

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE**



MEMOIRE

*De fin d'études en vue de l'obtention
du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique*

Option Réseaux Electriques

Thème

*Optimisation du Transfert d'Energie d'un Champ
Photovoltaïque basée sur la Commande MPPT
Prédictive*

Proposé et dirigé par :

M^r: Lh .ARAB

Etudié par :

M^r: B .BOUNOUA

M^r: R. HAOUCHINE

Promotion 2012

Remerciements :

Premièrement nous louangeons Dieu de nous avoir donné la force et le courage pour mener à terme ce présent travail.

Nos remerciements vont particulièrement à M^r Lh. ARAB (enseignant à l'université MOULOUD MEMMERI de TIZI-OUZOU), d'avoir proposé ce sujet, ainsi pour ces conseils judicieux et son orientation.

Nos remerciements vont aussi :

Aux membres de jury qui feront l'honneur de juger notre humble travail. Que tous les enseignants ayant contribué à notre formation trouvent ici notre profonde reconnaissance

Enfin, nous tenons à exprimer toutes nos gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail de prés ou de loin.

Dédicaces

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

- ❖ *A la mémoire de ma très chère mère(Zhira) que Dieu la garde dans son très vaste paradis.*
- ❖ *A mon très cher père (Salem) et ma chère belle mère(Farida), qui n'ont pas cessé de m'encourager durant tout mon cursus d'étude.*
- ❖ *A mes chers frères (Ahcene, Boubker, Ramdane, Moussa, Smail et surtout mon adorable Adem).*
- ❖ *A mes chères sœurs (Farida, Khadoudja et surtout la petite fleur Kenza).*
- ❖ *A tous mes neveux et nièces.*
- ❖ *A ma belle sœur Fadhila et ces trois petites fleurs (Djidji, Tiziri et Nesrine) sans oublier la vielle Chabha. .*
- ❖ *Atouts mes oncles et tantes.*
- ❖ *A Mohamed et son épouse Nadia*
- ❖ *A mon binôme et sa famille*
- ❖ *A tout mes amis.*

Brahim

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

- ❖ ***A mes chers parents***
- ❖ ***A mes frères.***
- ❖ ***Atouts mes oncles et tantes.***
- ❖ ***A mon binôme et sa famille.***
- ❖ ***A tout mes amis.***

Rabah .

sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : généralités sur les systèmes photovoltaïques	
I.1. Introduction	3
I.2. L'effet photovoltaïque	3
I.2.1. Energie solaire	3
I.2.2. Le rayonnement solaire	4
I.2. 3. Le spectre solaire	5
I.3. La cellule photovoltaïque	6
I.3.1. Historique des cellules solaires	6
I.3.2. Les type de cellules photovoltaïques	7
I.3.2.1. Les cellules monocristallines	7
I.3.2.2. Couche mince (Amorphe)	7
I.3.2.3. Cellules organiques et plastiques	8
I.3.3. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	8
I.3.4. Propriétés électriques des cellules photovoltaïques	9
I .3.4.1. Générateur idéale	9
I.3.4.2. Générateur photovoltaïque "réel"	10
I.3.4.3. Tension de circuit ouvert	12
I.3.4.4. Courant de court circuit	12
I.3.5. Rendement	13
I.3.6. caractéristiques d'une cellule photovoltaïque	13
I.4. Influence des différents paramètres sur les caractéristiques d'un panneau	
Solaire	15
I.4.1. Influence de la résistance série	15
I.4.2. Influence de la résistance parallèle (shunt)	16
I.4.3. Association des cellules en parallèle, série et mixte	16

I.4.4.Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$	19
I.4.4.1.Schéma de simulation	20
I.4.4.2.Résultats de simulation	20
I.4.5.Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$	21
I.4.5.1.Schéma de simulation	
I.4.5.2.Influence influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$	22
I.5.Conclusion	23

Chapitre II Etude des convertisseurs DC/DC

II.1.Introduction	24
II.2. Convertisseur continu-continu	25
II.3. hacheur dévolteur (Buck)	26
II.3.1. Principe de fonctionnement du hacheur série (Buck)	25
II.3.2. Circuit d'entrée du convertisseur (Buck)	26
II.3.3. L'inductance d'entrée du convertisseur	26
II.3.4. Equation régissant le circuit du convertisseur dévolteur	26
II.3.5. formes d'onde du convertisseur dévolteur	27
II.3.6. Avantages et inconvénients du convertisseur dévolteur	28
II.4. Convertisseur survolteur (Boost)	28
II.4.1.principe de fonctionnement du convertisseur Boost	28
II.4.2.Equations régissant le circuit dévolteur (Boost)	29
II.4.4.Forme d'onde du hacheur Boost	30
II.4.3. Avantages et inconvénients du convertisseur survolteur	31
II.5. Simulation du hacheur survolteur sur charge résistive	31
II.5.1.Le schéma de simulation	31
II.5.2 Résultats de simulation	31
II.6.Conclusion	33

Chapitre III : Le principe de base de la commande prédictive des convertisseurs DC/DC.

III.1. Introduction	34
III.2. généralités sur de la commande prédictive	34
III. 2.1. Historique de la commande prédictive	34
III.2.2. Domaines d'applications	35
III.2.3. Définitions	35
III.2.3.1. La commande prédictive (MPC)	35
III.2.3.2. Principe de base de la commande prédictive	35
III.2.4. Avantages de la commande prédictive	37
III.2.5. Eléments de la commande prédictive	37
III.2.6. Modèles de représentations	39
III.2.7. La représentation d'état	39
III.2.7.1. Définition	39
III.2.7.2. La représentation d'état d'un système dynamique linéaire continu	39
III.2.8. Critères de performances	40
III.2.9. Prédiction	40
III.2.10. Problème d'optimisation sans contraintes	42
a) La fonction cout	43
b) Les matrices de pondération	43
III.3. principe de la commande prédictive des convertisseurs DC/DC	44
III.3.1. Exemple électrique de prédiction du courant dans une inductance	45
III.3.2. Modèle prédictive du convertisseur Boost connecté à un	45

panneau solaire débitant sur une charge résistive	
III.3.2.1. Système d'équations sous forme matricielle	47
III.3.2.2 Système d'équations à « n » étapes	47
d'échantillonnage	
III.3.3. L'horizon de prédiction à deux étapes	47
d'échantillonnages	
III. 3.4.Calcul de la fonction cout	47
III.5.Conclusion	47

Chapitre IV Stratégie de commande MPPT

IV.1.Introduction	48
IV.2.Connexion directe entre la source et la charge	48
IV.3.Définition de l'étage d'adaptation entre une source et une charge	49
IV.4.Principe de la recherche du point de puissance maximale	50
IV.5.Synthèse des différents MPPT solaires photovoltaïques	52
IV.5.1 .Structure de la commande MPPT analogique	52
IV.5.2.Les commandes MPPT numériques performantes	52
IV.6.Méthodes de poursuite du point de puissance maximale	52
IV.6.1. Méthode de la dérivée de la puissance	53
IV.6.1.1. Méthode de la perturbation et l'observation la (P&O)	53
IV.6.1.2.Méthode d'incrément de conductance	56
IV.6.1.3.Principe de commande Hill-Climbing	58
VI.6.2. Méthodes à contre réaction de la tension	60
IV.6.3. Méthode avec contre réaction du courant	60
IV.6.4.MPPT prédictive	61
IV.7.La régulation des stratégies de commandes MPPT	61
IV.7.1.Types des correcteurs	61

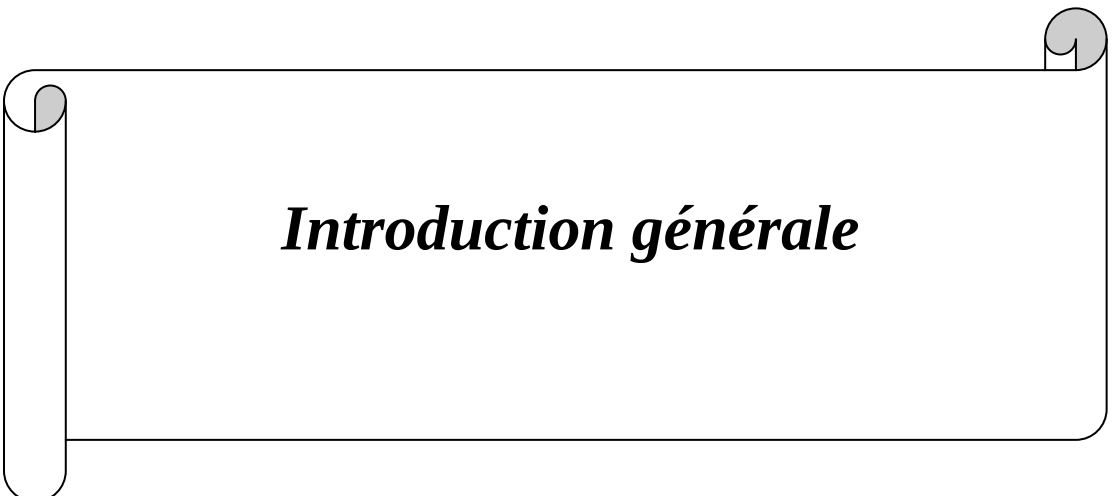
IV.7.Conclusion	62
Chapitre V : simulations et interprétation des résultats	
V.1. Introduction	63
V.2.Présentation du logicielle de simulation PSIM	63
V.3. Description et modélisation des différentes parties du système	65
V.3.1.Schéma synoptique	65
V.3.2.Le panneau solaire	65
V.3.3. Le convertisseur DC /DC	66
V.4.Le schéma de simulation avec la méthode de la perturbation et observation en utilisant le correcteur PI	66
V.4.1. Méthode de régulation du correcteur PI	67
V.4. 2.Résultats de simulation	68
a) Le courant I_R	68
b) Le courant du générateur I_{pv}	69
c) La tension V_{pv} aux bornes du générateur	70
d) La caractéristique $I(V)$ lors d'un saut d'éclairement	70
V.4.3.Interprétation de résultats	71
V.5.Simulation du système avec le MPPT prédictif	71
V.5 .1.Schéma de simulation	72
V.5.2.Résultats de simulation	73
V.7. Comparaison des résultats	75
V.8. Conclusions	78
Conclusion générale	79

Figure (I.1)	Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude L
Figure (I.2)	Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.
Figure (I.3)	Exemples de spectre solaire
Figure I.4	Cellules monocristalline
Figure(I.5)	Multi-cristallin
Figure (I.6)	Cellules Couche mince (Amorphe)
Figure(I.7)	Principe de la conversion photoélectrique
Figure(I.8)	type de dopages des semi conducteurs
Figure(I.9)	Modèle simplifié d'une cellule PV
Figure (I.10)	Schéma électrique équivalent d'une cellule PV
Figure (I.11)	Caractéristique $I(V)$ d'un module solaire, $T=25^{\circ}\text{C}$ (standard).
Figure (I.12)	Caractéristique $P(V)$ d'une cellule solaire, $T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{W/m}^2$
Figure (I.13)	Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule solaire en fonction de la Résistance série
Figure (I.14)	Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule solaire en fonction de la résistance parallèle
Figure (I.15)	Schéma de connexion des cellules solaires en série et parallèle
Figure (I.16)	panneau solaire.
Figure (I.17)	schéma de simulation d'un générateur photovoltaïque
Figure (I.18)	Caractéristique $I=f(V)$ d'un générateur photovoltaïque
Figure (I.19)	Caractéristique $P=f(V)$ d'un générateur photovoltaïque
Figure(I.20)	Influence de l'ensoleillement sur le générateur photovoltaïque
Figure(I.21)	Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I = f(V)$ à température constante.

Figure (I.22)	Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P_V = f(V_P)$ à température constante
Figure(I.23)	Influence de la température sur le générateur photovoltaïque
Figure (I.24)	Influence de la température sur la caractéristique à un ensoleillement constant
Figure (I.25)	Influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$ à un ensoleillement constant
Figure (II.1)	Schéma de principe hacheur dévolteur (Buck)
Figure (II.2)	circuit équivalent relatifs aux temps 1 et 2
Figure (II.3)	Signaux typiques du convertisseur abaisseur
Figure(II.4)	Hacheur élévateur (boost)
Figure (II.5)	Les circuits équivalents relatifs aux temps 1et 2
Figure (II.6)	Signaux typiques du convertisseur du hacheur survolteur
Figure (II.7)	simulation de l' hacheur élévateur sans régulation
Figure (II.8)	La tension aux bornes de la charge
Figure (II.9)	Le zoom de la forme de la tension aux bornes de la charge
Figure(II.10)	le courant de charge
Figure(II.11)	Oscillation du courant de charge
Figure(III.1)	principe de base de la commande prédictive
Figure(III.2)	Stratégie de commande prédictive
Figure (III.3)	la poursuite de trajectoire
Figure(III.4)	inductance traversée par un courant i
Figure (III.5)	schéma correspondant à l'état fermé et ouvert de l'interrupteur S
Figure(IV.1)	principe d'une connexion directe entre un générateur photovoltaïque et une charge

Figure(IV.2)	Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de P_{max} du GPV
Figure (IV.3)	Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par une commande (PPM) sur charge
Figure (IV.4)	Caractéristique du point de puissance maximale (MPP)
Figure (IV.5)	Caractéristique P_{PV} , V_{PV} d'un panneau photovoltaïque
Figure (IV.6)	Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation
Figure (IV.7)	Comportement en boucle ouverte et en boucle fermée du convertisseur
Figure (IV.8)	Organigramme de l'algorithme incrémentation de conductance
Figure (IV.9)	Relation entre P_{PV} et D du convertisseur statique.
Figure (IV.10)	Algorithme type de la commande Hill Climbing
Figure (IV.11)	Méthode avec Contre-réaction de tension et modulation
Figure (IV.12)	Méthode de la contre réaction en courant
Figure(IV.13):	MPPT par conductance incrémentale
Figure(V.1)	Schéma globale du logiciel PSIM
Figure(V.2)	Schéma récapitulatif de PSIM
Figure(V.3)	Schéma synoptique du système global
Figure (V.4)	Modèle du générateur photovoltaïque
Figure (V.5)	Schéma du convertisseur DC/DC sur PSIM
Figure (V.6)	Schéma de simulation avec le MPPT perturbation et observation
Figure (V.7)	le block MPPT.
Figure (V.8)	Courant I_R : optimisé
Figure (V.9)	Oscillations du courant I_R optimisé
Figure (V.10)	La tension v_c aux bornes de la charge
Figure (V.11)	forme du courant I_{pv} en fonction du temps

- Figure (V.12)** Tension aux bornes du générateur
- Figure (V.13)** la caractéristique $I(V)$ lors d'un saut d'éclairement de 200 à 800W/m²
- Figure. (V.14)** la caractéristique $P(V)$ lors d'un saut d'éclairement 200 à 800W/m²
- Figure (V.15)** simulation du système avec la stratégie de commande MPPT prédictive à deux pas de calcul.
- Figure (V.16)** le courant de la charge résistive
- Figure (V.17)** la tension aux bornes de la charge résistive
- Figure (V.18)** la tension aux bornes du générateur
- Figure (V.19)** la caractéristique $I(V)$ lors d'un saut d'éclairement 200 à 800W/m² à température constante
- Figure (V.20)** la caractéristique $I(V)$ lors d'un saut d'éclairement 200 à 800W/m² à température constante
- Figure (V.21)** le zoom des caractéristiques $I_{PV}(V)$ et $P_{PV}(V)$ en utilisant le MPPT seul
- Figure (V.22)** le zoom de la tension de charge v_c en utilisant le MPPT seul
- stratégie de commande MPPT prédictive
- Figure (V.23)** Le zoom (a, b, c) des caractéristiques $I_{PV}(V)$ et $P_{PV}(V)$ obtenus en utilisant la stratégie de commande MPPT prédictive

A decorative horizontal scroll graphic with a black outline and a light gray fill. It has a vertical tail on the left side and two small circular tabs at the top corners. The text "Introduction générale" is centered within the scroll.

Introduction générale

Introduction :

Le développement industriel durant ces dernières années a engendré une énorme croissance dans la consommation de l'énergie mondiale et ne cessera pas d'augmenter pour les années à venir. Ce facteur raréfiera les énergies fossiles au moyen terme tout en donnant lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. A cette crise annoncée, de nombreuses procédures ont été prises ; la diminution de la consommation énergétique et le développement de nouvelles sources d'énergies propres et renouvelables. [2],[6],[20]

Le rayonnement solaire est reparti sur toute la surface de la terre, sa densité n'est pas grande et ne cause aucun conflit entre les pays contrairement au pétrole. Dans notre pays, le problème d'accès à l'électricité pour les populations rurales et du grand désert constitue l'un des facteurs de l'exode rurale, c'est donc un déficit de mettre à leur disposition une source d'énergie capable de stimuler l'activité économique et de conduire à une amélioration de leurs conditions de vie. [6] , [8] , [19]

Les systèmes photovoltaïques présentent une solution d'avenir grâce à leurs grandes avantages (pas de gaz à effet de serre, énergie inépuisable, exploitable dans plusieurs sites). Ces capteurs sont souples, ce qui facilite leur intégration : vitrages, véhicules, équipements électroniques et même vêtements deviennent producteurs d'électricité. La maîtrise grandissante de l'industrie assure un abaissement régulier des coûts. La multiplication de la production des panneaux solaires au monde engendre la chute des prix à 20% chaque trois ans. [6] [18],

Pour atteindre ces performances il faut franchir plusieurs insuffisances que présentent les panneaux photovoltaïques (rendement faible, difficulté d'extraire la puissance optimale et sensibilité au changement climatique). D'où la nécessité de trouver des techniques d'optimisations pour extraire le maximum de puissance transmittant des panneaux solaires ; c'est le principe dit « la poursuite du point de puissance maximale » MPPT ou (maximum power point tracker). [19]

Dans ce contexte, notre travail est consacré à optimiser un champ d'énergie photovoltaïque basé sur la commande MPPT prédictive ; cette technique basée sur le modèle mathématique permet, non seulement de poursuivre le point de puissance maximale à l'instant présent mais aussi de prédire le comportement du système photovoltaïque au futur proche (sur un ou plusieurs pas de calcul). Après avoir déterminé le modèle mathématique,

on applique cette commande au système pour le forcer à poursuivre le point de puissance maximal à l'instant suivant. [\[9\]](#)

Notre travail présente un système photovoltaïque autonome reliant un algorithme de la commande MPPT prédictive d'un convertisseur statique optimisée et une charge résistive.

Dans le premier chapitre, nous rappellerons la conception d'un système photovoltaïque.

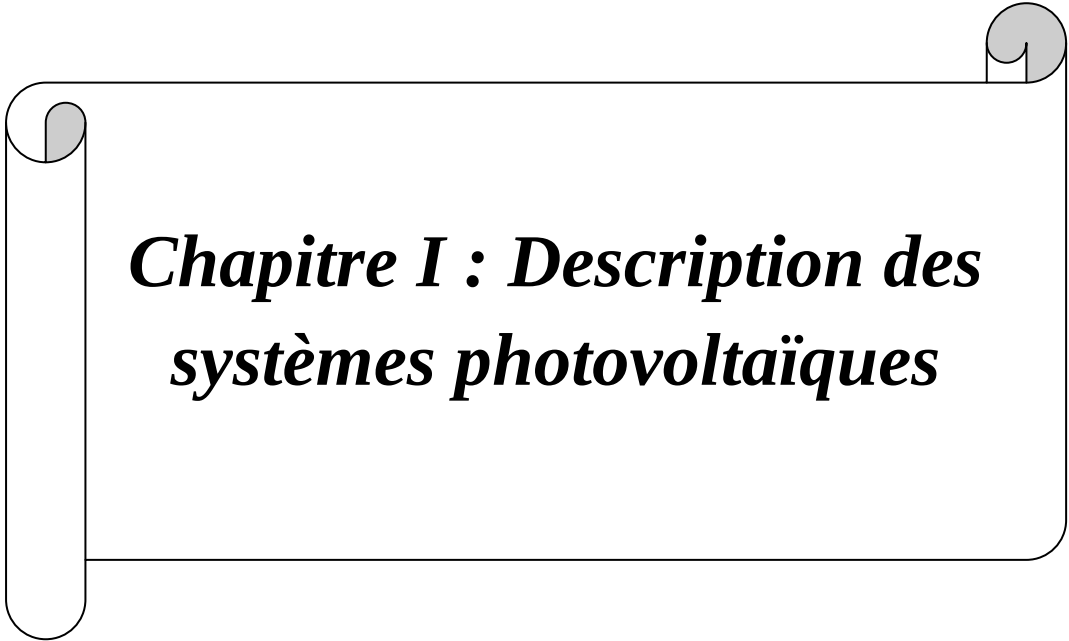
Dans le deuxième chapitre, nous étudierons les différents convertisseurs statiques continu-continu destinés aux systèmes photovoltaïques

Dans le troisième chapitre, nous présenterons le principe de la commande prédictive des convertisseurs statiques continu-continu.

Dans le quatrième chapitre, nous présenterons le principe de poursuite du point de puissance maximale.

Dans le dernier chapitre, nous effectuerons une application en simulation de la commande MPPT prédictive considéré.

Finalement, nous terminerons ce manuscrit par une conclusion générale.

A decorative graphic consisting of a horizontal scroll with a vertical strip on the left side. The scroll has a light gray fill and a black outline. The text is centered within the scroll.

Chapitre I : Description des systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction:

Le soleil est une étoile pleine d'énergie émet une puissance sous forme de rayonnements qui atteint toute la surface terrestre, malgré leur atténuation lorsque ils traversent la croûte terrestre, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol. Allant de 1000 W/m^2 crête dans les zones tempérées jusqu'à 1400 W/m^2 lorsque l'atmosphère est faiblement polluée. La densité de cette puissance reçue par une surface soumise à un flux lumineux explique la notion de l'éclairement.

Au jour d'hui dans de nombreux pays au monde notamment dans notre pays avec environ 3200 heures d'ensoleillement par an, l'exploitation de cette énergie propre est devenue la principale source d'énergie qui attire la recherche scientifique.

Le flux lumineux dépend de plusieurs phénomènes physiques (la pollution, l'inclinaison de la surface terrestre, la période de l'année, l'instant considéré dans la journée et la nature des couches nuageuses). Donc si on prend en considération tous ces derniers, on peut dire qu'il est difficile de prédire l'irradiation sur un lieu ou une heure précise. Ce qui présente une influence directe sur le comportement du générateur photovoltaïque. [2] [4] [5]

Dans ce chapitre nous présenterons la conception des systèmes photovoltaïques.

I.2. L'effet photovoltaïque:**I.2.1.Énergie solaire :**

La terre reçoit une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. La quantité d'énergie reçue par la terre dépend des couches atmosphériques car elle est caractérisée par le nombre de masse d'air AM (abréviation appelée par les scientifiques) **figure (I.2)** et la position du soleil (latitude) pendant la journée représentée sur la **figure (I.1)**. [7]

Ou :

L : la latitude

TS: heure solaire fixé à une demi-journée TS =12 heures.

δ : L'angle horaire comptée positivement l'après midi définit comme suit :

$$\delta = 15^\circ. (TS - 12)$$

(I.1) [2]

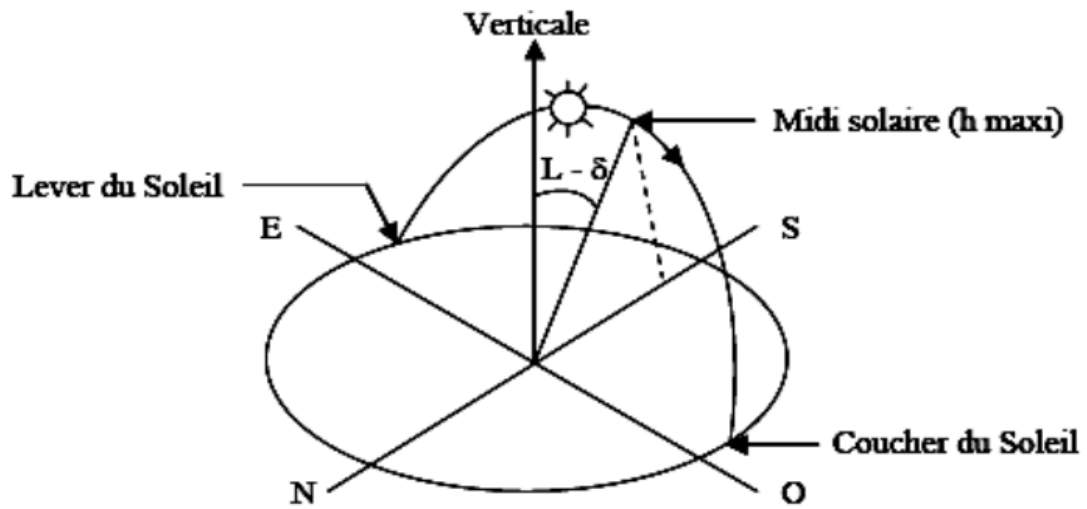


Figure (I.1) : Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude L [2]

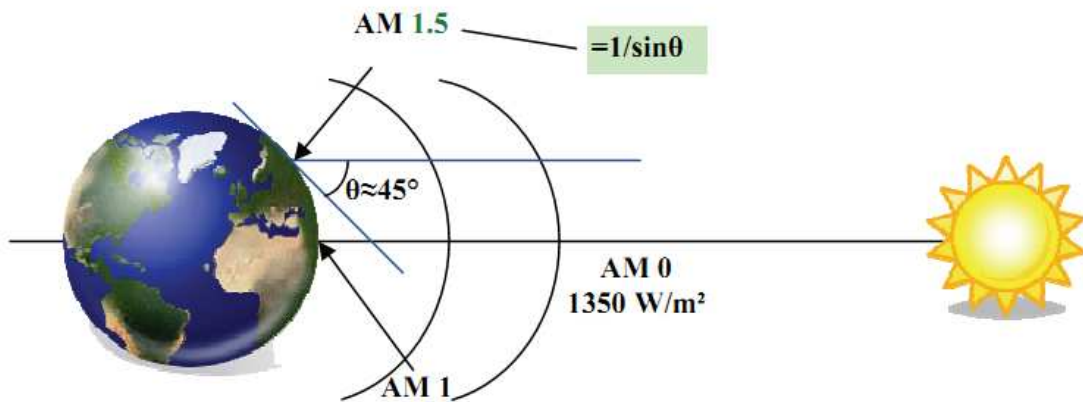


Figure (I.2) : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM. [4]

I.2.2. Le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie donnée par la relation suivante : [6] , [7]

$$E = c \cdot \frac{h}{\lambda} \quad (I.2)$$

Où :

E : représente la quantité d'énergie ;

λ : la longueur d'onde ;

h : la constante de Planck ;

c la vitesse de la lumière.

