi-conducteurs

Un Semi-conducteur est un composant dont la conductivité électrique (plus importante que celle des isolants, mais plus faible que celle des métaux) augmente par addition d'impuretés dans sa structure. Le semi-conducteur le plus courant est à base de silicium Si, un élément chimique le plus souvent associé à l'oxygène dans la silice SiO₂, donc très

abondant dans la nature. Le silicium pur est un semi-conducteur intrinsèque. Les propriétés d'un semi-conducteur peuvent être contrôlées en le dopant par des impuretés. Un semi-conducteur présentant plus d'électrons que de trous est alors dit de type N, tandis qu'un semi-conducteur présentant plus de trous que d'électrons est dit de type P.

La figure I-6 montre comment se font les liaisons dans un cristal de silicium.

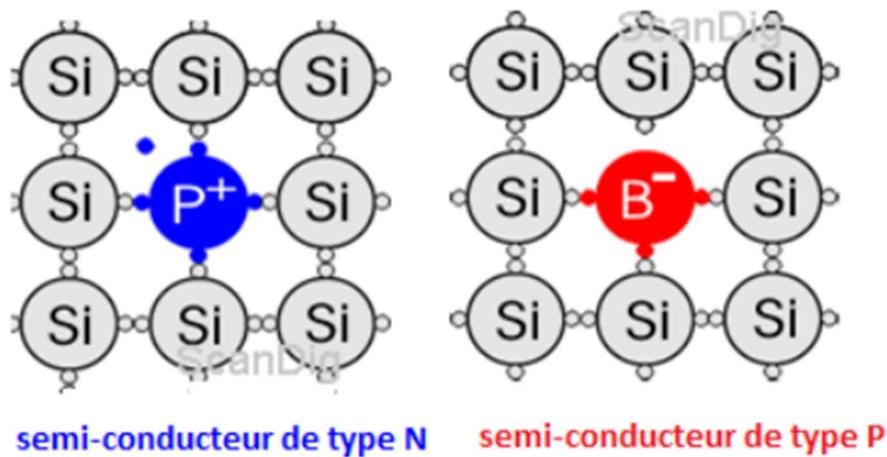


Figure 0-7 : Jonction de type NP.

Chaque Si comporte 4 électrons périphériques, appelés électrons de valence, et chacun de ses quatre voisins apporte un électron à mettre en commun pour créer quatre liaisons avec ses plus proches voisins. Il y a donc huit électrons externes autour de chaque Si (configuration stable). Le principe est ensuite d'utiliser les éléments voisins dans la classification périodique l'une présentant un excès d'électrons grâce au phosphore (Ph) et l'autre un déficit en électrons grâce au Bore (Bo), sont dites respectivement dopée de type N et dopée de type P [8].

I.4.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule PV donc est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants [8] :

- Absorption de la lumière dans le matériau.
- Le transfert de l'énergie lumineuse aux électrons.
- La collecte des charges.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trous créés est nécessaire

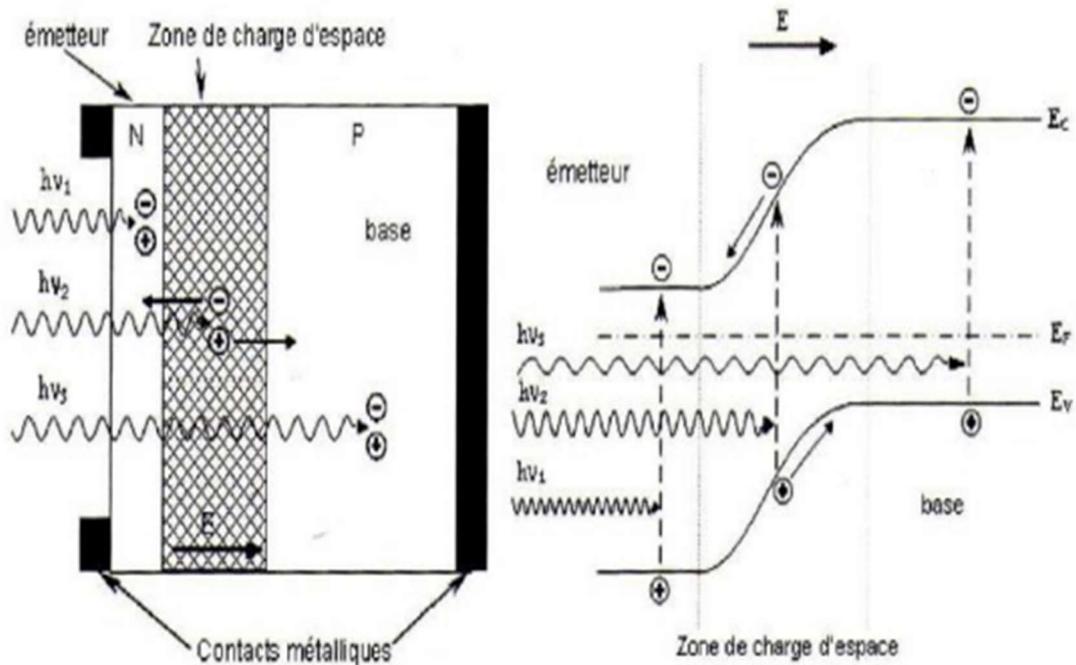


Figure 0-8 : Structure (à gauche) et diagramme de bande (à droite) d'une cellule photovoltaïque.

Comme nous montre la figure I.6, les photons incidents créent des porteurs dans les zones **N** et **P** et dans la zone de charge d'espace. Les photo-porteurs auront un comportement différent suivant la région :

- Dans la zone **N** ou **P**, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone **P** (pour les trous) ou dans la zone **N** (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura un photo courant de diffusion.
- Dans la zone de charge d'espace, le pair électron/ trou créés par les photons incidents sont dissociés par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région **N**, les trous vers la région **P**.

Ce déplacement des photo porteurs donne naissance à un photo courant de génération. Ces deux contributions ensemble ont pour résultat de donner un photo courant total . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [12].

I.5 Différents types de technologies de cellule photovoltaïque

Les différentes technologies de cellule PV existantes sont :

I.5.1 Technologie de la 1^{ère} génération à base de silicium cristallin

Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction P-N qui utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. La méthode de production basée sur les wafers de silicium est très énergivore et donc très chère. Elle nécessite par ailleurs un silicium d'une grande pureté. On différencie également les cellules à base de silicium monocristallin et poly cristallin.

I.5.2 Technologie de la 2^{ème} génération à base de couche-mince

Ce modèle de cellule photovoltaïque est composé de silicium ou d'autres matériaux. Les cellules dites couche mince (Thin-film) constituent ce que certains appellent les cellules de seconde génération car elles font historiquement suite aux cellules en silicium cristallin relativement épaisses. On distingue plusieurs types de cellules couche minces à savoir :

- Le silicium amorphe (a-si).
- Le tellure de Cadmium (CdTe).
- Le cuivre/indium/sélénium ou cuivre/indium/Gallium/sélénium (CIS ou CIGS).

Elles sont constituées de molécules organiques combinant flexibilité et légèreté. Ces technologies sont encore au stade de la recherche et développement. Il y a trois types de cellules.

- Cellule multicouche.
- Cellule organique.
- Cellule à concentration. Dans le tableau I-1, on résume les différentes performances des technologies citées précédemment [13].

Tableau 0-1: tableau récapitulatif des différents types des cellules PV

Type de cellule	Rendement	Avantage	Inconvénient	Illustration
Silicium Polycristallin	11-15%	Bon rendement pour un module	Cout de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication	
Silicium monocristalline	13-17%	Bon rendement Pour une Cellule	Cout de fabrication élevé, perte de matière en fabrication	
Silicium amorphe	5-6%	Facile à fabriquer	Mauvais rendement	
CdTe	7-11%	Absorbe 90% des photons incidents	Cadmium Très Polluant	
CIGS	20%	Energie de gap ajustable 99% des photons absorbés	Manque de matière première	
Cellules organiques	5%	Faible cout de fabrication flexible	Rendement encore trop bas	

I.6 Paramètres de la cellule photovoltaïque

Les grandeurs caractéristiques principales des cellules solaires sont :

- Le courant de court-circuit I_{cc}
- La tension en circuit ouvert V_{co}
- Le facteur de forme FF
- Le rendement de conversion d'énergie η
- Le point de puissance maximale PPM
- La réponse spectrale RS

I.6.1 Courant de court-circuit I_{cc}

Il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque éclairée lorsque celle-ci est en court-circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle (+) est relié au pôle (-) (la tension V à ses bornes est alors nulle).

I.6.2 La tension de circuit ouvert

Est la différence de potentiel mesurée aux bornes de la cellule lorsque la sortie est en circuit ouvert. C'est à dire : $V_{co}=V (I=0)$

Pour une cellule solaire idéale la tension de circuit ouvert est donnée par [14] :

$$V_{co} = \frac{K \cdot T}{q} \log \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad 0-3$$

I.6.3 Facteur de forme FF

Ce coefficient représente le rapport entre la puissance optimale que peut délivrer la cellule notée P_{PPm} et la puissance maximale que peut avoir la cellule $I_{cc} \cdot V_{co}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également [15].

Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{PPm}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad 0-4$$

I.6.4 Rendement de conversion η

Le rendement η de la cellule solaire exprimé en pourcentage, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance optimale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente [16].

0-5

$$\eta = \frac{V_{PPm} \cdot I_{PPm}}{P_{in}}$$

Avec :

I_{ppm} : Courant optimale au point de puissance maximale (A).

V_{ppm} : Tension optimale au point de puissance maximale (V).

P_{in} : Puissance incidente.

I.6.5 Point de puissance maximal PPM

Obtenu pour une tension et un courant optimal : V_{ppm} et I_{ppm} , le fonctionnement de la cellule est donc optimal.

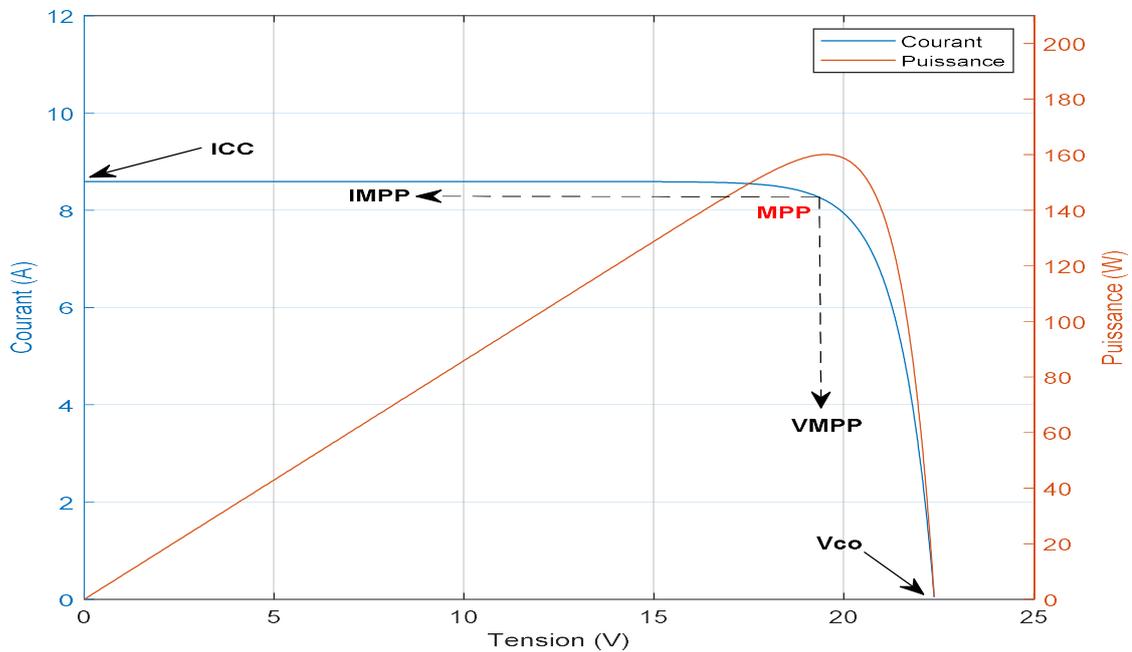


Figure 0-9 : Caractéristique I(V) et P(V) d’une cellule PV.

I.6.6 Reponse spectrale d'une cellule solaire

La réponse spectrale RS d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre le courant de court-circuit généré par la cellule et la puissance lumineuse incidente, en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident. La réponse spectrale RS est donnée par la relation suivante [17] :

$$RS = \frac{I_{cc}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)} (A/W) \quad 0-6$$

Le rendement quantique externe EQE de la cellule est le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons incidents pour chaque longueur d'onde, il est relié à la réponse spectrale par :

$$EQE(\lambda) = RS(\lambda) \frac{h \cdot c}{\lambda \cdot q} \quad 0-7$$

Le rendement quantique interne IQE de la cellule est le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons pénétrant dans le matériau, il est relié au rendement quantique externe EQE par l'équation [13] :

$$IQE(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{1 - R(\lambda)} \quad 0-8$$

I.7 Générateur photovoltaïque (GPV)

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un GPV. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera [10].

I.7.1 Modélisation d'un générateur photovoltaïque

I.7.1.1 Générateur photovoltaïque idéal

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'air de transition p-n de la cellule PV Figure (I-10). Si l'on connecte une charge résistive aux bornes du générateur photovoltaïque, ce dernier y débite une part de courant I et le reste, le courant I_D , dans la diode.

Nous avons alors la relation :

$$I = I_{ph} - I_D \tag{0-9}$$

Pour un générateur idéal, la tension aux bornes de la résistance égale à celle aux bornes de la diode :

$$V = V_D$$

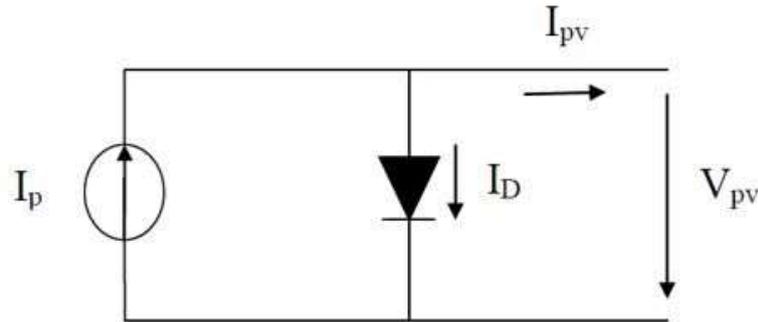


Figure 0-10 : Modèle simple d'une cellule PV.

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_D = I_S \left(\exp \left(\frac{V_D}{V_t} \right) - 1 \right) \tag{0-10}$$

Avec :

I_S : courant de saturation inverse de la diode, $V_T = kT/q$ potentiel thermique.

Le courant débité équivaut à :

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_S \left(\exp \left(\frac{V_D}{V_t} \right) - 1 \right) \tag{0-11}$$

Ce modèle reste théorique et ne rend pas compte du comportement d'une cellule photovoltaïque dans des conditions réelles

I.7.1.2 Générateur photovoltaïque réel

Le modèle photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une

perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. Cette perte de tension est modélisée donc par une résistance en série R_s et les courants de fuite par une résistance en parallèle R_{sh} comme montre la Figure I-11.

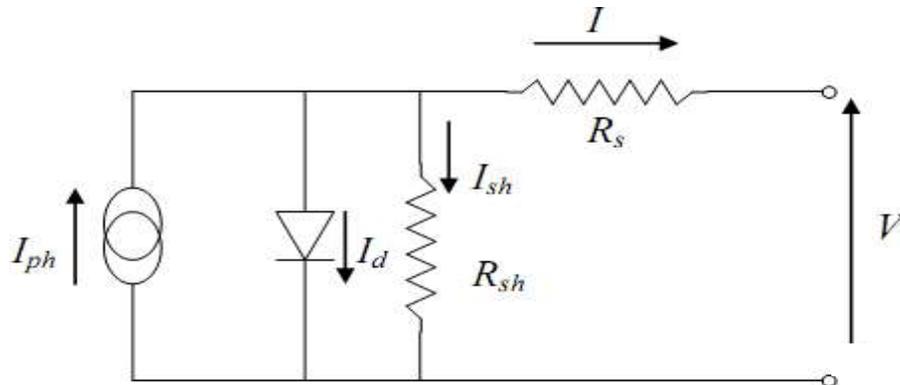


Figure 0-11 : Modèle de la cellule PV à une diode.

L'équation de la caractéristique est alors :

$$I = I_{ph} - I_s \left\{ \exp \left[\frac{q(v + R_s \cdot I)}{A \cdot KT} \right] - 1 \right\} - \frac{v + R_s \cdot I}{R_{sh}}$$

0-12

Avec :

I : Intensité aux bornes du générateur [A]
 I_s : Le courant de saturation de la diode [A]
 V : Tension aux bornes du capteur [V]

I_{ph} : Photo courant [A], proportionnel à l'irradiation G , avec correction selon T .

R_s : Résistance série[Ω].

R_{sh} : Résistance shunt (ou parallèle) [Ω].

q : Charge de l'électron = $1.6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb.

k : Constante de Boltzmann = $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K.

A : le facteur d'idéalité de la diode compris entre 1 et 2.

Nous obtenons une équation implicite en I et V qui peut être résolue grâce à une méthode numérique. [18]

I.8 Constitution D'un générateur photovoltaïque

- Câblage des cellules photovoltaïques : les cellules sont connectées entre elles par un fin ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+)
- Les cellules sont encapsulées sous vide entre 2 films thermoplastiques transparents (EVA : Ethylène Acétate de Vinyle)
- Le plus souvent présence d'un cadre en aluminium avec joint périphérique pour permettre la dilatation
- Un verre trempé en face avant protège les cellules sur le plan mécanique tout en laissant passer la lumière
- La face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille TEDLAR
- Connexion ; la boîte de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement, les diodes by-pass
- Les 2 câbles unipolaires sont raccordés.

Ainsi, pour N_s cellules en série, constituant des branches elles-mêmes N_p en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donné par :

$$P_{pv} = N_s \cdot V_{pv} \cdot N_p \cdot I_{pv}$$

0-13

Avec :

P_{pv} : la puissance disponible en sortie du GPV

V_{pv} : la tension à la sortie du GPV

I_{pv} : le courant de sortie du GPV

I.8.1 Mise en série

Une association de (N_s) cellule en série Figure I-14 permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristiques électriques d'une association série de (N_s) cellules [20].

$$V_{CONS} = N_S \times V_{CO} \quad 0-14$$

$$I_{CC} = I_{CCNS} \quad 0-15$$

V_{CONS} : la somme des tensions en circuit ouvert de N_S cellules en série.

I_{CCNS} : courant de court-circuit de N_S cellules en série.

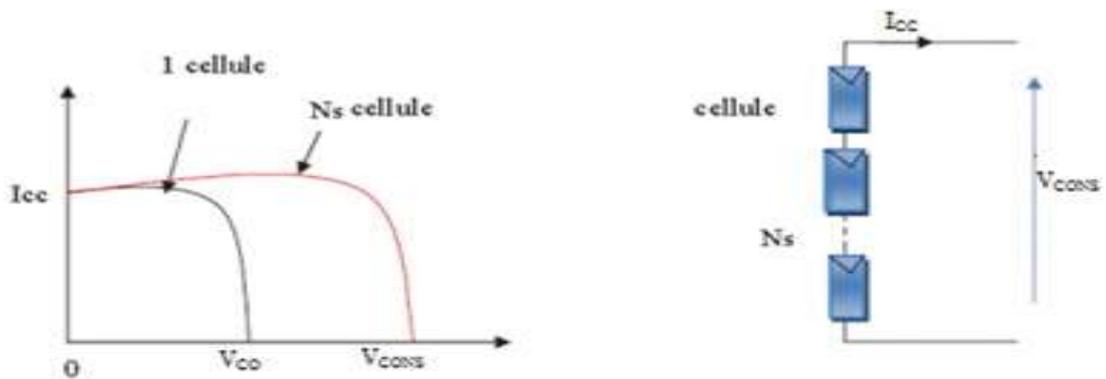


Figure 0-12 : Mise en série des cellules PV.

La Figure I-15 montre l'influence de l'association de plusieurs cellules PV en séries sur le courant I_{CCNS} et la tension V_{CONS}

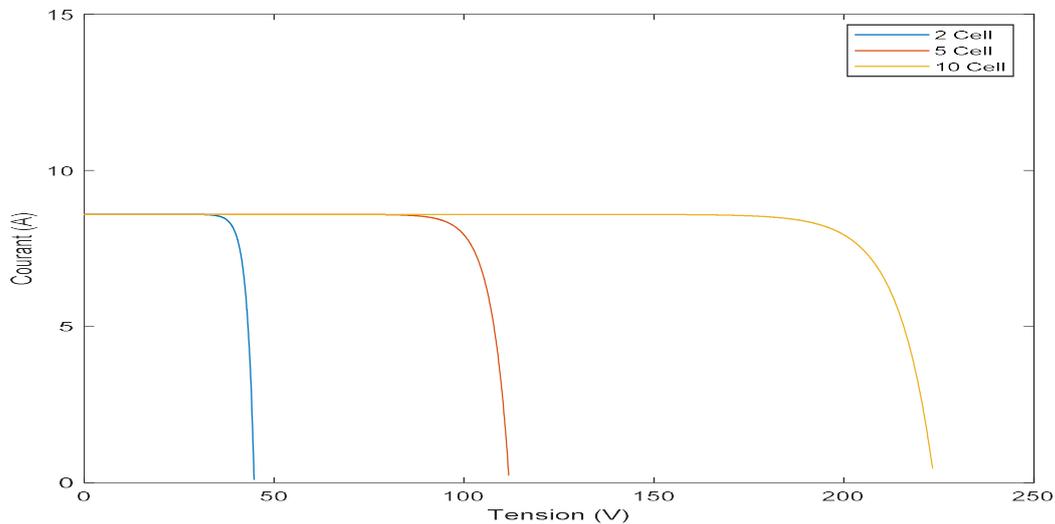


Figure 0-13 : Caractéristique courant-tension de N_S cellule série.

➤ **Interprétation :**

- D'après les résultats obtenus, on remarque que la tension augmente avec l'augmentation du nombre de cellules en séries, par contre le courant reste le même.

I.8.2 Mise en parallèle

Une association parallèle de (N_P) cellule est permet d'accroitre le courant de sortie du générateur. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants.

Avec :

$$V_{CO} = V_{CONP} \tag{0-16}$$

$$I_{CCNP} = I_{CC} \times N_P \tag{0-17}$$

I_{CCNP} : la somme des courants de cout circuit de (N_P) cellule en parallèle

V_{CCNP} : tension du circuit ouvert de (N_P) cellules en parallèle

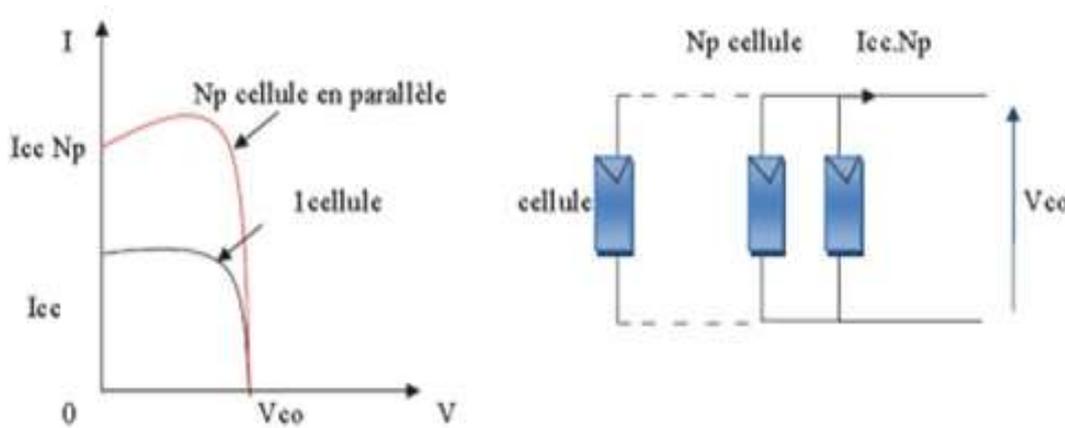


Figure 0-14 : Mise en parallèle des cellule PV.

La Figure I-17 montre l'influence de l'association du plusieurs cellules PV en parallèles sur le courant I_{CCNP} et la tension V_{CONP}

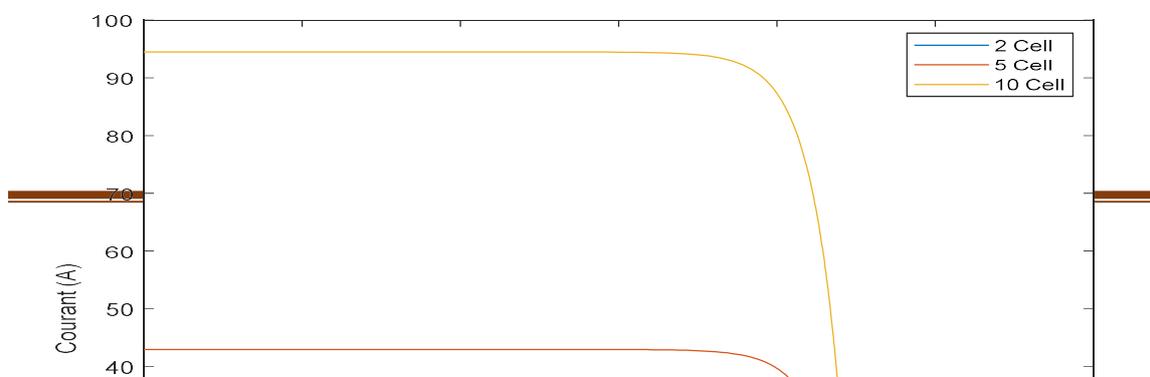


Figure 0-15 : Caractéristique courant-tension de NP cellule parallèle.

➤ **Interprétation :**

- ▣ D'après les résultats obtenus, on remarque que le courant augmente avec l'augmentation du nombre de cellules en parallèles. Par contre la valeur de la tension ne change pas.

I.8.3 Regroupement (série et parallèle)

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous, ce qui peut être généralisé sur une gamme de N_s modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant.

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque [21].

I.9 Influence des paramètres internes et externes

Le comportement électrique d'une cellule dépend de deux types de paramètres dont :

- Des paramètres internes tels que la résistance série R_s , la résistance shunt(parallèle) R_p .
- Des paramètres externes tels que l'irradiation solaire et la température.

I.9.1 Paramètres internes

I.9.1.1 Influence de la résistance série

La résistance série caractérise les pertes par effets Joule de la résistivité du semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule.

Les contacts semi-conducteur-électrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion.

L'influence de la résistance série sur la caractéristique $P(V)$, $I(V)$ de la cellule solaire est représentée sur les Figure I-18, I-19.

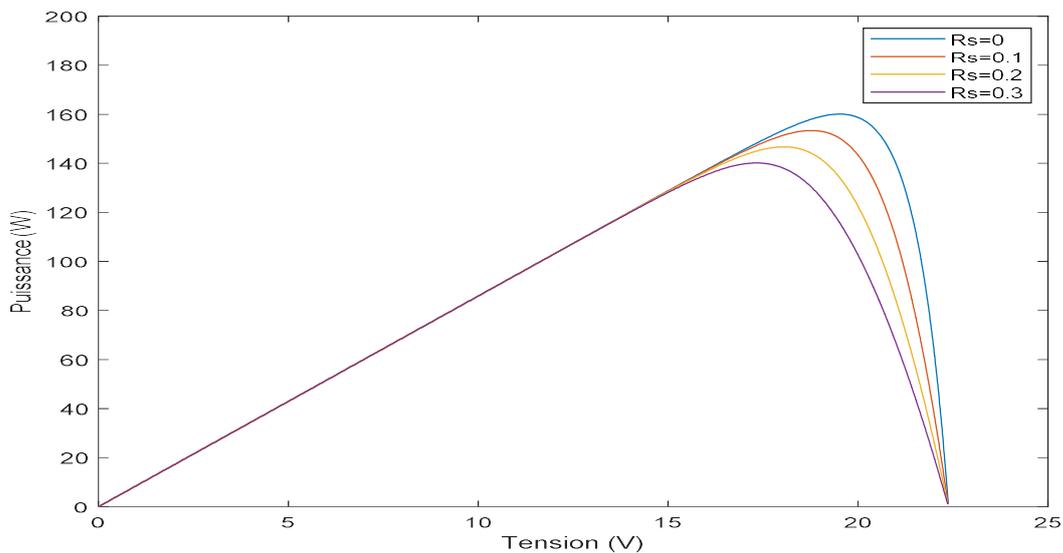


Figure 0-16 : Effet de la résistance série R_s sur la caractéristique $P(V)$.

