

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة سعد حليب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الطاقات المتجددة
Département des Energies Renouvelables



Option : conversion photovoltaïque

Mémoire de Projet de Fin d'Études

pour l'obtention du diplôme de master en énergies renouvelables

option : conversion photovoltaïque

Thème :

Analyse du comportement dynamique d'un système Photovoltaïque autonome

Anné : septembre 2016

Fait par : Encadré et suivi par :

AMROUNE Mohammed

Doc.CHEGGAGA. N

ملخص:

مثل كل الأنظمة الفيزيائية، تعتبر المحاكات لنظام الطاقة الشمسية المستقلة بذاتها الحل الأمثل لمعرفة أداء النظام بأكمله. والغرض من هذا العمل هو الحصول من خلال المحاكات على الخصائص والسلوك الديناميكي لهذا النظام دون اللجوء إلى اختباره على أرض الواقع وهذا لربح المال والوقت، خصوصاً وأن هذا النظام يتكون من عدة عناصر كل عنصر هو نظام قائم بذاته مثل الخلية الشمسية التي لها دور في تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية في ظروف مناخية متقلبة أو مثل المحول تيار مستمر-مستمر الذي بدوره يعتمد على عنصرين هامين لتحسين أدائه وهي الدوائر الكهربائية المكونة له والخوارزمية التي تتحكم في تشغيله هذه الأخيرة فيها عدة مشاكل من سرعة معالجة المعلومات للوصول إلى النقطة القصوى التي يعطيها المولد للطاقة الشمسية، وهذا كله لتغذية الحمل والمتمثلة في بطارية كهربائية. نعتمد في هذه المحاكات على matlab/simulink.

المفتاح: الواح الطاقة الشمسية. المحول للتيار مستمر-مستمر. الخوارزميات المتتبع للقطعة القصوى للطاقة البطاريات الكهربائية.

Résumé :

Comme tous les systèmes physiques, des simulations de système indépendant de l'énergie solaire autonome est la meilleure solution pour voir la performance de l'ensemble du système. Le but de ce travail est de passer à travers des simulations sur les caractéristiques et le comportement dynamique du système sans avoir recours à tester sur le terrain et cela est de faire de l'argent et du temps, en particulier lorsque le système est constitué de plusieurs composants de chaque élément est un système en lui-même, comme une cellule solaire qui ont un rôle dans l'énergie solaire est convertie en énergie électrique dans une des conditions climatiques instables ou tel convertisseur continu-continu, qui à son tour dépend de deux éléments importants pour améliorer ses performances et d'un circuit imaginaire constituant et l'algorithme qui contrôle l'exécution de ces derniers sont plusieurs problèmes avec la vitesse de traitement de l'information pour atteindre le point le plus élevé qui lui donne le générateur d'énergie solaire, et tout cela pour nourrir la grossesse et de la batterie électrique. Nous comptons sur ces simulations à logicielle MATLAB/Simulink.

Mots clés: Photovoltaïque, Convertisseur DC-DC, MPPT, batterie,

Abstract :

Like all physical systems, simulations of system independent stand-alone solar power are the best solution to see the performance of the entire system. The purpose of this work is to get through simulations on the characteristics and the dynamic behavior of the system without resorting to tested on the ground and this is to make money and time, especially when the system consists of several components of each element is a system in itself, such as a solar cell that have a role in the solar energy is converted into electrical energy in a volatile climatic conditions or such converter dc-continuously, which in turn depends on two important elements to improve its performance and imaginary circuit constituent and the algorithm that controls the run of the latter are several problems with the speed of information processing to reach the highest point that gives it the generator of solar energy, and all of this to feed the pregnancy and of the electric battery. We rely on these simulations from software MATLAB/Simulink.

Keywords: Photovoltaic, DC-DC converter, MPPT, battery,

Dédicace

À mes familles :

Ma chère mère qui, par ses précieux conseils et son soutien, a su me guider vers le droit chemin et vers la voie de la réussite ; Et qui a sacrifié sa noble existence pour bâtir la mienne, et qui est pour moi : le symbole du courage et du sacrifice.

Pour ma femme et les enfants

À mes très chères sœurs et frère

À tous mes amis

À tous ceux qui me sont chers

Remerciements

Remerciements

Je tien avant tout de remercier le bon **DIEU** qui m'a donné la volonté et le courage pour la réalisation de ce travail.

A mon promoteur qui m'aider et m'orienté pour bien complété ce travail

Toutes les enseignants les administratifs et le personnel du Département des énergies renouvelables.

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Liste des acronymes et abréviations

Table des matières

Liste des figures et Liste des tableaux

Introduction générale

Chapitre I.....(1)

I-1- Introduction :(1)

I-2 Le soleil :(1)

I-3- Energie Solaire :(2)

I-4- Unités utilisées :(3)

I-4-1- L'éclairement ou irradiante :(3)

I-4-2- L'irradiation ou rayonnement :(3)

I-4-3- Normalisation :(4)

I-5- Paramètres de position :(4)

I-5-1- Longitude «L»:(5)

I-5-2- Déclinaison « δ » :(5)

I-5-3- L'angle horaire « ω » :(6)

I-5-4- Hauteur angulaire « h » :(7)

I-5-5- Azimut « as »:(7)

I-6- Les Différents Types de Systèmes Photovoltaïques:(7)

I-6-1- Alimentations électriques faibles puissances :(7)

I-6-2- Installations électriques photovoltaïques autonomes :(7)

I-6-3- Installations ou centrales électriques photovoltaïques raccordées au réseau :....(8)

I-6-4- Installations ou centrale électriques photovoltaïques hybride :(9)

I-7- Avantages et Inconvénients de l'Énergie Photovoltaïque :(9)

I-8- Conclusion :(9)

Chapitre II.....(10)

II-1 Introduction :(10)

II-2 Historique des cellules solaires :.....(10)

II-3 Effet photoélectrique et jonction PN :.....(11)

II-4 Le silicium, propriétés et technologies associées :(12)

II-4-1 Les cellules mono-cristallines:.....(13)

II-4-2 Les cellules poly-cristallines:.....(13)

II-4-3 Les cellules amorphes en couche mince :(14)

II-4-4 Les autres modules photovoltaïques composites et organiques:.....(14)

II-4-5 Thin film au silicium amorphe ou CIS (cuivre-indium-sélénium):.....(14)

II-4-6 Comparatif des différentes technologies:.....(15)

II-5 Caractéristiques électriques d'une cellule solaire :(15)

II-5-1 Courant de court-circuit, I_{cc} :.....(15)

II-5-2 Tension à circuit ouvert, V_{oc} :.....(16)

II-5-3 La caractéristique courant –tension d'une cellule solaire :.....(16)

II-5-4 La caractéristique puissance tension d'une cellule solaire :(16)

II-5-5 Facteur de forme, FF:.....(17)

II-5-6 Le rendement énergétique :(17)

II-6 Modèles mathématiques d'une cellule solaire:.....(17)

Sommaire

II-6-1	Modèle idéal:.....	(17)
II-6-1-A	Présentation du modèle mathématique:.....	(18)
II-6-2	Modèle réelle :.....	(19)
II-6-2-A	Modèle à une diode:.....	(19)
II-6-2-A-1	Présentation du modèle mathématique:.....	(19)
II-6-2-B	Modèle à quatre paramètres (modèle simplifié) :.....	(19)
II-6-2-B-1	Présentation du modèle mathématique :.....	(20)
II-6-2-C	Modèle à deux exponentielles:.....	(20)
II-6-2-C-1	Présentation du modèle mathématique :.....	(20)
II-7	Panneau solaire :.....	(21)
II-7-1	Association de cellules solaires :.....	(21)
II-7-2	Association en série des cellules solaires :.....	(21)
II-7-3	Association parallèle des cellules solaires :.....	(22)
II-8	Les générateurs PV :.....	(23)
II-7-1	Protection d'un générateur photovoltaïque:.....	(24)
II-8	Contraintes de fabrication et d'exploitation d'un module photovoltaïque :	(24)
II-8-1	Influence de la température et de l'ensoleillement sur les courbes I(V) et P(V).....	(24)
II-8-1-A	Influence de l'Éclairement :.....	(25)
II-8-1-B	Influence de la Température :.....	(25)
II-8-2	Influence de la résistance série :.....	(26)
II-8-3	Influence de la résistance parallèle sur les courbes I(V) et P(V) :.....	(27)
II-8-4	Influence du facteur de qualité :.....	(28)
II-9	Conclusion :	(29)
Chapitre III.....		(30)
III-1	Introduction :	(30)
III-2-	Description d'un système de poursuite de point de puissance maximale (MPPT) :.....	(30)
III-2-1	Méthode de poursuite de puissance maximale :	(30)
III-2-2	Classification des méthodes de poursuite du point de puissance maximale :...	(31)
III-2-2-A	Méthodes à contre réaction de tension :.....	(32)
III-2-2-A-1	Méthode à contre réaction de tension de référence fixe :.....	(33)
III-2-2-A-2	Méthode à contre réaction de tension de référence en fonction de V_{co} :.....	(33)
III-2-2-B	Méthodes à contre réaction de courant :.....	(34)
III-2-2-C	Méthodes à contre réaction de puissance :	(34)
III-2-2-C-1	Algorithme incrémentale de la conductance (INC) :	(34)
III-2-2-C-2	Algorithme perturbation et observation (P and O) :	(37)
III-3	Les Convertisseurs statique DC-DC (hacheur) :	(39)
III-3-1	Hypothèses :	(40)
III-3-2	Définition du rapport cyclique :	(41)
III-3-3	Structure des convertisseurs d'énergie élévatrice et abaisseur :	(41)
III-3-3-A	convertisseur survolteur (Boost):	(41)
III-3-3-A-1	Structure de convertisseur survolteur(Boost) :	(41)
III-3-3-A-2	Modèle mathématique équivalente :	(41)
III-3-3-A-3	Modèle approximé du hacheur survolteur(Boost) :	(42)
III-3-3-A-4	Etude en régime continu :.....	(43)
III-3-3-A-5	Rapport de conversion :	(44)
III-3-3-B	Hacheur série (buck):	(45)

Sommaire

III-3-3-B-1	Modèle mathématique équivalente :	(45)
III-3-3-B-2	Modèle approximé du hacheur série :	(46)
III-3-3-B-3	Etude en régime continu :	(47)
III-3-3-B-4	Rapport de conversion $M(\alpha)$:	(47)
III-3-3-C	Hacheur série-parallèle (buck-boost):	(48)
III-3-3-C-1	Modèle mathématique équivalente :	(48)
III-3-3-C-2	Etude en régime continu :	(50)
III-3-3-C-3	Rapport de conversion $M(\alpha)$:	(50)
III-4	Charge :	(51)
III-4-1	Charge résistive :	(51)
III-4-2	Batterie :	(53)
III-4-2-A	Description d'une batterie d'accumulateur au plomb :	(53)
III-4-2-B	Modèle mathématique des batteries au plomb :	(53)
III-5	Conclusion :	(55)
Chapitre III.....		(56)
IV-1	Introduction :	(56)
IV-2	L'outil Matlab/Simulink :	(56)
IV-3	Système photovoltaïque proposée :	(56)
IV-4	Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque autonome :	(57)
IV-4-1	Modélisation du panneau solaire :	(57)
IV-4-2	Modélisation les deux algorithmes (P&O et INC) :	(59)
IV-4-2-A	Modélisation de l'algorithme perturbation et observation (P&O) :	(59)
IV-4-2-B	Modélisation de l'algorithme incrémentale de l'inductance (INC) :	(59)
IV-4-3	Modélisation du convertisseur (boost) :	(60)
IV-4-4	Modèle d'une batterie d'accumulateur au plomb:	(61)
IV-5	Résultats de simulation et évaluation :	(61)
IV-5-1	Etude du système solaire sans régulateur (MPPT) alimenter une charge résistive :	(61)
IV-5-1-A	Résultats de simulation pour la valeur de Résistance optimale :	(62)
IV-5-1-B	Résultats de simulation pour la valeur de R ni pas optimal :	(63)
IV-5-1-B-1	Résultats de simulation pour la valeur de R variable = 3 Ω :	(64)
IV-5-1-B-2	Résultats de simulation pour la valeur de R variable = 80 Ω :	(65)
IV-5-2	Etude du système solaire avec régulateur (MPPT) alimenter une charge résistive :	(66)
IV-5-3	Etude du système solaire avec régulateur (MPPT) alimenter une charge (batterie) :	(72)
IV-5-3-A	Fonctionnement sous des conditions variables d'ensoleillement :	(73)
IV-5-3-A-1	Variations brusques d'ensoleillement :	(74)
IV-5-3-A-2	Variations graduelles rapide d'ensoleillement :	(76)
IV-5-3-A-3	Variations graduelles lentes d'ensoleillement :	(79)
IV-5-3-B	Fonctionnement sous des conditions variables de température :	(81)
IV-5-3-B-1	Variations brusques de température :	(81)
IV-5-3-B-2	Variations graduelles rapide de température :	(84)
IV-5-3-B-3	Variations graduelles lentes de température :	(86)
IV-5-3-C	Variations aléatoire de l'ensoleillement et de température :	(88)
IV-6	Conclusion :	(90)
Conclusion générale :		
Référence bibliographique :		

Liste des figures et des tableaux

Les figures :

Figure I.1 : Vue en écorchée de l'intérieur solaire.....	(2)
Figure I.2: Réponse spectrale d'une cellule PV.	(3)
Figure I.3: le nombre de masse d'air AM	(4)
Figure I.4 : Position d'un astre dans l'espace	(5)
Figure I.5 : Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné.....	(5)
Figure I.6 : Trajectoire de la terre autour du soleil	(6)
Figure I.7 : Trajectoire de la terre autour du soleil	(6)
Figure I.8 : Schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome.	(8)
Figure I.9 : Installation ou centrale électrique photovoltaïque raccordée au réseau.....	(8)
Figure II.1: Jonction P-N dans une cellule photovoltaïque.....	(12)
Figure II.2: Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.....	(12)
Figure II.3: les différentes technologies d'une cellule photovoltaïque.....	(12)
Figure II.4: Cellule mono cristallines.....	(13)
Figure II.5: Cellule poly cristallines.....	(14)
Figure II.6: Panneaux PV avec des cellules amorphes en couche mince.....	(14)
Figure II.7: Les cellules photovoltaïques en plastique, composites et organique.....	(15)
Figure II.8 : cellule PV en court-circuit.....	(16)
Figure II.9 : cellule PV en circuit ouvert.....	(16)
Figure II.10: Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire.....	(16)
Figure II.11: Caractéristique puissance-tension d'une cellule solaire.....	(17)
Figure II.12 : schéma de circuit équivalent idéal d'une cellule solaire	(18)
Figure II.13: Schéma du modèle équivalent à une diode.....	(19)
Figure II.14: Schéma du modèle équivalent à quatre paramètres.....	(20)
Figure II.15: Schéma du modèle équivalent à deux exponentielles.....	(20)
Figure II.16: Branchement en série des cellules solaires.....	(21)
Figure II.17: Caractéristique résultante d'un branchement en série de cellules solaires.....	(22)
Figure II.18 : Branchement en parallèle des cellules solaires	(22)
Figure II.19: Caractéristique résultante d'un branchement en parallèle des cellules solaires.....	(23)
Figure II.20: Présentation d'une cellule, d'un panneau et d'un champ photovoltaïque.....	(23)
Figure II.21: Exemple de protection d'un générateur photovoltaïque.....	(24)
Figure II.22 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique I(V)	(25)
Figure II.23 : Influence de de l'ensoleillement sur la caractéristique P(V)	(25)
Figure II.24: Influence de la température sur la caractéristique I(V)	(26)
Figure II.25 : Influence de la température sur la caractéristique P(V)	(26)
Figure II.26 : Influence de la résistance série sur la caractéristique I(V)	(27)
Figure II.27 : Influence de la résistance série sur la caractéristique P(V)	(27)
Figure II.28 : Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique I(V)	(28)
Figure II.29 : Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique P(V)	(28)
Figure II.30 : Influence du facteur de qualité sur I(V).....	(29)
Figure II.31 : Influence du facteur de qualité sur P(V).....	(29)
Figure III.1: Schéma synoptique d'un système de poursuite du point de puissance maximale.....	(30)
Figure III.2: Classification des méthodes MPPT.....	(32)
Figure III.3: Méthodes à contre réaction de tension.....	(32)
Figure III.4: Intervalle de variation de la tension optimale.....	(33)
Figure III.5: Principe de la méthode à contre réaction de tension de référence en fonction de V_{co}	(33)
Figure III.6: Caractéristique $P=f(V)$ d'un panneau solaire.....	(34)
Figure III.7 : Organigramme de l'algorithme MPPT INC.....	(36)
Figure III.8 : Organigramme de l'algorithme MPPT P&O.....	(37)
Figure III.9 : Principe de la recherche du PPM selon la méthode P&O.....	(38)
Figure III.10 : Divergence de l'algorithme PO en cas de changements brusque des conditions de travail.....	(39)
Figure III.11: Circuit électrique équivalent d'un hacheur parallèle.....	(41)
Figure III.12: Circuit équivalent du hacheur parallèle quand k est fermé.....	(42)
Figure III.13 : Circuit équivalent du hacheur parallèle quand k est ouvert.....	(42)
Figure III-14 : Le rapport de conversion M en fonction de rapport cyclique α du hacheur parallèle).....	(44)
Figure III.15 : Caractéristique de la tension et du courant du hacheur survolteur).....	(44)
Figure III.16 : Circuit électrique équivalent d'un hacheur série).....	(45)
Figure III.17 : Circuit équivalent du hacheur série quand k est fermé).....	(45)
Figure III.18 : circuit équivalent du hacheur série quand k est ouvert).....	(46)

Liste des figures et des tableaux

Figure III.19: Le rapport de conversion M en fonction de rapport cyclique α du hacheur série).....	(47)
Figure III.20 : Caractéristique de la tension et du courant du hacheur Buck).....	(48)
Figure III.21 : Circuit électrique équivalent d'un hacheur série-parallèle.....	(48)
Figure III.22 : Circuit équivalent d'un hacheur série-parallèle quand k est fermé.....	(49)
Figure III.23 : Circuit équivalent du hacheur parallèle quand k est ouvert.....	(49)
Figure III-24 : Le rapport de conversion M en fonction de rapport Cyclique (α) du hacheur série-parallèle.....	(50)
Figure III-25 : Caractéristique de la tension et du courant du hacheur Buck-Boost.....	(51)
Figure III-26 : Connexion directe entre un panneau solaire et une charge résistive.....	(51)
Figure III-27 : courbe I-V du module et des diverses valeurs de la charge résistive.....	(52)
Figure III.28 : l'efficacité du module PV avec un charge résistive fixe Concue pour des différent niveaux d'ensoliellement	(53)
Figure III-29 : Modèle électrique équivalent d'une batterie d'accumulateur au plomb).....	(54)
FigureIV.1 : schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par (MPPT) sur charge (batterie).....	(57)
Figure IV.2: Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	(57)
Figure IV.3 : schéma bloc du générateur photovoltaïque.....	(58)
Figure IV.4 : Modèle du module photovoltaïque sous Simulink/Matlab.....	(58)
Figure IV.5 : Modèle l'algorithme P&O sous Simulink/Matlab.....	(59)
Figure IV.6 : Modèle l'algorithme INC sous Simulink/Matlab.....	(60)
Figure IV.7 : Modèle de hacheur (BOOST) sous Simulink/Matlab.....	(60)
Figure IV.8 : Schéma de bloc d'une batterie d'accumulateur au plomb.....	(61)
Figure IV.9 : système solaire sans MPPT alémenter une risistance.....	(61)
Figure IV.10: modèle de conditions climatiques (température et éclairement)	(62)
Figure IV.11: modèle de résistance optimale.....	(62)
Figure IV.12.a: La Tension V_{pv} aux bornes du générateur PV pour ($R=R_{op}$).....	(62)
Figure IV.12.b: Le courant I_{p} aux bornes du générateur PV pour ($R=R_{op}$)	(63)
Figure IV.12.c: La Puissance P_{pv} aux bornes du générateur PV pour ($R=R_{op}$)	(63)
Figure IV.13.a: la tension V_{pv} aux bornes du générateur PV pour $R=3 \Omega$	(64)
Figure IV.13.b: Le courant I_{p} aux bornes du générateur PV pour $R=3 \Omega$	(64)
Figure IV.13.c: La Puissance P_{pv} aux bornes du générateur PV pour ($R=3 \Omega$).....	(64)
Figure IV.14.a: la tension V_{pv} aux bornes du générateur PV pour $R=80 \Omega$	(65)
Figure IV.14.b: Le courant I_{p} aux bornes du générateur PV pour $R=80 \Omega$	(65)
Figure IV.14.c: La Puissance P_{pv} aux bornes du générateur PV pour ($R=3 \Omega$)	(65)
Figure IV.15 : système solaire avec MPPT et convertisseur (BOOST) alémenter une risistance.....	(66)
Figure IV.16 : les valeurs de la resistance variable qui représenter la charge resistive	(66)
Figure IV.17.a : le courant (I_{pv})débitée par le GPV.....	(66)
Figure IV.17.b: la tension (V_{pv}) électrique débitée par le GP.....	(67)
Figure IV.17.c: la puissance (P_{pv})débitée par le GPV	(67)
Figure IV.18.a: Tensions du sortir (V_s) au bornes du convertisseur (BOOST) pour les méthodes MPPT (P&O et INC) et ($\Delta V=0.006v$) et la résistance variable pour de sortir.....	(67)
Figure IV.18.b: le pic de tension (V_s) suite a l'appele de charge (regime transitoire)	(68)
Figure IV.18.c: la tension (V_s) au rigime parmanent.....	(68)
Figure IV.18.d: les oscillations de tension (V_s) suite à La brusque de la charge (réponse indicielle).....	(68)
Figure IV.19: le courant (I_s) de sortir au bornes du convertisseur (BOOST) pour les méthodes MPPT (P&O et INC) et ($\Delta V=0.006v$).....	(69)
Figure IV.20: la puissance (P_s) de sortir au bornes du convertisseur (BOOST)pour les méthodes MPPT (P&O et INC) et ($\Delta V=0.006v$)	(69)
Figure IV.21.a: le courant (I_r) consommer par la charge pour les méthodes MPPT (P&O et INC) et ($\Delta V=0.006v$)	(70)
Figure IV.21.b: la puissance (P_r) consommer par la charge pour les méthodes MPPT (P&O et INC) et ($\Delta V=0.006v$).....	(70)
Figure IV.21.c: le courant (I_p) perdu non pas exploiter pour les méthodes MPPT (P&O et INC) et ($\Delta V=0.006v$).....	(70)
Figure IV.21.d: la puissance P_p perdu non pas exploiter pour les méthodes MPPT (P&O et INC) et ($\Delta V=0.006v$).....	(71)
Figure IV.22.a: les puissances (P_s) de sortir aux bornes des convertisseurs (BOOST et BUK-BOOST) pour les méthodes MPPT (P&O et INC) et ($\Delta V=0.6v$)	(71)
Figure IV.22.b: les valeurs des puissances (P_s) de sortir aux bornes des convertisseurs (BOOST et BUK BOOST) pour les méthodes MPPT (P&O et INC) et ($\Delta V=0.6v$)	(72)

Liste des figures et des tableaux

Figure IV.23 : système solaire avec MPPT et convertisseur (BOOST) alémenter une batterie.....	(73)
Figure IV.24 : les conditions métrologiques appliquées dans ce cas.	(73)
Figure IV.25.a : la tension V_{pv} de sortir du G_{pv}	(74)
Figure IV.25.b : la puissance P_{pv} de sortir du G_{pv}	(74)
Figure IV.25.c : le courant I_{pv} de sortir du G_{pv}	(74)
Figure IV.26 : le rapporte cycliques (α) pour ($\Delta V=0.006v$) et leur réponse vis a vi le changement de l'ensoleillement.....	(75)
Figure IV.27.a : la tension V_s de sortir de convertisseur (A) avec la forme de tension au régime transitoire (B).....	(75)
Figure IV.27.b : la tension V_s de sortir de convertisseur au régime permanent (A) et réponse indicielle (B).....	(75)
Figure IV.28 : le courant I_s de sortir du convertisseur	(76)
Figure IV.29 : la puissance P_s de sortir du convertisseur.....	(76)
Figure IV.30 : les conditions métrologiques appliquées dans ce cas variation graduelles rapide d'ensoleillement Et la température constante.	(76)
Figure IV.31.a : la tension V_{pv} de sortir du G_{pv}	(77)
Figure IV.31.b : le courant I_{pv} de sortir du G_{pv}	(77)
Figure IV.31.c : la puissance P_{pv} de sortir du G_{pv}	(77)
Figure IV.32 : le rapporte cycliques (α) pour ($\Delta V=0.006v$) et leur réponse vis a vi le changement de l'ensoleillement	(78)
Figure IV.33 : la tension V_s de sortir de convertisseur au régime transitoire et permanent et réponse indicielle.....	(78)
Figure IV.34 : le courant I_s de sortir du convertisseur.....	(78)
Figure IV.35 : les conditions métrologiques appliquées dans ce cas variation graduelles lentes d'ensoleillement Et la température constante.	(79)
Figure IV.36.a : la tension V_{pv} de sortir du G_{pv} cas variation graduelles lentes d'ensoleillement Et la température constante.....	(79)
Figure IV.36.b : le courant I_{pv} de sortir du G_{pv} cas variation graduelles lentes d'ensoleillement Et la température constante.....	(79)
Figure IV.36.c : la puissance P_{pv} de sortir du G_{pv} cas variation graduelles lentes d'ensoleillement Et la température constante.....	(80)
Figure IV.37 : le rapporte cycliques (α) pour ($\Delta V=0.006v$) et leur réponse vis a vi le changement de l'ensoleillement	(80)
Figure IV.38 : la tension V_s de sortir de convertisseur au régime transitoire et permanent et réponse indicielle.....	(80)
Figure IV.39 : le courant I_s de sortir du convertisseur.....	(81)
Figure IV.40 : les conditions métrologiques appliquées dans ce cas variation brusque de la température et l'ensoleillement constante.	(81)
Figure IV.41.a : la tension V_{pv} de sortir du G_{pv}	(82)
Figure IV.41.b : le courant I_{pv} de sortir du G_{pv}	(82)
Figure IV.41.c : la puissance P_{pv} de sortir du G_{pv}	(82)
Figure IV.42 : le rapporte cycliques (α) pour ($\Delta V=0.006v$) et leur réponse vis a vi le changement de la température	(83)
Figure IV.43 : la tension V_s de sortir de convertisseur au régime transitoire et permanent et réponse indicielle.....	(83)
Figure IV.44 : le courant I_s de sortir du convertisseur.....	(83)
Figure IV.45 : les conditions métrologiques appliquées dans ce cas variation graduelles rapides de la température et l'ensoleillement constante.	(84)
Figure IV.46.a : la tension V_{pv} de sortir du G_{pv} cas variation graduelles rapides de la température et l'ensoleillement constante.....	(84)
Figure IV.46.b : le courant I_{pv} de sortir du G_{pv} cas variation graduelles rapides de la température et l'ensoleillement constante.....	(84)
Figure IV.46.c : la puissance P_{pv} de sortir du G_{pv} cas variation graduelles rapides de la température et l'ensoleillement constante.....	(85)
Figure IV.47 : le rapporte cycliques (α) pour ($\Delta V=0.006v$) et leur réponse vis a vi le changement de la température.....	(85)
Figure IV.48 : la tension V_s de sortir de convertisseur au régime transitoire et permanent et réponse indicielle.....	(85)
Figure IV.49 : le courant I_s de sortir du convertisseur	(86)

Liste des figures et des tableaux

Figure IV.50 : les conditions métrologiques appliquées dans ce cas variation graduelles lentes de la température et l'ensoleillement constante.	(86)
Figure IV.51.a : la tension V_{pv} de sortir du G_{pv} cas variation graduelles lentes de la température et l'ensoleillement constante.....	(86)
Figure IV.51.b : le courant I_{pv} de sortir du G_{pv} cas variation graduelles lentes de la température et l'ensoleillement constante.....	(87)
Figure IV.51.c : la puissance P_{pv} de sortir du GPV cas variation graduelles lentes de la température et l'ensoleillement constante.....	(87)
Figure IV.52: le rapporte cycliques (α) pour ($\Delta V=0.006v$) et leur réponse vis a vi le changement de la température	(87)
Figure IV.53 : la tension V_s de sortir de convertisseur au régime transitoire et permanent et réponse indicielle.	(87)
Figure IV.54 : le courant I_s de sortir du convertisseur.....	(88)
Figure IV.55 : les conditions métrologiques aléatoires appliquées dans ce cas.....	(88)
Figure IV.56.a : la tension V_{pv} de sortir du GPV	(88)
Figure IV.56.b : le courant I_{pv} de sortir du GPV	(89)
Figure IV.56.c : la puissance P_{pv} de sortir du G_{pv}	(89)
Figure IV.57: le rapporte cycliques (α) pour ($\Delta V=0.006v$) et leur réponse vis-à-vis le changement aléatoire des conditions météorologiques	(89)
Figure IV.58 : la tension V_s de sortir de convertisseur au régime transitoire et permanent et réponse indicielle.	(90)
Figure IV.59 : le courant I_s de sortir du convertisseur.....	(90)

Liste des tableaux :

Tableau II.1 Comparatif des différentes technologies.....	(15)
--	------

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE :

La production d'énergie est un grand et important défi pour les années à venir, pour pouvoir satisfaire les besoins énergétiques qui sont de plus en plus croissants.

Actuellement, la production d'énergie dans le monde est basée presque totalement sur les sources fossiles, sources qui présentent les inconvénients d'être limitées et qui constituent un grand danger écologique à cause des émissions de gazes à effet de serre. [1]

Les énergies renouvelables (l'énergie solaire, géothermique, biomasse, éolienne, hydraulique...) sont des énergies à coût élevé actuellement; néanmoins ils sont, à l'opposé des énergies fossiles, des ressources illimitées.

L'énergie solaire photovoltaïque devient de plus en plus une solution qui promet de substituer les énergies fossiles; ceci grâce à ces avantages dont on peut citer l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tous points du globe terrestre. C'est aussi une énergie fiable (aucune pièce mécanique en mouvement), modulable (taille adaptable des installations), et qui peut être produite au plus proche du lieu de consommation. [2]

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (**PV**) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules **PV** en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (**GPV**) qui a une caractéristique courant-tension (**I-V**) non linéaire présentant un point de puissance maximale. [3]

Le générateur photovoltaïque est l'élément de base de toutes les installations photovoltaïques. L'énergie produite n'est stockée dans le générateur photovoltaïque, ni sous forme chimique ni sous aucune autre forme. Ce n'est pas donc une pile, mais un convertisseur instantané, qui pourra fournir une énergie sous forme électrique que s'il reçoit une énergie sous forme de rayonnement solaire. L'énergie solaire est de nature intermittente et les besoins en électricité ne correspondent pas souvent aux heures d'ensoleillement. Un stockage de l'excédent d'énergie produite par le générateur photovoltaïque est donc nécessaire pour couvrir les besoins en électricité pendant l'absence d'ensoleillement. Le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques autonomes est en général assuré par des batteries. Celles-ci sont des éléments essentiels au bon fonctionnement des systèmes autonomes. Le stockage d'énergie, qui représente de **15 à 25%** du coût des systèmes photovoltaïques, est l'élément fragile du système. [4]

L'installation photovoltaïque la plus simple que l'on puisse concevoir se compose d'un générateur photovoltaïque formé d'un ou plusieurs modules connectés en série ou en parallèle, des batteries et d'une charge qui utilise directement l'énergie produite. Une telle installation ne fournit un effet utile que pendant les périodes ensoleillées. Elle ne convient donc que pour de rares applications. Ce type d'installation a le mérite de la simplicité, mais elle ne conduit pas à une utilisation optimum du générateur photovoltaïque. Mais, le niveau de tension et de courant qui s'établit spontanément sur générateur photovoltaïque n'est pas

Introduction générale

forcément celui qui convient le mieux aux les éléments de l'installation. On doit veiller lors de la conception de l'installation à choisir des éléments tels qu'une adaptation se réalise spontanément dans toutes les conditions d'utilisation. Compte tenu du nombre de paramètres en jeu, l'adaptation obtenue n'est jamais parfaite, et la solution n'est pas transposable d'une région à l'autre ni même d'une situation à l'autre. On est donc amené à disposer un circuit d'interface entre les batteries et le générateur photovoltaïque, en général un convertisseur statique. Les pertes d'énergie occasionnées par ce circuit sont compensées par une meilleure extraction d'énergie du générateur photovoltaïque. Compte tenu des fluctuations permanentes des conditions de fonctionnement, il faut aussi prévoir un système de commande automatique de ce convertisseur, ainsi que divers capteurs fournissant à ce convertisseur les informations dont il a besoin. [4]

Le système de commande automatique pour le suivi du point de puissance maximale de panneau photovoltaïque souffre d'un grave problème auquel le **(PPM)** ne peut pas être rapidement acquis. Basé sur la théorie des semi-conducteurs de la jonction (**p-n**), nous développons une méthode de prédiction pour estimer directement le **(PPM)** pour le suivi de puissance dans le panneau photovoltaïque

Dans cet **MPPT** (dit aussi régulateur), un circuit mesure en permanence la tension et le courant du photo-générateur afin d'en tirer de l'énergie au point de puissance maximale. Ceci permet le fonctionnement du système photovoltaïque avec le maximum d'énergie produite, quelque soient les conditions atmosphériques (température et éclairement). En général, ces régulateurs fonctionnent soit en élevant ou en abaissant la tension. Un premier circuit ajuste la demande au point de puissance maximale du photo-générateur et un deuxième circuit transforme la tension et le courant pour l'adapter au type de batterie.

La commande du système **MPPT** consiste donc en l'ajustement de ce convertisseur à récupérer le maximum d'énergie produite par le photo-générateur, c'est-à-dire minimiser voire éliminer les pertes d'énergie. Le modèle de la caractéristique courant- tension est non linéaire, avec des contraintes de température et l'ensoleillement qui varient d'une manière aléatoire ce qui nous confronte à un problème d'optimisation non linéaire, surtout pour les applications récentes comme les voitures ou les variations peuvent être très brusques et très grandes comme le passage sous un pont ou dans un tunnel.

Dans ce sens, l'objectif de ce mémoire présenter une contribution à l'analyse du comportement et la maîtrise des performances d'un système photovoltaïque constitué par un module **PV**, un convertisseur **DC-DC** de type **BOOST**, batterie de stockage comme charge et Un contrôleur (**MPPT**).

La modélisation et la simulation permettent de passer de la conception théorique du système à la réalisation pratique avec plus d'assurance. Dans ce travail les simulations font appel à des situations variées et représentatives de certaines difficultés potentielles rencontrées dans les systèmes autonome. Ainsi l'attention est focalisée sur le comportement dynamique d'un système PV autonome face aux variations brusques et variations graduelles des conditions climatiques (éclairage et température)

Ce travail comporte quatre chapitres ainsi qu'une introduction et une conclusion. Dans le premier chapitre, nous avons abordé le gisement solaire et les paramètres de positionnement (astronomie) et on suit les différents Types de Systèmes Photovoltaïques.

Introduction générale

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des cellules photovoltaïques, à la mise au point d'un modèle mathématique du panneau photovoltaïque permettant de déterminer la caractéristique tension-courant et l'influence des paramètres (température, ensoleillement, résistance série, facteur de qualité,...) sur cette caractéristique

Le troisième chapitre est consacré à l'étude du convertisseur **DC-DC** type (**BOOST** et **BUCK** et **BUCK-BOOST**), ainsi que les différentes stratégies de commande utilisées sont illustrées.

Le quatrième chapitre est consacré à la simulation de tout le système (système photovoltaïque autonome alimenter une batterie comme charge). Les résultats de simulation sont présentés ainsi que l'analyse spectrale

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et de simulation

Dans ce manuscrit, et afin d'étudier en détail le fonctionnement d'un système photovoltaïque, nous nous proposons de le modéliser puis le simuler à l'aide du logiciel de calcul scientifique **Matlab-Simulink**.

I-1- Introduction :[8]

De tout temps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil. La plupart des utilisations, connues depuis des siècles, sont directes comme en agriculture à travers la photosynthèse ou dans les diverses applications de séchage et chauffage autant artisanales qu'industrielles.[8]

L'énergie solaire est une source d'énergie accessible à tous (industriels, collectivités et particuliers). Grâce à celle-ci, il est possible de produire trois types d'énergies : l'énergie calorifique avec les installations solaires thermiques (chauffe-eau solaire ou climatiseur solaire), l'énergie électrique avec les installations solaires photovoltaïques et le solaire à concentration thermodynamique.

Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 10 000 W/m² crête dans les zones tempérées et jusqu'à 14 000 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée.

Signalons dès à présent le flux solaire reçu au niveau de sol dépend de [8] :

- l'orientation, la nature et l'inclinaison de la surface terrestre.
- la latitude du lieu de collecte, son degré de pollution ainsi que son altitude.
- la période de l'année.
- l'instant considéré dans la journée.
- la nature des couches nuageuses.

L'électricité photovoltaïque a dans un premier temps été développée pour des applications autonomes sans connexion à un réseau électrique pour par exemple des satellites de télécommunication ou pour des habitations isolées. On la trouve maintenant dans des applications de diverses puissances comme les calculatrices, les montres et d'autres objets d'utilisation courante. En effet, cette électricité produite par des cellules photovoltaïques individuelles peut alimenter diverses charges continues sans difficulté. Plus récemment, avec l'émergence d'installations photovoltaïques connectées au réseau de distribution, le photovoltaïque a connu un développement important en tant que moyen de production d'électricité.

Cette évolution constante a été rendue possible grâce aux recherches fondamentales menées dans le domaine des matériaux photovoltaïques, mais aussi par l'amélioration progressive des dispositifs de gestion de cette énergie menée en parallèle. En effet, l'électricité photovoltaïque est une source d'énergie intermittente, à caractère non-linéaire et dépendante de nombreux paramètres comme l'irradiation et la température. Il a donc fallu adapter cette source d'énergie à notre mode de consommation, soit en stockant la production solaire dans des batteries ou dans tout autre moyen de stockage en cours de développement, soit en la renvoyant sur le réseau électrique public.

Une cellule photovoltaïque convertit une partie de l'énergie solaire en énergie électrique. Une cellule photovoltaïque est donc un transducteur qui, dans la majorité des cas, utilise le rayonnement solaire. Il semble par conséquent intéressant de s'intéresser tout d'abord au générateur de ce rayonnement.

I-2Le soleil : [5]

Le Soleil est une étoile, c'est-à-dire un astre qui produit sa propre énergie. Cette étoile est particulièrement importante car elle fournit l'essentiel de l'énergie que les planètes du système solaire reçoivent. Néanmoins, elle reste relativement banale comparée à l'ensemble des autres

étoiles. Il s'agit d'une étoile de classe **G**, située sur la séquence principale, donc dans la phase principale de sa vie. Son rayon de ($6.957 \times 10^8 \text{ m}$) et sa masse de ($1.9884 \times 10^{30} \pm 82 \times 10^{26} \text{ Kg}$).

Bien que la notion de surface n'ait pas grand sens dans le cas d'une sphère de gaz, on distingue toutefois deux grandes zones : l'intérieur et l'atmosphère du Soleil. Schématiquement, l'intérieur du soleil est toute la région inaccessible par des moyens optiques (quels qu'ils soient).

La « surface » solaire (qui définit aussi son rayon) est définie par l'altitude à partir de laquelle les photons à **500 nm** se propagent librement.

L'intérieur solaire est composé de trois régions :

Le noyau

La zone radiative

La zone de convection

L'atmosphère est elle aussi composée de trois zones :

La photosphère

La chromosphère

La couronne

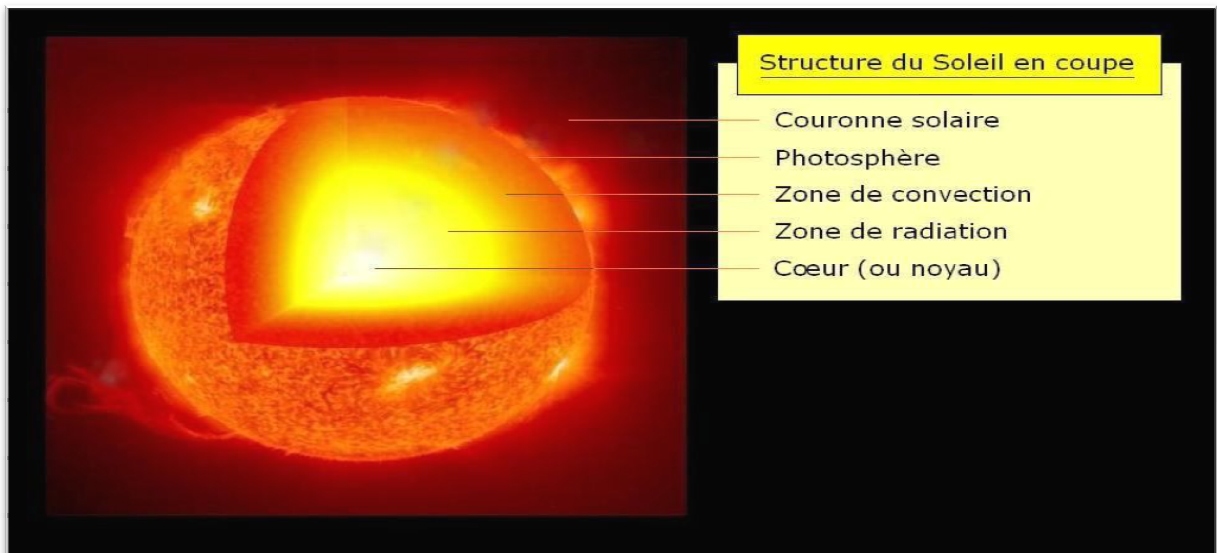


Figure I.1 : Vue en écorchée de l'intérieur solaire.

I-3-Energie Solaire :[5]

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre (150.10^6 Km), la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante (180.10^6 GW), c'est pour cela que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie non-renouvelables.

Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de (220 à 10000 nm), l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit:

9 % dans la bande des ultraviolets ($< \text{à } 400 \text{ nm}$).

47 % dans la bande visibles (400 à 800 nm).

44 % dans la bande des infrarouges ($> \text{à } 800 \text{ nm}$).

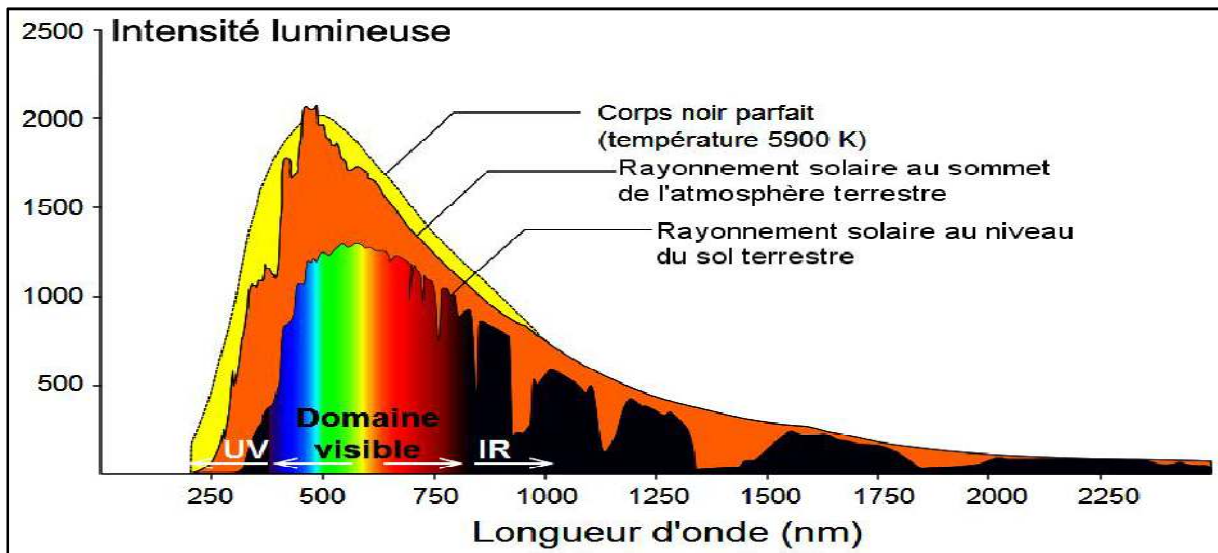


Figure I.2: Réponse spectrale d'une cellule PV.

Au cours de ces dix dernières années ce spectre a été homologué par l'organisation internationale de standardisation (**ISO 9845-1 :1992**) et la société américaine de test et de matériaux (**ASTM E 892-87 :1992**) ont fixées le flux de standardisation E_s à **1000 W/m²**. Cette énergie est définie comme paramètre solaire qui a une valeur variable suivant la saison, l'heure, la localisation géographique du site, les conditions météorologiques (poussière, humidité,...etc.).

I-4-Unités utilisées :

I-4-1-L'éclairement ou irradiante :[6]

Est défini comme une puissance reçue par une surface. Il s'exprime en **W/m²** (watt par mètre carré). Le S.I. (système international d'unités) recommande d'utiliser le symbole E_{ph} .

I-4-2- L'irradiation ou rayonnement :[6]

Est l'énergie reçue par une surface. Elle s'exprime en **J m⁻²**(joule par mètre carré). L'**ISES (International SolarEnergy Society)** recommande le symbole **H**. d'autres unités plus courantes sont le **Wh/m²**(wattheure par mètre carré) bien que ce dernier ne doive pas être utilisé puisque n'appartenant pas au système international d'unités (**SI**).

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de **(1367 watts)** atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de **150 Millions de km**), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à **(1367W/m²)**.

La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air **AM**.

Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de **1000 W/m²**et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "**1**" (ou **AM1**). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant

plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m^2 .

Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : **AM1.5G** ou **AM1.5D**.

Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith).

Le « G » représente le rayonnement "global" incluant rayonnement direct et rayonnement diffus et la lettre « D » tient compte seulement du rayonnement direct.

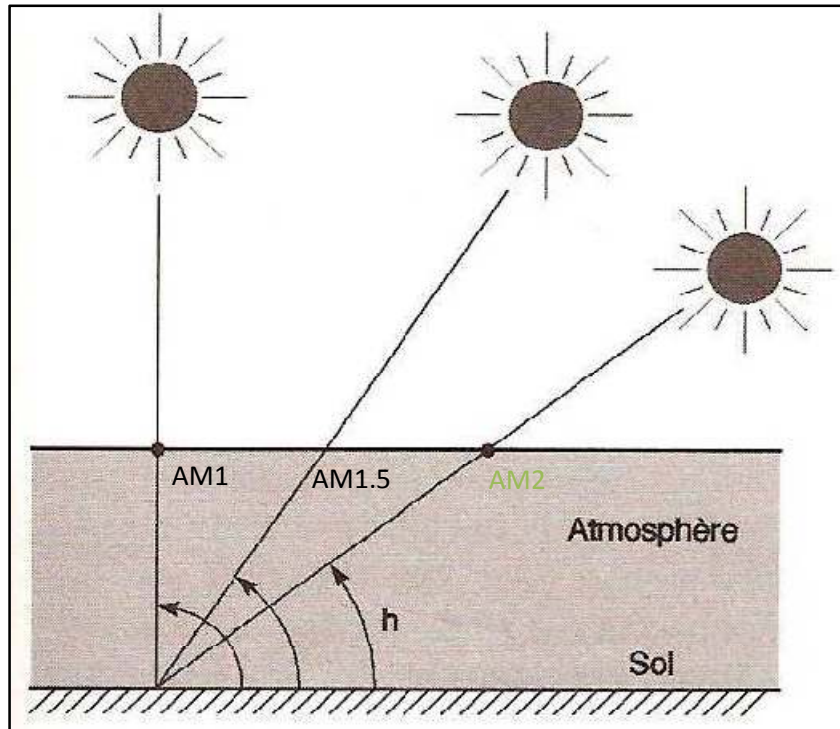


Figure I.3: le nombre de masse d'air AM.

I-4-3- Normalisation : [6]

Les conditions standards de qualification des modules photovoltaïques sont : un spectre **AM1.5** sous un éclairage de 1000 W/m^2 et une température de 25°C .

Les constructeurs de panneaux solaires spécifient les performances de leur matériel dans les conditions normalisées citées ci-dessus (**S.T.C. : Standard Test Conditions**).

Signalons que, *outre l'incidence de l'atmosphère*, l'irradiation solaire dépend :

- de l'orientation et l'inclinaison de la surface.
- de la latitude du lieu et son degré de pollution.
- de la période de l'année.
- de l'instant considéré dans la journée.
- de la nature des couches nuageuses.

I-5- Paramètres de position : [2]

L'énergie solaire atteignant une surface donnée dépend directement de l'orientation de celle-ci et de la position du soleil. Pour récupérer un maximum d'énergie en provenance du soleil, il est nécessaire d'orienter au mieux le récepteur par rapport aux rayons lumineux.

La connaissance de la position du soleil en fonction du temps est donc fondamentale. En énergétique solaire, on utilise les coordonnées locales du soleil sur la sphère céleste, **figure I.4**, à savoir :

- sa **hauteur angulaire « h »** sur l'horizon, angle de sa direction avec l'horizontale ;
- son **azimut « as »**, angle du plan vertical contenant le soleil avec le plan méridien local.

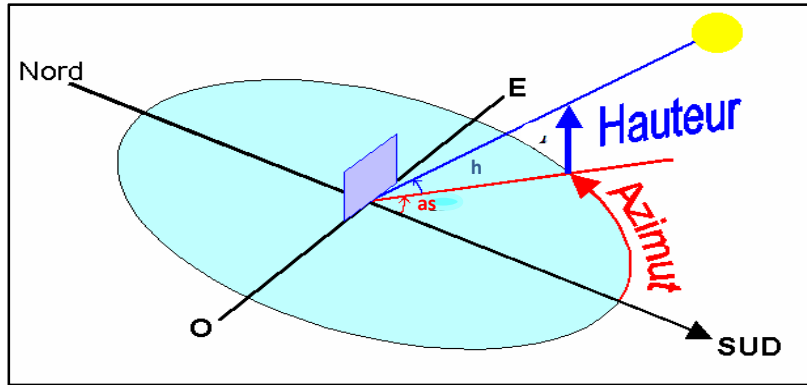


Figure I.4 : Position d'un astre dans l'espace

Ces grandeurs sont calculables à partir des grandeurs géophysiques longitude « L » et déclinaison « δ ».

I-5-1- Longitude «L»:[2]

L'équateur est une ligne fictive de séparation entre l'hémisphère nord et l'hémisphère sud, définie par un plan perpendiculaire à l'axe des pôles. Le méridien est le plan du lieu passant par l'axe des pôles.

Tout point de la sphère terrestre peut être repéré par deux coordonnées, appelées coordonnées terrestres, à savoir : sa latitude « ϕ », qui est positive dans l'hémisphère nord, elle est négative dans l'hémisphère sud, et sa longitude « L » positive à l'ouest négative à l'est.

La méridienne origine, servant à la mesure de la longitude, est celui de Greenwich.

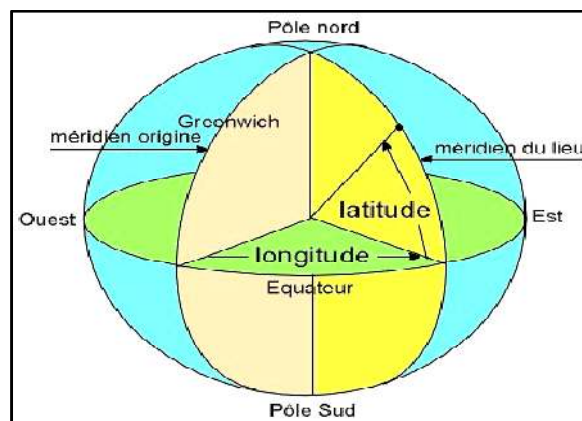


Figure I.5 : Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné

I-5-2- Déclinaison « δ »:[2]

La terre décrit autour du soleil une ellipse située dans un plan appelé le plan de l'écliptique comme le montre la **figure I 6** ci-dessous :

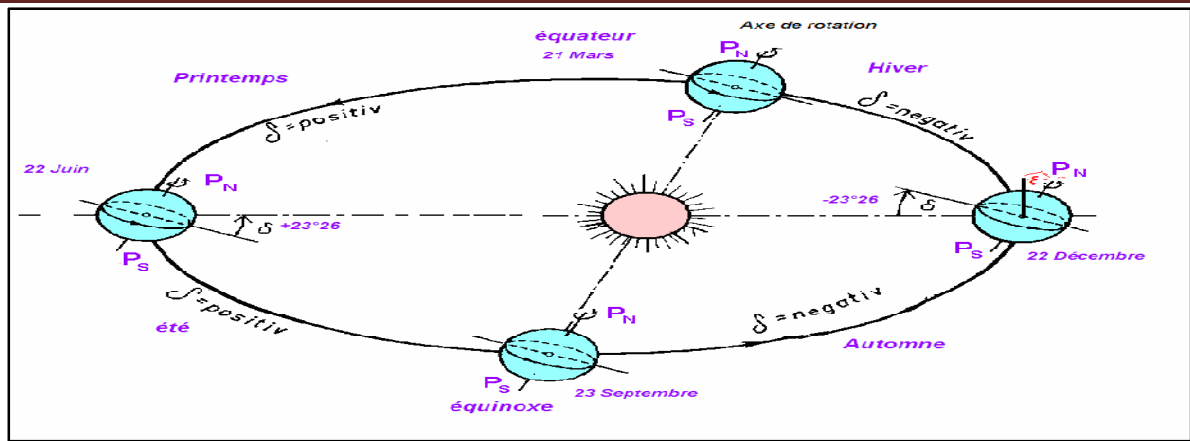


Figure I.6 : Trajectoire de la terre autour du soleil

La valeur de la déclinaison peut être obtenue avec une bonne précision par la formule suivante

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left[\left(\frac{360}{365} \right) \cdot (284 + j) \right] \dots \dots \dots (I-1)$$

Avec *j*: nombre de jours écoulés depuis le 1^{er} Janvier.

I-5-3- L'angle horaire « W » : [2]

L'angle horaire *w* (encore noté AH) du soleil est déterminé par la rotation diurne de la terre autour de son axe. C'est la mesure de l'arc de trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien du lieu.

La hauteur « *h* » est obtenue en fonction de la longitude *L*, de la déclinaison *δ* et de l'heure solaire par :

$$w = (TSV - 12) \cdot 15^\circ \dots \dots \dots (I-2)$$

Avec *TSV* est le temps solaire vrai exprimé en heures.

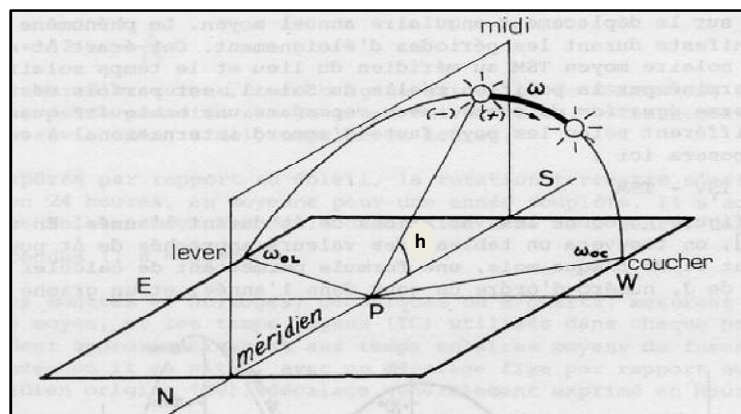


Figure I 7 : Trajectoire de la terre autour du soleil

I-5-4- Hauteur angulaire« h » : [2]

C'est l'angle (**h**) formé par le plan horizontal au lieu d'observation et la direction du soleil. Il est donné par la relation:

$$h = \sin^{-1}(\sin L . \sin \delta + \cos L . \cos \delta . \cos w) \dots \dots \dots (I-3)$$

I-5-5- Azimut« as »: [2]

C'est l'angle **a** compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil. L'azimut est relié à l'angle horaire, la hauteur et la déclinaison par la relation:

$$as = \text{arc sin} \left(\frac{\cos \delta \sin w}{\cos h} \right) \dots \dots \dots (I-4)$$

I-6- Les Différents Types de Systèmes Photovoltaïques: [2]

I-6-1- Alimentations électriques faibles puissances :

Il s'agit des alimentations électriques faibles telles que les cauculettes ou les chargeurs de piles. Des modules photovoltaïques (**PV**) peuvent faire fonctionner n'importe quel appareil alimenté par des piles.

I-6-2- Installations électriques photovoltaïques autonomes :

En site isolé, le champ photovoltaïque **figure I.8** peut fournir directement l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner les récepteurs (éclairage et équipement domestique). Un système de régulation et une batterie d'accumulateurs permettent de stocker l'énergie électrique qui sera ensuite utilisée en l'absence du Soleil. Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique sous une forme chimique. Elles restituent l'énergie électrique au besoin selon ses caractéristiques.

Le régulateur de charge a pour fonction principale de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes. Il est un élément essentiel pour la durée de vie de la batterie. En site isolé, on peut aussi utiliser des récepteurs fonctionnant en courant alternatif. Dans ce cas, l'installation comprendra un onduleur. On peut citer quelques exemples de systèmes autonomes, comme les balises en mer, les lampadaires urbains, le pompage solaire et les maisons en sites isolés.

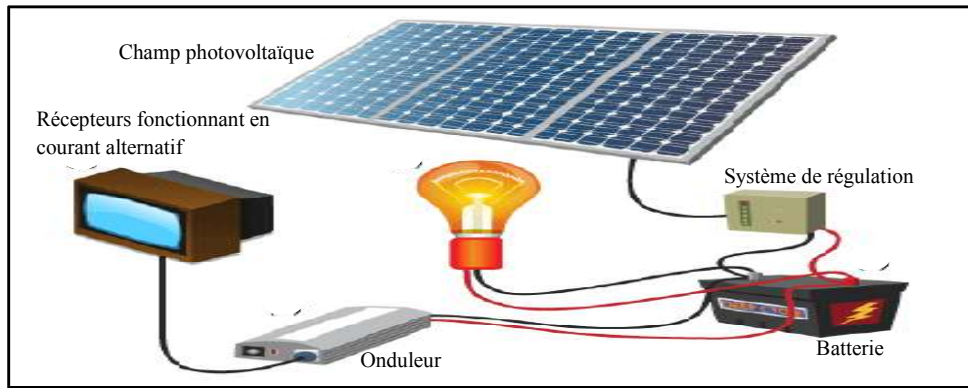


Figure I.8 : Schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome.

La majorité des populations à l'écart des réseaux électriques vit dans des zones rurales, où l'implantation de tels réseaux est difficile, pour des raisons d'accès ou de moyens. Les systèmes photovoltaïques constituent alors une option intéressante, ils donnent aux populations un accès à l'électricité avec un coût, une maintenance et des difficultés de mise en œuvre réduits.

I-6-3- Installations ou centrales électriques photovoltaïques raccordées au réseau :

Un générateur photovoltaïque connecté au réseau n'a pas besoin de stockage d'énergie et élimine donc le maillon le plus problématique (et le plus cher) d'une installation autonome. C'est en fait le réseau dans son ensemble qui sert de réservoir d'énergie.

Deux compteurs d'énergie sont nécessaires : un compteur comptabilise l'énergie achetée au fournisseur d'énergie et un autre compteur mesure l'énergie renvoyée sur le réseau électrique lorsque la production dépasse la consommation.

Un troisième compteur est ajouté dans le cas où l'énergie produite est injectée en intégralité dans le réseau (compteur de non-consommation).

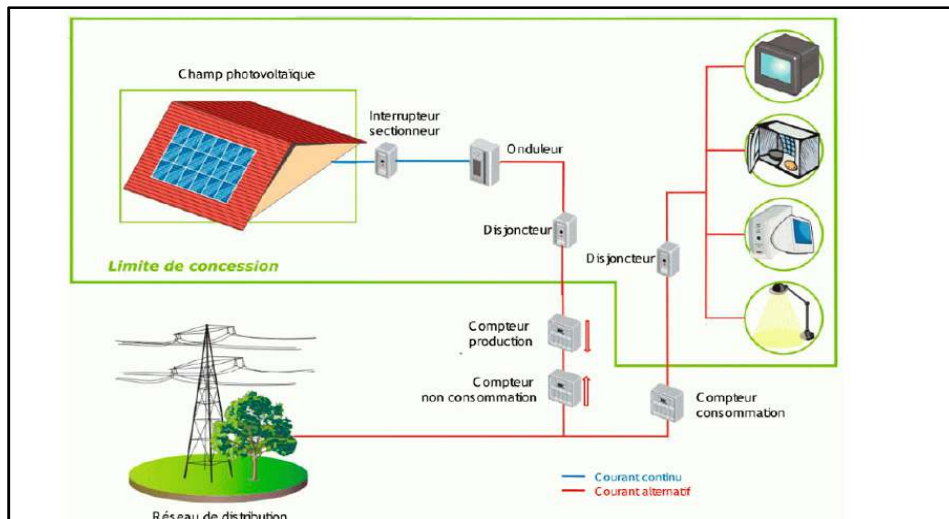


Figure I.9 : Installation ou centrale électrique photovoltaïque raccordée au réseau

I-6-4- Installations ou centrale électriques photovoltaïques hybride :

Il s'agit de systèmes qui regroupent des sources d'énergie de nature différentes tels une installation éolienne, un générateur diesel ou une centrale de cogénération en plus du générateur photovoltaïque. Ce type d'installation est utilisé lorsque le générateur photovoltaïque seul ne couvre pas toute l'énergie requise.

I-7- Avantages et Inconvénients de l'Énergie Photovoltaïque :

Les principaux avantages de l'énergie photovoltaïque sont :

- Sa gratuité.
- Pas de pollution.
- Sa ... fiabilité et la longue vie de l'installation.
- Sa structure fixe.
- Son coût de maintenance bas.
- Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
- L'installation ne produit aucun bruit.

Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque sont :

- Le coût élevé de l'installation.
- Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).
- Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome.
- Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution, la fabrication, l'installation et l'élimination des panneaux ont un impact sur l'environnement.

I-8- Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons vu des notions sur l'énergie solaire et ses caractéristiques ainsi que les différents types de systèmes d'alimentations photovoltaïques existants et enfin les principaux avantages et inconvénients de l'énergie Photovoltaïque.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter la structure d'un générateur photovoltaïque en décrivant les éléments qui le constituent suivis d'une élaboration de quelques modèles d'un panneau solaire.

II-1 Introduction :

Les performances d'un module photovoltaïque sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température du module. Nous avons opté pour le modèle à une diode pour simuler le fonctionnement du module photovoltaïque pour différentes conditions d'irradiation et de température. Le principal intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre à partir des caractéristiques techniques données par le constructeur.

II-2 Historique des cellules solaires :[7]

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis plus de 60 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil. Le photovoltaïque a évolué selon les dates suivantes.

- Le français Alexandre Edmond Becquerel (1820/1891) découvre l'effet photo- électrique. Avec son père Antoine César Becquerel (1788/1878), ils présentent devant l'Académie des Sciences l'effet photoélectrique expérimenté avec des électrodes de platine et de cuivre plongées dans une solution électrolytique acide.
- 1873 : Willoughby Smith (1828/1891), ingénieur électricien anglais, découvre avec son assistant J. May les propriétés photosensibles du sélénium.
- 1875 : Ernst Werner Von Siemens (1816/1892), ingénieur et industriel allemand, expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- 1877 : William Grylls Adams (1836/1915), professeur anglais, met en évidence l'effet photovoltaïque du sélénium.
- 1885 : Ernst Werner Von Siemens précise que la conductivité du sélénium est proportionnelle à la racine carrée de l'intensité de la lumière et imagine les possibilités de captage de l'énergie solaire.
- 1887 : Heinrich Rudolf Hertz (1857/1894), physicien allemand, publie les résultats de ses expériences photoélectriques dans un article intitulé "Sur un effet de la lumière ultraviolette sur les décharges électriques".
- 1902 : Philippe Lenard (1862/1947), physicien allemand, fait une série d'observations sur l'énergie cinétique des électrons et détermine que le seuil de l'effet photoélectrique dépend de la fréquence de la lumière incidente.
- 1905 : Albert Einstein (1879/1955), physicien allemand, publie "Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière". En 1921, il reçoit le prix Nobel de physique pour son apport à la physique théorique et particulièrement son explication de l'effet photoélectrique.
- **1912** : première mise en œuvre d'un capteur cylindro-parabolique inventé par Charles Vernon Boys (1855-1944), un physicien anglais.
- 1916 : Robert Andrews Millikan (1868/1953), physicien américain, confirme expérimentalement les travaux d'Einstein.
- 1939 : Russel Ohl (1898/1987), ingénieur américain, découvre la jonction p-n et ses travaux le conduisent à développer la première cellule solaire en silicium.
- **1949** : Félix Trombe (1906-1985), un chimiste français, développe les systèmes passifs de chauffage solaire et notamment le "mur Trombe". Il participe également au développement des fours solaires successifs du site d'Odeillo.

- 1954 : La première photopile a été développée aux États-Unis par les chercheurs des laboratoires Bell (D.M. Chapin, C.S. Fuller, et G. L. Pearson), qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Leur cellule solaire a un rendement de conversion de 6 %. Cette découverte constitue pour l'industrie spatiale naissante une solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites.
- 1958 : une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- 1959 : lancement de Vanguard I, le premier satellite fonctionnant à l'énergie photovoltaïque.
- 1973 : la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware.
- **Années 80** : les développements sont freinés pour des raisons de rentabilité liées notamment aux technologies trop coûteuses. (en 1983 : la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie).
- **2012** : la puissance photovoltaïque mondiale raccordée aux réseaux dépasse la barre des 100 GW.

II-3 Effet photoélectrique et jonction PN :[8]

L'effet photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique utilisable de type continue. A chaque photon, on associe une énergie $E_{ph} = h\nu$ où ν est la fréquence associée à la longueur d'onde du photon ($\lambda = c / \nu$, avec c la célérité de la lumière dans le vide). Pour passer de l'énergie de photon E_{ph} à la longueur d'onde, on utilise la relation suivante où λ est en μm .

$$E_{ph} = 1.24/\lambda \dots \dots \dots (II-1)$$

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est illuminé avec un rayonnement de longueur d'onde appropriée (l'énergie des photons doit être au moins égale à celle du gap énergétique du matériau), l'énergie des photons absorbés permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur, générant ainsi des paires électron-trou, qui peuvent contribuer au transport du courant (photoconductivité) par le matériau lorsqu'on le polarise.

Si on illumine maintenant une jonction PN, les paires électron-trou qui sont créées dans la zone de charge d'espace de la jonction sont immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région, et entraînées dans les zones neutres de chaque côté de la jonction.

Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de potentiel aux bornes de la jonction (photo tension); s'il est connecté à une charge électrique extérieure, on observe le passage d'un courant alors qu'on n'applique aucune tension au dispositif. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque.[9]

Une cellule solaire Photovoltaïque est une diode électronique PN de grande surface qui, exposée à la lumière (photons), génère une tension électrique (volts).

Dans les conditions d'éclairement constant, la caractéristique est décalée de l'origine vers le bas d'une valeur I_{cc} (courant de court-circuit). Dans la partie où le produit ($I_d.V$) est négatif et si on ferme la diode directement sur une résistance, elle va agir comme un générateur électrique.

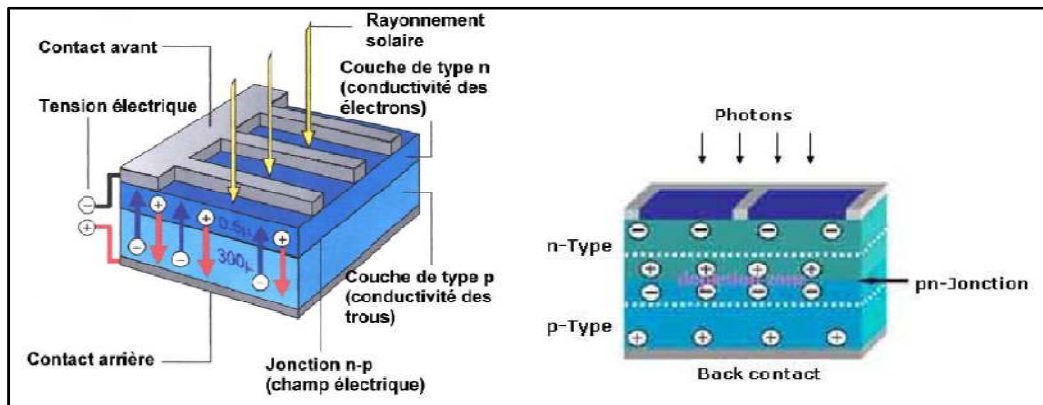


Figure II.1: Jonction P-N dans une cellule photovoltaïque

Les caractéristiques électriques en convention récepteur de la cellule pour différents éclairagements sont données sur la **figure II.2** ci-dessous. [9]

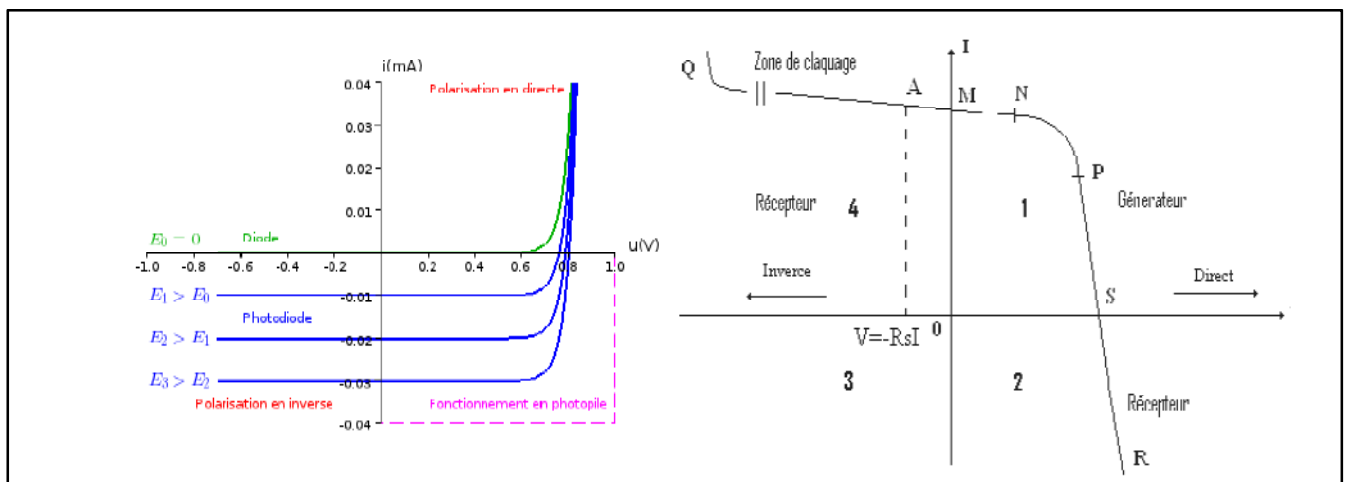


Figure II.2: Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

II-4 Le silicium, propriétés et technologies associées :[10]

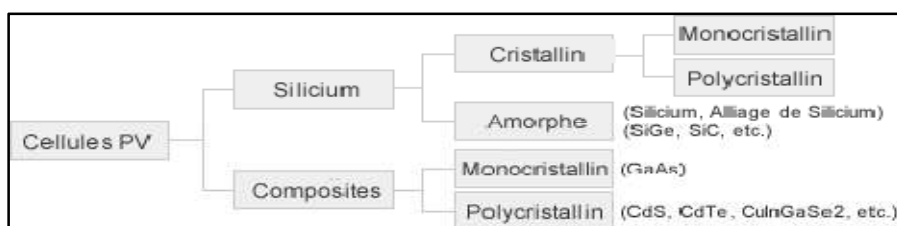


Figure II.3: les différentes technologies d'une cellule photovoltaïque

Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque. Beaucoup sont encore en phase de recherche et développement.

Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont : le silicium mono ou poly-cristallin (plus de 80% de la production mondiale) et le silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou CIS (Cuivre Indium Sélénium).

Plusieurs types de semi-conducteurs sont utilisés dans cette conversion ; on cite le silicium (Si), le germanium (Ge), le sélénium (Se) ou les composés semi-conducteurs tels que l'arséniure de gallium (GaAs), ou le tellure de cadmium (CdTe). Les cellules solaires de type GaAs sont très coûteuses dans leur fabrication, elles sont utilisées uniquement aux applications spatiales.

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques parce qu'il est :

- Le moins coûteux des semi-conducteurs.
- Résistant aux températures assez élevées et très abondant dans la nature (28% de l'écorce terrestre sous forme de composés « silicates, silice », ce qui en fait une source quasi inépuisable).
- Déjà utilisé dans tous les domaines de l'électronique.

Le silicium cristallin (mono ou multi) représente la majorité de la production mondiale d'énergie solaire (respectivement 29 % et 51% de la production mondiale). On distingue les trois catégories principales qui se disputent le marché. Ils ont des caractéristiques, des durées de vie, et des sensibilités différentes.

II-4-1 Les cellules mono-cristallines :[8]

La cellule monocristalline est celle qui s'approche le plus du modèle théorique: cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. Les cellules monocristallines permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de 15 à 22 %.

Ces cellules présentent néanmoins des inconvénients:

- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.
- Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée (jusqu'à 7 ans).

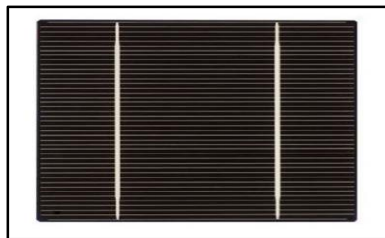


Figure II.4: Cellule mono cristallines

II-4-2 Les cellules poly-cristallines :[8], [10]

Il est constitué de multiples petits cristaux de tailles et de formes variées, juxtaposés dans différentes orientations donnant à la cellule un aspect mosaïque. Le silicium poly-cristallin est la technologie la plus répandue sur le marché mondial vu son bon rendement (environ 15 %) et de sa garantie (jusqu'à 20 ans) pour des coûts de fabrication abordables. Il offre actuellement un bon rapport qualité/prix.

Les cellules poly-cristallines est caractérisées par :

- Cout de production moins élevé.

- Nécessite moins d'énergie.
- Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en laboratoire.

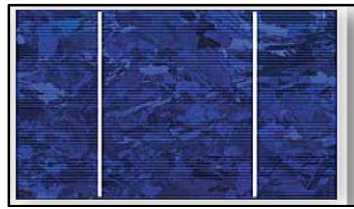


Figure II.5: Cellule poly cristallines

II-4-3 Les cellules amorphes en couche mince : [10]

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi-conduction. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre son rendement de conversion est faible (de 7 à 10 %) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière. La plupart des garanties du produit sont de 10 ans.

Il existe d'autres technologies déjà industrialisées ou en phase de recherche. Le silicium amorphe est accordé à des dispositifs qui consomment peu d'énergie, tels que les montres ou les calculatrices ou à des systèmes connectés au réseau. En revanche, les cellules au silicium cristallin sont utilisées et adaptées à une très large expertise d'applications autonomes, malgré leur coût le plus élevé.



Figure II.6: Panneaux PV avec des cellules amorphes en couche mince

II-4-4 Les autres modules photovoltaïques composites et organiques : [6]

Plusieurs technologies de cellules photovoltaïques autre que la technologie « silicium » existent mais ne sont pas représentatives de la production actuelle mais plutôt du domaine de la recherche. Voici quelques-unes d'entre-elles.

II-4-5 Thin film au silicium amorphe ou CIS (cuivre-indium-sélénium) : [6]

Le **thin film** met en œuvre 1% seulement du silicium utilisé pour la fabrication de modules cristallins équivalents. Les cellules **thin film** sont plutôt utilisées pour des applications "courant faible". Elles sont également souvent utilisées là où un fort échauffement des modules est à prévoir car le rendement ne chute pas avec la température. Cependant, le rendement est de l'ordre de plus de 2 fois inférieur à celui du silicium cristallin et nécessite donc plus de surface pour la même puissance installée. Il y a un risque de toxicité vis-à-vis de l'environnement pour les modules **CIS** qui présentent un meilleur rendement que l'amorphe pur.



Figure II.7: Les cellules photovoltaïques en plastique, composites et organique

II-4-6 Comparatif des différentes technologies:[6]

Matériau	Rendement	Longévité	caractéristiques	Principales utilisations
Silicium mono cristallin	12 à 18% <i>(24,7% en laboratoire)</i>	20 à 30 ans	* Très performant * Stabilité de production d'W * Méthode de production coûteuse et laborieuse.	Aérospatiale, modules pour toits, façades,...
Silicium poly cristallin	11 à 15% <i>(19,8% en laboratoire)</i>	20 à 30 ans	* Adapté à la production à grande échelle. * Stabilité de production d'W. Plus de 50% du marché mondial.	Modules pour toits, façades, générateurs...
Amorphe	5 à 8% <i>(13% en laboratoire)</i>		* Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. * Fonctionnement si faible luminosité. * Fonctionnement par temps couvert. * Fonctionnement si ombrage partiel * La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment
Composite mono cristallin (GaAs)	18 à 20% <i>(27,5% en laboratoire)</i>		* Lourd, fissure facilement	Systèmes de concentrateurs Aérospatiale (satellites)
Composite poly cristallin (CdS, CdTe, CuInGaSe ₂ , etc.)	8% <i>(16% en laboratoire)</i>		Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment

Tableau II.1 Comparatif des différentes technologies

II-5 Caractéristiques électriques d'une cellule solaire :

Les paramètres des cellules photovoltaïques (V_{oc} , I_{sc} , FF , η), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

II-5-1 Courant de court-circuit, I_{cc} :[9]

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$) dans le schéma équivalent. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

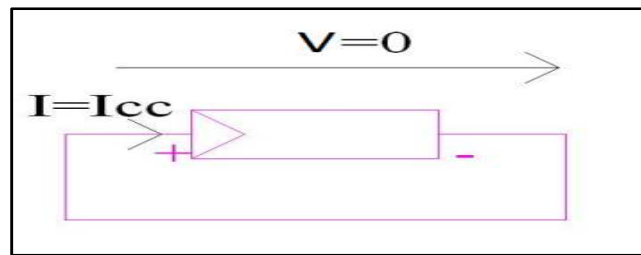


Figure II.8 : cellule PV en court-circuit

II-5-2 Tension à circuit ouvert, V_{oc} : [9]

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

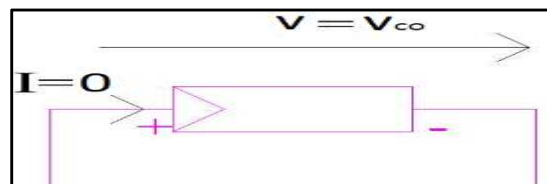


Figure II.9 : cellule PV en circuit ouvert

II-5-3 La caractéristique courant –tension d'une cellule solaire : [11]

La caractérisation $I=f(V)$ d'une cellule solaire représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension à ses bornes depuis le court-circuit jusqu'au circuit ouvert **Figure II.10**.

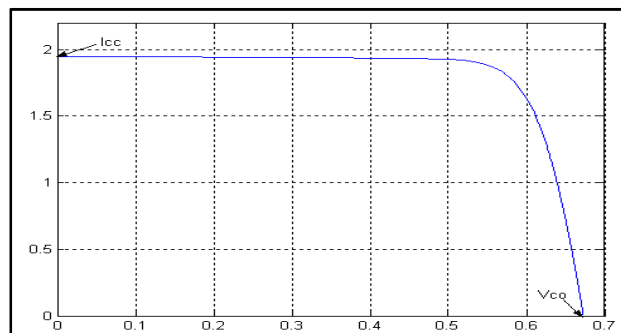


Figure II.10: Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire.

II-5-4 La caractéristique puissance tension d'une cellule solaire : [11]

La caractéristique $P=f(V)$ représente le produit de courant par la tension délivrée par une cellule solaire $P=V.I$.

La courbe de puissance est nulle en court-circuit et en circuit ouvert, elle passe par un maximum (PPM) comme montre la **Figure II.11**.

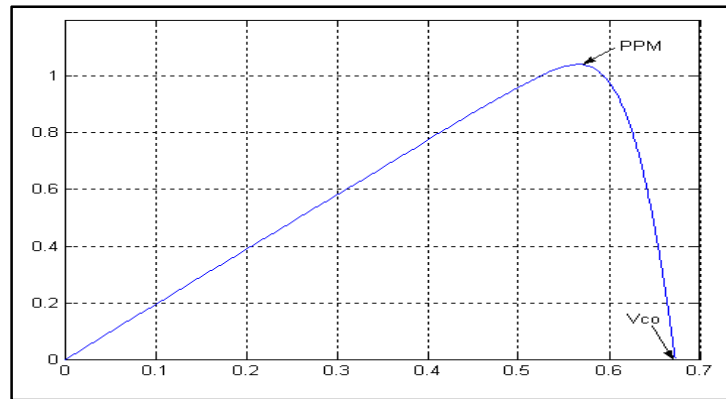


Figure II.11: Caractéristique puissance-tension d'une cellule solaire

II-5-5 Facteur de forme, FF:[11]

On appelle facteur de forme (FF) le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule dans des conditions d'éclairement et de température donnés, et le produit du courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert.

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \dots\dots\dots (II - 2)$$

II-5-6 Le rendement énergétique :[11]

Ce rendement est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule solaire et la puissance lumineuse qu'elle reçoit.

$$\eta(\%) = \frac{V_m \cdot I_m}{E \cdot S} \dots\dots\dots (II - 3)$$

Où : S : Surface totale de la cellule solaire (m²)

V_m : Tension optimale correspondant à la puissance maximale (V).

I_m : courant optimale correspondant à la puissance maximale (A).

E : puissance lumineuse ou éclairement (W/m²).

II-6 Modèles mathématiques d'une cellule solaire:[8]

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

Dans cette partie, nous présenterons quelques modèles de la cellule solaire :

II-6-1 Modèle idéal:[11]

Une cellule solaire idéale peut être représentée par une source de courant montée en parallèle avec une diode.

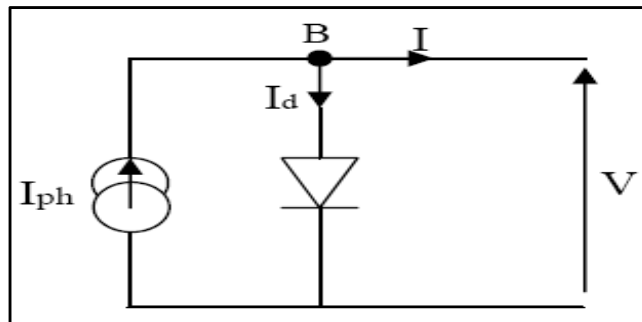


Figure II.12: Schéma de circuit équivalent idéal d’une cellule solaire

II-6-1-A Présentation du modèle mathématique:[26]

L’équation caractéristique d’une cellule idéale en utilisant la loi de kirchoff en nœud B est :

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{q \cdot v}{n \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right] \dots\dots\dots(\text{II-4})$$

$$I_{ph} = [I_{cco} + K_i(T - T_r)] \frac{E}{E_0} \dots\dots\dots(\text{II-5})$$

$$I_{sat} = I_{cc} \left(\frac{T}{T_r}\right)^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{nK} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right) \dots\dots\dots(\text{II-6})$$

$$I_{cc} = \frac{I_{cco}}{\exp\left(\frac{q \cdot V_{co}}{n \cdot K \cdot T_r}\right) - 1} \dots\dots\dots(\text{II-7})$$

Où :

n : le facteur d’idéalité de la diode, dans le cas idéal n=1

I, V : Courant et tension fournis par la cellule.

I_{ph} : Photo courant ou courant généré par un éclairement (A).

I_d : Courant de la diode (A).

I_{sat} : Courant de saturation de la diode (A).

T : Température de la jonction (en Kelvin).

E : Eclairement (W/m²).

E₀ : Eclairement standard (E₀=1000W/m²).

E_g : Energie de gap de semi-conducteur (eV).

K : constante de Boltzmann (K=1,38.10⁻²³ JK⁻¹).

I_{cco} : courant de saturation inverse dans les conditions standard

I_{cc} : courant de saturation inverse

q : Charge de l’électron (q=1,6.10⁻¹⁹ C).

K_i :Le coefficient de température de court-circuit (K_i=17 * 10⁻⁴)

Mais en réalité il y a des pertes au niveau de la cellule donc on ajoute au schéma de la cellule idéale deux résistances pour modéliser les pertes internes :

II-6-2 Modèle réelle :[11]

Les performances d'une cellule solaire sont limitées par l'influence de quelques facteurs physiques liés à sa fabrication :

II-6-2-A Modèle à une diode:[11]

C'est le modèle le plus cité dans la littérature, la cellule PV est caractérisée par son schéma électrique équivalent **Figure II.13** qui se compose de :

- Source de courant : Modélise la conversion de flux lumineux en courant électrique.
- Une diode : Modélise la jonction PN.
- Une résistance série (R_s) : Modélise les diverses résistances des différentes couches de la cellule.
- Une résistance parallèle (R_p) : Caractérise le courant de fuite dans la diode et effets de bords de la jonction.

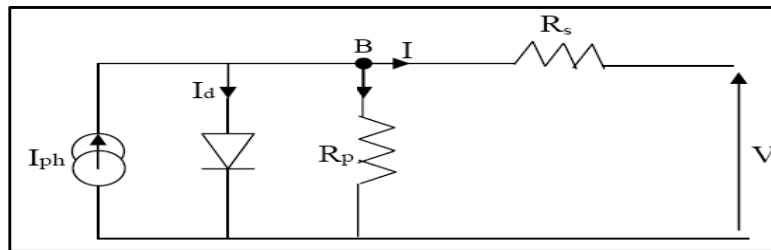


Figure II.13: Schéma du modèle équivalent à une diode

II-6-2-A-1 Présentation du modèle mathématique

Le courant généré par la cellule solaire est donné par l'application de la loi de Kirchhoff en nœud **B** :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \dots \dots \dots (II-8)$$

$$I = I_{ph} - I_{sat} \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot (V + R_s \cdot I)}{n \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \dots \dots \dots (II-9)$$

Où :

R_s : Résistance série (Ω)

R_p : Résistance parallèle (Ω).

II-6-2-B Modèle à quatre paramètres (modèle simplifié) :[12]

Le modèle à quatre paramètres est un modèle largement utilisé; il a été étudié par Townsend et Beckmann. Ce modèle traite la cellule photovoltaïque comme une source de courant, dépendante de l'éclairement, connectée en parallèle avec une diode et une résistance parallèle (R_p) est très grande et en série avec une résistance série R_s . Les quatre paramètres apparaissant dans l'équation de la caractéristique $I(V)$ sont : le courant photonique I_{ph} , la résistance série R_s , et deux caractéristiques de la diode I_{sat} et n . Ces paramètres ne sont pas des quantités mesurables et ne sont pas généralement inclus dans les données des fabricants. Par

conséquent, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations I(V) pour différents points de fonctionnement (donnés par les fabricants).

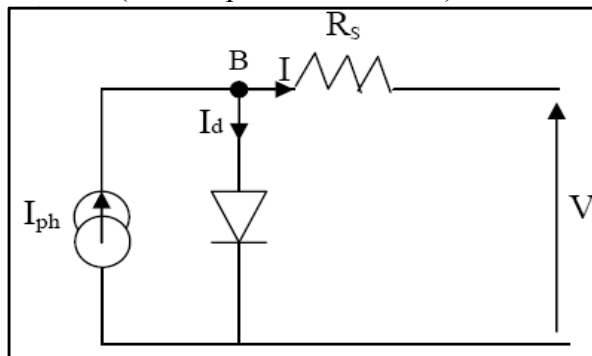


Figure II.14: Schéma du modèle équivalent à quatre paramètres

II-6-2-B-1 Présentation du modèle mathématique :

Le courant généré par la cellule solaire est donné par l’application de la loi de Kirchoff en nœud B :

$$I = I_{ph} - I_d \dots\dots\dots(II-10)$$

$$I = I_{ph} - I_{sat} \cdot [\exp(\frac{q(V + R_s \cdot I)}{n \cdot K \cdot T}) - 1] \dots\dots\dots(II-11)$$

II-6-2-C Modèle à deux exponentielles:[11]

La Figure II.15 propose un modèle de la cellule photovoltaïque prenant en compte les différents facteurs physiques, qui se compose d’une source de courant modélisant l’éclairement solaire, les pertes modélisées par les résistances Rp et Rs et deux diodes, l’une caractérise la jonction PN et l’autre modélise le phénomène de recombinaison des porteurs minoritaire.

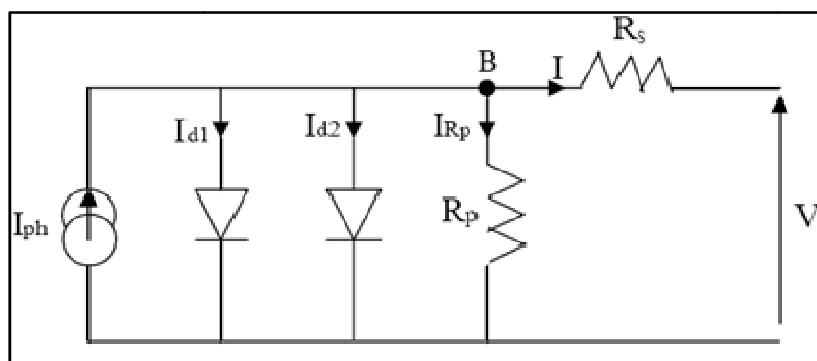


Figure II.15: Schéma du modèle équivalent à deux exponentielles

II-6-2-C-1 Présentation du modèle mathématique :

Le courant généré par la cellule solaire est donné par l’application de la loi de Kirchoff en nœud B :

$$I = I_{ph} - I_{sat1} \cdot \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s \cdot I)}{n_1 \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right] - I_{sat2} \cdot \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s \cdot I)}{n_2 \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \dots\dots\dots (II-12)$$

$$I_{sat1} = K_{i1} \cdot T^3 \cdot \exp\left(\frac{-Eg}{K \cdot T}\right) \dots\dots\dots (II-13)$$

$$I_{sat2} = K_{i2} \cdot T^{5/2} \cdot \exp\left(\frac{-Eg}{K \cdot T}\right) \dots\dots\dots (II-14)$$

Avec:

K_{i1} : Le coefficient de température de court-circuit $K_{i1} = 1.2 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{K}^3$

K_{i2} : Le coefficient de température de court-circuit $K_{i2} = 2.9 \cdot 10^5 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{K}^{5/2}$

II-7 Panneau solaire :[11]

Le panneau solaire est un ensemble de cellules solaires connectées en série ou en parallèle afin d’obtenir une tension ou un courant exploitable. Un panneau contient généralement de 36 à 96 cellules en série.

II-7-1 Association de cellules solaires :[11]

L’association des cellules solaire est analogue à l’association de générateurs de courant.

II-7-2 Association en série des cellules solaires :[11]

Le groupement en série des cellules solaires, nous permet d’augmenter la tension fournie à la charge, en gardant le courant constant.