Le flux d'énergie solaire est transmis sous forme de rayonnements électromagnétiques, (sous forme d'ondes électromagnétique).

Les longueurs d'ondes du rayonnement solaire sont comprises entre 0.22 et 10 μm [6] [8].

I.2.3. Le spectre solaire :

Le spectre solaire à l'atmosphère terrestre est décalé vers le rouge et l'infrarouge par rapport au spectre hors atmosphère. Représenter sur la figure (I. 3).

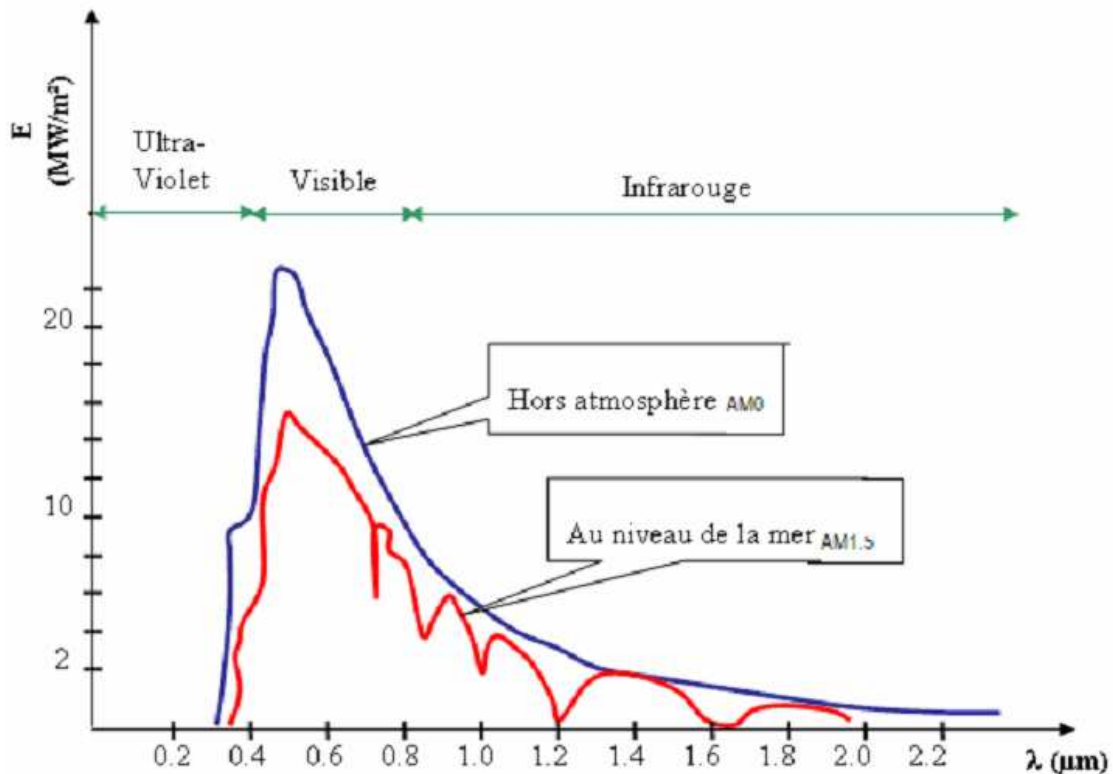


Figure (I.3) : Exemples de spectre solaire [6]

Avec :

AM0 : Conditions d'éclairement en haut altitude.

AM1.5 : Conditions d'atmosphère terrestre, le soleil étant à 30° sur l'horizon.

Le tableau suivant donne les valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire :

λ (μm)	E_{ph} (eV)	Zone
0.2	6.2	Ultraviolet
0.4	3.1	Visible bleu
0.5	2.48	Visible jaune-vert
0.78	1.59	Visible rouge
1	1.24	Infrarouge
2	0.62	Infrarouge
4	0.31	Infrarouge

I.3. La cellule photovoltaïque :

I.3.1. Historique des cellules solaires :

En 1839, Becquerel découvre pour la première fois l'effet photovoltaïque. Il s'agit de convertir directement l'énergie solaire en énergie électrique.

En 1954, les chercheurs américains du laboratoire de la compagnie Bell Téléphone ont produit le premier type pratique de la cellule solaire, une cellule de silicium de type monocristalline avec une efficacité de conversion d'énergie jusqu'à 6%. Depuis, les recherches sont devenues plus intenses sur les cellules photovoltaïques et se sont développées à l'échelle industrielle afin d'améliorer leur efficacité et réduire leur coût.

En 1982, les dispositifs photovoltaïques introduits les semi-conducteurs. Le matériau utilisé était le sélénium avec une efficacité de conversion d'énergie qui n'a jamais excédé approximativement 2%.

Avec le développement industriel l'utilisation des différents semi conducteurs a permis d'augmenter l'efficacité de la conversion d'énergie jusqu'à une efficacité de 31% pour une cellule d'arséniure de gallium (GaAs) avec un éclairement solaire équivalent à 350 W/m² (1988).

Actuellement l'usine Konarka (Etats-Unis) produit des panneaux en plastique à bas coût. [3], [6]

I.3.2. Les types de cellules photovoltaïques :

Les différents matériaux cités ci-dessus sont utilisés dans la fabrication des cellules photovoltaïques. Le silicium sous ces différentes formes (monocristallin, multi-cristallin, amorphe, en couche mince,...) est le plus utilisé dans les applications terrestres selon les performances recherchées. [6] [7]

I.3.2.1. Les cellules monocristallines :

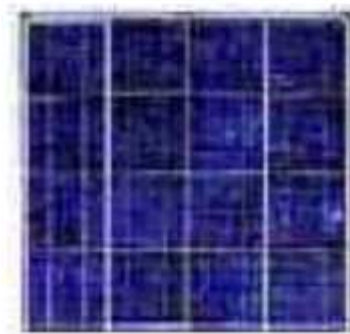
Elles sont de la première génération des cellules utilisées comportent deux technologies : le silicium monocristallin et le silicium multi-cristallin. Le premier est le plus efficace que le deuxième car son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie. représentées sur la **figure(I.4)** [6] , [7]



Monocristalline

Figure I.4 : Cellules monocristalline [7]

Le deuxième sous forme de cristaux multiples ne nécessite pas une grande énergie pendant la fabrication, son rendement peut aller de 25 à 35 % moins que le premier, néanmoins il présente l'avantage d'être moins coûteux. Voir la **figure (I.5)**



Figure(I.5) :Multi-cristallin [6]

I.3.2.2.Couche mince (Amorphe) :

Ces cellules son constituées de plusieurs couches minces du silicium de manière que chaque couche destinée à capter une longueur d'onde qui lui convient lors du rayonnement solaire **Figure(I.7)**. Elle ne nécessite pas une grande énergie de fabrication, présente un rendement allant de 5 à 10% moins que les cellules monocristallines. **Figure(I.6)** [3] [6] , [7]



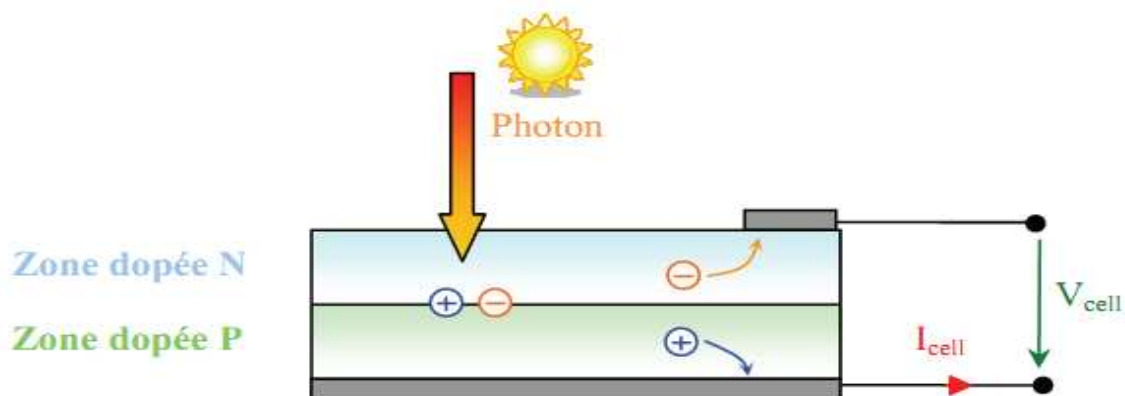
Figure (I.6): Cellules Couche mince (Amorphe) [6]

I.3.2.3. Cellules organiques et plastiques :

Afin de diminuer le coût et augmenter le rendement et l'efficacité des cellules photovoltaïques, de nombreuses recherches au monde ont été menées pour découvrir de nouveaux matériaux photovoltaïques moins coûteux ce qui permettra de résoudre la cherté des matériaux utilisés actuellement. Depuis plusieurs années, on parle de matériaux organiques et de polymères qui présentent, sous certaines conditions, des propriétés photovoltaïques. [6], [7].

I.3.3. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Pour produire un courant électrique par le rayonnement solaire, il faut utiliser un ou plusieurs matériaux capables de capter les longueurs d'ondes des photons cités ci-dessus (**Tableau(I.1)**). Une fois les photons seront absorbés par le ou les matériaux, leur énergie excite les électrons du matériau pour enfin collecter un courant électrique. Donnée sur la **figure (I.7)**

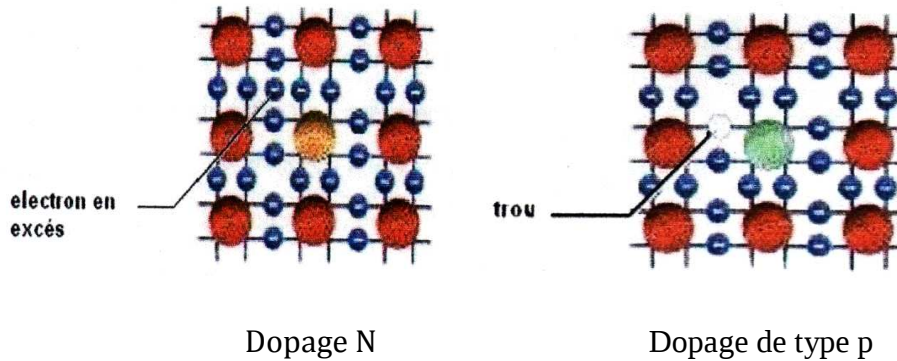


Figure(I.7) : Principe de la conversion photoélectrique [4], [7]

Avec :

Zone dopée N : semi – conducteur donneur d'électrons } Voir **Figure(I.8)**
 Zone dopée P : semi – conducteur composé de trous. }

L'interface des deux régions s'appelle jonction.



Figure(I.8) : type de dopages des semi conducteurs [7]

I.3.4. Propriétés électriques des cellules photovoltaïques :

I .3.4.1.Générateur idéale : [6]

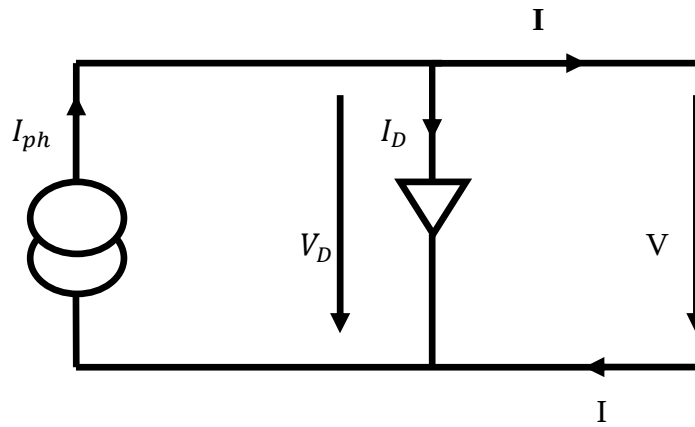
Peut être décrit de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule PV . Si l'on connecte une charge résistive aux bornes du générateur photovoltaïque, celui-ci débitera une part dans la diode et le reste vers la charge, voir **figure (I.9)**

On a alors la relation:

$$I = I_{ph} - I_D \quad (I.3)$$

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode : [5], [6] , [7].

$$V = V_D \quad (I.4)$$



Figure(I.9) : Modèle simplifié d'une cellule PV

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

$$I_D = I_0 \left(\exp \left(\frac{V_D}{V_T} \right) - 1 \right) \quad (I.5)$$

Avec

I_0 Courant de saturation inverse de la diode

$V_T = kT/q$, potentiel thermique

Le courant débité équivaut à :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{V_D}{V_T} \right) - 1 \right) \quad (I.6)$$

I.3.4.2. Générateur photovoltaïque “réel” :

Représenter par une source de courant idéale, branchée avec une ou deux diodes en parallèle et une résistance série R_s . la première diode $D1$ décrit les propriétés de semi conducteur de la cellule et la seconde diode $D2$ modélise le phénomène de recombinaison des porteurs de charge.(voir **Figure(I.10)**)

Le modèle à une diode (empirique) est actuellement le plus utilisé en raison de sa simplicité. Il permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes et des conditions climatiques (ensoleillement et température ambiante) [4], [5], [6] [7]

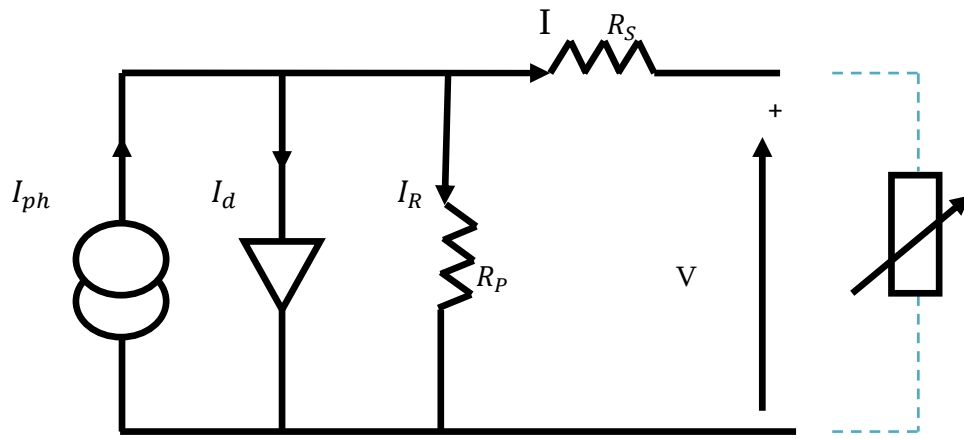


Figure (I.10) : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV

a) Le courant de la photopile a pour expression :

$$I = I_{ph} - I_d - I_R \quad (I.7)$$

Avec :

$$I_{ph} = I_{sc} \cdot \left(\frac{G}{1000} \right) \quad (I.8)$$

Photo courant de cellule, proportionnel à l'éclairement G

Ce courant correspond également au courant court circuit I_{cc} , avec : $I_{sc} \cong I_{cc}$,

b) Le courant I_d :

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{a \cdot k \cdot T}} \right) \quad (I.9)$$

I_d : Est le courant de diode .

Si on fait apparaître le potentielle thermodynamique $V_T = \frac{q}{a \cdot k \cdot T}$

Avec :

a : Le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < a < 3$).

I_0 : Le courant de saturation inverse de la diode

q : la charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$)

k : constant de Boltzmann ($1,38.10^{-23}$ J/K).

T : température de jonction (K).

c) Le courant I_R :

$$I_R = \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (I.10)$$

R_p : Résistances shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de cellule.

R_s : résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi conducteur, ainsi les résistances Ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules.

A partir des equations précédentes on peut tirer l'expression du courant délivré par une cellule photovoltaïque ainsi que sa caractéristique courant-tension.

L'intensité I en fonction de la tension V aux bornes d'une cellule est [4] :

$$I = I_{sc} \left(\frac{G}{1000} \right) - I_0 \left[e^{\left(\frac{V + I R_s}{V_T} \right)} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (I.11)$$

I.3.4.3. Tension de circuit ouvert :

La tension de circuit ouvert est déterminée pour un courant de sortie nul ($I=0$) on peut déduire : [7, 14 , 15, 21, 22, , 23]

$$0 = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_{co}}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_p} \quad (I.12)$$

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

$$V_{co} = V_T \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (I.13)$$

Avec :

V_{co} : la tension à circuit ouvert de référence (V)

I.3.4. 4. Courant de court circuit : [1] [8]

Le courant de court-circuit est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur est nulle.

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{R_s I_{cc}}{V_T}} - 1 \right) - \frac{R_s I_{cc}}{R_p} \quad (I. 14)$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme $I_0 \left[e^{\left(\frac{V+I.R_s}{V_T} \right)} - 1 \right]$; devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court circuit est alors :

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_p}} \quad (I. 15)$$

A des niveaux d'irradiation solaire différentes le photocourant (I_{ph}) est proportionnel à elle. Dans le cas idéale donnée par la relation:

$$I_{cc} = I_{cc0} \cdot \left(\frac{G}{1000} \right) \quad (I. 16)$$

Ou :

I_{cc0} : le courant de court-circuit sous une l'irradiation standart 1000W/m²

I.3.5. Rendement :

Le rendement d'une photopile est le rapport entre l'énergie électrique qu'elle fournit et l'énergie solaire reçue sur l'ensemble de sa surface.

$$\eta = \frac{\text{Energie electrique}}{\text{Energie lumineuse}}$$

I.3.6.caracteristiques d'une cellule photovoltaïque : [22, 23,11 ,21]

a).caracteristique courant-tension :

C'est une caractéristique fondamentale d'une cellule solaire. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante . Cette caracteristique contient trois zone de fonctionnement représenter sur la figure (I.11).

- **La zone (I) :** où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- **La zone (II) :** correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre la zone précédente et la zone suivante, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- **La zone (III) :** qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à une source de tension.

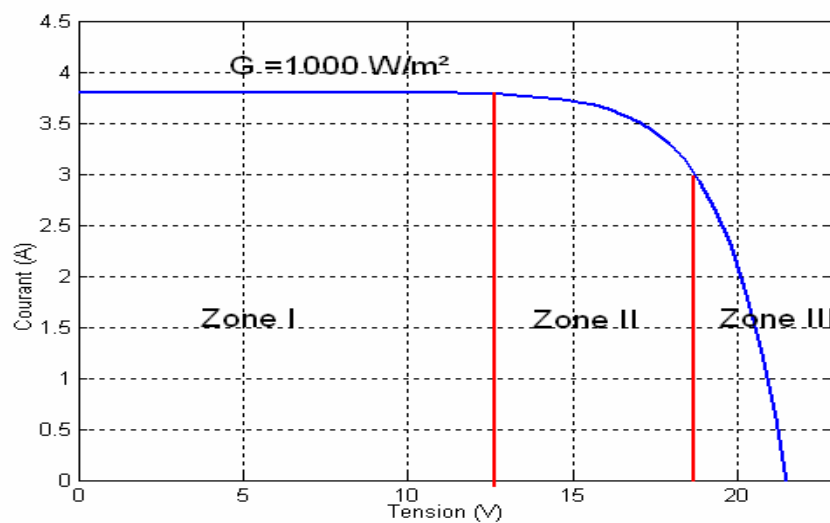


Figure (I.11) : Caractéristique I(V) d'un module solaire, T=25°C (standard) [8]

b)Caractéristique puissance-tension :

La puissance débitée par le module photovoltaïque dépend du point de fonctionnement de cette dernière ; c'est le produit de l'intensité de courant et de la tension entre ses bornes (Figure). Le point « M » représente la puissance maximale débitée par le module. [5]

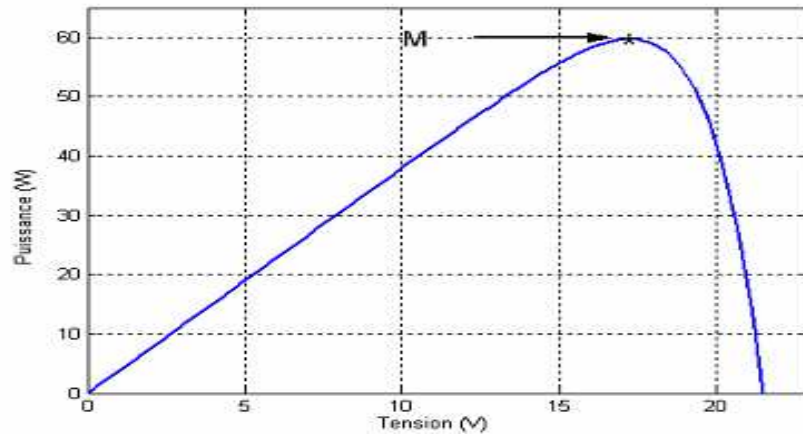


Figure (I.12) : Caractéristique $P(V)$ d'une cellule solaire, $T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{W/m}^2$
[8] [5]

I.4. Influence des différents paramètres sur les caractéristiques du panneau solaire :

I.4.1. Influence de la résistance série :

La résistance série a une influence direct sur les deux caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$ [8].

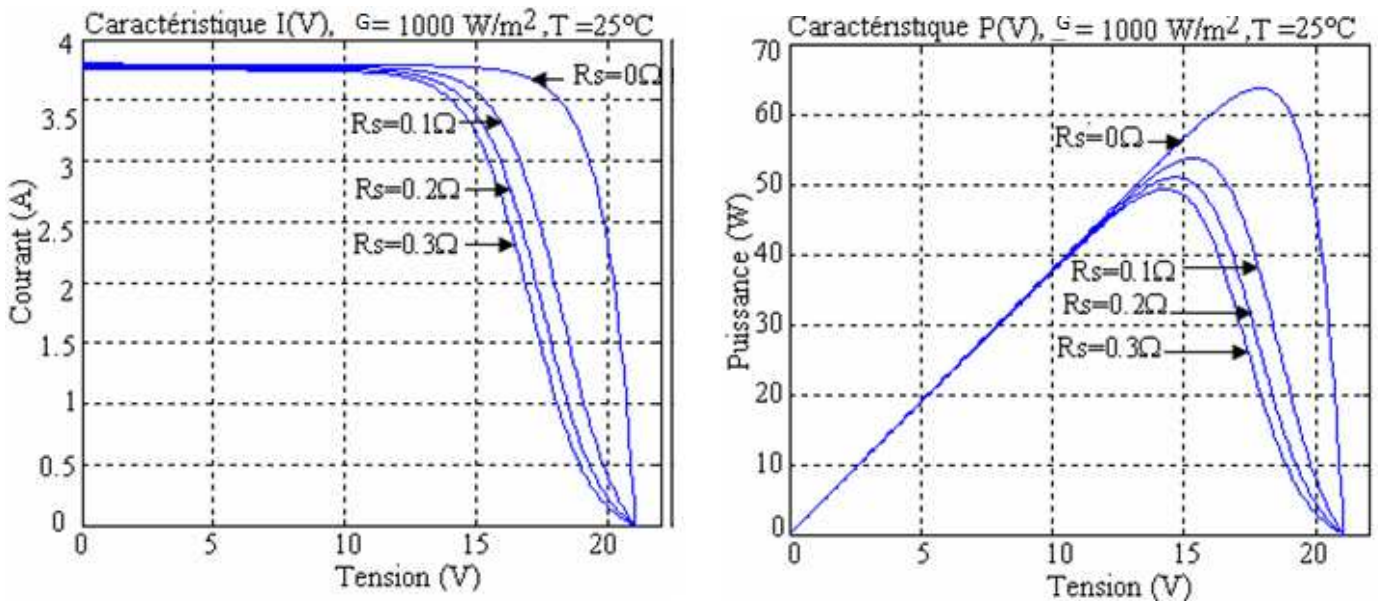


Figure I.13: Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule solaire en fonction de la résistance série [7]

I.4.2. Influence de la résistance parallèle (shunt) :

En générale, la résistance shunt est très élevée est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant.