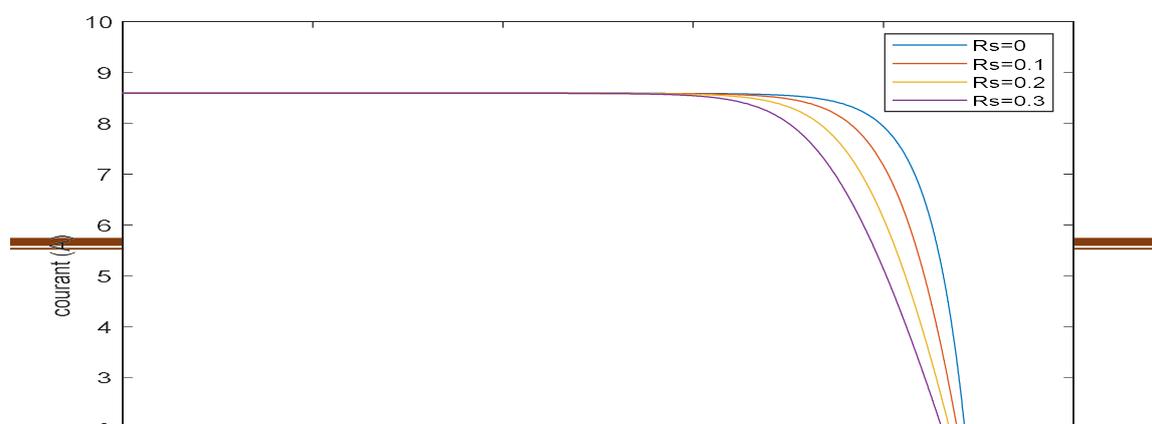


Figure 0-17 : Effet de la résistance série R_s sur la caractéristique $I(V)$.

➤ **Interprétation :**

- ✚ La résistance série n'affecte pas sur la tension du circuit ouvert et lorsque sa valeur est élevée, le courant de court-circuit diminue légèrement.
- ✚ L'augmentation de valeur de la résistance série se traduit par une diminution de pente de la courbe de puissance.

I.9.1.2 Influence de la résistance parallèle R_p

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge d'espace. L'existence de fissures et de défaut de structures complexes devient le siège de phénomène physique assimilable aussi à une résistance parallèle (R_p). Ordre de grandeur de R_p pour une cellule au Si : $R_p = 10^2$ à $10^4 \Omega$. R_p augmente avec le groupement série de cellules solaires et diminue avec une connexion parallèle. L'influence de la résistance parallèle sur la caractéristique de la cellule solaire est représentée sur les Figures I-20, I-21.

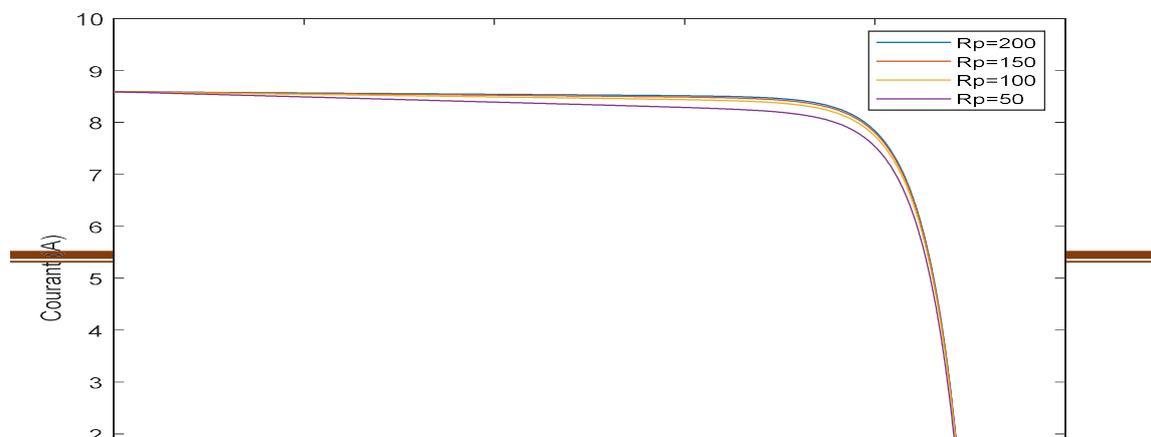


Figure 0-18 : Effet de la résistance parallèle R_p sur la caractéristique $I(V)$.

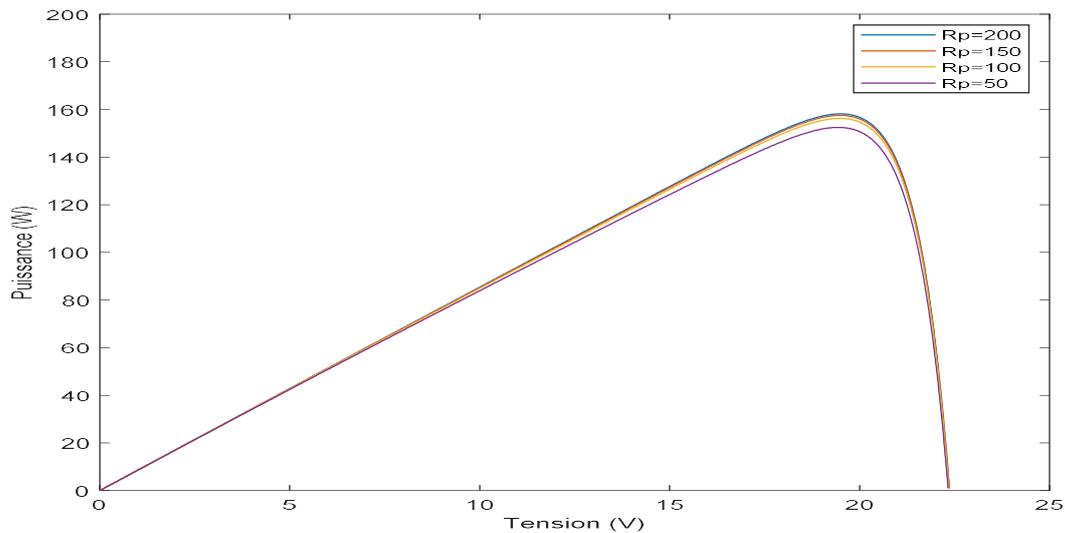


Figure 0-19: Effet de la résistance parallèle R_p sur la caractéristique $P(V)$.

➤ **Interprétation :**

- + L'influence de la résistance parallèle (shunt) sur la caractéristique courant-tension se traduit par une légère diminution de la tension de circuit ouvert, et une augmentation de la pente de la courbe $I-V$ de la cellule dans la zone correspondante à un fonctionnement comme une source de courant.
- + La puissance fournie par une cellule solaire varie avec sa résistance parallèle, plus cette résistance est élevée plus la puissance fournie est importante

I.9.2 Paramètres externes

I.9.2.1 Influence de l'éclairement

L'augmentation d'ensoleillement (flux lumineux) se traduit par un déplacement de la caractéristique $I=f(V)$ suivant l'axe des courants.

L'croissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert étant donné que le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement, alors que celle de la tension à circuit ouvert est logarithmique

L'influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) et P(V) de la cellule solaire est représentée sur la Figure I-22, pour une température fixe $T=25c^{\circ}$

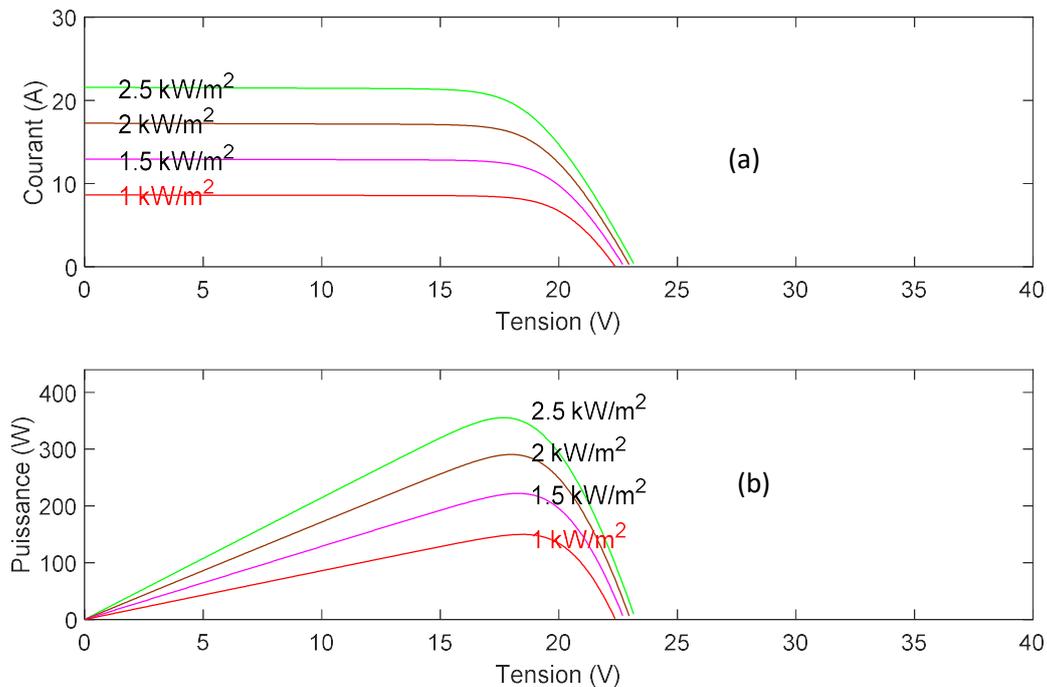


Figure 0-20 : (a) Influence de L'ensoleillement sur les courbes I(V).

(b) Influence de L'ensoleillement sur les courbes P(V).

➤ **Interprétation**

Nous remarquons que :

- ✚ 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
- ✚ La puissance optimale de la cellule (P_{ppm}) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement
- ✚ Les points de puissances maximales se situent à peu près à la même tension.

I.9.2.2 Influence de la température

L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique courant/tension d'un semi-conducteur. Pour une température qui change, on peut voir que la variation de la tension change beaucoup plus que le courant. Ce dernier varie très légèrement.

L'influence de la température sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ de la cellule solaire est représentée sur la Figure I-23, pour un éclairement fixe $G = 1000 \text{ W/m}^2$ [22].

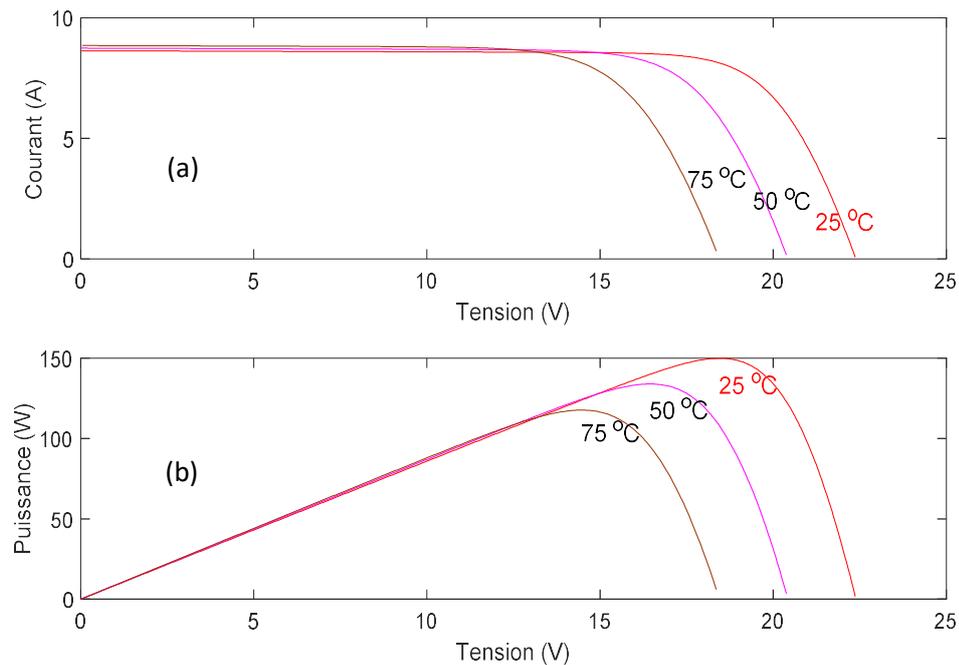


Figure 0-21: (a) Influence de la température sur les courbes $I(V)$.

(b) Influence de la température sur les courbes $p(V)$.

➤ Interprétation :

Comme on peut voir sur la figure :

- La température influe négativement sur la tension de circuit ouvert (Plus la température est élevée plus V_{co} est faible et le courant de court-circuit I_{cc} augmente avec la température).
- Par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente.

I.10 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

I.10.1 Avantages

- D'abord une haute fiabilité. 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.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

I.10.2 Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et exigé des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10 - 15 % avec limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes [23].

I.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions sur le rayonnement solaire. Suivi de présenter les bases indispensables à la compréhension du fonctionnement physique d'une cellule photovoltaïque. Puis on a expliqué le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques et citons les différentes générations des cellules photovoltaïques.

Ensuite nous avons expliqué l'influence des paramètres internes et externes l'augmentation d'ensoleillement et de la température, ainsi la résistance parallèle R_p et la résistance série R_s sur le fonctionnement des cellules photovoltaïques.

L'étude du différent type de convertisseur DC/DC comme étage de conversion d'énergie, les techniques MPPT existantes qui permettent de faire fonctionner le GPV à sa puissance maximale sera présentée dans le deuxième chapitre.

Chapitre II :Les hacheurs et le principe de la recherche du point de puissance maximal

II.1 Introduction

Les GPV ont des caractéristiques I-V non linéaires qui permettent un point de fonctionnement optimal dans des conditions d'éclairage et de température uniformes. Une adaptation d'impédance est nécessaire, ce qui peut être réalisé en couplant directement une charge appropriée ou en insérant des composants électroniques entre le GPV et la charge électrique. L'appareil n'est rien de plus qu'un convertisseur statique équipé d'un contrôle de suivi PPM. Pour concevoir une interface de puissance plus efficace, un convertisseur DC-DC statique non isolé en mode de conduction continue est étudié. La conception de l'étage d'adaptation équipé de l'algorithme MPPT permet d'optimiser la conversion d'énergie et de connecter facilement le GPV à sa charge.

Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'étude du différent type de convertisseur DC/DC comme étage de conversion d'énergie, on présentera quelques techniques MPPT existantes qui permettent de faire fonctionner le GPV à sa puissance maximale.

II.2 Les hacheurs

Le convertisseur *DC-DC* permet d'alimenter une charge sous une tension continue réglable à partir d'une source continue fixe.

On obtient une tension de valeur moyenne variable en établissant et interrompant périodiquement l'alimentation de la charge par la source grâce à des interrupteurs.

II.2.1 Différents types d'hacheurs

Selon la position du commutateur et de l'hacheur, différents types de convertisseurs de tension peuvent être réalisés :

- ✓ abaisseur de tension «Buck »
- ✓ élévateur de tension « Boost »
- ✓ abaisseur élévateur de tension « Buck-Boost »

II.2.1.1 Convertisseur Buck

Hacheur abaisseur, hacheur dévolteur, hacheur série, hacheur de type Buck. L'hacheur série est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. 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) [24].

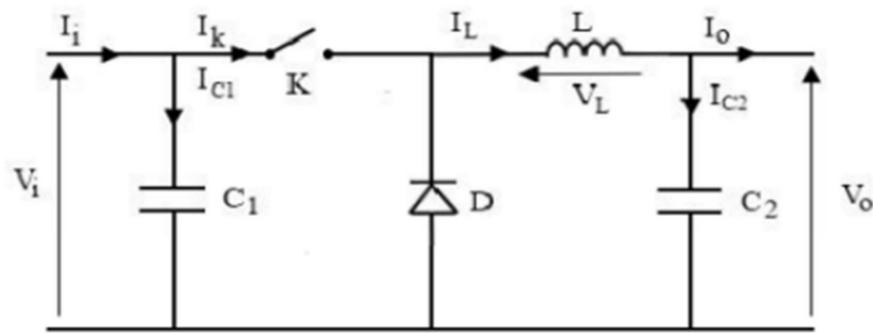


Figure 0-1 : Schéma électrique d'un hacheur buck.

Fonctionnement

Avec

α : le rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur.

T_e : étant la période des impulsions.

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , la tension appliquée aux bornes de la diode. L'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage $f_e = \frac{1}{T_e}$. La source V_i fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps $t \in [\alpha T_e, T_e]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle. Les chronogrammes (tracés dans le cas idéal) de la figure II-2 sont tracés dans le cas d'une conduction continue, c'est-à-dire que le courant ne repasse jamais par zéro. Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle [25].

$$V_0 = \alpha \cdot v_i \quad 0-1$$

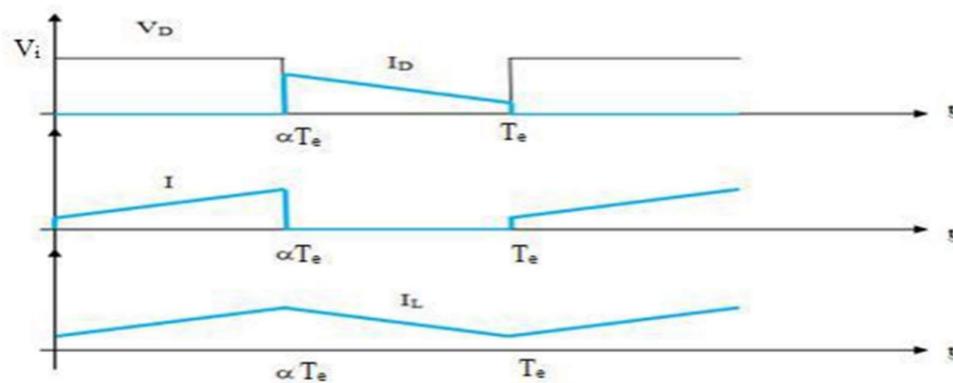


Figure 0-2 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck.

Pour savoir le comportement réel nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure II-3 montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec le commutateur fermé, tandis que la figure II-4 représente le convertisseur dévolteur avec le commutateur ouvert pendant $(1 - \alpha) T_e$.

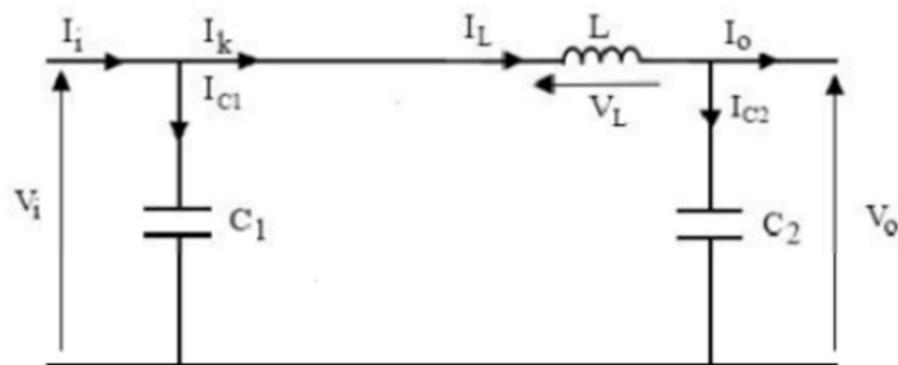


Figure 0-3 : Schéma électrique d'un hacheur buck fermé.

Lorsqu'on applique la loi de Kirchhoff sur le circuit ci-dessus on aura les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 I_{C1}(t) &= C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \\
 I_{C2}(t) &= C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \\
 V_L(t) &= L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t)
 \end{aligned}
 \tag{0-2}$$

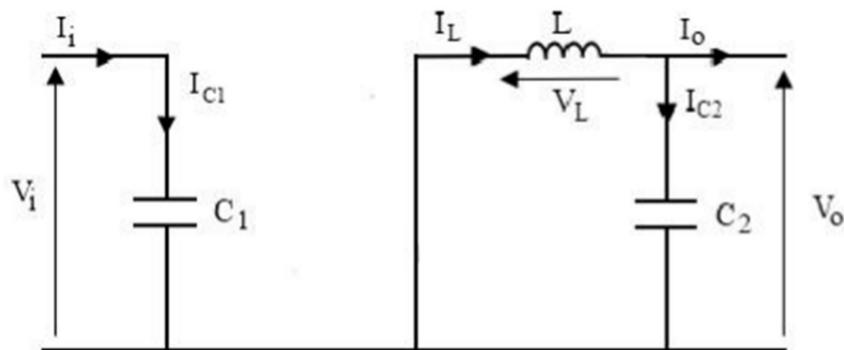


Figure 0-4 : Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert.

$$I_{C1}(t) = C_2 \frac{dV_{i(t)}}{dT} = I_i(t) \quad 0-3$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_{0(t)}}{dt} = I_L(t) - I_0(t)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = -V_0(t)$$

II.2.1.2 Le convertisseurs BOOST

C'est un convertisseur direct DC-DC. 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). Connue aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure II-5. [25]

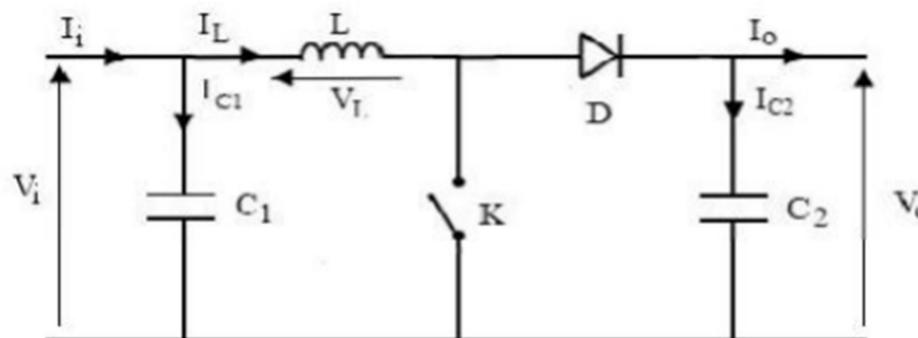


Figure 0-5 : Le convertisseur boost.

Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure

Fonctionnement

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée, le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à

$$V_0(1 - \alpha) = V_i \quad 0-4$$

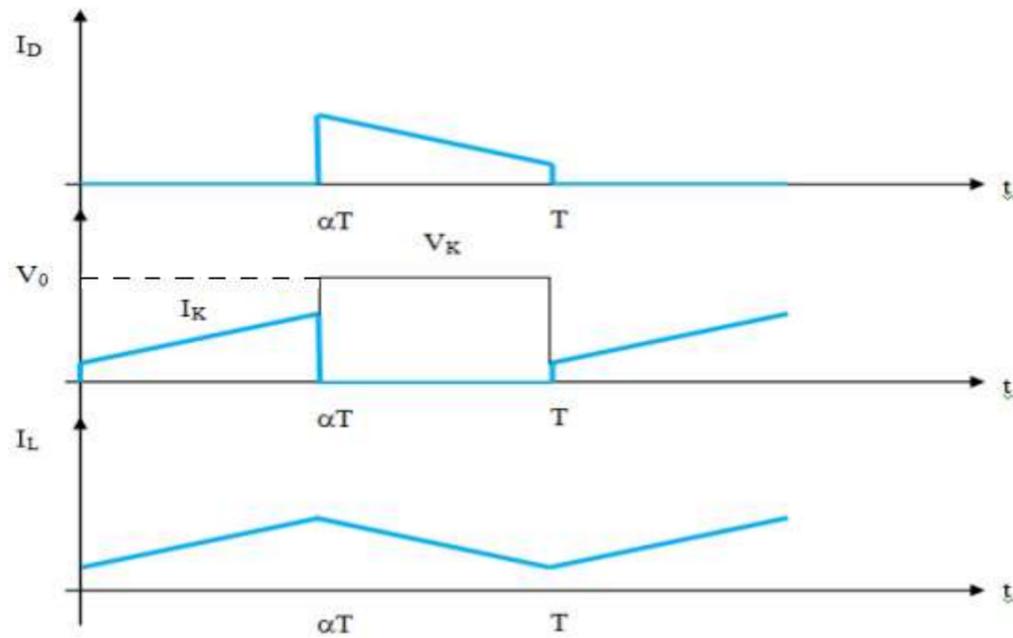


Figure 0-6 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. celui de la figure II-7 présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c-à-d d'entre $[0, \alpha T_e]$.[25]

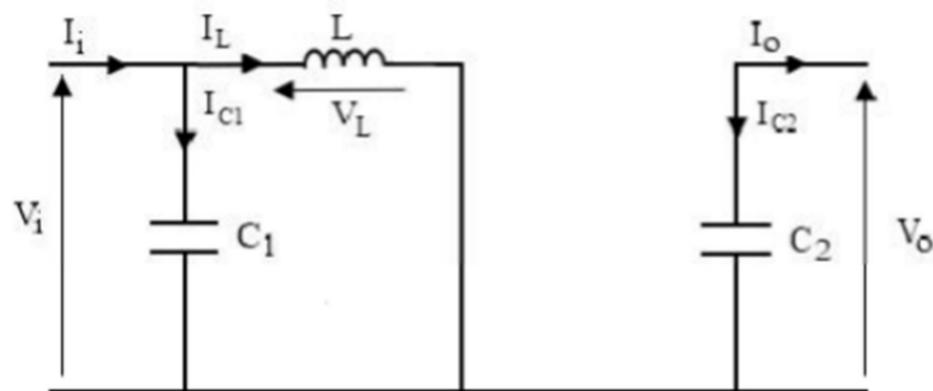


Figure 0-7 : Schéma électrique d'un hacheur boost fermé.

Comme pour le circuit buck, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donnent les calculs suivants :

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad 0-5$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t)$$

L'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant :

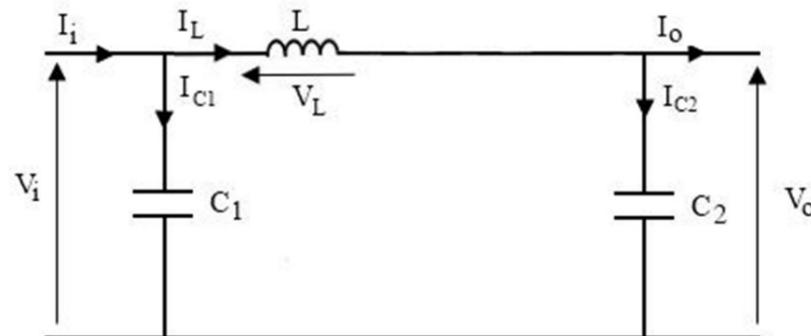


Figure 0-8 : Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert.