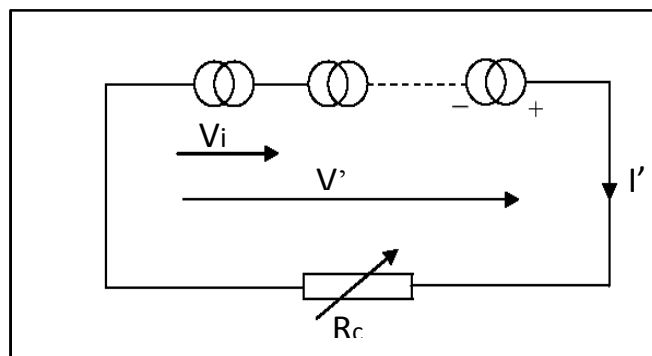


Figure II.16:Branchement en série des cellules solaires

Pour N_s cellules en série, la tension V' et le courant I' fournie à la charge tel que :

$$I' = I \qquad V' = N_s \cdot V_i \dots\dots\dots (II-15)$$

D’où la puissance sera :

$$P' = N_s \cdot V_i \cdot I_i = N_s \cdot P \dots\dots\dots (II-16)$$

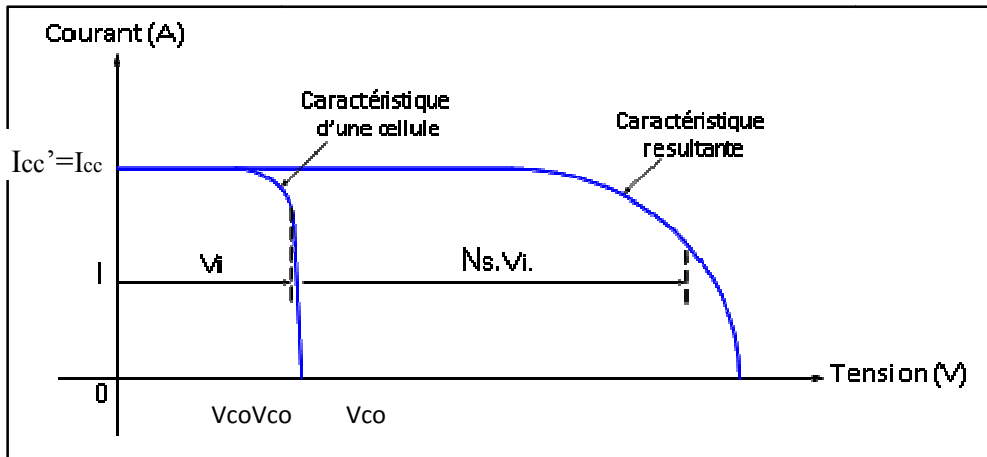


Figure II.17: Caractéristique résultante d'un branchement en série de cellules solaires

II-7-3 Association parallèle des cellules solaires :[11]

Le groupement en parallèle de cellules solaires, nous permet d'augmenter le courant dans la charge toute en gardant la tension à ses bornes constante.

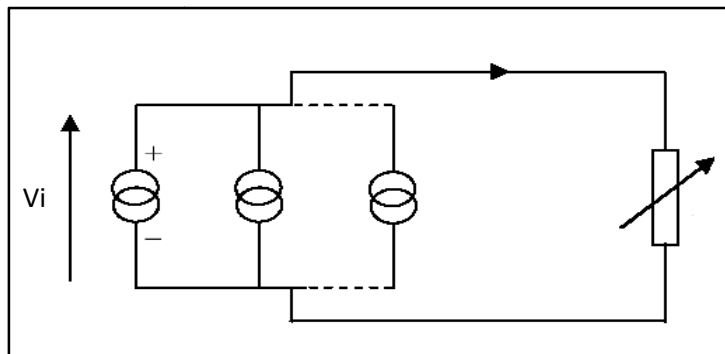


Figure II.18:Branchement en parallèle des cellules solaires

Pour N_p cellules en parallèle, la tension V' et le courant I' fournis à la charge tel que :

$$V' = V_i \quad I' = N_p \cdot I_i \dots \dots \dots (II-17)$$

D'où la puissance sera :

$$P' = N_p \cdot I_i \cdot V_i = N_p \cdot P \dots \dots \dots (II-18)$$

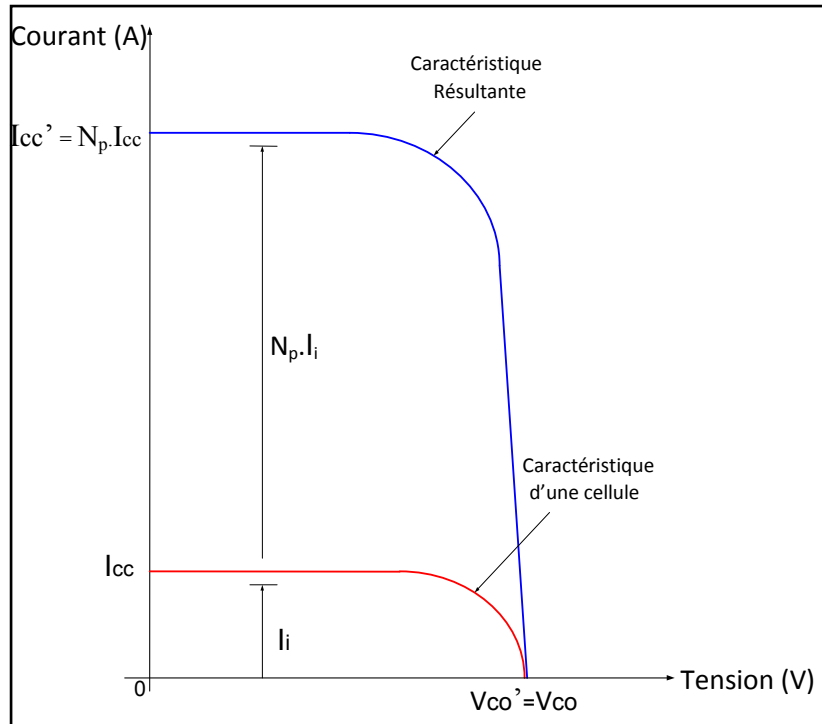


Figure II.19: Caractéristique résultante d'un branchement en parallèle des cellules solaires

II-8 Les générateurs PV :[13]

Les modules *PV* sont les éléments de base de tout système photovoltaïque. Ils peuvent être branchés en série pour augmenter leur tension d'utilisation et en parallèle pour augmenter leur courant. Cet ensemble est appelé le champ de modules *PV*. L'énergie fournie par le champ peut être utilisée pour charger des batteries qui fourniront l'électricité au moment voulu.

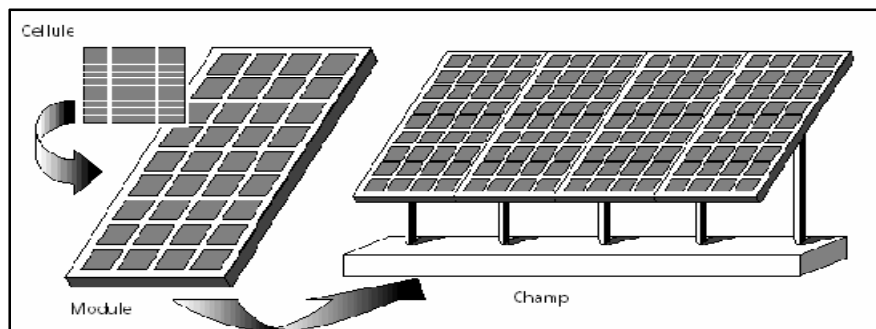


Figure II.20: Présentation d'une cellule, d'un panneau et d'un champ photovoltaïque.

Pour le générateur, la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ est obtenue par :

$$I_{pv} = N_p \cdot I \dots \dots \dots (II-19)$$

$$V_{pv} = N_s \cdot V \dots \dots \dots (II-20)$$

II-7-1 Protection d'un générateur photovoltaïque:[11]

Le raccordement électrique des panneaux entre eux et à la batterie nécessite une protection contre certaines détériorations, elle se fait en général par l'adjonction des diodes :

- **Diode anti-retour** : Elle protège le générateur photovoltaïque contre la décharge de la batterie à travers les panneaux solaires en période de non ensoleillement.
- **Diode by-pass** : Elle protège les panneaux solaires contre les phénomènes d'échauffement destructif d'un masquage accidentel d'une partie de module (ombre, salissure,...).

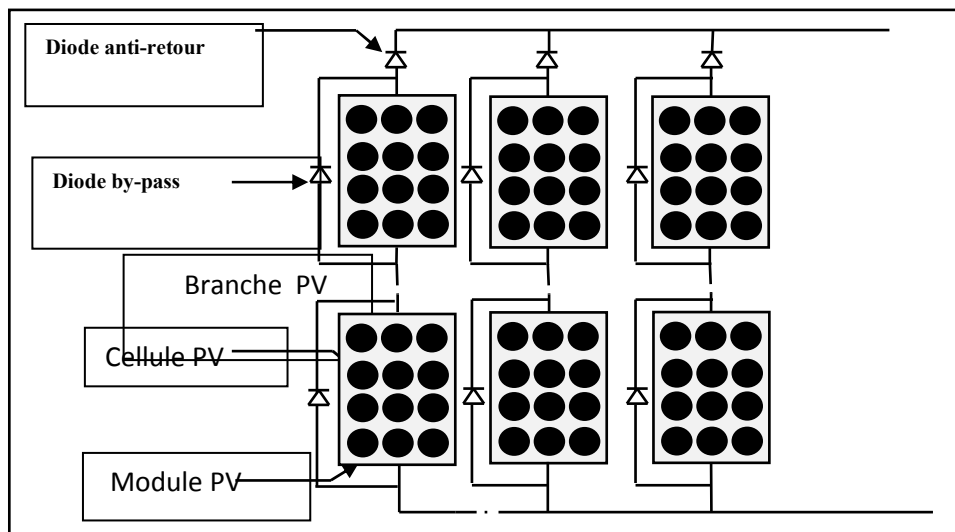


Figure II.21: Exemple de protection d'un générateur photovoltaïque

II-8 Contraintes de fabrication et d'exploitation d'un module photovoltaïque :[10]

La maîtrise de l'énergie photovoltaïque n'est pas aussi simple qu'elle le paraît. La production de courant dans un module photovoltaïque est donc limitée par la cellule la plus faible de l'ensemble. Généralement, lors de l'assemblage des cellules, il est nécessaire de les trier en fonction de leurs caractéristiques électriques afin d'obtenir une association homogène et ainsi éviter de limiter la puissance fournie par un panneau à cause d'une dispersion des cellules.

De plus, le vieillissement des cellules peut produire une dispersion des caractéristiques. Les conditions météorologiques auxquelles les modules sont soumis (ensoleillement inhomogène, température, salissures, neige, pluie, dépôt de feuilles mortes, poussière ...) font de l'énergie photovoltaïque une ressource difficilement maîtrisable.

II-8-1 Influence de la température et de l'ensoleillement sur les courbes I(V) et P(V):[11]

L'ensoleillement et la température ont un impact direct et non négligeable sur les courbes I(V) et P(V) d'un panneau solaire photovoltaïque. Au fait une petite partie de l'ensoleillement qui atteint le module est convertie en électricité, le reste de l'énergie incidente se convertit en chaleur.

II-8-1-A Influence de l'Éclairement : [1],[9],[10]

En faisant varier l'éclairement entre 200 w/m^2 et 1000 w/m^2 avec un pas de 200 w/m^2 , Les courbes $I(V)$, $P(V)$ sont illustrées dans les **Figure II.22** et **Figure II.23** et tracées pour une température $T=25^\circ\text{C}$. On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement les courbes sont traduites vers le haut et vers la droite. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

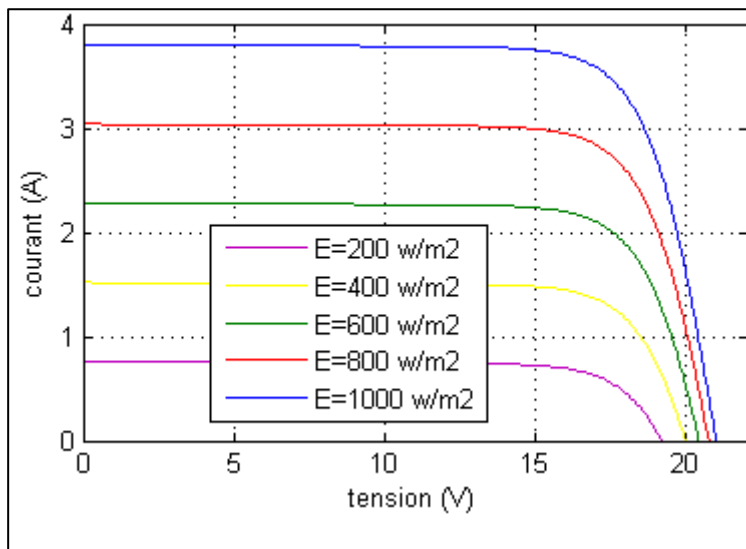


Figure II.22 : Influence de l'enseillement sur la caractéristique $I(V)$

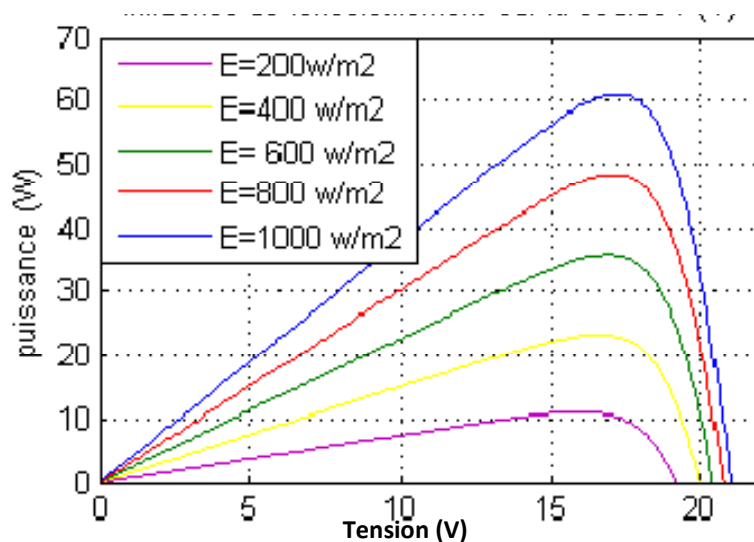


Figure II.23 : Influence de de l'enseillement sur la caractéristique $P(V)$

II-8-1-B Influence de la Température : [1],[9],[10]

En faisant varier la température de 25°C jusqu'à 75°C , les courbes $I(V)$, $P(V)$ sont illustrées dans les **Figure II.24** et **Figure II.25** pour un ensoleillement constant $E=1000 \text{ W/m}^2$. On remarque que la température à une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température

augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte.

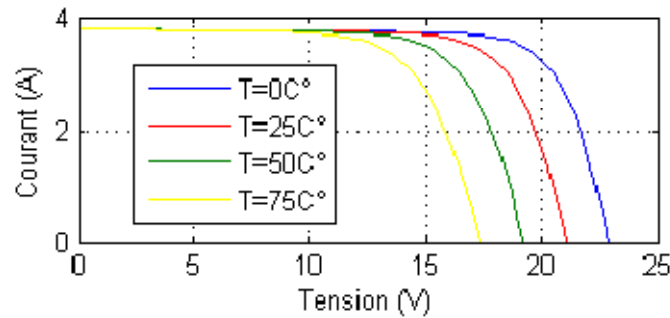


Figure II.24:Influence de la température sur la caractéristique I(V)

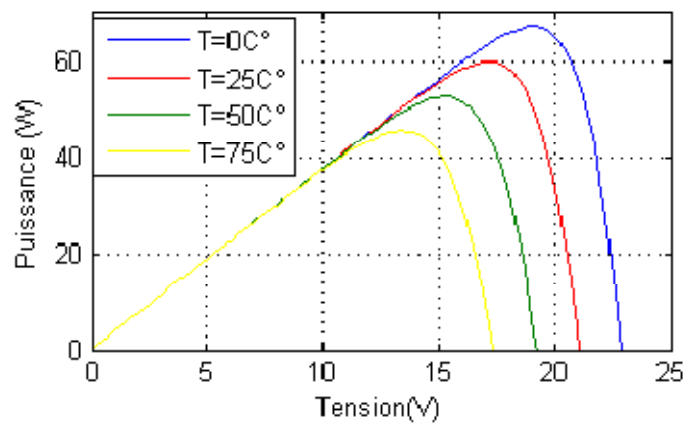


Figure II.25 :Influence de la température sur la caractéristique P(V)

II-8-2 Influence de la résistance série :[1],[9],[14]

Les Figure II.26 et Figure II.27 montre l'influence de la résistance série sur les courbes I(V) et P(V) Même si sa valeur est très petite, la résistance série agit sur la pente de la courbe I(V), et incline vers la gauche les caractéristiques I(V) et P(V) selon la relation :

$$\Delta V = I * R_s \dots \dots \dots (II-21)$$

Ce qui implique une perte de puissance donc une perte de rendement.

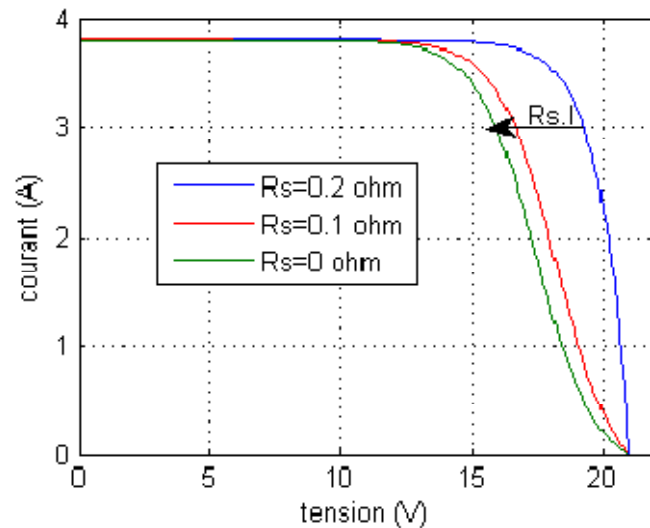


Figure II.26 : Influence de la résistance série sur la caractéristique I(V)

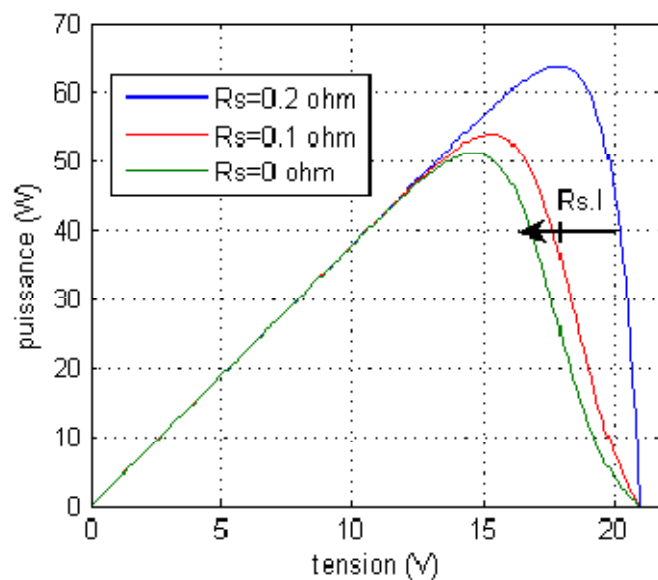


Figure II.27 : Influence de la résistance série sur la caractéristique P(V)

II-8-3 Influence de la résistance parallèle sur les courbes I(V) et P(V) :[9], [14]

La résistance shunt est en général très élevée. Dans cette étude la valeur utilisée (304.83 Ω) est optimisée par les techniques de l’intelligence artificielle, voir (article). Les **Figure II.28** et **Figure II.29** montrent que le courant chute avec la diminution de la selon la relation suivante :

$$\Delta I = \frac{V}{Rsh} \dots \dots \dots (II-22)$$

Ce qui implique une perte de puissance donc une perte de rendement.

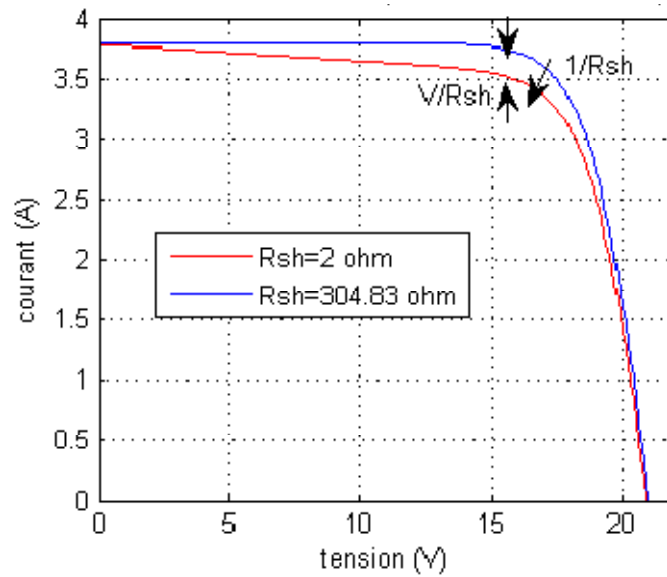


Figure II.28 : Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique I(V)

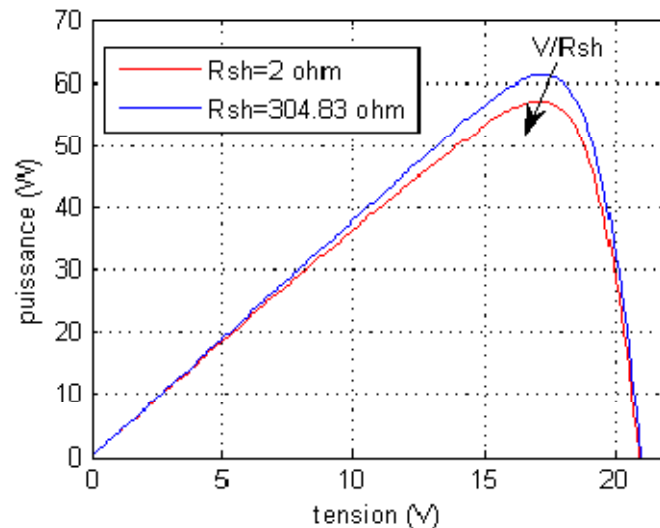


Figure II.29 : Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique P(V)

II-8-4 Influence du facteur de qualité :

L'augmentation du facteur de qualité de la diode influe inversement sur le point de puissance maximale et cela se traduit par une baisse de puissance au niveau de la zone de fonctionnement voir **Figure II.30** et **Figure II.31**.

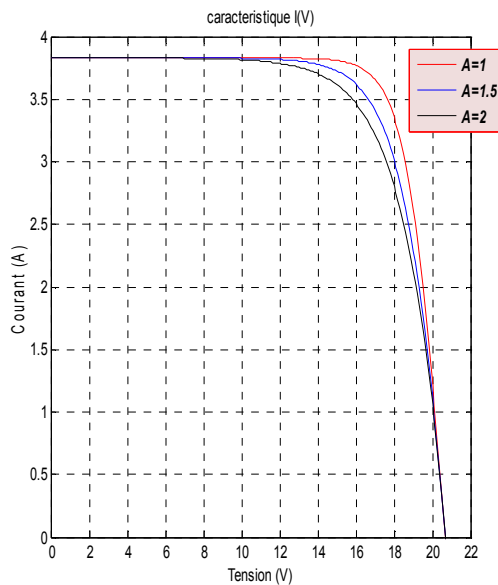


Figure II.30 : Influence du facteur de qualité sur I(V)

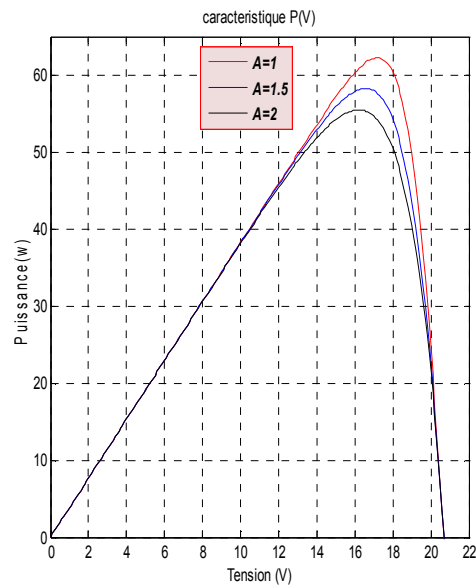


Figure II.31 : Influence du facteur de qualité sur P(V)

II-9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons décrit le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque au silicium. Ensuite, nous avons présentés les différentes simulations sur les caractéristiques électriques du modèle électrique équivalent de la cellule photovoltaïque, ainsi que l'influence de la température et de l'éclairement sur ces caractéristiques.

Nous avons simulé sous matlabtouts les **figures II de (22 à 31)**déjà élaborés par plusieurs travaux[1],[9],[10],[11],[14]cela a permis la validation de notre modelé. Ce dernier sera utilisé dans le chapitre quatre pour étudier les variations brusques.

Notre étude ensuite se résume en une estimation mathématique sur la fonction de changement du point de puissance maximal en fonction de l'influence de la température et de l'éclairement sur les caractéristiques électriques. Les résultats obtenus par simulation du modèle sont satisfaisantes, car les courbes obtenus décrits bien les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque type **MSX50**. Afin d'exploiter au maximum l'énergie électrique issue par le générateur photovoltaïque à chaque instant il est nécessaire d'introduire un système électronique pour le faire fonctionner quel que soit les facteurs, c'est l'objectif du chapitre suivant.

III-1 Introduction : [10],[11]

Du chapitre précédent, il en ressort que le panneau solaire fonctionne dans une large plage de tension et de courant, mais ne peut générer une puissance maximale que pour un seul point de fonctionnement situé sur la caractéristique courant-tension. Ce point est appelé point de puissance maximale (PPM).

Dans ce chapitre, nous le débiterons par un rappel de la problématique de la recherche du PPM (point de puissance maximale). Nous donnerons ensuite une classification des commandes MPPT présentes dans la littérature que l'on peut classifier en deux catégories : les méthodes (**offlines**) et les méthodes (**en lignes**). Les méthodes MPPT les plus utilisées seront détaillées. L'approche de poursuite de la commande Perturber et Observer (P&O) qui représente la base des MPPT sera elle aussi étudiée dans différentes conditions d'ensoleillement et de température.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous définissons et mettons en évidence la nécessité d'un étage d'adaptation (convertisseur DC/DC) pour le générateur photovoltaïque. Trois types de convertisseurs seront abordés, le convertisseur Buck et le convertisseur Boost. et le convertisseur buck-Boost. On détaillera le principe de fonctionnement et le dimensionnement des différents éléments qui le composent, ainsi que les modèles mathématiques simplifiés, et on a finir par les type de charge quelle que soit résistive ou batterie on détaillera le modèles mathématique de ce dernier.

III-2-Description d'un système de poursuite de point de puissance maximale(MPPT) : [10]

Le système de poursuite de point de puissance maximale comme le montre la **Figure III.1** est composée de deux parties :

- Partie commande.
- Partie d'électronique de puissance comprenant un convertisseur DC-DC.

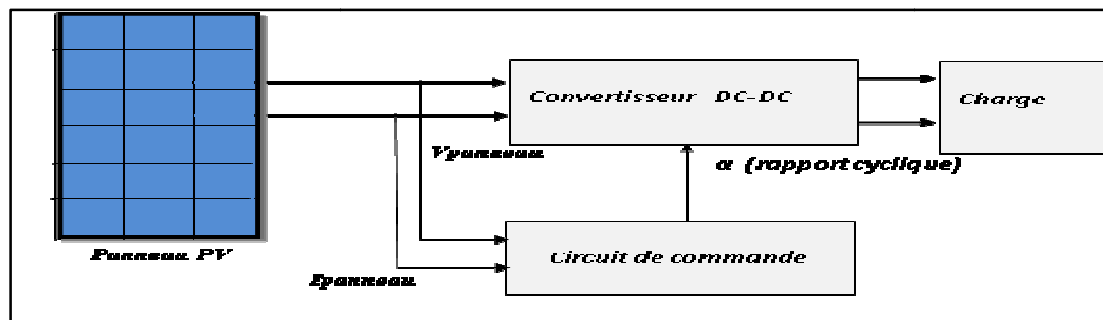


Figure III.1: Schéma synoptique d'un système de poursuite du point de puissance maximale

III-2-1 Méthode de poursuite de puissance maximale : [11],[15]

Un panneau photovoltaïque a des caractéristiques courant-tension (IV) non linéaires. Sa puissance de sortie change avec les conditions atmosphériques. Il existe seulement un point (PPM) où la puissance est maximale.

L'efficacité d'un système photovoltaïque n'est améliorée si seulement si le panneau est actionné intentionnellement au PPM indépendamment des variations des conditions atmosphériques. Ceci peut être fait en accordant correctement le panneau avec la charge à l'aide des techniques qui détectent et localisent électriquement les PPM sans qu'à priori ces

points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont été modifiés ni quelles étaient les raisons de ce changement.

Ces techniques sont appelées MPPT « maximum power tracking » en anglais ou souvent nommées « recherche de point de puissance maximale ». Elles sont utilisées pour extraire le maximum de puissance disponible à l'aide d'un algorithme implanté dans un microcontrôleur et un étage d'adaptation à savoir un hacheur ou un onduleur selon l'exigence du système.

La littérature rapporte un grand nombre de techniques MPPT, le choix d'une d'entre elles reste éprouvant puisque chacune a ses avantages et ses inconvénients.

Pour cela on présente dans ce chapitre quelques techniques de poursuite du point de puissance maximale en détaillant les plus simples à savoir :

- Conductance incrémentale.
- Perturbation & observation (P&O).

III-2-2 Classification des méthodes de poursuite du point de puissance maximale:[11],[15]

La poursuite du point de puissance maximale est un sujet de recherche qui demeure toujours d'actualité. De nombreuses publications voient le jour chaque année présentant de nouvelles idées d'algorithmes ou de nouvelles versions d'anciens algorithmes, dans le seul but d'affiner les rendements. Les algorithmes MPPT peuvent être classés de différentes manières. Dans ce travail, nous présentons une classification basée sur le principe de fonctionnement de l'algorithme utilisé. Ainsi, nous distinguons quatre grandes familles d'algorithmes MPPT comme illustré par la **Figure III.2**.

- Les algorithmes exploitant les propriétés des caractéristiques électriques du générateur PV. Ces algorithmes, comme est le cas pour l'algorithme à tension constante, l'algorithme de la tension à circuit ouvert ou encore celui du courant de court-circuit, exploitent des relations existant entre les références du point de puissance maximale (courant et tension) et les caractéristiques du générateur photovoltaïque comme le courant de court-circuit I_{cc} ou la tension de circuit ouvert (V_{co}).
- Les algorithmes exploitant les modèles mathématiques des générateurs PV.
- Les algorithmes se basant sur la forme de la caractéristique de puissance du générateur PV comme l'algorithme perturbation et observation et l'algorithme à conductance incrémentielle.
- Et enfin, dans la dernière famille, nous classons tous les autres algorithmes y compris ceux exploitant les nouveaux concepts tels que ceux de l'intelligence artificielle

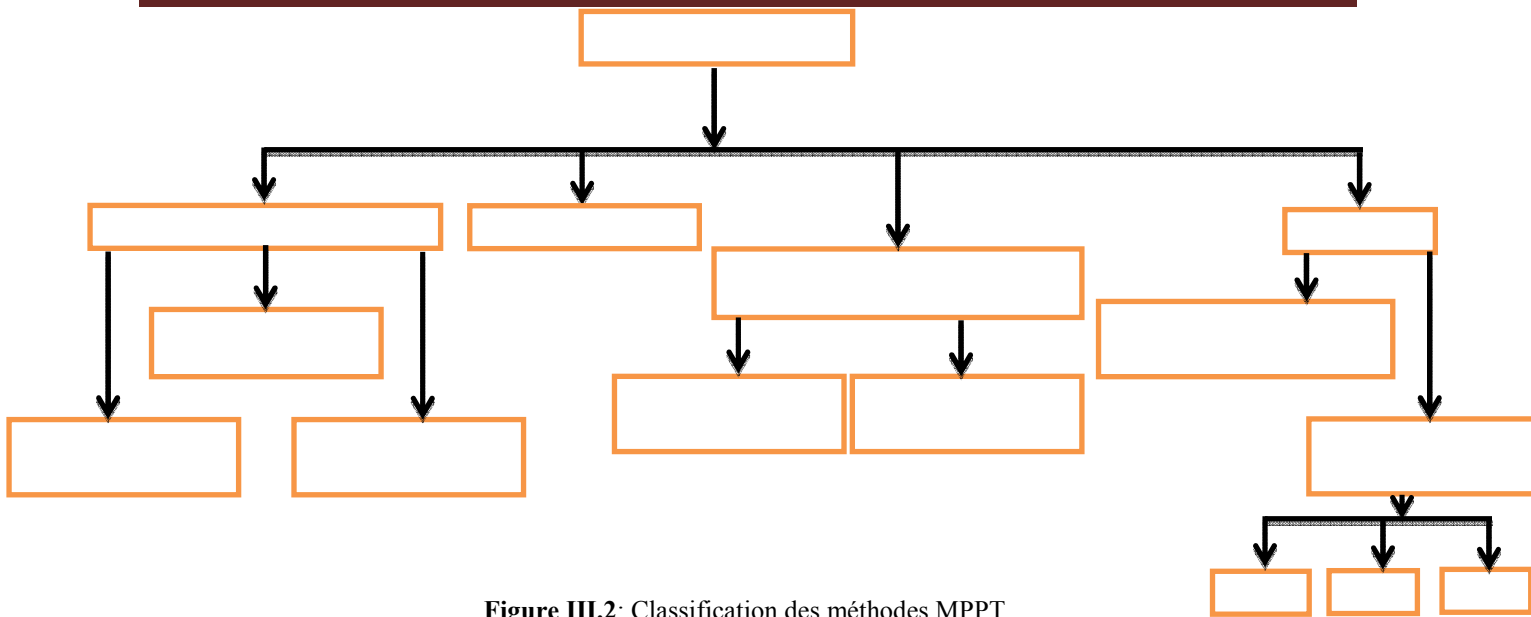


Figure III.2: Classification des méthodes MPPT.

Alors la partie commande est caractérisée par : La méthode à utiliser afin d’effectuer une opération de poursuite de point de puissance maximale.

Différents méthodes de recherche du point de puissance maximale peuvent être utilisées, on peut citer à titre d’exemple :

- Méthodes à contre réaction de tension.
- Méthodes à contre réaction de courant.
- Méthodes à contre réaction de puissance.

III-2-2-A Méthodes à contre réaction de tension :[1],[11],[15],[16],[17],[18]

Les méthodes à contres réaction de tension se basent sur la différence entre une tension référentielle (fixe ou variable) et la tension délivrée par le panneau solaire, cela génère une tension d’erreur (e) qui fait varier le rapport cyclique.

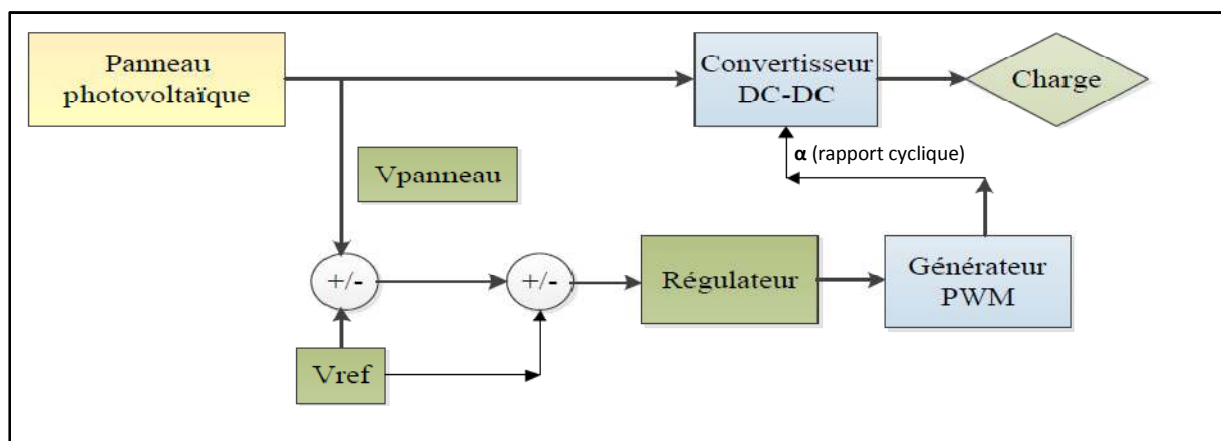


Figure III.3: Méthodes à contre réaction de tension

III-2-2-A-1 Méthode à contre réaction de tension de référence fixe :

La tension de référence est égale à la moyenne des tensions optimales de l'intervalle des points des puissances maximale pour différentes valeurs de températures et éclairagements, comme l'indique la Figure III.4.

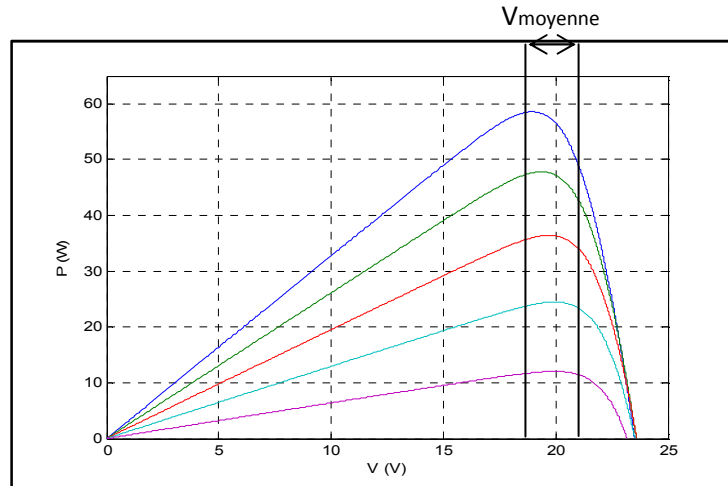


Figure III.4: Intervalle de variation de la tension optimale

III-2-2-A-2 Méthode à contre réaction de tension de référence en fonction de V_{co} :

La tension de référence est égale à la tension optimale (la tension correspondante au point de puissance maximale) qui peut être exprimée comme une fonction linéaire de la tension en circuit ouvert, $V_{opt} = \beta.V_{co}$ ou β est une constante généralement comprise entre 0.7 et 0.85 selon la température et le type de panneau solaire. La tension V_{co} du circuit ouvert du panneau solaire est mesurée par l'interruption de fonctionnement normal du système.

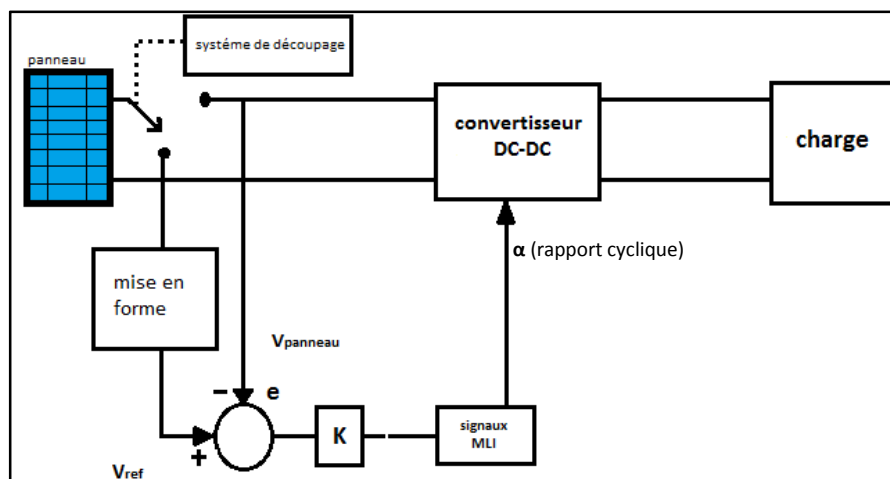


Figure III.5: Principe de la méthode à contre réaction de tension de référence en fonction de V_{co}

Cette méthode présente des inconvénients :

- L'interruption du système à chaque fois pour les besoins de mesure de V_{co} occasionne des pertes et une augmentation des bruits.

- Le fait d'introduire une valeur fixe de β cause l'inexactitude de cette méthode.

III-2-2-B Méthodes à contre réaction de courant: [1],[11],[15],[16],[17],[18]

Par analogie avec la méthode à contre réaction de tension de référence en fonction de V_{co} , le courant de court-circuit I_{cc} du panneau solaire permet de savoir la valeur du courant optimal dans lequel doit fonctionner le panneau pour extraire le maximum de puissance. Le courant optimal est proportionnel au courant de court-circuit, cette proportionnalité est presque constante en fonction des conditions d'ensoleillement et de température ($I_{opt} = k' I_{CC}$).

III-2-2-C Méthodes à contre réaction de puissance : [1],[11],[15],[16],[17],[18]

Les méthodes à contre réaction de puissance se basent sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du panneau afin que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système.

La puissance extraite du panneau solaire est calculée à partir des mesures de courant I et de tension V puis la multiplication de ces deux grandeurs.

La caractéristique $P=f(V)$ peut être assimilée à une parabole, qui possède un seul point maximum correspond à la puissance maximale. Pour trouver le point de puissance maximale (PPM) on se base sur l'étude de signe de gradient $\frac{dP}{dV}$, ce dernier donne une information sur la position de fonctionnement par rapport au point maximum.

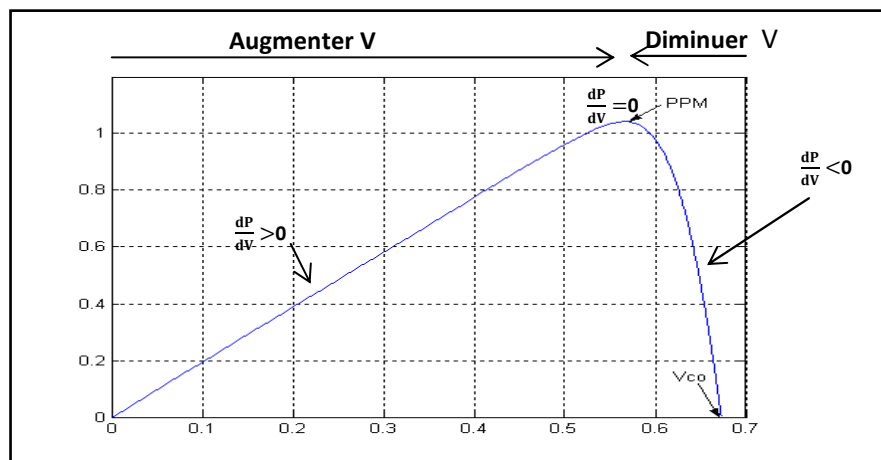


Figure III.6: Caractéristique $P=f(V)$ d'un panneau solaire

- Si $\frac{dP}{dV}$ est positive, le point de fonctionnement se trouve à gauche de PPM, la tension doit être augmentée pour s'approcher du PPM en agissant sur le rapport cyclique.
- Si $\frac{dP}{dV}$ est négative, le point de fonctionnement se trouve à droite du PPM, la tension doit être diminuée pour s'approcher du PPM.
- Si $\frac{dP}{dV} = 0$, le point de fonctionnement se trouve sur le PPM.

III-2-2-C-1 Algorithme incrémentale de la conductance (INC) :

La méthode à conductance Incrémentielle (INC) présente un bon comportement en termes de poursuite du point de puissance maximale . Son concept de base repose sur la dérivée de la conductance du GPV ($dC = dI/dV$) pour connaître la position relative du PPM sur la courbe PV afin d’appliquer une action de contrôle adéquate au suivi de ce PPM. En effet, la puissance fournie par le générateur PV est exprimée comme suit :

$$P = V * I.....(III-1)$$

La dérivée par rapport à la tension peut être formulée par l’expression suivante :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V*I)}{dV}.....(III-2)$$

Ce qui donne :

$$\frac{dP}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{dI}{dV}.....(III-3)$$

Qui est équivalent à :

$$\frac{1}{V} \frac{dP}{dV} = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} (III - 4)$$

En définissant la conductance et la conductance incrémentielle comme suit :

$$C = \frac{I}{V} \quad \text{et} \quad \Delta C = \frac{dI}{dV}$$

L’équation (III-4) peut être mise sous la forme :

$$\frac{1}{V} \frac{dP}{dV} = C + \Delta C (III - 5)$$

La tension étant toujours de valeur positive, et comme au point de puissance maximale, la dérivée de la puissance par rapport à la tension est nulle, l’idée de base de cet algorithme est de rechercher le point de fonctionnement qui satisfait cette condition comme illustré par la **figure III.6** et exprimé selon les expressions mathématiques (III-6). En d’autres termes, au point de puissance maximale, la conductance et son incrément sont de valeurs absolues égales mais avec des signes opposés.

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} > 0 \Leftrightarrow C > -\Delta C & (a) \\ \frac{dP}{dV} = 0 \Leftrightarrow C = -\Delta C & (b).....(III-6) \\ \frac{dP}{dV} < 0 \Leftrightarrow C < -\Delta C & (c) \end{cases}$$

L’équation (III-6-b) indique que le point de fonctionnement (PF) est positionné au point de puissance maximale (PPM), tandis que les inéquations (III-6-a) et (III-6-c) déterminent la direction de la perturbation à appliquer pour faire coïncider le PF et le PPM. Cette perturbation est maintenu jusqu’à satisfaction de l’équation (III-6-b). Un autre cycle de

cause des imprécisions de la mesure, la condition $\frac{dP}{dV}=0$ est rarement détectée ce qui engendre quand même des oscillations, d'où l'apparition de plusieurs versions améliorées et modifiée pour la méthode (IC) suggérant dans la plus part du temps l'utilisation d'un pas variable. Toujours en comparaison avec l'algorithme (P&O), conclu que l'algorithme (IC) est plus rapide et qu'il présente un comportement plus stable une fois le MPP atteint, mais que l'avantage du (P&O) réside dans la simplicité de son implémentation.