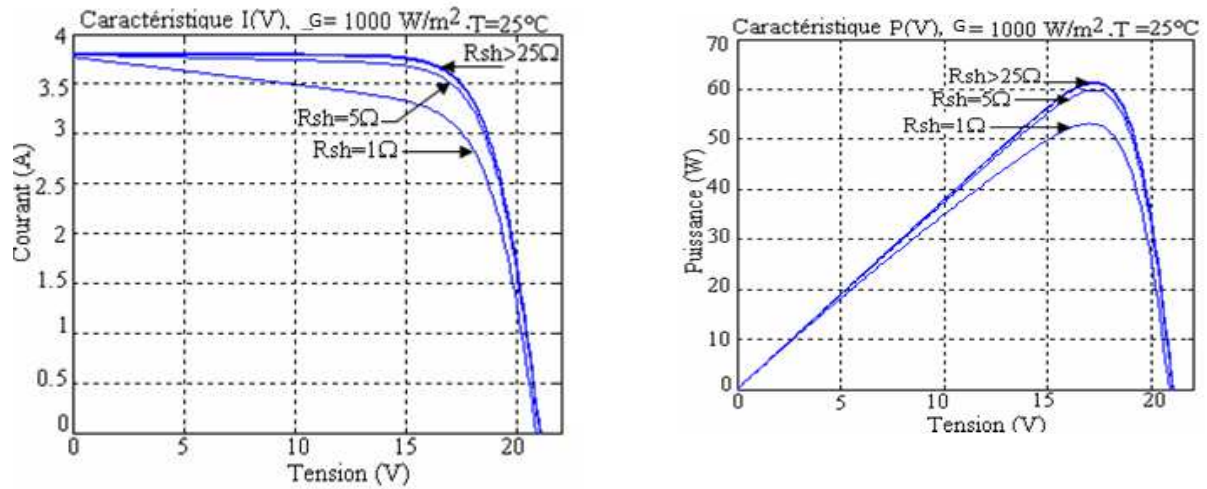


Figure (I.14) : Caractéristiques I (V) et P(V) d'une cellule solaire en fonction de la résistance parallèle [7],

I.4.3. Association des cellules en parallèle, série et mixte (série et parallèle) :

Pour obtenir une augmentation de la tension du générateur en, associe N_s cellules en série et pour augmenter le courant, on associe N_p cellules en parallèles. Cette association mixte de cellules forme des modules photovoltaïques.

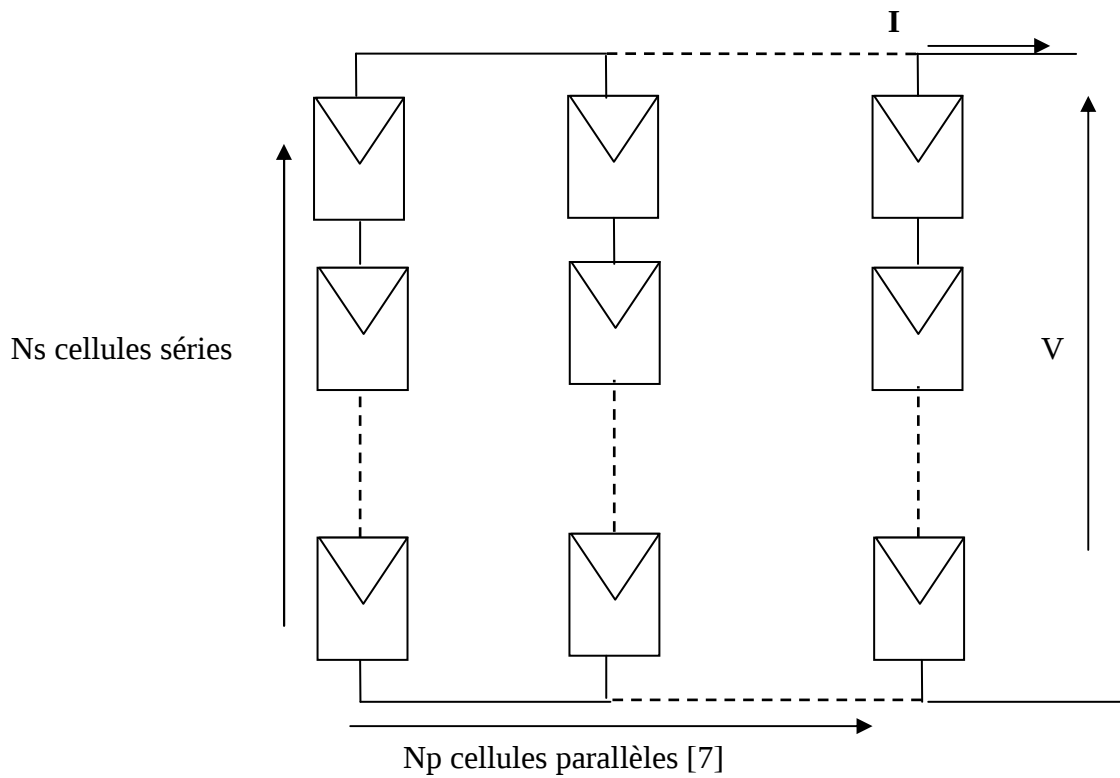


Figure (I.15) : Schéma de connexion des cellules solaires en série et parallèle [5]

Il est nécessaire d'associer ces modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque **Figure (I.10).**[5]



Figure (I.16) : panneau solaire.

L'équation relative à un groupement mixte formé par la mise en série de N_s cellules en série et N_p en parallèle est la suivante:

$$I = N_s \cdot I_{\text{cell}} \quad (\text{I. 21})$$

$$V = N_s \cdot V_{\text{cell}} \quad (\text{I. 22})$$

Pour la modélisation et la simulation à l'aide du logiciel PSIM on a choisie le modèle photovoltaïque contenant 36 cellules, ayant les caractéristiques suivantes :

Courant maximal(I_{max})	3.5A
Tension maximale (V_{max})	17.1V
Puissance maximale (P_{max})	60W
Courant de saturation ($I_{sc, n}$)	3.8A
Tension du circuit ouvert (V_{co})	21.1V
Coefficient d'idéalité de la tension (K_v)	-0.38V/K
Coefficient d'idéalité de la lumière (I_{pv})	3.8A
Nombre de cellules séries (N_s)	36
Courant nominal de saturation ($I_{0,n}$)	2.10^{-8} A
Courant produit par la lumière I_{pv}	3.8A
Facteur d'idéalité de la jonction (a)	1.2
Resistance parallèle (R_p)	1000 Ω
Resistance série (R_s)	0.008 Ω

Schéma de simulation de ce model sur PSIM :

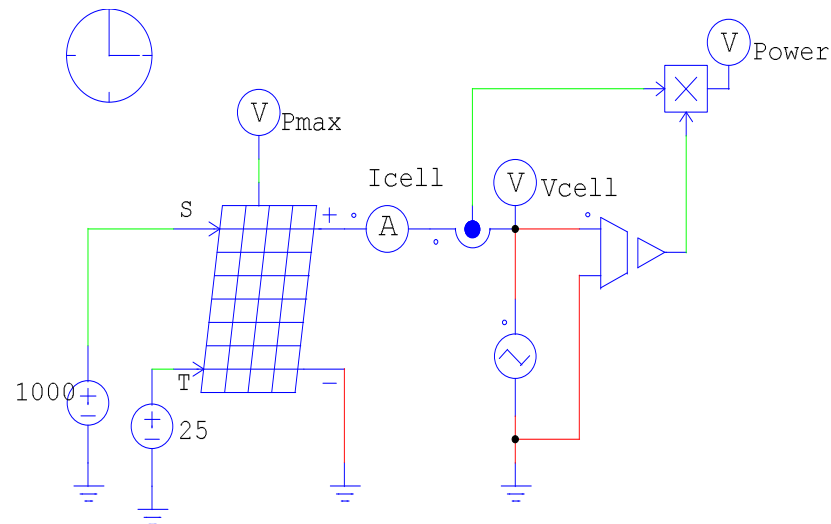


Figure (I.17) : schéma de simulation d'un générateur photovoltaïque

La caractéristique $I=f(V)$ pour un éclairement et température constants et particulièrement aux conditions standards ($G=1000W/m^2$, $T=25^\circ C$) est illustrée dans la figure suivante :

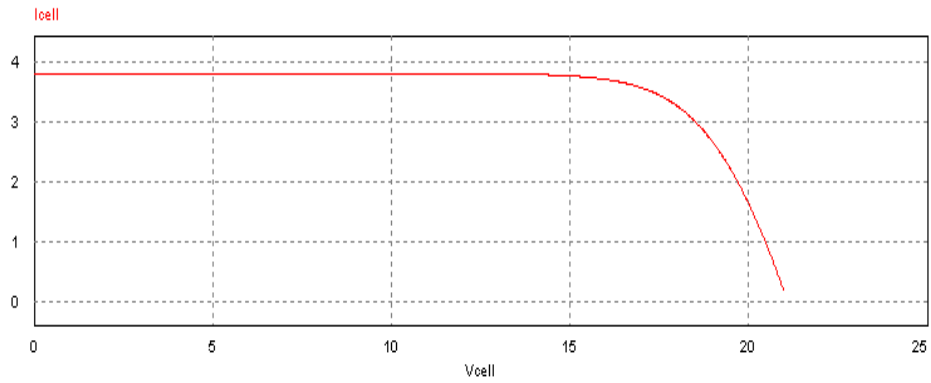


Figure (I.18) : Caractéristique $I=f(V)$ d'un générateur photovoltaïque

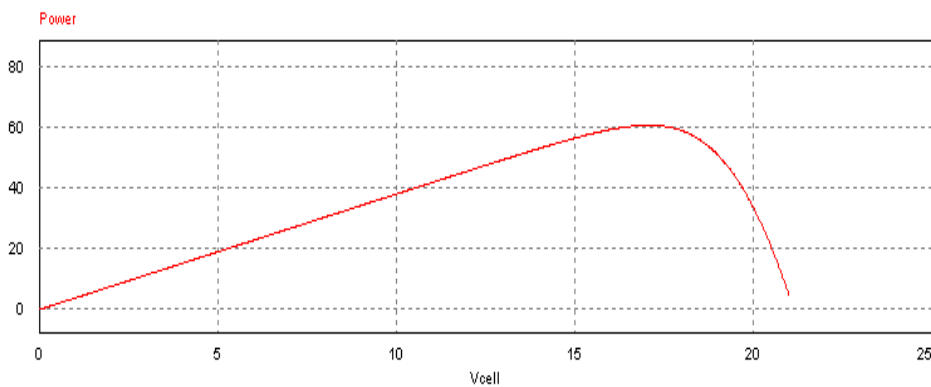
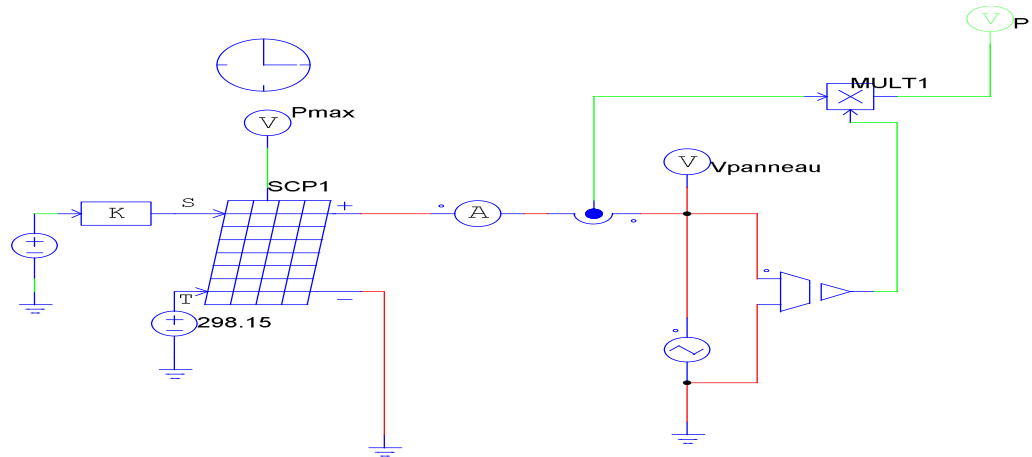


Figure (I.19) : Caractéristique $P=f(V)$ d'un générateur photovoltaïque

I.4.4. Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$:

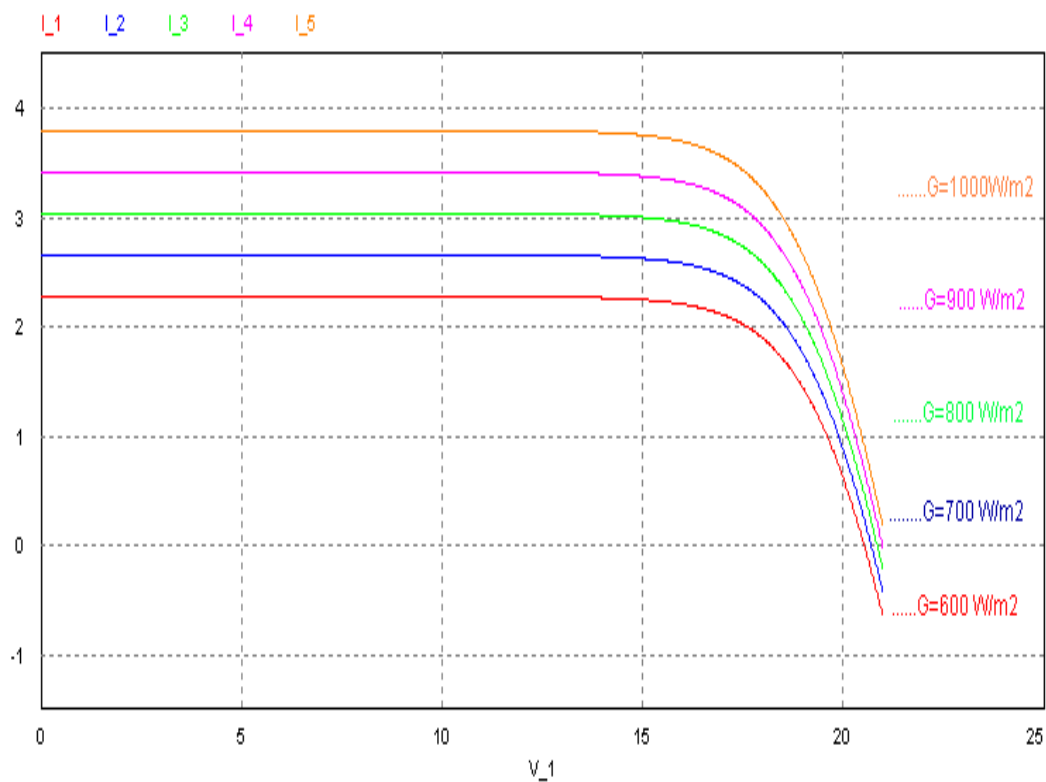
Nous avons fait varier l'irradiation solaire de 600 W/m^2 à 1000 W/m^2 avec un pas de 100 W/m^2 en maintenant la température constante. La figure (I.21) montre le schéma de simulation sur PSIM de cette influence.

I.4.4.1. Schéma de simulation :



Figure(I.20) : Influence de l'ensoleillement sur le générateur photovoltaïque

I.4.4.2. Résultats de simulation :



Figure(I.21). Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I = f(V)$ à température constante.

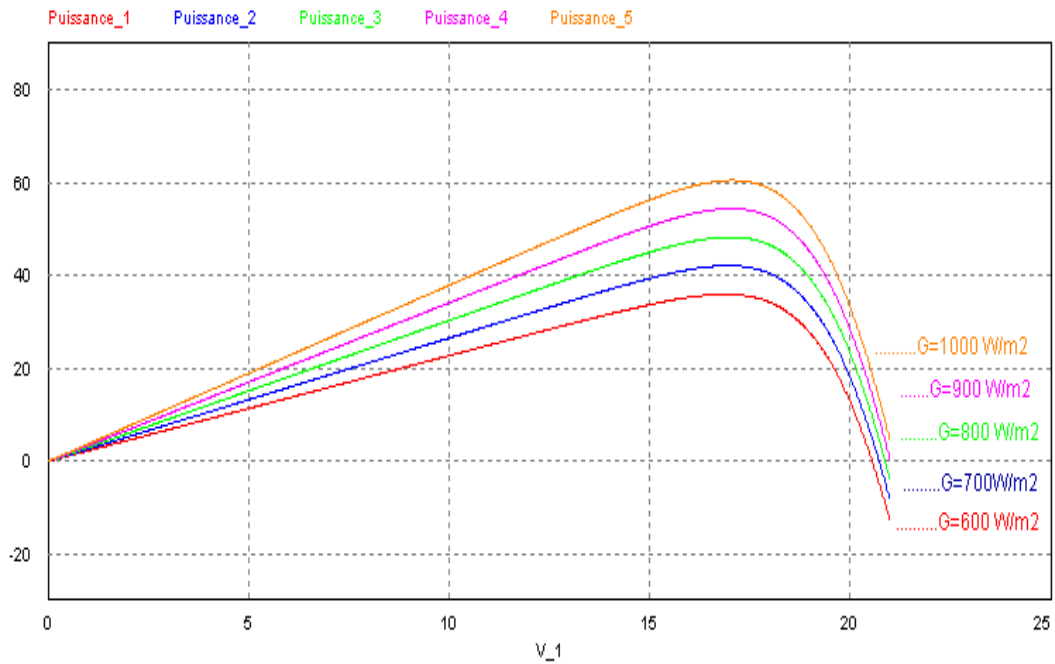
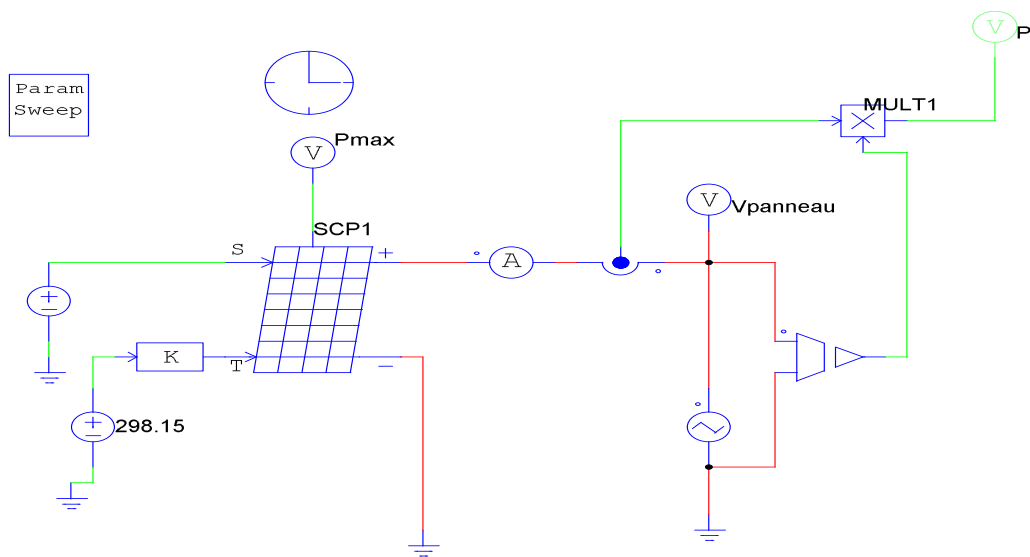


Figure (I.22) : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P_V = f(V_P)$ à température constante

I.4.5. Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$:

Nous avons effectué une simulation en maintenant une irradiation constante à différentes températures de 15°C avec un pas de 10°C . La figure (I.24) montre le schéma de simulation sur PSIM de l'influence de la température sur le générateur photovoltaïque

I.4.5.1. Schéma de simulation :



Figure(I.23) : Influence de la température sur le générateur photovoltaïque

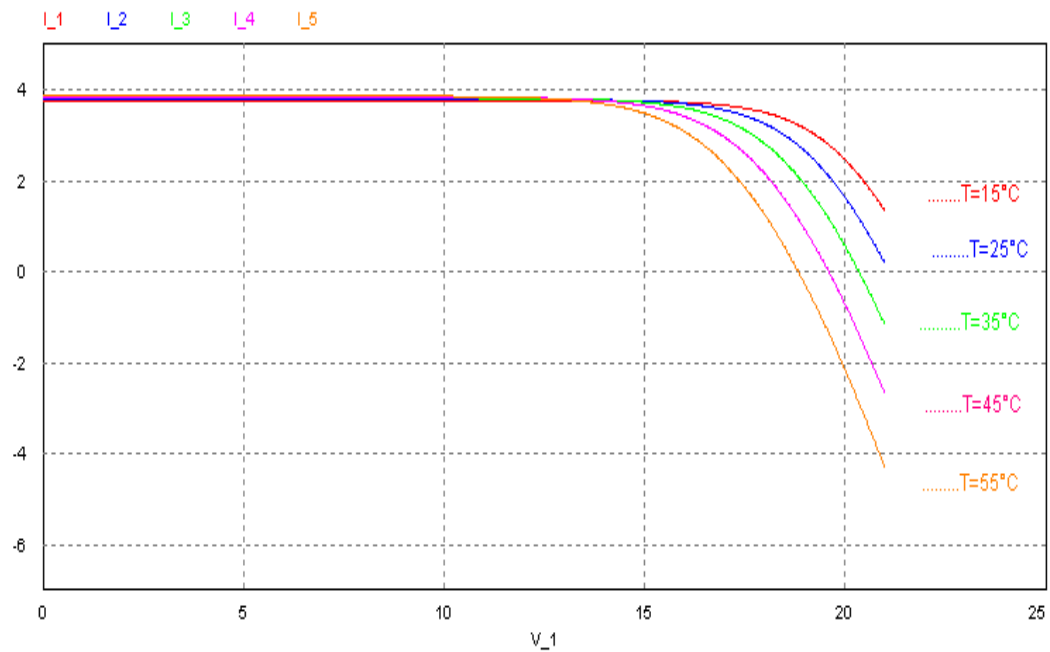


Figure (I.24) : Influence de la température sur la caractéristique à un ensoleillement constant.

On remarque que la température a une grande influence sur la tension (V_{pv}) et une légère influence sur le courant (I_{ph}).

I.4.5.2. Influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$:

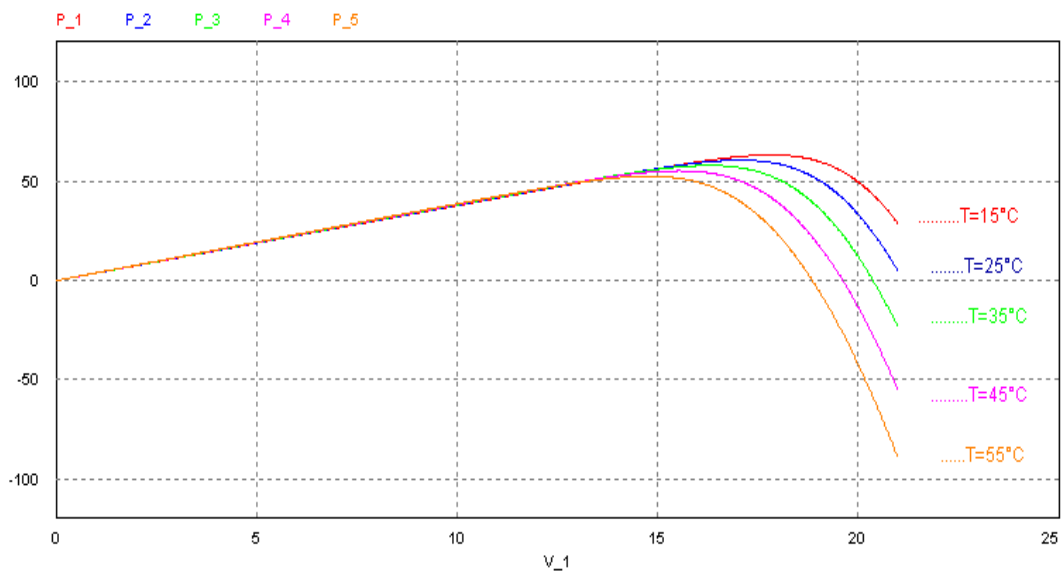


Figure (I.25): Influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$ à un ensoleillement constant.