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \quad 0-6$$

II.2.1.3 Hacheur Buck-Boost

L'hacheur buck-boost 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). 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) [25]

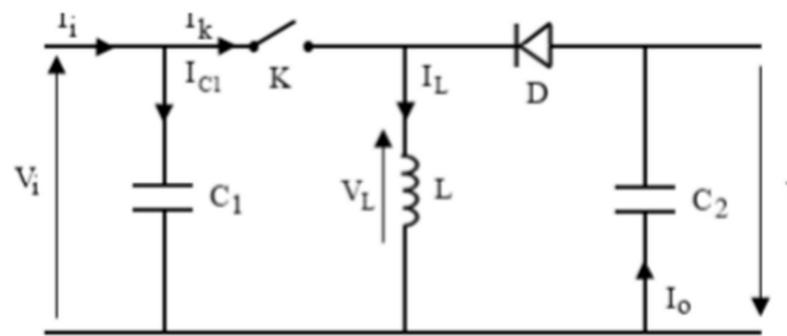


Figure 0-9: schéma électrique d'un hacheur buck-boost.

Fonctionnement

Cette structure de convertisseur permet d'obtenir des tensions négatives à partir de tension positive. Le schéma de principe est présenté figure II-10. Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , le courant augmente linéairement. La tension est égale à V_i . À l'ouverture de K, la diode prend le relais et la tension V_L est égale à $-v_0$. Par définition la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle. Il en résulte que:

$$V_i \cdot \alpha \cdot T = V_0(1 - \alpha)T \quad 0-7$$

Quand le rapport cyclique α supérieur à 0.5 le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur boost et si le rapport cyclique α inférieur à 0.5 le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur buck [25].

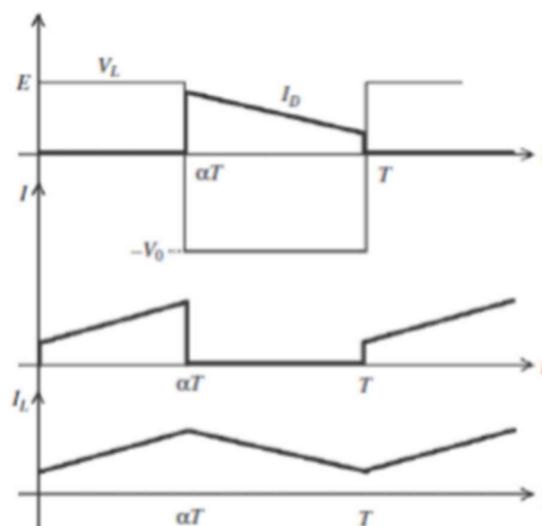


Figure 0-10 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck-boost.

Lorsque l'interrupteur K est fermé le circuit équivalent est montré sur la figure

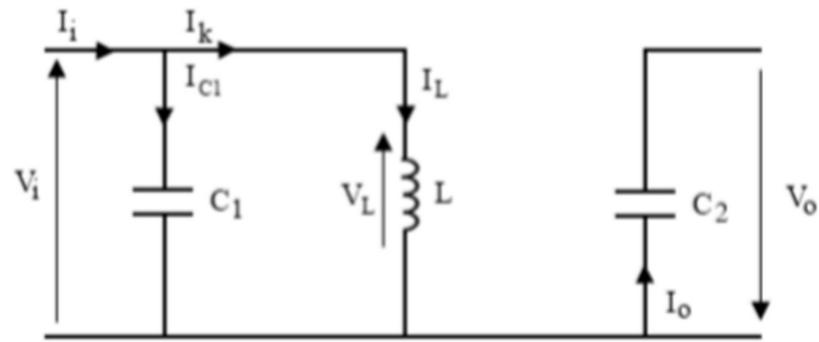


Figure 0-11: Schéma électrique d'un hacheur buck- boost fermé.

En appliquant la loi de Kirchhoff à ce circuit on obtiendra les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 I_{C1}(t) &= C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \\
 I_{C2}(t) &= C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t) \\
 V_L(t) &= L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t)
 \end{aligned}
 \tag{0-8}$$

Lorsque l'interrupteur K est ouvert le circuit équivalent apparait à la figure

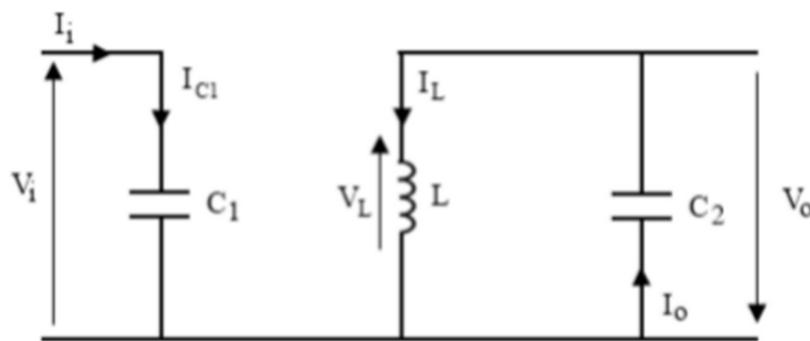


Figure 0-12: Schéma électrique d'un hacheur buck- boost ouvert.

Le modèle d'équation dans cette configuration est comme suit :

$$\begin{aligned}
 I_{C1}(t) &= C_1 \frac{dV_1(t)}{dt} = I_i(t) \\
 I_{C2}(t) &= C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = I_0 - I_L(t) \\
 V_L(t) &= L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_0(t)
 \end{aligned}
 \tag{0-9}$$

II.3 Principe de la recherche du point de puissance maximal

II.3.1 Généralités

Un MPPT, de l'anglais « Maximum Power Point Tracking » est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une MCC par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant. La Figure II-13 représente la trajectoire du point de puissance maximale produite par le générateur.

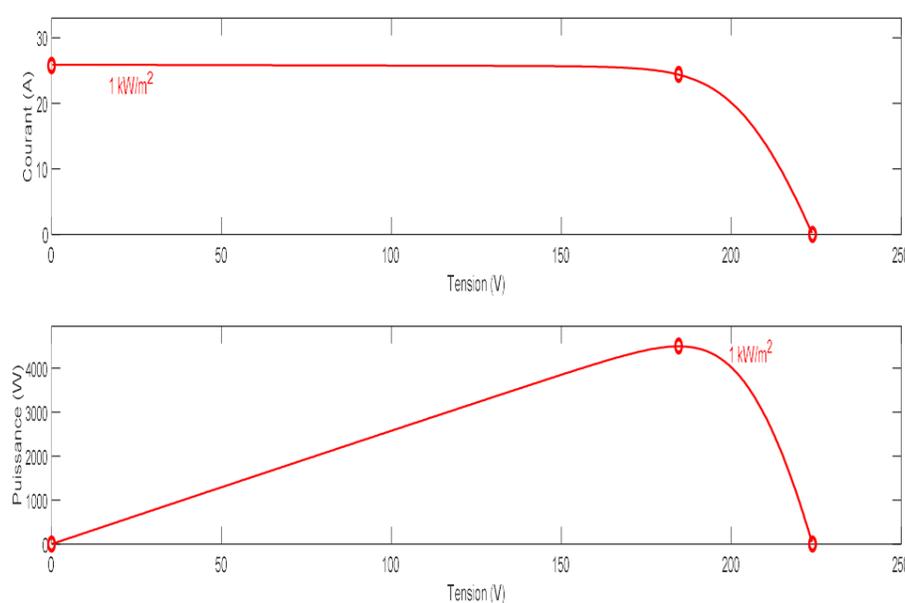


Figure 0-13: La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM.

La Figure II-14 présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie servant de stocke l'énergie pour une charge qui ne supporte pas les fluctuations de tension. Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui

permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé [26].

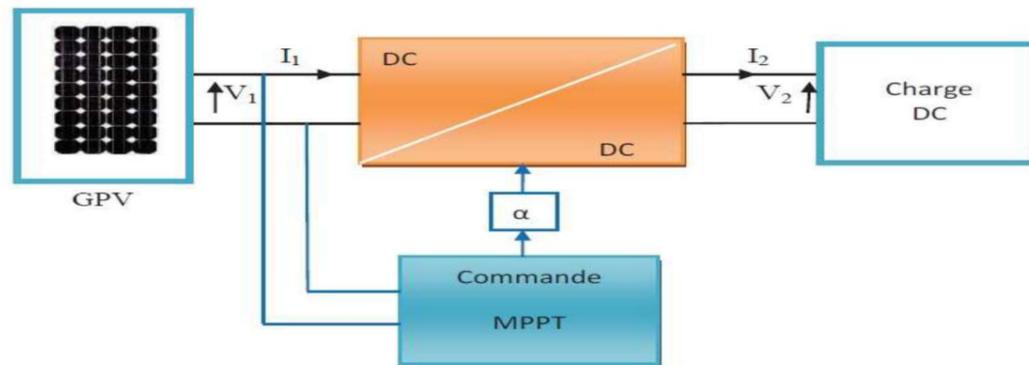


Figure 0-14: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

Pour assurer le fonctionnement d'un GPV à son point de puissance maximale (PPM) des contrôleurs MPPT sont utilisés, ces contrôleurs sont destinés à minimiser l'erreur entre la Puissance de fonctionnement et puissance maximale de référence variable en fonction des conditions climatiques basées sur des méthodes optimales [27].

II.3.2 Gestion de la MPPT

La figure II-15 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. Dans ce cas est pour une variation d'ensoleillement il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Dans le cas b pour une variation de charge on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Enfin dans le dernier cas c de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV. Bien qu'il faut également agir au niveau de la commande [8].

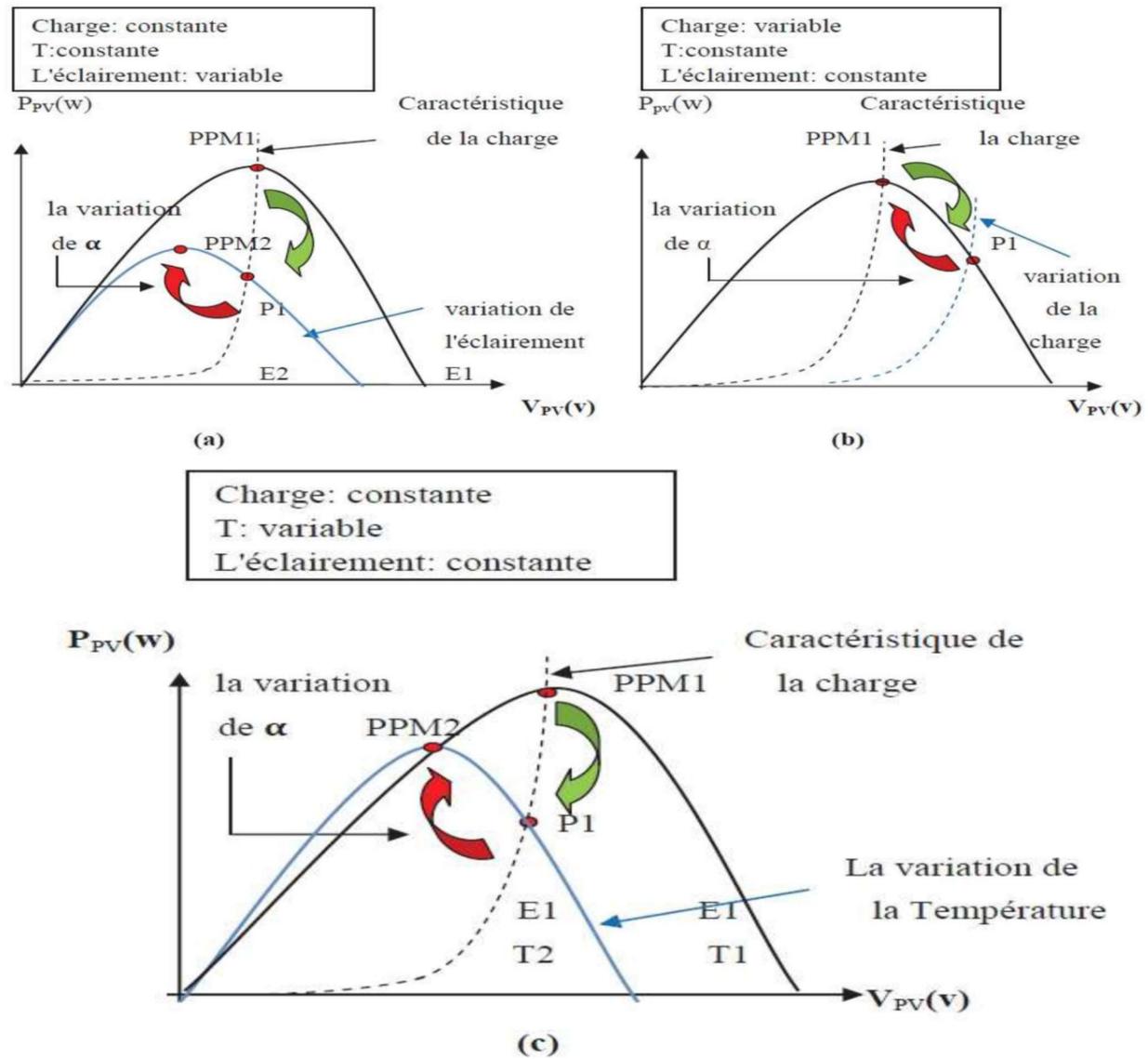


Figure 0-15: Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à un variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température.

II.3.3 Les techniques de commandes MPPT

Il existe de nombreuses méthodes et techniques de commande MPPT disponibles dans la littérature dont on cite trois méthodes classiques: Perturbe and Observe (P&O), l'incrémentation de conductance (IncCon) et la méthode Hill Climbing. Actuellement il existe des méthodes basées sur l'intelligence artificielles à savoir : logique floue, et réseau de neurones et les algorithmes génétiques.

II.3.3.1 La méthode Perturbe & 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 [30-33]. Ainsi, comme l'illustre la figure II-16, 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 la convergence vers le nouveau PPM.

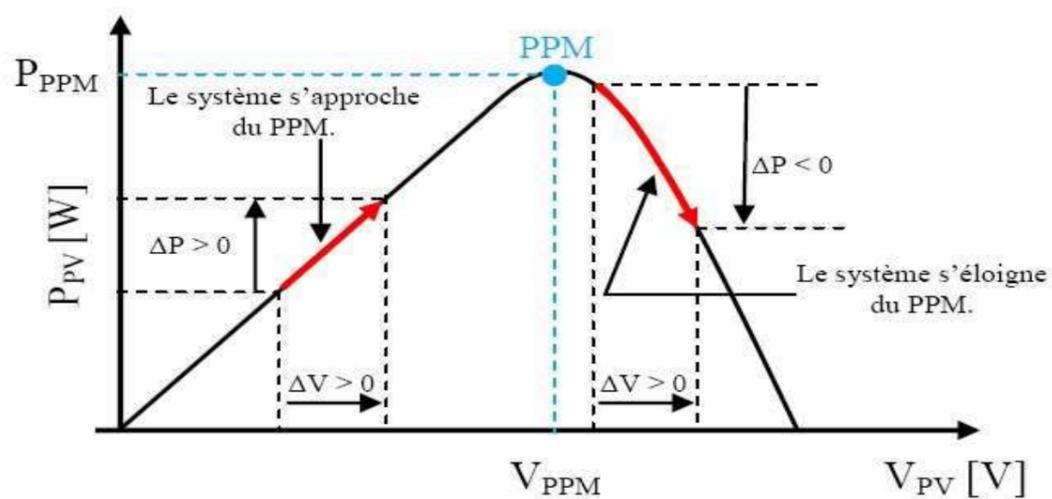


Figure 0-16: Caractéristique PPV (VPV) d'un panneau solaire.

La figure II-17 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.

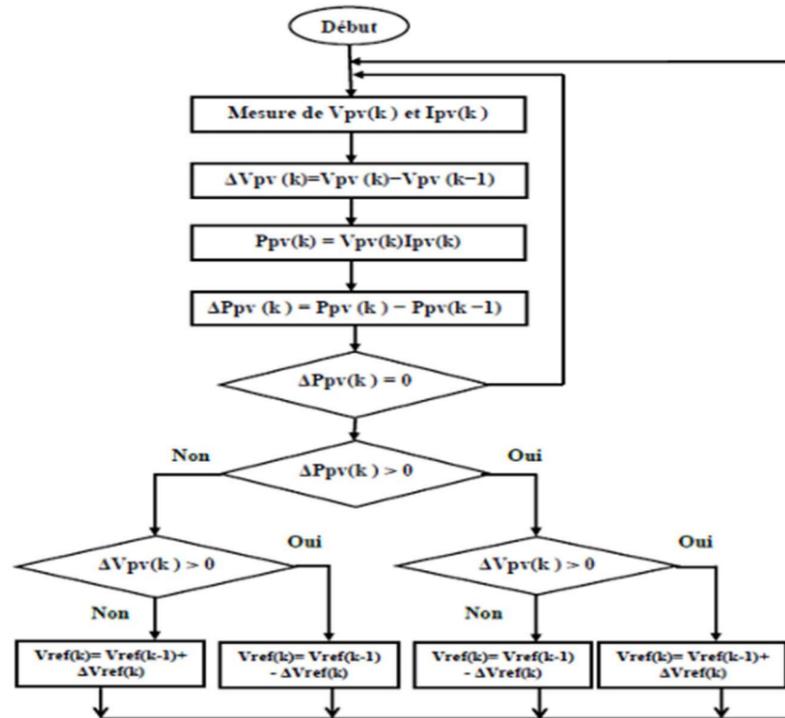


Figure 0-17: Algorithme type de la méthode P&O.

Avec :

P_{pvn} : la nouvelle puissance

$P_{pv(n-1)}$: l'ancienne puissance dans le temps (t-1)

$$\begin{aligned} \Delta_V &= V_{PVn} - V_{PV(n-1)} \\ \Delta_P &= P_{PVn} - P_{PV(n-1)} \end{aligned} \quad 0-10$$

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de part 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 la précision et la rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser [8].

II.3.3.2 La méthode Incrémentation des conductances (INC)

Cette technique est basée sur la variation de la conductance du GPV et son influence sur la position du point de fonctionnement. La conductance et la variation élémentaire de la conductance (incrément) du module photovoltaïque sont définies respectivement par :

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad 0-11$$

$$dG = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad 0-12$$

La caractéristique puissance-tension du GPV, permet d'écrire les conditions suivantes :

- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$ le point de fonctionnement est à gauche du PPM.
- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$ le point de fonctionnement est sur le PPM.
- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0$ le point de fonctionnement est sur la droite du PPM.

En utilisant la relation (II.12), la dérivée de la puissance peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(V_{pv} \cdot I_{pv})}{dV_{pv}} = I_{pv} \cdot \frac{dV_{pv}}{dV_{pv}} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad 0-13$$

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

Le PPM peut être atteint en comparant à chaque instant la valeur de la conductance (I_{PV}/V_{PV}) avec celle de l'incrément de conductance (dI_{PV}/dV_{PV}). La figure II.18 montre l'algorithme de cette méthode, où V_r représente la tension de référence.

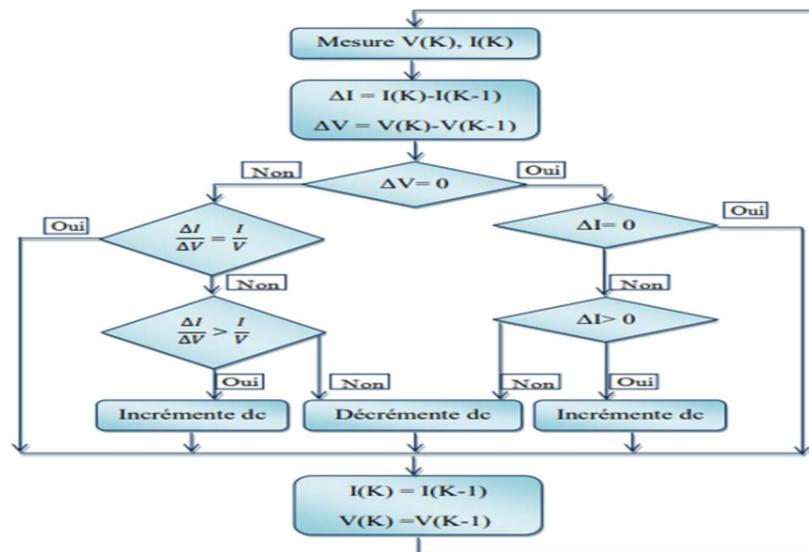


Figure 0-18: Algorithme de la méthode Incrément de conductance.

Pratiquement, comme la méthode P&O, cette technique présente des oscillations autour du PPM car il est difficile de remplir la condition $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$, ce qui fait que le système reste toujours en train de la chercher. L'algorithme IncCond est plus complexe que celui du P&O, ce qui engendre un temps d'exécution plus long [28].

II.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence les différents types de convertisseurs DC/DC les plus utilisés comme étage d'adaptation (Buck, Boost et Buck-Boost).

La deuxième partie de ce chapitre est consacré aux principes et les techniques de commande MPPT qui sont nécessaires pour qu'un système photovoltaïque fonctionne à sa puissance maximale même pour des variations météorologiques ou de la charge.

Nous avons basé sur l'étude des convertisseurs du courant continu (boost) et la commande MPPT de type P&O pour le but d'utiliser à votre simulation qui relié avec la charge (MCC) de chapitre suivant.

Chapitre III: Les Machines à courant continu

III.1 Introduction

Les machines à courant continu furent les premières machines électriques utilisées par les ingénieurs au milieu du 19^{ème} siècle pour produire de la puissance motrice en usine ou en transport (les tramways).

Ils sont des actionneurs électromécaniques très utilisés dans l'industrie, car elles constituent le composant le plus important des chaînes de production fréquemment automatisées et qui nécessite une variation précise de la vitesse de rotation.

Dans ce chapitre, nous décrirons ce qu'est un moteur à courant continu et son fonctionnement, et nous construirons différents types de moteurs à courant continu. Nous énumérons ensuite les avantages et les inconvénients de cet actionneur.

III.2 Définition

Les machines à courant continu sont des convertisseurs électromécaniques d'énergie. Il existe deux modes de fonctionnement d'une machine à courant continu. Mode moteur, si l'énergie électrique absorbée est convertie en énergie mécanique et capable de fournir une puissance mécanique suffisante pour entraîner une charge. L'autre mode est générateur, si l'énergie mécanique reçue est convertie en énergie électrique, dans ce cas elle peut utiliser pour alimenter une charge électrique [29].

Le moteur à courant alternatif est invariablement utilisé dans l'industrie pour la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique, mais un moteur à courant continu est très utilisé pour les petites et moyennes puissances car il apporte une très grande souplesse de fonctionnement avec un encombrement minimum [30].

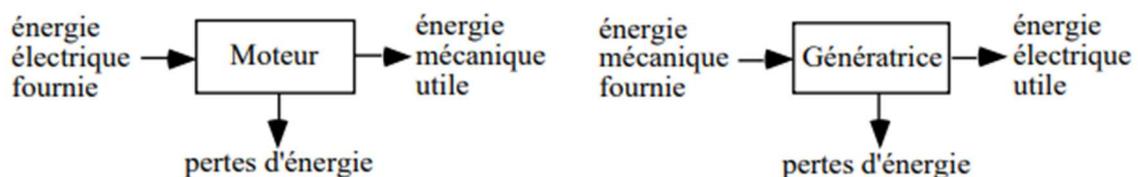


Figure 0-1 : Type de fonctionnement d'une machine à courant continu.

III.2.1 Symboles

La machine à courant continu est symbolisée par :

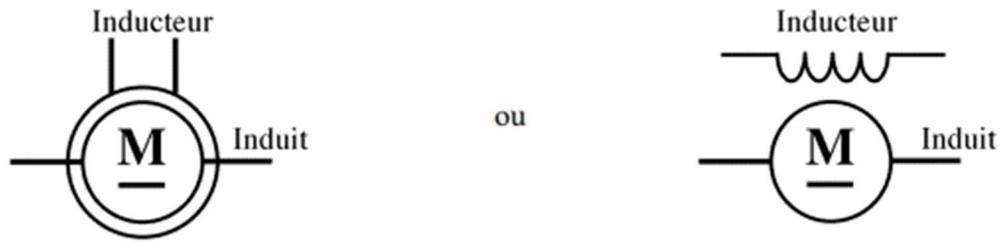


Figure 0-2 : Les symboles d'une MCC.

III.3 Les principaux éléments constituant la machine à courant continu

Une machine à courant continu comprend deux parties principales. Une partie mobile appelée l'induit, dans laquelle a lieu la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique. Une partie fixe destinée surtout à créer le flux magnétique.

Les parties fixe et mobile sont séparées l'une de l'autre par un entrefer.

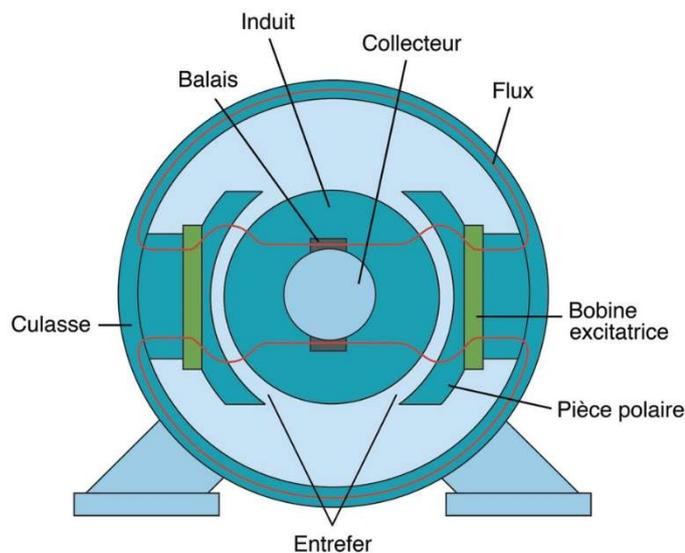


Figure 0-3 : Constitution d'une MCC.

III.3.1 Partie fixe d'une machine à courant continu

III.3.1.1 Inducteur

L'inducteur (producteur de flux magnétique) responsable de la production du champ magnétique d'excitation, pour des petites machines le bobinage de l'inducteur ou bien les bobinages d'excitation sont remplacés par des aimants permanents.

L'inducteur comporte en générale deux paires de pôle ($2 \cdot P$ pôles) :

$P=1$: machine bipolaire (2 pôles)

$P=2$: machine tétrapolaire (4 pôles)

$P=3$: machine hexa-polaire (6 pôles)

$P=4$: machine octal-polaire (8 pôles)

Ces pôles sont dits pôles principaux, constitués de noyaux massifs en acier doux, ils sont terminés par des épanouissements (ou cornes) polaires feuilletés pour réduire les pertes fer [31].

III.3.1.2 La carcasse (culasse)

Elle forme la partie extérieure qui supporte les différentes parties de la machine, elle renferme le champ magnétique.

III.3.1.3 Les pièces polaires

Les pièces polaires sont constituées de tôles feuilletées (pour réduire les pertes par courant de Foucault) et permettent de supporter les bobines d'excitation de la machine. Elles permettent donc de produire un champ d'induction [32].

III.3.2 Partie mobile d'une machine à courant continu

III.3.2.1 L'induit (le rotor)

L'induit est la partie tournante de la machine composée d'un ensemble de bobinage identique reparti uniformément autour d'un noyau cylindrique.

Les conducteurs d'induit sont parcourus par des courants ne débitent pas la machine, si le courant est plutôt faible on emploie des conducteurs ronds, on se sert de conducteurs rectangulaires qui permettent une meilleure utilisation du volume de l'encoche pour courant qui dépasse une cinquantaine d'ampères [33].

III.3.2.2 Le collecteur

Le collecteur assure la liaison entre les conducteurs tournants et le circuit extérieur fixe. Il est le constituant critique des machines à courant continu car ses lames sont soumises aux efforts centrifuges et assemblées manuellement. Son usure due au frottement avec les balais nécessite un démontage et un ré-usinage périodiques. De plus, il accroît de 20 à 30% la longueur totale de la machine [34].