III-2-2-C-2 Algorithme perturbation et observation (P and O) :

La méthode perturbation et observation (P&O) procède en changeant continuellement le point de fonctionnement jusqu'à le faire coïncider avec le point de puissance maximale (PPM). Cela s'effectue en perturbant le point de fonctionnement du système et en observant ce qui se produit en sortie au niveau de la puissance pour en décider de l'action à suivre durant le suivant cycle de perturbation, d'Ou son appellation (P&O) algorithme. L'organigramme de cette méthode MPPT est illustré par la **Figure III.8**.

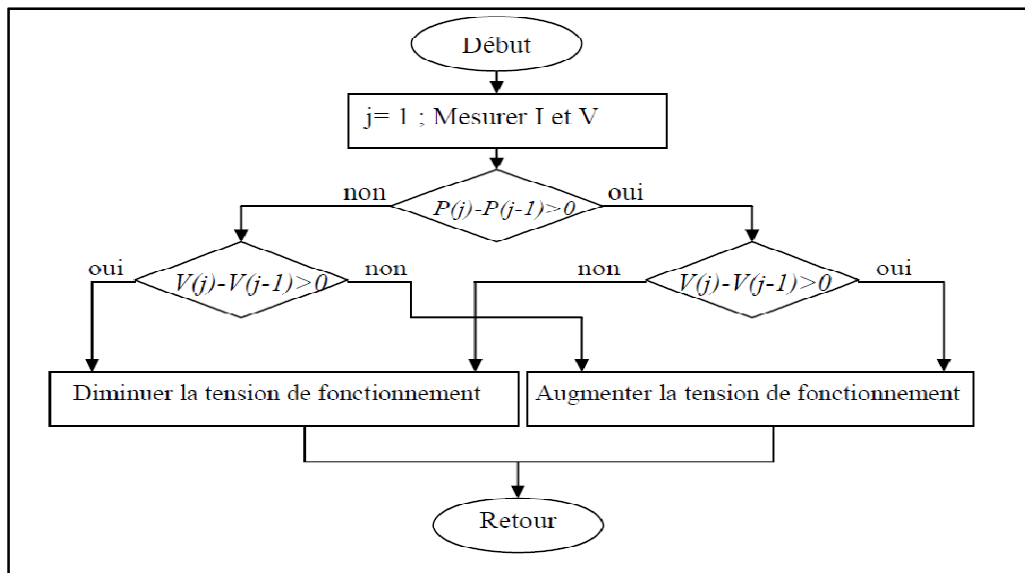


Figure III.8 : Organigramme de l'algorithme MPPT P&O.

Pour mieux expliquer le principe, nous considérons la **Figure III.9**. Nous commençons par supposer que le point de fonctionnement initial (PF) du système se trouve en point **A**, une perturbation causée par une augmentation de la tension de fonctionnement fait déplacer le PF vers la position **B**. Dans ce cas de figure, une augmentation de la puissance de sortie sera observée. Cela voudrait dire que la recherche du PPM se fait dans la bonne direction et par conséquence, la décision à prendre serait de maintenir le même sens de recherche et donc de perturbation durant le prochain cycle. Dans un deuxième cas de figure. Nous supposons que le point de fonctionnement se trouve en point **C**, une perturbation dans le sens croissant de la tension causera, cette fois ci, le déplacement du PF vers la position **D**. Coté puissance, une diminution sera observée ce qui nous permet de déduire que le point de puissance maximale recherché se trouve dans l'autre direction, la tension de fonctionnement sera diminuée au lieu d'être augmenté durant le prochain cycle de recherche.

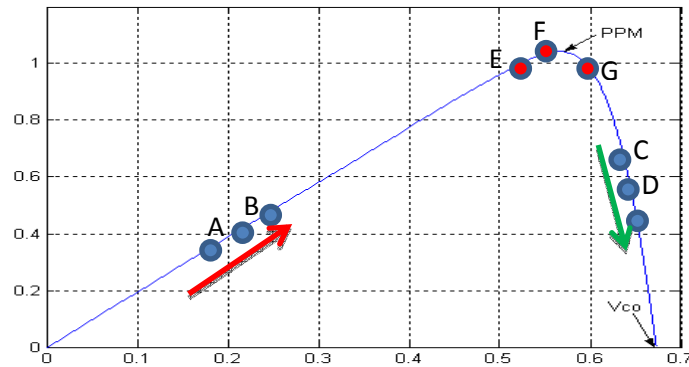


Figure III.9 : Principe de la recherche du PPM selon la méthode P&O.

Il faut noter que la méthode (**P&O**) est l'une des méthodes les plus utilisées pour la recherche du PPM. Cela est dû essentiellement à la simplicité de son raisonnement, sa facilité d'implémentation et surtout à son faible coût qui est relatif au nombre de mesures qu'elle nécessite pour son bon fonctionnement. Toutefois, elle présente deux inconvénients majeurs qui suscitent, depuis des années, plusieurs recherches dans le but de minimiser leurs impacts. Le premier inconvénient concerne les oscillations que présente l'algorithme de recherche autour du point de puissance maximale une fois ce dernier atteint. Et le deuxième inconvénient étroitement dépendant et faisant face au premier concerne la rapidité de la recherche.

Pour mieux expliquer ces deux inconvénients, nous proposons ce scénario de recherche dans le cas de conditions stables de fonctionnement, c'est-à-dire température et ensoleillement fixes ou lentement variables. L'algorithme commence la recherche à partir du point A, après plusieurs cycle de recherche le point E est atteint. Le teste au niveau de la puissance est positif, la direction de la recherche est maintenue, le point de fonctionnement durant le cycle suivant de la perturbation passe à F, le test sera positif aussi, ce qui fait que le prochain PF sera en G. A ce moment, le test fait signaler qu'il faut changer de direction, et ainsi le PF se trouvera au point F, le test pour la puissance sera positif, mais le prochain PF sera en E dont la puissance est inférieure à celle du point F, donc un changement de direction sera obligatoire et ainsi de suite, le point de fonctionnement oscillera sans cesse autour du point de fonctionnement ce qui engendrera une perte de puissance non négligeable.

Pour minimiser l'impact de ces oscillation, une solution existe, prendre un pas de perturbation (ΔV) le plus petit possible de manière à minimiser l'amplitude des oscillations. Mais ce choix là va avoir une autre conséquence néfaste, l'algorithme sera ralenti, et le nombre de cycle de perturbation nécessaire pour approcher le PPM sera remarquablement augmenté.

Le deuxième inconvénient se manifeste lors d'un changement considérable et rapide dans les conditions de travail, l'algorithme peut perdre le sens d'orientation de la recherche et fait déplacer le point de fonctionnement loin du PPM au lieu de s'en approcher. Ce cas de figure, illustré par la **Figure III.10**, se présente lorsqu'un changement brusque en rayonnement solaire surgit durant une phase de perturbation et nécessite une modification importante de la tension de fonctionnement dans le sens opposé à celui en plein exécution. Le point de fonctionnement se trouvant initialement en A va être déplacé vers B1 pour approcher le PPM1 selon l'algorithme (**P&O**), mais une augmentation de l'rayonnement solaire pendant cette phase d'exécution le fait coïncider au point de fonctionnement B2 sur la nouvelle caractéristique I-V qui correspond à la nouvelle condition de travail. Une perturbation dans le sens contraire

aurait déplacé le point de fonctionnement vers **C1**, et ceci l'aurait rapproché d'avantage ou le coïncider exactement avec le nouveau **PPM** qui est le **PPM2**.

Gérer ces deux inconvénients en même temps n'est pas une tâche facile. En effet, pour que le **PF** ne soit pas projeté loin du **PPM** en cas de changement brusque des conditions de travail, il faut choisir un pas de perturbation petit, celui là permet de maintenir l'amplitude des oscillations dans des limites abordable mais ralenti d'une manière considérable la recherche du **PPM** et donc le repositionnement du **PF** en cas de divergence de l'algorithme.

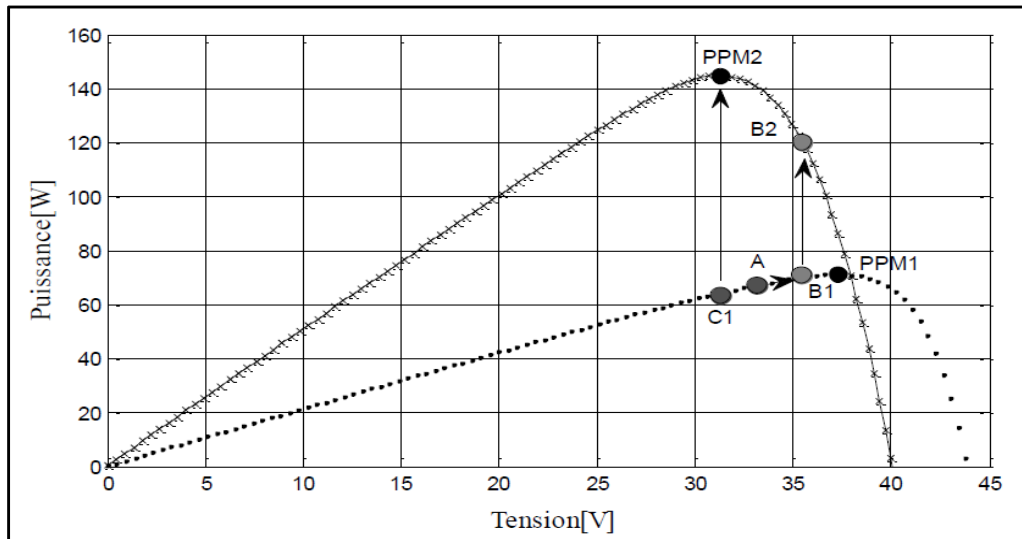


Figure III.10 : Divergence de l'algorithme PO en cas de changements brusques des conditions de travail

Dans la littérature, plusieurs recherches se sont intéressées à ce problème : la confusion du sens de recherche du **MPP**, certaines proposent d'utiliser un pas de perturbation variable . Ainsi, un ΔV assez grand peut être choisi pour accélérer la recherche quand le point de fonctionnement (**PF**) est loin du **PPM**, tandis qu'une petite valeur est choisie lorsque le **PF** est aux voisinages du **PPM** pour minimiser l'amplitude des oscillations, et aussi pendant les brusques changements, de manière à ce que l'algorithme ne diverge pas, ou pas trop. Ceci dit, si la méthode (**P&O**) est de loin la plus utilisée, cela est dû à sa simplicité, doter l'algorithme d'un système muni d'une logique de décision pour le choix du pas d'apprentissage nécessite un complément matériel qu'il faut ajouter au coût global de la commande **MPPT** et du système final. Ce coût supplémentaire peut être apprécié ou pas en fonction de l'apport énergétique qu'apporte cette modification.

III-3 Les Convertisseurs statique DC-DC (hacheur) : [19],[20],[21],[22],[23]

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du **GPV** et la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le **GPV** et la charge comme décrit dans la **figure III.1**. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de P_{max} disponible .

Aujourd'hui, on peut trouver deux types d'étages d'adaptation électroniques distincts commercialisés.

Le premier type permet de connecter le **GPV** à une charge continue telle qu'une batterie. Il fait appel à des convertisseurs (**DC-DC**). Ce type d'architecture est la plupart du temps utilisé pour un fonctionnement en site isolé .

Dans certains cas, il n'y a pas le choix car les caractéristiques de la charge ne sont pas compatibles avec la forme d'électricité produite par un **GPV**. C'est le cas de toutes les charges ayant besoin des tensions alternatives. Dans ce cas, on fait appel à un second type d'architecture permettant d'effectuer une conversion continu-alternatif (**DC-AC**).

L'étage d'adaptation (partie de puissance) se compose généralement d'un convertisseur statique, qui situé entre les panneaux solaires et la charge.

Par définition un convertisseur statique est un montage permettant par une commande pertinente de un ou plusieurs interrupteurs à semi-conducteur de régler un transfert d'énergie entre une source et un récepteur, Usuellement, au sein d'un **MPPT**, deux types de convertisseurs statiques sont utilisés:

- des convertisseurs de type « **Boost** » : la tension en sortie (aux bornes de la batterie) est plus importante que celle en entrée (aux bornes du panneau solaire).
- des convertisseurs de type « **Buck** » : la tension en sortie est alors plus faible que celle en entrée.

L'étage d'adaptateur est le plus souvent un hacheur (**DC-DC**), grâce à son commande, en peut à chaque instant ouvrir ou fermée l'interrupteur pour changer le point de fonctionnement, l'adaptation se fait par la variation du rapport cyclique de la commande de l'interrupteur du convertisseur.

Le hacheur est un convertisseur continu- continu mettant en oeuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue avec un rendement élevé. Le rapport cyclique se fait à une fréquence très élevée ce qui à pour conséquence de créer une tension moyenne. Si la tension délivrée en sortie est Inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit dévolteur(**Buck**). Dans le cas contraire, il est dit survolteur(**Boost**). Il existe des hacheurs capables de travailler des deux manières (**Boost-Buck ,Cuk**).

Les hacheurs de puissance sont utilisés pour la variation de vitesse des moteurs à courant continu. En plus faible puissance, Ils sont un élément essentiel des alimentations à découpage. Les convertisseurs d'énergie (**DC-DC**) peuvent fonctionner en trois modes : régime continu, régime discontinu (interrompu) et critique.il est alors nécessaire de dimensionner certains composants du convertisseur pour ne pas faire fonctionner ce deux dernier en mode interrompu et critique.

III-3-1 Hypothèses :

Afin d'étudier les différents types de hacheurs, on propose les hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'interrupteur **k** est supposé parfait.
- La chute de tension à la borne de la diode est négligeable.
- L'inductance **L** est supposée parfaite, donc sa résistance est nulle.

III-3-2 Définition du rapport cyclique :

Le rapport cyclique α est défini comme étant le temps t_{on} pendant lequel l'interrupteur est fermé divisé par la période de fonctionnement du montage T , soit $\alpha = \frac{t_{on}}{T}$. On définit également le temps pendant lequel l'interrupteur est ouvert par :

$$t_{off} = T - t_{on} \dots\dots\dots(III-7)$$

III-3-3 Structure des convertisseurs d'énergie élévatrice et abaisseur :

Le choix de la structure de conversion est effectué en fonction de la charge à alimenter. Nous avons besoin de structures de conversion survoltrice ou désolatrice en fonction de la caractéristique de cette charge. Deux types de convertisseurs statiques sont utilisés :

III-3-3-A convertisseur survolteur (Boost):

III-3-3-A-1 Structure de convertisseur survolteur(Boost) :

Le schéma de réalisation de l'étage d'adaptation d'un GPV à partir d'un convertisseur de type (boost) est présenté en Figure III.11 Cette structure élévatrice est plutôt destinée aux applications où la tension de la batterie est supérieure à la tension de circuit ouvert V_{co} du générateur .

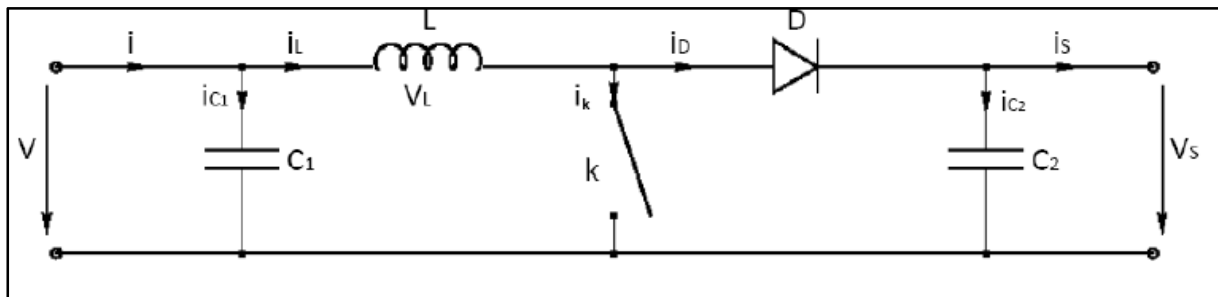


Figure III.11: Circuit électrique équivalent d'un hacheur parallèle

III-3-3-A-2 Modèle mathématique équivalente :

Comme le hacheur série, l'application de la loi de Kirchhoff sur le circuit précédent selon l'état de l'interrupteur k nous permet pour :

- $0 < t < \alpha.T$ k est fermé, la diode est polarisée en inverse et le courant dans l'inductance croît progressivement (c'est une phase d'accumulation d'énergie sous forme magnétique).
-

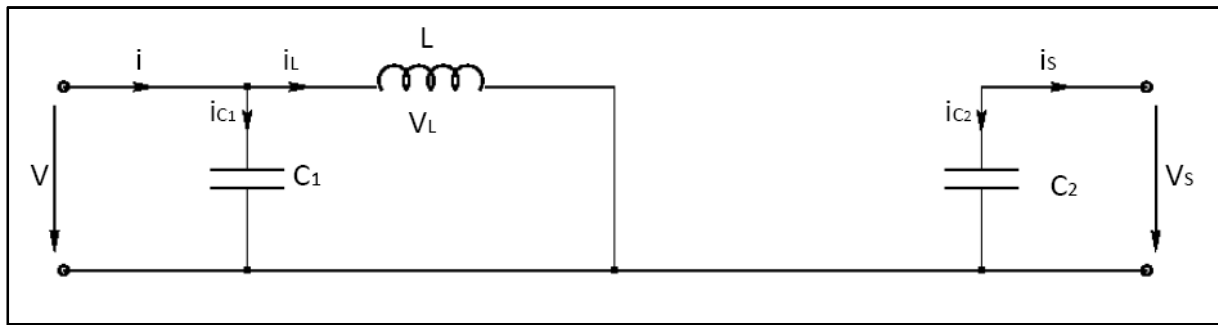


Figure III.12: Circuit équivalent du hacheur parallèle quand **k** est fermé

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_s(t)}{dt} = -i_s(t) \dots \dots \dots (III-8) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V(t) \end{array} \right.$$

- $\alpha.T < t < T$ **k** est ouvert, la diode est passante et l'inductance libère l'énergie emmagasinée lorsque **k** est fermé avec diminution du courant .

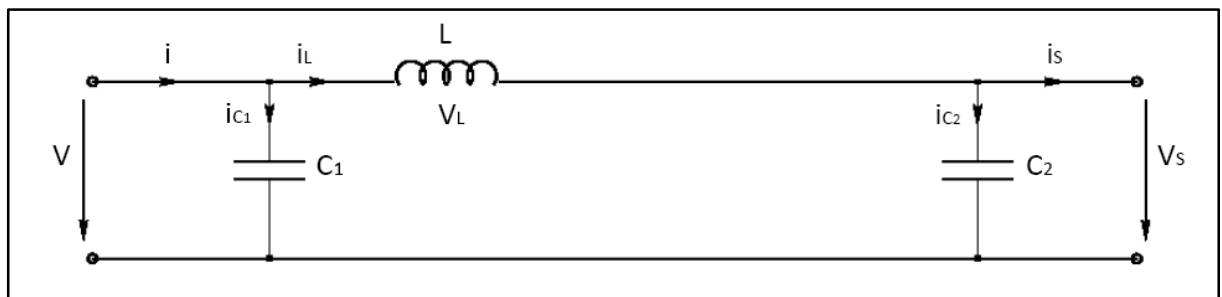


Figure III.13 : Circuit équivalent du hacheur parallèle quand **k** est ouvert

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_s(t)}{dt} = i_L(t) - i_s(t) \dots \dots \dots (III-9) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V(t) - V_s(t) \end{array} \right.$$

III-3-3-A-3 Modèle approximé du hacheur survolteur(Boost) :

Le hacheur parallèle est représenté par les systèmes d'équations pour une période (**k** fermé et **k** ouvert), le hacheur oscille entre ces deux états avec une fréquence élevée, nous devons trouver une représentation dynamique approximée valable pour ces deux états. Pour cela nous considérons que la variation des variables dynamiques est de forme linéaire, donc la dérivée de ces grandeurs sera constante.

Cette approche nous permet de décomposer l'expression de la valeur moyenne du dérivé de la variable dynamique sur les deux états :

Le courant qui parcourt la self et la tension aux bornes de la capacité est de la forme linéaire.

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle = \frac{dx_{(\alpha.T)}}{dt} \cdot \alpha.T + \frac{dx_{(1-\alpha).T}}{dt} \cdot (1-\alpha).T \dots\dots\dots(III-10)$$

Ou $\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle$ est la valeur moyenne de la dérivée de x sur une période T. Cette relation est valide

si $\frac{dx_{(\alpha.T)}}{dt}$ sont constants sur $\alpha.T$ et $(1-\alpha).T$ respectivement.

En appliquant la relation sur les systèmes d'équations (III-10), on trouve le modèle approximé du hacheur parallèle :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv}{dt} T = \alpha.T \cdot (i - i_L) + (1-\alpha) T \cdot (i - i_L) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dVs}{dt} T = -i_s \cdot \alpha.T + (1-\alpha) T \cdot (i_L - i_s) \dots\dots\dots(III-11) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} T = V\alpha.T + (1-\alpha) T \cdot (V - V_s) \end{array} \right.$$

Le modèle dynamique du hacheur parallèle est obtenu après arrangement des termes de l'équation précédents

$$\left\{ \begin{array}{l} i_L = i - C_1 \frac{dv}{dt} \\ i_s = (1-\alpha)i_L - C_2 \frac{dVs}{dt} \dots\dots\dots(III-12) \\ V = (1-\alpha)V_s + L \frac{di_L}{dt} \end{array} \right.$$

III-3-3-A-4 Etude en régime continu :

Le régime continu est obtenu en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et en remplaçant les variables dynamiques par leurs valeurs moyennes.

Le système d'équations donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_L = i \\ i_s = (1-\alpha)i_L \dots\dots\dots(III-13) \\ V = (1-\alpha)V_s \end{array} \right.$$

III-3-3-A-5 Rapport de conversion :

Le rapport de conversion **M** est défini comme étant le rapport entre la tension de sortie et la tension d'entrée

$$M(\alpha) = \frac{V_s}{V} = \frac{1}{1-\alpha} \dots\dots\dots III.14$$

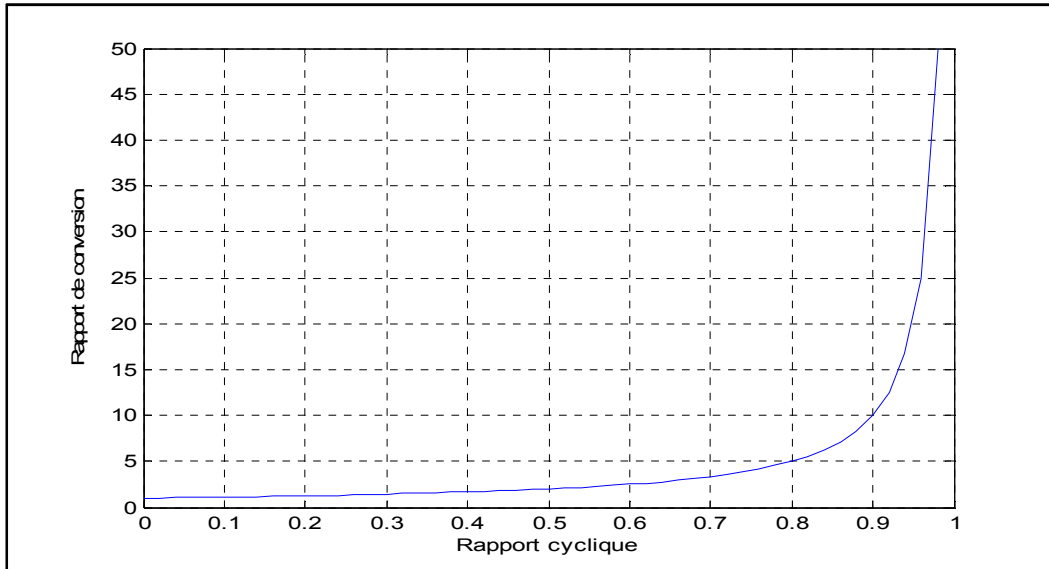


Figure III-14 : Le rapport de conversion M en fonction de rapport cyclique α du hacheur parallèle

D'après l'équation (III-14) et la Figure III-14, on peut dire que le hacheur parallèle est un élévateur de tension

Les caractéristiques de tension et du courant de charge du convertisseur (**Boost**) dans le cas de la conduction continue sont décrites par la Figure III.15 ; comme suit :

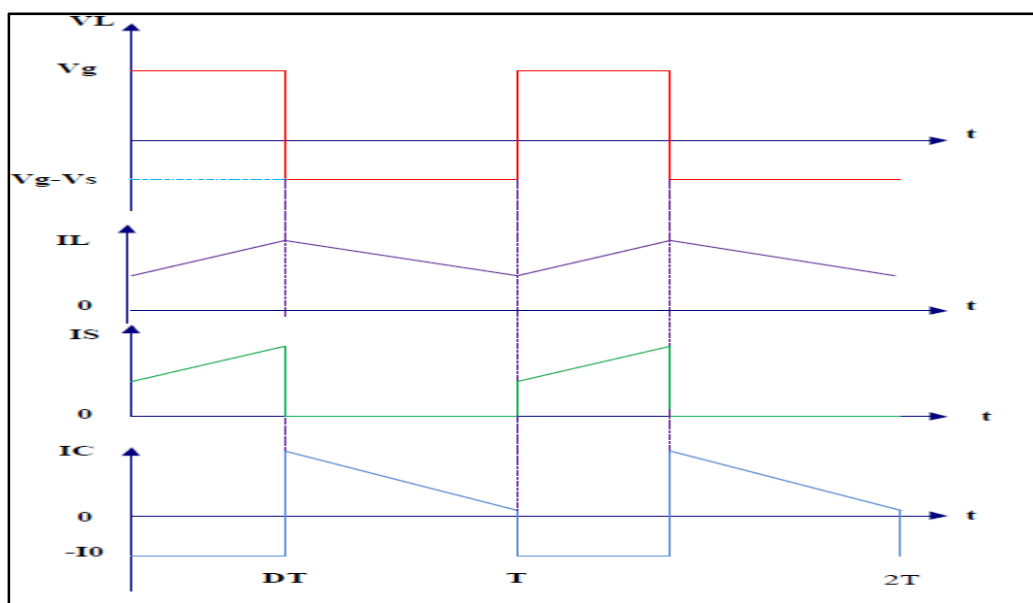


Figure III.15 :Caractéristique de la tension et du courant du hacheur survolteur

III-3-3-B Hacheur série (buck):

Le schéma de la Figure III.16 représente le circuit électrique équivalent d'un hacheur série (abaisseur de tension) ou un convertisseur (**Buck**). Ce montage permet de convertir la tension d'entrée V en une tension de sortie V_s inférieure.

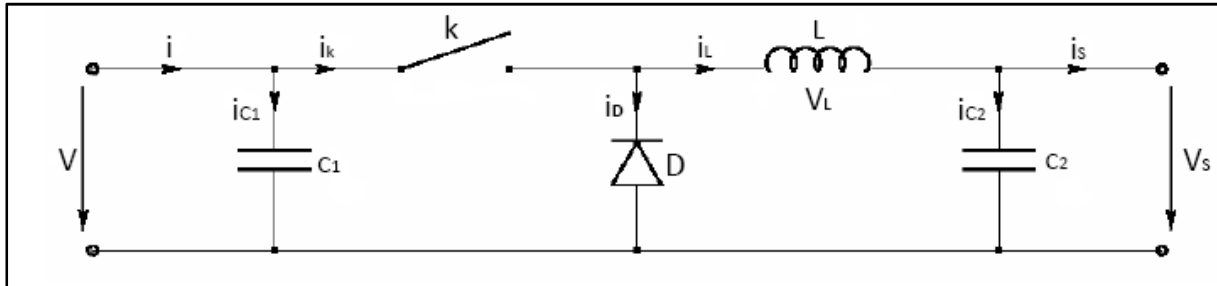


Figure III.16 : Circuit électrique équivalent d'un hacheur série

III-3-3-B-1 Modèle mathématique équivalente :

Pour extraire le modèle mathématique du hacheur, il faut l'étudier dans les deux phases de fonctionnement (k fermé, et k ouvert), ensuite donner son modèle approximé.

Les variables dynamiques du circuit de hacheur sont i_L, V_{C1}, V_{C2} , associée avec les composants L, C_1, C_2 . Les équations qui lient les dérivées de i_L, V_{C1} par rapport au temps, aux variables d'entrée et de sortie ainsi que les composants du condensateur et les variables dynamique i_L, V_{C1} sont de la forme.

$$\frac{dV_C(t)}{dt} = f(i_L, i_C, V_C, L, C) \dots\dots\dots(III-15)$$

$$\frac{di_L(t)}{dt} = g(i_L, i_C, V_C, L, C) \dots\dots\dots(III-16)$$

- $0 < t < \alpha.T$ k fermé, la diode se bloque et le courant circulera dans la charge à travers l'inductance.

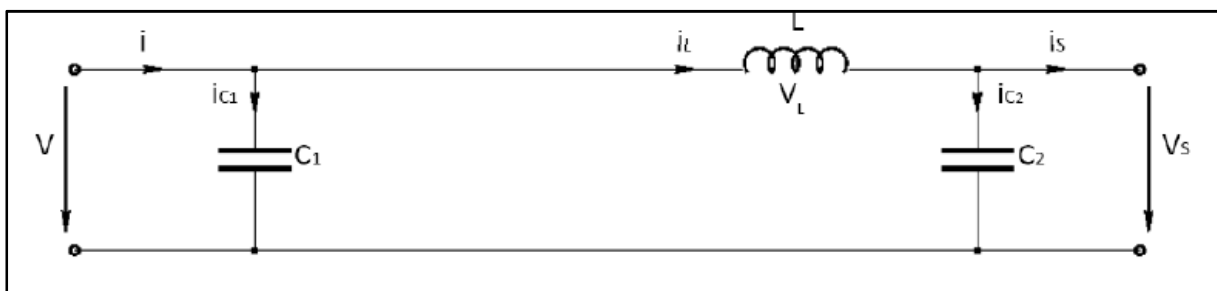


Figure III.17 : Circuit équivalent du hacheur série quand k est fermé

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_s(t)}{dt} = i_L(t) - i_s(t) \dots \dots \dots (III-17) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V(t) - V_s(t) \end{array} \right.$$

- $\alpha \cdot T < t < T$ **k** ouvert, la diode devient passante et le courant traversant l'inductance décroît. L'ajout de la diode est justifié pour assurer la continuité de courant de l'inductance.

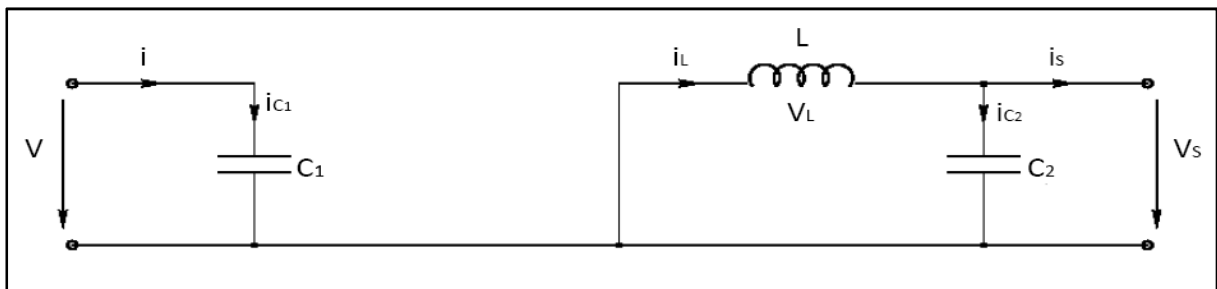


Figure III.18 :circuit équivalent du hacheur série quand **k** est ouvert

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV(t)}{dt} = i(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_s(t)}{dt} = i_L(t) - i_s(t) \dots \dots \dots (III-18) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_s(t) \end{array} \right.$$

III-3-3-B-2 Modèle approximé du hacheur série :

En appliquant la relation sur les systèmes d'équations (III-10), on trouve le modèle approximé du hacheur parallèle.

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV}{dt} T = \alpha \cdot T \cdot (i - i_L) + (1 - \alpha) T \cdot i \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_s}{dt} T = \alpha \cdot T \cdot (i_L - i_s) + (1 - \alpha) T \cdot (i_L - i_s) \dots \dots \dots (III-19) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} T = (V - V_s) \alpha \cdot T + (1 - \alpha) T \cdot (-V_s) \end{array} \right.$$

En arrangeant les termes des équations précédentes, on obtient la modélisation dynamique du hacheur série.

$$\left\{ \begin{array}{l} i_L = \frac{1}{\alpha} \left(i - C_1 \frac{dv}{dt} \right) \\ i_s = i_L - C_2 \frac{dv_s}{dt} \dots\dots\dots (III-20) \\ V = \frac{1}{\alpha} \left(V_s + L \frac{di_L}{dt} \right) \end{array} \right.$$

III-3-3-B-3 Etude en régime continu :

Le régime continu est obtenu en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et en remplaçant les variables dynamiques par leurs valeurs moyennes. Le système d'équations donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} i = \alpha \cdot i_L \\ i_s = i_L \dots\dots\dots (III-21) \\ V_s = \alpha \cdot V \end{array} \right.$$

III-3-3-B-4 Rapport de conversion M(α) :

rapport de conversion **M** est défini comme étant le rapport entre la tension de sortie et la tension d'entrée :

$$M(\alpha) = \frac{V_s}{V} = \alpha \dots\dots\dots III.22$$

La Figure III.19 montre cette relation.

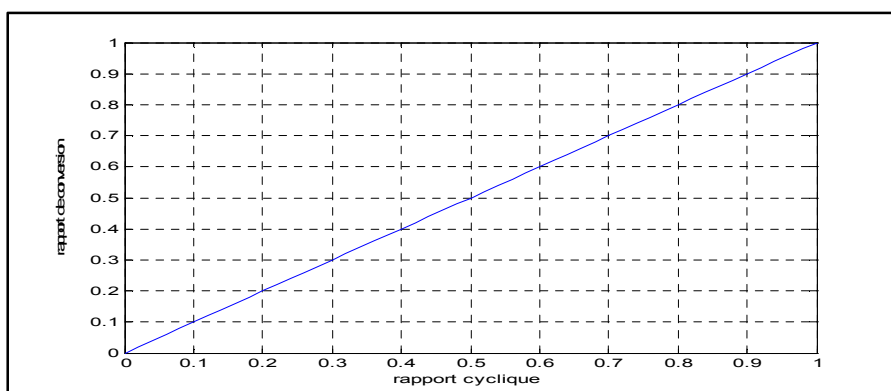


Figure III.19: Le rapport de conversion **M** en fonction de rapport cyclique **α** du hacheur série.

L'équation (III-22) et la Figure III.19 montrent que le hacheur série est un abaisseur de tension car la tension de sortie est égale à la tension d'entrée multipliée par un coefficient qui varie dans l'intervalle **[0, 1]**.

Les caractéristiques de tension et du courant de charge du convertisseur (**Buck**) dans le cas de la conduction continue sont décrites par la Figure III.20 ; comme suit :

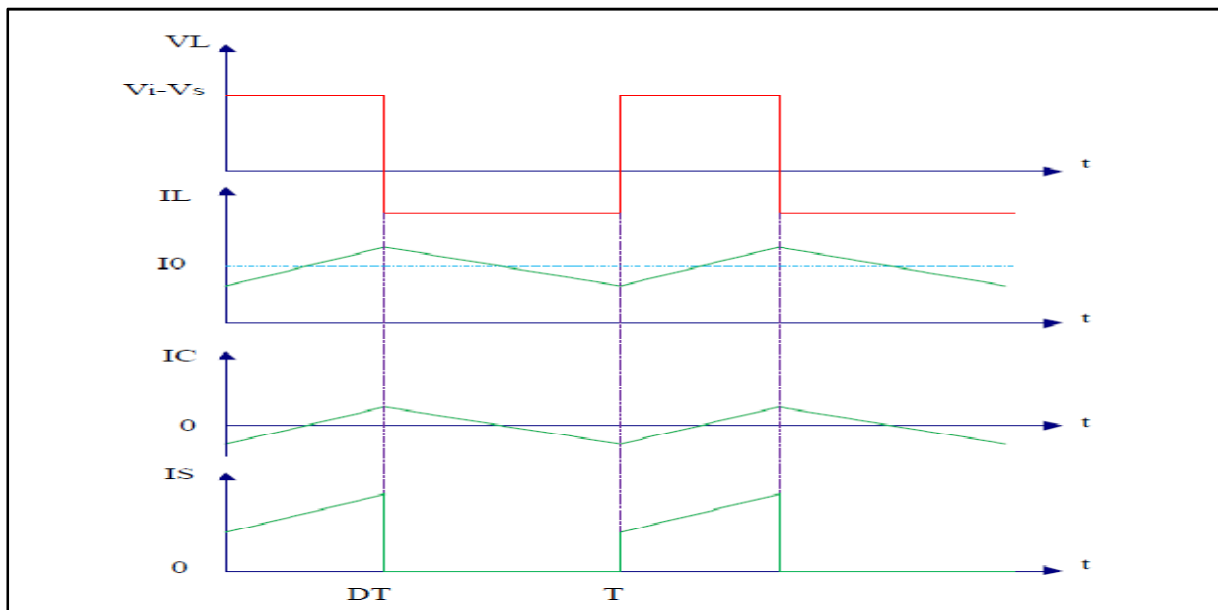


Figure III.20 : Caractéristique de la tension et du courant du hacheur Buck

III-3-3-C Hacheur série-parallèle (buck-boost):

Le hacheur série-parallèle (élevateur-abaisseur) ou convertisseur (**Buck-Boost**) combine les propriétés des configurations de hacheur série et parallèle. Il peut être employé pour transformer n'importe quelle tension continue d'entrée en n'importe quelle tension continue désirée de sortie.

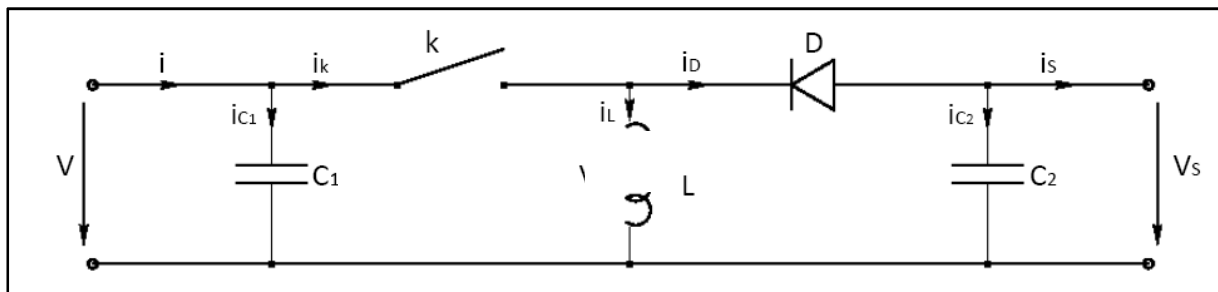


Figure III.21 :Circuit électrique équivalent d'un hacheur série-parallèle

III-3-3-C-1 Modèle mathématique équivalente

Par l'application de la loi de Kirchhoff et selon l'état de l'interrupteur k le fonctionnement du hacheur série-parallèle est donné par :

- $0 < t < \alpha.T$ k est fermé, c'est une phase d'accumulation d'énergie sous forme magnétique dans l'inductance et la diode est bloquée.

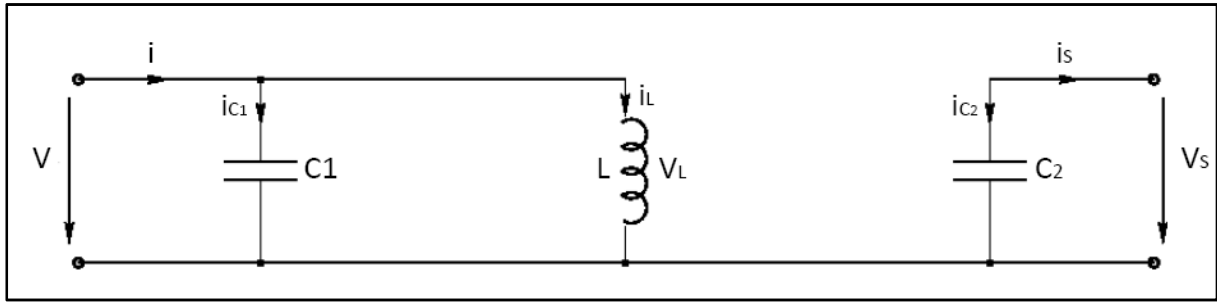


Figure III.22 : Circuit équivalent d'un hacheur série-parallèle quand k est fermé

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_s(t)}{dt} = -i_s(t) \dots \dots \dots (III-23) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V(t) \end{array} \right.$$

- $\alpha.T < t < T$ k est ouvert, la diode est passante et l'inductance libère l'énergie emmagasinée lorsque k est fermé avec diminution du courant .

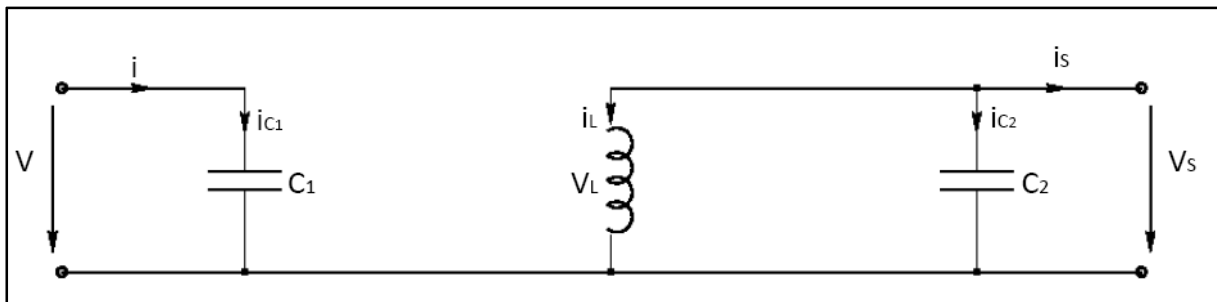


Figure III.23 : Circuit équivalent du hacheur parallèle quand k est ouvert

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV(t)}{dt} = i(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_s(t)}{dt} = -i_L(t) - i_s(t) \dots \dots \dots (III-24) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_s(t) \end{array} \right.$$

En appliquant la relation, on trouve :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV}{dt} T = \alpha.T. (i - i_L) + (1-\alpha) T. i \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_s}{dt} T = \alpha.T. (-i_s) - (1-\alpha) T. (i_L + i_s) \dots \dots \dots (III-25) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} T = (V)\alpha.T + (1-\alpha) T. (V_s) \end{array} \right.$$

La modélisation dynamique du hacheur série-parallel est obtenue après arrangement des termes des équations.

$$\left\{ \begin{array}{l} i_L = \frac{1}{\alpha} (i - C_1 \frac{dV}{dt}) \\ i_s = (\alpha - 1) i_L - C_2 \frac{dV_s}{dt} \dots \dots \dots (III-26) \\ V = \frac{1}{\alpha} ((\alpha - 1) V_s + L \frac{di_L}{dt}) \end{array} \right.$$

III-3-3-C-2 Etude en régime continu :

$$\left\{ \begin{array}{l} i = \alpha \cdot i_L \\ i_s = (\alpha - 1) i_L \dots \dots \dots (III-27) \\ V = \frac{(\alpha - 1)}{\alpha} \cdot V_s \end{array} \right.$$

III-3-3-C-3 Rapport de conversion M(α) :

L'expression de rapport de conversion est donné par :

$$M(\alpha) = \frac{\alpha}{\alpha - 1} \dots \dots \dots (III - 28)$$

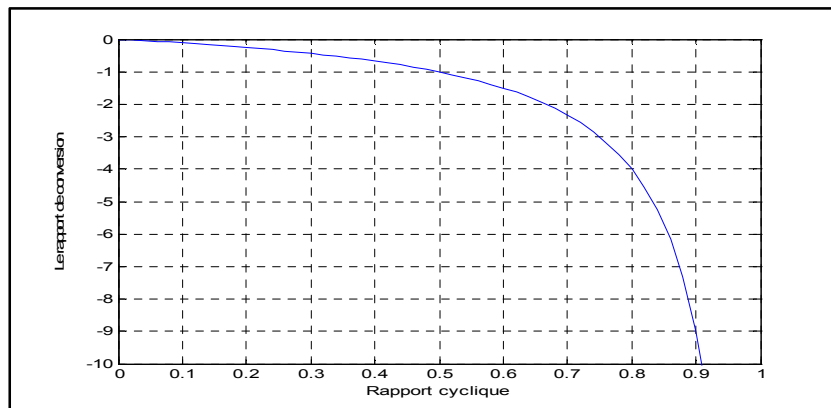


Figure III-24 : Le rapport de conversion M en fonction de rapport Cyclique (α) du hacheur série-parallel

romarque :

0 < α < 0.5 : Le hacheur est un abaisseur de tension.

0.5 < α < 1 : Le hacheur est un élévateur de tension.