Interprétation des résultats :

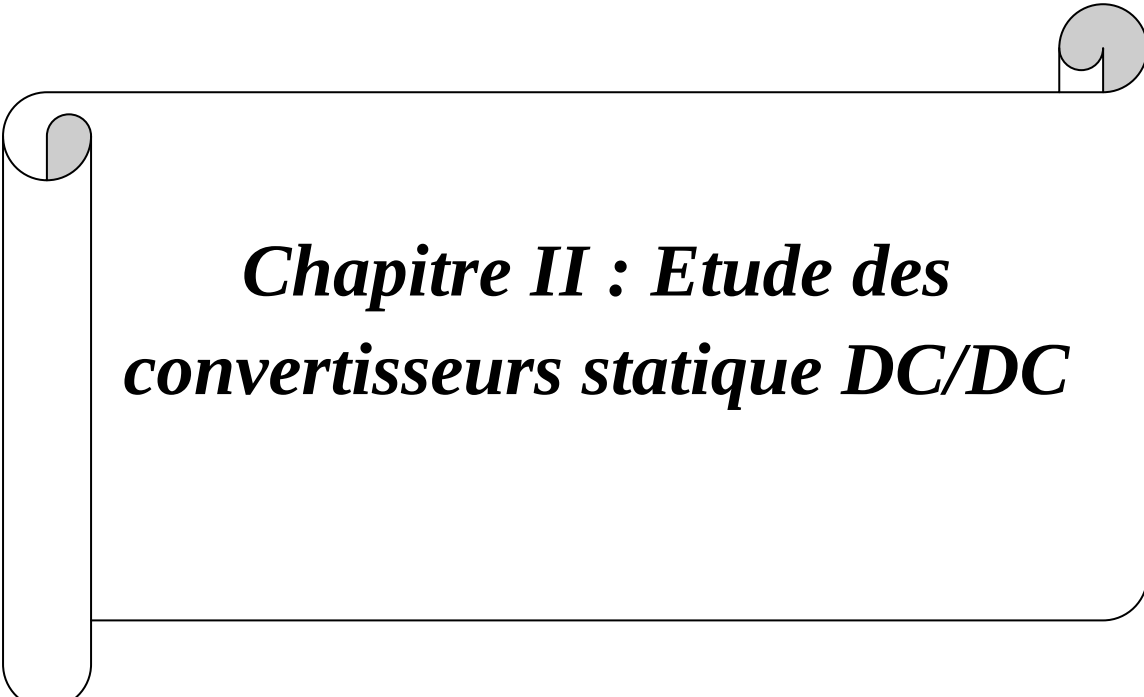
Quand l'ensoleillement augmente, l'intensité du courant photovoltaïque croît, les courbes I-V se décalent vers les valeurs croissantes permettant au module de produire une puissance électrique plus importante (Figure (I.21)). Le photo-courant est donc directement lié à l'éclairement.

Le comportement de la caractéristique I-V d'un générateur PV en fonction de la température (Figure I.25) est complexe. Lorsque la température augmente, la tension du générateur diminue, par contre le courant demeure constant.

L'effet de l'augmentation de la température sur la caractéristique P-V fait diminuer légèrement la puissance et la tension du générateur photovoltaïque.

I.5.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié la conception d'un générateur photovoltaïque, nous avons pu simuler les caractéristiques courant-tension, prenant en compte les variations de l'éclairement et de la température, ce qui a permis la détermination des différentes valeurs optimales de ces facteurs pour le bon fonctionnement du générateur photovoltaïque.

A decorative scroll frame with a light gray background and a black border. The frame has a vertical scroll on the left side and a horizontal scroll on the top right side. The text is centered within the frame.

Chapitre II : Etude des convertisseurs statique DC/DC

II.1.Introduction :

La poursuite du point de puissance maximale du module solaire nécessite un étage d'adaptation de la charge à la source, qu'on peut assurer en utilisant des convertisseurs statiques DC-DC, car la connexion directe présente des déviations du point de puissance maximale.

Il est nécessaire d'inclure les techniques de commande de ces convertisseurs pour assurer leur fonction. Ces techniques peuvent être conçues en se basant sur les topologies Buck/Boost ces deux types de convertisseurs ne nécessitent qu'un seul transistor, sont simples et peuvent avoir un rendement élevé. Ils fournissent un courant unidirectionnel, ce qui ne présente aucun inconvénient dans une installation photovoltaïque. Ils ne fournissent qu'une seule polarité de la tension de sortie, ce qui réduit les applications au cas d'une charge DC. [8]

II.2. Convertisseur continu-continu: [7] [19],

Convertisseur continu-continu ou Le hacheur est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue.

Le signal de commande de fonctionnement du convertisseur DC-DC est élaboré en passant par une commande MLI (modulation largeur d'impulsion)

Sa fréquence est donnée par la relation suivante :

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{II. 1})$$

Avec :

f : Fréquence qui est de l'ordre de plusieurs dizaines de kHz ou même plus.

T : la période de cycle de fonctionnement interne

Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander. Les *MOSFETS* (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les *IGBTs* (transistors bipolaires à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance.

Pendant une durée T_{on} et bloqué pendant le reste de la période T . on définit le rapport cyclique comme suit :

$$\alpha = \frac{T_{on}}{T} \quad (II. 2)$$

C'est en réglant ce rapport cyclique que le contrôleur peut agir sur le convertisseur. [19]

II.3. hacheur dévolteur (Buck) :

Le hacheur dévolteur, son schéma de principe est présenté sur la Figure (II.1). Il comporte un interrupteur S (peut être un IGBT, MOSFET,.....) à amorçage et à blocage commandés et un interrupteur à blocage et amorçage spontanés (diode D).

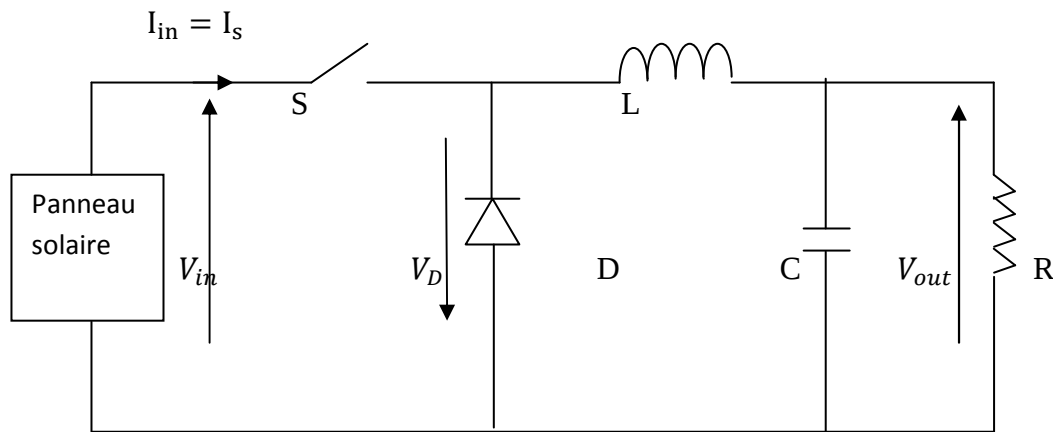


Figure (II.1):Schéma de principe hacheur dévolteur (Buck) [19]

II.3.1. Principe de fonctionnement du hacheur série (Buck) :

Le fonctionnement du circuit peut être divisé en plusieurs temps :

Le temps 1 commence quand le transistor S est fermé en $t = 0$: Le courant sortant du panneau solaire croît d'une manière considérable en traversant l'inductance puis s'écoule dans la capacité C et la charge, si on suppose que la tension d'entrée est supérieure à celle de sortie.

Le temps 2 commence quand le transistor S est bloqué en ($t = \alpha T$): Dans ce cas, le courant de l'inductance décroissant en traversant la diode D et s'écoule vers l'ensemble formé par la charge et la capacité C .

Si un nouveau cycle commence avant que le courant de l'inductance ne soit annulé, le fonctionnement ne comporte que les deux temps décrits ci-dessus (le cas de la

conduction continue) par contre, si le courant de l'inductance s'annule avant le début d'une nouvelle période, il existe un troisième temps durant lequel le courant de l'inductance est nul: on a alors affaire à un fonctionnement en conduction discontinue. Les circuits équivalents relatifs aux temps 1 et temps 2 sont montrés sur la figure (II.2). La forme des tensions et courants à la figure (II.3) pour un fonctionnement en conduction continue. [19]

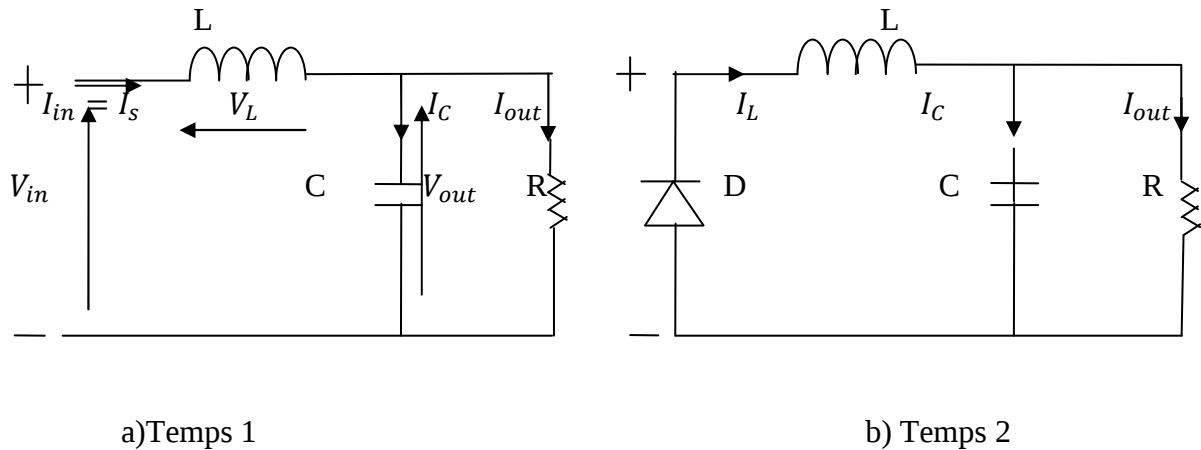


Figure (II.2) : circuit équivalent relatifs aux temps 1 et 2.

II.3.2. Circuit d'entrée du convertisseur dévolteur(Buck):

Durant le premier intervalle du temps $[0, \alpha T]$, lorsque le convertisseur de la figure(II.1) est connecté à un générateur classique le courant dans l'inductance est égale au courant d'entrée ($I_{in} = I_L$) et il est nulle durant l'intervalle $[\alpha T, T]$.

II.3.3. L'inductance d'entrée du convertisseur :

La self L est traversée par le courant $I_{in} = I_L$ (figure II.2), ce dernier est affecté par une ondulation ΔI_L . Si cette ondulation est inacceptable pour la charge, on doit ajouter un condensateur en parallèle à la sortie du convertisseur, comme indiquer sur la figure (II.1). La valeur du condensateur dépend de l'ondulation de la tension de sortie ΔV_{out} et de l'amplitude de l'ondulation du courant.

II.3.4. Equation régissant le circuit du convertisseur (Buck) : [19]

a) Pendant le premier temps ($0 < t < \alpha T$):

$$V_{in} - V_{out} = L \frac{di}{dt} \quad (II. 2)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_{in} - V_{out}}{L} \quad (II. 3)$$

Avec :

V_{out} : La tension de sortie du convertisseur

V_{in} : La tension a l'entrée du convertisseur

$$\text{Avec } V_{out} = \alpha V_{in} \quad (II.4)$$

$$i(t) = \frac{(1-\alpha)V_{in}}{L} t + I_{min} \quad (II.5)$$

b) Pendant le deuxième temps $\alpha T < t < T$:

$$-V_{out} = -L \frac{di}{dt} \quad (II.6)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{\alpha V_{in}}{L} \quad (II.7)$$

$$i(t) = \frac{-\alpha V_{PV}}{L} t + I_{max} \quad (II.8)$$

II.3.5. formes d'onde du convertisseur (Buck) :

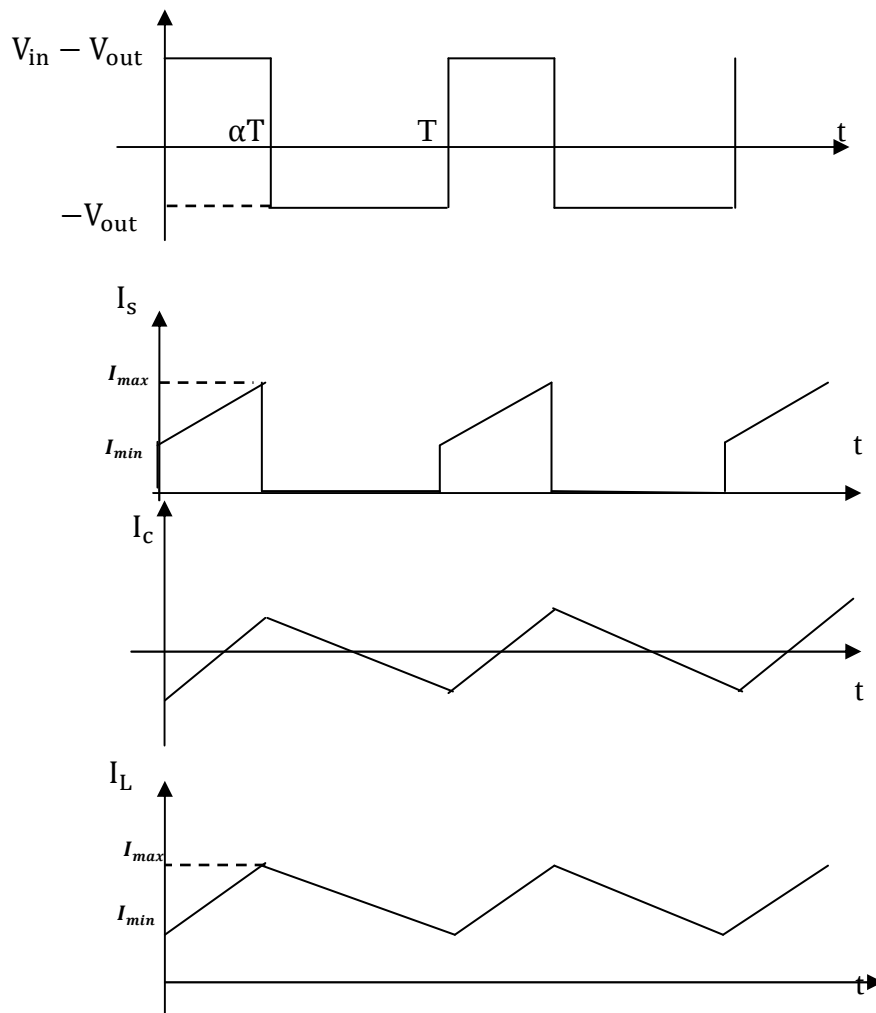


Figure (II.3) : Signaux typiques du convertisseur abaisseur

II.3.6. Avantages et inconvénients du convertisseur « buck » : [\[19\]](#)

a) Avantage :

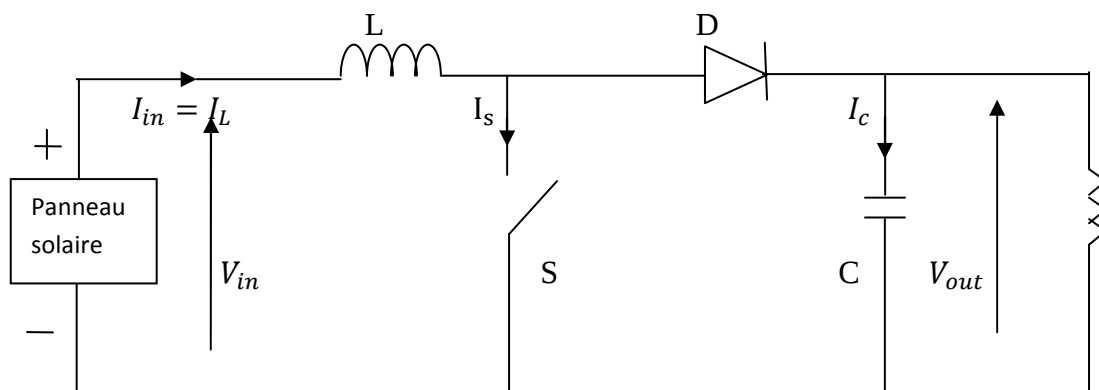
- Ce convertisseur assure le lissage du courant par l'inductance L.
- Il assure la protection de la charge contre les surintensités on agissant sur l'ouverture et la fermeture du transistor S.

b) Inconvénients :

- Il ne peut fonctionner lorsque la tension du générateur (PV) est inférieure à la tension de la charge de sorte que l'énergie reçue pendant les périodes à faible éclairement est perdue.

II.4. Convertisseur (Boost) :

Cette topologie est fréquente car on a souvent besoin d'une tension de sortie plus élevée. Le schéma de ce convertisseur est représenté par la Figure (II.4).



Figure(II.4) : Hacheur élévateur (boost). [7] [\[19\]](#)

II.4.1.principe de fonctionnement du convertisseur Boost : [\[2\]](#) [7] [\[19\]](#)

Le fonctionnement de ce convertisseur peut être divisé en deux temps :

a)Pendant le premier temps ($0 < t < \alpha T$) :

Lorsque l'interrupteur S est fermé, la diode est polarisée en inverse ($V_d = -V_{out}$); la charge est donc isolée de la source. La source fournit de l'énergie à l'inductance L.

b) Pendant le deuxième temps ($\alpha T < t < T$) :

Lorsque l'interrupteur S est ouvert, l'étage de sortie reçoit de l'énergie de la source et en traversant l'inductance L

Dans le cas d'une conduction continue, c'est le condensateur de sortie C qui assure le filtrage de la tension.

Enfin il existe un troisième temps durant lequel le courant de l'inductance s'annule, on a alors affaire à un fonctionnement en conduction discontinu.

Les circuits équivalents relatifs aux temps 1 et 2 sont montrés sur **figure (II.5)** la forme des tensions et courants à la **figure (II.6)** pour un fonctionnement en conduction continue.

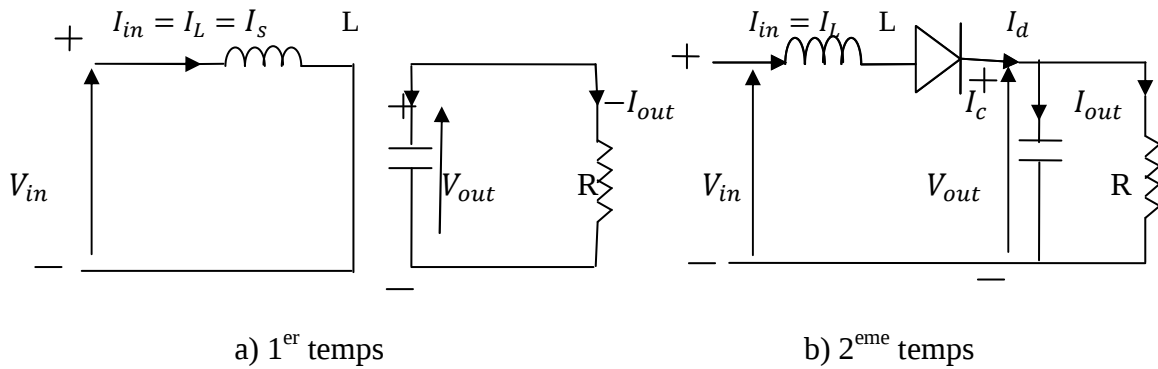


Figure (II.5) : Les circuits équivalents relatifs aux temps 1et 2. [\[19\]](#)

II.4.2.Equations régissant le circuit (Boost) :

a)Pendant le premier temps :

$$V_{in} = L \frac{di}{dt} \quad (II. 8)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_{in}}{L}$$

$$i(t) = \frac{V_{in}}{L} t + I_{min} \quad (II. 9)$$

$$V_{out} = 0 \quad (II. 10)$$

c) Pendant le deuxième temps:

$$V_{in} - V_{out} = -L \frac{di}{dt} \quad (II. 11)$$

Avec :

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - \alpha} \quad (\text{II.12})$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_{in} - V_{out}}{L} = \frac{-\alpha V_{in}}{L(1 - \alpha)} \quad (\text{II.13})$$

$$i(t) = \frac{-\alpha V_{in}}{L(1 - \alpha)} t + I_{max} \quad (\text{II.14})$$

$$V_{in} I_{in} = V_{out} I_{out} = V_{in} I_{out} / (1 - \alpha) \quad (\text{II.15})$$

On trouve:

$$I_{in} = \frac{I_{out}}{1 - \alpha} \quad (\text{II.16})$$

II.4.4. Forme d'onde du hacheur Boost :

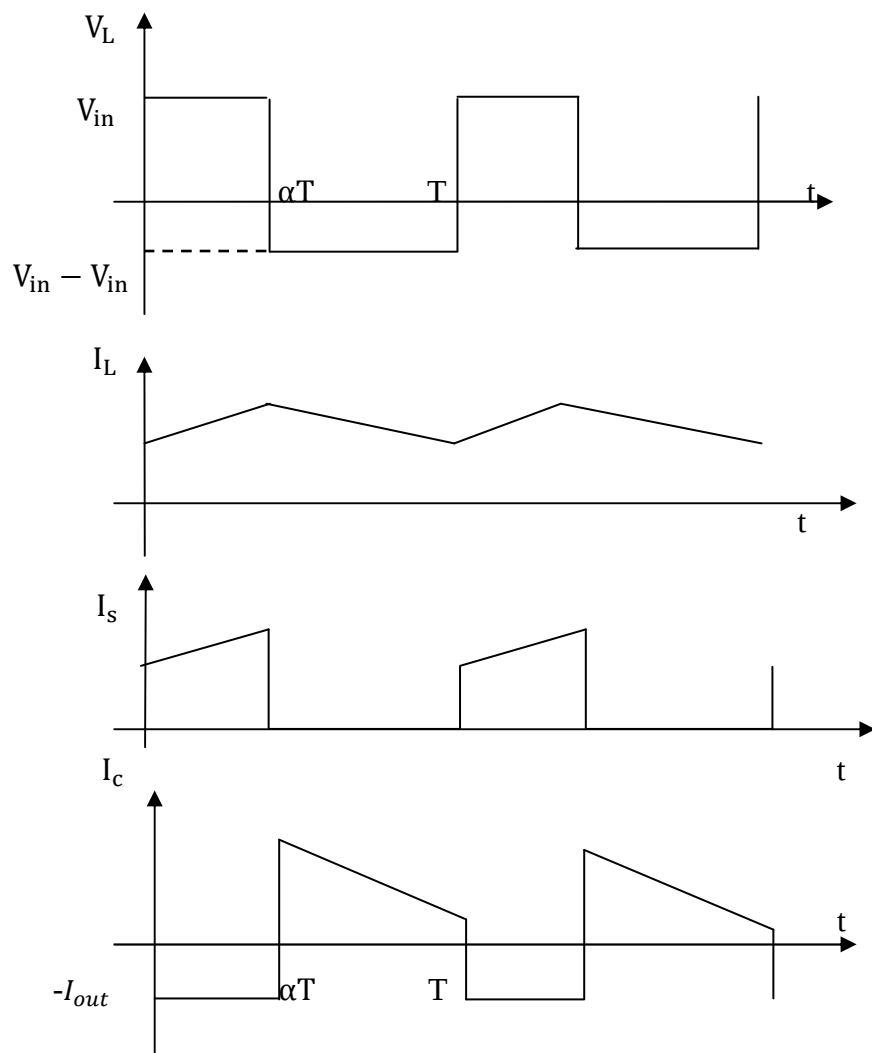


Figure (II.6) : Signaux typiques du convertisseur du hacheur survolteur. [\[2\]](#)

II.4.3. Avantages et inconvénients du convertisseur « boost » : [2],[19]

a) Avantage :

- Une ondulation du courant d'entrée limitée par l'inductance L.
- Sa tension de sortie est plus élevée que celle d'entrée, ce qui est le cas du photovoltaïque, permet de récupérer le peu d'énergie disponible lors des périodes à faible éclaircissement.

b) Inconvénients :

- Si la tension à vide du générateur PV devient supérieur à la tension de la charge, il n'est plus possible d'annuler le courant en bloquant l'interrupteur S, mais il reste une possibilité d'annuler le courant de sortie en rendant l'interrupteur conducteur en permanence, ce qui revient à court-circuiter le générateur PV.