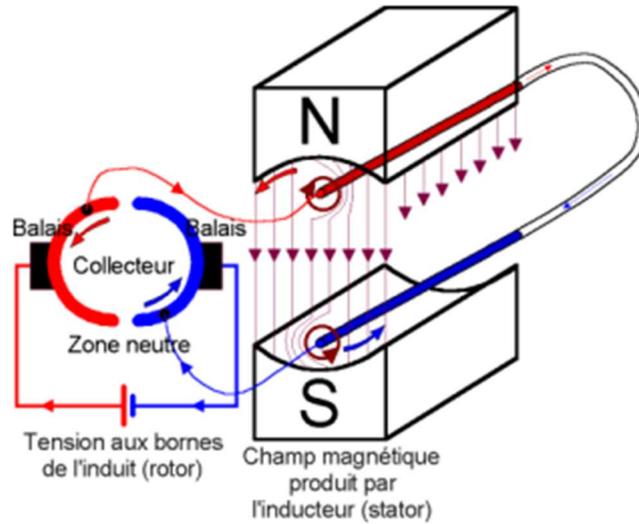


Figure 0-4 : Collecteur de moteur à courant continu [35].

III.3.2.3 Les balais

Les balais ou frotteurs, sont fixes et appuient sur le collecteur pour assurer la transmission de l'énergie entre la machine et le circuit extérieur. Ils sont maintenus par des porte-balais dans lesquels des ressorts viennent maintenir une pression appropriée du balai sur le collecteur. Ces balais sont faits de carbone. Il s'agit d'un matériau ayant une bonne conductivité thermique et électrique. De plus, il est assez doux pour ne pas endommager le collecteur [29].

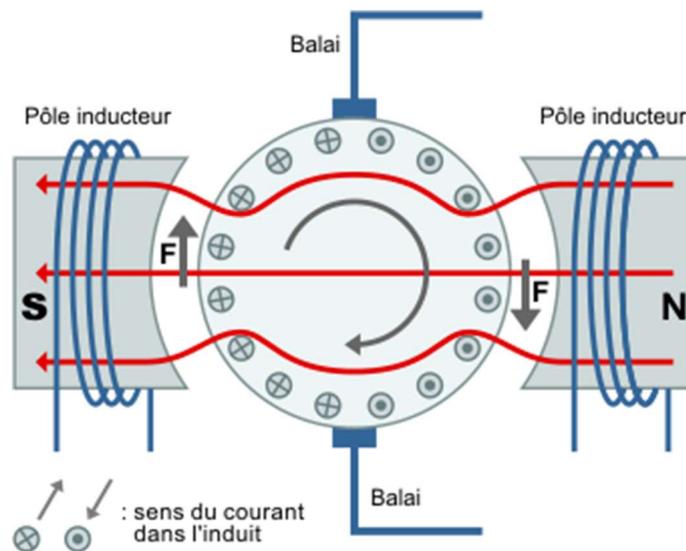


Figure 0-5 : Schéma de branchement de balais [36].

III.4 Différents types du Moteur à courant continu

On distingue deux types de moteurs à courant continu :

III.4.1 Les moteurs à inducteur à aimant permanent

Il n'y a pas de circuit inducteur, le flux inducteur est produit par un aimant permanent. Tous les moteurs à courant continu de faible puissance et les micromoteurs sont des moteurs à aimant permanent. Ils représentent maintenant la majorité des moteurs à courant continu. Ils sont très simples à l'utilisation.

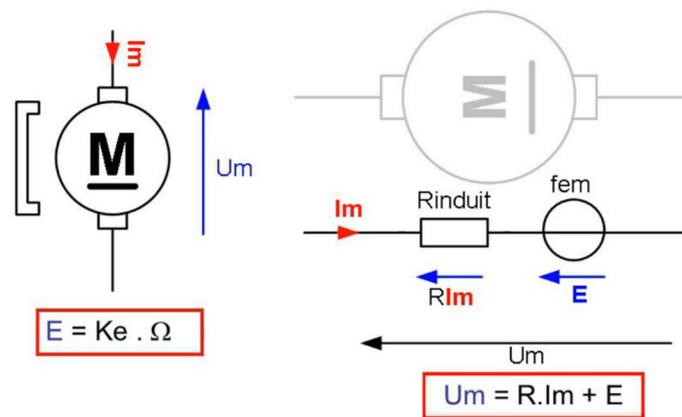


Figure 0-6: Schéma équivalent du MCC à aimant permanent.

III.4.2 Moteurs à inducteur bobiné

L'inducteur d'un moteur à courant continu peut être branché de diverses façons. La machine est à excitation séparée (ou indépendante) quand l'inducteur et l'induit sont reliés à des sources différentes.

La machine est à excitation liée, lorsque l'inducteur et l'induit sont alimentés à partir de la même source.

On distingue quatre modes d'excitation :

III.4.2.1 Moteur à excitation série

Pour le moteur à courant continu à excitation série, l'induit et l'inducteur sont branchés en série, ce qui donne le schéma suivant Figure III-7, et le schéma équivalent suivant (modèle de Thévenin) Figure III-8.

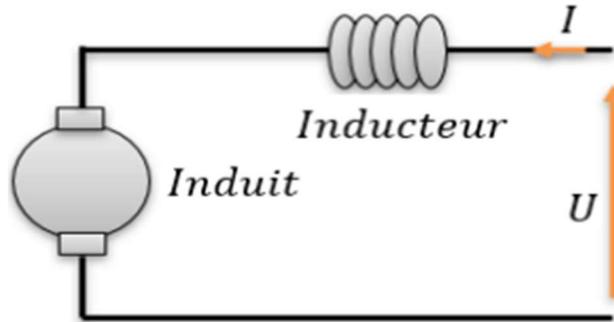


Figure 0-7: Schéma du MCC à excitation série.

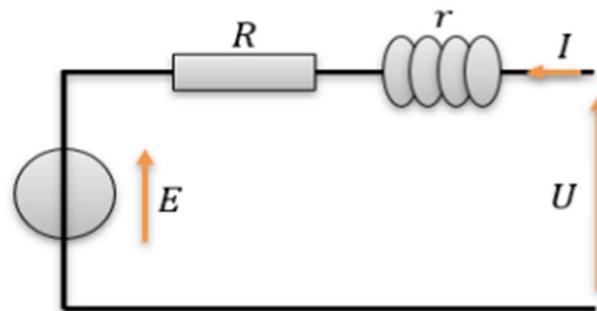


Figure 0-8 : Schéma équivalent du MCC à excitation série.

R_t est la résistance totale du moteur, elle est égale à la somme des résistances d'induit R et d'inducteur r :

$$R_t = R + r \quad 0-1$$

R_t Se mesure en mesurant r et R indépendamment l'une de l'autre.

Remarque

Le moteur à excitation série ne doit jamais fonctionner à vide car si

$$I \rightarrow 0, \Omega \rightarrow \infty$$

La machine risque l'emballement.

III.4.2.2 Moteur à excitation shunt

L'enroulement d'excitation shunt est connecté en parallèle sur l'alimentation du moteur, il possède les mêmes propriétés que le moteur à excitation séparée du fait que, dans les deux cas l'inducteur constitue un circuit extérieur à celui de l'induit. Le circuit électrique est représenté par la Figure III-9.

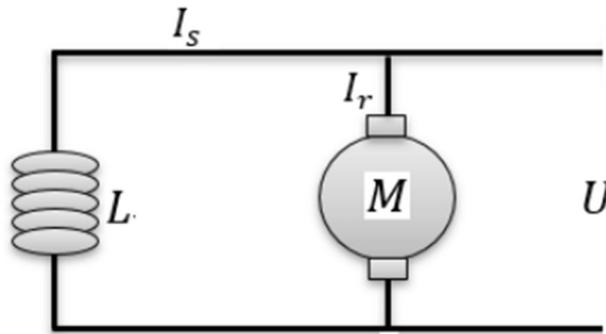


Figure 0-9 : Schéma de MCC à excitation shunt.

III.4.2.3 Moteur à excitation Composée

Le moteur à excitation composé, est à raccorder à avec deux excitations, excitation série et excitation shunt en même temps.

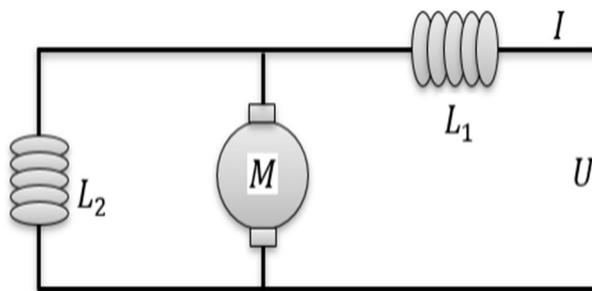


Figure 0-10: Schéma de MCC à excitation composée.

III.4.2.4 Moteur à excitation séparée

L'alimentation de l'enroulement inducteur est prise sur une source indépendante de la source de l'induit comme l'indique la Figure III-11[40].

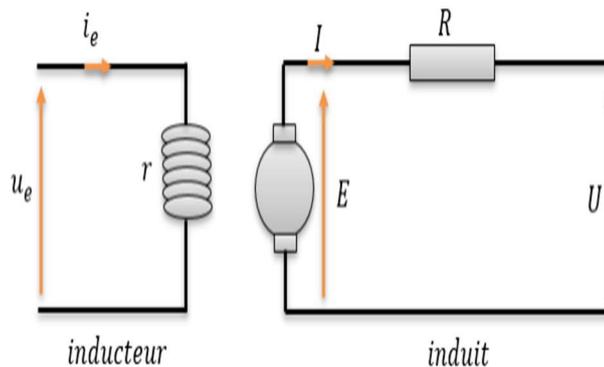


Figure 0-11 : Schéma équivalent du MCC à excitation séparée.

III.5 Principe de fonctionnement

Le moteur à courant continu fonctionne selon la loi de Laplace : « **Tout conducteur de longueur L parcouru par un courant I et placé dans un champ magnétique B est soumis à une force F** ».

Un conducteur de longueur (L), placé dans un champ magnétique et parcouru par un courant, est soumis à une force électromagnétique. Le champ créé par l'inducteur agit sur les conducteurs de l'induit : Chacun des (N) conducteurs de longueurs (L) placé dans le champ (B) et parcouru par un courant (I) est le siège d'une force électromagnétique perpendiculaire au conducteur :

$$F = B \cdot I \cdot L \cdot \sin \alpha \quad 0-2$$

Ces forces de Laplace exercent un couple proportionnel à l'intensité (I) et au flux (Φ) sur le rotor. Le moteur se met à tourner à une vitesse proportionnelle à la tension d'alimentation (V) et, inversement proportionnelle au flux (Φ).

Au passage de tout conducteur de l'induit sur la ligne neutre, le courant qui le traverse change de sens grâce au collecteur. Le moteur conserve le même sens de rotation.

Pour inverser le sens de rotation du moteur, il convient d'inverser le sens du champ produit par l'inducteur par rapport au sens du courant circulant dans l'induit :

- Soit on inverse la polarité de la tension d'alimentation de l'induit.
- Soit on inverse la polarité d'alimentation du circuit d'excitation [37].

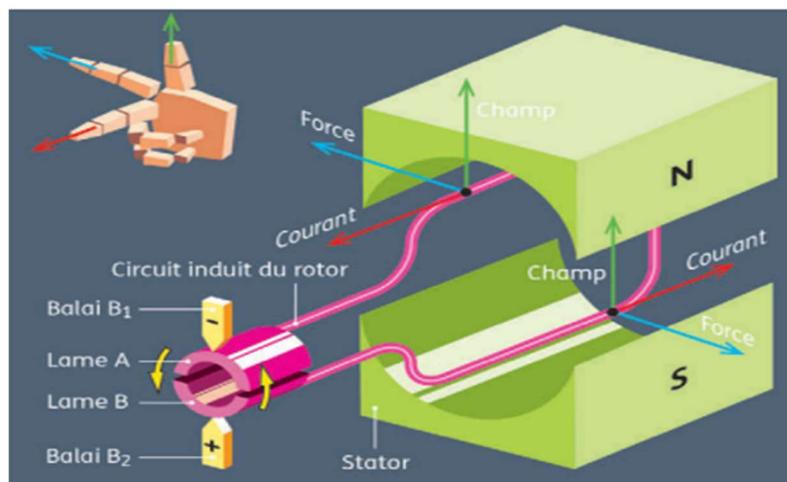


Figure 0-12: Principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu [38].

- La force contre électromotrice

Elle est donnée par la relation d'électrotechnique : La force électromotrice (E) est la tension produite par le rotor (l'induit) lors de sa rotation dans le flux magnétique produit par la partie fixe (l'inducteur). Elle dépend des éléments de construction de la machine.

$$E = \frac{P}{a} N \cdot n \Phi \quad 0-3$$

P : Nombre de pair de pôles de la machine.

N : Nombre de conducteurs actifs de la périphérie de l'induit.

a : Nombre de paires de voies de l'enroulement entre les deux balais.

n : Fréquence de rotation de l'induit (en t/s).

Φ : flux sous un pôle de la machine en Webers.

Finalement :

$$E = K \cdot \Omega \cdot \Phi \quad 0-4$$

Avec :

$$K = \frac{P}{2\pi a} \cdot N \quad 0-5$$

K : Constante de la force contre électromotrice.

- Couple électromagnétique

Pour une spire : les deux brins d'une spire placées dans le champ magnétique B, subissent des forces de Laplace F_1 et F_2 formant un couple de force ($F_1 = -F_2 = I \cdot l \wedge B$),

Pour une spire :

$$C = 2rF = 2rlBI = SBI = \Phi I. \quad 0-6$$

Donc le couple électromagnétique total développé est :

$$C_{EM} = K\Phi I \quad 0-7$$

K : est la même constante que dans la formule de la f.c.é.m.

Si de plus la machine fonctionne à flux constant :

$$C_{EM} = K\Phi I; \text{ avec } K' = K\Phi \quad 0-8$$

- Puissance électromagnétique

Si l'induit présente une f.é.m. E et s'il est parcouru par le courant I , il reçoit une puissance électromagnétique $P_{EM} = E \cdot I$

D'après le principe de conservation de l'énergie cette puissance est égale à la puissance développée par le couple électromagnétique [29].

$$P_{EM} = C_{EM}\Omega = EI \quad 0-9$$

III.5.1 Bilan de puissance

Le bilan des puissances résume toutes les puissances, depuis la puissance absorbée d'origine électrique jusqu'à la puissance utile de nature mécanique [39].

Le bilan, peut être résumé à l'aide du schéma suivant :

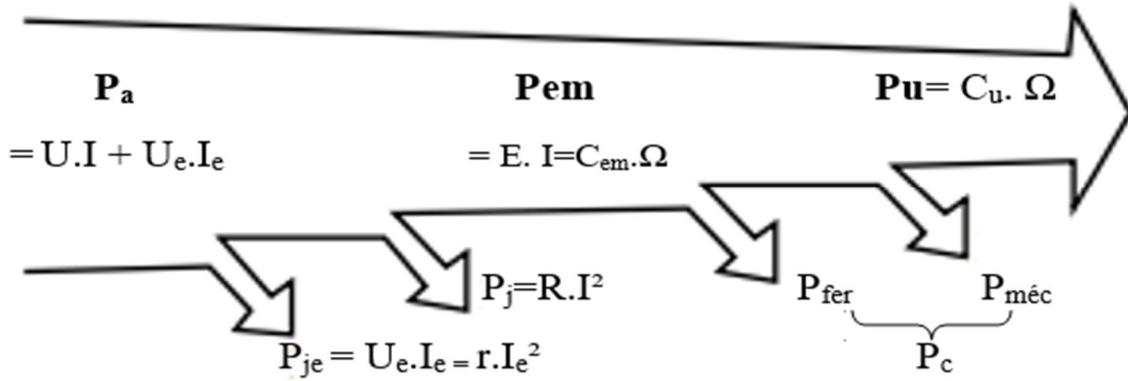


Figure 0-13 : Bilan de puissance.

III.5.1.1 Rendement de la machine à courant continu

Du fait de ces différentes pertes, le rendement d'une machine à courant continu est la puissance utile divisé par la puissance absorbée.

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad 0-10$$

III.5.2 Les quatre quadrants de fonctionnement et la notion de la réversibilité

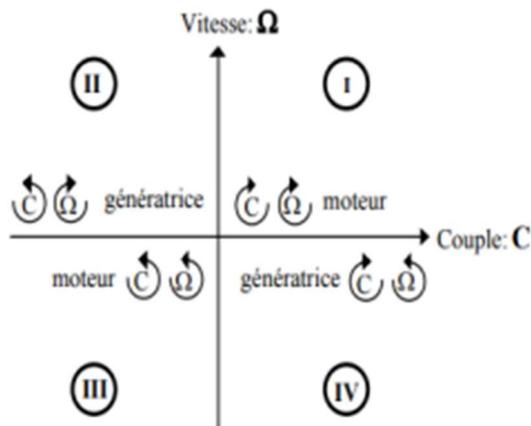


Figure 0-14 : Les quadrants de fonctionnement.

L'association d'un variateur dit à quatre quadrants et d'un moteur courant continu couvre quatre séquences de fonctionnement.

- Deux séquences pour lesquelles le moteur entraîne sa charge dans un sens ou dans un autre (quadrant I et III).
- Deux séquences pour lesquelles la charge est freinée par restitution d'énergie au réseau d'alimentation (quadrant II et IV).

On emploie le terme de réversibilité pour qualifier l'aptitude des éléments à accepter une tension ou un courant positif ou négatif.

L'induit de la machine à courant continu est un dipôle inductif (un élément courant) si on le fait fonctionner dans les quatre quadrants du plan couple /vitesse, il est réversible en tension et en courant [37].

On a en convention récepteur :

$$U = R.I + E \quad 0-11$$

En puissance absorbée P_M :

$$P_M = U.I = E.I + RI^2 \quad 0-12$$

III.6 Caractéristique des moteurs à courant continu

III.6.1 Moteur série

Le moteur série est autorégulateur de puissance. Sa caractéristique mécanique montre qu'il possède un très fort couple au démarrage qui ne dépend pas de la tension, mais il ne peut pas fonctionner à faible charge car sa vitesse devient infinie (risque de destruction du moteur).

Sa vitesse décroît quand la charge augmente d'où l'option de changement de vitesse automatique. Ce dernier est moins sensible aux variations brusques de la tension d'alimentation que le moteur shunt Figures III-16, Figure III-17.

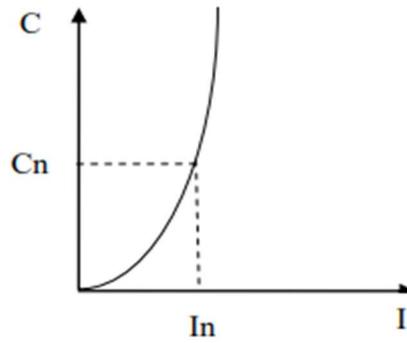


Figure 0-15 : Caractéristique électromécanique du moteur série.

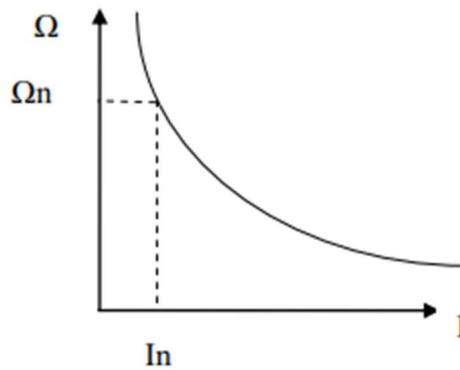


Figure 0-16 : Caractéristique de vitesse en fonction du courant (moteur série).

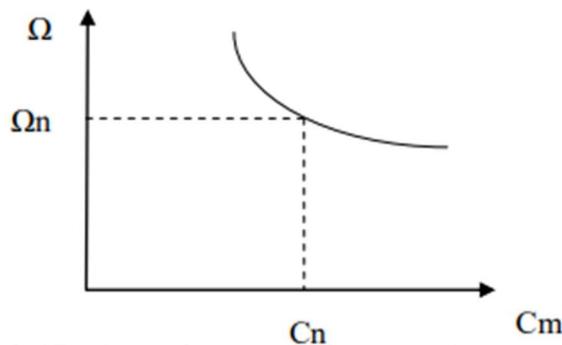


Figure 0-17 : Caractéristique mécanique du moteur série.

III.6.2 Moteur shunt

D'après ces caractéristiques, on remarque que le moteur shunt est un autorégulateur de vitesse dans des limites étroites. Cette dernière n'est pas vraiment influencée par la variation de la tension d'induit, que le moteur à excitation séparée, elle est relativement constante quelle que soit la charge. Il peut fonctionner à vide sans risque d'emballement, utilisé pour l'entraînement des machines dont la vitesse ne doit pas dépendre de la charge, cas des machines-outils, et remplace le moteur série ou l'emballement est craindre, et utilisé dans des appareils de lavage, machine textile et téléphérique ...etc.

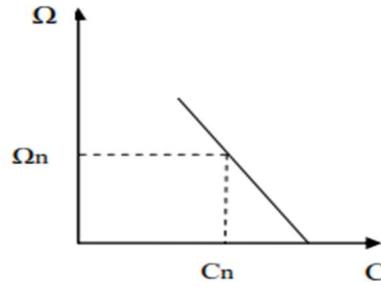


Figure 0-18 : Caractéristique mécanique du moteur shunt.

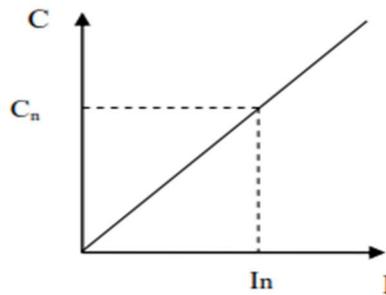


Figure 0-19 : Caractéristique électromécanique du moteur shunt.

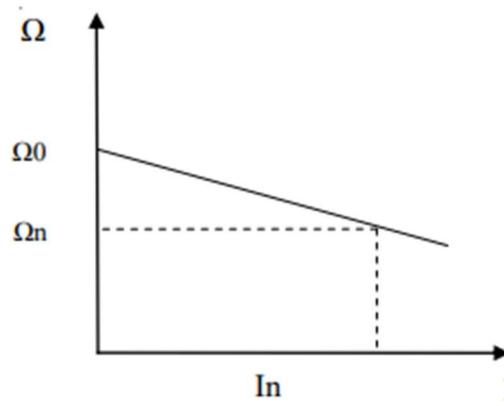


Figure 0-20 : Caractéristique de vitesse en fonction du courant (moteur shunt).

III.6.3 Moteur composé

Le moteur composé est un alliage du moteur série et du shunt, il a bénéficié des avantages des deux moteurs.

Son couple de démarrage est plus fort que le moteur shunt. Il peut fonctionner à faible charge sans risque d'emballement et présente une meilleure stabilité que les deux moteurs précédents, mais il est fait seulement pour l'entraînement à vitesse rigoureusement constante Figure III-21 et Figure III-22.

On peut utiliser ces moteurs dans les ateliers où on utilise les appareils de lavage, les cisailles et les broyeuses...etc.

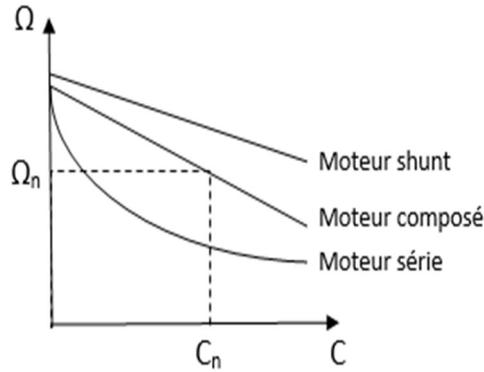


Figure 0-21 : Caractéristique mécanique du moteur composé.

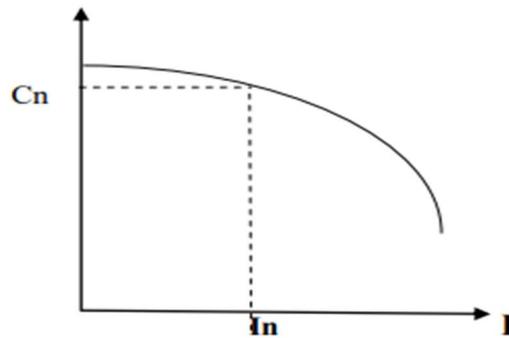


Figure 0-22: Caractéristique de vitesse en fonction du courant.

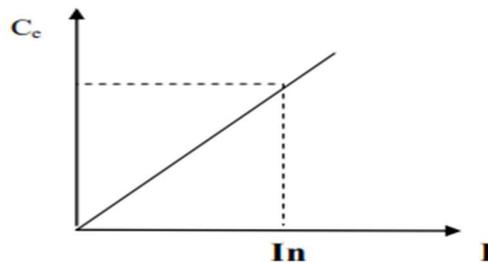


Figure 0-23 : Caractéristique électromécanique du moteur composé.

III.6.4 Moteur séparé

Le moteur à excitation séparée jouit à l'avantage d'un réglage de vitesse dans de larges limites. Cette dernière est très sensible aux variations de la tension d'induit, et indépendante de la charge, ce qui permet de le coupler à des faibles charges sans risque d'emballement. Son couple est proportionnel au courant d'induit, et très important à faible vitesse, d'où ces performances dynamiques très élevées. Son courant de démarrage est très fort d'où la limiter pour éviter l'échauffement du circuit induit.

Ce moteur est le moteur de base des asservissements de position, aussi bien pour les petites que les grandes puissances, et il est utilisé dans des pompes, le transport comme TGV [40].

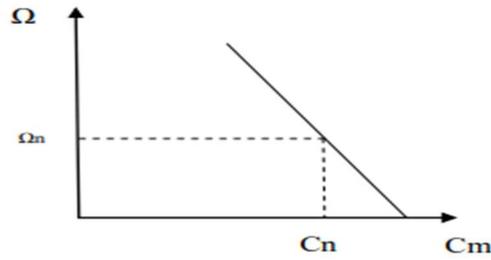


Figure 0-24 : Caractéristique mécanique du moteur séparée.

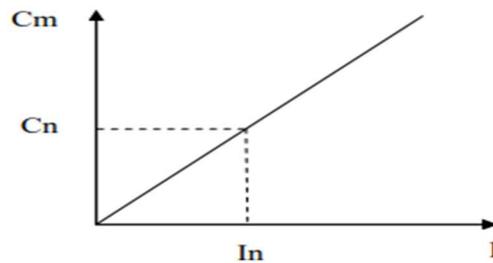


Figure 0-25 : Caractéristique électromécanique du moteur.

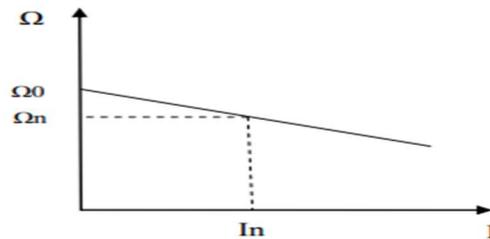


Figure 0-26 : Caractéristique de vitesse en fonction du courant (moteur séparée).

III.7 Modélisation du moteur à courant continu

Le modèle du moteur au quelle nous allons nous intéresser et le moteur à excitation indépendante au quelle nous allons présenter ces expressions mathématiques, le schéma équivalent et représenté dans la Figure III-27.

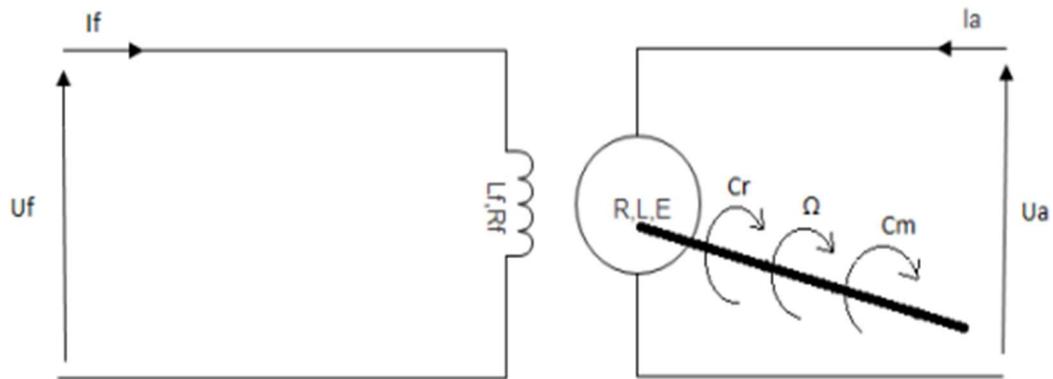


Figure 0-27 : Schéma électrique du modèle de moteur choisi.