Les caractéristiques de tension et du courant de charge du convertisseur (**Buck-Boost**) dans le cas de la conduction continue sont décrites par la **Figure III.25** ; comme suit :

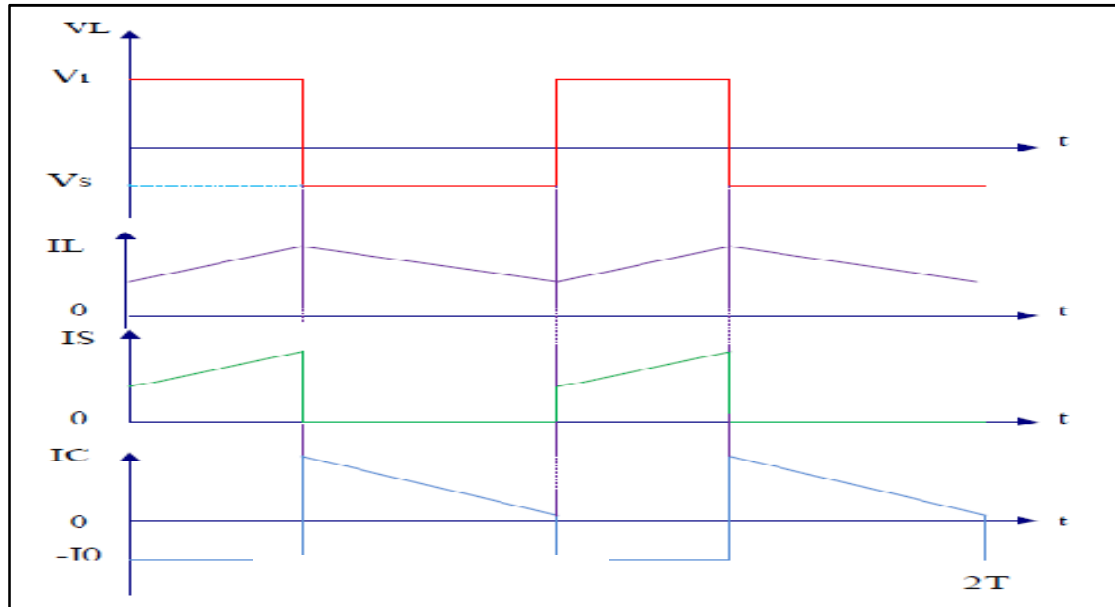


Figure III-25 : Caractéristique de la tension et du courant du hacheur Buck-Boost

III-4 La Charge :

Un panneau solaire se comporte comme un générateur de courant de type continu, pour cela il est relié directement à une résistance ou une batterie.

III-4-1 Charge résistive :[24]

On a vu jusqu'à présent que le point de puissance maximale dépend de la température et de l'éclairement solaire. Dans cette partie on va voir l'influence de la charge sur le fonctionnement d'un panneau solaire.

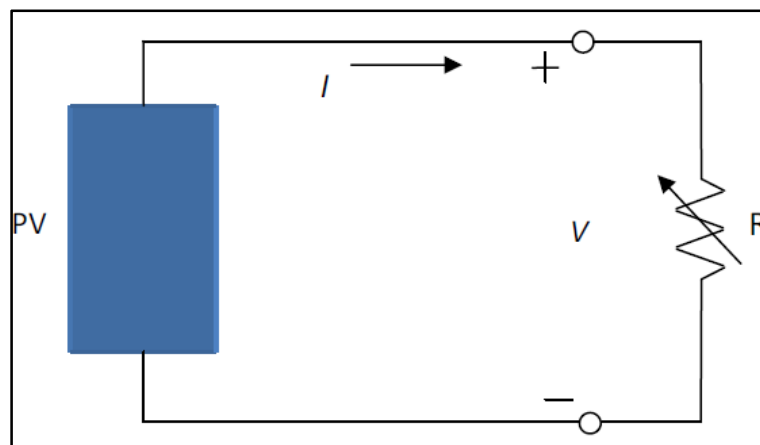


Figure III-26 : Connexion directe entre un panneau solaire et une charge résistive

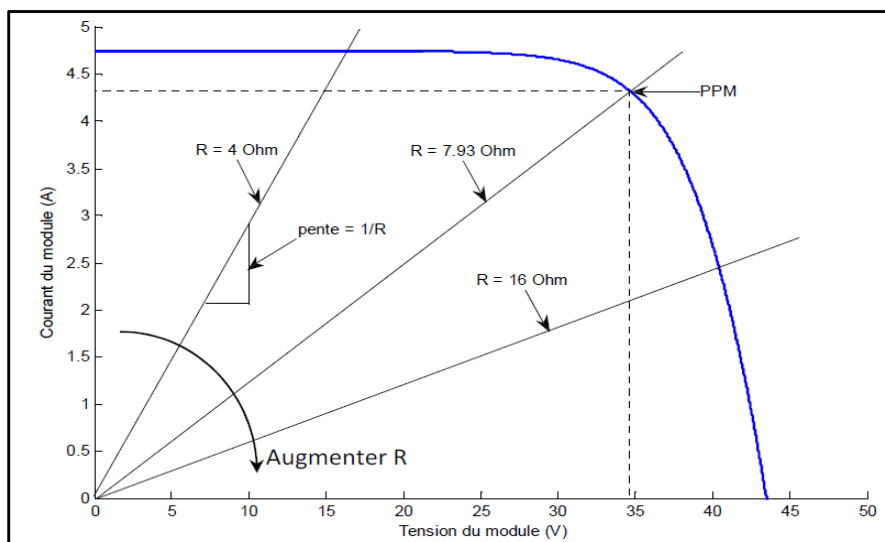


Figure III-27 :courbe I-V du module et des diverses valeurs de la charge résistive

Comme nous pouvons le constater sur la **Figure III-27** le fonctionnement d’un panneau solaire dépend fortement des caractéristiques de la charge à laquelle il est associé, en effet, seule une charge dont sa caractéristique passe par le **PPM** permet d’extraire la puissance maximale (disponible à une température et un éclairage donné), qu’on appelle résistance optimale sa valeur est donnée par la relation suivante :

$$R_{OPT} = \frac{V_{OPT}}{I_{OPT}} \dots\dots\dots(III - 29)$$

Où : V_{OPT} peut être déterminé à partir du point de puissance maximale sur la caractéristique puissance-tension puis on extrapole cette valeur sur la caractéristique courant-tension pour déterminer I_{OPT} .

Pour déterminer la résistance optimale à **T=25°C** et **E=1000W/m²** et en utilisant les instructions mentionnés précédemment on trouve :

- V_{OPT}=17.21 V.**
- I_{OPT}=2.905 A.**
- R_{OPT}=5.92 Ω.**

Mais La **Figure III.28** montre que , pour un résistance fixe le point opérationnelle s’éloigne du PPM quand les conditions changent et le module devient de moins en moins efficace d’où on a besoin d’introduire un suiveur de puissance maximale pour maintenir le rendement du **PV** le plus élevé a tout moment.

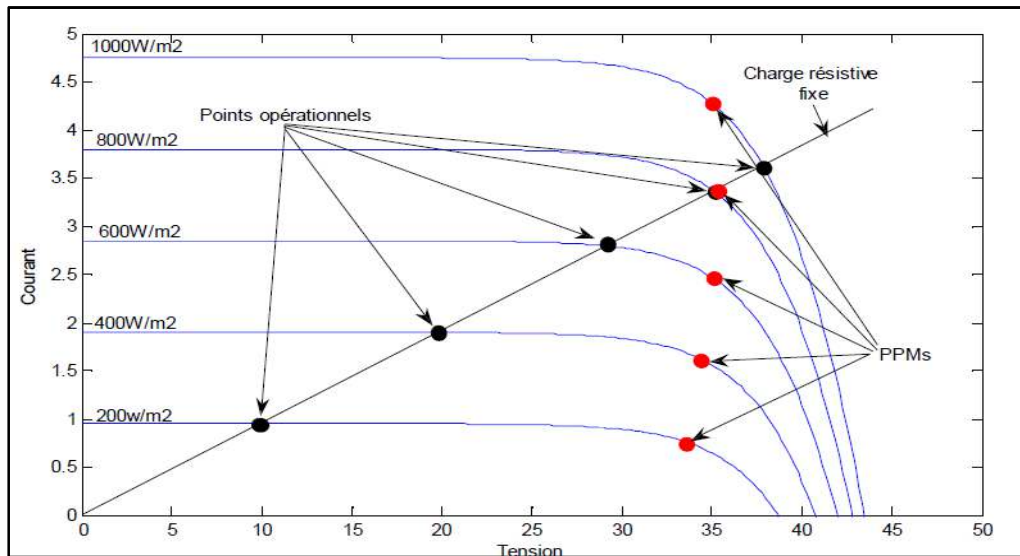


Figure III.28 : l'efficacité du module PV avec un charge résistive fixe
Concue pour des différent niveaux d'ensoliellement

III-4-2 Batterie :[25]

Le stockage de l'énergie électrique dans les systèmes **PV** est assuré par des batteries d'accumulateur électrochimique.

De nombreux types de batteries'accumulateurs électrochimique existent, pour les installations **PV** les accumulateurs au plomb sont les plus utilisés (son coût est relativement faible).

III-4-2-A Description d'une batterie d'accumulateur au plomb :

Une batterie d'accumulateur au plomb est constituée par :

- Une électrode positive : Plaque en bioxyde de plomb (**PbO₂**).
- Une électrode négative : Plaque en plomb (**Pb**).
- Un électrolyte : Solution d'acide sulfurique (**H₂SO₄**).

Les électrodes sont immergées dans l'électrolyte. Pendant la décharge de la batterie, la concentration de l'acide sulfurique décroît, inversement l'acide sulfurique se reforme pendant la charge.

III-4-2-B Modèle mathématique des batteries au plomb/

La Figure III.29représente le modèle équivalent de la batterie d'accumulateur au plomb. Ce modèle inclut les composants équivalents pour toutes les caractéristiques de fonctionnement principales de cette batterie.

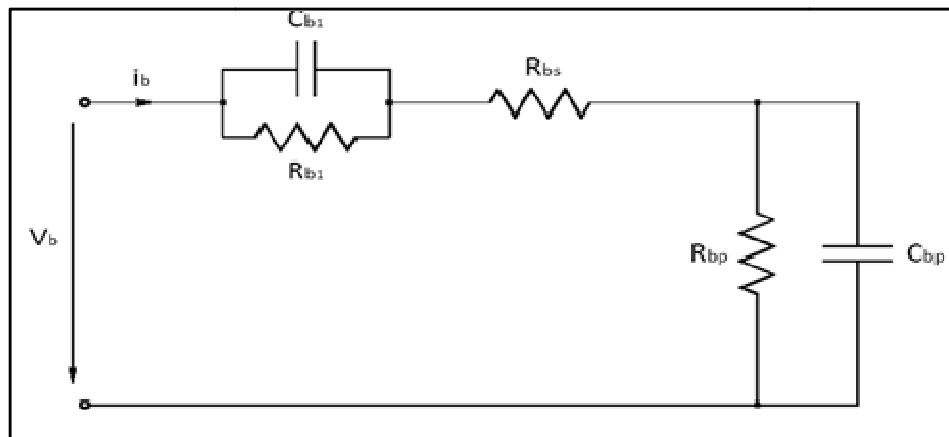


Figure III-29 : Modèle électrique équivalent d'une batterie d'accumulateur au plomb

La capacité électrochimique de la batterie est représentée par le condensateur C_{bp} et sa valeur peut être tirée de l'expression générale de l'énergie :

$$E_C = \frac{1}{2} C V^2 \dots \dots \dots (III - 30)$$

Avec : C est la capacité et V la tension du condensateur.

A la différence d'un condensateur, la tension d'une batterie ne sera pas égale à zéro à son plus bas état de charge. C'est équivalent à un condensateur ayant un niveau minimum de charge égale à l'énergie. Ceci est indiqué par l'équation suivante :

$$E_b = E_{C_{max}} - E_{C_{min}} = \frac{1}{2} C V_{max}^2 - \frac{1}{2} C V_{min}^2 = \frac{1}{2} C_{bp} (V_{max}^2 - V_{min}^2) \dots \dots \dots (III - 31)$$

L'énergie est donnée par le constructeur de la batterie en Kilowatt par heure. Les tensions V_{max} et V_{min} sont la tension maximale et la tension minimale de la batterie en circuit ouvert respectivement. D'après l'équation on a :

$$C_{bp} = \frac{2 \cdot E_b}{V_{max}^2 - V_{min}^2} \dots \dots \dots (III - 32)$$

La résistance interne de la batterie est représentée par les deux résistances R_{b1} et R_{bp} . La résistance d'électrolyte et de plaques est représentée par la résistance R_{b1} tandis que la résistance R_{bp} représente la diffusion d'électrolyte.

L'impédance équivalente à la figure :

$$Z(s) = R_{bs} + (R_{b1} // C_{b1}) + (R_{bp} // C_{bp}) = R_{bs} + \frac{R_{b1}}{R_{b1} \cdot C_{b1} \cdot s + 1} + \frac{R_{bp}}{R_{bp} \cdot C_{bp} \cdot s + 1} \dots \dots \dots (III - 33)$$

$$Z(s) = \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \dots \dots \dots (III - 34)$$

Les coefficients a_2 et b_2 sont employés pour représenter les différents composants :

$$a_2 = R_{bs} R_{b1} R_{bp} C_{b1} C_{bp}$$

$$a_1 = R_{bs} R_{b1} C_{b1} + R_{bs} R_{bp} C_{bp} + R_{b1} R_{bp} C_{bp} + R_{bp} R_{b1} C_{b1}$$

$$a_0 = R_{bs} + R_{b1} + R_{bp}$$

$$b_2 = R_{b1}R_{bp}C_{b1}C_{bp}$$

$$b_1 = R_{b1}C_{b1} + R_{bp}C_{bp}$$

$$b_0 = 1$$

III-5 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a exposé brièvement quelques topologies de base des alimentations à découpage, qui ne sont rien d'autres que des convertisseurs continus-continus. Comme le convertisseur dévolteur, convertisseur survolteur et convertisseur dévolteur-survolteur.

On a présenté aussi la commande **MPPT** des convertisseurs (**DC-DC**) pour rechercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale, sous différentes conditions de fonctionnement. On a étudié quelques méthodes **MPPT** basées sur contre réaction de puissance, comme l'algorithme d'incrément de l'inductance et méthode de perturbation et observation et enfin en a étudié et représente le modèle équivalent de la batterie d'accumulateur au plomb.

IV-1 Introduction :

Dans ce chapitre, le comportement du notre système sera analysé par des simulations. Pour mieux comprendre certains régimes propres au système nous allons montrer a priori les résultats de simulation de l'ensemble charge alimenté par un générateur solaire, via un hacheur survolteur.

Pour une première configuration, nous présentons les résultats de simulation relatifs à un ensoleillement et une température fixés. Pour trois points de fonctionnements : On branche au début une charge résistive R ou sa valeur coïncide parfaitement avec le point optimale, ensuite, on prend une charge plus grande ; puis, on prend une plus petite et en registre les différentes réponses qu'il délivre le panneau solaire.

Pour une deuxième configuration et après avoir évoqué quelques méthodes de suivi de la puissance maximale, on présentera une étude de modélisation et de simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT numérique « perturbation et observation et incrimmentation de l'inductance ». Ce système est comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur « boost », une commande MPPT « perturbation et observation et incrimmentation de l'inductance» ainsi qu'une charge(batterie).

Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel **MATLAB/Simulink**. Enfin, des simulations seront présentées tout en tenant compte de l'effet de changement des conditions météorologiques.

IV-2 L'outil Matlab/Simulink :[23]

MATLAB fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

- Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes).
- Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs Simulions spécialisés (Blocksets).
- D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.
- Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop.

SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques.

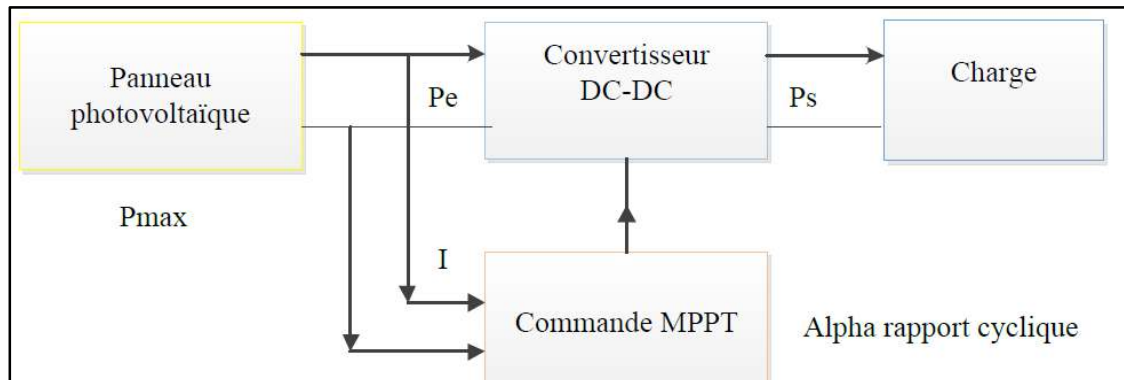
Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal .

IV-3 Système photovoltaïque proposée :

La **FigureIV.1** est représenté le schéma synoptique d'un système PV alimente une batterie comme une charge.

- Le générateurPV (MSX50) est en silicium monocristallin est constitué de 36 cellules photovoltaïques élémentaires. Il peut délivrer dans les conditions standards de test une puissance de **50W**, un courant de **2.92A** sous une tension optimale de **17.1 V**.
- Le quadripôle d'adaptation est un convertisseur d'énergie de type survolteur(Boost) pour des applications nécessitant des tensions supérieures à **24V**.

- La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV qui dépend des conditions météorologiques et de la variation de la charge stables. Son principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α à la valeur adéquate de manière à maximiser continuellement la puissance à la sortie du panneau PV.



FigureIV.1 :schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par (MPPT) sur charge (batterie)

IV-4 Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque autonome :

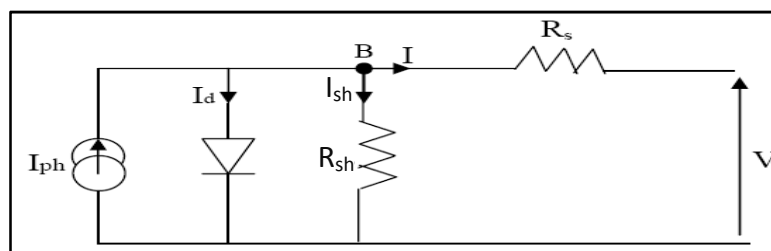
IV-4-1 Modélisation du panneau solaire :

Pour trouver le modèle de ce générateur, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. De nombreux modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques, ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations.

Le module fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation d'une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule, une résistance série R_s représentant les diverses résistances de contacts et de connexions et une résistance parallèle R_{sh} caractérisant les divers courants de fuites dus à la diode et aux effets de bords de la jonction.

Le générateur photovoltaïque est représenté par un modèle standard à une seule diode, établi par Shockley pour une seule cellule PV, et généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série-parallèle.

On présente le schéma du circuit électrique par la **FigureIV.2**:



FigureIV.2 : Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Alors, on peut présenter le schéma électrique équivalent du générateur photovoltaïque (GPV) par un schéma bloc Figure (IV.3) comportant quatre paramètres. Deux variables d'entrées qui sont : l'ensoleillement dans le plan des panneaux $E_s(W/m^2)$, température de jonction des cellules $T_j (^{\circ}C)$ et deux variables de sortie : courant fourni par le GPV $I_{PV}(A)$, tension aux bornes du GPV $V_{PV}(V)$.

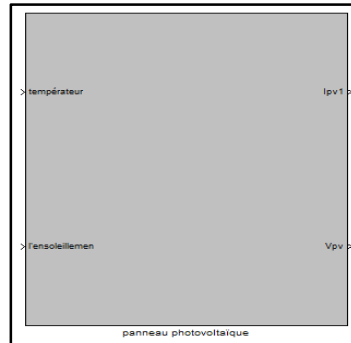


Figure IV.3 : schéma bloc du générateur photovoltaïque

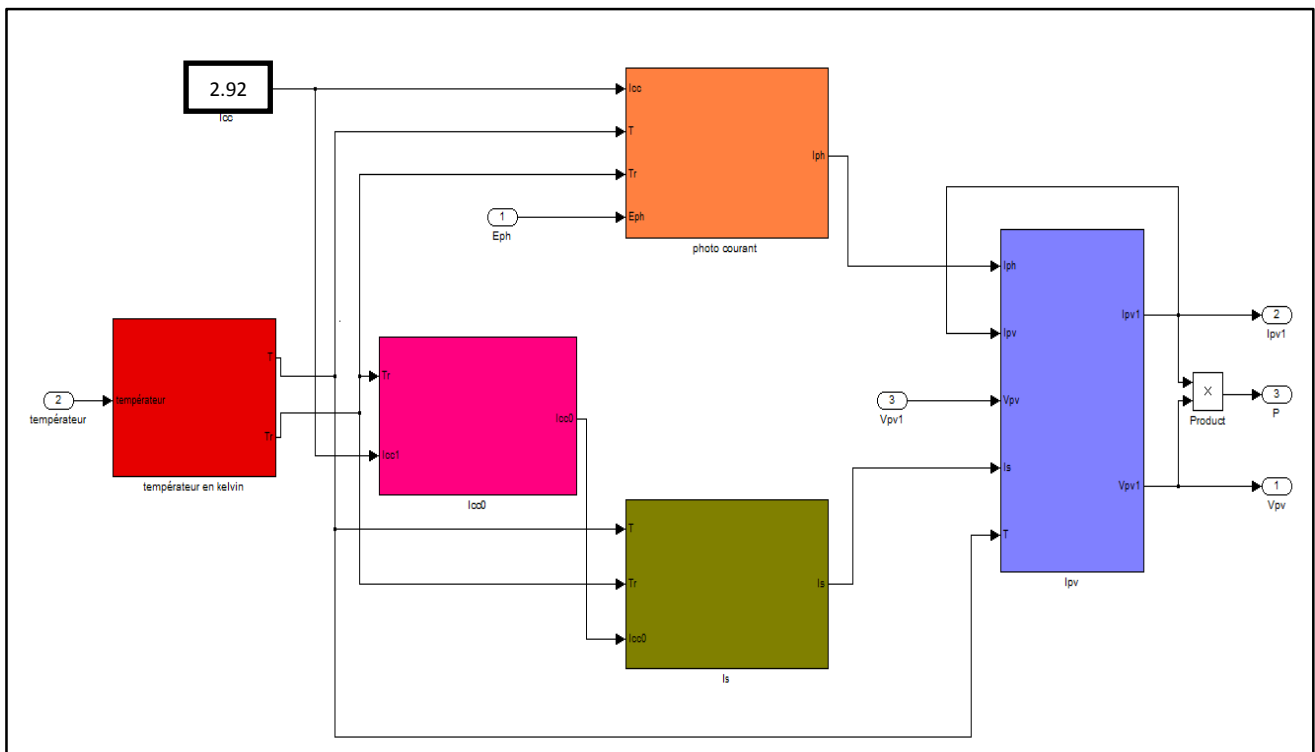


Figure IV.4 :Modèle du module photovoltaïque sous Simulink/Matlab

La Figure IV.4 montre le schéma fonctionnel du panneau solaire sous **Simulink**, ce schéma modélise les équations mathématiques du panneau solaire vu dans le chapitre I qui sont :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \dots \dots \dots (II-8)$$

$$I = I_{ph} - I_{sat} \cdot [\exp(\frac{q \cdot (V + R_s \cdot I)}{n \cdot K \cdot T}) - 1] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \dots \dots \dots (II-9)$$

Avec :

$$I_{ph} = [I_{cco} + K_i(T - Tr)] \frac{E}{E_0} \dots \dots \dots (II-5)$$

$$I_{sat} = I_{cc} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{nK} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right)\right) \dots\dots\dots(\text{II-6})$$

$$I_{cc} = \frac{I_{cco}}{\exp\left(\frac{q.V_{co}}{n.K.T_r}\right) - 1} \dots\dots\dots(\text{II-7})$$

IV-4-2 Modélisation les deux algorithmes (P&O et INC)

Dans tous les simulations qu'on va voir dans ce chapitre on a fait une comparaison entre deux contrôleurs (P&O et INC):

IV-4-2-A Modélisation del'algorithm perturbation et operservation (P&O)

Cette méthode de contrôle étudié dans le **chapitre III** est une méthode célèbre déjà étudié par plusieurs littérature ; le fonctionnement de l'algorithm **P&O** est bien expliqué sur l'organigramme de la **Figure III.8**. ce dernier on peut le modéliser sous Simulink comme suit (**Figure IV.5**) :

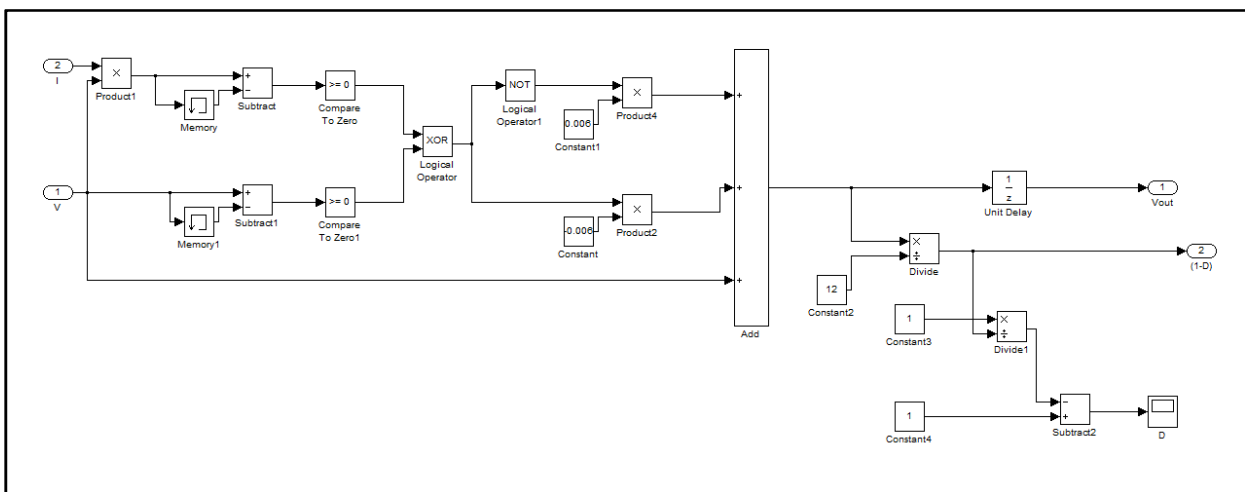


Figure IV.5:Modèle l'algorithm P&O sous Simulink/Matlab

IV-4-2-B Modélisation de l'algorithm incrémentale de l'inductance (INC)

Cette méthode de contrôle étudié dans le **chapitre III** est une méthode célèbre déjà étudié par plusieurs littérature; le fonctionnement de l'algorithm **INC** est bien expliqué sur l'organigramme de la **Figure III.7**. ce dernier on peut le modéliser sous **Simulink** comme suit (**Figure IV.6**) :

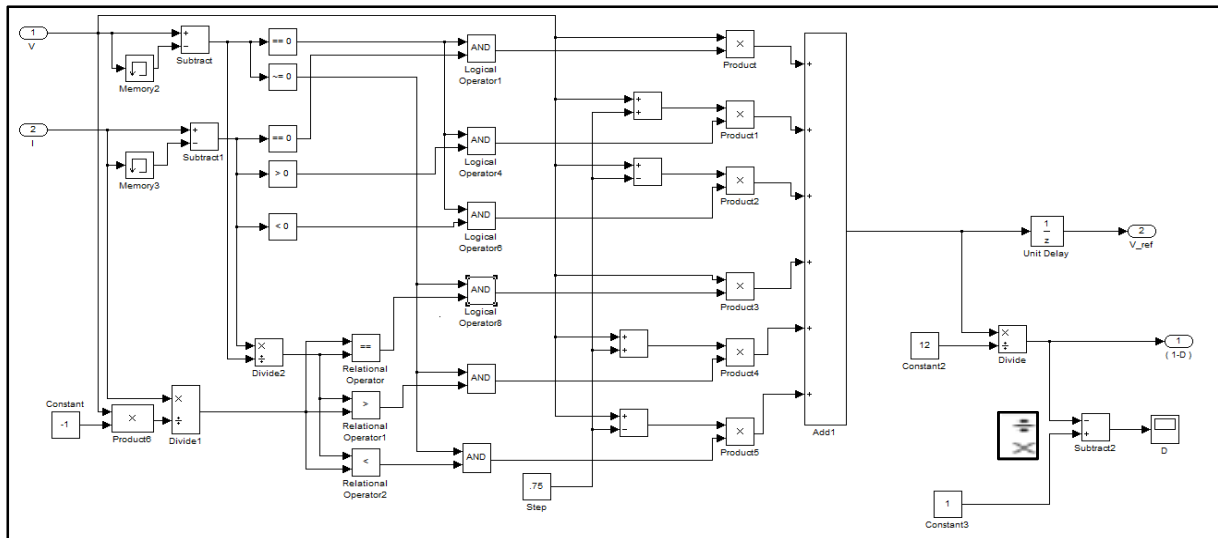


Figure IV.6 :Modèle l’algorithme INC sous Simulink/Matlab

IV-4-3 Modélisation du convertisseur (boost) :

Les équations de base pour le hacheur survolteur ont été données dans la section III. comme expressions (III.11) et (III.12) ces équation mènent au modèle suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_L = i - C_1 \frac{dv}{dt} \\ i_s = (1-\alpha)i_L - C_2 \frac{dvs}{dt} \\ V = (1-\alpha)V_s + L \frac{diL}{dt} \end{array} \right.$$

Ces équations sont implémentées en Simulink. Le bloc correspondant peut être dans la figure suivante :

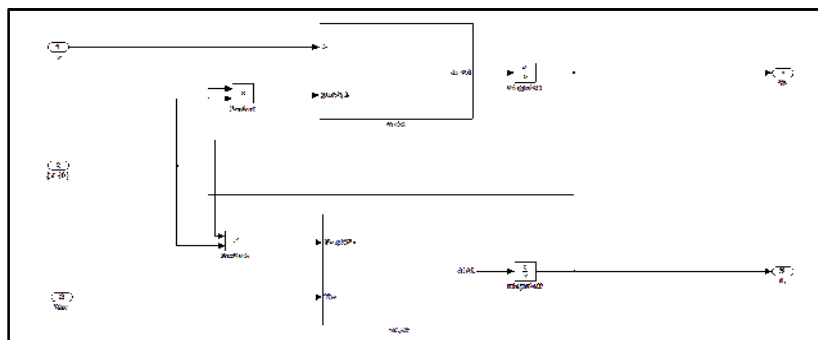


Figure IV.7 :Modèle de hacheur (BOOST) sous Simulink/Matlab

Dans le circuit convertisseur DC-DC précédents, les valeurs des composantes utilisées sont :

- C2 = 15 μF
- L = 10 μH

IV-4-4 Modèle d’une batterie d’accumulateur au plomb:

Le modèle de la batterie d'accumulateur au plomb est représenté sous simulink est donné par :

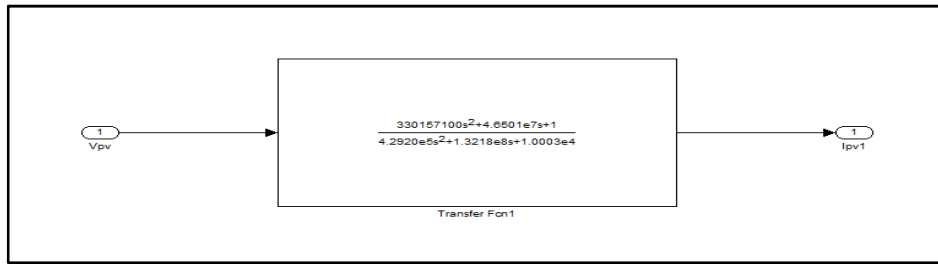


Figure IV.8 : Schéma de bloc d'une batterie d'accumulateur au plomb

On donne : [11].

$$R_{bs} = 0.0013 \text{ Ohm}$$

$$R_{b1} = 2.84 \text{ Ohm}$$

$$R_{bp} = 10 \cdot 10^3 \text{ Ohm}$$

$$C_{b1} = 2.5 \text{ mF}$$

$$C_{bp} = 4.501 \text{ kF}$$

IV-5 Résultats de simulation et évaluation

IV-5-1 Etude du système solaire sans régulateur (MPPT) alimenter une charge resistive :

Le but de cette étude c'est de voir le comportement des panneaux photovoltaïque afin de le réguler pour mieux l'exploiter et extraire le maximum de sa puissance.

La Figure IV.9, représente le schéma de bloc de l'association d'un panneau PV avec une charge résistive.

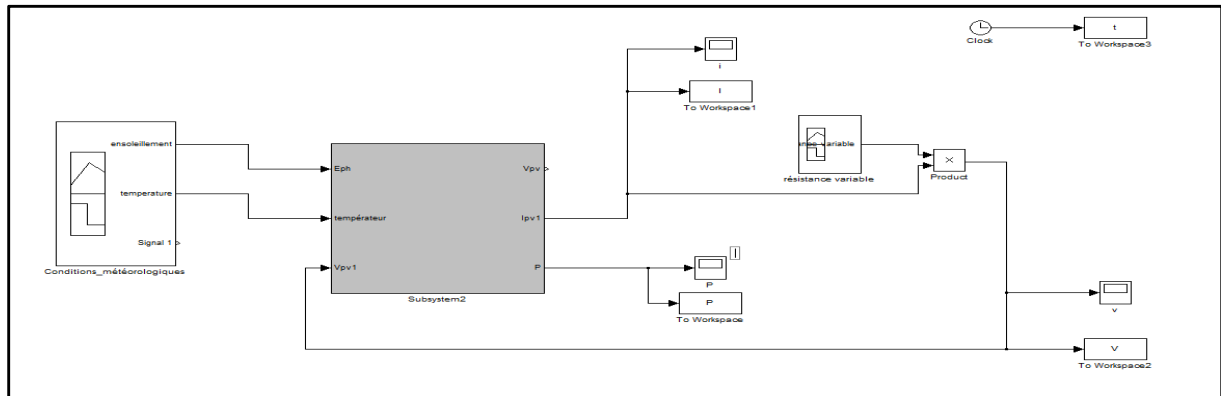


Figure IV.9 : système solaire sans MPPT alimenter une resistance

Pour nos simulations, les valeurs de la résistance variable **R**, ont été considéré de tel façon que :

- **R** la valeur pour laquelle le point de fonctionnement exigé par la charge est celui du point de puissance maximal de notre générateur **PV**, on l'obtient soit après calcul soit après plusieurs simulations on variant à chaque fois la valeur de **Ra** concurrence d'atteindre le point de puissance maximal du **GPV**.
- **R** la valeur pour laquelle le point de fonctionnement a la droite du point de puissance maximal du **GPV**.

- **R** la valeur pour laquelle le point de fonctionnement a la gauche du point de puissance maximal du **GPV**.

Les résultats de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque sont représentés sur les schémas des figures ci-dessous.

IV-5-1-A Résultats de simulation pour la valeur de Résistance optimale :

Dans ce cas, le changement climatique, la température et l'éclairage sont représentés sur la **Figure IV.10**. Si l'on divise le temps de simulation en deux. La première fois de **0 à 24** secondes dans ce temps nous avons varier graduellement l'éclairage de 100w/m^2 à 1200w/m^2 a température constante **25 °C** ,ensuite pendant la deuxième demi période [**24-48**]on fixe l'éclairage a 1000 w/m^2 et on a procédé a un changer la température de **0 à 100 °C** .

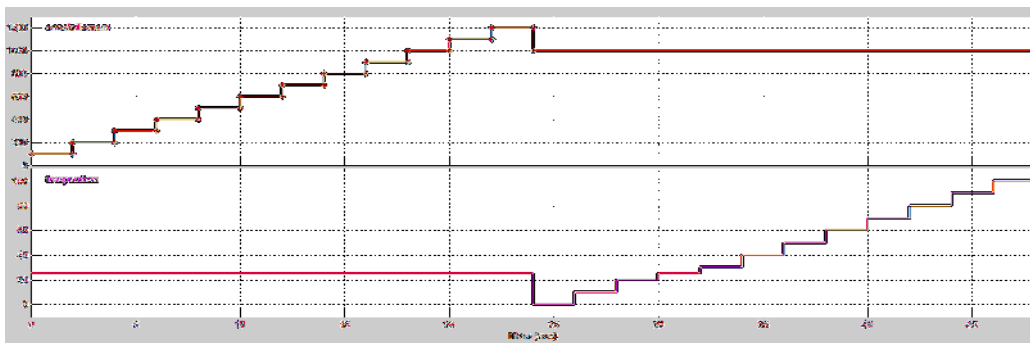


Figure IV.10: modèle de conditions climatiques (température et éclairage)

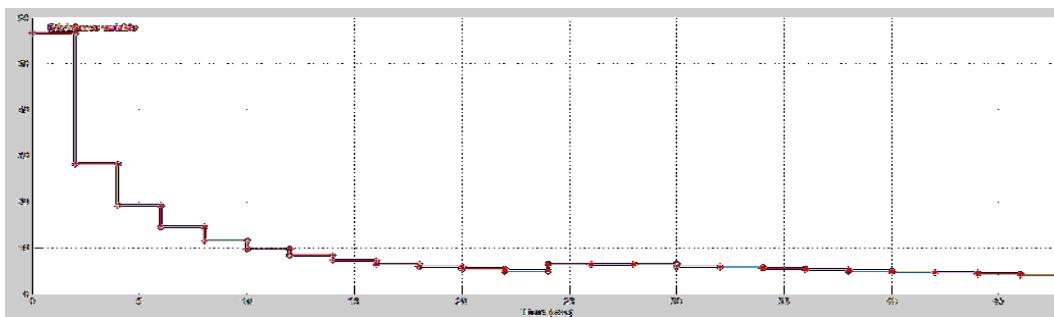


Figure IV.11: modèle de résistance optimale

La **Figure IV.11**représente les valeurs de la résistance variable qui suit la valeur de la résistance optimale de chaque variation de la tension aux bornes du panneau .obtenue à partir de la du rapport tension courant.

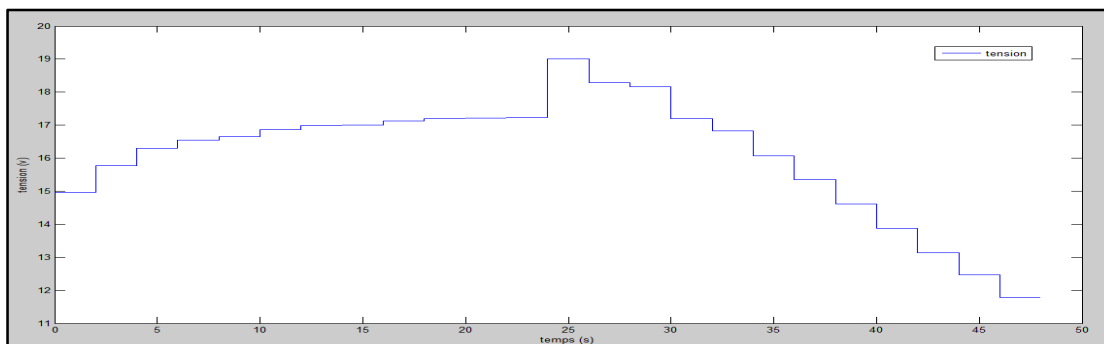


Figure IV.12.a: La Tension V_p aux bornes du générateur PV pour ($R=R_{op}$)

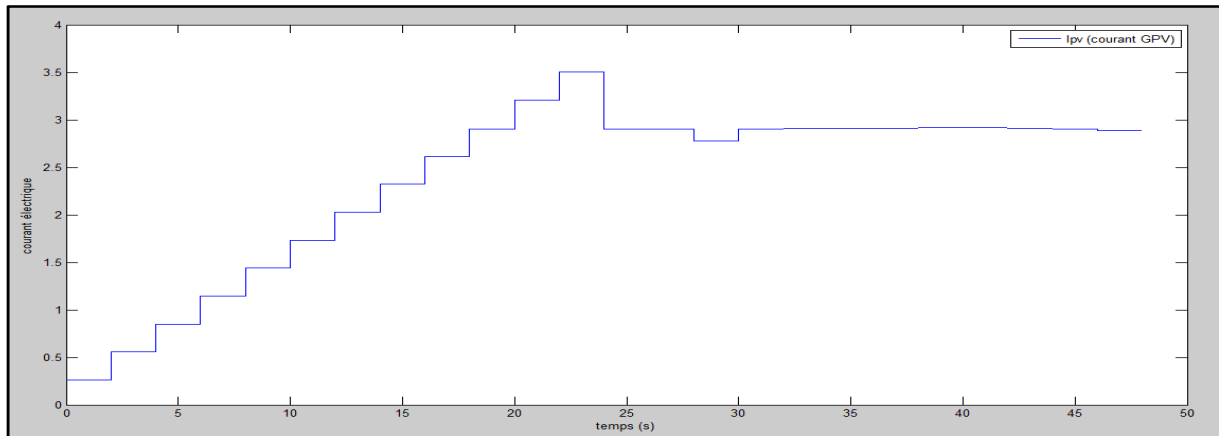


Figure IV.12.b: Le courant I_{pv} aux bornes du générateur PV pour ($R=R_{op}$)

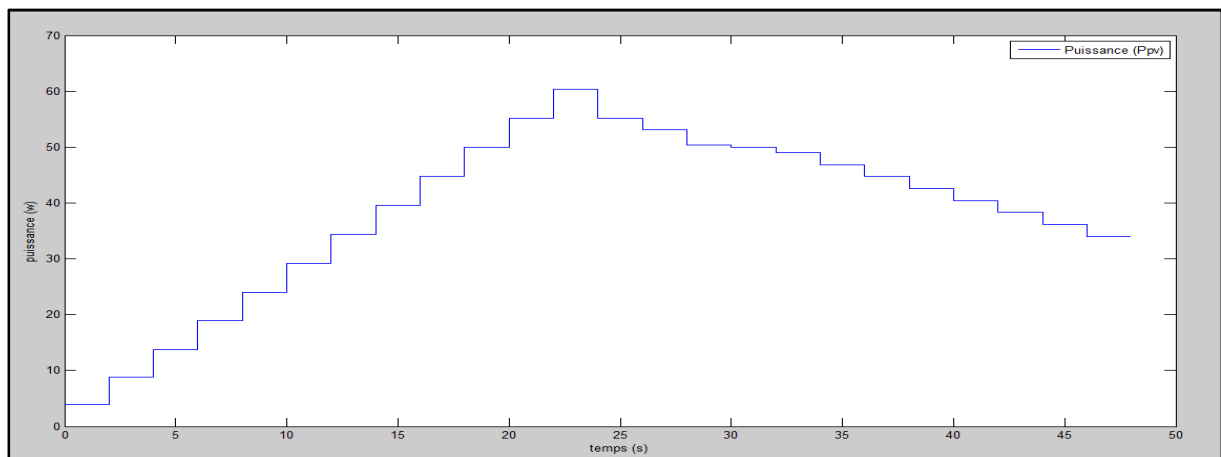


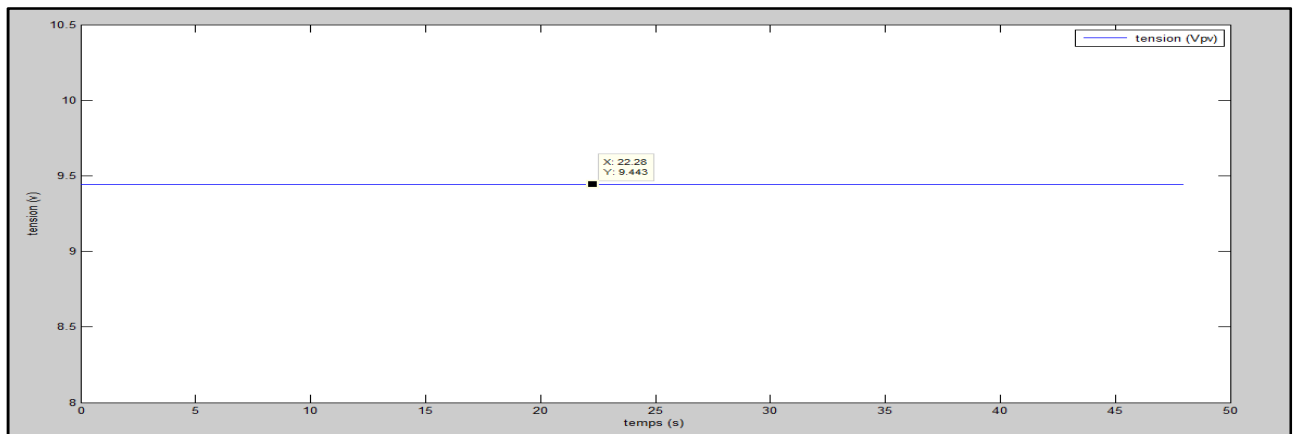
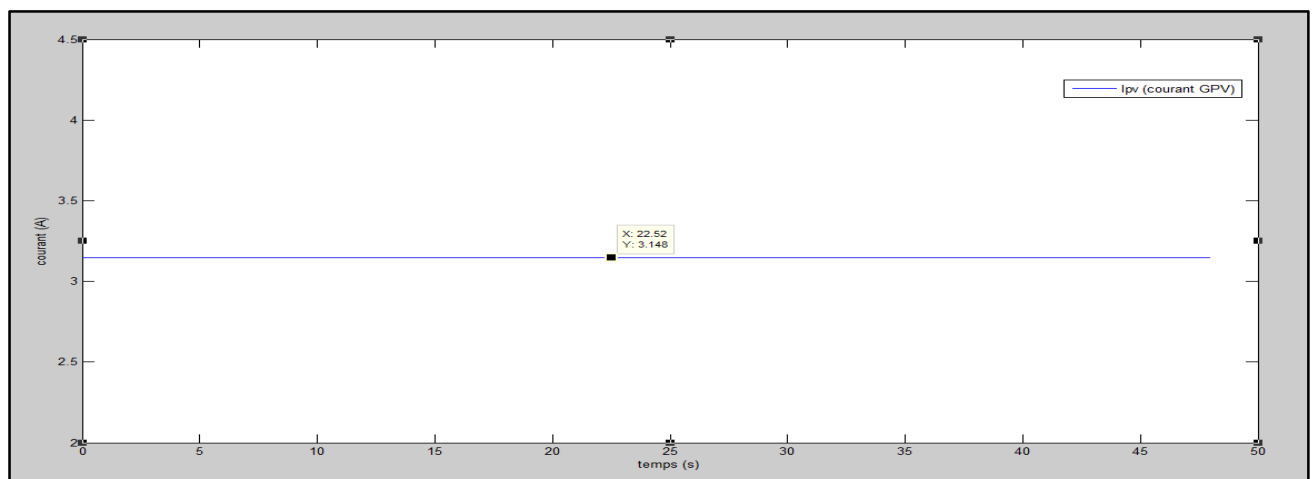
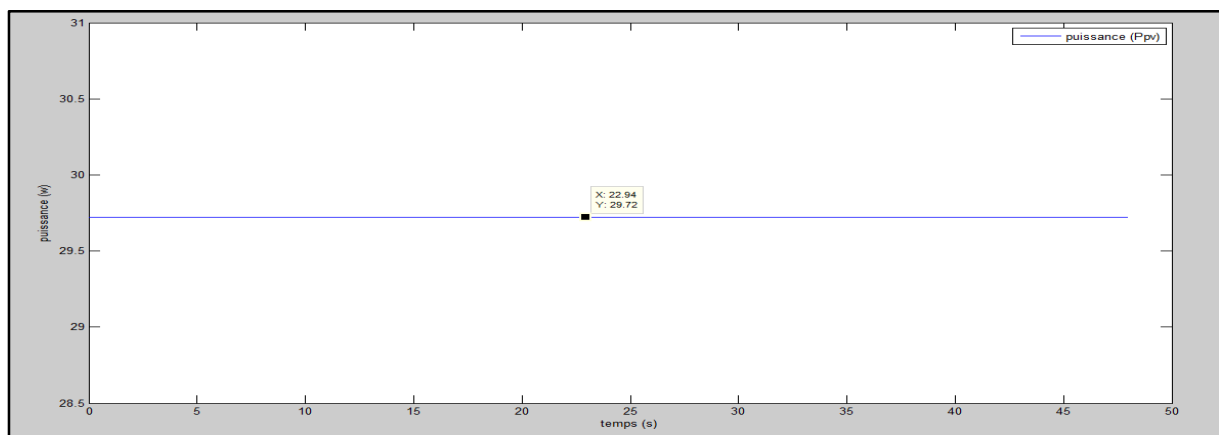
Figure IV.12.c: La Puissance P_{pv} aux bornes du générateur PV pour ($R=R_{op}$)

D'après les **Figures IV.12. (a) et (b)**, nous constatons que la tension (V_{pv}) varie légèrement lors d'un changement d'éclairement. Mais elle est très influencée par le moindre changement de température. Tandis que le courant (I_{pv}) est très influencé par les changements de **température (éclairage)**

D'après la **Figures IV.12.d**, la puissance consommée par la charge est égale à celle débitée par le générateur photovoltaïque qui débite des sorties suivant le modèle des conditions climatiques de la (**Figure IV.10**). Ce qui nous confirme que nous sommes effectivement au point de puissance maximal pour cette valeur de R variable.