II.5. Simulation du hacheur « boost » sur charge résistive :

Nous avons effectué sur PSIM un exemple de simulation en utilisant le hacheur Boost alimenté par un générateur photovoltaïque débitant un courant sur une charge résistive. Avec : $C_1 = C_2 = 9.27\mu\text{F}$, $L = 0.3\text{mH}$, $R = 10\Omega$ et $\alpha = \frac{1}{2}$

II.5.1. Le schéma de simulation :

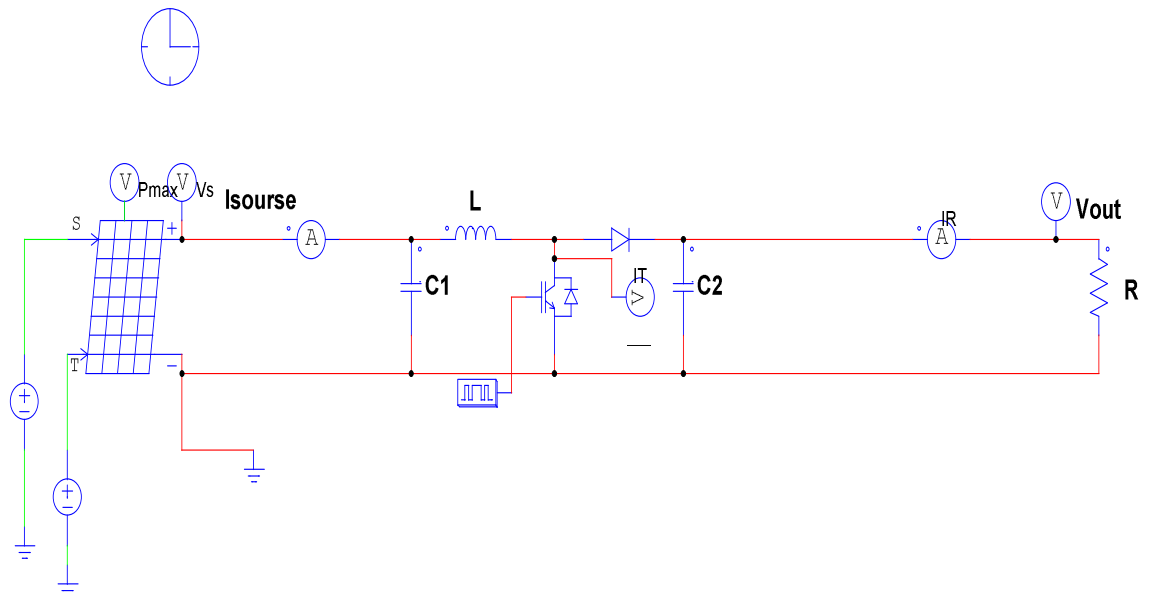


Figure (II.7) : simulation du hacheur élévateur sans régulation

II.5.2 Résultats de simulation :

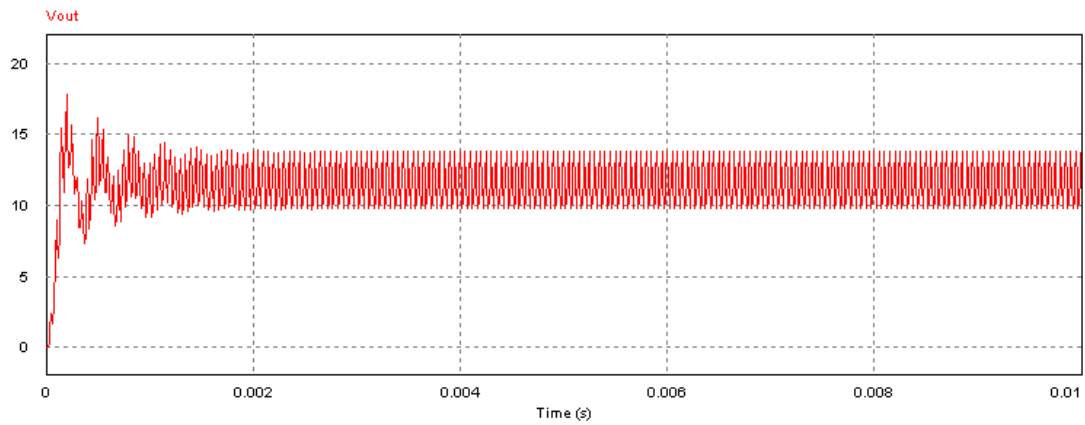
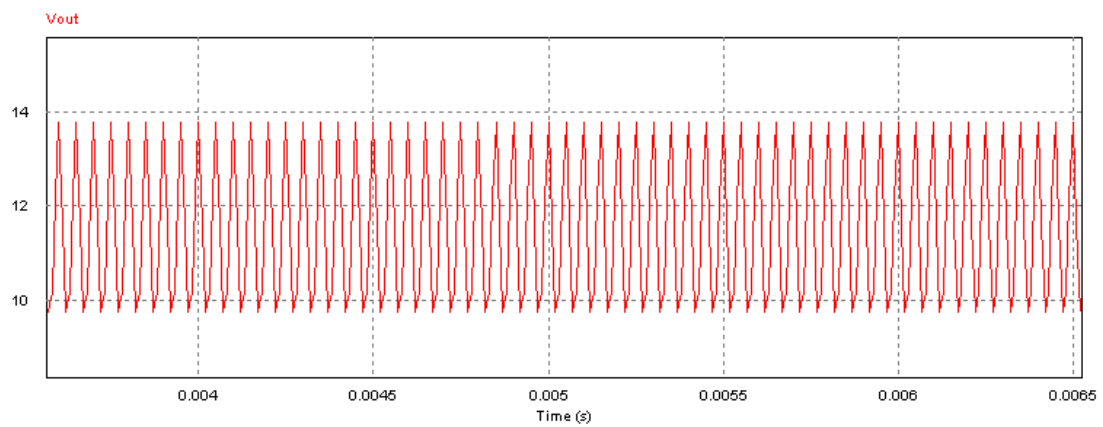
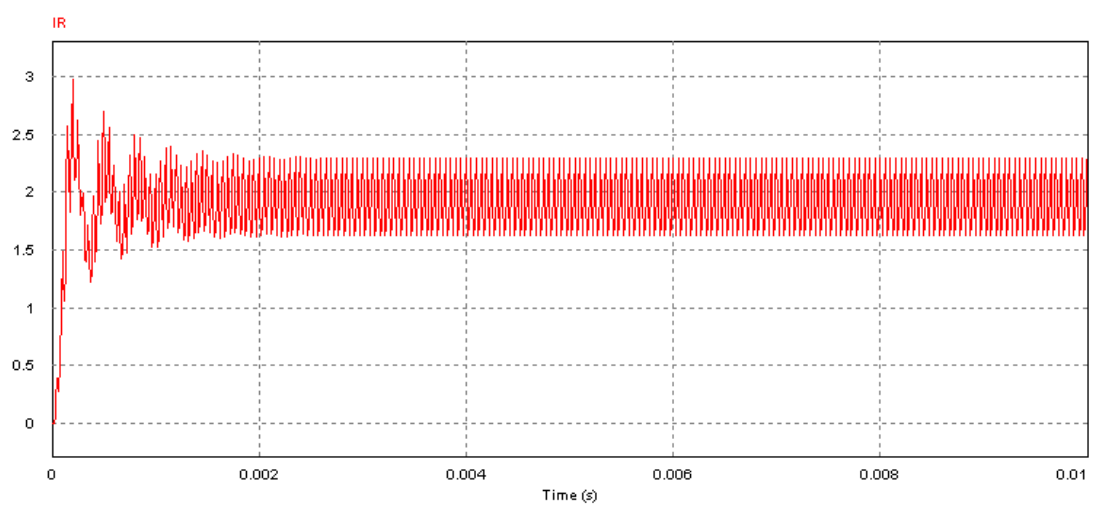


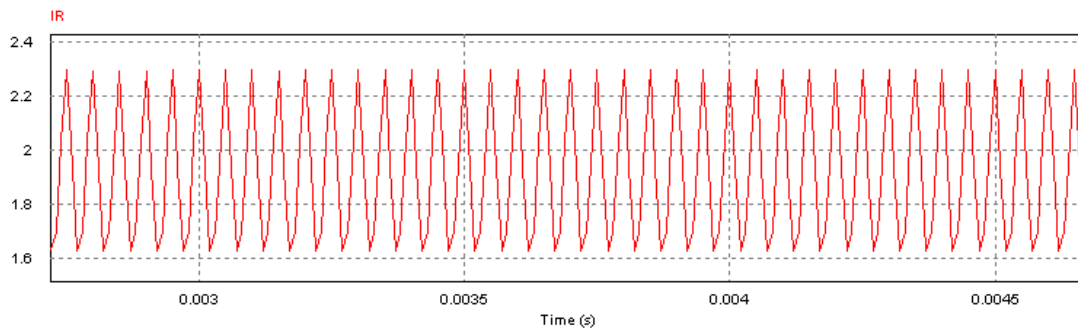
Figure (II.8) : La tension aux bornes de la charge.



Figure(II.9) : Le zoom de la forme de la tension aux bornes de la charge



Figure(II.10) : le courant de charge



Figure(II.11) : Oscillation du courant de charge.

II.6.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié les convertisseurs statiques DC/DC les plus utilisés dans les systèmes photovoltaïques (Buck et Boost) tout en commençant par leur définition et principe de fonctionnement ensuite nous avons présenté pour chacun des deux types ces avantages, inconvénients et les équations de fonctionnement.

Chapitre III :
***Principe de base de la commande
prédictive des convertisseurs DC/DC***

III.1. Introduction:

La commande prédictive joue un rôle très important dans le milieu industriel vu son intérêt. L'intérêt est que des spécifications de fonctionnement ainsi que des contraintes d'exploitation (sécurité de fonctionnement des biens, des personnels et de l'environnement, qualité des produits), inévitables pour la plupart des systèmes, peuvent être conjointement traitées dans l'élaboration de la loi de commande de plus, la mise en œuvre d'une commande prédictive est relativement simple et il en va de même pour les outils théoriques nécessaires à leurs études, ce qui justifie sa popularité en utilisation industrielle. L'évolution de l'informatique sur le plan matériel et logiciel a propulsé la commande prédictive pour occuper une place prépondérante dans le milieu industriel [13] [15].

Dans ce chapitre nous présenterons des généralités sur la commande prédictive et la stratégie de commande prédictive des convertisseurs statique DC-DC.

III.2. généralités sur de la commande prédictive :**III. 2.1. Historique de la commande prédictive :**

Les premiers travaux sur la commande prédictive remontent à la fin des années 70 et ont été initiés par Richalet (1976) en proposant le *Model Algoritmic Control* (MAC). Puis Dekeyser et Van Cauwenberghe (1979) introduisent le *Extended Prediction self Adaptive Control* (EPSAC) qui est une commande auto-adaptative étendue développée. L'idée consiste à utiliser un signal de commande constant pour tout l'horizon de prédiction, et qui est appliqué dès le début du calcul de la commande qui optimise le critère. Culter et Ramaker (1979) ont développé le célèbre algorithme *Dynamic Matrix Control* (DMC), basé sur le modèle de convolution (réponse indicielle et impulsionnel). Ydstie (1984) propose l'*Extended Horizon adaptive Control* (EHAC) qui est une commande adaptative à l'horizon étendu. Clarke (1987) développe le *Generalized Predictive Control* (GPC) qui détrône le DMC et qui devient la méthode la plus populaire. Le GPC est très proche de l'ESPAC et de l'EHAC.

Le succès de ces différents algorithmes, en particulier le DMC et GPC, a suscité graduellement un grand intérêt pour la commande prédictive, pas seulement au milieu académique mais aussi au milieu industriel, depuis les années 80. [13]

III.2.2. Domaines d'applications:

La commande prédictive est utilisée dans plusieurs domaines industriels depuis son apparition, parmi ces derniers (Chimie, Alimentaires, Papier, Air et Gaz, Polymères, service, etc....).

Actuellement, on peut estimer un nombre important de procédés utilisant cette technologie. Finalement l'application de cette technique augmente le rendement de production d'une unité.

III.2.3. Définitions:

III.2.3.1. La commande prédictive (MPC) :

La commande prédictive se résume à utiliser le modèle du système pour prédire son comportement future en minimisant la fonction cout . Le MPC implique alors la résolution d'un problème d'optimisation de dimension finie à chaque période d'échantillonnage. Il est clair que le temps d'obtention de la solution joue un rôle important dans l'application de cette stratégie en temps réel [13]. [15]

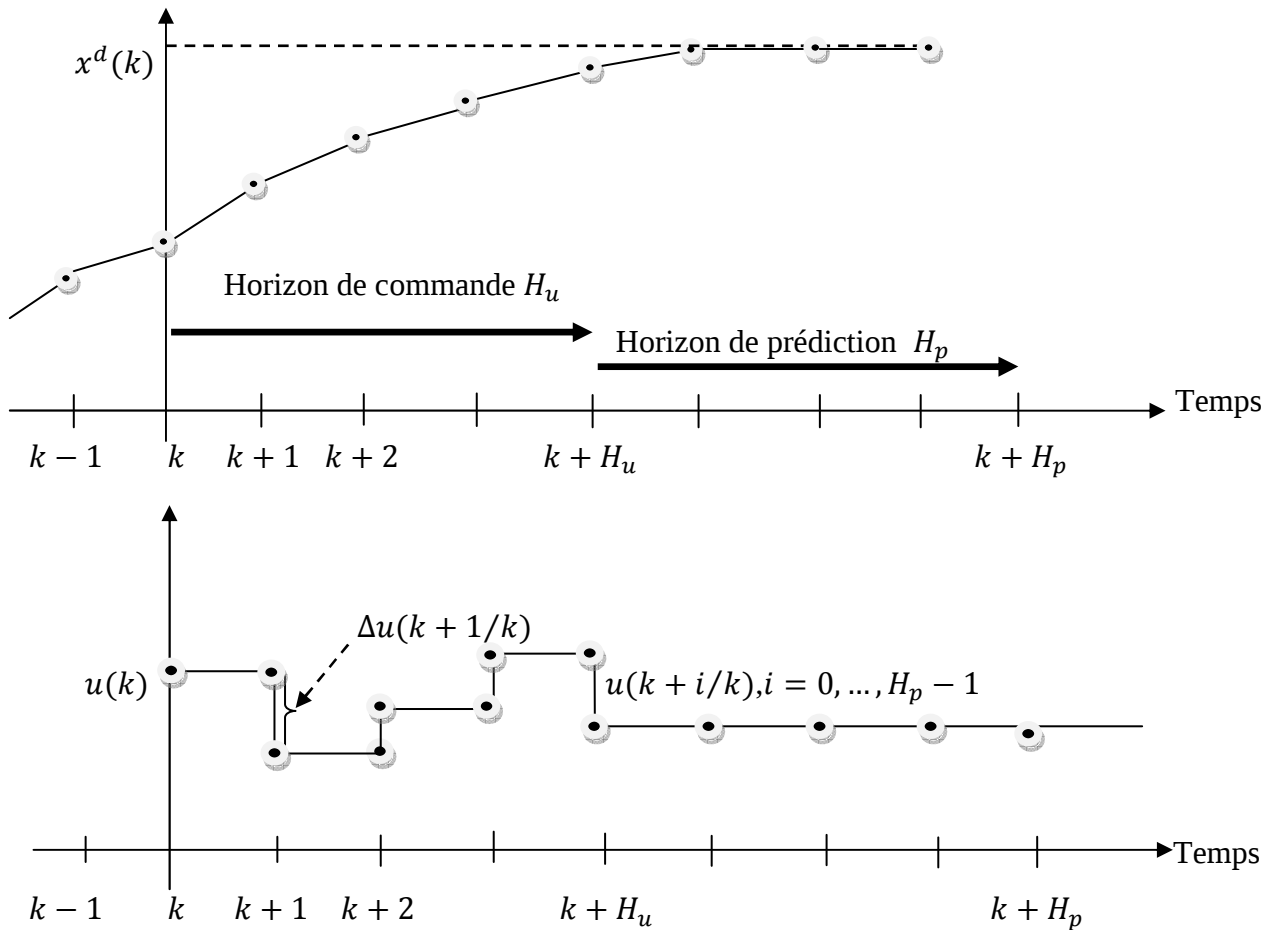
Elle est basé sur le modèle, par conséquent avoir de bonnes performances est lié directement à la précision et la complexité du modèle utilisé dans l'algorithme de commande pour la prédiction des sorties futures du système.

III.2.3.2. Principe de base de la commande prédictive : [13] [15]

L'idée de base est d'utiliser la connaissance issue du modèle pour envisager divers scénarios de fonctionnement du système dans le futur et de choisir le meilleur en fonction des objectifs à atteindre. Pour ce faire, la stratégie de commande prédictive s'articule autour des points suivants:

- Un objectif de fonctionnement désiré pour le système,
- Un modèle du système à commander,
- Un problème d'optimisation traduisant le premier point,
- Une méthode de résolution pour le problème d'optimisation aboutissant aux commandes à appliquer au système.

La figure (III.1) représente la commande prédictive basée sur le modèle.



Figure(III.1) : principe de base de la commande prédictive.

H_p Appelée horizon de prédiction, qui est relativement long par rapport à la vitesse d'évolution du procédé.

- A chaque instant d'échantillonnage k , les sorties futures du système sont prédites à l'horizon de temps H_p .

Les prédictions $\hat{x}(k+i/k)$, pour $i = 1, \dots, H_p$, sont réalisées en utilisant le modèle du système et dépendent non seulement du passé du système (les commandes et les sorties avant l'instant k), mais des commandes futures $u(k+1)$, pour $i = 0, \dots, H_p - 1$, à déterminer et appliquée au système.

La prédiction ne va pas dépendre uniquement des sorties précédentes mais aussi de l'évolution envisagée dans le temps futur pour la variable de commande.

- La fonction de cout à minimiser est déterminée par la séquence de commande, elle permet d'assurer la poursuite de la consigne (la valeur de référence du paramètre).
- Cette fonction est une fonction quadratique des erreurs entre les sorties prédites et la trajectoire de référence.

III.2.4. Avantages de la commande prédictive : [15]

La commande prédictive présente plusieurs avantages ; on peut citer :

- Elle permet de respecter les différentes contraintes sur les états, les commande et les sorties,
- Elle permet d'assurer la poursuite pour certaines consignes tout en maintenant d'autres dans des couloirs bien spécifiés,
- Elle évite les variations excessives pour les variables de commandes.
- Elle peut s'appliquer à des systèmes avec ou sans retard,
- Son réglage est aisé et son principe est intuitif,
- Elle est assez robuste aux erreurs de modèle.

L'intérêt de la commande prédictive est multiple:

- Comparés à la technique classique, elle est extrêmement performante si le procédé réagit avec un certain retard ou si les changements de consignes sont connus à l'avance,
- Comparés aux techniques plus sophistiquées réalisant minimisation d'un critère à un pas, les techniques prédictives sont nettement robustes, en particulier lorsque la structure du modèle utilisée pour décrire le procédé est mal connue.

Elle peut être utilisée en conservant un seul paramètre libre pour le réglage. (Fluas 1994 ; Huang et al. 2008)

III.2.5. Eléments de la commande prédictive:

Tous les algorithmes de la commande prédictive possèdent les mêmes éléments (**Figure 1.1**), et différentes options peuvent être considérées pour chaque élément, qui donne une multitude d'algorithmes. Ces éléments sont :

- Le modèle du système (prédiction).
- Le critère de performances
- L'algorithme d'optimisation (pour déterminer la séquence de commande)

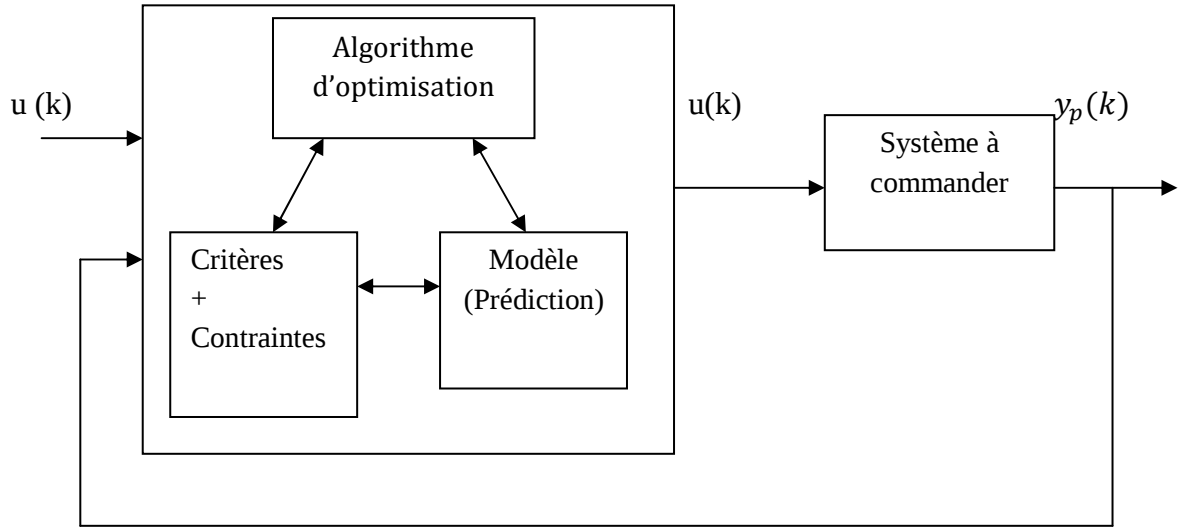


Figure.III.2. Stratégie de commande prédictive.

Un cas particulier de la poursuite de trajectoire photovoltaïque en utilisant un représente sur la figure (III.3).

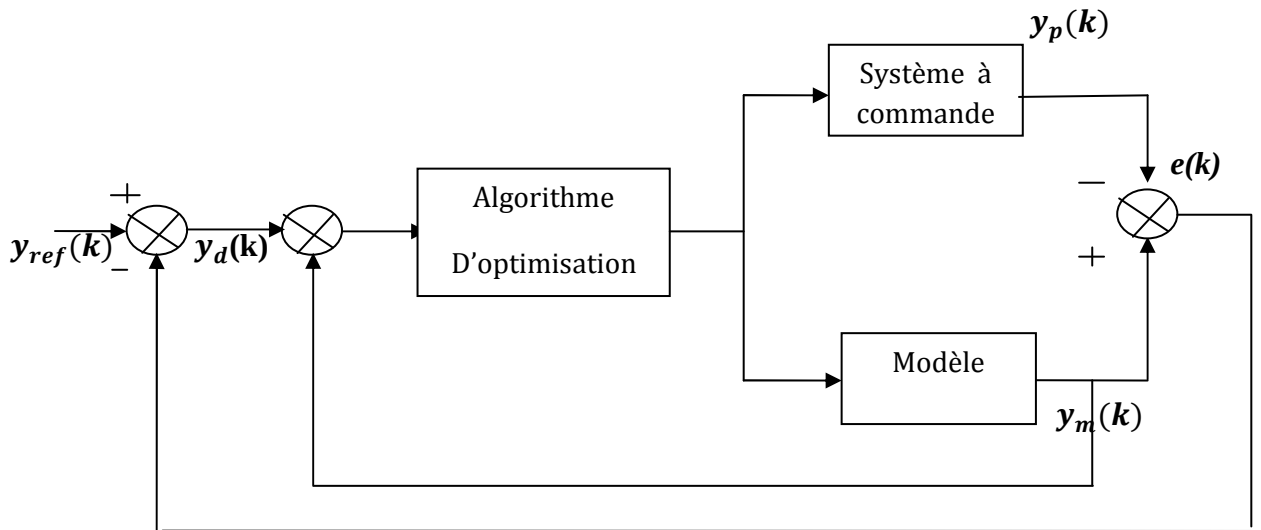


Figure (III.3): la poursuite de trajectoire [1]

A partir de cette structure, on élabore un signal désiré $y_d(k)$ issu des signaux $y_{ref}(k)$ et comme suit : [1]

$$y_d(k) = y_{ref}(k) - e(k) \quad (III. 1)$$

$$y_d(k) = y_{ref}(k) - (y_p(k) - y_m(k)) \quad (III. 2)$$

$$y_d(k) - y_m(k) = y_{ref}(k) - (y_p(k) - y_m(k)) \quad (III. 3)$$

Le modèle:

Le modèle du système est essentiellement utilisé pour deux tâches la prédiction du comportement dynamique future du système et le calcul de l'action correctrice appropriée pour assurer la poursuite de la consigne imposée. [13]

Il existe plusieurs modèles qui peuvent être utilisés.

III.2.6.Modèles de représentations: [15]

- ❖ La fonction de transfert discrète
- ❖ Le modèle de Volterra
- ❖ Le modèle neuronal
- ❖ Le modèle flou
- ❖ Le modèle d'état discret (notre étude est limitée à cette représentation)

III.2.7. La représentation d'état : [\[9\]](#)**III.2.7.1.Définition :**

Le principe de base de la représentation d'état est que le futur d'un système dépend de son passé, de son présent et de ses entrées : le futur peut alors être décrit à partir d'un ensemble de variables bien choisies. L'analyse a lieu dans le domaine temporel (au lieu du domaine fréquentiel de la représentation de Laplace)

III.2.7.2. La représentation d'état d'un système dynamique linéaire continu :

$$\hat{x}(k) = Ax(k) + Bu(k) \quad \text{Équation d'état} \quad (\text{III.4})$$

$$y(k) = Cx(k) \quad \text{Équation de mesure} \quad (\text{III.5})$$

Avec :

A: matrice d'état.

B: matrice de commande (d'entrée).

C: matrice de mesure (sortie).

x(k) : vecteur d'état.

U(k) : vecteur d'entrée.

Y(k) : vecteur de sortie.