III.7.1 Equations électriques

Les équations électriques qui rigide de notre moteur à courant continue et :

$$U_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + M_{fd} \cdot I_f \cdot \omega_r \quad 0-13$$

Avec :

$$M_{fd} \cdot I_f \cdot \omega_r = K_e \cdot \omega_r = E \quad 0-14$$

Pour l'excitation :

$$U_f = R_f I_f + L_f \frac{dI_f}{dt} \quad 0-15$$

III.7.2 Equations mécaniques

Sur le principe de la loi de Laplace, le rotor de la machine possède un couple qui en nomme couple électromagnétique.

L'expression du couple électromagnétique est donnée par [39] :

$$C_{em} = M_{fd} \cdot I_f \cdot I_a = K_e \cdot I_a \quad 0-16$$

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\omega_r}{dt} + K_f \cdot \omega_r \quad 0-17$$

Et on peut écrire les équations précédentes dans le domaine de Laplace comme suit :

$$U_a(p) = (R_a + L_a \cdot P)I_a(p) + E(p) \quad 0-18$$

$$E(p) = K_e \cdot \omega_r(p) \quad 0-19$$

$$C_{em}(p) = K_e \cdot I_a(p) \quad 0-20$$

$$C_{em}(p) - C_r(p) = (J \cdot P + K_f)\omega_r(p) \quad 0-21$$

III.8 Commande en vitesse de la machine

III.8.1 Système de commande

Le système de commande ou simplement la commande (contrôleur, régulateur) est un système permettant de générer l'action délibérée à appliquer à l'entrée de l'organe de commande afin de faire atteindre à la sortie du système à commander des objectifs définis en termes de durée et de la forme du régime transitoire ainsi que la valeur finale.

On peut commander le système de deux formes :

- Commande en boucle ouverte : le système ne dispose pas d'information sur la sortie du système.
- Commande en boucle fermée : lorsque le système reçoit une information sur la sortie à commander, dans ce cas il travaille en comparaison entre la sortie et la valeur de référence à lui faire attendre.

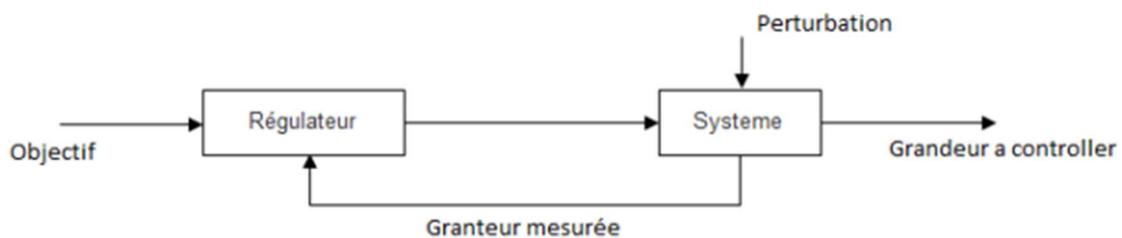


Figure 0-28 : Structure générale de la commande en boucle fermée.

III.8.2 Choix de régulateur

Le régulateur représente l'élément intelligent d'un système, il est ajouté à l'extérieur du système à commander, il permet d'améliorer les performances du système qu'il commande quel que soit de régime transitoire ou permanent. Pour la régulation de notre vitesse en choisit le régulateur PI (régulateur proportionnelle intégral) car il améliore la précision de la boucle (erreur statique nul).

III.8.3 Expression du régulateur PI

La structure générale d'un régulateur proportionnel intégral (PI) est composée de la fonction proportionnelle et de la fonction intégrale mis en parallèles. Fonction de transfert est donnée par :

$$C(p) = K_p + \frac{K_i}{p} = \frac{K_p p + K_i}{p} = K \left(1 + \frac{1}{\tau_i p} \right) \quad 0-22$$

Avec : $\tau_i = \frac{K_p}{K_i}$

L'avantage principal d'un régulateur PI est qu'il annule l'erreur statique grâce à la fonction intégrale et non pas en utilisant les coefficients K_p et K_i .

En effet, il calcule la commande $U(t)$ à injecter au système en intégrant la grandeur d'erreur $\varepsilon(t)$.

Ainsi le signal de commande augmente tant que le signal d'erreur est nul, la commande $U(t)$ ne cesse de croître tant que l'erreur entre la sortie $\Omega(t)$ et la référence $\Omega_{\text{réf}}(t)$ n'est pas nulle.

III.8.4 Fonction de transfert de la machine

En écrivant les équations du moteur dans le domaine opérationnel, et en supposant que les conditions initiales sont nulles.

$$U_a(p) = R_a \cdot I_a + p \cdot L_a(p) + E(p) \quad 0-23$$

$$C_{em}(p) - C_r(p) = J \cdot p \Omega_r(p) + f \Omega_r(p) \quad 0-24$$

$$E(p) = K_m \cdot \Omega_r(p) \quad 0-25$$

$$C_{em}(p) = K_m \cdot I_a(p) \quad 0-26$$

De l'équation III-23 on peut déduire la relation entre la tension d'alimentation « $U_a(p)$ » et la force contre électromotrice « $E(p)$ » qui est donnée par :

$$U_a(p) - E(p) = (R_a + L_a \cdot p)I_a(p) \quad 0-27$$

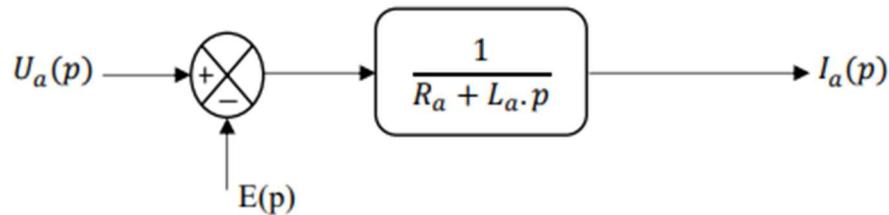


Figure 0-29 : Schéma bloc de la boucle du courant.

De l'équation III-26 on déduit la relation entre le courant d'induit « $I_a(p)$ » et le couple électromagnétique « C_{em} » Figure III-30 :

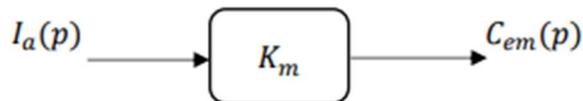


Figure 0-30 : Schéma bloc de la boucle du couple.

De l'équation III-24 on déduit la relation entre la vitesse de rotation « $\Omega_r(p)$ » et le couple utile « $C_{em} - C_r$ » qui est donnée comme suit :

$$C_{em}(p) - C_r(p) = (J \cdot p + f) \cdot \Omega_r(p) \quad 0-28$$

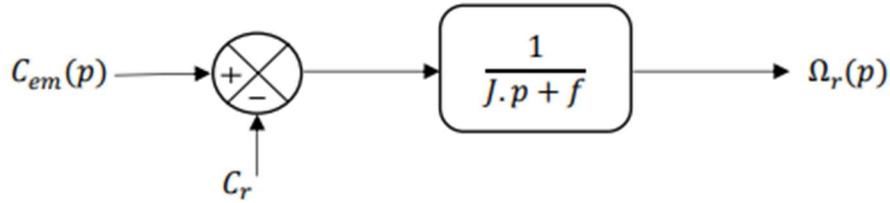


Figure 0-31 : Schéma bloc de la boucle de vitesse.

De l'équation III-25 on déduit la relation entre la vitesse de rotation et la force contre électromotrice Figure III-32 :

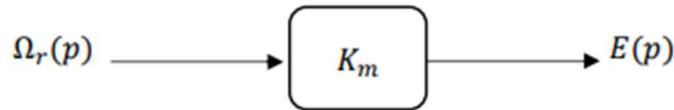


Figure 0-32 : Schéma bloc de vitesse de rotation en fonction de la force Contre électromotrice.

A partir des relations III-23, III-24, III-25, III-26 on obtient la fonction de transfert globale du moteur qui est comme suit :

$$T(p) = \frac{\Omega_r}{U_a} = \frac{\frac{K_m}{R_a \cdot f + K_m}}{\left(L_a \cdot J p^2 + \left(\frac{L_a \cdot f + R_a \cdot J}{R_a \cdot f + K_m^2} \right) p + 1 \right)} \quad 0-29$$

En reliant les différents blocs Figure III-29, Figure III-30, Figure III-31, Figure III-32 on obtient le schéma bloc global du moteur Figure III-33 :

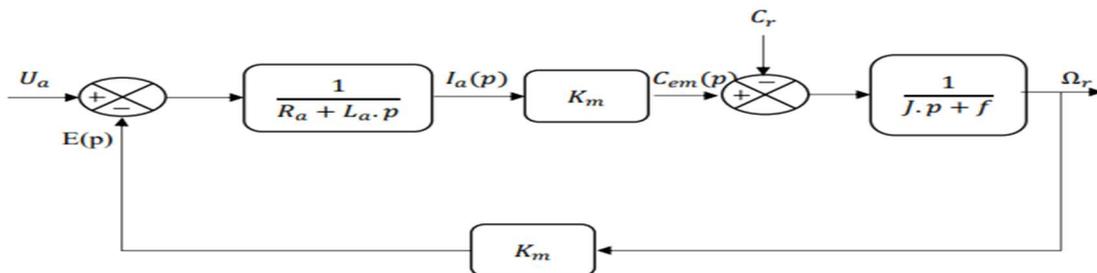


Figure 0-33 : Schéma fonctionnel du moteur à excitation séparée.

III.8.5 Structure de la commande PI

Chaque boucle de régulation est dotée d'un régulateur proportionnel intégral PI classique présenté sur la Figure III-34. Il comporte une action proportionnelle qui sert à

régler la rapidité avec laquelle la régulation doit avoir lieu et une action intégrale qui sert à éliminer l'erreur statique entre la grandeur réglée et sa propre consigne.

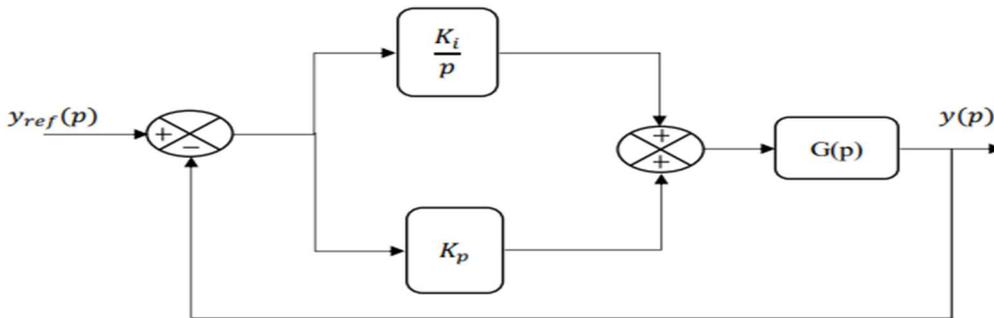


Figure 0-34 : Schéma de commande utilisant la structure PI..

Soit $G(p)$ la fonction de transfert d'un système de premier ordre donnée par :

$$G(p) = \frac{G_0}{(1 + \tau \cdot p)} \tag{0-30}$$

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$FT_{bf}(p) = \frac{G_0 \cdot K_i \left(\frac{K_p}{K_i} p + 1 \right)}{(\tau p + 1) \left(p + (K_p p + K_i) \frac{G_0}{\tau p + 1} \right)} \tag{0-31}$$

L'apport d'un zéro par le régulateur PI dans la fonction de transfert en boucle fermée peut modifier le régime transitoire du système. Pour remédier à ce problème, la méthode de compensation des pôles est plus adaptée pour le calcul des paramètres K_p et K_i .

Elle consiste à imposer le zéro du régulateur égal à un pôle de la fonction de transfert du système à commander et une constante du temps FT_{bf} répondant aux objectifs fixés [41].

Le principe de cette méthode est illustré par les relations de l'équation suivante

$$\frac{K_p}{K_i} p + 1 = (\tau p + 1) \Rightarrow \tau = \frac{K_p}{K_i} \tag{0-32}$$

$$FT_{bf} = \frac{G_0 K_i}{p + G_0 K_i} \Rightarrow \tau_{bf} = \frac{1}{G_0 K_i} \quad 0-33$$

Les paramètres du régulateur sont alors donnés par :

$$K_i = \frac{1}{G_0 \tau_{bf}} \quad 0-34$$

$$K_p = \frac{\tau}{G_0 \tau_{bf}} \quad 0-35$$

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié la machine à courant continu, ces différents éléments qui la composent, ces types d'excitation et on a choisi le moteur à excitation séparée qui correspond le mieux à notre objectif en la modélisant avec ces propres équations mathématiques et on lui a même intégré un régulateur PI.

Dans le chapitre suivant on va faire une simulation globale de notre système photovoltaïque qui alimente un moteur à courant continu à excitation séparée.

CHAPITRE IV : Fonctionnement et simulation du système : PV- Hacheur-MCC

I.12 Introduction

Dans ce chapitre on va détailler et simuler le fonctionnement du système de commande d'un moteur à courant continu par un Pi alimenté par une source photovoltaïque, ce dernier et commande avec MPPT et un convertisseur DC-DC (convertisseur boost).

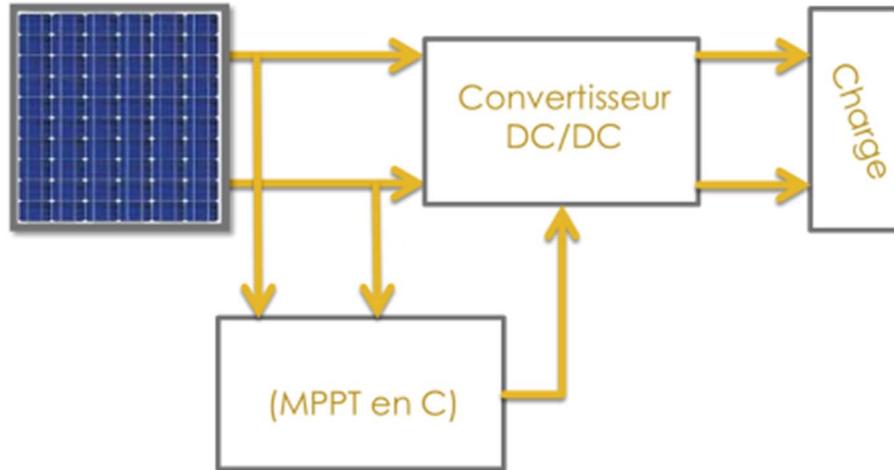


Figure 0-1 : Chaîne de conversion photovoltaïque.

I.13 Simulations et interprétations

MATLAB/Simulink est un logiciel de simulation et modélisation système multi-physique, il nous permet de visualiser, calculer et même tracer des courbes des systèmes de notre domaine d'électrotechnique.

I.14 Simulation du générateur PV avec MPPT et convertisseur DC/DC

La Figure suivante représente le bloc schématique de SIMULINK du générateur photovoltaïque commandé par MPPT « perturbation et observation P&O »

On utilise les conditions standard des tests (STC) ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000 \text{ W/m}^2$) dans cette simulation.

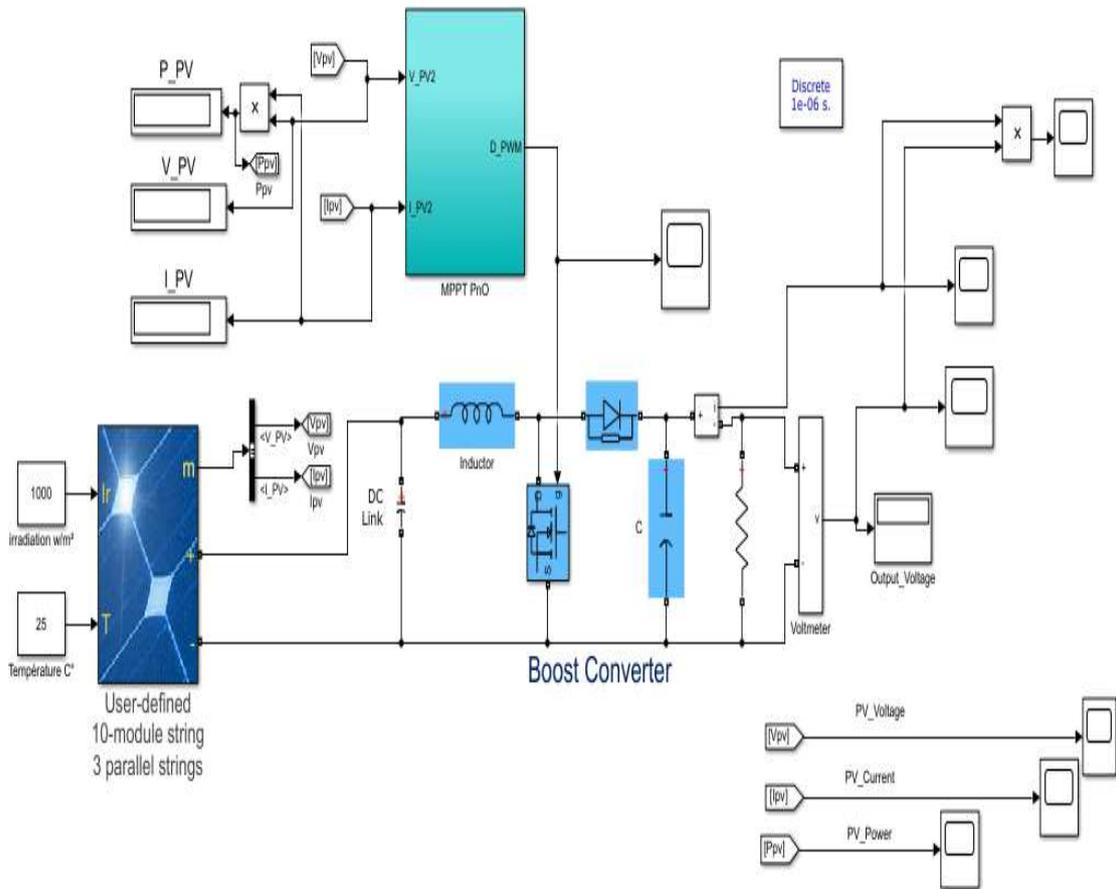


Figure 0-2: Simulation du GPV avec MPPT et convertisseur DC-DC.

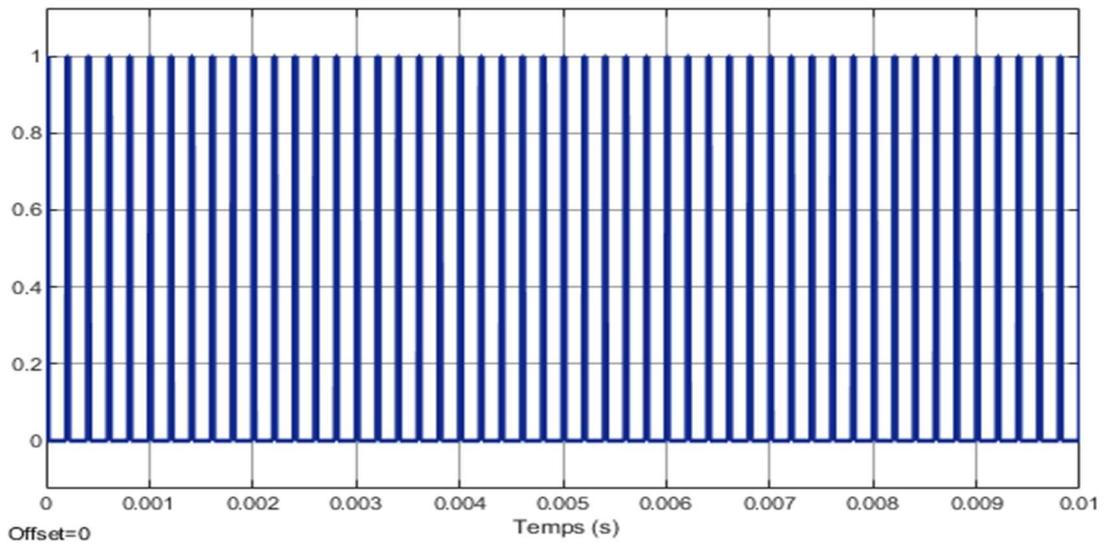


Figure 0-3: Le signal de l'MPPT P&O.

I.14.1 Résultats de la simulation à la sortie du générateur photovoltaïque

Les Figures IV-4, IV-5, IV-6 représentent les courbes de tension, de courant et de puissance à la sortie du GPV.

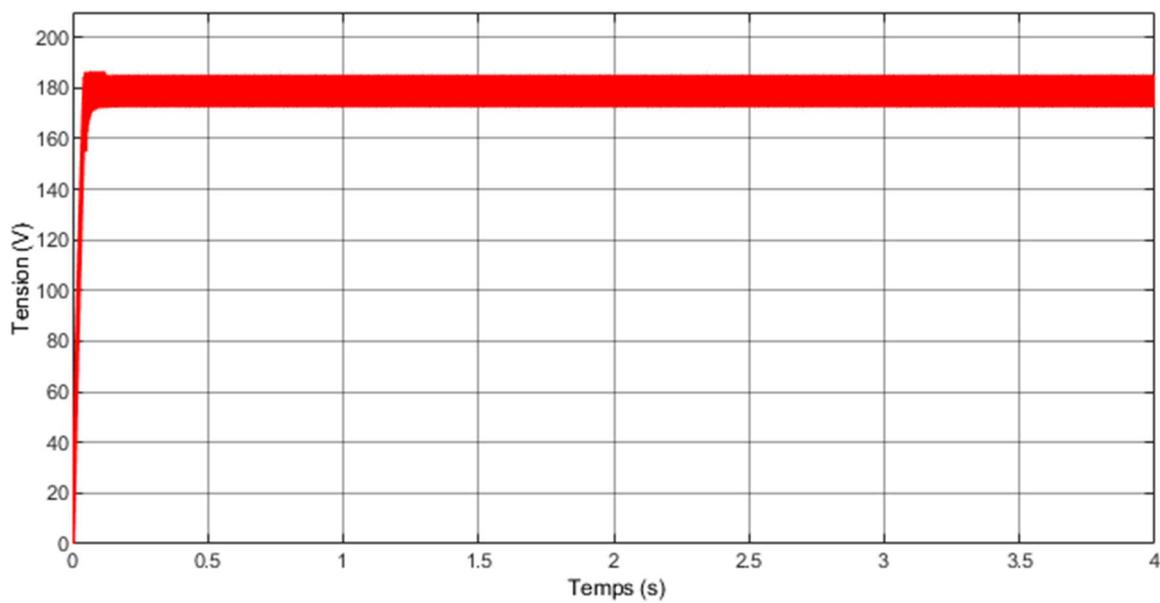


Figure 0-4: Tension à la sortie du GPV.

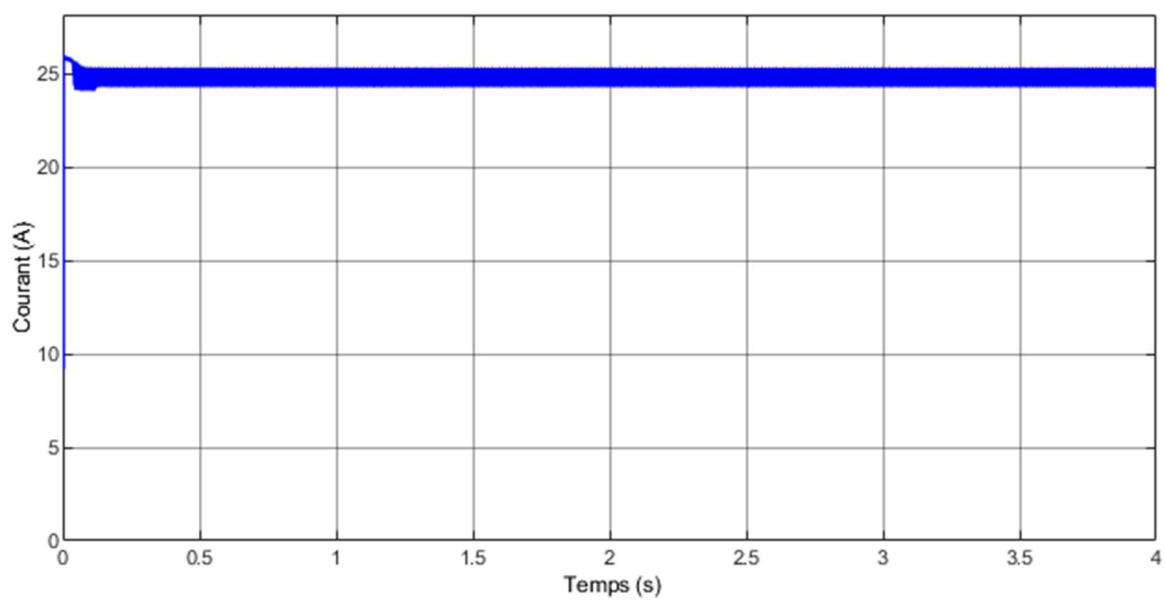


Figure 0-5: Courant à la sortie du GPV.

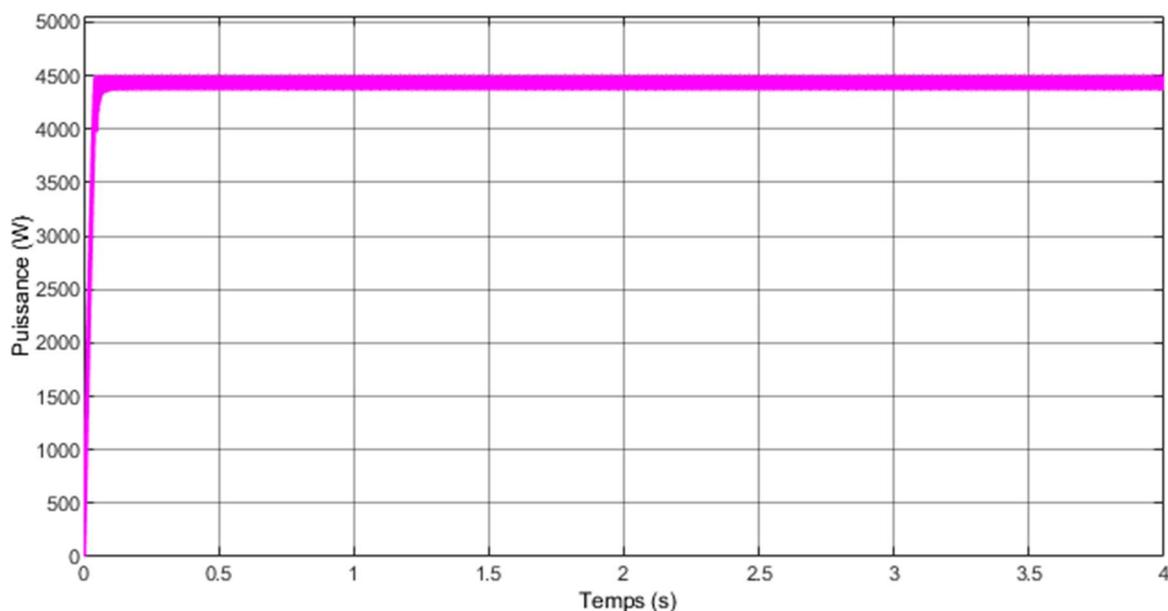


Figure 0-6: Puissance à la sortie du GPV.