IV-5-1-B Résultats de simulation pour la valeur de R ni pas optimal :

Dans ce cas nous allons travailler avec les valeurs standards de l'éclairement (1000w/m^2) et la température (25 C^0) et deux valeurs différentes de la résistance optimale à savoir :
 $R=3\ \Omega$; valeur inférieur a de la résistance optimale ($R_{op}=5.92\ \Omega$)
 $R=80\ \Omega$; valeur superieur a de la résistance optimale

IV-5-1-B-1 Résultats de simulation pour la valeur de $R=3 \Omega$:**Figure IV.13.a:** la tension V_{pv} aux bornes du générateur PV pour $R=3 \Omega$ **Figure IV.13.b:** Le courant I_{pv} aux bornes du générateur PV pour $R=3 \Omega$ **Figure IV.13.c:** La Puissance P_{pv} aux bornes du générateur PV pour ($R=3 \Omega$)

D'après les Figures IV.13. (a), (b), et (c), nous constatons que la tension (V_{pv}) plus basse que la tension optimale, mais le courant électrique plus proche a la valeur de court-circuit (I_{cc}), et la puissance consommée par la charge est inférieure à la puissance optimale.

Donc le point de fonctionnement se situe à gauche du point de puissance maximal du GPV.

IV-5-1-B-2 Résultats de simulation pour la valeur de $R=80 \Omega$:

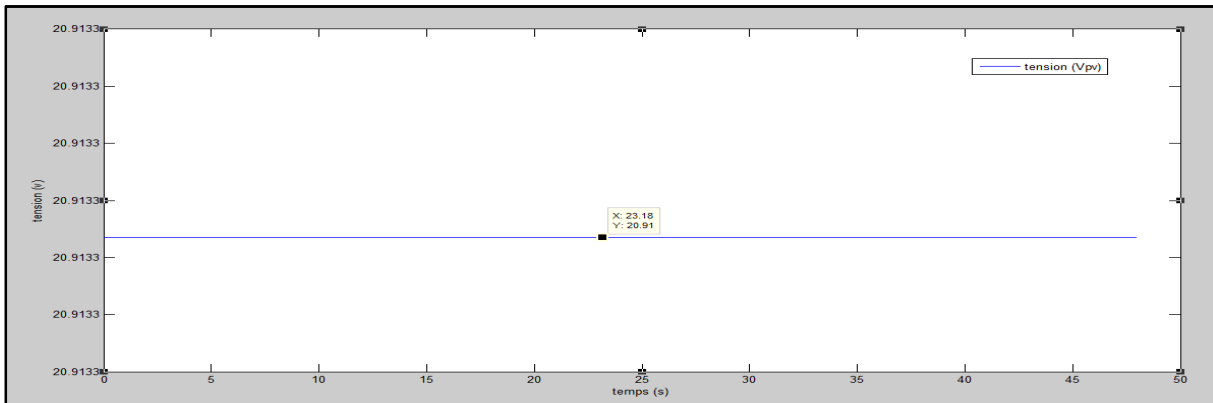


Figure IV.14.a: la tension V_{pv} aux bornes du générateur PV pour $R=80 \Omega$

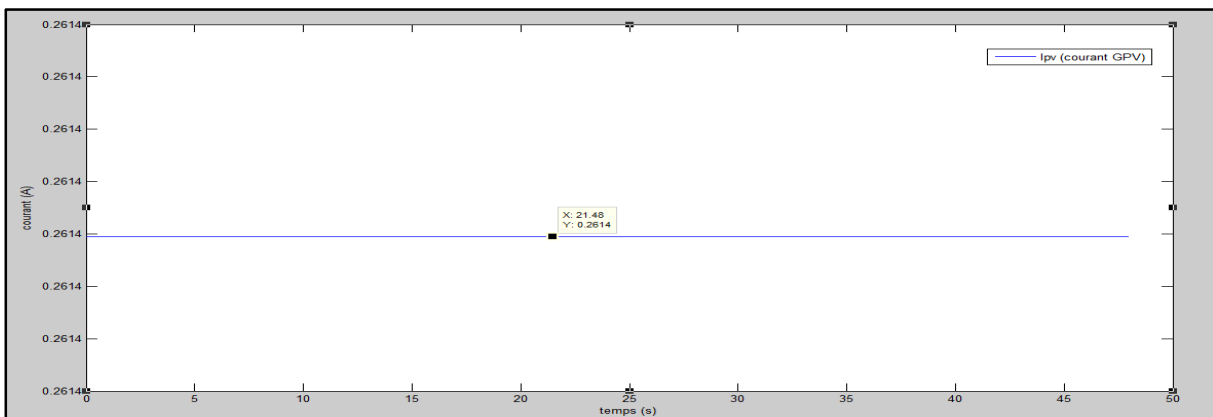


Figure IV.14.b: Le courant I_{pv} aux bornes du générateur PV pour $R=80 \Omega$

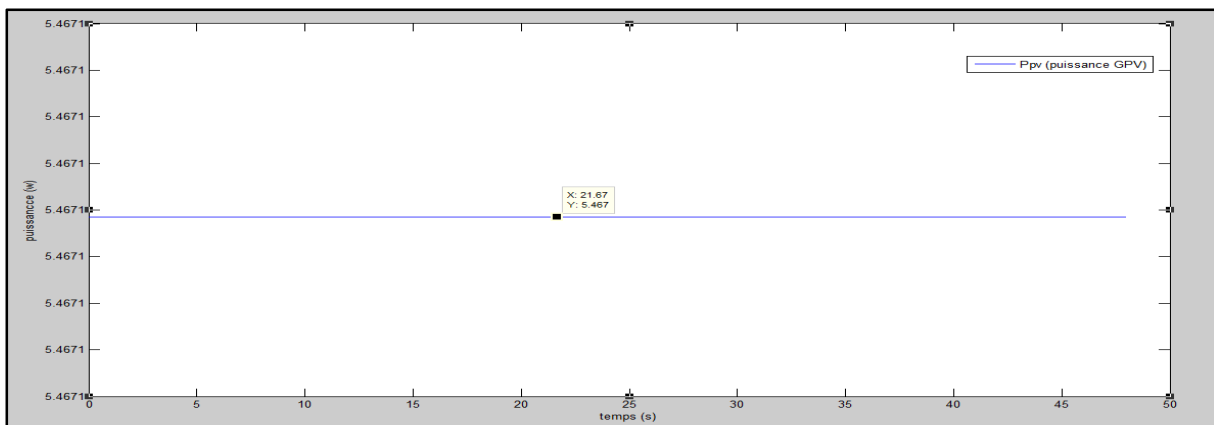


Figure IV.14.c: La Puissance P_{pv} aux bornes du générateur PV pour ($R=80 \Omega$)

D'après les Figures IV.14. (a), (b), et (c), nous constatons que la tension (V_{pv}) est proche de la valeur de circuit ouvert (V_{co}), mais le courant électrique plus bas par rapport au courant optimale, et la puissance consommée par la charge est inférieure à la puissance optimale. Donc le point de fonctionnement se trouve à droite du point de puissance maximale du GPV.

IV-5-2 Etude du système solaire avec régulateur (MPPT) alimenter une charge resistive :

Le but de cette étude c'est d'analyser le comportement dynamique de système de régulation et de conversion du panneaux photovoltaïque pour mieux l'exploiter et extraire le maximum de sa puissance ,donc pour trouver les bonne résultat nous adoptons pour nos simulations les conditions métrologies standards.

La **Figure IV.15**, représente le schéma bloc de l'association d'un panneau **PV** avec un convertisseur (**DC/DC BOOST** idéale c'està dire pas de perte de puissance le rendement égale**100%**) et un système de suivant le max de puissance (**P&O et INC**) pour alimenter une charge résistive (les valeurs de la charge résistive seront représentées dans la **Figure IV.16**).

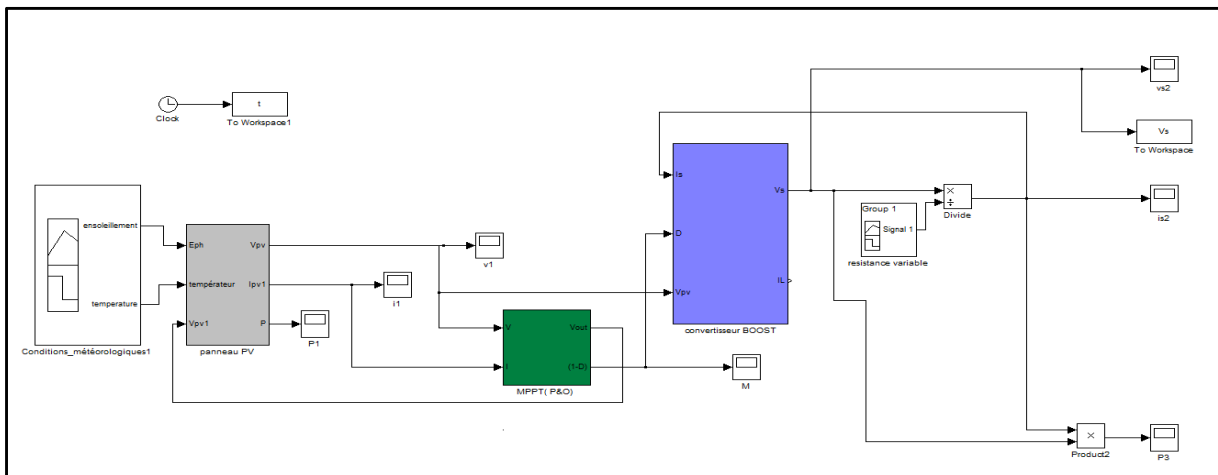


Figure IV.15 : système solaire avec MPPT et convertisseur (BOOST) alémenter une resistance

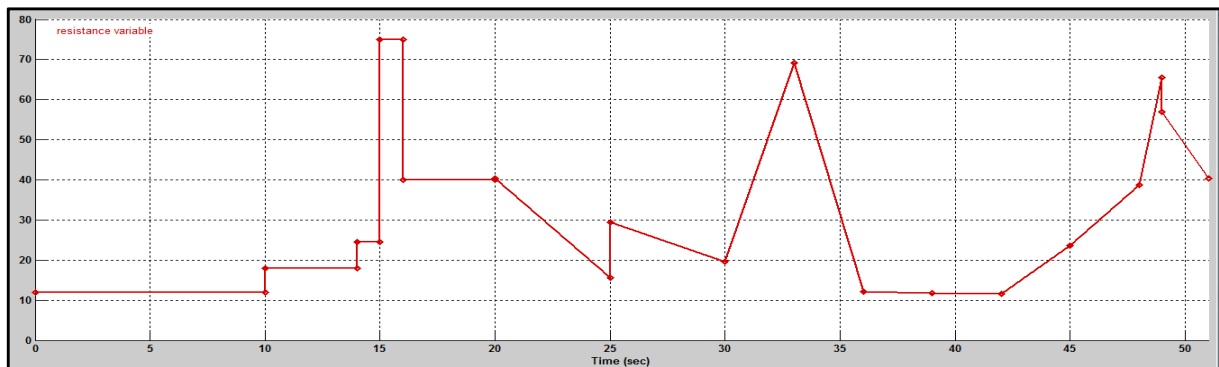


Figure IV.16 : les valeurs de la resistance variable qui réprésenter la charge resistive

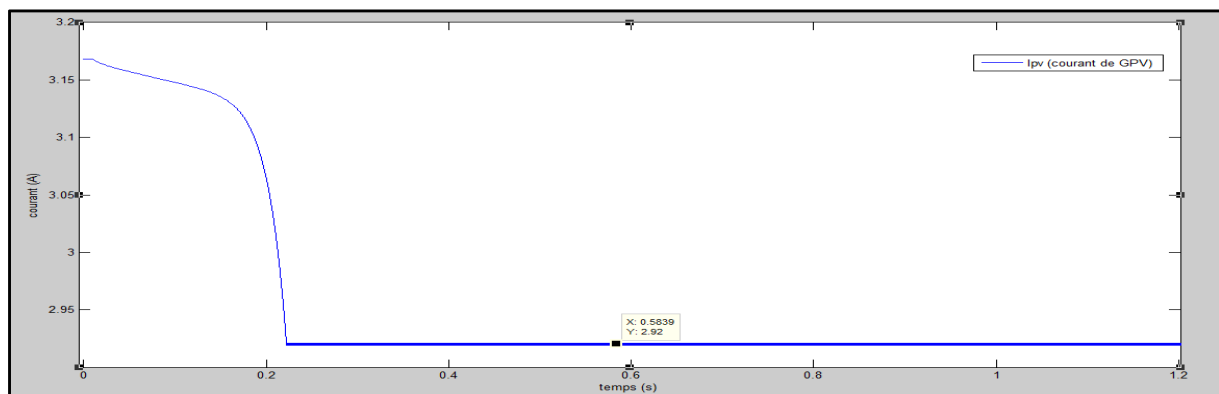


Figure IV.17.a : le courant (**Ipv**)débitée par le GPV

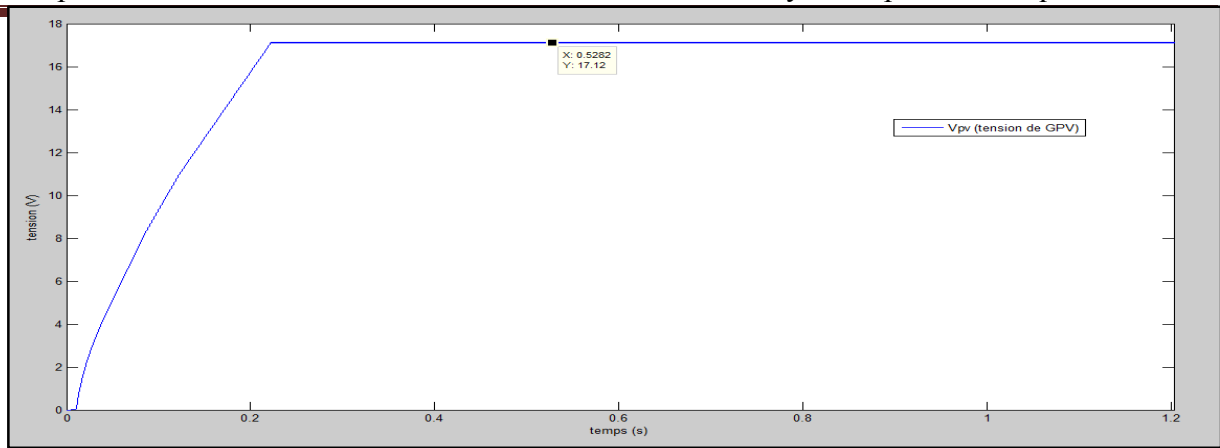


Figure IV.17.b: la tension (V_{pv}) électrique débitée par le GP

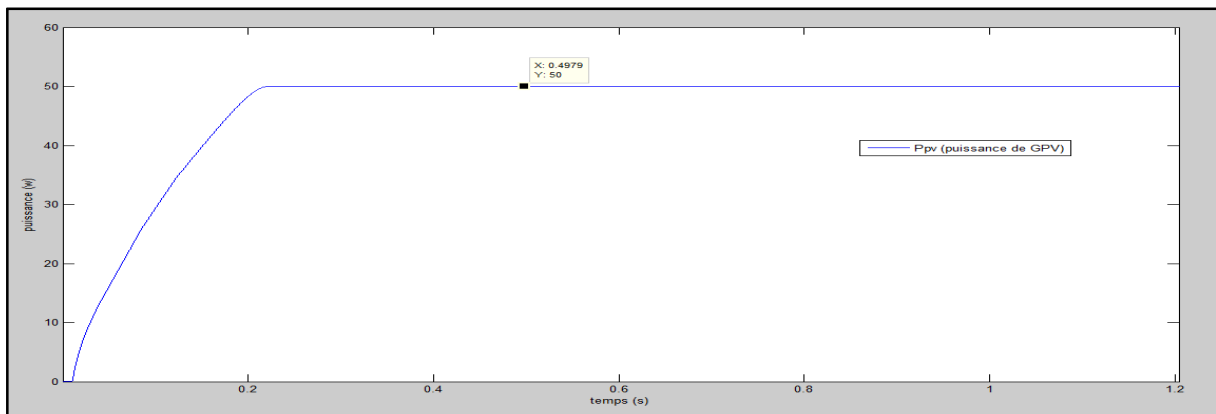


Figure IV.17.c: la puissance (P_{pv}) débitée par le GPV

D'après les Figures IV.17.(a) ,(b),(c) ; Nous constatons que pendant (0.2) seconde le courant et la tension même pour la puissance passent par le régime transitoire avant de se stabiliser à la valeur optimale pour les méthodes MPPT (P&O et INC) et ($\Delta V=0.006v$).

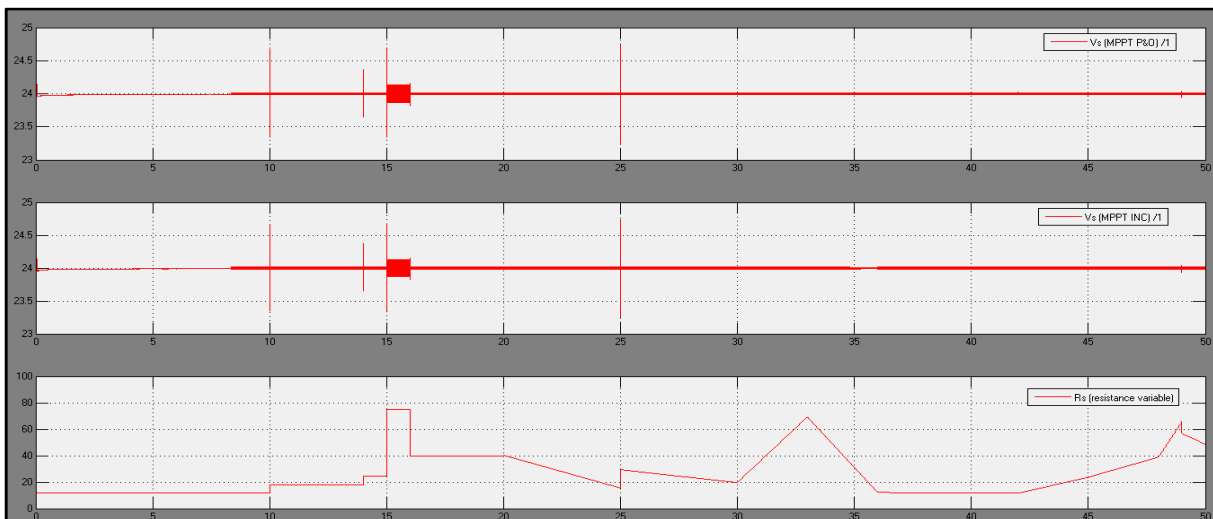


Figure IV.18.a: Tensions du sortir (V_s) au bornes du convertisseur (BOOST) pour les méthodes MPPT (P&O et INC) et ($\Delta V=0.006v$) et la résistance variable pour de sortir

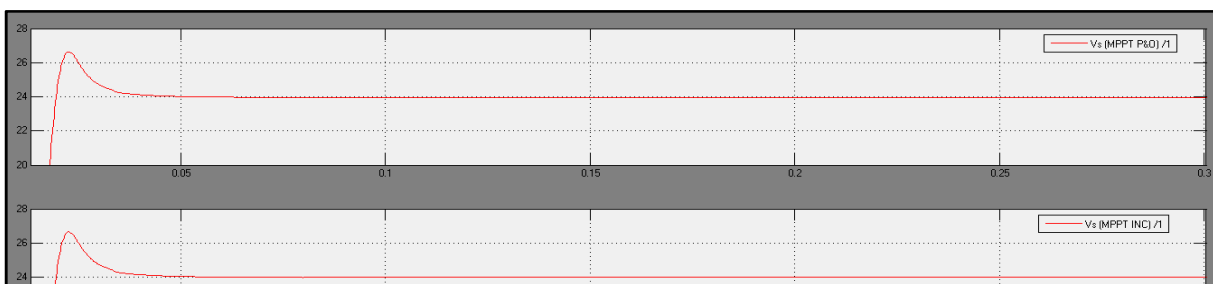


Figure IV.18.b: le pic de tension (V_s) suite à l'appelle de charge (regime transitoire)

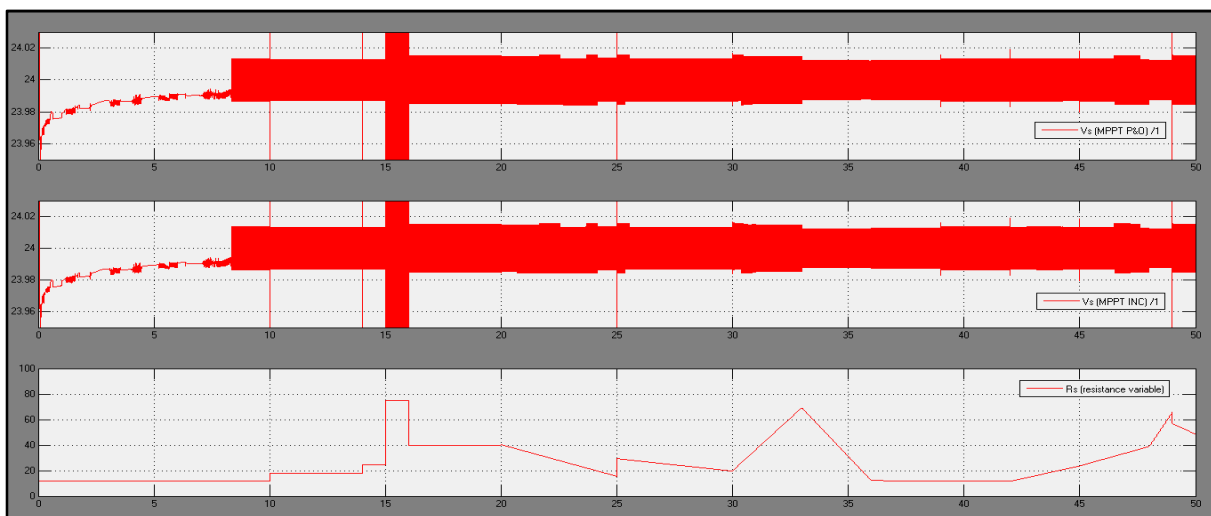


Figure IV.18.c: la tension (V_s) au régime permanent

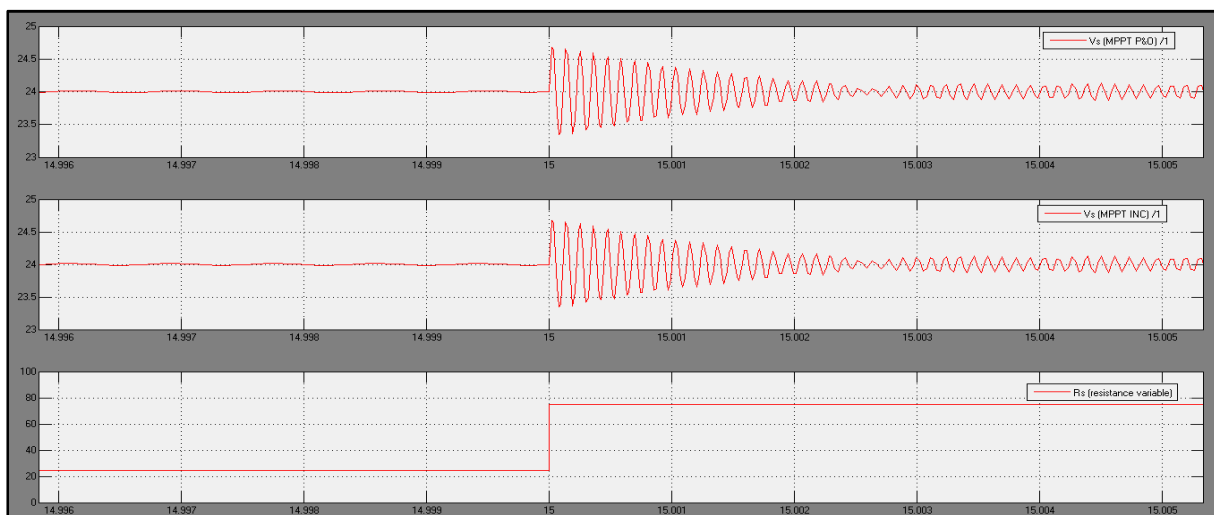


Figure IV.18.d: les oscillations de tension (V_s) suite à La brusque de la charge (réponse indicielle)

D'après les Figures IV.18.(a) ,(b),(c)et(d) ; Nous constatons que pendant (8.35 s) seconde de temps la tension (V_s) va passer par le régime transitoire par une valeur de (26.99 v) à la fin elle se stabilise au régime permanent avec une valeur de tension presque stable ($V_s \approx 24$ v) comme indique la Figures IV.18.(b).mais dans le régime permanent on remarque :

- Des petites oscillations ou la tension varié légèrement ($\Delta V_s=0.006$ V) suivant la variation de la charge et la variation du rapport cyclique (α) sous l'algorithme (P&O).
- des oscillations s importantesla tension varié ($\Delta V_s=0.1$ V) dues aux variations de la résistance on observe des oscillations important au niveau de la tension pour les variations très brusques durant quelques milliseconde est sa disparaît comme indique la **Figure IV.18.d**. Cette durée dépend de l'importance des variations et de la robustesse de la commande et du bon dimensionnement des composants de convertisseur DC-DC. donc toutes autres variations importantes durant cette durée risque de déstabiliser le système.

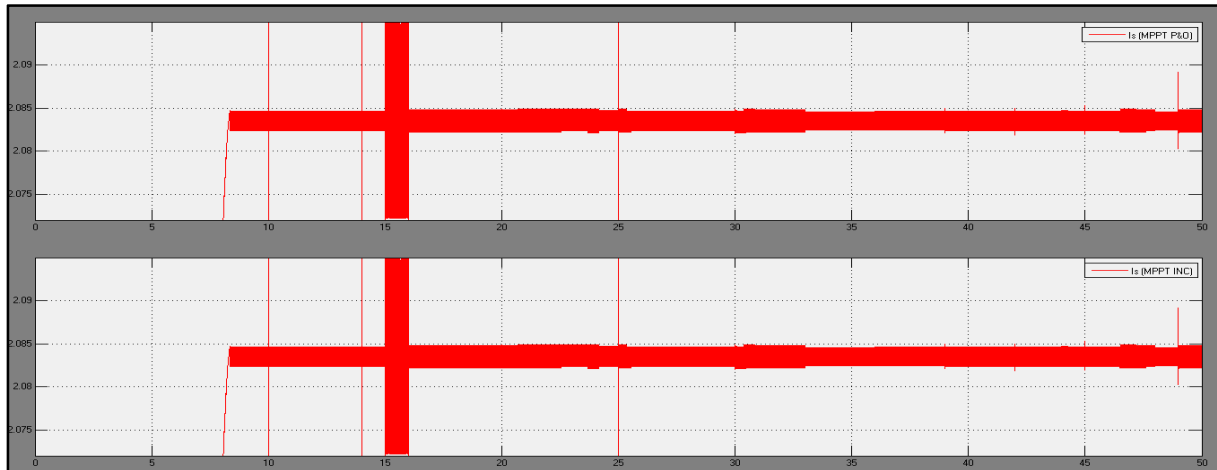


Figure IV.19: le courant (I_s) de sortie au bornes du convertisseur (BOOST) pour les méthodes MPPT (P&O et INC) et ($\Delta V=0.006$ v).

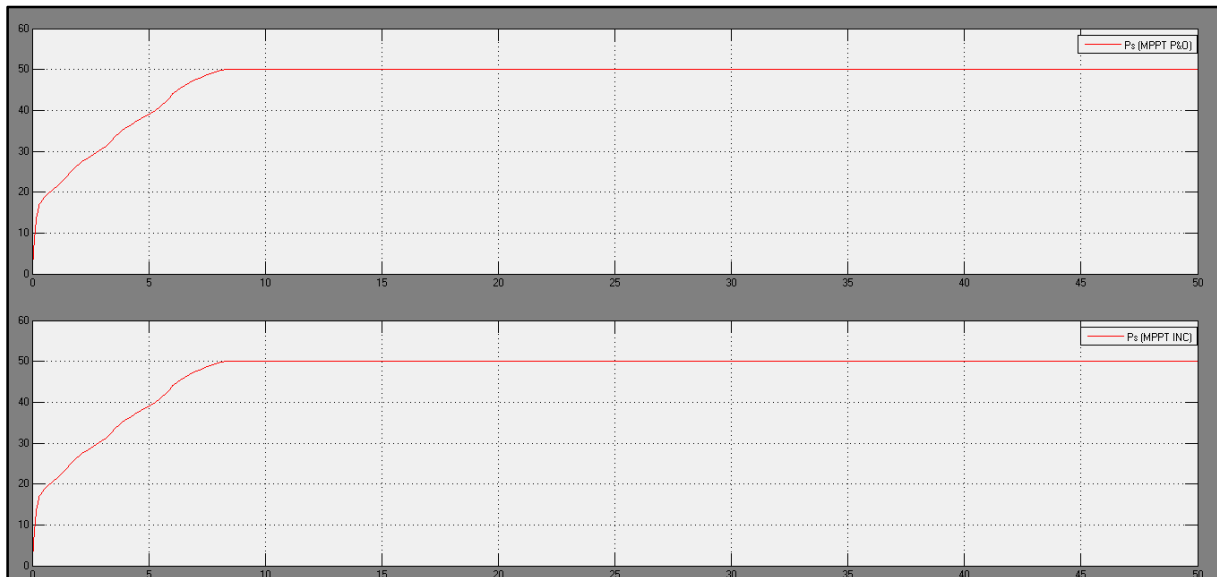


Figure IV.20: la puissance (P_s) de sortie au bornes du convertisseur (BOOST) pour les méthodes MPPT (P&O et INC) et ($\Delta V=0.006$ v)

D'après les **Figures IV.19 et (20)** ; Nous constatons que pendant (**8.35**) seconde le courant (I_s) et la puissance (V_s) va passer de régime transitoire au régime permanent avec une valeur presque stable. Mais dans le régime permanent le courant varie légèrement ($\Delta I_s=0.001$ A)

suivant la variation de la charge et la variation du rapport cyclique (α) ce dernier change de valeur selon l'algorithme (P&O).

Également lorsque la charge varie brusquement on a observé des oscillations important au niveau de l'amplitude de courant durant quelque milliseconde est sa disparaît.

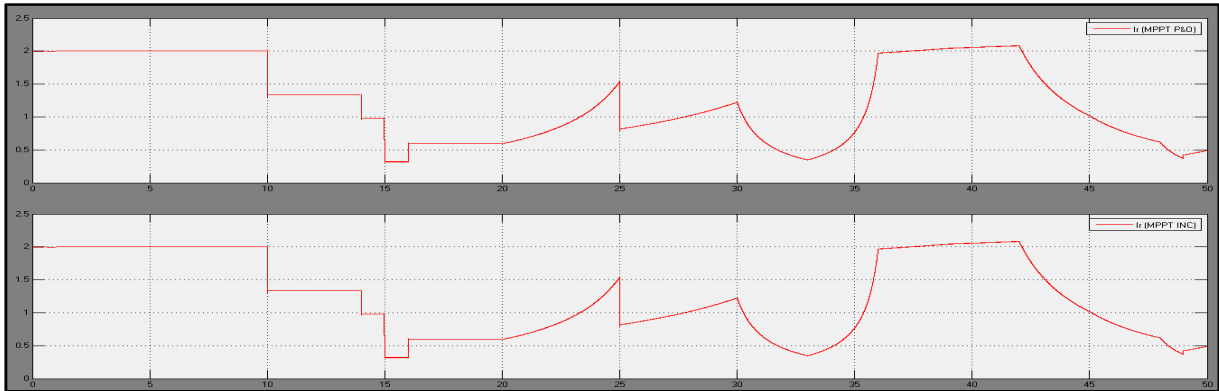


Figure IV.21.a: le courant (I_r) consommé par la charge pour les méthodes MPPT (P&O et INC) et ($\Delta V=0.006v$)

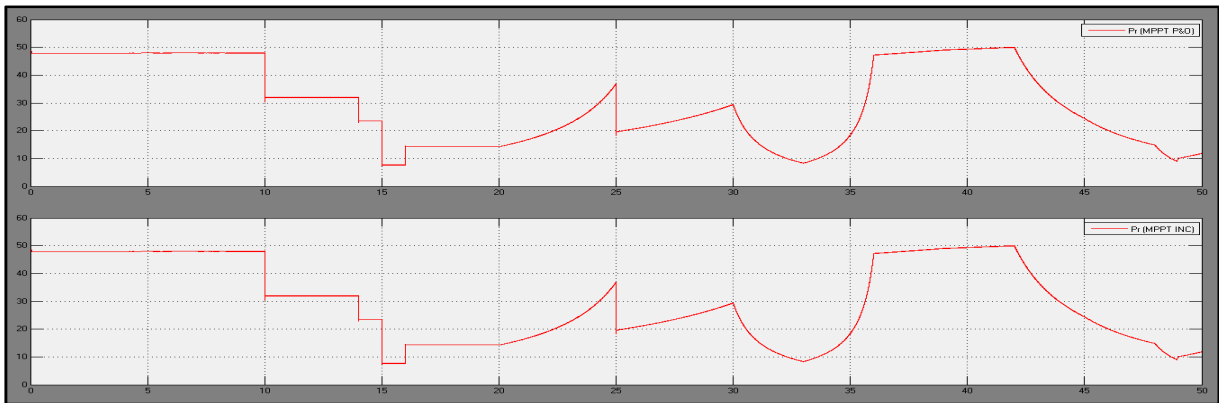


Figure IV.21.b: la puissance (P_r) consommé par la charge pour les méthodes MPPT (P&O et INC) et ($\Delta V=0.006v$)

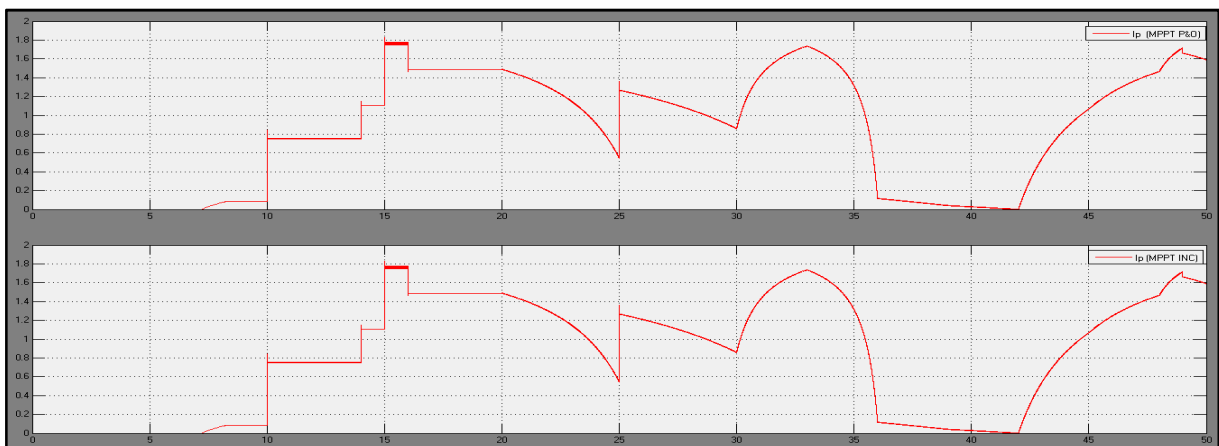


Figure IV.21.c: le courant (I_p) perdu non pas exploiter pour les méthodes MPPT (P&O et INC) et ($\Delta V=0.006v$)

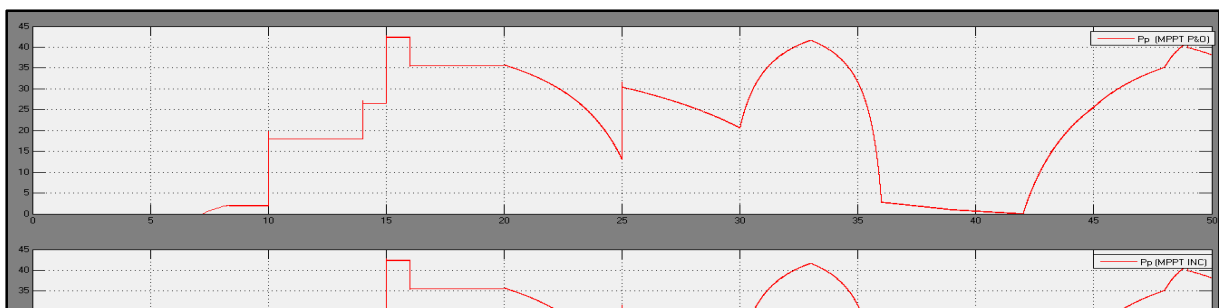


Figure IV.21.d: la puissance P_p perdue non pas exploiter pour les méthodes MPPT (P&O et INC) et ($\Delta V=0.006v$)

D'après les **Figures IV.21. (a), (b), (c)et(d)** ; Nous constatons dans l'intervalle de temps de $[0s, 10s]$ que toute l'énergie fournir par le GPV est consommé cas de la charge optimale. quand la charge prend des valeurs plus grandes que la résistance optimale le système produit plus qu'il ne consomme. Quand la charge prend des valeurs plus petites que la résistance optimale le système consomme plus qu'il ne produit. puis que la résistance prendre une valeur minimale requise pour le système non pas tombée dans le cas d'un déficit , comme le montre la **Figures IV.21.(d)** on a presque une moyen de 30W perdu pour éviter cet perte Ily a deux solution soit on stocker cet énergie soit on distribuer sur le réseaux publique.



Figure IV.22.a: les puissances (P_s) de sortir aux bornes des convertisseurs (BOOST et BUK-BOOST) pour les méthodes MPPT (P&O et INC) et ($\Delta V=0.6v$)

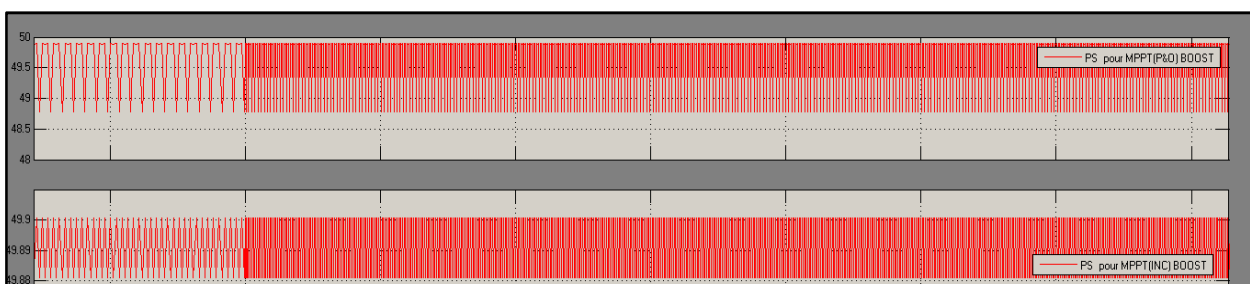


Figure IV.22.b: les valeurs des puissances (P_s) de sortir aux bornes des convertisseurs (**BOOST** et **BUK BOOST**) pour les méthodes MPPT (**P&O** et **INC**) et ($\Delta V=0.6v$)

D'après les **Figures IV.22. (a) et (b)** ; Nous constatons que pour la méthode de **P&O**, toutes les courbes passent par un état transitoire qui dure **0.2s**, une fois que le régime permanent est établi on remarque que :

La valeur de la puissance présente des oscillations au-dessous d'une valeur maximale ce qui implique que la puissance maximale n'est jamais atteinte. Cela est due à l'approximation de la dérivée continue par une différence discrète ($dP \approx \Delta P$), ce qui conduit à l'impossibilité

d'annuler le gradient $\frac{dP}{dV}$. Le rapport cyclique oscille autour de la valeur **0.5** et **0.38** pour une

valeur de charge optimale. Pour la méthode à contre réaction de puissance basée sur l'algorithme de l'**INC** on constate que les valeurs de la tension, courant et puissance sont presque stables et ne présentent aucune oscillation. Comme dans le cas d'un fonctionnement sans MPPT.

On constate que l'algorithme **P&O** rattrape le point optimal pour différentes valeurs de la charge avec une oscillation autour du point de puissance maximale, tel que le pas ($\Delta V=0.6v$), mais les oscillations de l'algorithme **P&O** plus important par rapport à l'algorithme (**INC**).

Par contre si on diminue le (ΔV) à des valeurs ($\Delta V=0.06v$) et ($\Delta V=0.006v$) on aura l'absence des oscillations pour tous les deux algorithmes donc on a choisi la valeur **0.006** qui représente le pas de (ΔV).

IV-5-3 Etude du système solaire avec régulateur (MPPT) alimenter une charge (batterie) :

Afin d'évaluer le temps de réponse des deux mécanismes de poursuite, ces derniers sont soumis à des variations des conditions climatiques (l'ensoleillement et température), la **Figure IV.23**, représente le schéma bloc de l'association d'un panneau **PV (module M₅₀)** avec un convertisseur sur valeur (**DC/DC BOOST** idéale c'est à dire pas de perte de puissance le rendement égale **100%**) et un système de suivant le point maximale de la puissance (**P&O**), pour alimenter une batterie de **24V** nous sommes obligés d'appliquer une tension de (**25V**) au borne de la batterie .

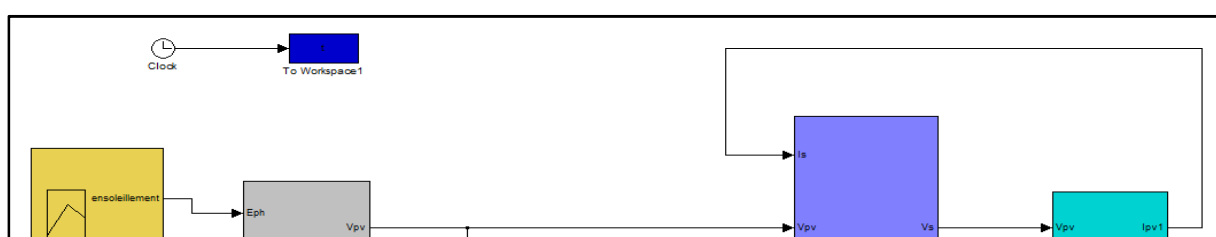


Figure IV.23 : système solaire avec MPPT et convertisseur (BOOST) alémenter une batterie

IV-5-3-A Fonctionnement sous des conditions variables d'enseillement :

Les ombres des structures, de la végétation, et des nuages auront comme conséquence des changements soudains de l'insolation, qui mènent à leur tour à un changement correspondant de la température des cellules surtout pour les systèmes embarqués.

Le premier test est fait sous de changement brusque d'enseillement. Ce cas est observé dans les stations mobiles (Exemple : véhicule solaire) lors de changement brusque de l'angle d'incidence des rayons solaires.