III.2.8. Critères de performances : [13],

La fonction coût J à chaque période d'échantillonnage défini pour traduire le comportement souhaité des sorties prédites $\hat{z}(k + i/k)$ d'une trajectoire de référence $r(k + i/k)$ en plus des variations du vecteur de commande $\Delta u(k) - u(k - 1)$, elle est souvent donnée par la forme quadratique:

$$J(k) = \sum_{i=H_w}^{H_p} \|\hat{z}(k + i/k) - r(k + i/k)\|_{Q(i)}^2 + \sum_{i=0}^{H_u-1} \|\Delta \hat{u}(k + i/k)\|_{R(i)}^2 \quad (\text{III. 6})$$

Ou

$$\|X\|_A^2 = X^T A X \quad (\text{III. 7})$$

H_p L'horizon de prédiction, H_u l'horizon de commande, $H_u \leq H_p$

$\Delta \hat{u}(k + i/k) = 0$ Pour $i \geq H_u$

$Q(i) \geq 0$ et $R(i) \geq 0$ sont les matrices de pondération.

On peut définir la commande prédictive linéaire comme le résultat

$u(k) = f(z(k))$ qui minimise $J(k)$. Il n'est pas nécessaire de commencer immédiatement la pénalisation des déviations des sorties prédites $\hat{z}(k + i/k)$ de la trajectoire de référence $r(k + i/k)$ (si $H_w > 1$) car il peut exister un retard entre l'application de la commande $u(t)$ et la réponse du système à celle-ci. La forme de la fonction coût (III.6) n'implique que le vecteur erreur $\hat{z}(k + i/k) - r(k + i/k)$ est pénalisée à chaque point dans l'intervalle $H_w \leq i \leq H_p$.

Dans certain cas un terme de la forme $\sum \|\hat{u}(k + i/k)\|_{S(i)}^2$ est ajouté à la fonction cout (III.6) qui permet de prendre en considération l'effort de la commande dans l'élaboration de la loi de commande. [15] [13]

III.2.9. Prédiction : [13] [15] [16]

Supposons que le vecteur d'état x est mesurable, $\hat{x}(k/k) = x(k) = y(k)$ ($C = 1$) Le calcul des sorties prédites $\hat{z}(k + i/k)$ se fait par itération du modèle (III.4), (III.5)

$$\hat{x}(k + 1/k) = Ax(k) + B\hat{u}(k/k) \quad (\text{III. 8})$$

$$\hat{x}(k + 2/k) = Ax(k + 1) + B\hat{u}(k + 1/k) \quad (\text{III. 9})$$

$$= A^2x(k) + AB\hat{u}(k + 1/k) \quad (\text{III. 10})$$

⋮

$$\hat{x}(k + H_p/k) = A\hat{x}(k + H_p - 1/k) + B\hat{u}(k + H_p - 1/k) \quad (\text{III. 11})$$

$$= A^{H_p}x(k) + A^{H_p-1}B\hat{u}(k/k) + \dots + B\hat{u}(k + H_p - 1/k) \quad (\text{III. 12})$$

Rappelons que $\Delta\hat{u}(k + i/k) = \hat{u}(k + i/k) - \hat{u}(k + i - 1/k)$ et que les entrées peuvent changer seulement aux instants $k, k + 1, \dots, k + H_u - 1$, et reste constantes après.

$$\hat{u}(k + i/k) = \hat{u}(k + H_u - 1) \text{ Pour } H_u \leq i \leq H_p - 1 \quad \text{alors}$$

$$\hat{u}(k/k) = \Delta\hat{u}(k/k) + \hat{u}(k - 1) \quad (\text{III. 13})$$

$$\hat{u}(k + 1/k) = \Delta\hat{u}(k + 1/k) + \Delta\hat{u}(k/k) + u(k - 1) \quad (\text{III. 14})$$

⋮

$$\hat{u}(k + H_u - 1/k) = \Delta\hat{u}(k + H_u - k/k) + \dots + \Delta\hat{u}(k - 1) + u(k - 1) \quad (\text{III. 15})$$

Ainsi nous obtenons:

$$\hat{x}(k + 1/k) = Ax(k) + B[\Delta\hat{u}(k/k) + u(k - 1)] \quad (\text{III. 16})$$

$$\hat{x}(k + 2/k) = A^2x(k) + AB[\Delta\hat{u}(k/k) + u(k - 1)] + B[\Delta\hat{u}(k + 1/k) + \Delta\hat{u}(k/k) + u(k - 1)]$$

$$= A^2x(k) + (A + 1)B\Delta\hat{u}(k/k) + B\Delta\hat{u}(k + 1/k) + (A + 1)Bu(k - 1) \quad (\text{III. 17})$$

⋮

$$\hat{x}(k + H_u/k) = A^{H_u}x(k) + (A^{H_u-1} + \dots + A + 1)B\Delta\hat{u}(k/k) + \dots + B\Delta\hat{u}(k + H_u - 1/k) + (A^{H_u-1} + \dots + A + 1)Bu(k - 1) \quad (\text{III. 18})$$

$$\begin{aligned} \hat{x}(k + H_u + 1/k) &= A^{H_u+1}x(k) + (A^{H_u} + \dots + A + 1)B\Delta\hat{u}(k/k) + \dots \\ &\dots + (A + 1)B\Delta\hat{u}(k + H_u - 1/k) + (A^{H_u} + \dots + A + 1)Bu(k - 1) \end{aligned} \quad (\text{III. 19})$$

⋮

$$\begin{aligned}
 \hat{x}(k + H_p/k) &= A^{H_p}x(k) + (A^{H_p-1} + \dots A + 1)B\Delta\hat{u}(k/k) \\
 &+ \dots + (A^{H_p-H_u} + \dots + A + 1)B\Delta\hat{u}(k + H_u - 1/k) \\
 &+ (A^{H_p-1} + \dots A + 1)Bu(k - 1)
 \end{aligned} \tag{III. 20}$$

Finalement sous forme matricielle : [15] :

$$\begin{bmatrix} \hat{x}(k + 1) \\ \vdots \\ \hat{x}(k + H_u/k) \\ \hat{x}(k + H_u + 1/k) \\ \vdots \\ \hat{x}(k + H_p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ \vdots \\ A^{H_u} \\ A^{H_u+1} \\ \vdots \\ A^{H_p} \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} B \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_u-1} A^i B \\ \sum_{i=0}^{H_u} A^i B \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_p-1} A^i B \end{bmatrix} u(k - 1) +$$

$$\begin{bmatrix} B \\ AB + B \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_u-1} A^i B \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_u} A^i B \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_p-1} A^i B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\hat{u}(k) \\ \vdots \\ \Delta\hat{u}(k + H_u - 1) \end{bmatrix} \tag{III. 21}$$

Les prédictions (III.21) sont composées de deux termes. Le terme du cote droite de dépend des entrées futures. Par contre le premier terme dépend seulement des sorties précédentes ou également des entrées précédentes selon le système. Après les prédictions peuvent être décomposées en général en deux parties: [13]

$$\hat{x}(k + i/k) = \hat{x}_{libre}(k + i) + \hat{x}_{forcé}(k + i)$$

La réponse libre, $\hat{x}_{libre}(k + i)$, correspond à la prédiction de la sortie lorsque la commande est maintenue constante à sa valeur actuelle $u(k)$ le long de l'horizon de prédiction H_p . Par contre la réponse forcée, $\hat{x}_{forcé}(k + i)$, correspond à la prédiction de la sortie due aux actions futures $u(k+i)$, $i=1, \dots, H_p$.

D'après (III.31) les prédictions de z sont données par :

$$\begin{bmatrix} \hat{z}(k+1/k) \\ \vdots \\ \hat{z}(k+H_p/k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_z & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_z & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & C_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}(k+1) \\ \vdots \\ \hat{x}(k+H_p/k) \end{bmatrix} \quad (\text{III. 22})$$

III.2.10. Problème d'optimisation sans contraintes :

a) La fonction cout :

Nous pouvons mettre la fonction coût (III.14) sous la forme :

$$J(k) = \|Z(k) - T(k)\|_{\bar{Q}}^2 + T(k)\|\Delta U(k)\|_{\bar{R}}^2 \quad (\text{III. 23})$$

Ou :

$$Z(k) = \begin{bmatrix} \hat{z}(k+H_w/k) \\ \vdots \\ \hat{r}(k+H_p/k) \end{bmatrix} \quad T(k) = \begin{bmatrix} \hat{r}(k+H_w/k) \\ \vdots \\ \hat{r}(k+H_p/k) \end{bmatrix}$$

$$\Delta \hat{u}(k/k) = \begin{bmatrix} \Delta \hat{u}(k/k) \\ \vdots \\ \Delta \hat{u}(k+H_u-1/k) \end{bmatrix} \quad (\text{III. 24})$$

b) Les matrices de pondération sont données par :

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} Q(H_w) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Q(H_w+1) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Q(H_p) \end{bmatrix}$$

$$\bar{R} = \begin{bmatrix} R(0) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R(1) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & R(H_u-1) \end{bmatrix} \quad (\text{III. 25})$$

A partir des équations (III.21) et (III.22), $Z(k)$ a la forme suivante :

$$Z(k) = \psi x(k) + Yu(k-1) + \theta \Delta U(k) \quad (\text{III. 26})$$

Ou : (ψ, Y, θ) représente des vecteurs des équations (III.30) et (III.32)

$$\text{Et} \quad \varepsilon(k) = T(k) - \psi x(k) - Yu(k-1) \quad (\text{III. 27})$$

Alors :

$$J(k) = \|\theta \Delta U(k) - \varepsilon(k)\|_{\bar{Q}}^2 + \|\Delta U(k)\|_{\bar{R}}^2 \quad (\text{III. 28})$$

$$\text{On a: } \|X\|_A^2 = X^T A X \quad (\text{III. 29})$$

Alors :

$$\begin{aligned} J(k) &= [\Delta U(k)^T \theta^T - \varepsilon(k)^T] \bar{Q} [\theta \Delta U(k) - \varepsilon(k)] + \Delta U(k)^T \bar{R} \Delta U(k) \\ &= [\varepsilon(k)^T \bar{Q}] \varepsilon(k) - 2 \Delta U(k)^T \theta^T \bar{Q} \varepsilon(k) + \Delta U(k)^T (\theta^T \bar{Q} \theta + \bar{R}) \Delta U(k) \end{aligned} \quad (\text{III. 30})$$

$$\text{Si on pose : } G = \theta^T \bar{Q} \varepsilon(k) \text{ et } H = (\theta^T \bar{Q} \theta + \bar{R})$$

$J(k)$ aura la forme suivante :

$$J(k) = \text{constante} - 2G\Delta U(k)^T + \Delta U(k)^T H \Delta U(k) \quad (\text{III. 31})$$

La séquence des variations de commande futures optimales est :

$$\Delta U(k)_{\text{opt}} = \frac{1}{2} H^{-1} G \quad (\text{III. 32})$$

H^{-1} existe car $H > 0$

Seulement la partie correspondant au premier pas optimale est appliquée au système :

$$\Delta u(k) = \underbrace{[1, 0, \dots, 0]}_{(H_u - 1) \text{ fois}} \Delta U(k)_{\text{opt}} \quad (\text{III. 33})$$

$$u(k)_{\text{opt}} = \Delta u(k)_{\text{opt}} + u(k-1) \quad (\text{III. 34})$$

III.3. principe de la commande prédictive des convertisseurs DC/DC : [\[10\]](#)

Le principe de cette stratégie de commande peut être résumé comme suit :

- Un modèle de la charge est utilisé pour prédire l'évolution du courant en fonction de chacun des états possibles
- Une fonction coût est définie pour traduire le comportement souhaité.
- Sélection de la combinaison minimisant le critère choisi.

III.3.1.Exemple électrique de prédiction du courant dans une inductance :

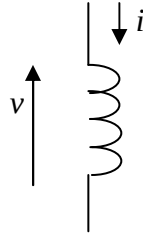


Figure (III.4) : inductance traversée par un courant i

- L'équation de la tension dans le domaine temporelle :

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{v(t)}{L} \quad (\text{III. 35})$$

- L'équation d'état discret :

$$\frac{i(k+1) - i(k)}{T_s} = \frac{v(k)}{L} \quad (\text{III. 36})$$

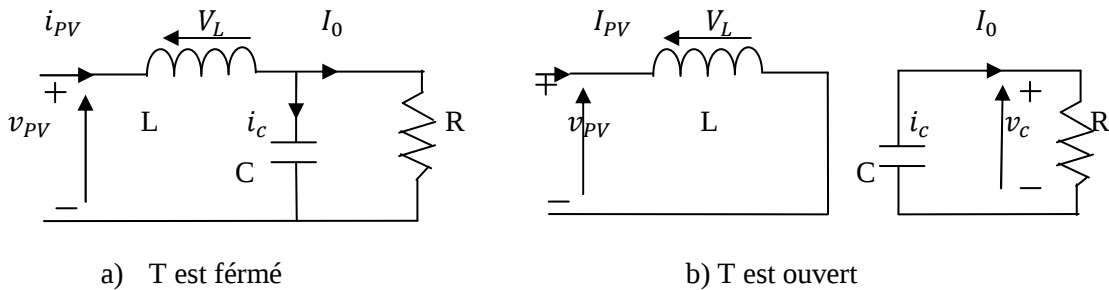
L'équation de prédiction:

$$i(k+1) = i(k) + \frac{T_s}{L} v(k) \quad (\text{III. 37})$$

III.3.2. Modèle prédictive du convertisseur Boost connecté à un panneau solaire débitant sur une charge résistive :

Nous avons opté pour notre application l'utilisation du hacheur Boost comme un étage d'adaptation pour simuler un système photovoltaïque contenant un panneau solaire débitant un courant sur une charge résistive.

Si on connecte une charge résistive au convertisseur Boost représenté sur la (Figure(II.5)) on aura selon les deux phases de son fonctionnement (S fermé et S ouvert) :



Figure(III.5) :schéma correspondant à l'état fermé et ouvert de l'interrupteur S

On a :

a) S ouvert :

$$L \frac{di_{PV}(t)}{dt} = v_{PV}(t) - v_c(t) \quad (\text{III. 38})$$

$$\frac{di_{PV}(t)}{dt} = \frac{v_{PV}(t)}{L} - \frac{v_c(t)}{L} \quad (\text{III. 39})$$

$$i_c(t) = i_{PV}(t) - I_0(t)$$

$$C \frac{dv_c(t)}{dt} = i_{pv}(t) + \frac{v_c(t)}{R} \quad (\text{III. 40})$$

$$\frac{dv_c(t)}{dt} = \frac{1}{C} \cdot i_{pv}(t) + \frac{1}{R \cdot C} \cdot v_c(t) \quad (\text{III. 41})$$

b) Lorsque S est fermé:

$$\frac{di_{PV}(t)}{dt} = \frac{1}{L} \cdot v_{PV}(t) \quad (\text{III. 42})$$

$$\frac{dv_c(t)}{dt} = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot v_c(t) \quad (\text{III. 43})$$

- Les équations de prédiction des équations (III. 40), (III. 41), (III. 42) et (III. 43) :

$$\frac{i_{PV}(k+1) - i_{PV}(k)}{T_s} = \frac{v_{PV}(k)}{L} - \frac{v_c(k)}{L}$$

$$i_{PV}(k+1) - i_{PV}(k) = \frac{T_s}{L} v_{PV}(k) - \frac{T_s}{L} v_c(k)$$

$$i_{PV}(k+1) = i_{PV}(k) - \frac{T_s}{L} v_c(k) + \frac{T_s}{L} v_{PV}(k) \quad (\text{III. 44})$$

$$\frac{v_c(k+1) - v_c(k)}{T_s} = \frac{1}{C} \cdot i_{pv}(k) + \frac{1}{R \cdot C} \cdot v_c(k)$$

$$v_c(k+1) = \frac{T_s}{C} \cdot i_{PV}(k) + \left(1 - \frac{T_s}{R \cdot C}\right) \cdot v_c(k) \quad (\text{III. 45})$$

$$i_{PV}(k+1) = i_{PV}(k) + \frac{T}{L} v_{PV}(k) \quad (\text{III. 46})$$

$$\frac{v_c(k+1) - v_c(k)}{T_s} = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot v_c(k)$$

$$v_c(k+1) = \left(1 - \frac{T}{R \cdot C}\right) \cdot v_c(k) \quad (\text{III. 47})$$

III.3.2.1. Système d'équations sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} i_{PV}(k+1) \\ v_C(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha \frac{T}{L} \\ \alpha \frac{T}{C} & 1 - \frac{T}{R \cdot C} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{PV}(k) \\ v_C(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot v_{PV}(k) \quad (\text{III. 43})$$

III.3.2.2. Système d'équations à « n » étapes d'échantillonnage : [\[9\]](#)

Considérant l'horizon de la commande prédictive de n-étape d'échantillonnages.

Les équations de prédiction du courant i_{PV} et de la tension v_C sont données comme suit :

$$i_{PV}(k+n+1) = i_{PV}(k+n) - \alpha \frac{T}{L} \cdot v_C(k+n) + \frac{T}{L} \cdot v_{PV}(k+n) \quad (\text{III. 49})$$

$$v_C(k+n+1) = \alpha \frac{T}{C} \cdot i_{PV}(k+n) + (1 - \frac{T}{R \cdot C}) \cdot v_C(k+n) \quad (\text{III. 50})$$

III.3.3. L'horizon de prédiction à deux étapes d'échantillonnages: [\[9\]](#)

Dans le cas de l'horizon en deux étapes comme dans notre application le modèle d'équations de ces deux étapes d'échantillonnages d'après (III. 49) et (III. 50) sont donnés comme suit :

$$i_{PV}(k+1) = i_{PV}(k) - \alpha \frac{T}{L} \cdot v_C(k) + \frac{T}{L} \cdot v_{PV}(k) \quad (\text{III. 51})$$

$$v_C(k+2) = \alpha \frac{T}{C} \cdot i_{PV}(k+1) + (1 - \frac{T}{R \cdot C}) \cdot v_C(k+1) \quad (\text{III. 52})$$

III. 3.4. Calcul de la fonction cout :

La fonction cout $J(k)$ est donnée comme suit :

$$J_{D=m}^{n=0,1 \text{ et } m=0,1} = w_C \cdot |v_{C,\alpha=m(k+2)} - v^*| - w_D |i_{PV,\alpha=m(k+2)} - i^*| + J_{\alpha=n} \quad (\text{III. 53})$$

III.4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons défini la commande prédictive, ses avantages, son importance dans l'industrie puis nous avons défini le principe de base de la commande prédictive des convertisseurs statiques.

A decorative graphic of a scroll with a light gray background and a dark gray border. The scroll is unrolled, with the top and bottom edges curled up. The text is centered within the unrolled portion.

Chapitre IV: Stratégie de commande MPPT

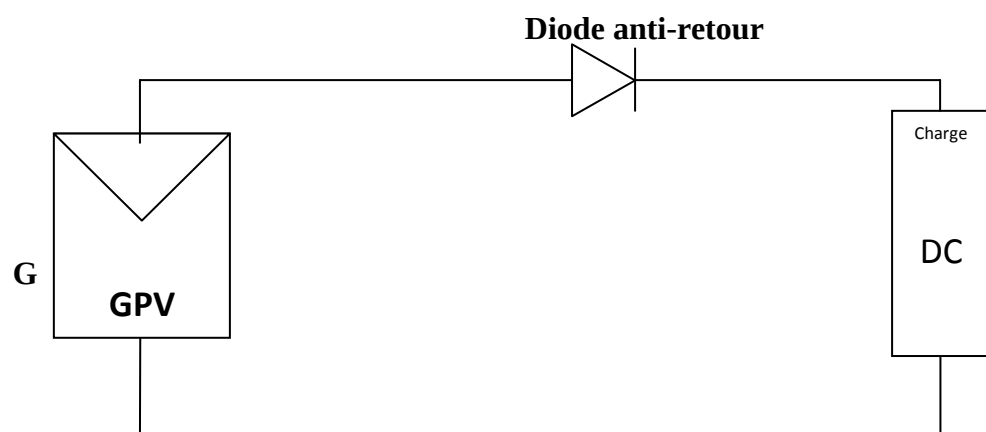
IV.1.Introduction :

Ces dernières années, les sources d'énergies renouvelables, particulièrement les générateurs photovoltaïques ont trouvé l'utilisation accrue dans des productions d'électricité. Elles peuvent fournir l'électricité dans les secteurs non servis par les réseaux électriques. Cependant, la caractéristique non-linéaire des panneaux photovoltaïques et à la dépendance du courant et de tension des conditions environnementales. Pour surmonter ces problèmes, différentes méthodes de MPPT, avec différents dispositifs qui les rendent appropriés pour des applications spécifiques. [7]

La plupart des applications photovoltaïques sont suivis d'un étage d'adaptation associé à une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), dans le but de transférer en permanence la puissance maximale produite par le générateur photovoltaïque (GPV) à la charge. Selon le type de charge utilisée, l'étage, d'adaptation insérée dans la chaîne de conversion peut être, soit un convertisseur statique DC / DC pour une batterie, soit un convertisseur DC /AC pour la connexion au réseau électrique [7].

IV.2.Connexion directe entre la source et la charge : [7], [20]

La connexion directe du panneau solaire photovoltaïque à une charge reste actuellement le principe de fonctionnement le plus répandus, (**Figure(IV.1)**), le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque dépend de l'impédance de la charge à laquelle il est connecté.



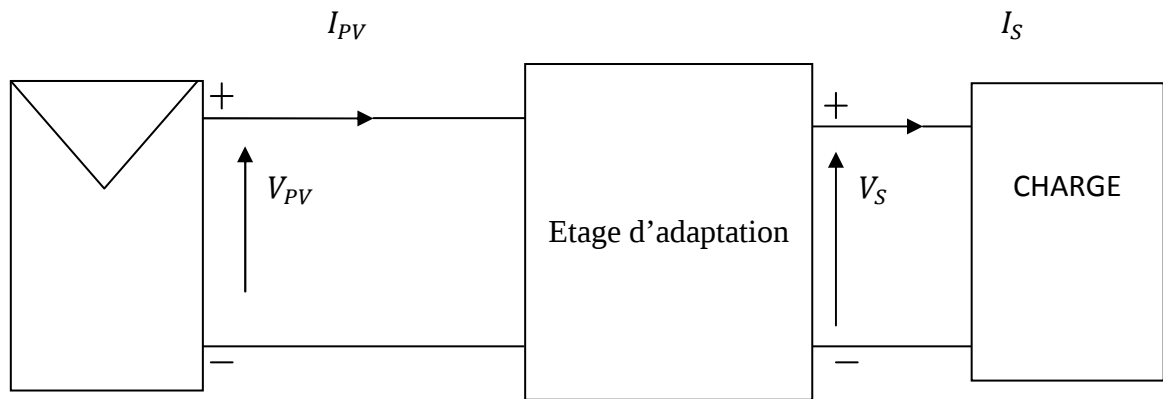
Figure(IV.1) : principe d'une connexion directe entre un générateur photovoltaïque et une charge.

L'inconvénient majeur de cette connexion est la dépendance directe de la puissance fournie par le générateur à la charge. En fait, la puissance fournie par le module photovoltaïque résulte de l'intersection entre la caractéristique $I(v)$ du générateur photovoltaïque et celle de la charge. Ce qui la restreint à des applications nécessitant une tension fixe ou faiblement variable. [8]

IV.3.Définition de l'étage d'adaptation entre une source et une charge : [7] [20].

D'après ce qu'on a vu précédemment un générateur photovoltaïque présente des caractéristiques $I(V)$ non linéaires avec des points de puissance maximale. Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le générateur photovoltaïque débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance maximale du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe.

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur photovoltaïque et de la transférée à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge comme le montre la (figure IV.2).cette 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. Pour cela, il suffit d'effectuer un choix sur l'étage d'adaptation selon ses propriétés de conversion de puissance qui permet d'adapter les tensions et les courants autant en valeur qu'en forme entre son port d'entrée et son port de sortie pour respecter au mieux les contraintes d'une part du générateur photovoltaïque et d'autres part , de la charge . L'électronique de puissance largement utilisée dans divers domaines de la conversion d'énergie offre plusieurs solutions potentielles sous forme de convertisseurs statiques.



Figure(IV.2) : Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de P_{max} du GPV [7].

En résumé, selon l'application et le degré d'optimisation de production souhaités, l'étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge peut être constitué d'un ou plusieurs convertisseurs statiques et permet d'assurer les fonctions suivantes :

- Adapter les niveaux de tensions entre la source et la charge dans de grands rapports si nécessaire (convertisseurs Buck, Boost,...)
- Connecter une charge avec des besoins d'alimentation de type alternative (onduleurs)
- L'introduction d'un étage d'adaptation permettant de fixer le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque indépendamment de celui de la charge, permet l'extraction de la puissance optimale.

L'ensemble peut fonctionner de façon idéale, en entrée, elles garantissent l'extraction à chaque instant, du maximum de puissance disponible aux bornes du générateur photovoltaïque, et en sortie, des boucles de contrôle spécifiques permettent un fonctionnement optimal de chaque application dans son mode le plus approprié. Les techniques utilisées classiquement pour les boucles de contrôle en entrée consistent à associer à l'étage d'adaptation une commande appelée MPPT qui effectue une recherche permanente du point de puissance maximale.

IV.4.Principe de la recherche du point de puissance maximale: [7], [2] [20].