I.14.2 Résultats à la sortie du convertisseur DC-DC

Les Figures IV-7, IV-8, IV-9 représentent les courbes de tension, de courant et de puissance à la sortie du convertisseur boost.

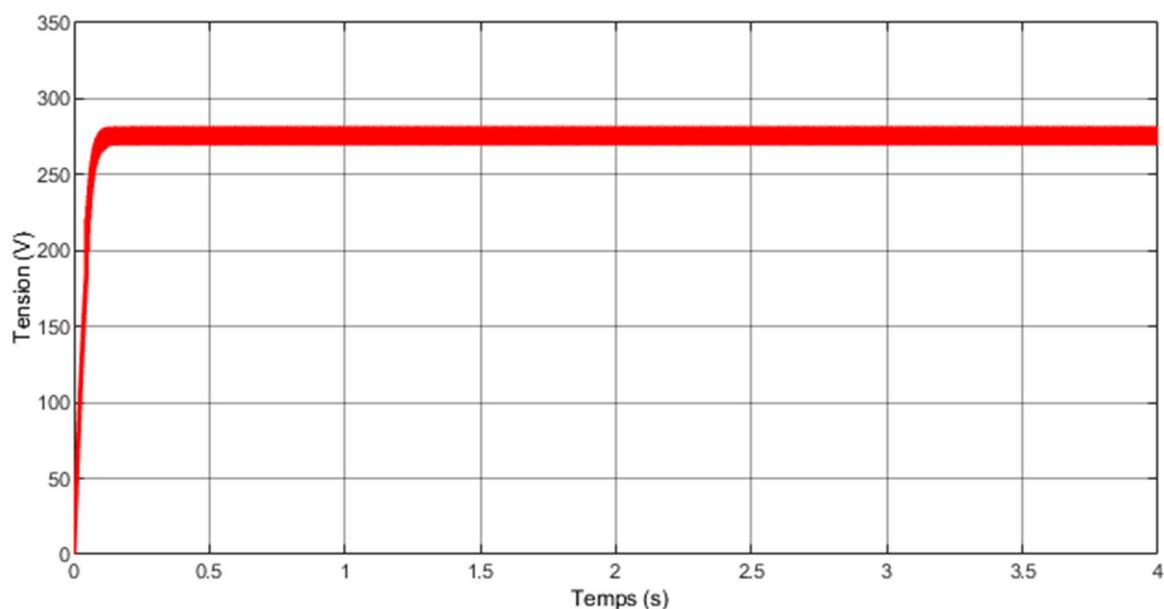


Figure 0-7: Tension à la sortie du convertisseur DC-DC.

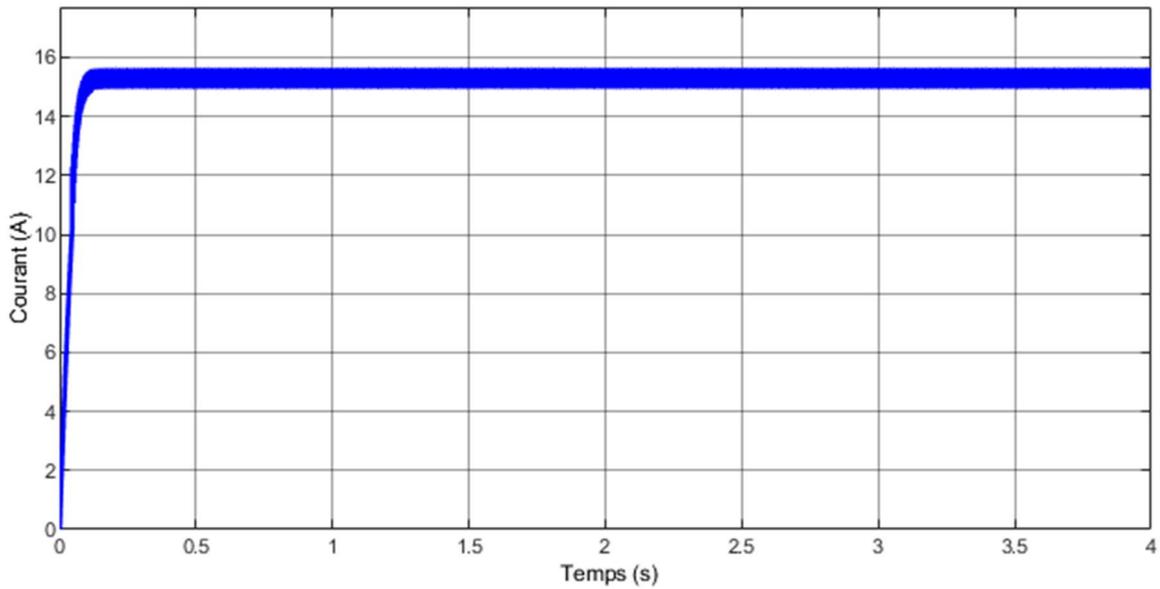


Figure 0-8: Courant à la sortie du convertisseur DC-DC.

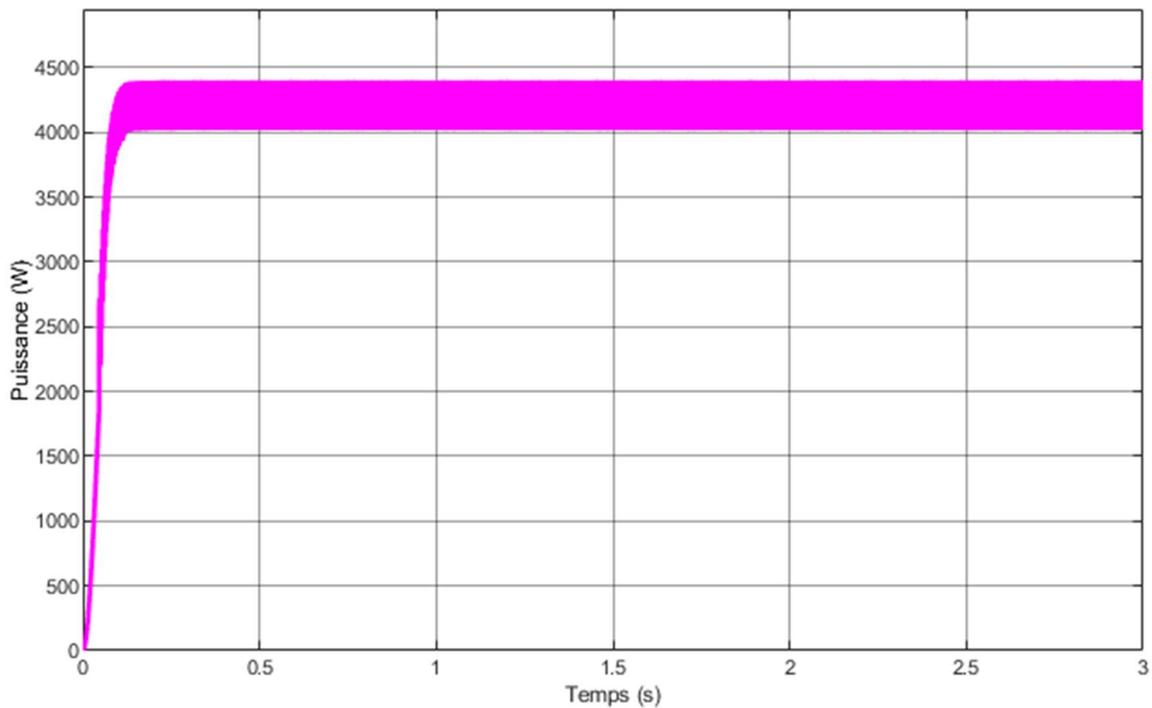


Figure 0-9: Puissance à la sortie du convertisseur DC-DC.

D'après les courbes précédentes, on constate que la tension de sortie du convertisseur boost est environ deux fois supérieure à la tension de sortie du générateur photovoltaïque grâce au Hacheur Boost qui a le rôle d'élever la tension tout en conservant la même puissance avec une légère diminution de celle-ci due aux pertes de niveau des composants.

Ces résultats montrent que l'hacheur survolteur et la commande MPPT P&O fonctionnent correctement.

I.15 Influence du changement d'éclairement

Afin d'étudier les performances du système à la puissance maximale avec la méthode P&O.

On applique une irradiation variable qui diminue de 1000 (W/m²) vers 500 (W/m²), voire Figure IV-10. Avec une température fixée à 25°C, voire Figure IV-11.

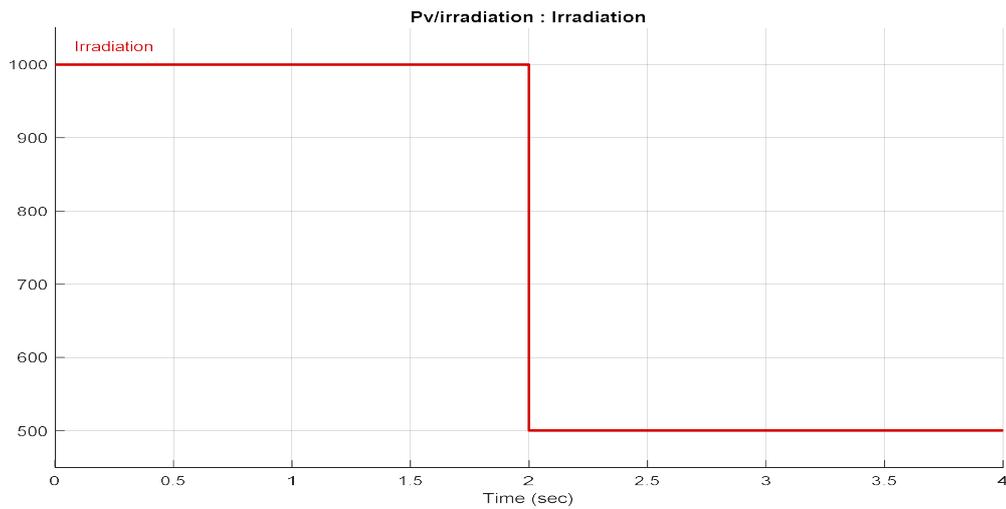


Figure 0-10: Signal d'irradiation appliqué.

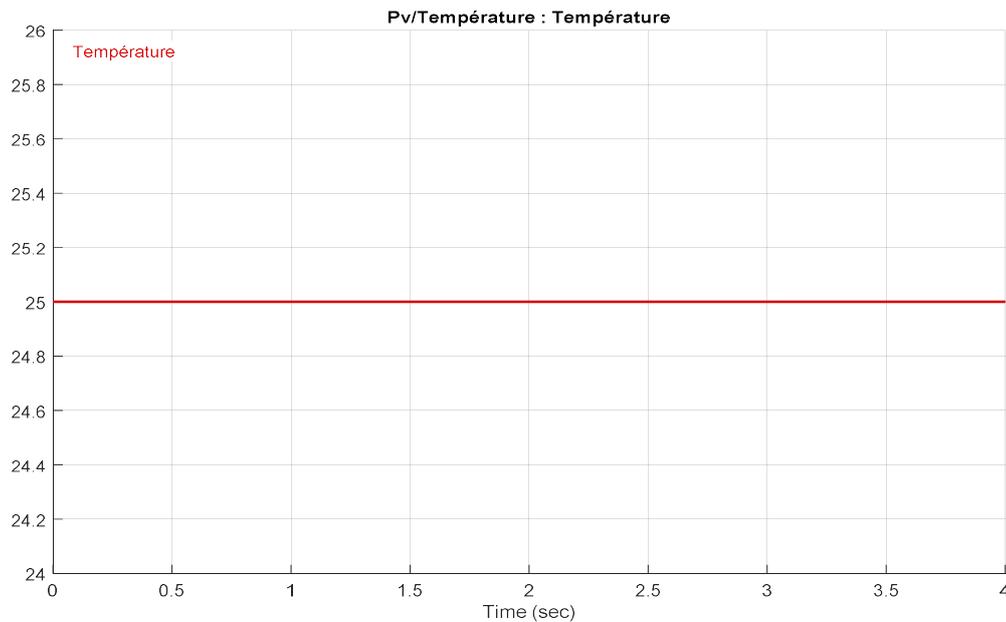


Figure 0-11: Signal de température appliqué.

I.15.1 Résultats à la sortie du générateur photovoltaïque

Les Figures suivantes IV-12, IV-13, IV-14, IV-15, IV-16 illustrent l'évolution de tension, de courant, de puissance à la sortie du générateur PV et les caractéristique I(V), P(V).

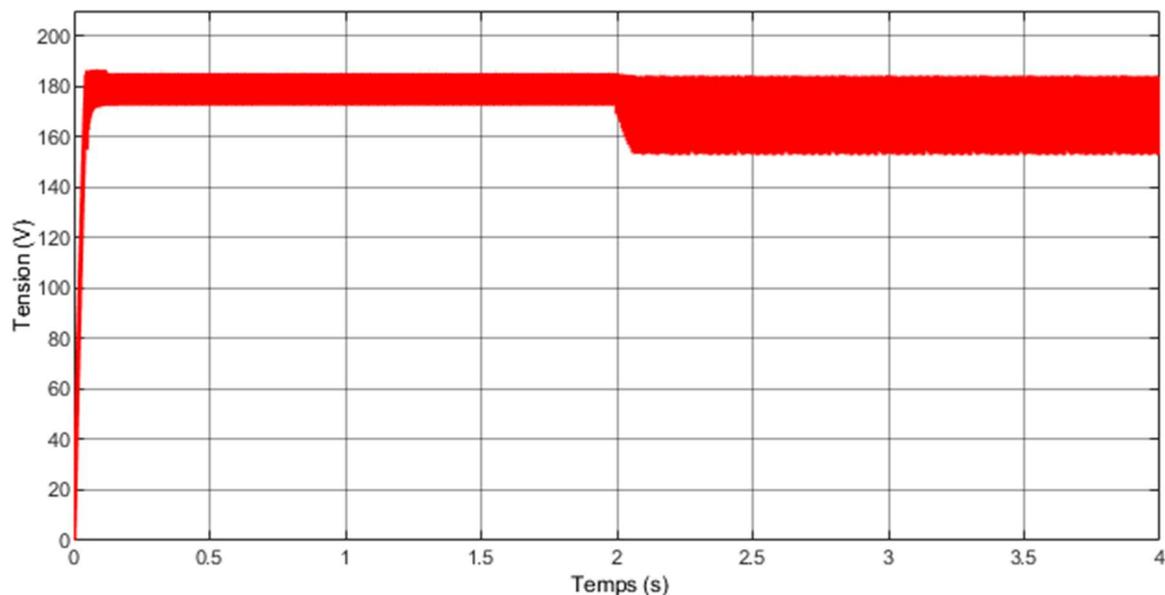


Figure 0-12: Tension à la sortie du générateur photovoltaïque.

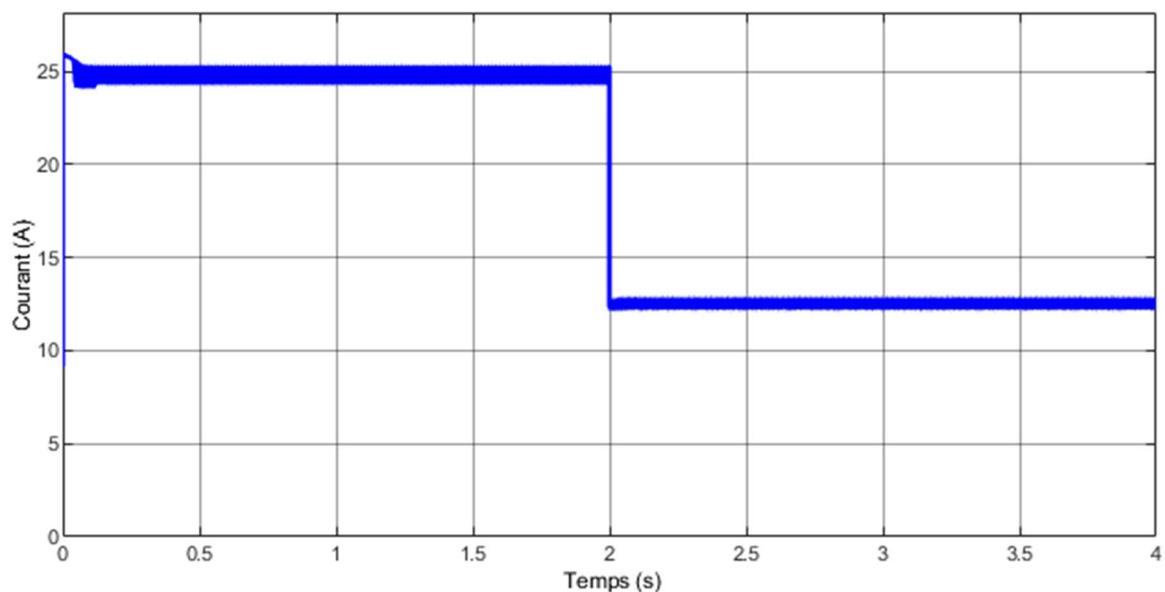


Figure 0-13: Courant à la sortie du générateur photovoltaïque.

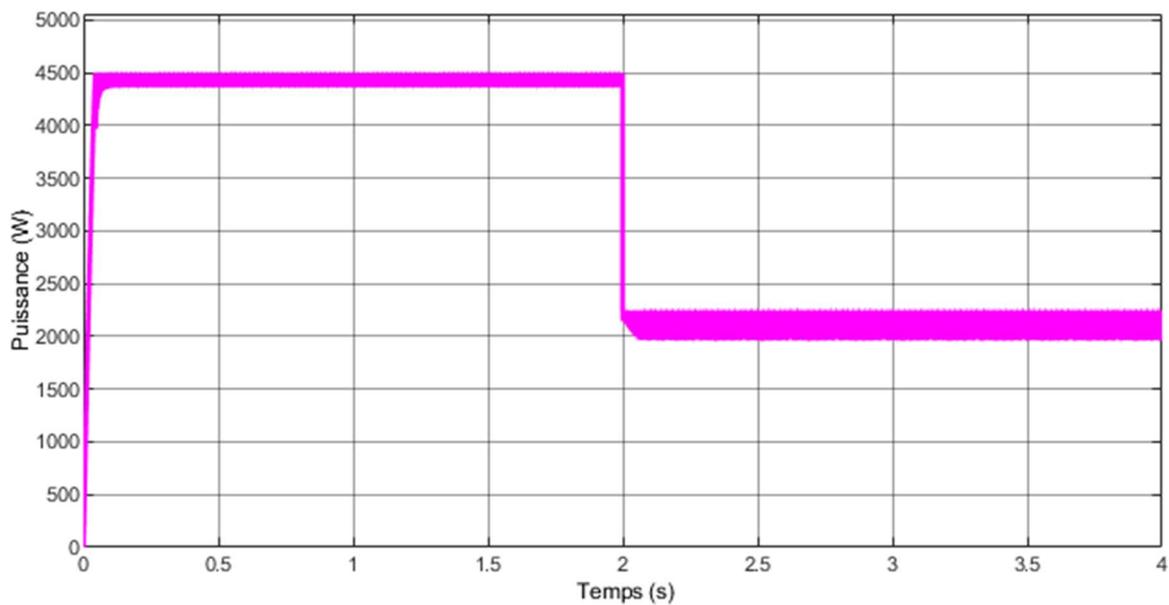


Figure 0-14: Puissance à la sortie du générateur photovoltaïque.

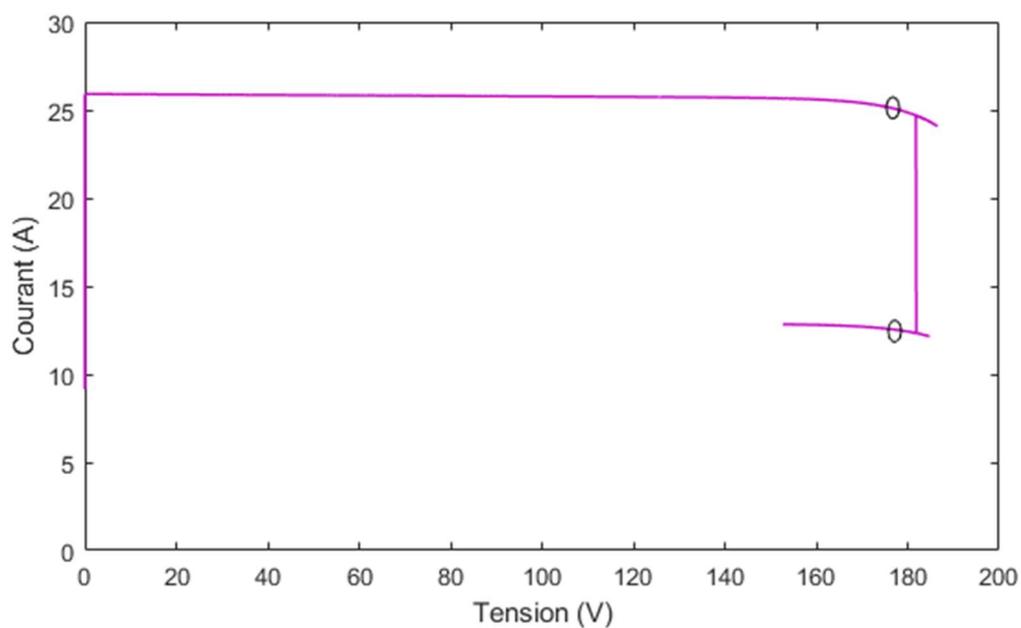


Figure 0-15: Caractéristique I(V).

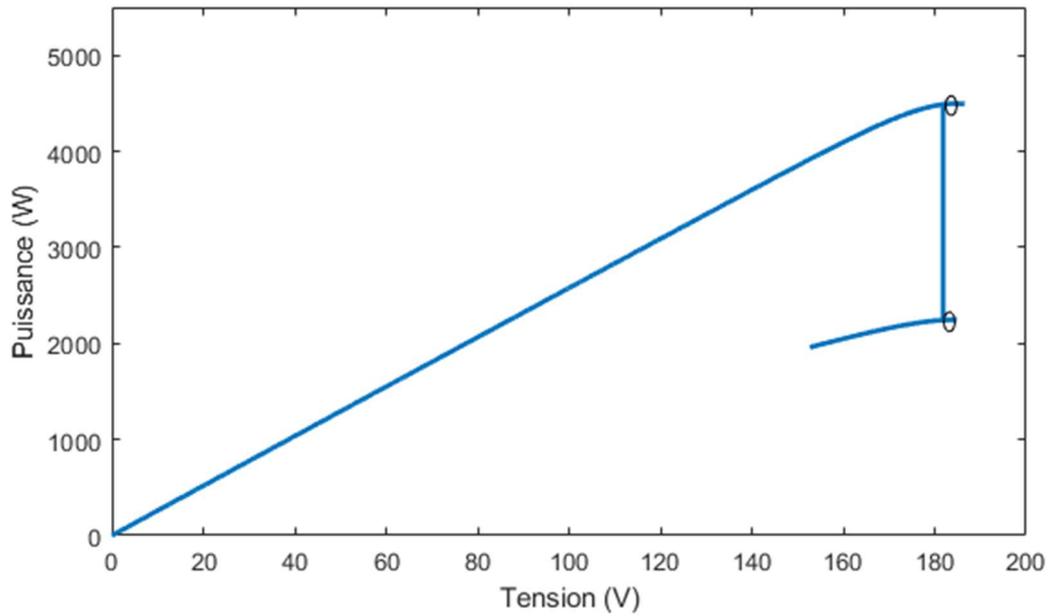


Figure 0-16: Caractéristique P(V).

I.15.2 Résultats à la sortie du convertisseur DC-DC

Les Figures suivantes IV-17, IV-18, IV-19 représente la tension, le courant et la puissance à la sortie du convertisseur DC-DC.

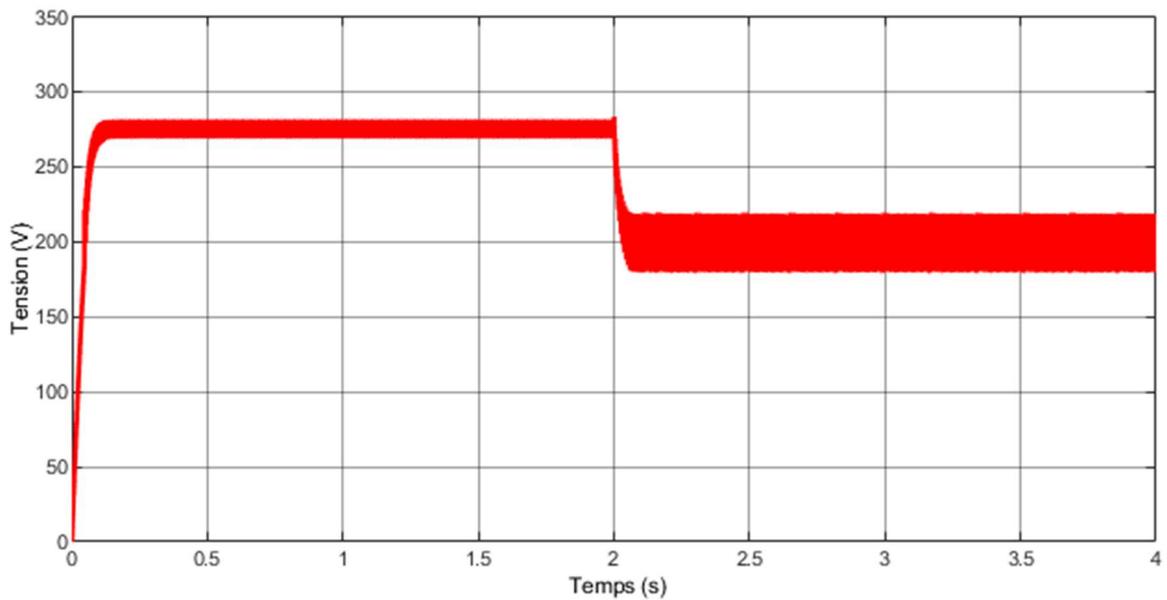


Figure 0-17: Tension à la sortie du convertisseur DC-DC.

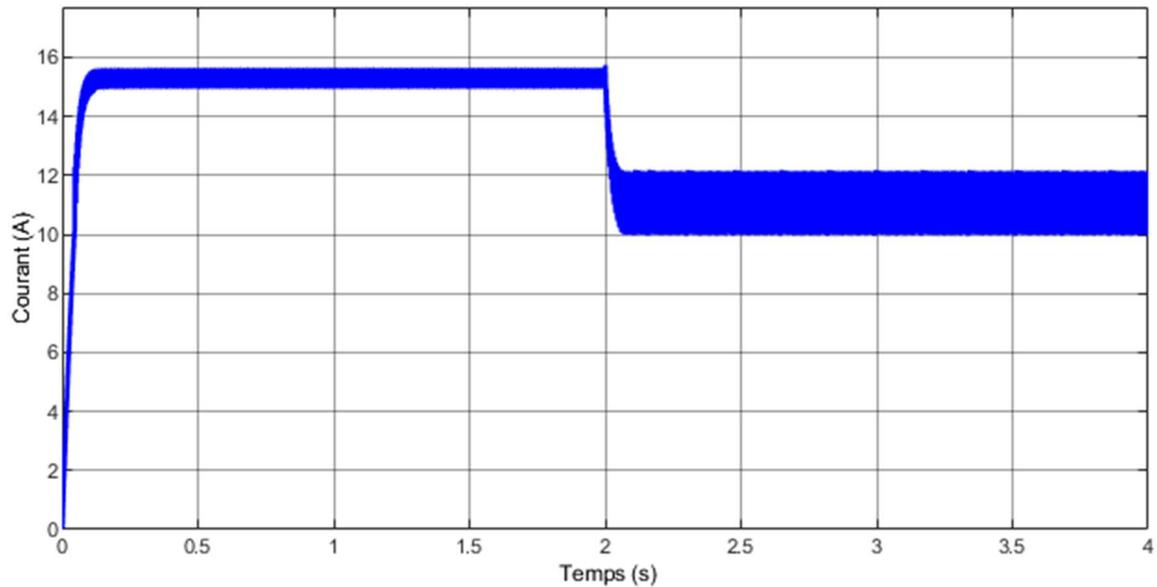


Figure 0-18: Courant à la sortie du convertisseur DC-DC.