Le deuxième test est fait sous des changements graduels lents d'enseillement, cas observé dans des stations fixes lors de passage de nuages ou d'un quelconque obstacle

Le troisième test fait sous des changements graduels rapides d'enseillement, cas aléatoire de changement d'enseillement à température constante

IV-5-3-A-1 Variations brusques d'enseillement :

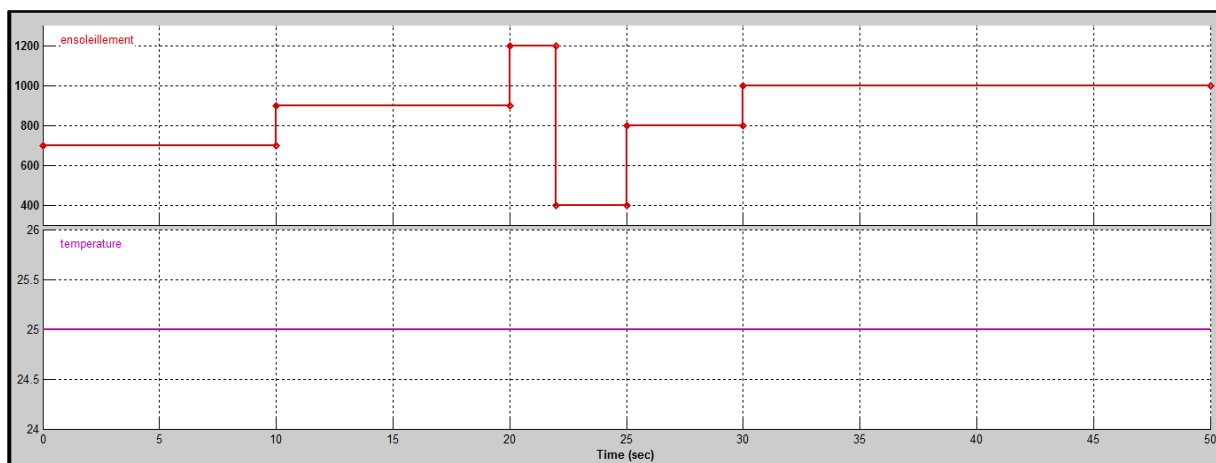


Figure IV.24 : les conditions météorologiques appliquées dans ce cas.

La Figure IV.24 représenté des changements brusques d'enseillement. Ce cas est observé dans les stations mobiles (Exemple : véhicule solaire) lors de changement brusque de l'angle d'incidence des rayons solaires et a température constant

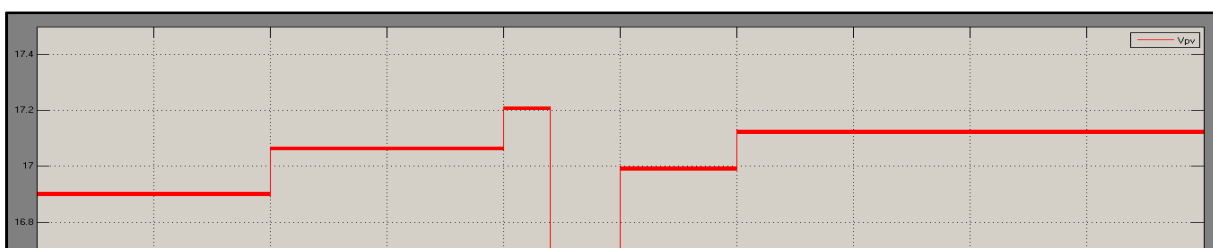


Figure IV.25.a : la tension V_{pv} de sortir du G_{pv}

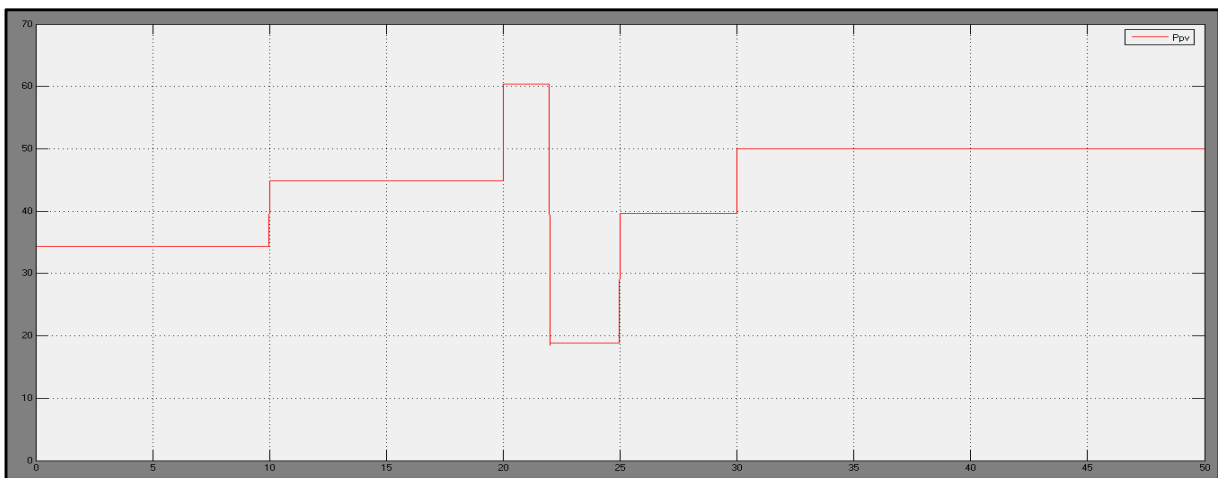


Figure IV.25.b : la puissance P_{pv} de sortir du G_{pv}

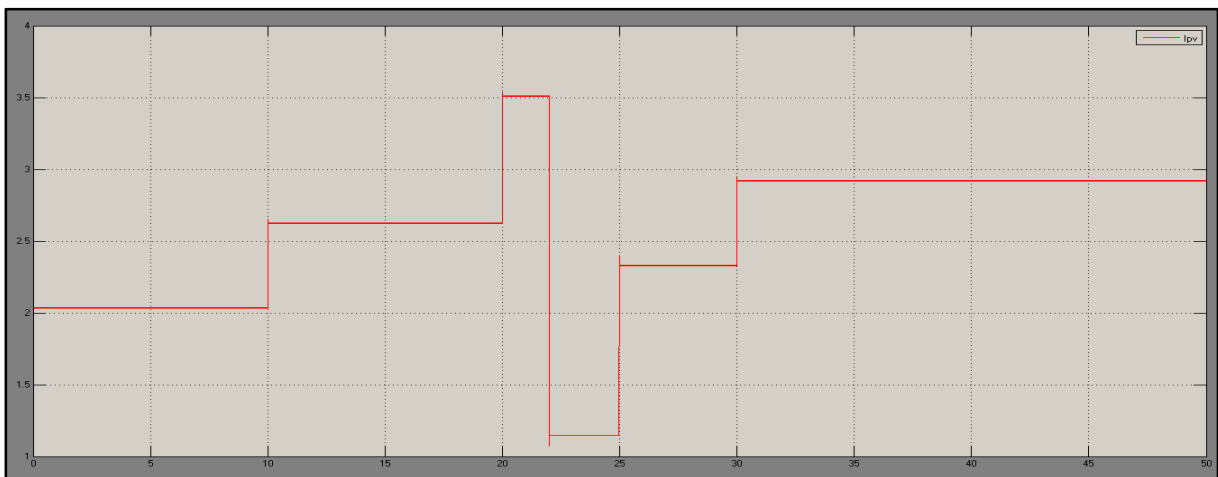
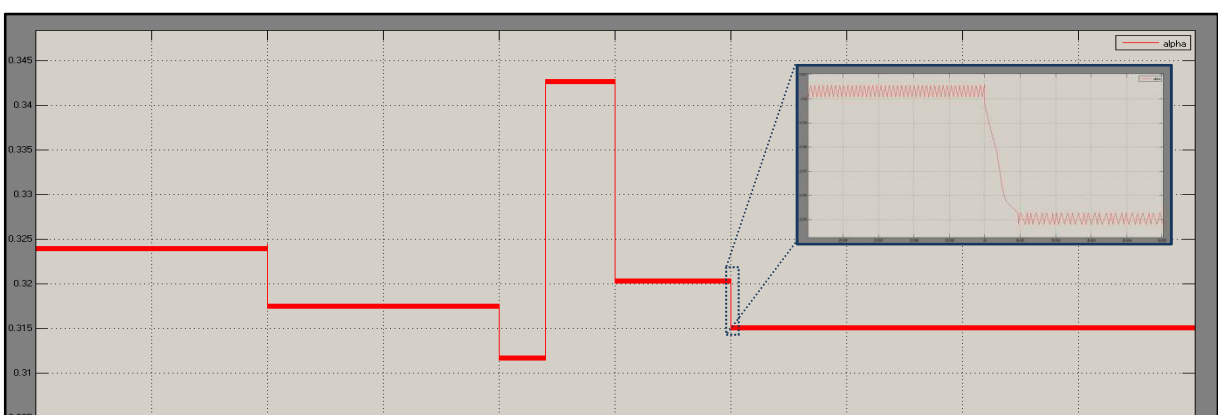


Figure IV.25.c : le courant I_{pv} de sortir du G_{pv}



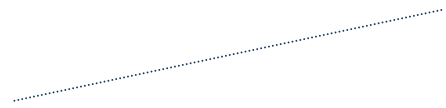


Figure IV.26 : le rapporte cycliques (α) pour ($\Delta V=0.006v$)et leur réponse vis a vi le changement de l'ensoleillement

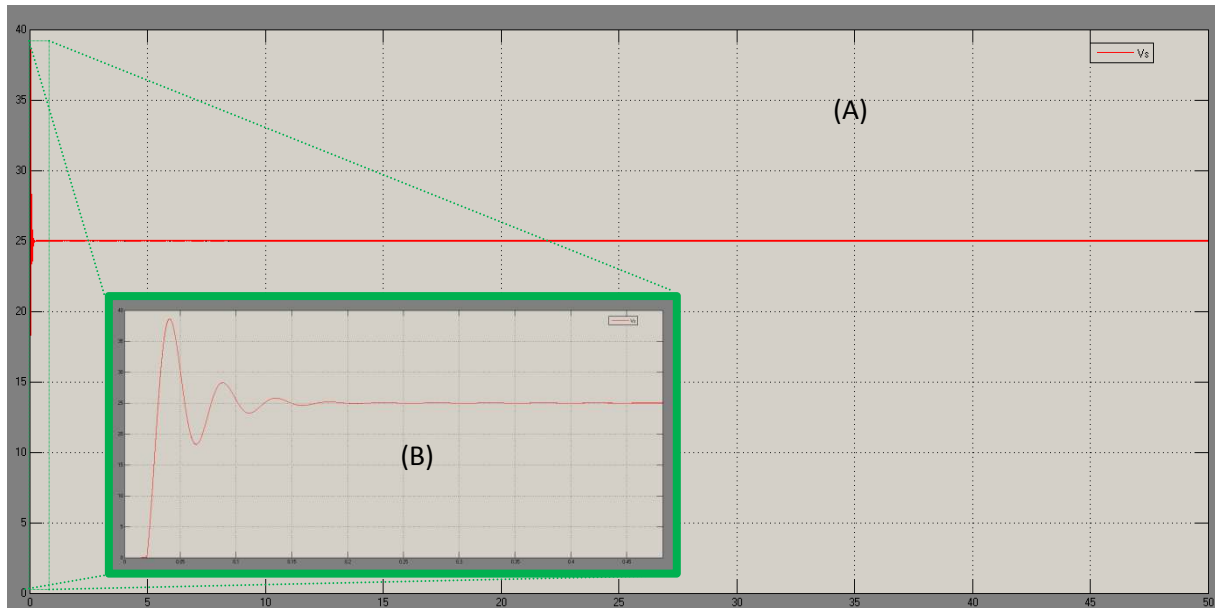


Figure IV.27.a :la tension Vs de sortir de convertisseur (A) avec la forme de tension au régime transitoire (B)

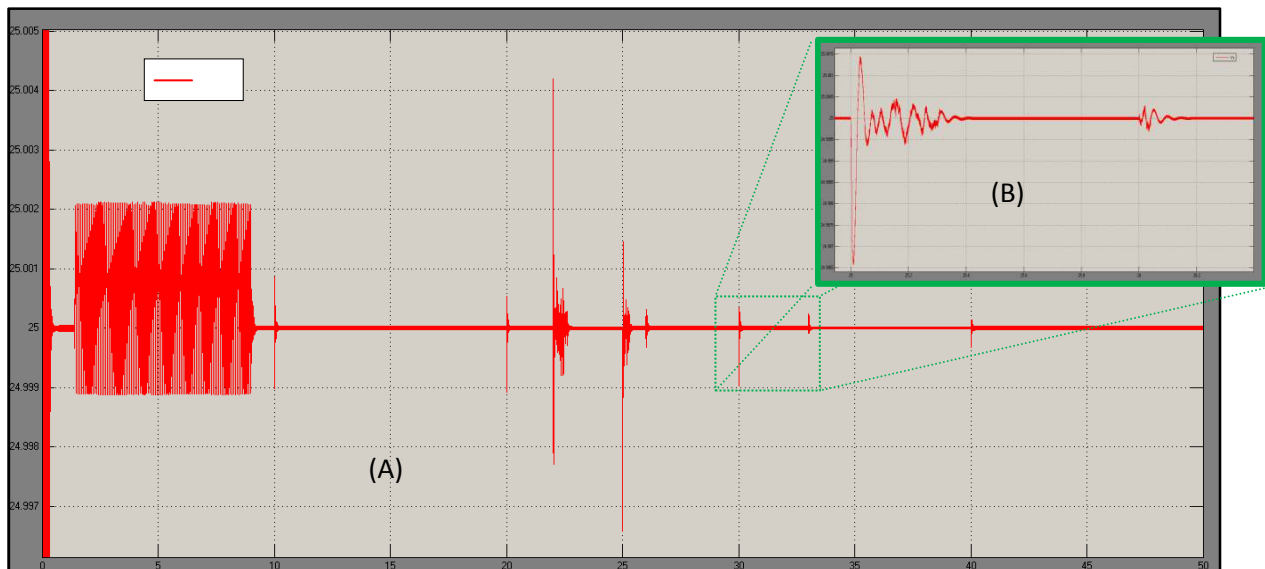


Figure IV.27.b :la tension Vsde sortir de convertisseur au régime permanent (A) et réponse indicielle (B)

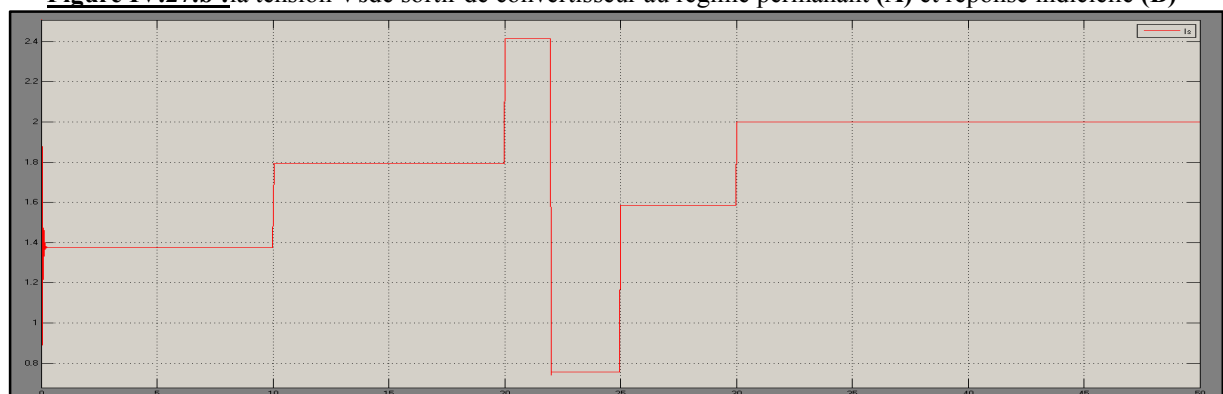


Figure IV.28 : le courant I_{sd} de sortir du convertisseur

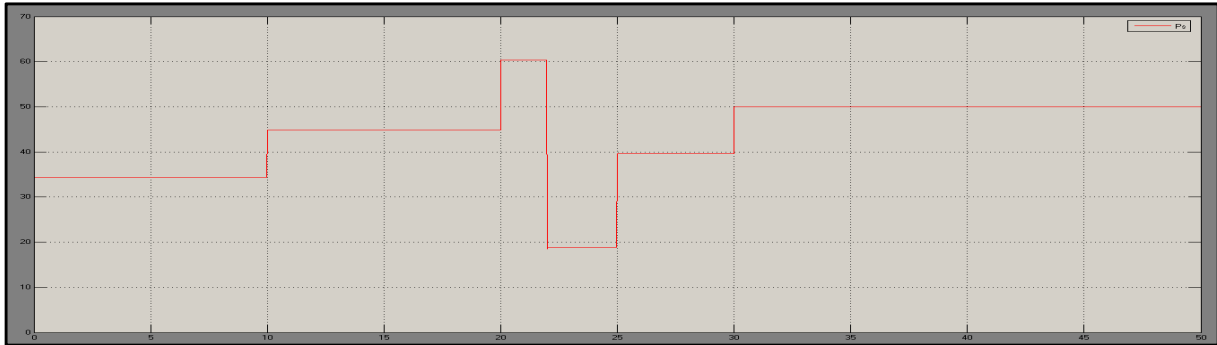


Figure IV.29: la puissance P_s de sortir du convertisseur

D'après les **Figures IV.25. (a), (b) et (c)**, nous constatons que l'algorithme (**P&O**) suit le point maximale de la puissance quelle que soit la variation de l'ensoleillement et forcer le panneau **PV** génère la puissance optimale donc un courant et tension optimal, et on a constaté d'après les **Figures IV.27.(a) et (b)** que la tension de sortie présente des pics et des oscillations à chaque fois qu'on a une perturbation de l'ensoleillement, résultat de la réponse indicielle du convertisseur.

On constater aussi que le courant de sortie (**Figures IV.28**) suit les variations de l'ensoleillement à travers la variation de rapport cyclique (**Figures IV.26**), donc la puissance de sortie du convertisseur (**Figures IV.29**) est égale la puissance de la sortie de GPV

IV-5-3-A-2 Variations graduelles rapide d'ensoleillement :

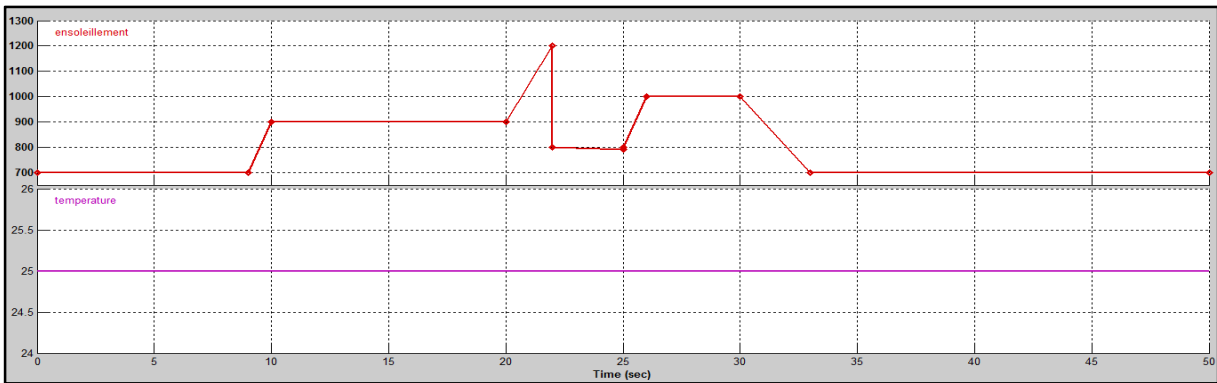


Figure IV.30 : les conditions météorologiques appliquées dans ce cas variation graduelles rapide d'ensoleillement Et la température constante.



Figure IV.31.a : la tension V_{pv} de sortie du G_{pv}



Figure IV.31.b : le courant I_{pv} de sortie du G_{pv}

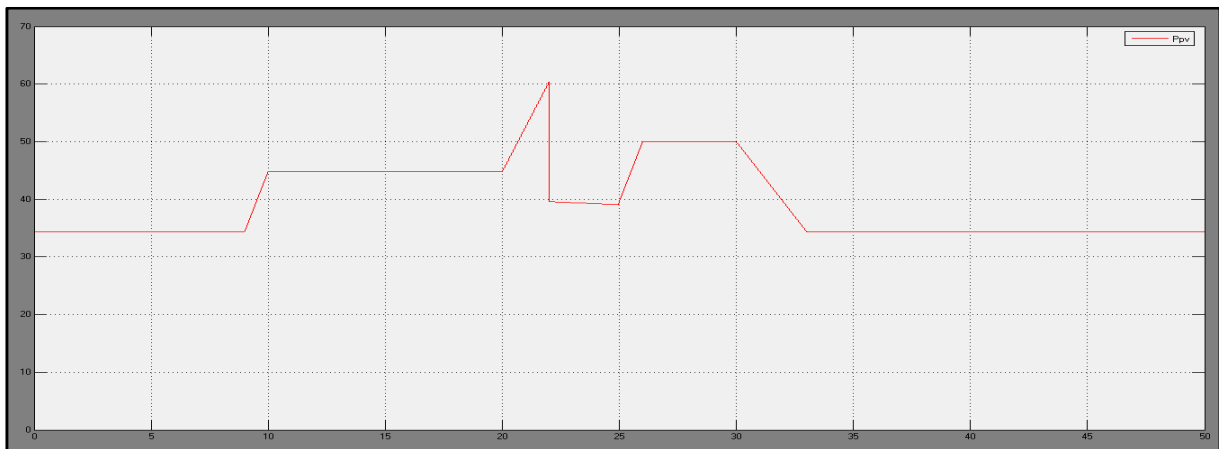


Figure IV.31.c : la puissance P_{pv} de sortie du G_{pv}



Figure IV.32: le rapporte cycliques (α) pour ($\Delta V=0.006v$)et leur réponse vis a vi le changement de l'enseillement

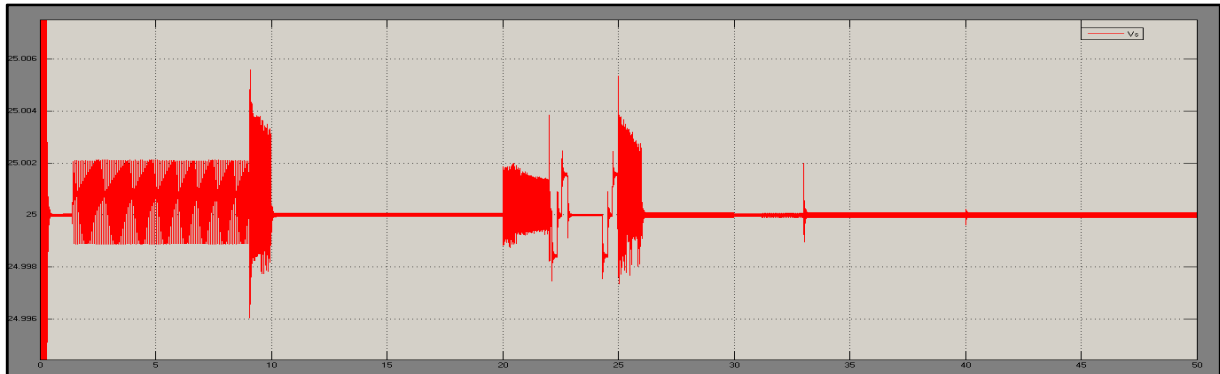


Figure IV.33 : la tensionVsde sortir de convertisseur au régime transitoire et permanant et réponse indicielle.



Figure IV.34 : le courant Isde sortir du convertisseur

D'après les **Figures IV.31. (a), (b) et (c)**, nous constatons que l'algorithme **(P&O)** suit le point maximale de la puissance quelle que soit la variation de l'enseillement et forçement le panneau **PV** génère la puissance optimale donc un courant et une tension optimales, et on a constaté d'après la **Figures IV.33** que la tension de sortie présente des pics et des oscillations important à chaque fois qu'on a une perturbation du l'enseillement, résultat de la réponse indicielle de convertisseur.

On constater aussi que le courant de sortie (**Figures IV.34**) suit la variation de l'enseillement à travers la variation de rapport cyclique (**Figures IV.32**), donc la puissance de sortir du convertisseur (**Figures IV.31.C**) équivaut la puissance qui est à sortir de **GPV**

IV-5-3-A-3 Variations graduelles lentes d'enseillement :

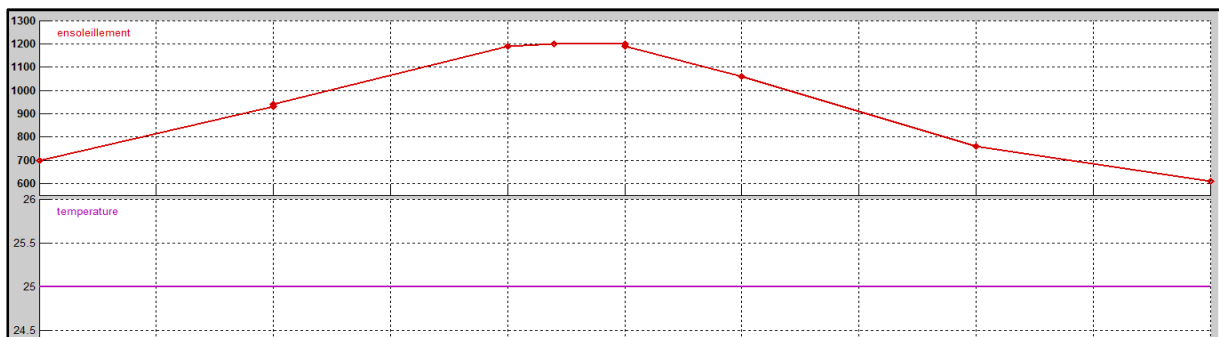


Figure IV.35 : les conditions météorologiques appliquées dans ce cas variation graduelles lentes d'ensoleillement Et la température constante.

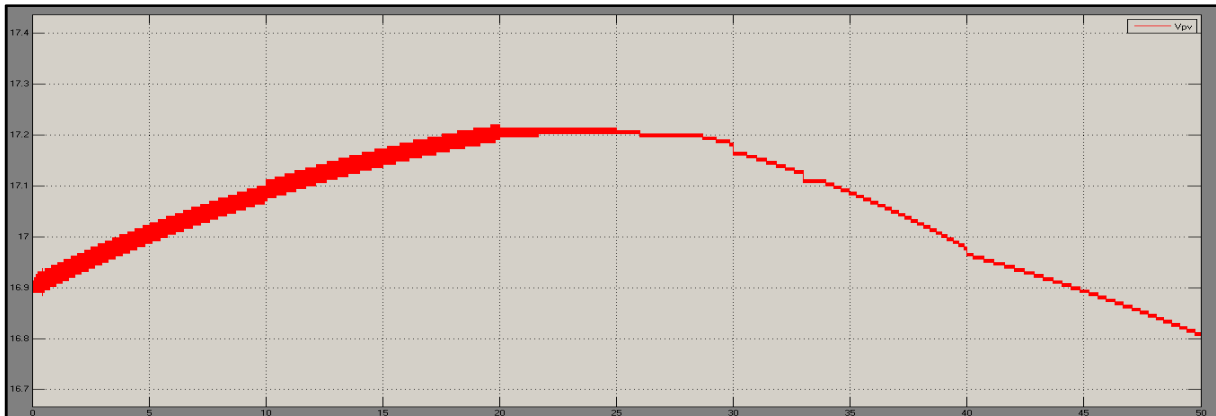


Figure IV.36.a : la tension V_{pv} de sortir du G_{pv} cas variation graduelles lentes d'ensoleillement Et la température constante.

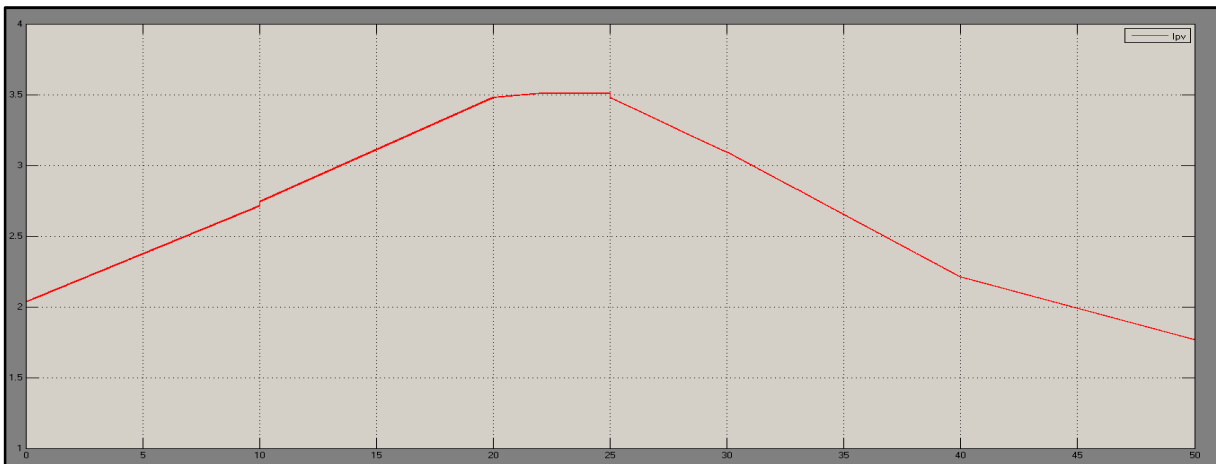


Figure IV.36.b : le courant I_{pv} de sortir du G_{pv} cas variation graduelles lentes d'ensoleillement Et la température constante.

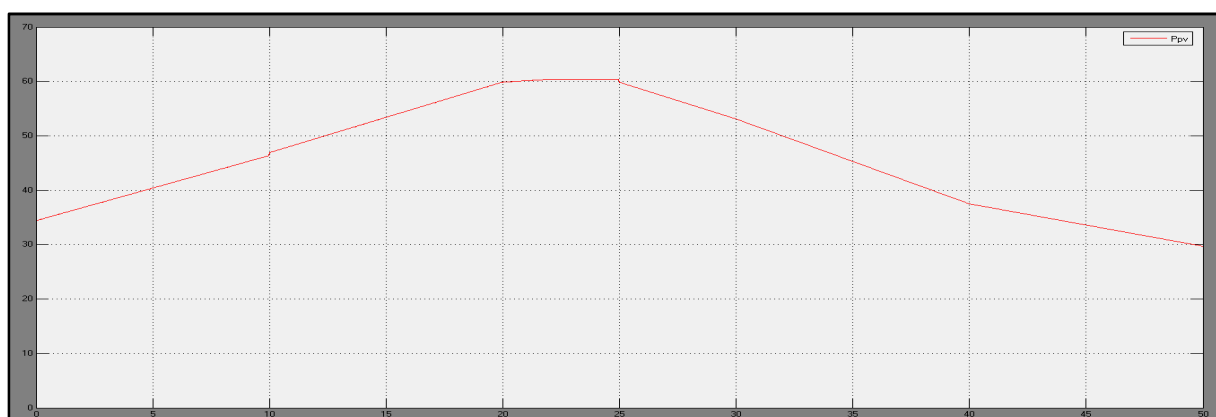


Figure IV.36.c : la puissance P_{pv} de sortir du G_{pv} cas variation graduelles lentes d'ensoleillement Et la température constante.

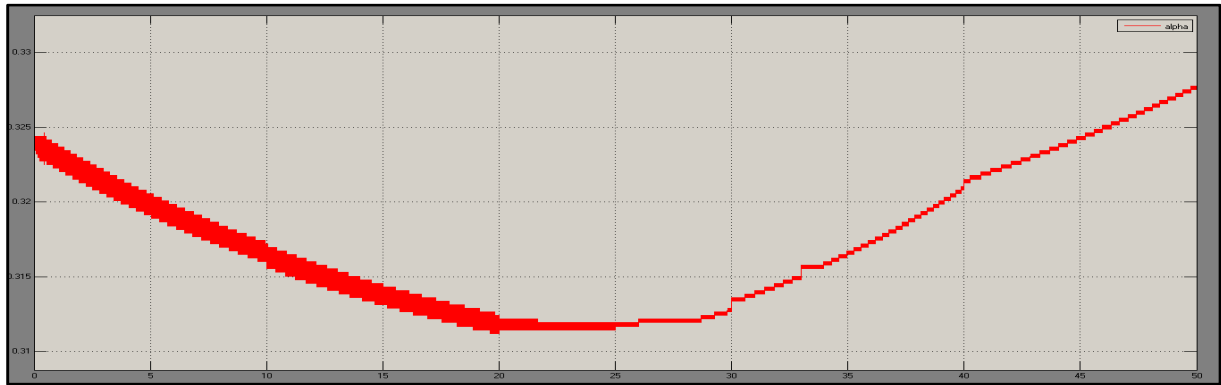


Figure IV.37: le rapporte cycliques (α) pour ($\Delta V=0.006v$)et leur réponse vis a vi le changement de l'ensoleillement

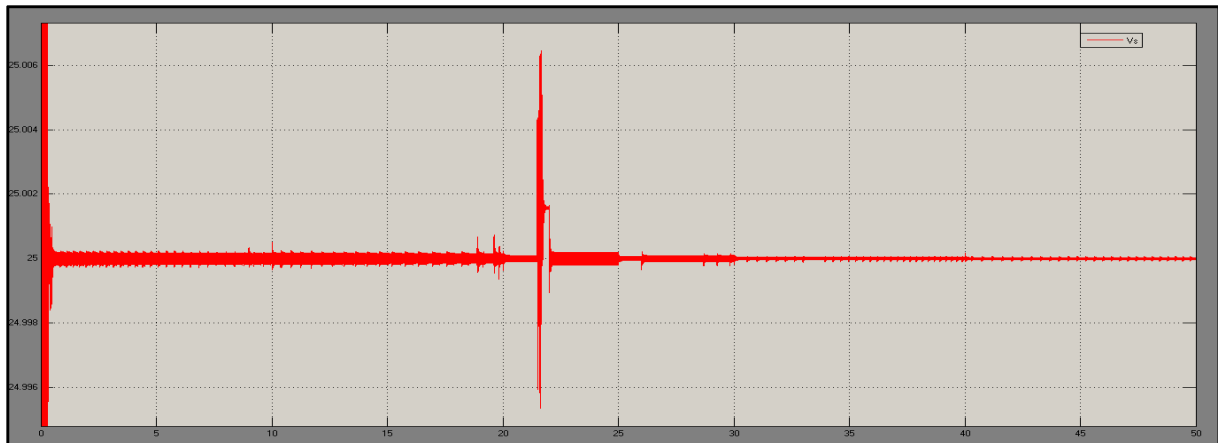


Figure IV.38 :la tension V_{sde} de sortir de convertisseur au régime transitoire et permanant et réponse indicielle.

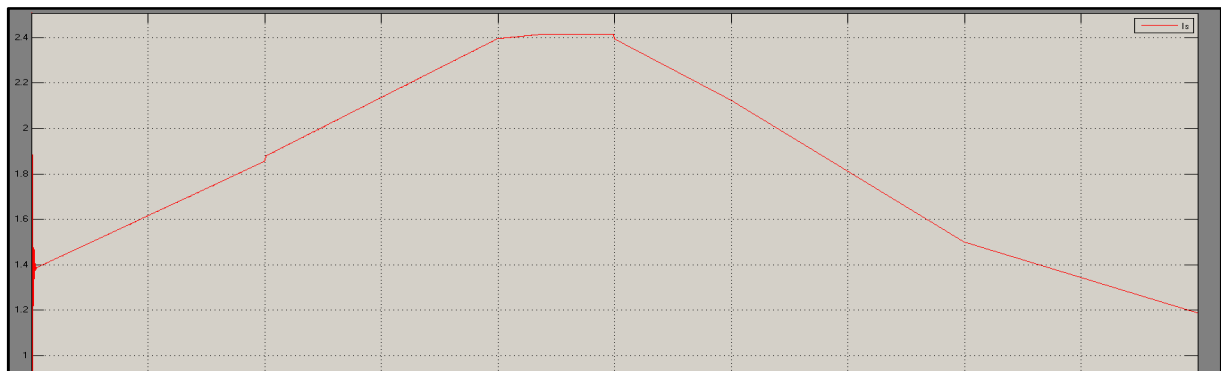


Figure IV.39 : le courant I_s de sortir du convertisseur

D'après les **Figures IV.38**, on a constaté que la tension de sortie présente des pics et des oscillations importantes à chaque fois qu'on a une perturbation de l'ensoleillement, résultat de la réponse indicielle de convertisseur.

On constate aussi que le courant de sortie (**Figures IV.39**) suit la variation de l'ensoleillement à travers la variation de rapport cyclique (**Figures IV.37**), donc la puissance de sortie du convertisseur (**Figures IV.36.C**) égale la puissance qui est à sortir de GPV

IV-5-3-B Fonctionnement sous des conditions variables de température :

Les ombres des structures, de la végétation, et des nuages auront comme conséquence des changements soudains de l'insolation, qui mènent à leur tour à un changement correspondant de la température des cellules.

Le premier test est fait sous de changement brusque de la température. Ce cas est observé dans les stations mobiles (Exemple : **véhicule (satellite)solaire**) **lors de changement brusque de l'angle d'incidence des rayons solaires.**

Le deuxième test est fait sous des changements graduels lents de la température, cas observé dans des stations fixes lors de passage de nuages ou d'un quelconque obstacle

Le troisième test fait sous des changements graduels rapides de la température, cas aléatoire de changement **d'ensoleillement à température constante**

IV-5-3-B-1 Variations brusques de température :

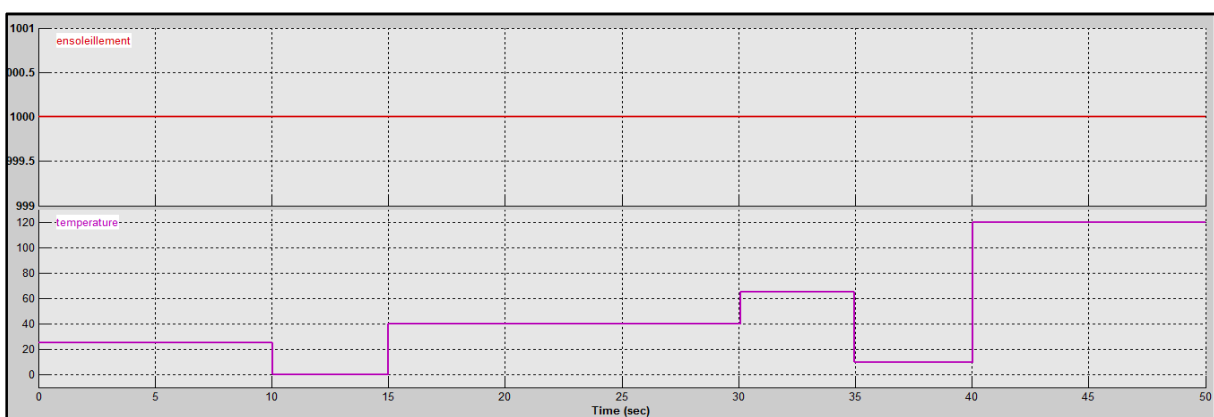


Figure IV.40 : les conditions météorologiques appliquées dans ce cas variation brusque de la température et l'ensoleillement constante.

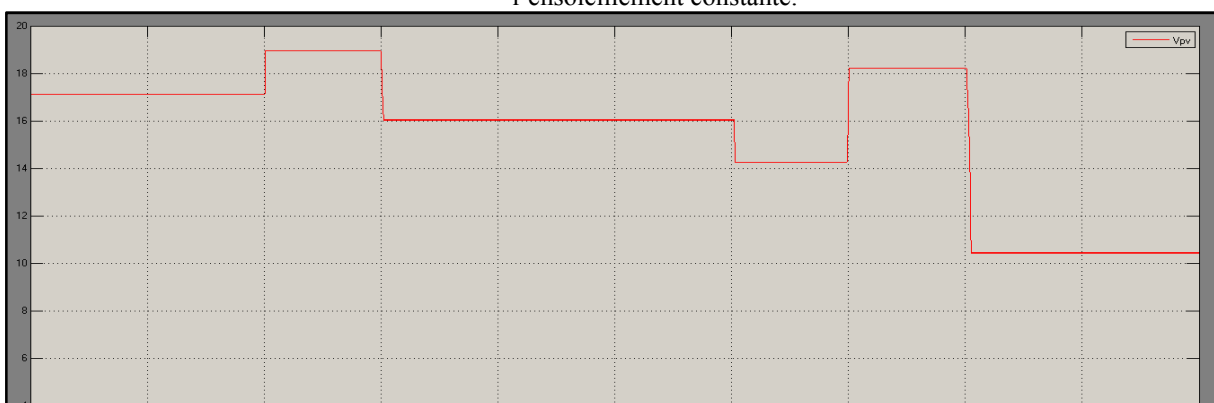


Figure IV.41.a : la tension V_{pv} de sortir du G_{pv}

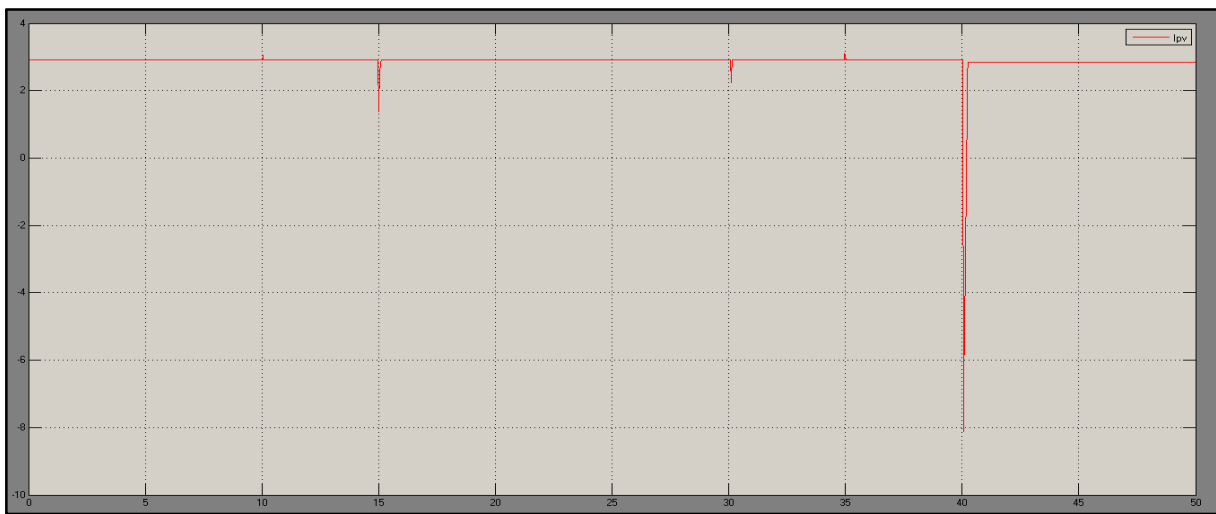


Figure IV.41.b : le courant I_{pv} de sortir du G_{pv}

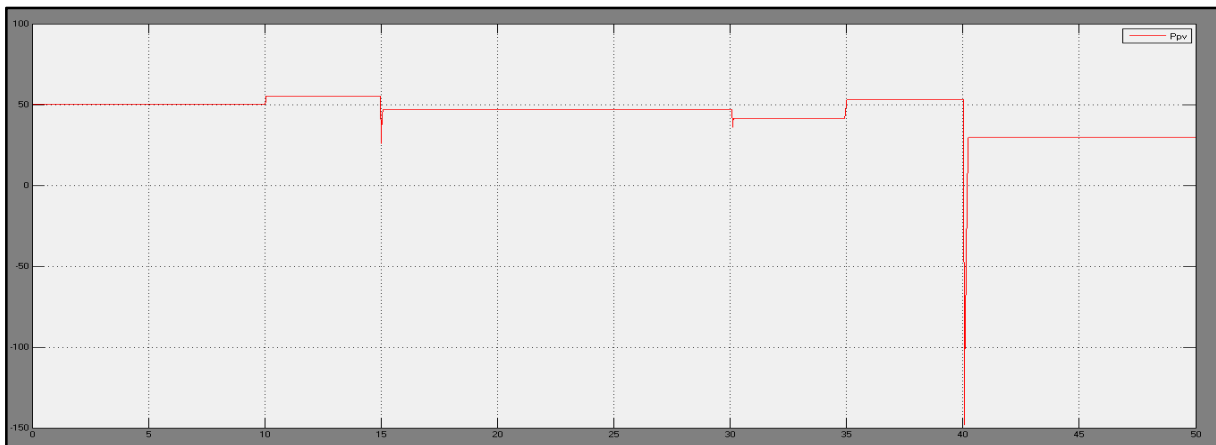


Figure IV.41.c : la puissance P_{pv} de sortir du G_{pv}

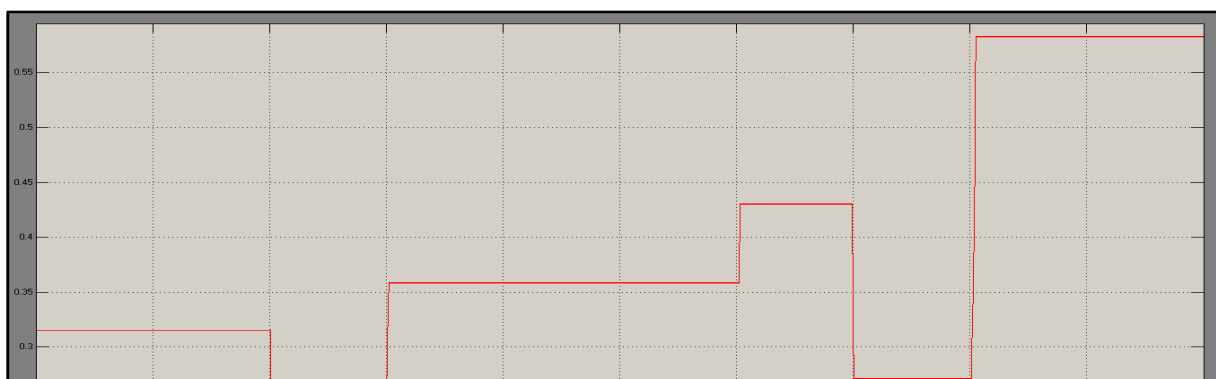


Figure IV.42: le rapporte cycliques (α) pour ($\Delta V=0.006v$)et leur réponse vis a vi le changement de la température

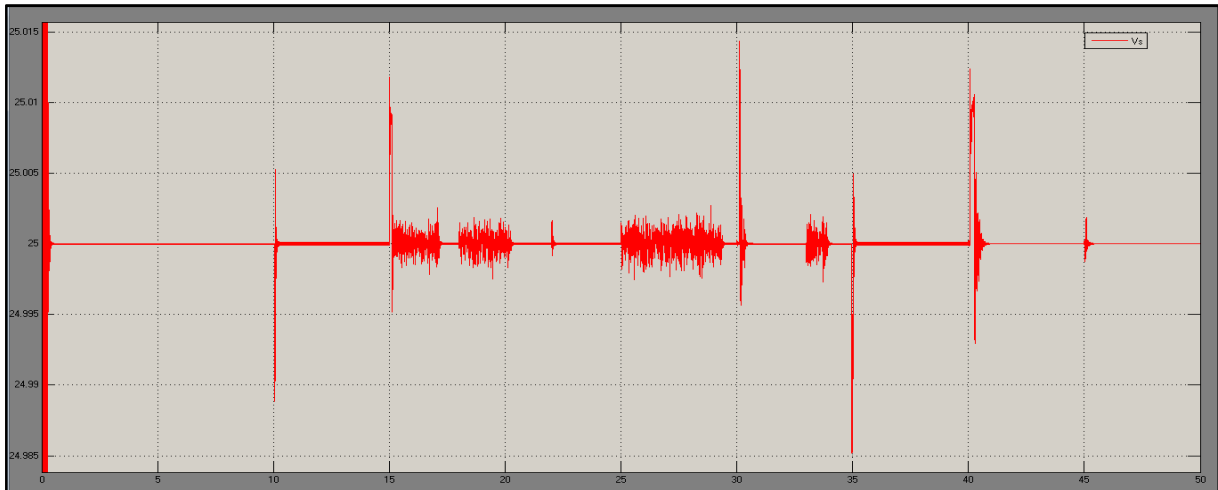


Figure IV.43 : la tension V_s de sortir de convertisseur au régime transitoire et permanent et réponse indicielle.