La figure(IV.3) représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque associée à une MPPT. Pour simplifier les conditions de fonctionnement de cette

stratégie de commande, qui est nécessairement associée à un quadripôle qui permet de faire une adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge. Dans le cas de la conversion solaire, le quadripôle peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le générateur photovoltaïque corresponde à la puissance maximale (P_{max}) qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge.

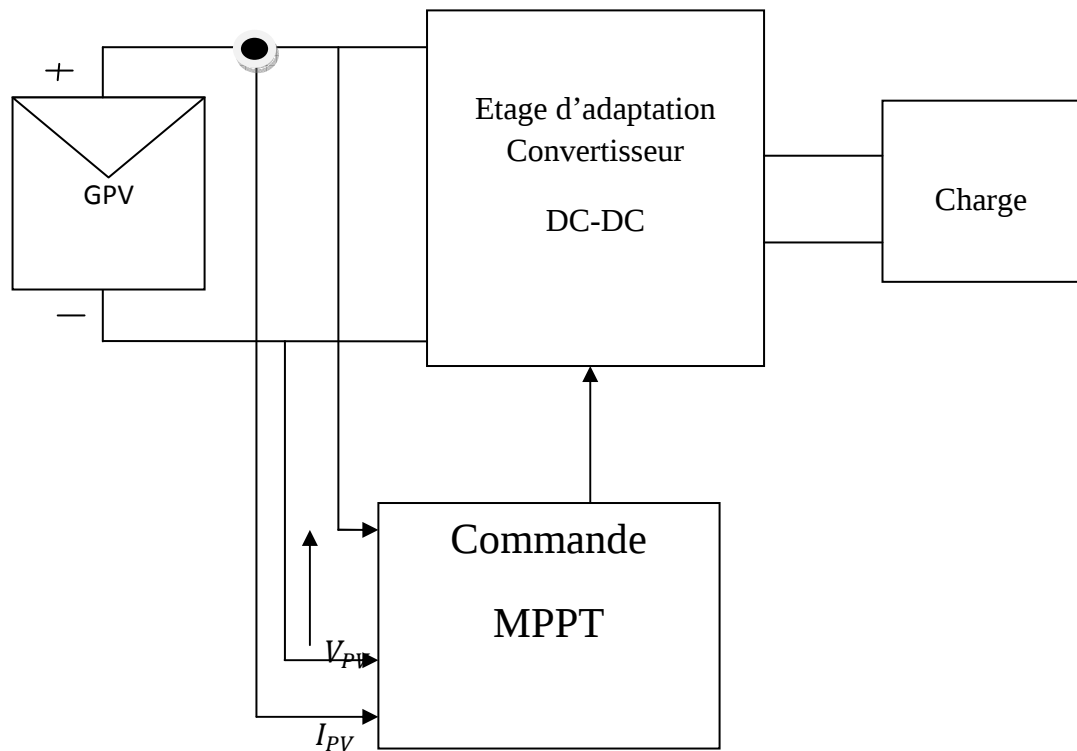


Figure (IV. 3):Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par une commande (PPM) sur charge [2]

La technique de contrôle utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa puissance à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elle que soient les instabilités météorologiques (variation de l'éclairement et température) ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment.

IV.5.Synthèse des différents MPPT solaires photovoltaïques : [7], [10], [12]

La classification d'une manière générale des commandes MPPT est faite selon le type d'adaptation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT (courant et puissance).

Il existe un grand nombre de publications scientifiques qui présentent des commandes MPPT plus ou moins complexes.

IV.5.1.Structure de la commande MPPT analogique :

Cette commande MPPT analogique utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

La conception de cette commande est indépendante de la structure du convertisseur statique utilisé, elle peut s'appliquer aussi bien à des convertisseurs abaisseurs qu'à des éleveurs [7]

IV.5.2.Les commandes MPPT numériques performantes :

La plus plupart des commandes MPPT récentes sont de type numérique, elles sont basées sur la mesure des tensions de sortie et d'entrée d'un hacheur. Ainsi, connaissant le comportement du convertisseur statique, on en déduit la valeur du rapport cyclique qui permet de faire la meilleure adaptation source-charge. [2], [7]

IV.6.Méthodes de poursuite du point de puissance maximale : [2], [7]

Pour obtenir un meilleur rendement dans le fonctionnement des générateurs photovoltaïques, la technique appelée la poursuite de la puissance maximale (MPPT) qui consiste à transférer de façon optimale toute la puissance électrique à extraire de cette source de l'énergie photovoltaïque vers la charge à alimenter. Elle doit être utilisée dans toute application utilisant ces générateurs, et deviendra nécessaire et même indispensable selon la théorie du transfert optimal de puissance. Les techniques de contrôle employées pour la poursuite du point de puissance sont :

- Méthodes de la dérivée de la puissance
- Méthodes à contre réaction de la tension

IV.6.1. Méthode de la dérivée de la puissance :

Cette méthode est basée sur la recherche de l'extremum de la courbe de puissance $p_v = f(v_p)$ obtenue directement de la caractéristique du générateur photovoltaïque. Le point de puissance maximale (PPM) est obtenu lorsque la dérivée de la puissance par rapport à la tension s'annule, c'est-à-dire, lorsque $(\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = 0)$ [11], [7], [5].

Le point de puissance maximale est donné par la Figure (IV.17)

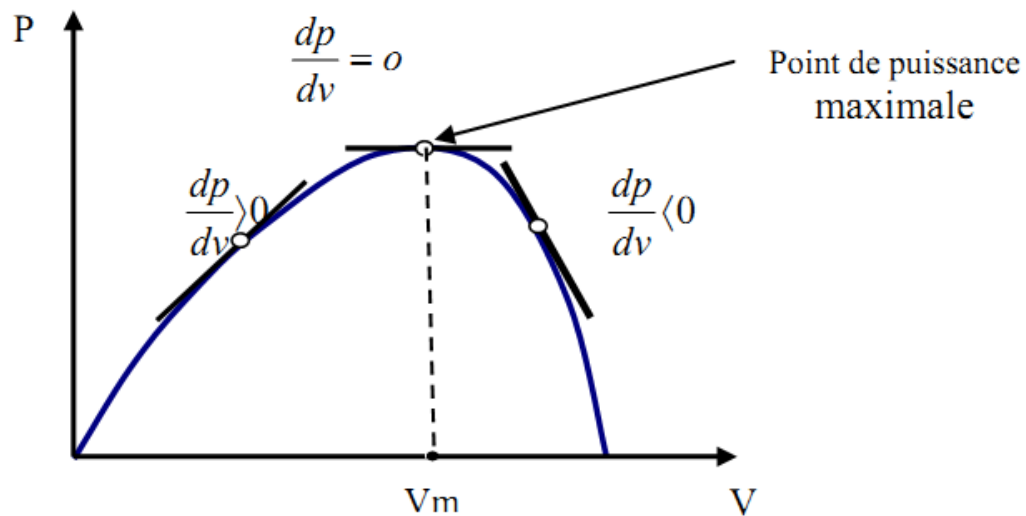


Figure (IV.4) : Caractéristique du point de puissance maximale (MPP)

IV.6.1.1. Méthode de la perturbation et l'observation la (P&O) :

On générale si on veut poursuivre le point de puissance maximale en s'affranchissant de la connaissance des paramètres qui modifient sa position, on doit recourir aux techniques d'asservissement, en utilisant la plus souple, celle de la perturbation et de l'observation, (P & Q). [2]

Le principe de cette commande consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte [7].

C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPM) le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension de référence (V_{ref}), ou en agissant

directement sur le rapport cyclique du convertisseur (DC/DC), puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique. [2], [5]

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance du générateur photovoltaïque augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau MPP. [17], [5]

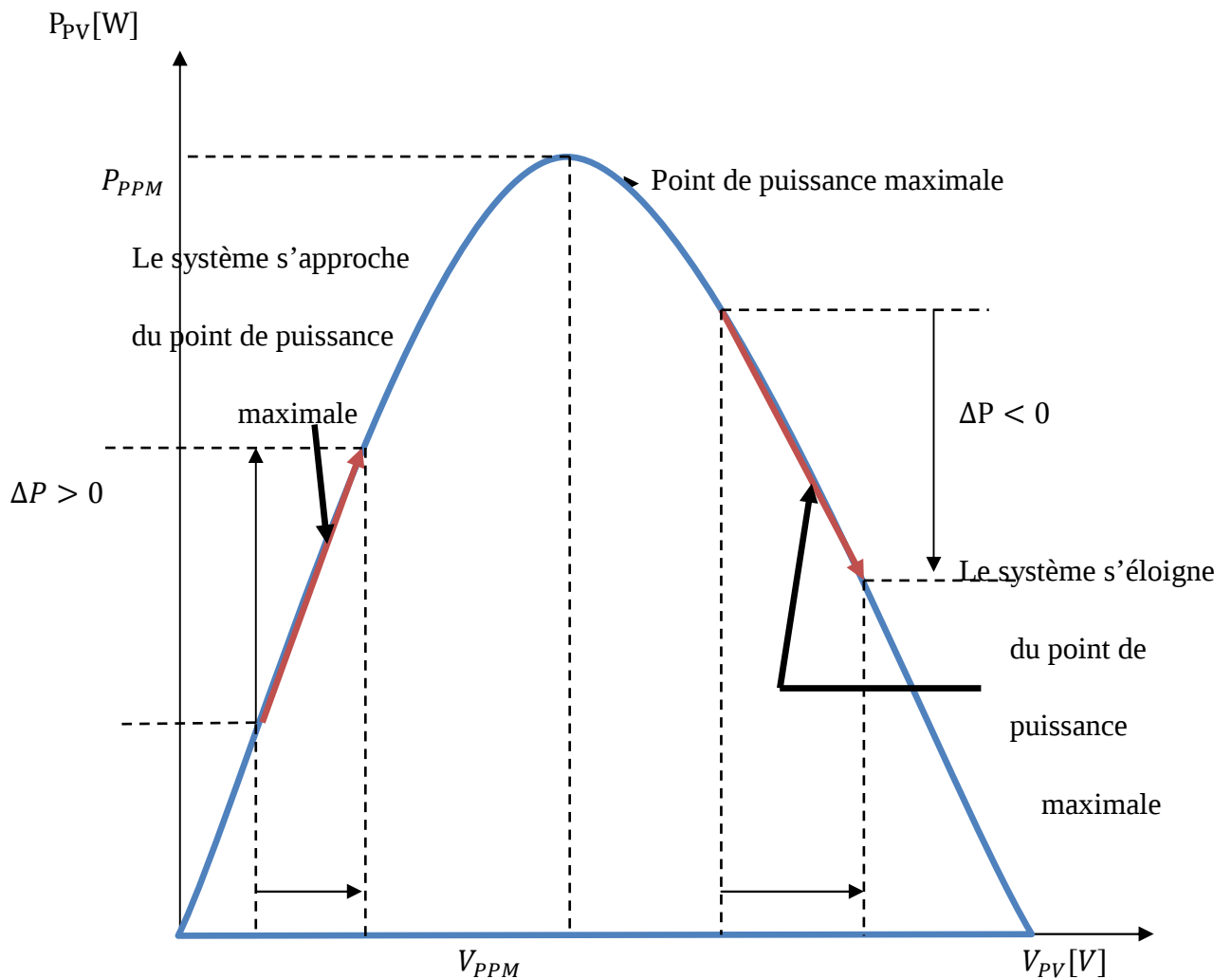


Figure (IV.5) : Caractéristique P_{PV} , V_{PV} d'un panneau photovoltaïque

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de part sa facilité d'implémentation. Cependant, elle présente quelques problèmes liés aux

oscillations autour du MPP qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du MPP doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du MPP. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du MPP, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité, ce qui rend cette commande difficile à optimiser. [5][17]

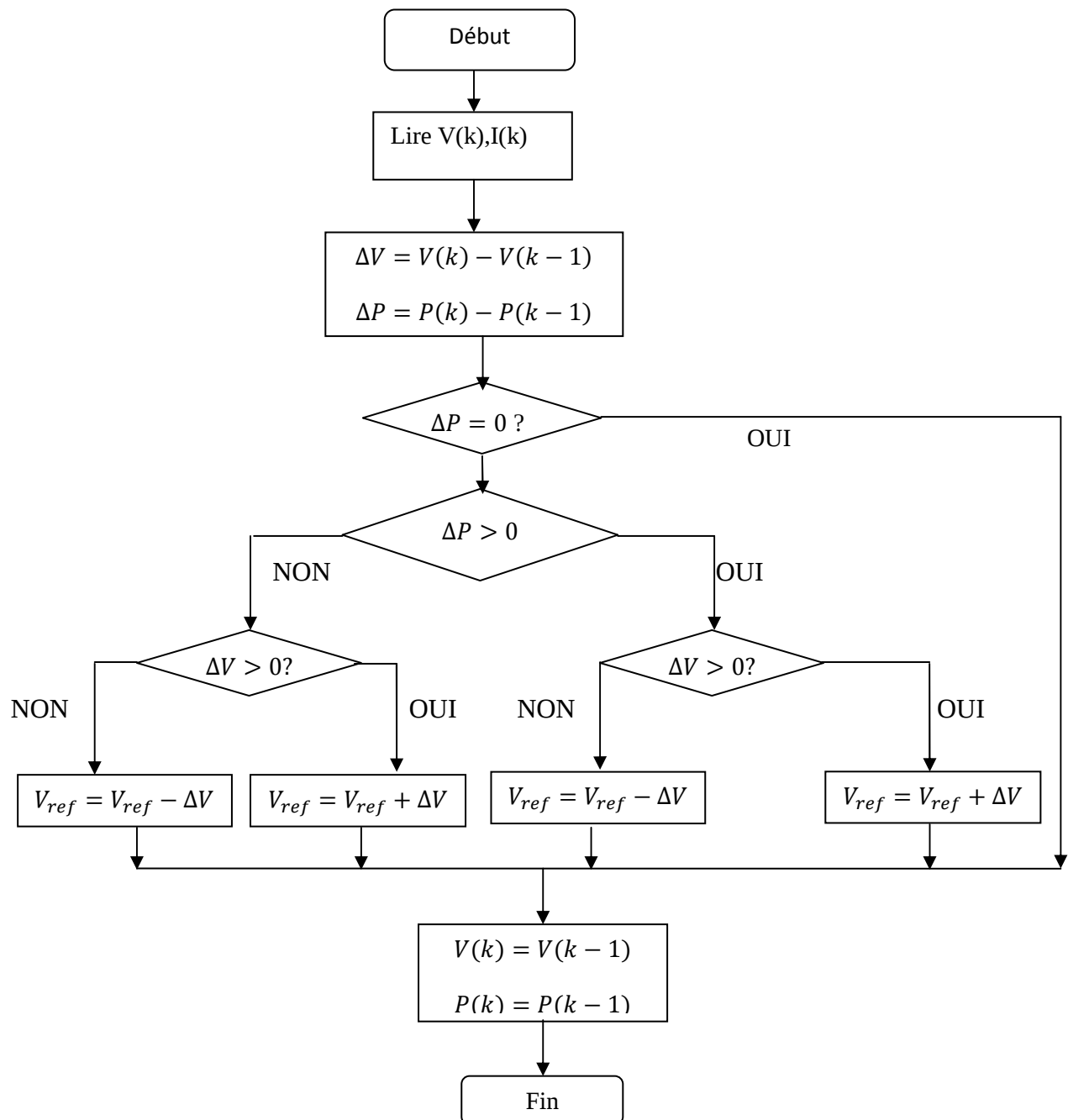


Figure (IV.6) : Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation [2]

IV.6.1.2. La méthode Incrément de conductance :

Dans cette partie, pour alléger les notations, on note V, I, P les grandeurs relatives au générateur photovoltaïque. , [2], [7] [17], [20]

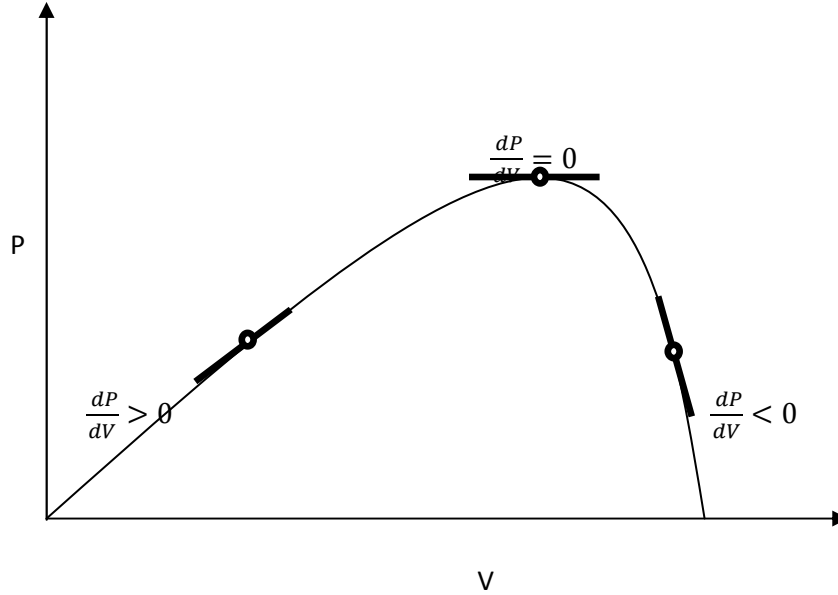


Figure (IV.7) : Comportement en boucle ouverte et en boucle fermée du convertisseur [7], [5]

Remarque : I/V : conductance, dI/dV conductance incrémentale

La figure (IV.10) : permet d'écrire l'ensemble d'équations suivantes :

$$\text{Si } \frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} > 0 \quad \Rightarrow \text{le point de fonctionnement est à gauche du PPM}$$

$$\text{Si } \frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = 0 \quad \Rightarrow \text{point de fonctionnement est sur le PPM,}$$

$$\text{Si } \frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} < 0 \quad \Rightarrow \text{point de fonctionnement est sur la droite du PPM}$$

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(I_{PV} \cdot V_{PV})}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = 0 \quad \Rightarrow \text{sur le PPM}$$

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(I_{PV} \cdot V_{PV})}{dV_{PV}} \cong I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} > 0 \quad \Rightarrow \text{gauche du PPM}$$

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(I_{PV} \cdot V_{PV})}{dV_{PV}} \cong I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} < 0 \quad \Rightarrow \text{droite du PPM}$$

Ces équations peuvent être écrites comme :

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = -\frac{I_{PV}}{V_{PV}} \quad \text{Au PPM}$$

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} > -\frac{I_{PV}}{V_{PV}} \implies \text{À gauche du PPM}$$

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} < -\frac{I_{PV}}{V_{PV}} \quad \text{à droite du PPM}$$

L'avantage principal de cet algorithme est qu'il est adapté aux conditions climatiques instables car, théoriquement, il est possible de trouver un point de puissance maximale et de s'y immobiliser si la perturbation cesse. Dans ce cas-là, la variation de tension est nulle ; l'apparition d'une variation de courant permet d'ajuster la valeur de la tension de référence pour atteindre un nouveau point de puissance maximale. C'est une propriété intéressante par rapport aux deux types de MPPT précédents car en régime établi, il n'y a pas d'oscillations autour du point de puissance maximale. De plus, cette méthode ne présente pas de risques de divergence par rapport au point de puissance maximale.

L'organigramme de cet algorithme est donné par la **figure(IV.8)**

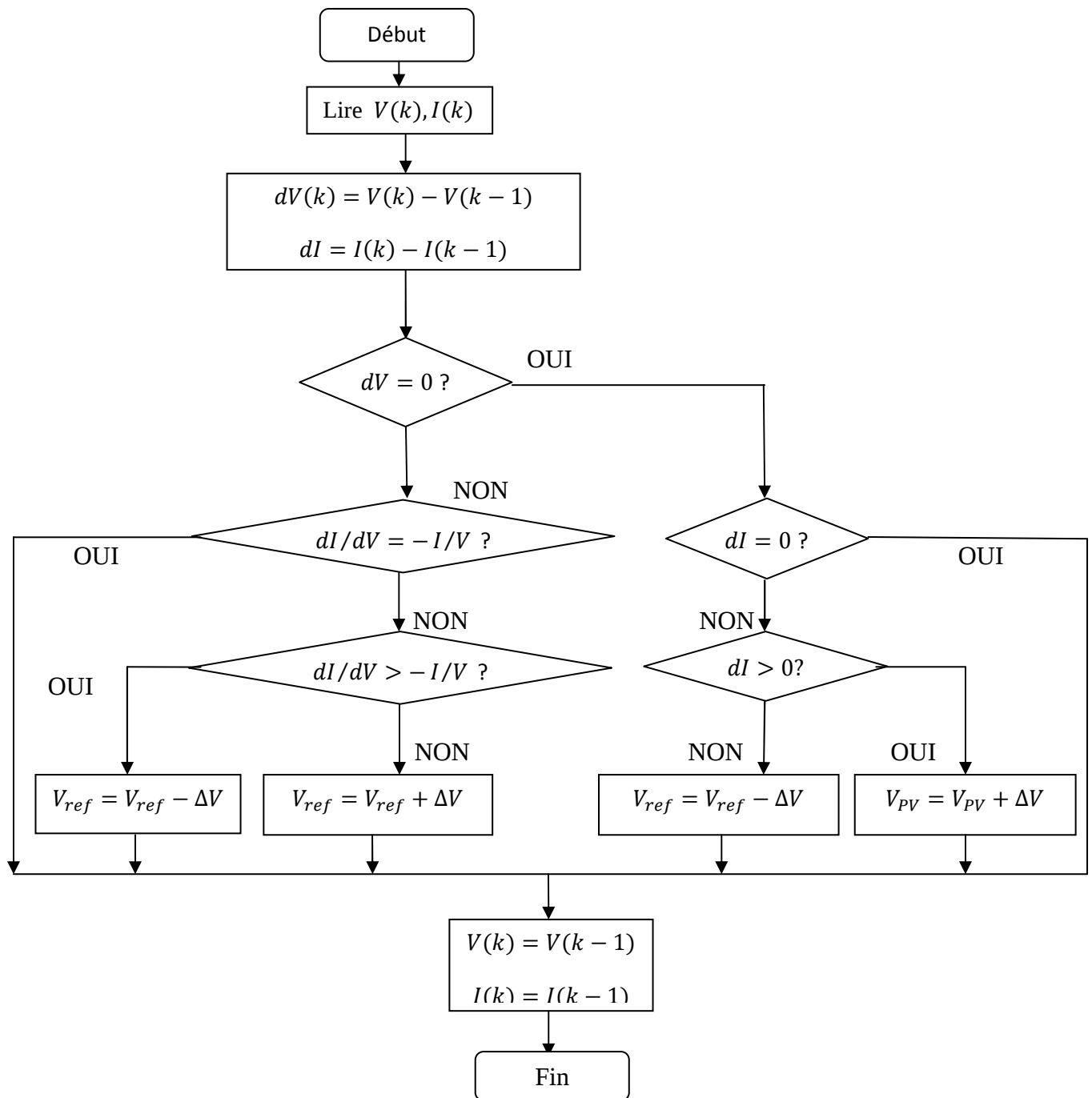


Figure (IV.8). Organigramme de l'algorithme incrémentation de conductance

[\[17\]](#)

IV.6.1.3.Principe de commande Hill-Climbing :

La technique de contrôle nommée Hill Climbing, consiste à faire monter le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum. La recherche s'arrête théoriquement quand le point de puissance maximal est atteint. Cette méthode est basée sur la relation entre la puissance du panneau et la valeur du rapport cyclique appliqué au convertisseur statique.

Mathématiquement, le PPM est atteinte lorsque dP_{PV}/dD est forcé à zéro par la commande [7], [10]

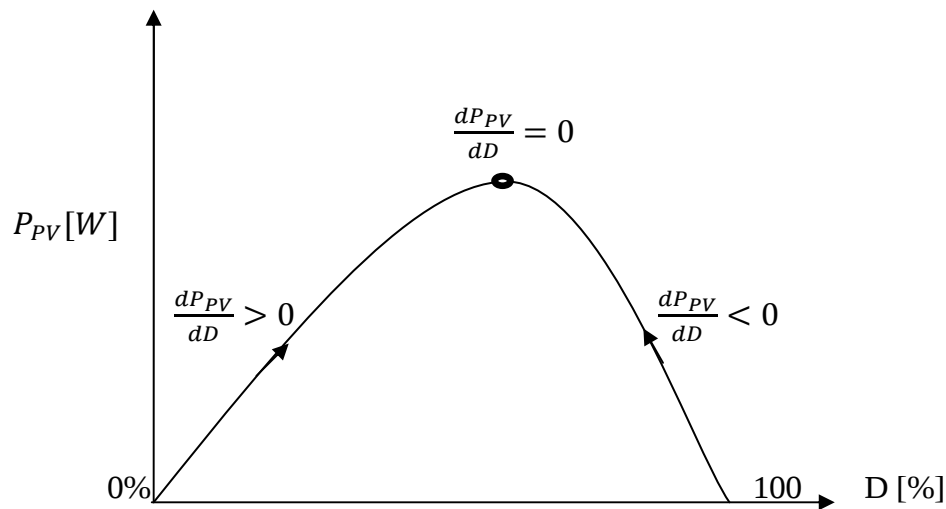


Figure (IV.9) : Relation entre P_{PV} et D du convertisseur statique.