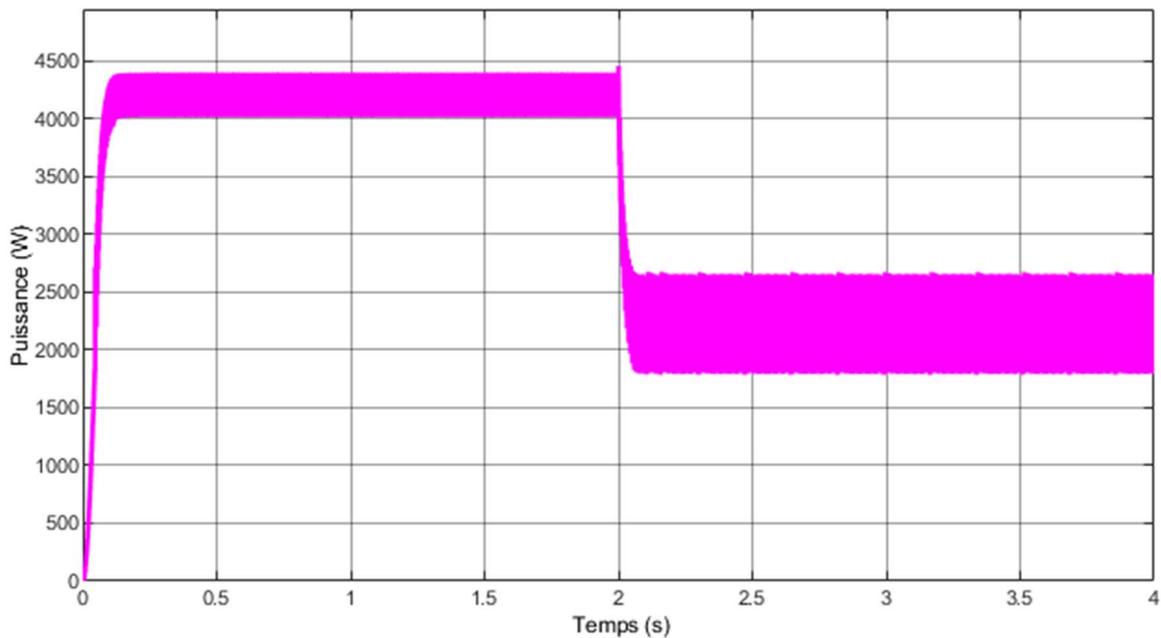


Figure 0-19: Puissance à la sortie du convertisseur DC-DC.

➤ **Interprétation**

L'allure de la puissance maximale extraite du générateur photovoltaïque est représentée sur la Figure IV-14. Ces résultats de simulation montrent que la puissance du générateur photovoltaïque est proportionnel à l'irradiation du soleil, donc une réduction de l'éclairement signifie une réduction de la puissance photovoltaïque produite.

Les tensions optimales correspondantes obtenues à partir de l'algorithme P&O sont présentées dans la Figure IV-12 et restent pratiquement inchangées. Le courant se développe avec le changement de rayonnement solaire Figure IV-13, et les caractéristiques de $P=f(v)$ et $I=f(v)$ du générateur photovoltaïque au point PPM sont exprimées par des caractéristiques théoriques pour les variations du niveau d'éclairement, Figures IV-15,IV-16.

La tension, courant et puissance de sortie du convertisseur baisse assez fortement lorsque l'irradiation descente Figure IV-17, Figure IV-18, Figure IV-19.

I.16 Influence du changement de la température

On applique maintenant une irradiation fixée a 1000 W/m^2 , voire figure (IV-20), Avec une température variable, Initialement 25°C , atteignant 50°C simultanément, voire figure (IV-21).

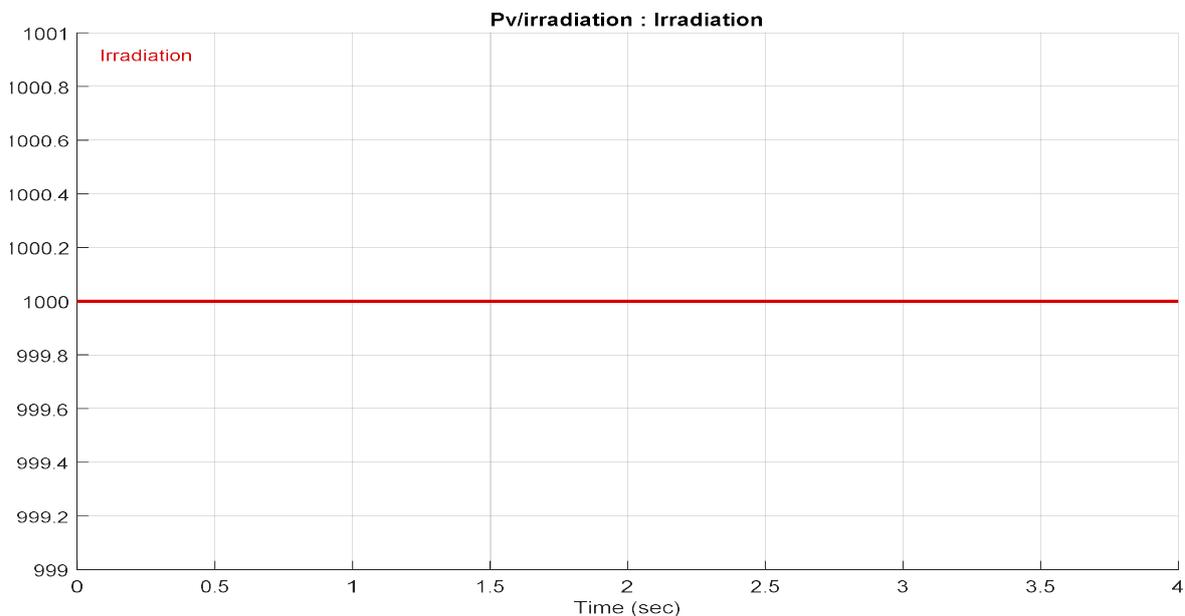


Figure 0-20: Signal d'irradiation appliqué.

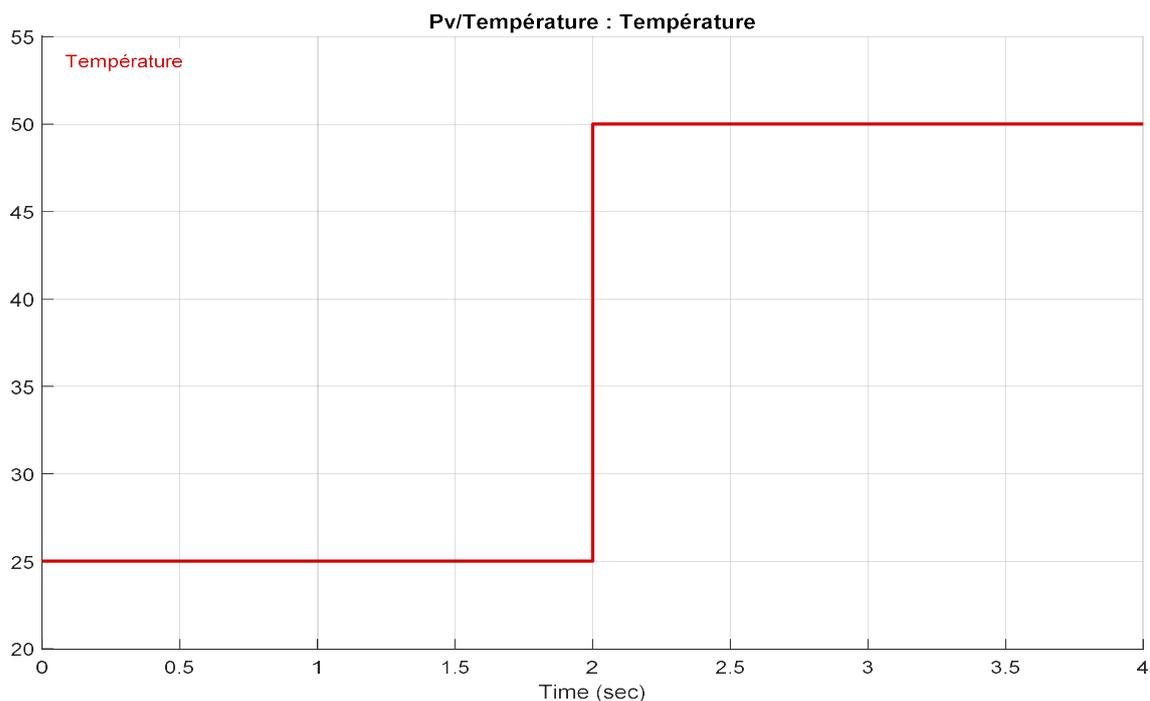


Figure 0-21: Signal de température appliqué.

I.16.1 Résultats à la sortie du générateur photovoltaïque

Les Figures suivantes IV-22, IV-23, IV-24, IV-25, IV-26 illustrent l'évolution de tension, de courant, de puissance et à la sortie du générateur PV et les caractéristique I(V), P(V).

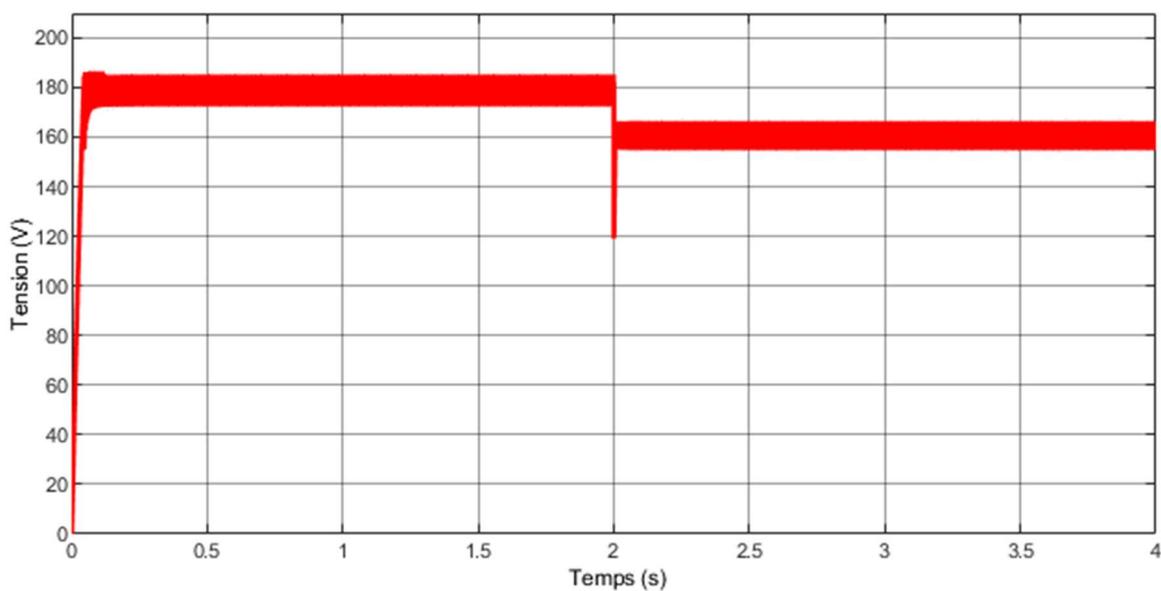


Figure 0-22: Tension à la sortie du générateur photovoltaïque.

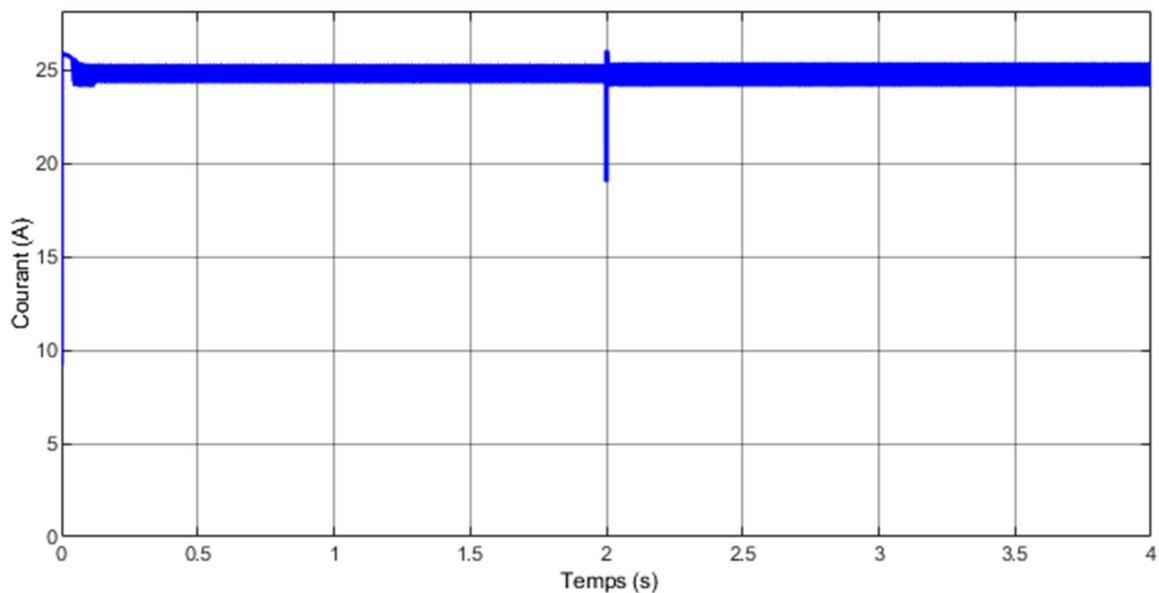


Figure 0-23: Courant à la sortie du générateur photovoltaïque.

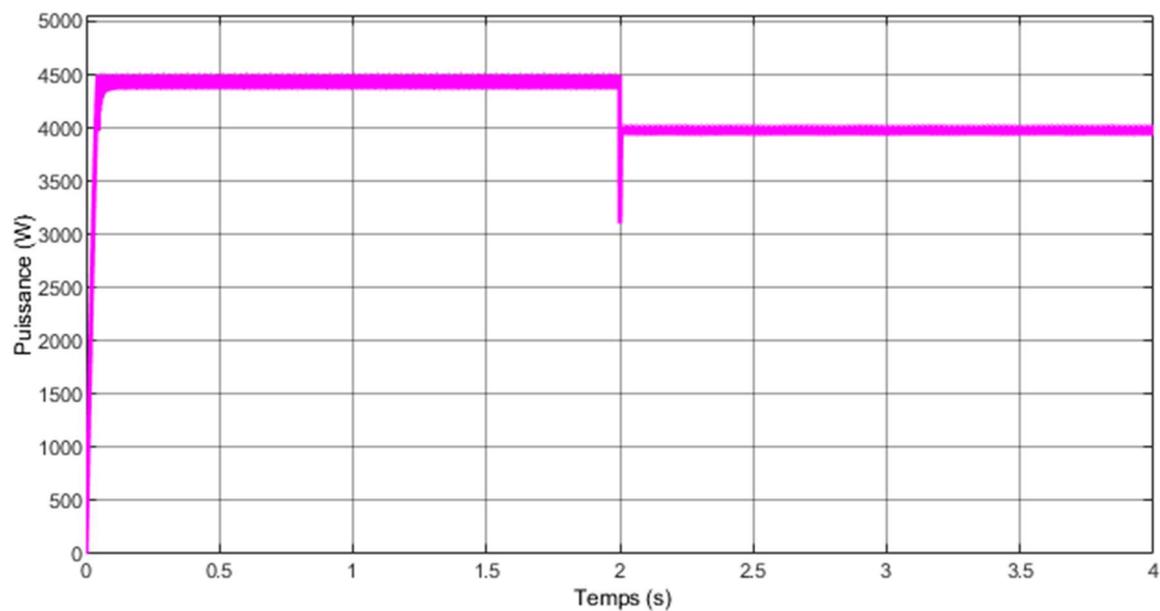


Figure 0-24: Puissance à la sortie du générateur photovoltaïque.

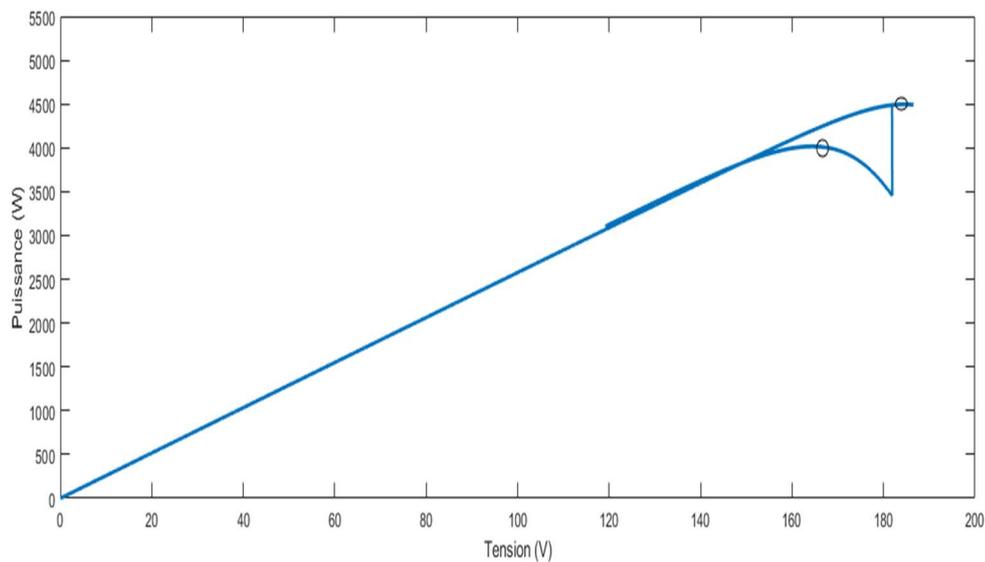


Figure 0-25: Caractéristique I(V).

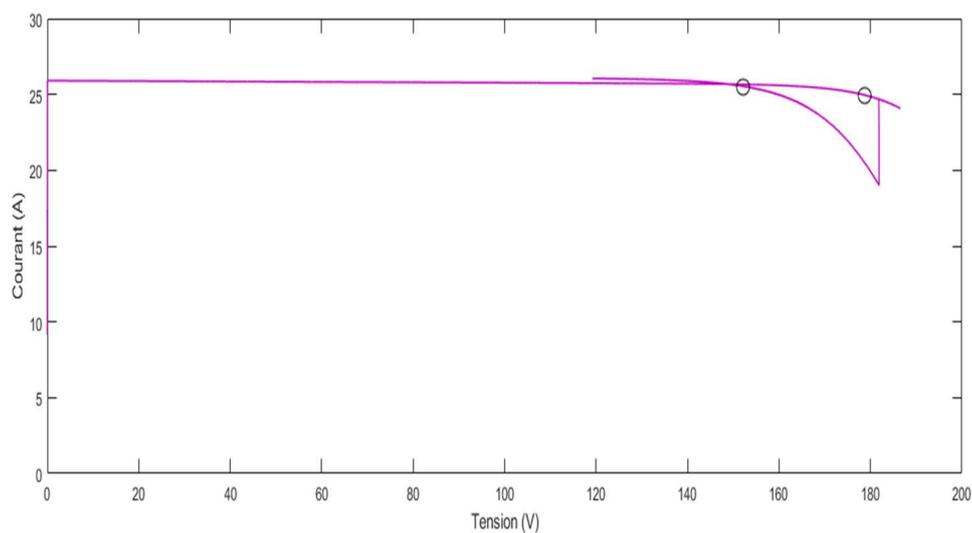


Figure 0-26: Caractéristique P(V).

I.16.2 Résultats à la sortie du convertisseur

Les Figures suivantes IV-27, IV-28, IV-29 représente la tension, le courant et la puissance à la sortie du convertisseur DC-DC.

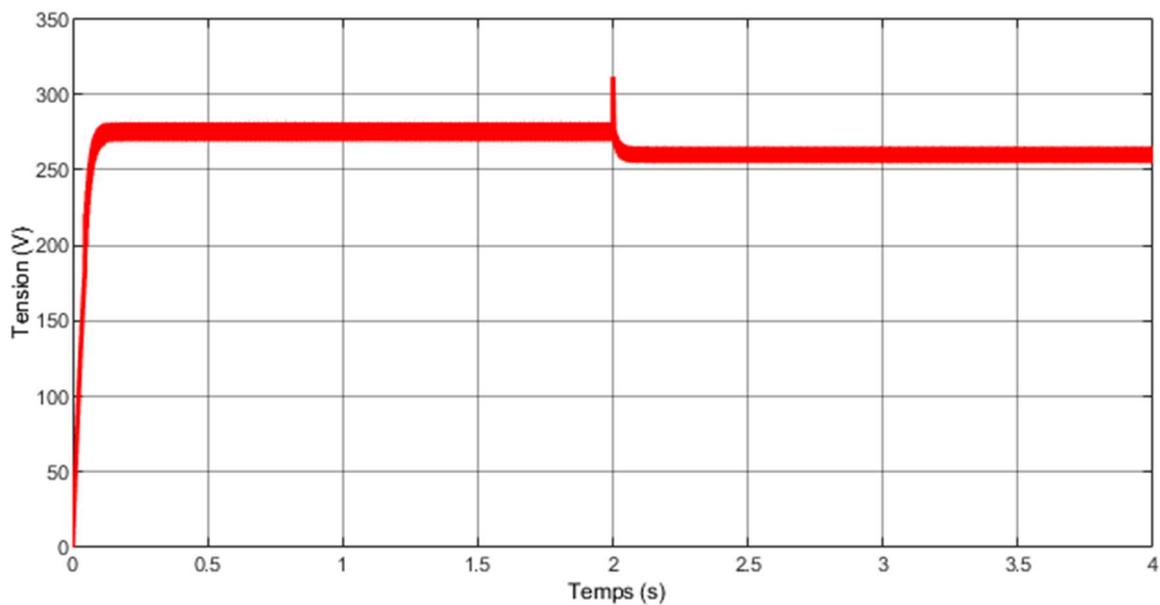


Figure 0-27 : Tension à la sortie du convertisseur DC-DC.

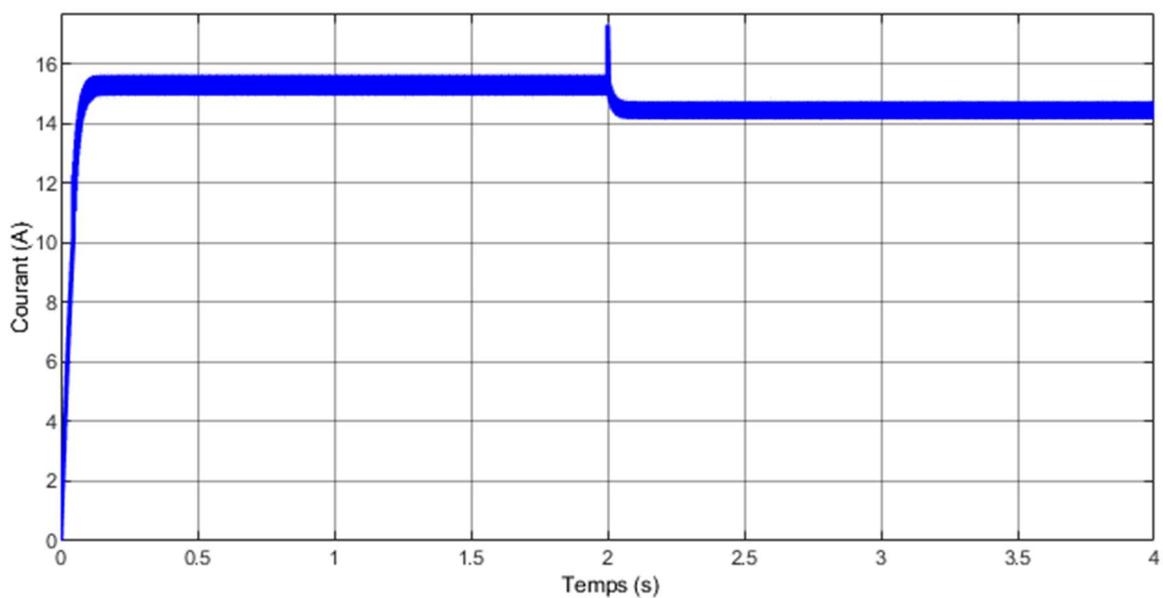


Figure 0-28 : Courant à la sortie du convertisseur DC-DC.

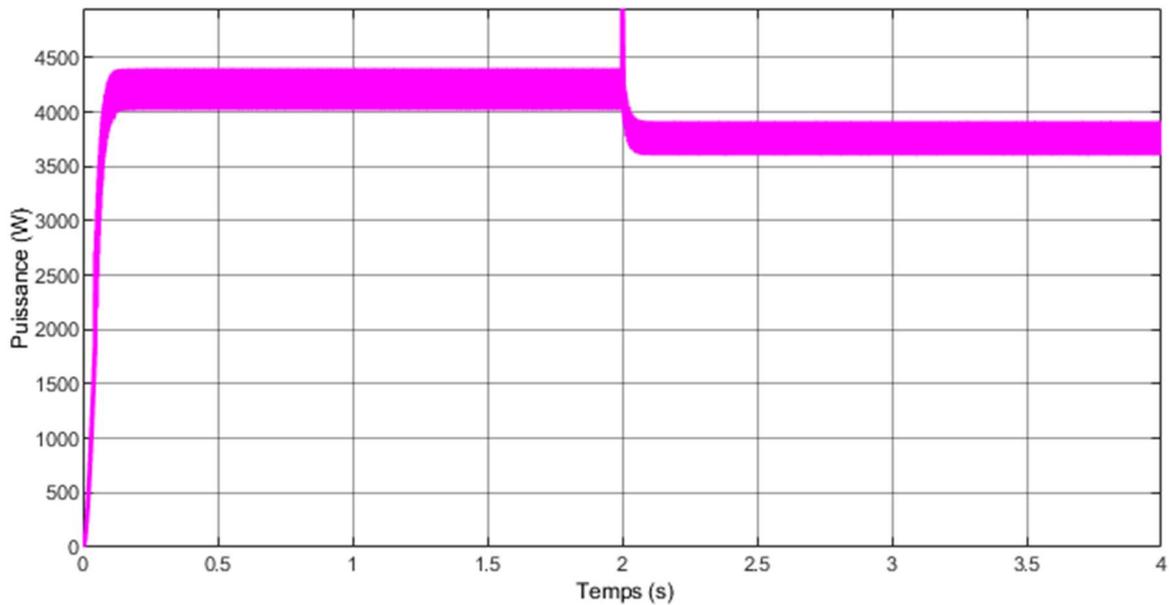


Figure 0-29 : Puissance à la sortie du convertisseur DC-DC.

➤ Interprétation

L'allure de la puissance maximale tirée du générateur photovoltaïque est représentée sur la Figure IV-24. Ces résultats de simulation montrent qu'une augmentation de la température entraîne une diminution de la puissance.

La Tension optimale correspondante obtenue à partir de l'algorithme P & O est représentée sur la Figure IV-22. Il est clair que la Tension diminue avec l'augmentation de la température, pendant ce temps, diffusez le courant photovoltaïque n'a pas beaucoup changé Figure IV-23.

La tension, le courant et la puissance de sortie du convertisseur baisse assez fortement lorsque la température augmente Figure IV-27, Figure IV-28, Figure IV-29.

Les caractéristiques du générateur photovoltaïque $P=f(V)$ et $I=f(V)$ au PPM est représentées avec les caractéristiques théoriques pour les variations de température, Figure IV-25, IV-26. Donc le point de puissance maximale se déplace pour rejoindre le nouveau point maximum correspondant à cette température.