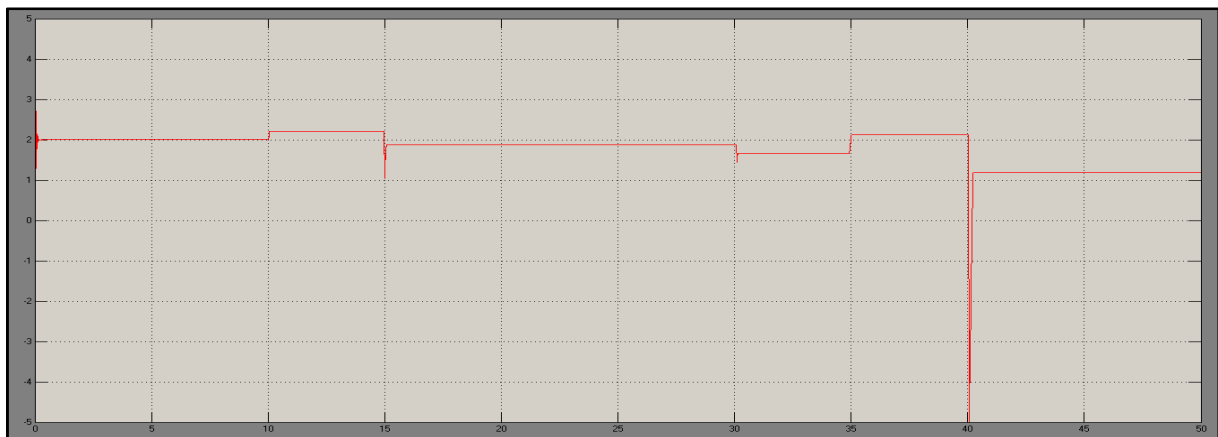


Figure IV.44 : le courant I_s de sortir du convertisseur

D’après les **Figures IV.41.(a),(b) et (c)** on a constaté qu’il a un écrasement au niveaux du courant suite a une chute de tension provoqué par l’élévation de la température et la réponse indicielle du système.

IV-5-3-B-2 Variations graduelles rapide de température

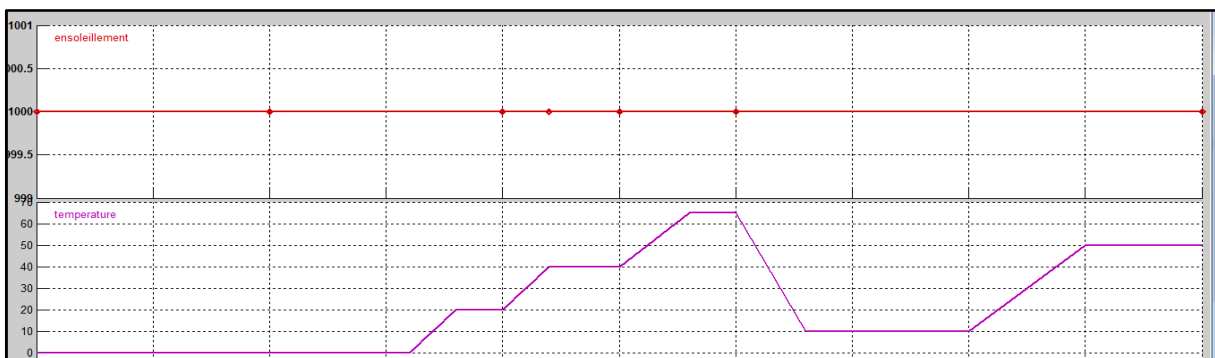


Figure IV.45 : les conditions météorologiques appliquées dans ce cas variation graduelles rapides de la température et l'ensoleillement constante.

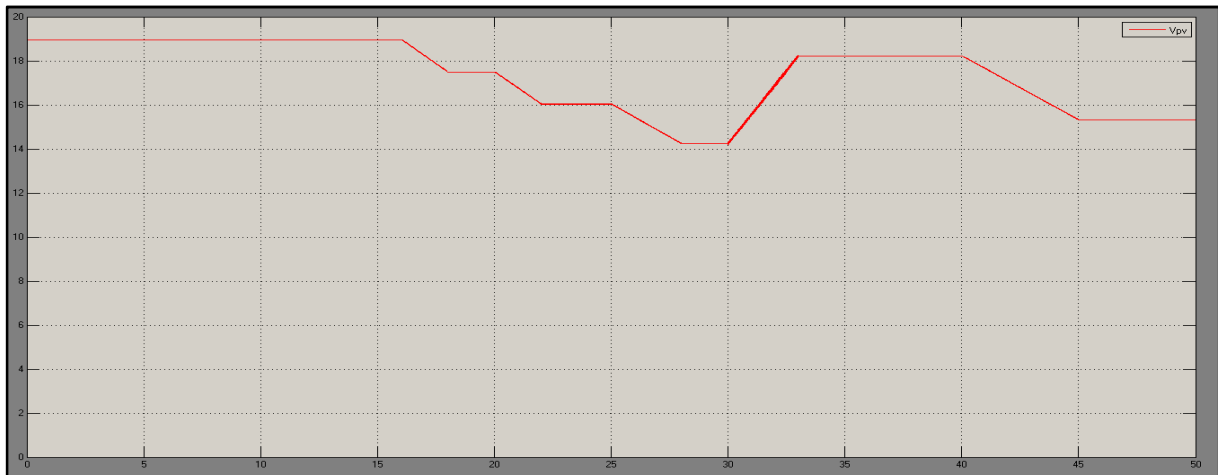


Figure IV.46.a : la tension V_{pv} de sortir du G_{pv} cas variation graduelles rapides de la température et l'ensoleillement constante.

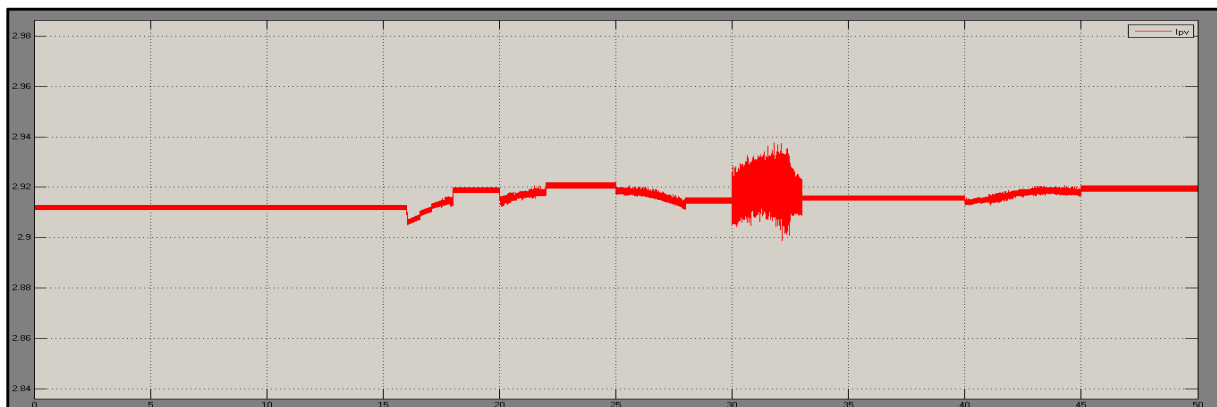


Figure IV.46.b : le courant I_{pv} de sortir du G_{pv} cas variation graduelles rapides de la température et l'ensoleillement constante.

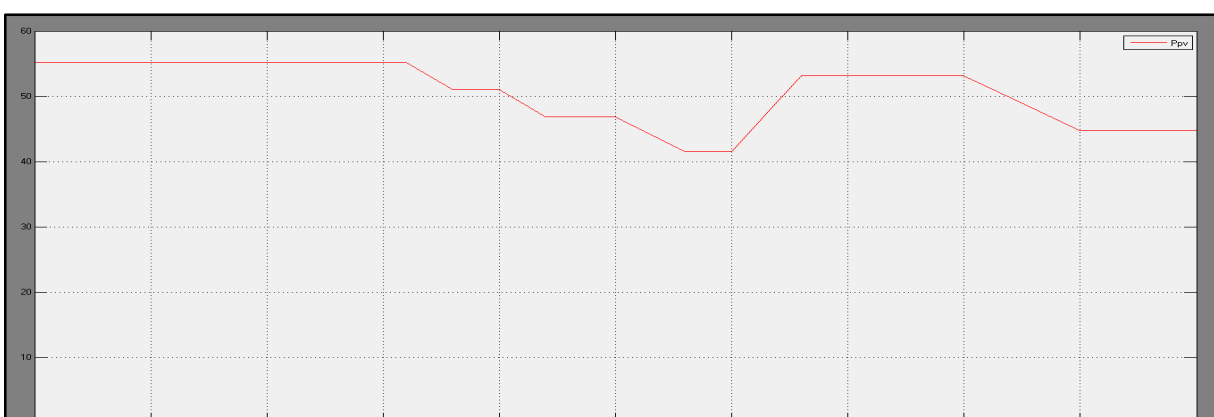


Figure IV.46.c : la puissance P_{pv} de sortir du G_{pv} cas variation graduelles rapides de la température et l'ensoleillement constante.



Figure IV.47: le rapporte cycliques (α) pour ($\Delta V=0.006v$) et leur réponse vis a vi le changement de la température

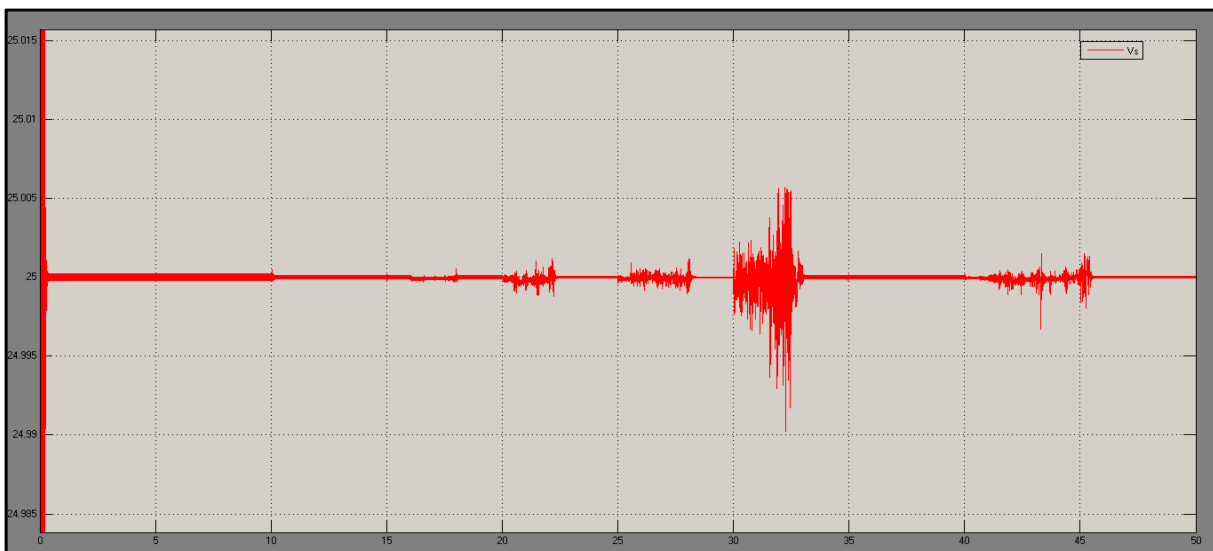


Figure IV.48 : la tension V_s de sortir de convertisseur au régime transitoire et permanent et réponse indicielle.



Figure IV.49 : le courant I_{sdc} de sortir du convertisseur

D'après les **Figures IV.46.(b)** et **Figures IV.(48),(49)** :on a constaté que le système presque stable c'est-à-dire que la température influencer légèrement sur le comportement de panneaux .

IV-5-3-B-3 Variations graduelles lentes de température :

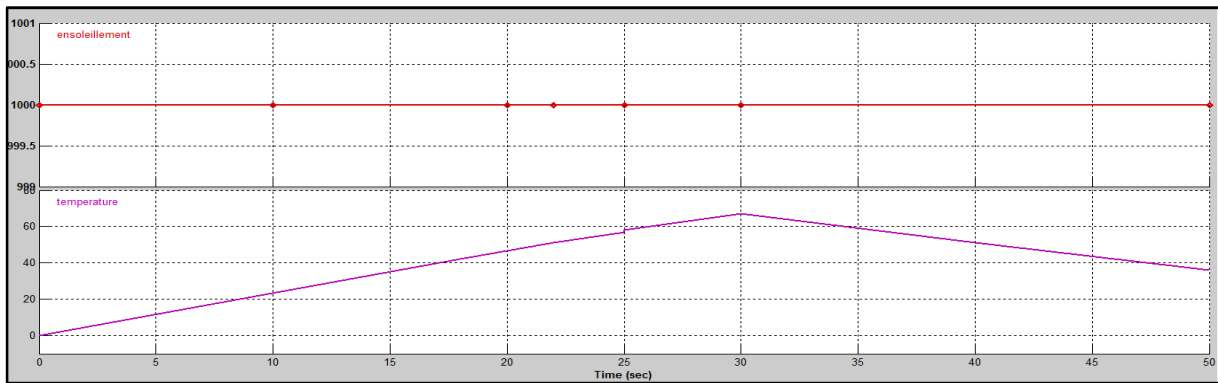


Figure IV.50 :les conditions météorologiques appliquées dans ce cas variation graduelles lentes de la température et l'ensoleillement constante.

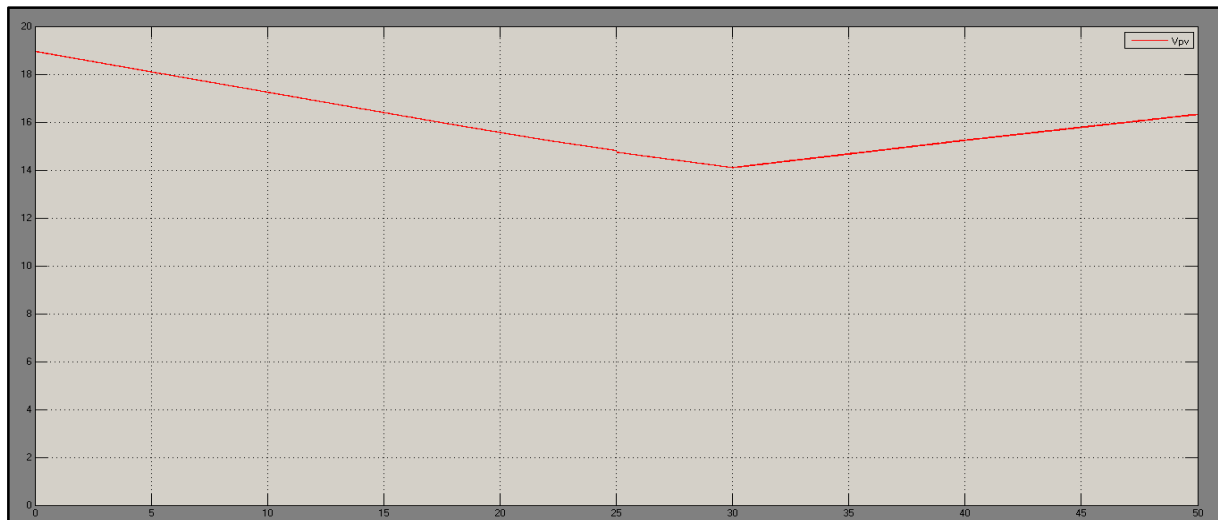


Figure IV.51.a : la tension V_{pv} de sortir du G_{pv} cas variation graduelles lentes de la température et l'ensoleillement constante

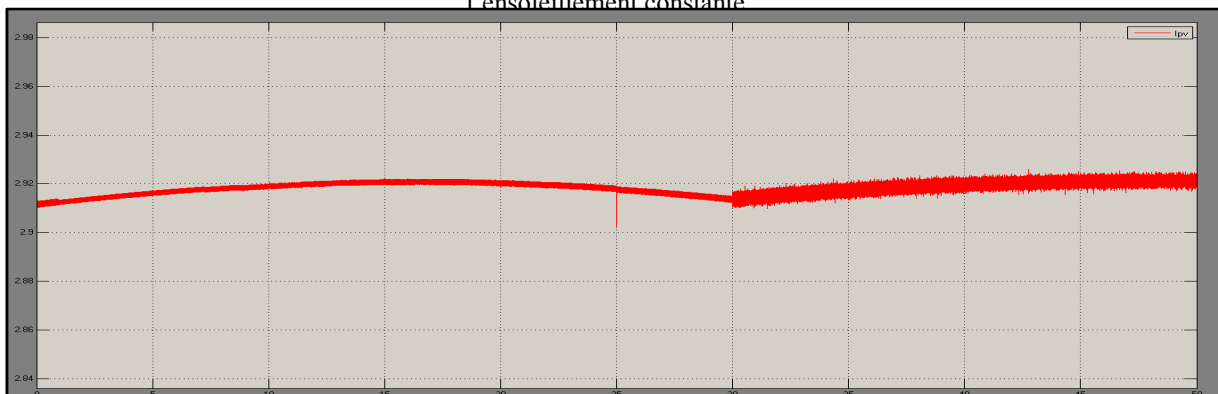


Figure IV.51.b : le courant I_{pv} de sortir du G_{pv} cas variation graduelles lentes de la température et l'ensoleillement constante.

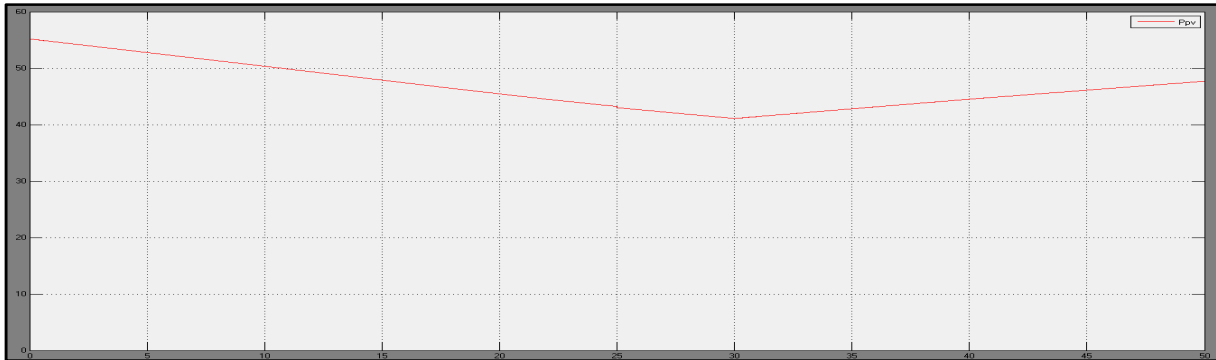


Figure IV.51.c : la puissance P_{pv} de sortir du G_{PV} cas variation graduelles lentes de la température et l'ensoleillement constante.

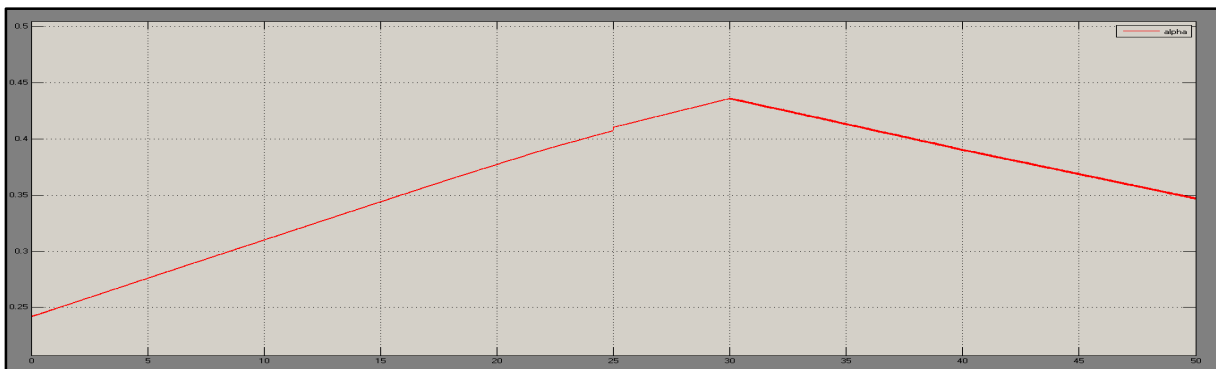


Figure IV.52: le rapporte cycliques (α) pour ($\Delta V=0.006v$)et leur réponse vis a vi le changement de la température

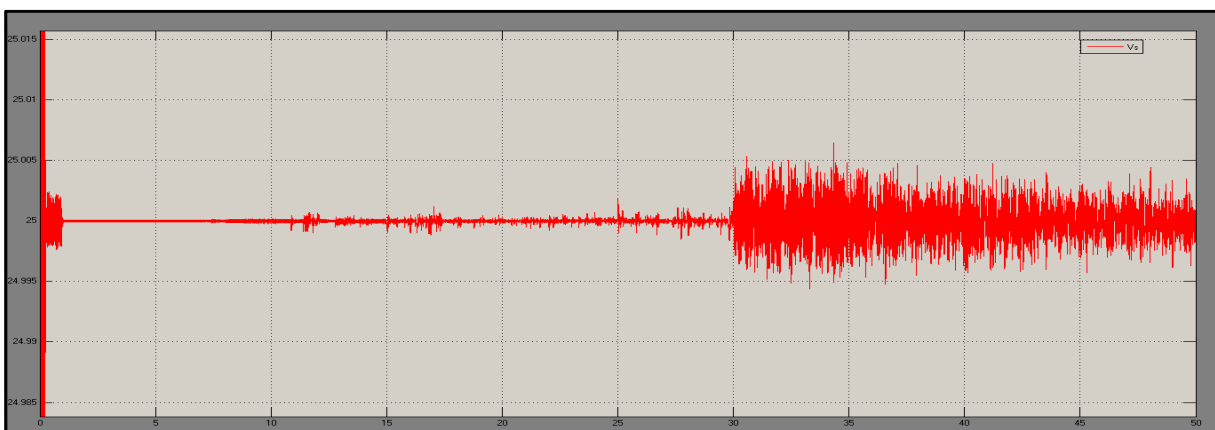


Figure IV.53 : la tension V_s de sortir de convertisseur au régime transitoire et permanant et réponse indicielle.



Figure IV.54 : le courant I_s de sortir du convertisseur

D'après les **Figures IV.53**: on a constaté que la tension de sortie système presque stable c'est-à-dire que la température influencer légèrement sur le comportement de panneaux.

IV-5-3-C Variations aléatoire de l'ensoleillement et de température :

Ce teste permet de mieux approcher le comportement dynamique de système photovoltaïque autonome.

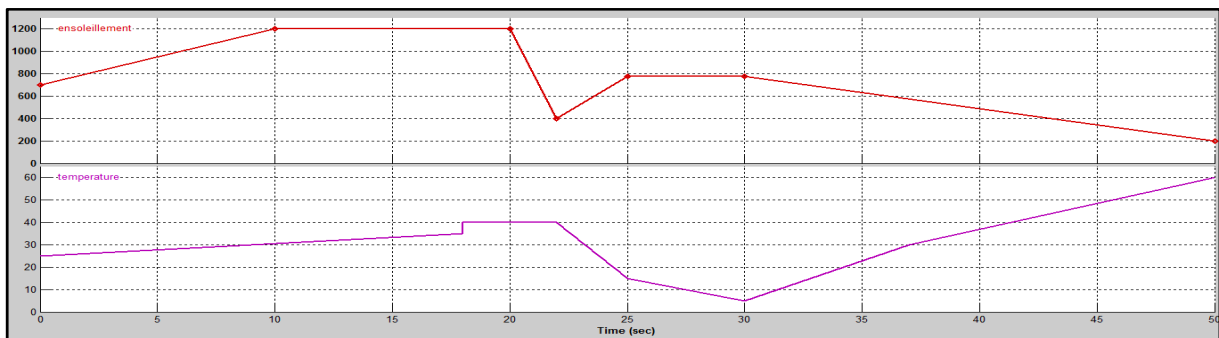


Figure IV.55 : les conditions météorologiques aléatoires appliquées dans ce cas

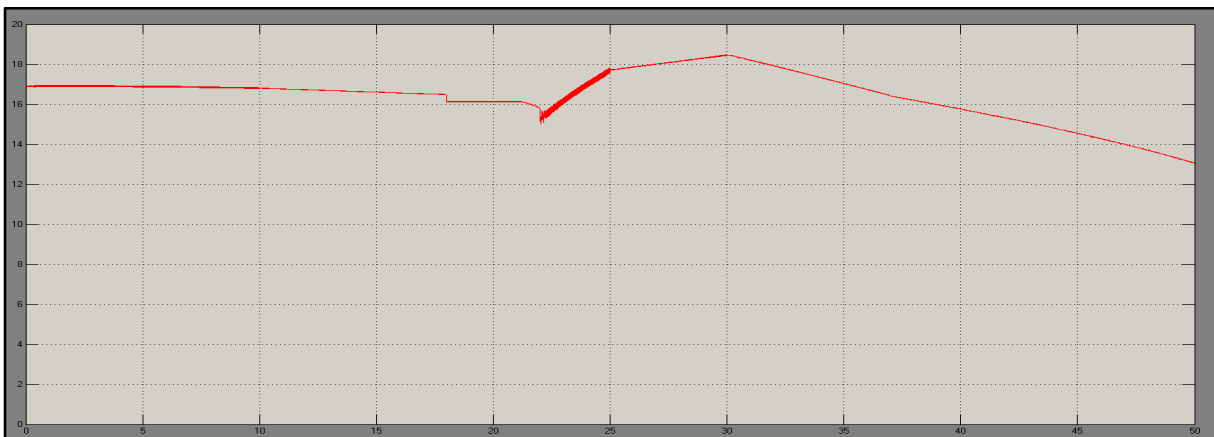


Figure IV.56.a : la tension V_{pv} de sortir du GPV

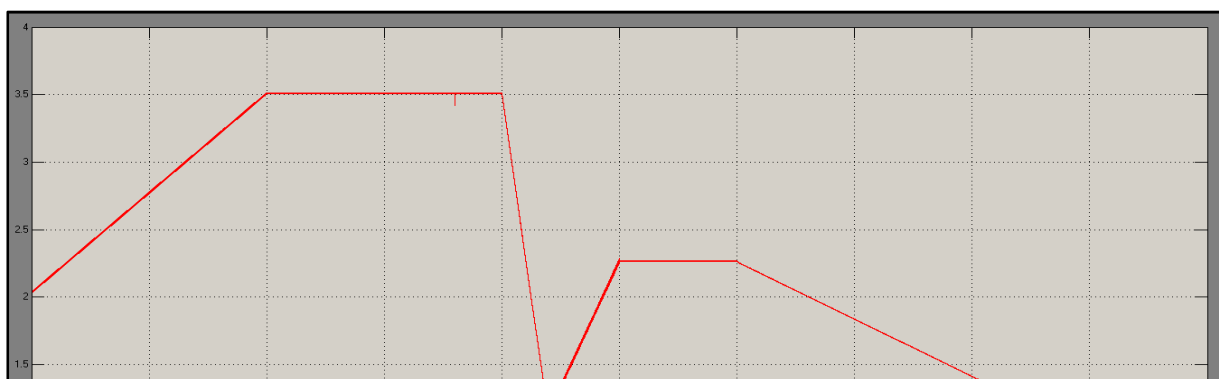


Figure IV.56.b : le courant I_{pv} de sortir du GPV

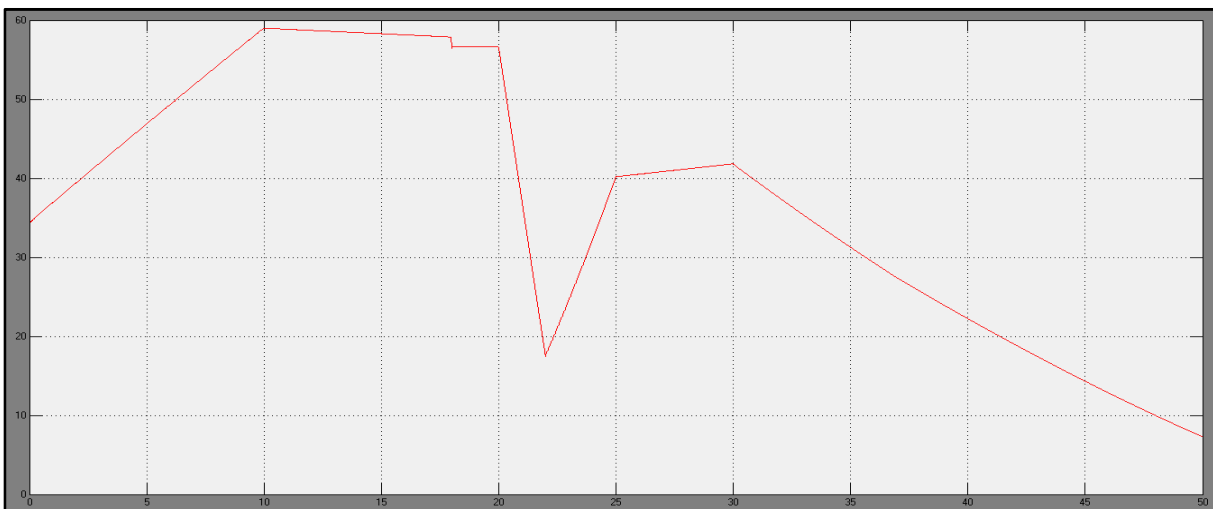


Figure IV.56.c : la puissance P_{pv} de sortir du Gpv



Figure IV.57: le rapporte cycliques (α) pour ($\Delta V=0.006v$) et leur réponse vis-à-vis le changement aléatoire des conditions météorologiques

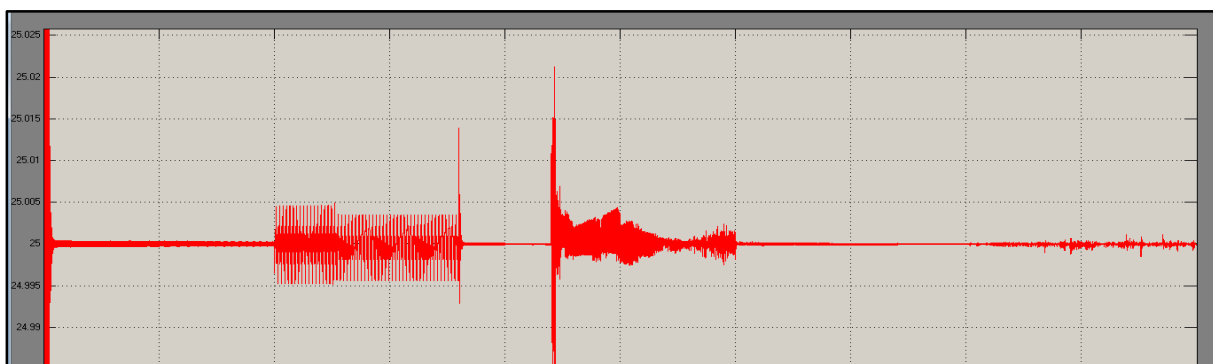


Figure IV.58 : la tension V_s de sortie de convertisseur au régime transitoire et permanent et réponse indicielle.

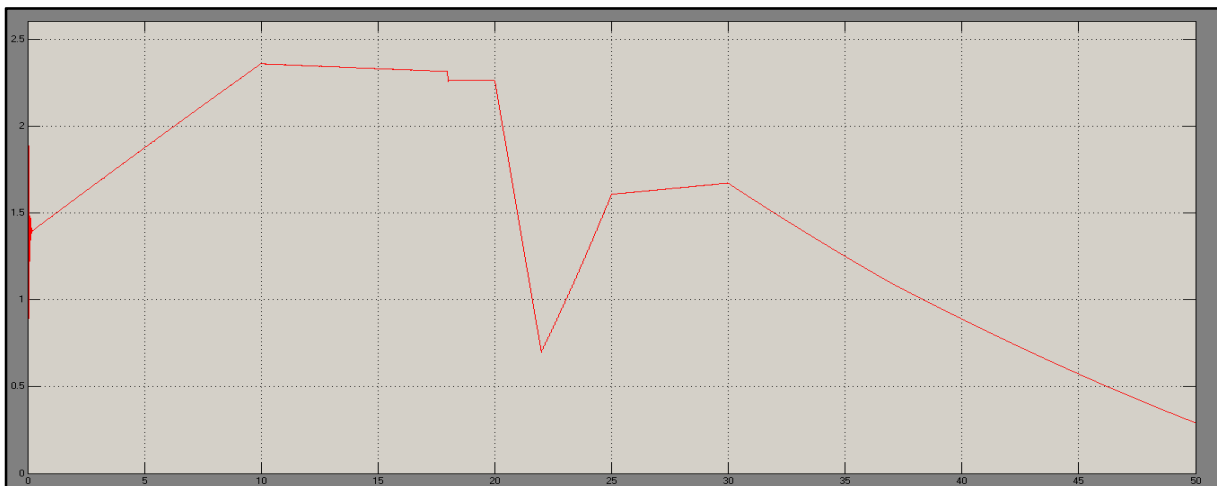


Figure IV.59 : le courant I_s de sortie du convertisseur

D'après les **Figures IV.56. (a), (b) et (c)**, nous constatons que l'algorithme **(P&O)** suit le point maximale de la puissance quelle que soit la variation de l'ensoleillement (et la température) et forcer le panneau **PV** génère la puissance optimale donc un courant et une tension optimale, et on a constaté d'après la **Figures IV.58** que la tension de sortie présente des pics et des oscillations à chaque fois qu'on a une perturbation du l'ensoleillement (et la température), résultat de la réponse indicielle de convertisseur.

On constater aussi que le courant de sortie (**Figures IV.59**) suit la variation de l'ensoleillement (et la température) à travers la variation de rapport cyclique (**Figures IV.57**), donc la puissance de sortir du convertisseur (**Figures IV.56.c**) est égale à la puissance qui de sortie de GPV

IV-6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons analysé dans les conditions climatiques (éclairage et température) le fonctionnement électrique d'un système **PV**, adapté par des convertisseurs d'énergie **DC-DC** (hacheur survolteur), régulé par Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande **MPPT (P&O)**. Les résultats obtenus montrent qu'après un régime transitoire de durée **200 ms**, la commande **MPTT** fait osciller le point de fonctionnement autour du point du **PPM**. et en variant d'une manière automatique le rapport cyclique du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur d'énergie **DC-DC**, le convertisseur **DC-DC** et la commande **MPPT** effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur **PV**. La commande **MPPT** adapte le générateur **PV** à la charge:

transfert de la puissance maximale fournie par le générateur **PV**. Donc le système converge vers les conditions optimales indépendamment des conditions météorologiques et de la variation de la charge. Ces résultats, forts intéressants, montrent que l'utilisation de la commande **MPPT** permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques. Il est à noter que ce comportement n'est pas assuré lors des changements brusques et importantes des conditions météorologiques.

Le choix de pas de la tension (ΔV), de la commande **MPPT**, est un compromis fondamental au tour de la rapidité et la stabilité et la précision de convergence autour du **PPM** du système. Plus le pas de tension (ΔV) est petite, plus il y a de précision sur le point PPM et qu'il y a de faibles oscillations autour de celui-ci. Mais si le pas de tension (ΔV) devient plus grande, le système peut devenir instable et moins précis. Ceci se traduit par la présence de fortes oscillations autour du **PPM**.

Conclusion générale

Conclusion générale :

le travail présenté dans ce mémoire est une contribution à l'analyse du comportement et la maîtrise des performances d'un système photovoltaïque constitué par un module **PV**, un convertisseur **DC/DC** de type **BOOST**, batteries de stockage comme charge et un contrôleur **MPPT**. L'objectif était la simulation du fonctionnement du générateur et l'étude de l'influence de la température et l'irradiation sur sa caractéristique courant-tension. À l'issue des simulations effectuées, nous avons constaté une forte dépendance des performances du module photovoltaïque en fonction des conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température du module.

Afin d'extraire le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur **PV** et la charge. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de la puissance maximale. La solution fréquemment adoptée est l'incorporation d'un convertisseur statique.

Pour faire fonctionner 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, nous nous sommes intéressés particulièrement à l'application de l'algorithme basé sur la perturbation et l'observation et l'algorithme d'incrément de l'inductance dans le contrôle des convertisseurs **DC - DC**. Les résultats de simulation ont montré de bonnes performances en termes de poursuite de la puissance maximale fournie par le panneau photovoltaïque.

Donc le système converge vers les conditions optimales indépendamment des conditions météorologiques et de la variation de la charge. Ces résultats, forts intéressants, montrent que l'utilisation de la commande **MPPT** permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques, nous sommes remarqué que pour augmenter la vitesse de réponse de système vis-à-vis des changements brusques des conditions de fonctionnement, il faut augmenter la fréquence d'échantillonnage (au delà le pas de tension ΔV), mais l'augmentation de cette fréquence au-delà d'une certaine valeur fait apparaître un autre phénomène, pour des hautes fréquences d'échantillonnages le convertisseur **DC-DC** n'est plus capable de suivre les variations rapides du rapport cyclique, ou la puissance de sortie continue a chuté ou a croître malgré l'inversion des sens de perturbation ce qui conduit à une inversion erronée de la perturbation encore une fois. Dans ce cas le mécanisme de l'algorithme est perturbé par la fausse information des sens de variation de la puissance causée par le retard de réponse du convertisseur **DC-DC**.

Ce défaut produit une augmentation considérable de taux d'ondulation de la puissance de sortie qui dépend aussi du type de convertisseur **DC-DC** utilisé, ce taux dépend aussi des composants capacitifs du convertisseur **DC-DC**, donc la valeur de taux d'ondulation est proportionnelle aux capacités d'entrée et de sortie. Pour diminuer ce taux on a intérêt à diminuer la capacité de ces condensateurs ce qui impose à faire augmenter la fréquence de découpage de la **PWM**, même si on a fait tous cela il y a des oscillations aux niveaux de la sortie de convertisseur **DC-DC** surtout à la variation brusque des conditions climatiques, donc il faut inclure la commande **MPPT** par un correcteur proportionnel et intégral (**PI**) pour régler la tension d'entrée du convertisseur. Sa tâche est de réduire l'erreur au minimum entre V_{ref} et la

Conclusion générale

tension mesurée par l'ajustage du rapport cyclique. Le régulateur PI fonctionne avec une cadence plus rapide que la commande MPPT pour assurer la stabilité du système.

Références Bibliographiques

- [1] **M. SLAMA Fateh** "Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique", thèse De Magister En Electrotechnique à l'université de Ferhat Abbas - Setif : 2011.
- [2] **Mr. Mohamed El Amine Khaled BENALOUACH** "Modélisation, Simulation et Optimisation d'un Système Energétique de Production Photovoltaïque associé à un Accumulateur ", thèse de Magister en Physique université Abou-Bekrbelkaïd de Tlemcen : 2013.
- [3] **ARIF ALI** "Amélioration des performances d'un véhicule électrique alimenté par une source photovoltaïque", diplôme de Doctorat en sciences Université Mohamed Khider – Biskra : 2013
- [4] **Y AMINA AZZOUG** "commande de la charge d'une batterie dans une installation photovoltaïque", comme exigence partielle de la maîtrise en génie électrique université du Québec Trois-Rivières
- [5] **BOUKHERS Djamil** "optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage", diplôme de magister en électrotechnique université Mentouri de Constantine : 2007.
- [6] **B. Flèche - D. Delagnes** "production d'énergie électrique : énergie solaire photovoltaïque", Energie solaire photovoltaïque.doc : juin 07
- [7] **Mechouma Rabiaa** "Contribution à l'étude des onduleurs dans les systèmes photovoltaïques: Applications pour les charges commerciales", Thèse de Doctorat en sciences Université Hadj Lakhdar – Batna : 2015.
- [8] **AOUN Nouar** "étude et modélisation des différents modèles de la cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales", diplôme de magister en physique université Mentouri Constantine : 2010.
- [9] **Dariga Meekhum** "réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteur sans fil autonomes pour l'application aéronautique ", diplôme de Doctorat de université de Toulouse :
- [10] **Mlle Ayache Khedidja** "Modélisation et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque Couplé à un Réseau Électrique", Mémoire de Magister Université Mohamed Chérif Messaâdia de Souk-Ahras : 2014
- [11] **Idir MAHIOUT** "Modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque par différents régulateurs MPPT", Master 2 en électro-énergétique-industrielle Université d'Artois Faculté des sciences appliquées : 2011 /2012
- [12] **BORNI ABDELHALIM** "étude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire", diplôme de magister en électrotechnique université Mentouri de Constantine : 2009
- [13] **CHAIB SETTI AHMED & BOUTELDJA ABD ELKADER** "Analyse du comportement dynamique d'un système photovoltaïque face aux variations climatiques", Mémoire de Projet de Fin d'Études pour l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique option : Machines Electrique Université de BLIDA1 : 2014/2015
- [14] **BRIHMAT FOUZIA** "L'étude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride pv/éolien", mémoire de magister en électronique université mouloud mammeri de tizi-ouzou: 2012
- [15] **Badia AMROUCHE** "contribution au développement d'une nouvelle méthode MPPT basée sur les concepts de l'intelligence artificielle pour les systèmes photovoltaïques", thèse de doctorat université Saad DAHLAB de Blida : 2013
- [17] **Mechouma Rabiaa** "Contribution à l'étude des onduleurs dans les systèmes photovoltaïques: Applications pour les charges commerciales", thèse de doctorat en sciences Université Hadj Lakhdar – Batna: 2015
- [18] **MECHALIKH Med Nadjib HAMADA Charaf Eddine** "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau", master académique université Kasdi Merbah – Ouargla: 2013
- [19] **MERAHI REDA** "modélisation d'un dispositif MPPT pour l'étude de l'augmentation de la puissance produite par les générateurs photovoltaïques", diplôme de magister université Badji Mokhtar Annaba : 2010
- [20] **HANANOU FATIHA et ROUABAH AICHA** "Modélisation et simulation d'un système Photovoltaïque", MASTER ACADEMIQUE UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA: 2013/2014
- [21] **MEHIMMEDETSI Boudjemâa** "Application du formalisme Bond Graph à une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque", diplôme de magister université Mentouri de Constantine: 2007
- [22] **TIAR Mourad** "Commande Optimale d'un Système de Génération Photovoltaïque Hybride", Diplôme de Magister en Electrotechnique Université Mohamed Khider – Biskra: 2011
- [23] **BENSACI Wafa** "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT", Diplôme de Master en Génie électrique Université Kasdi Merbah – Ouargla : 2011/2012
- [24] **HAMZA AZZEDINE** "modélisation et commande d'un système photovoltaïque", magister en automatique université Badji Mokhtar Annaba

Références Bibliographiques

- [25] **N. Achaïbou** "Introduction à l'Etude du Système de Stockage dans un Système Photovoltaïque", Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger ; *Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999) 1-6*
- [26] **LADRAA Wafa & MOUSSAOUI Yamina** "Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque mixte (Si monocristallin-couche mince) et calcul du coefficient de perte de puissance", diplôme Master en génie électrique Université SAAD DAHLAB de BLIDA : 2012/2013