I.17 Simulation Global du système (GPV + MPPT + Hacheur + Régulateur PI + MCC)

La Figure ci-dessous IV-30 illustre le bloc schématique de simulation du système PV

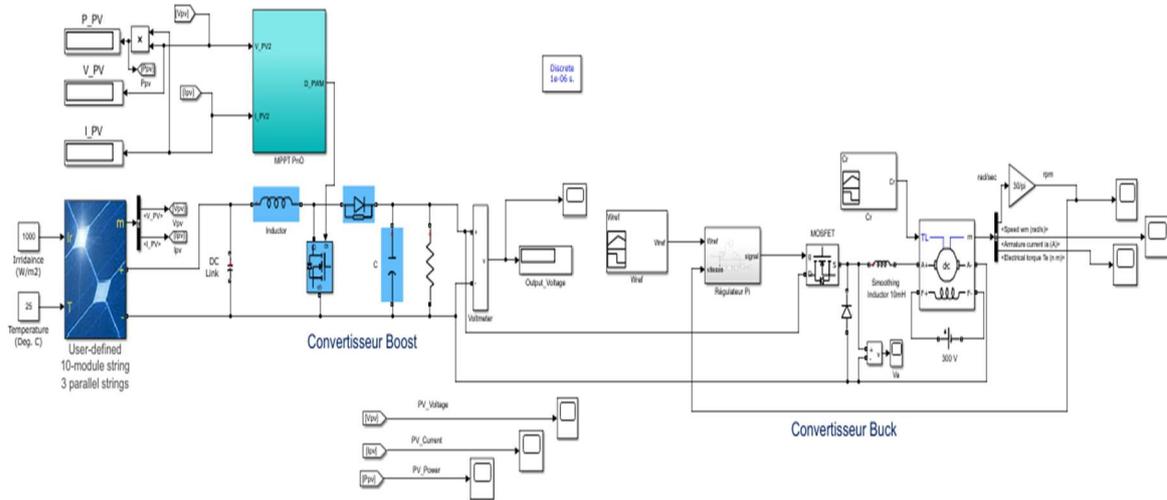


Figure 0-30 : Bloc de Simulation global.

Simulation du régulateur PI :

La Figure IV-31 représente le schéma bloc de régulateur PI

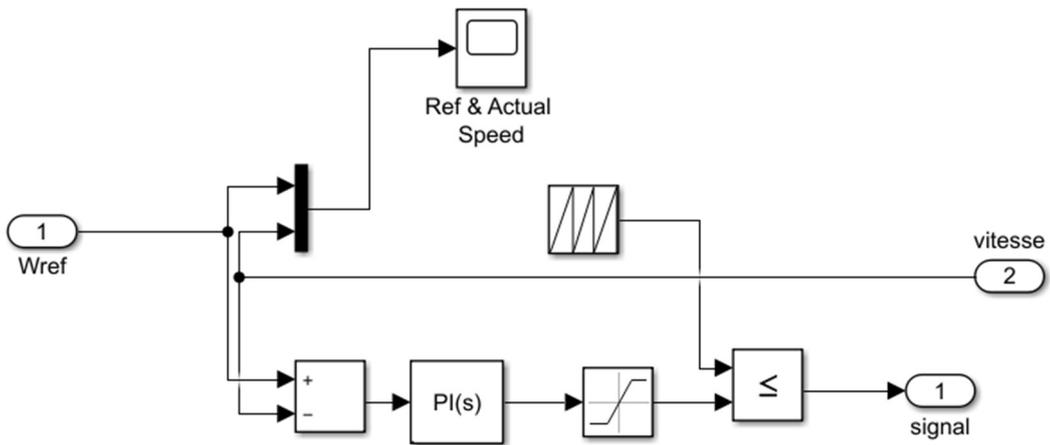


Figure 0-31: Schéma bloc de simulation de régulateur PI.

La Figure IV-32 représente la variation appliquée sur la vitesse de référence (W_{ref})

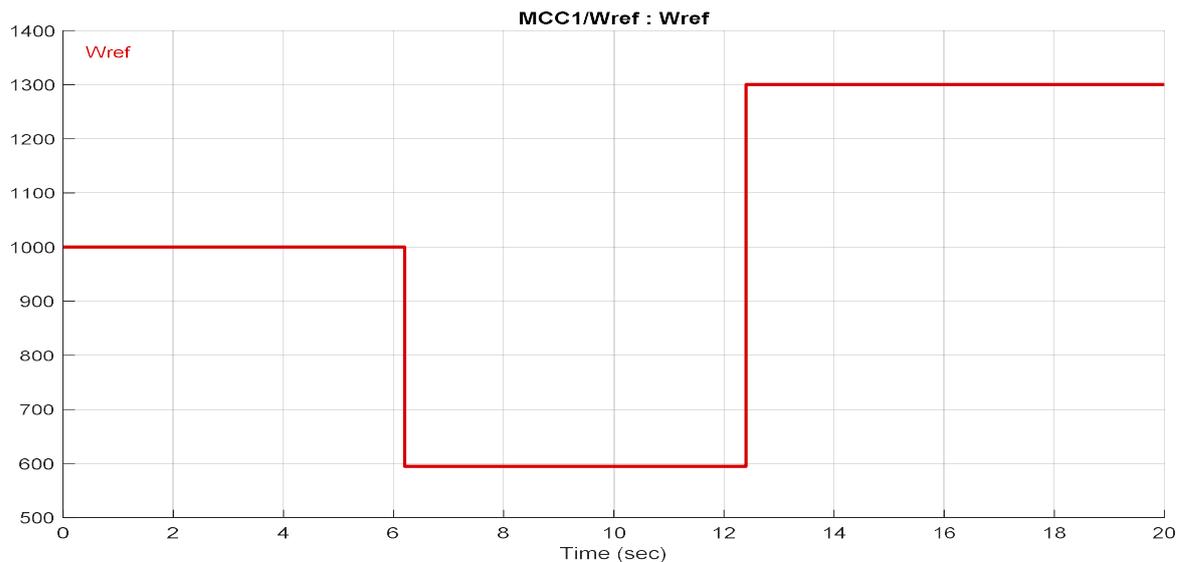


Figure 0-32: Vitesse de référence.

Le moteur à courant continu utilisé dans la simulation

On utilise un moteur à excitation séparée a cause de son facilité de variation sur la vitesse de rotation par rapport à les autres types d'excitation.

La figure suivante représente les différentes variations du couple résistant appliqué sur le moteur.

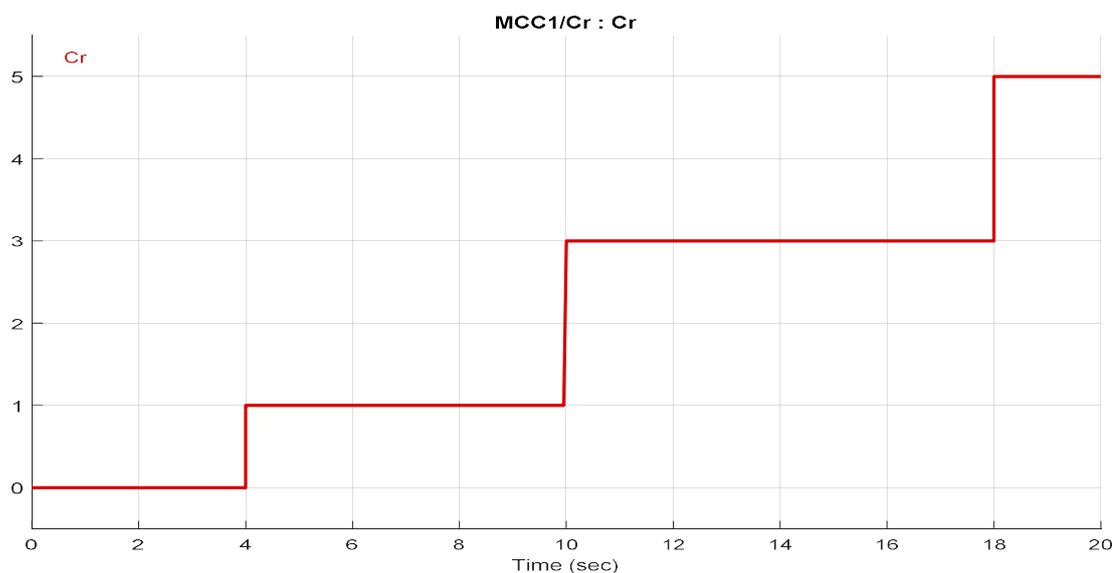


Figure 0-33: Le couple résistant.

Résultats de la régulation et des caractéristiques de MCC obtenus

La Figure ci-dessous représente la réponse de la vitesse de moteur avec la régulation.

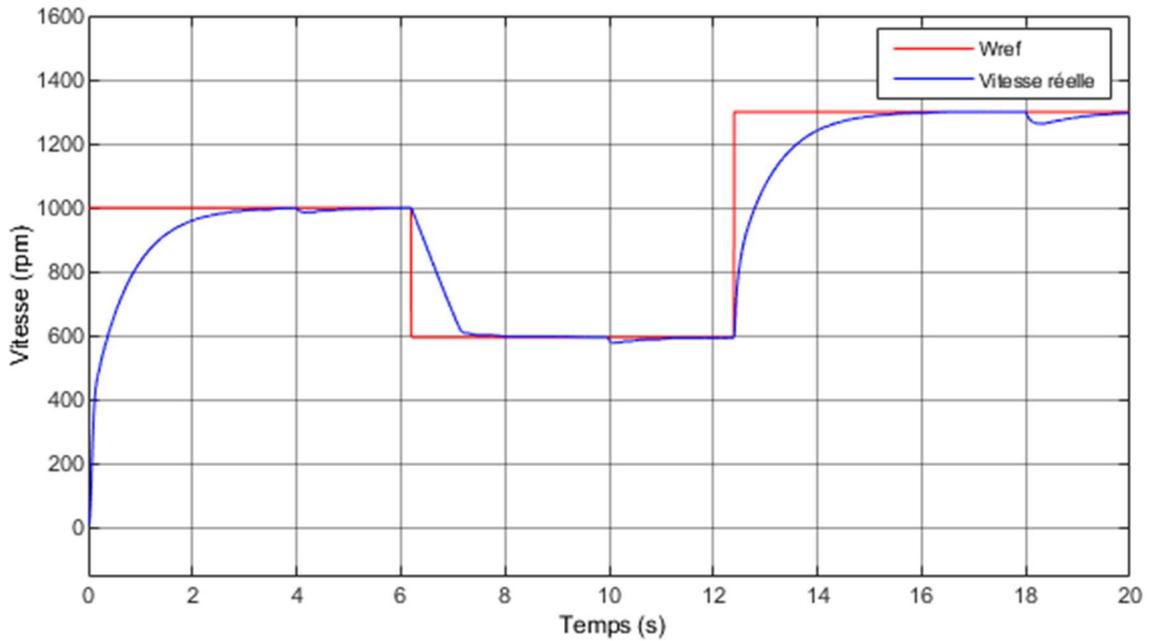


Figure 0-34: Vitesse référence et vitesse Réelle.

D’après la Figure IV.34 qui représente la réponse de la vitesse avec une régulation, on remarque que la vitesse à chute après l’application du couple puis elle retourner vers la vitesse de référence.

Les Figures IV-35, IV-36 illustre l’évolution de courant d’induit et l’évolution du couple électromagnétique.

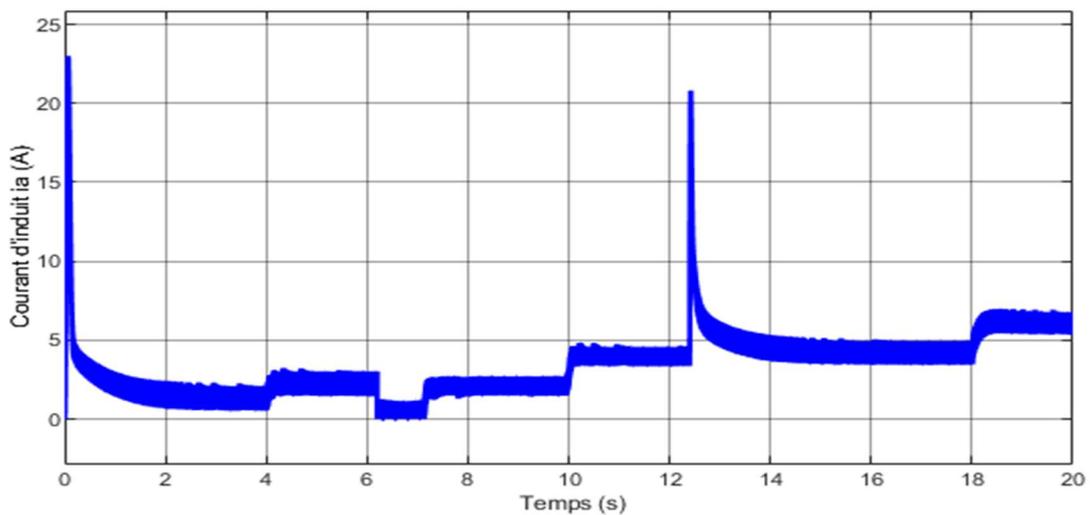


Figure 0-35: L’évolution du courant d’induit.

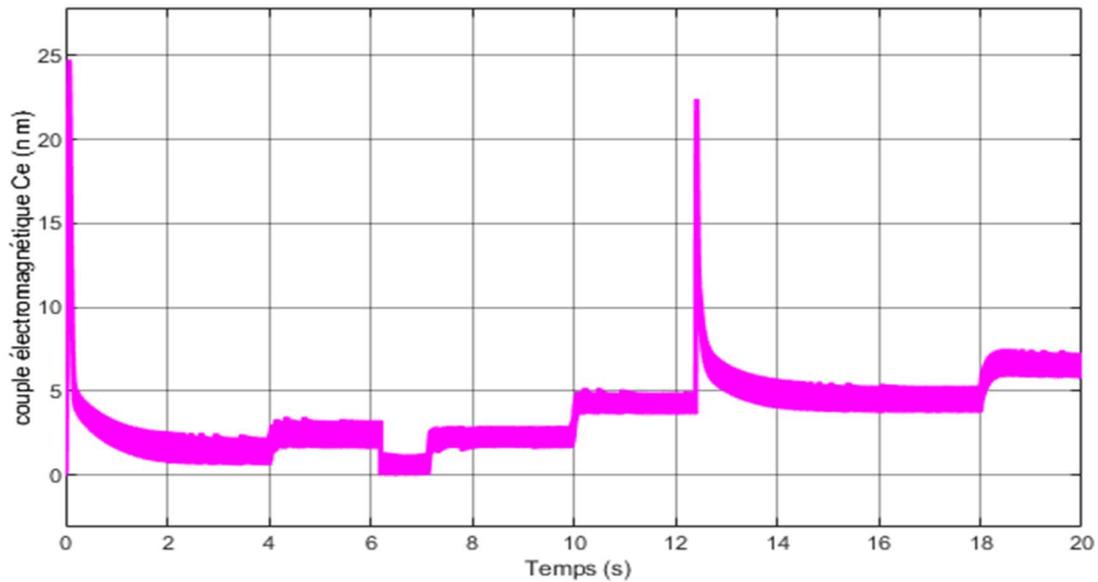


Figure 0-36: L'évolution du couple électromagnétique.

➤ Interprétation

✚ Dans l'intervalle de [0, 4s]

Le couple résistant appliqué égale à ($C_r=0$ Nm) donc le moteur fonctionne à vide, l'alimentation directe du moteur est caractérisée par deux temps, le premier est de démarrage où le courant absorbé est fort ($I_d=23$ A) et le couple électromagnétique en phase non stable, le deuxième est la période de stabilisation, le courant et le couple électromagnétique prennent des valeurs fixes.

✚ Dans l'intervalle de [4, 10s]

Après l'application du couple résistant de valeur de 1 Nm, on remarque une augmentation du courant d'induit et de couple électromagnétique avec une stabilité mais ils sont entrecoupés d'une petite chute du période très courts à cause de la variation de la vitesse appliquée par le régulateur.

✚ Dans l'intervalle de [10, 18s]

Ces on augmente la valeur du couple résistant ($C_r=3$ Nm), le courant d'induit et le Couple électromagnétique augmente avec une stabilité, mais sont entrecoupés d'une forte augmentation de ces valeurs a causé de la variation de la vitesse appliqué par le régulateur.

✚ Dans l'intervalle de [18, 20s]

Le couple résistant appliqué égale à ($C_r=5$ Nm), on remarque une augmentation du courant d'induit et de couple électromagnétique avec une stabilité.

La Figure IV-37 montre la courbe de tension à la sortie de convertisseur DC-DC quand ont réglée sur la vitesse du moteur.

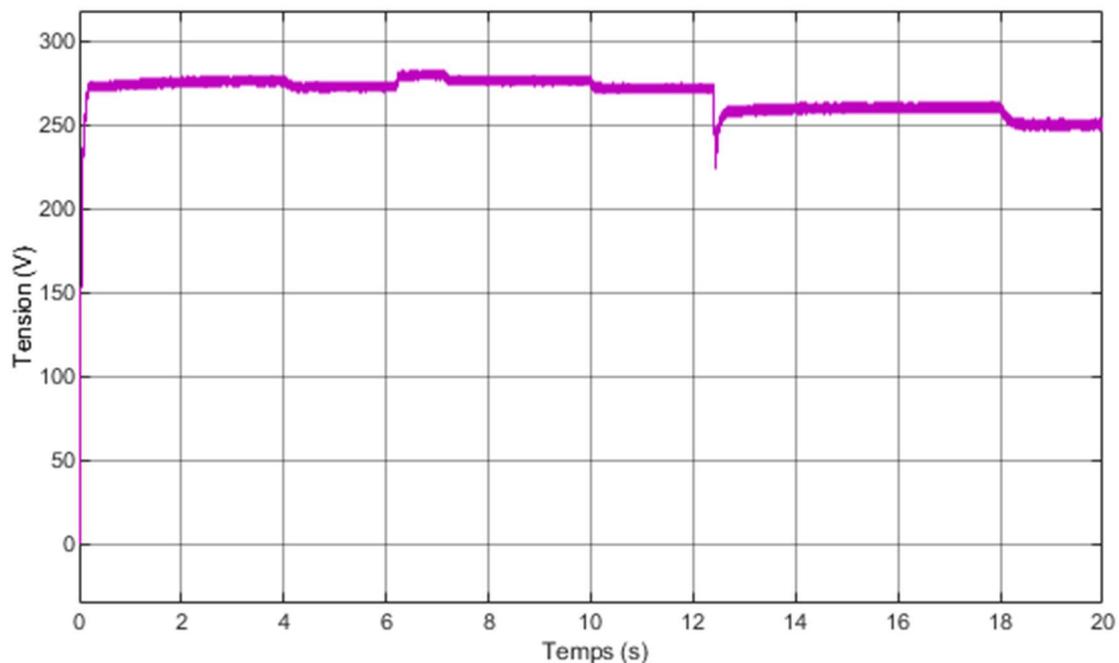


Figure 0-37 : Courbe tension à la sortie de convertisseur DC-DC.

➤ Interprétation

On remarque que chaque fois qu'il y a un changement de couple ou de vitesse, il y aura un changement de tension de sortie de convertisseur DC-DC.

I.18 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une simulation globale de système PV alimenter un moteur a courant continu. Au début nous avons testé la méthode **P&O** pour voir leur comportement sur notre le système global. Puis, on a appliqué une variation sur le couple résistant du moteur pour voir l'effet de cette variation sur le fonctionnement du moteur, la vitesse de ce dernier a été réglé par un régulateur PI.

D'après les résultats de simulation obtenus ont prouvé que :

- La méthode perturbation et observation (P&O) est robuste par rapport aux variations des conditions météorologiques (irradiation et température).
- Le régulateur PI (proportionnel intégral) joue un rôle très important sur le système à commander (MCC) et aussi améliore les performances de notre machine (précision et stabilité)

CONCLUSION GENERALE

Conclusion

Le travail effectué dans ce mémoire, avait comme objectif d'étudier, de modéliser et de simuler un générateur photovoltaïque associé à un convertisseur DC-DC contrôlé par une commande MPPT, pour alimenter un moteur à courant continu. La vitesse de ce dernier a été réglé et Contrôler par un régulateur PI.

Dans le premier chapitre, nous avons donné un aperçu sur l'énergie solaire en portant un intérêt particulier au l'énergie photovoltaïque. On a fait une étude et une simulation du cellule photovoltaïque pour bien comprendre son fonctionnement électrique en fonction des facteurs internes de la cellules (Résistance shunt, résistance série) et les facteurs externes (température, irradiation). La modélisation et la simulation du module photovoltaïque ont démontrés que les courbes caractéristiques Puissance, Tension en fonction du temps sont fortement influencé les paramètres internes et externes.

Pour utiliser un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, le convertisseur DC-DC associé doit être contrôlé par un algorithme traqueur du point de puissance maximale. A cet effet, dans le deuxième chapitre nous nous sommes intéressés de étudie les convertisseurs DC/DC, ces types et principes de fonctionnements. Suivi de l'étude de l'algorithme basé sur la perturbation et l'observation (P&O) et l'algorithme d'incrément de conductance.

On a choisi l'algorithme basé sur la perturbation et l'observation (P&O) pour l'appliqué dans la simulation du système a cause sa simplicité.

Dans le troisième chapitre nous nous somme intéresser de l'étude de la machine à courant continu et leur composition ainsi le principe de fonctionnement en moteur et les différents types des moteurs a courant continu selon le type d'excitation, suivi de modélisant un moteur à courant continu à excitation indépendante. A la fin on a choisi et étudié le régulateur PI pour contrôler la vitesse du moteur.

Pour mieux analyser les contraintes de l'exploitation d'un système photovoltaïque, nous avons analysé dans le simulateur Matlab 2020 le fonctionnement optimal d'un système PV, de moyennes puissances dont la régulation de la puissance est effectuée par une commande MPPT alimente un moteur a courant continu commander par un régulateur PI, suites aux variations des conditions météorologiques (éclairagements, Température) et charge.

On peut faire une combinaison d'un capteur thermique et d'un module photovoltaïque dans un seul panneau (une PVT) permet l'augmentation de l'efficacité de la conversion totale de l'énergie solaire.

Références bibliographiques

- [1] : BELAKEHAL Soltane, « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Énergies Renouvelables », Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine 1, 2010
- [2] : Akassewa Tchapo Singo, « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincare, Nancy-I.
- [3] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement_solaire, consulté le 20/05/2022.
- [4] : Anne Labouret, Michel Villon, « Installations photovoltaïques », 5eme Edition Dunod ,2012
- [5] : P. Claux, « Atlas solaire français », PYC éditions, 1982.
- [6] : <https://www.ef4.be/fr/pv/composants-dun-systeme/enseillement-belgique.html> , consulté le 20/05/2022.
- [7] M. Adouane, M. Haddadi, N. Benamrane, K. Touafek, A. Khelifa and I. Tabet, « Evaluation de l'influence de l'Inclinaison des Modules Photovoltaïques sur la Production d'Energie d'un Système Hybride », (SEINR'14), Ghardaïa – Algérie 13 et 14 Octobre 2014
- [8] : BENHADDOUCHE Nesrine Fatima, « Commande d'un système photovoltaïque d'un satellite », Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2013
- [9] : AMOKRANE Karima , « Dimensionnement et optimisation d'un système de pompage photovoltaïque destiné pour l'alimentation en eau potable », thèse doctorat, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2016.
- [10] : Angel Cid Pastor, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.
- [11] : F. Lasnier, T.G. Ang, « Photovoltaic Engineering Handbook », IOP Publishing Ltd. 1980.
- [12] : Henry Mathieu, « Physique des semiconducteurs et des composants électroniques », 2ème Edition, Masson, France, 1990.
- [13] : GALLOUL Lyssia et MESSAHLI Lynda, « Modélisation d'un panneau photovoltaïque », Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2020 .
- [14] : SOUCI Fatma-Zohra, « Modélisation d'une cellule solaire en couche mince à base de Cuivre Indium Sélénium(CuInSe2) », Thème de Magister, Université Kasdi Merbah de Ouargla, 2009.

- [15] : PETIBON Stéphane, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [16] : BEZZIOU Fatma, « Etude par simulation numérique d'une cellule solaire à homojonction (GaAs) et à hétérojonction (Ga_{0.3}Al_{0.7}As/GaAs) par le logiciel TCADSILVACO », Mémoire De Master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2015.
- [17] : Y. Sayade, « Détermination de la longueur de diffusion des porteurs de charges minoritaires dans le silicium cristallin par interaction lumière matière », Thèse de Doctorat, INSA Lyon, 2009.
- [18] : BOUGUERRA Tarek « Optimisation d'un système photovoltaïque : Application en continu et en alternatif », Mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine 1, 2014.
- [19] : <https://terresolaire.com/Blog/batiment-solaire/inclinaison-panneau-solaireorientation/>, consulté le 28/05/2022.
- [20] : BELKACEM Mourad « Etude et optimisation du transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance maximale (MPPT) », Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2015.
- [21] : BENSEDDIK Othmane et DJALOUD Fathi « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque », Université Kasdi Merbah de Ouargla, 2012.
- [22] : HADJAB Moufdi, « Développement des performances d'un système photovoltaïque », Mémoire de Master Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, 2011.
- [23] : LASMI Yassine, « Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes », Mémoire de Magister, Université de Sétif 1, 2013.
- [24] A. Rufier, P. Barrade, « Cours d'électronique de puissance Conversion DC/DC », , octobre 2001, EPFL, 90 pages. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
- [25] : ZAHI Houssem, « Modélisation Et simulation d'un système photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar de Annaba, Juin 2019.
- [26] Z. Bendjellouli ' Contribution a la modélisation d'une cellule solaire', Mémoire de magister université de bachar, 2009.
- [27] C. CABAL 'Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque ', Thèse de doctorat université de Toulouse III ,2008.

- [28] Réalisation d'un convertisseur DC/DC dans une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque , Juin 2017, GOAR Noureddine, MAHMOUDI Abdelkader, Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi -
- [29] : ATIR Nour El Wiam, NEZLI Tayeb et BEN MEBAEK Latifa « Etude et simulation de la commande d'un moteur à courant continu à excitation série par un redresseur commandé », Mémoire de Master, Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2020.
- [30] : SEBAA Hamza, « Commande d'une machine à courant continu », Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2018.
- [31] : Rene le Doeuff et Mohammed El-Hadi Zaim, « machines électriques tournantes », Lavoisier, Paris, 2009.
- [32] : T.Wildi et G. Sybille, « Electrotechnique », Edition de Boeck, 2005.
- [33] : T.Wildi et G.Sybille, « Electrotechnique » Canada, Decock, 2000.
- [34] : ILILTEN Atman, « Banc d'essais virtuel pour un moteur à courant continu », Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2013.
- [35] : <https://sites.google.com/site/tpepreverthoule/i/fonctionnement-generateur> , consulté le 05/05/2022.
- [36] : <https://energieplus-lesite.be/techniques/ascenseurs7/moteur-a-courant-continu> , consulté le 05/05/2022.
- [37] : KEDJBOUR Abdelhamid et BOUKOUICEM Zoubir, «Etude et simulation de l'asservissement de vitesse dans l'association moteur à courant continu-hacheur série», Mémoire de Master, Université Mohamed Seddik Ben Yahia de Jijel , 2019.
- [38] : Franck Le Gall, « Les moteurs électriques, de la physique à la réalisation industrielle » Technologie, N°203, juin 2016, page 7.
- [39] : HAMIDA Mohamed Lamine et KADI Farid, « Identification et contrôle de la machine à courant continu par la Dspace 1103 », Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.
- [40] : MIOUAT Azzouz « Identification par Algorithmes Génétiques des Pertes dans un Moteur à Courant Continu à Excitation Séparée », Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2013
- [41] : BOUZEGANE Mhenna et GAOUAOU Ferhat « Alimentation d'un moteur à courant continu par une source photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2018.