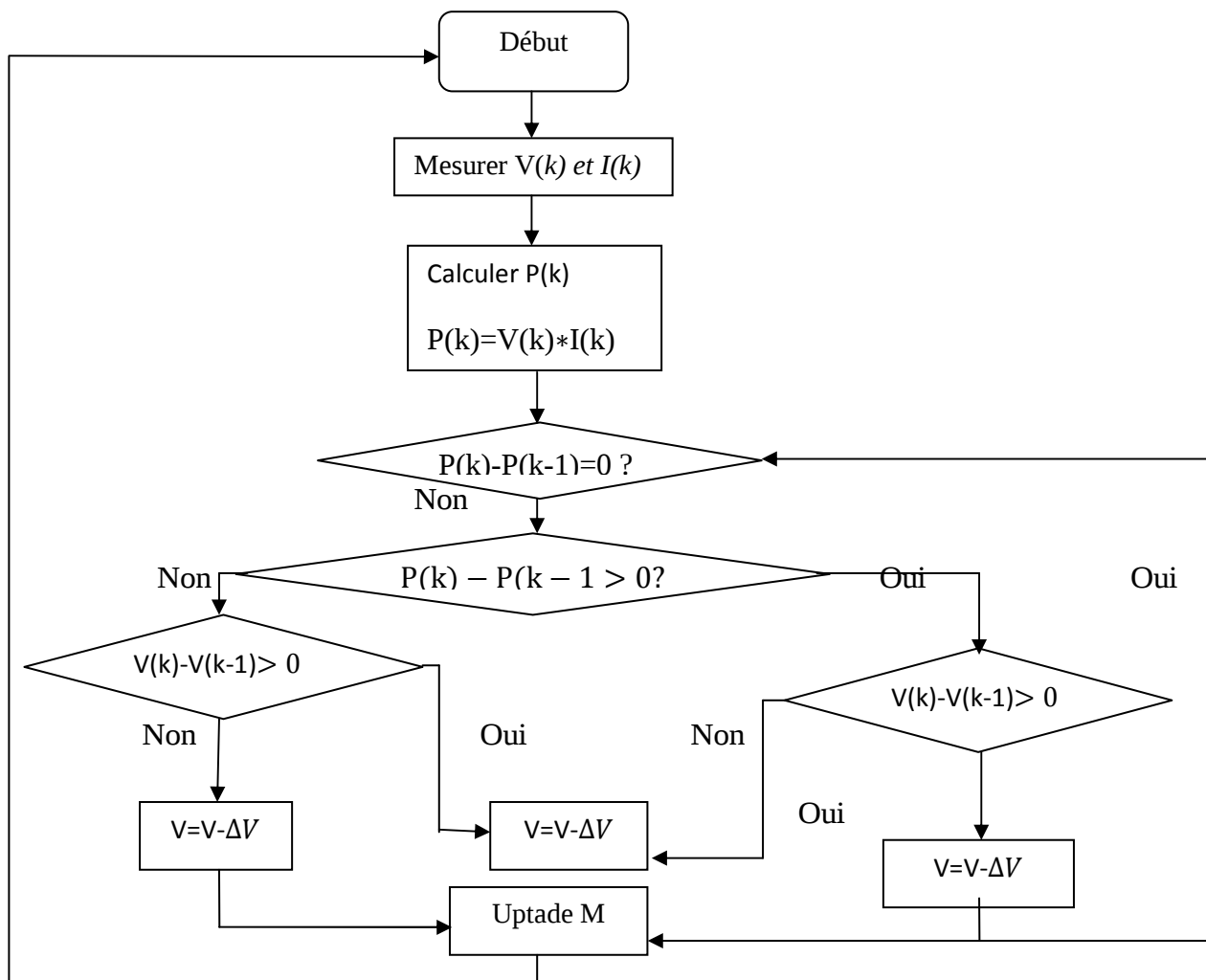


Figure (IV.10) : Algorithme type de la commande Hill Climbing

VI.6.2. Méthodes à contre réaction de la tension :

Ce genre de mécanisme repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par comparaison de cette tension avec une référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la MLI de la commande afin d'annuler cette erreur comme le montre la figure (IV.12) [2]:

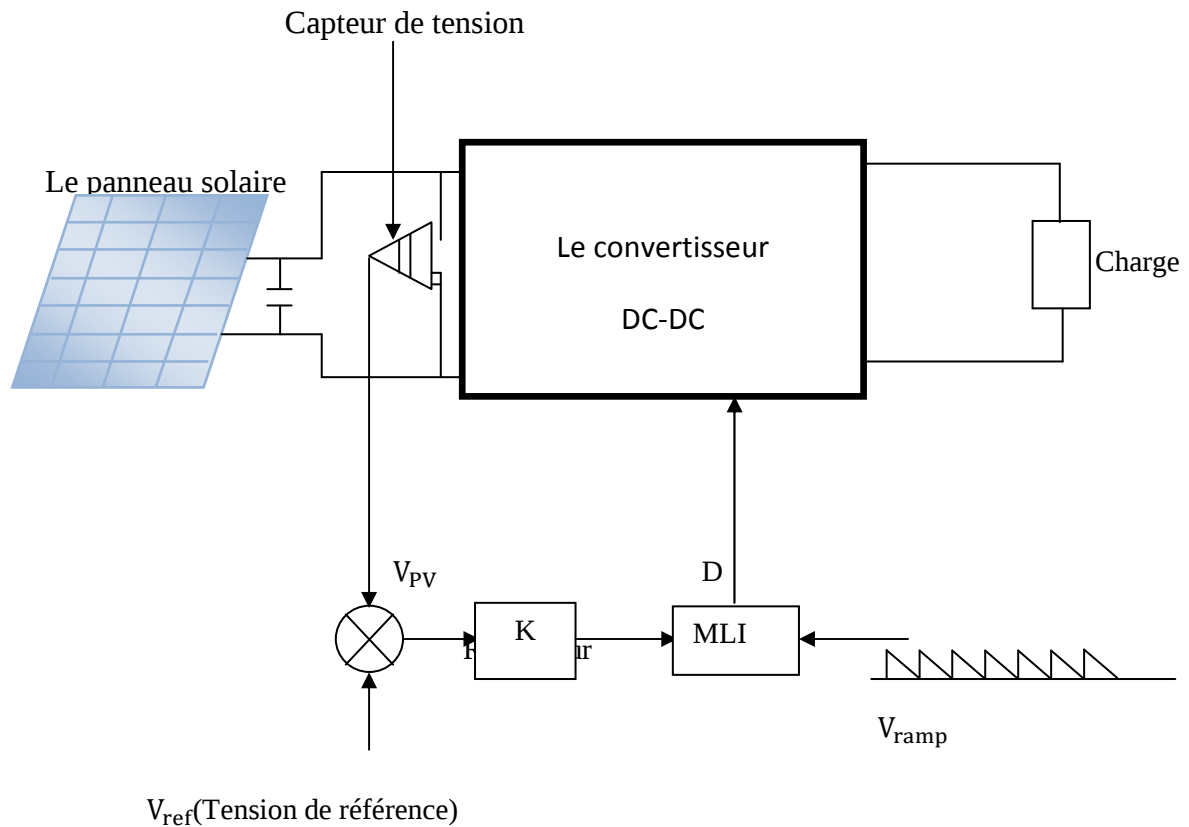


Figure (IV.11) : Méthode avec Contre-réaction de tension et modulation [2]

Selon la nature de cette tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe), on distingue trois types de méthodes :

- Méthode à tension de référence fixe.
- Méthode MPPT avec mesure de la tension à vide du panneau.
- Méthode MPPT avec cellule pilote.

IV.6.3. Méthode avec contre réaction du courant :

Dans toutes les méthodes (MPPT) présentées jusqu'ici, une mesure de (I_{PV}) et (V_{PV}) a été employée pour obtenir des informations sur la puissance de sortie du panneau. Cette nouvelle méthode (MPPT) utilise seulement une mesure de courant pour obtenir l'information sur le point opérationnel et actuel du système [2].

L'avantage de cette méthode est qu'elle est simple, contrairement aux méthodes mentionnées précédemment.

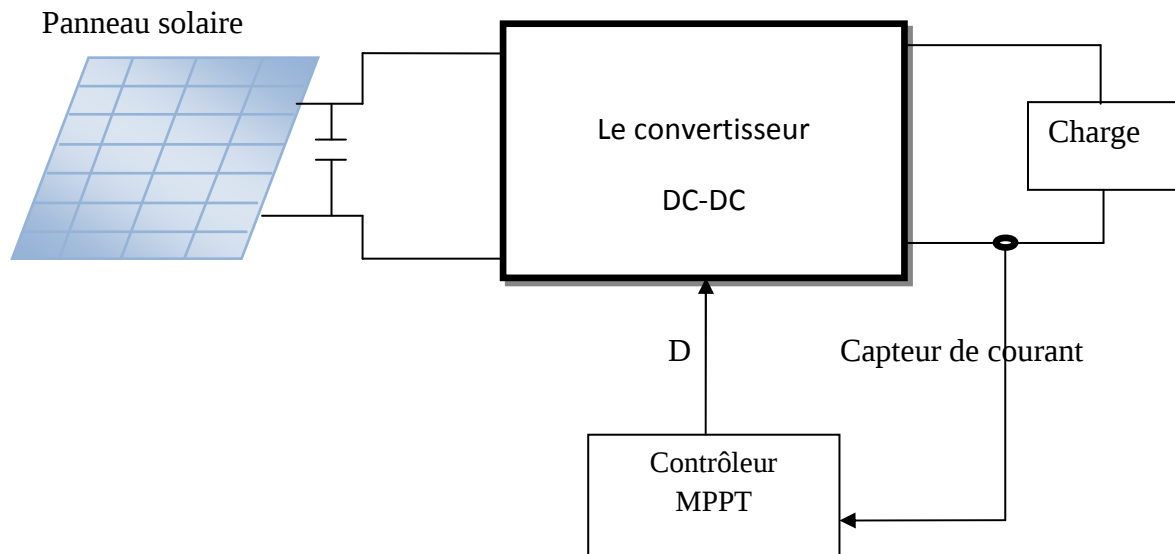


Figure (IV.12) : Méthode de la contre réaction en courant [2]

Il existe une autre technique plus avancée que les techniques présentées ci-dessus :

IV.6.4.MPPT prédictive :

Cette technique nous permet de poursuivre le point de puissance maximale en se basant sur le modèle du système. La liaison entre le MPPT et le contrôleur prédictif force le système à poursuivre le point de puissance maximale même dans des conditions défavorables du fonctionnement.

IV.7.La régulation des stratégies de commandes MPPT : [7], [18]

La puissance délivrée par un générateur photovoltaïque doit être régulée pour optimiser le GPV et limiter l'impact des perturbations. Elle sera contrôlée avec un régulateur proportionnel, Intégrale.

IV.7.1.Types des correcteurs : [8], [18]

Dans l'industrie il existe plusieurs types de régulateurs parmi les plus répandus : les correcteurs PID (Proportionnel, Intégrale, Dérivé).

Donc le choix d'un correcteur revient à choisir une structure des structures suivantes (PI, PD ou bien PID).

- Un correcteur de type proportionnel dérivé PD a un effet stabilisant par rapport à la marge de phase et augmente la rapidité par l'élargissement de la bande passante mais, il ne permet pas d'améliorer la précision et amplifie les bruits de mesure.
- Un correcteur de type PI améliore la précision mais diminue la stabilité par perte de phase et ralentit le système par diminution de la bande passante.
- Un correcteur PID combine les trois actions de base P, I et D et permet de bénéficier de leurs avantages.

La figure (IV.7) ci-dessous montre l'emplacement du correcteur PI dans la boucle d'asservissement en utilisant le MPPT par conductance incrémentale :

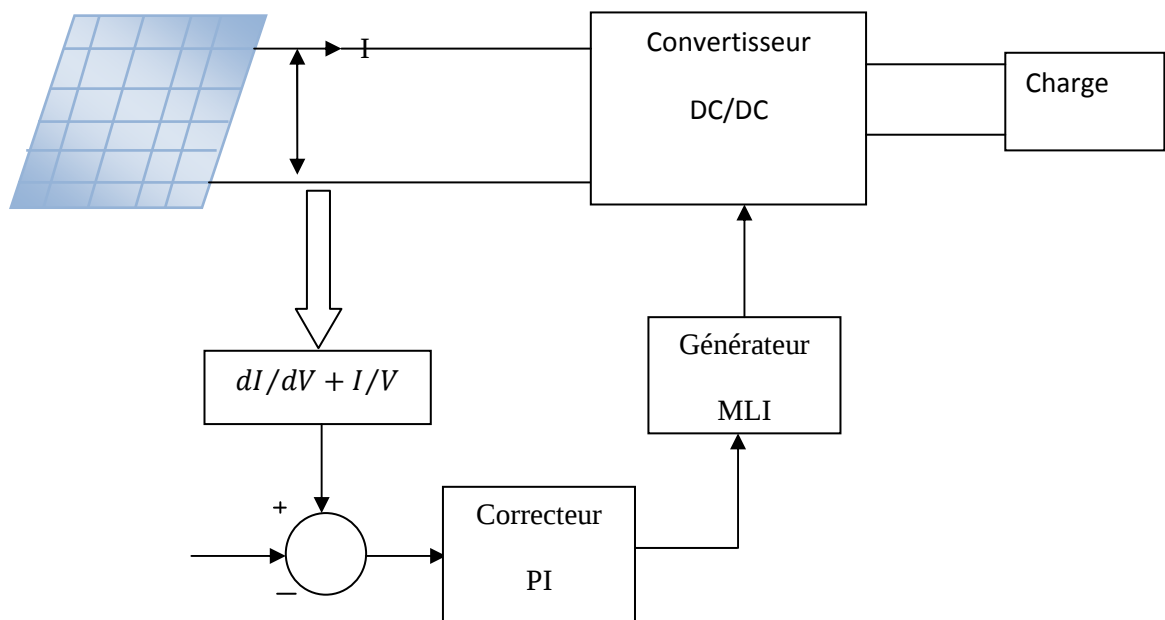


Figure (IV.13) : MPPT par conductance incrémentale

IV.8.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté le rôle de l'étage d'adaptation, pour un système photovoltaïque l'adaptation est effectuée par un convertisseur DC-DC, pour avoir un transfert maximal de la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque il faut utiliser une méthode de poursuite de point de puissance maximale et enfin l'utilisation de l'une de ces méthodes nécessite un étage de régulation.

A decorative scroll frame with a horizontal bar and two vertical bars on the left and right sides, each with a circular end. The text is centered within the horizontal bar.

Chapitre V :
Application en Simulation de la
Commande MPPT Prédictive au
Générateur Photovoltaïque

V.1.Introduction :

Dans ce chapitre nous allons appliquer la stratégie de commande MPPT prédictive sur un système photovoltaïque contenant un panneau solaire (même caractéristique du modèle utilisé dans le premier chapitre) dans le but de poursuivre le point de puissance maximale produit par le générateur photovoltaïque lors de son fonctionnement en alimentant une résistance. Nous commençons par la simulation avec la technique MPPT (perturbation et observation) en utilisant le régulateur PI, ensuite on applique le contrôleur prédictif.

V.2.Présentation du logiciel PSIM :

PSIM est un logiciel de simulation spécifiquement conçu pour des commandes de l'électronique de puissance et de moteur.

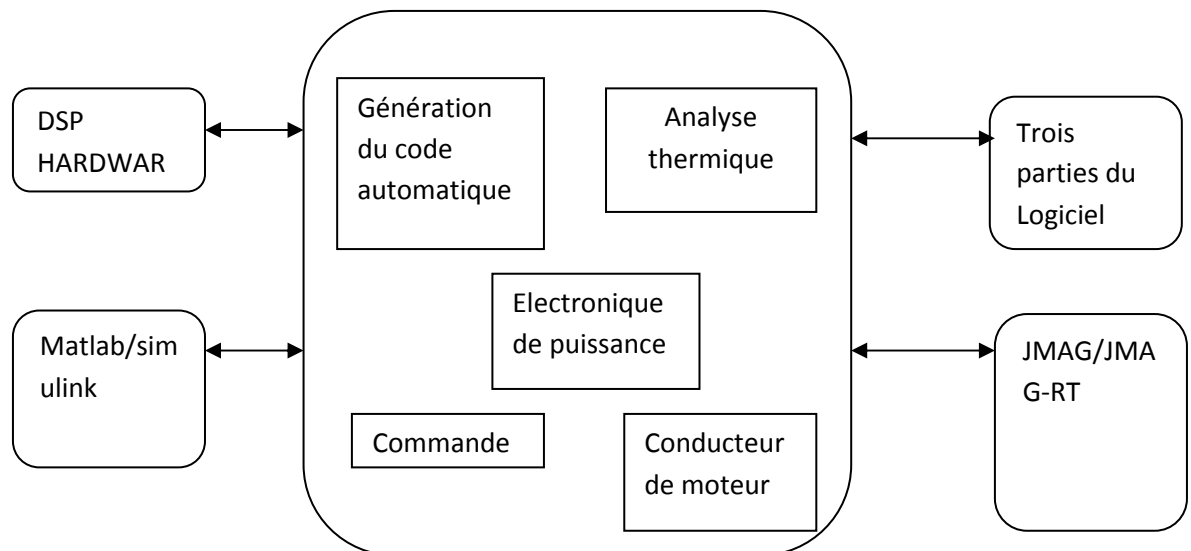
PSIM fournit un environnement de simulation pour l'électronique de puissance, la commande numérique, et le système d'entraînement de moteur étudié.

PSIM inclut le paquet de base, aussi bien que les options ajoutées suivantes :

- Module d'entraînement de moteur : aux modèles intégrés de machine et les modèles mécaniques de charge pour le système d'entraînement de moteur étudié.
- Module de Commande Numérique : fournit les éléments discrets tels que : le bloc de fonction de transfert, bloc de quantification, les filtres numériques pour l'analyse de système de commande numérique.
- Module de Sim Coupler : fournit l'interface entre PSIM et Matlab/Simulink3 pour la Co-simulation.
- Module thermique : fournit les possibilités pour calculer des pertes de dispositifs de semi-conducteur.
- Module de mag coupler : fournit l'interface entre PSIM et le logiciel JMAG4 d'analyse de champ électromagnétique pour la Co-simulation.
- Module mag coupler-Droite : lie PSIM avec des fichiers des données (Jmag-rt4)
- Module SimCoder2 : fournit des possibilités automatiques de génération de code pour le matériel de DSP.

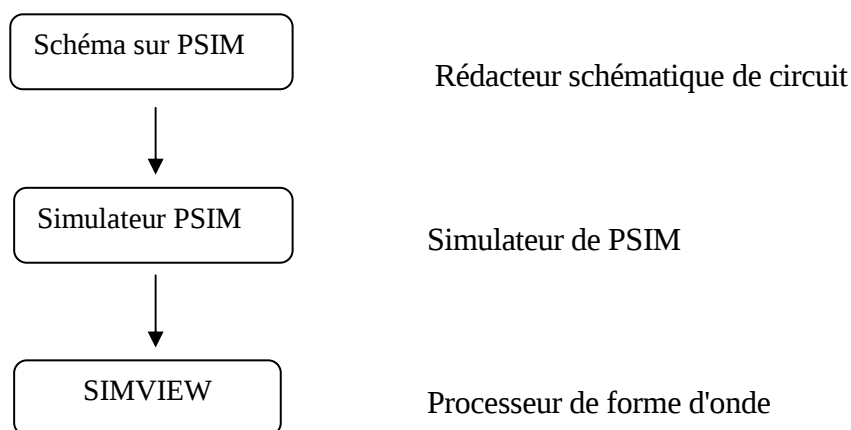
- Paquet d'Énergie Renouvelable : inclut le paquet de base de PSIM, le module d'entraînement de moteur, le modèle d'énergie solaire et la turbine d'éolienne pour la simulation dans des applications d'énergie renouvelable

L'environnement global de PSM est montré ci-dessous :



Figure(V.1) : Schéma globale du logiciel PSIM

L'environnement de simulation de PSIM comprend le programme schématique PSIM de circuit, le moteur de simulateur et le programme de traitement Simview1 de forme d'onde. Le procédé de simulation est illustré comme suit :

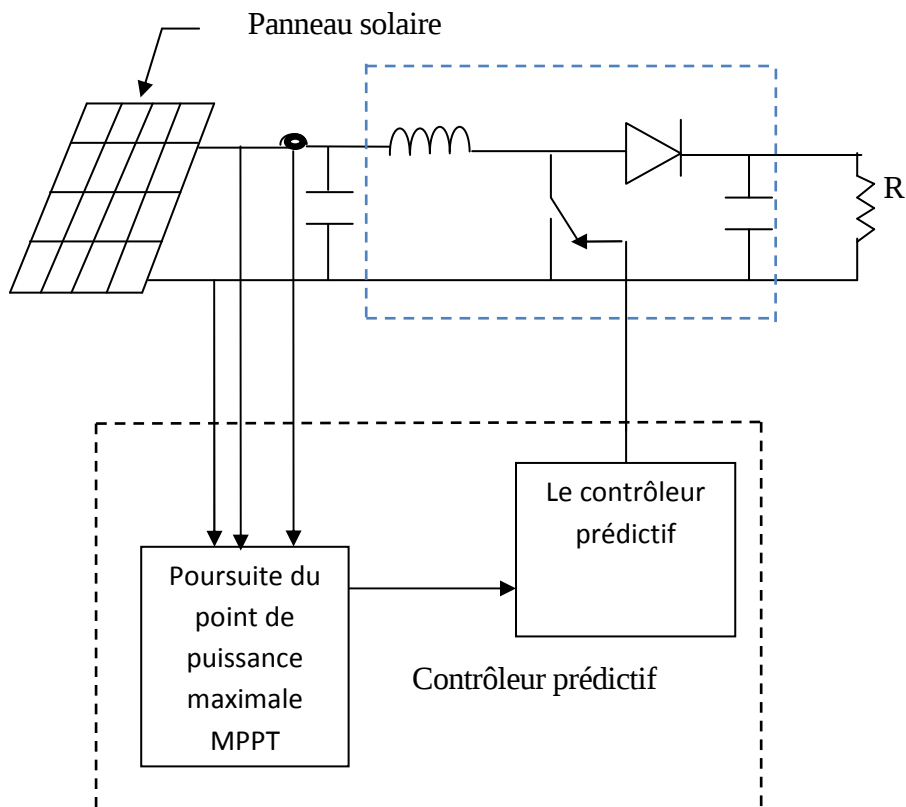


Figure(V.2) : Schéma récapitulatif de simulation sur PSIM.

V.3. Description et modélisation des différentes parties du système :

Le système est composé de trois éléments différents, le générateur photovoltaïque, le convertisseur électronique de puissance (DC/DC) et la charge (résistance). Pour chacune des parties. Ceci nous permet de mieux comprendre l'influence des paramètres du système et d'en dégager les conclusions intéressantes.

V.3.1. Schéma synoptique



Figure(V.3) : Schéma synoptique du système global

V.3.2. Le panneau solaire :

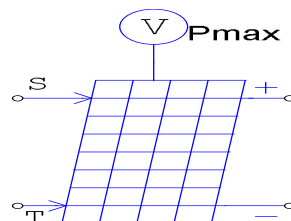


Figure (V.4): Modèle du générateur photovoltaïque sur l'environnement PSIM

Ou :

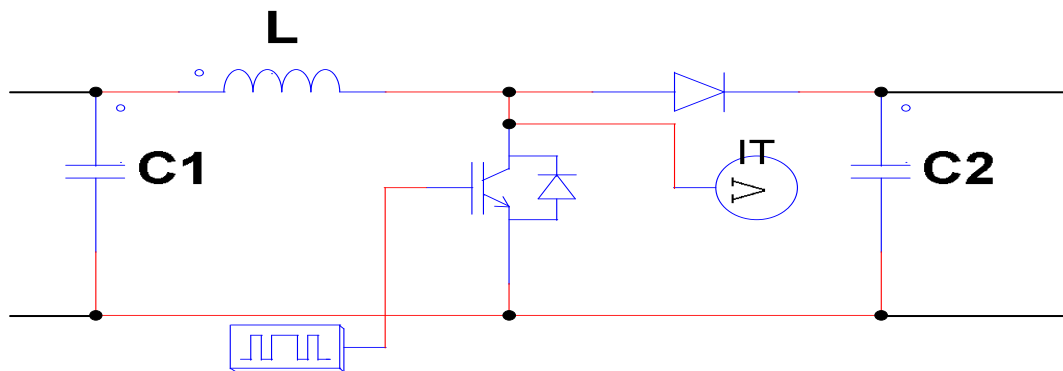
S : représente l'irradiation solaire.

T : représente la température.

La borne de dessus représente la puissance maximale du générateur

Pour effectuer les simulations nous avons choisit le même modèle utilisée dans le premier chapitre.

V.3.3. Le convertisseur DC /DC:



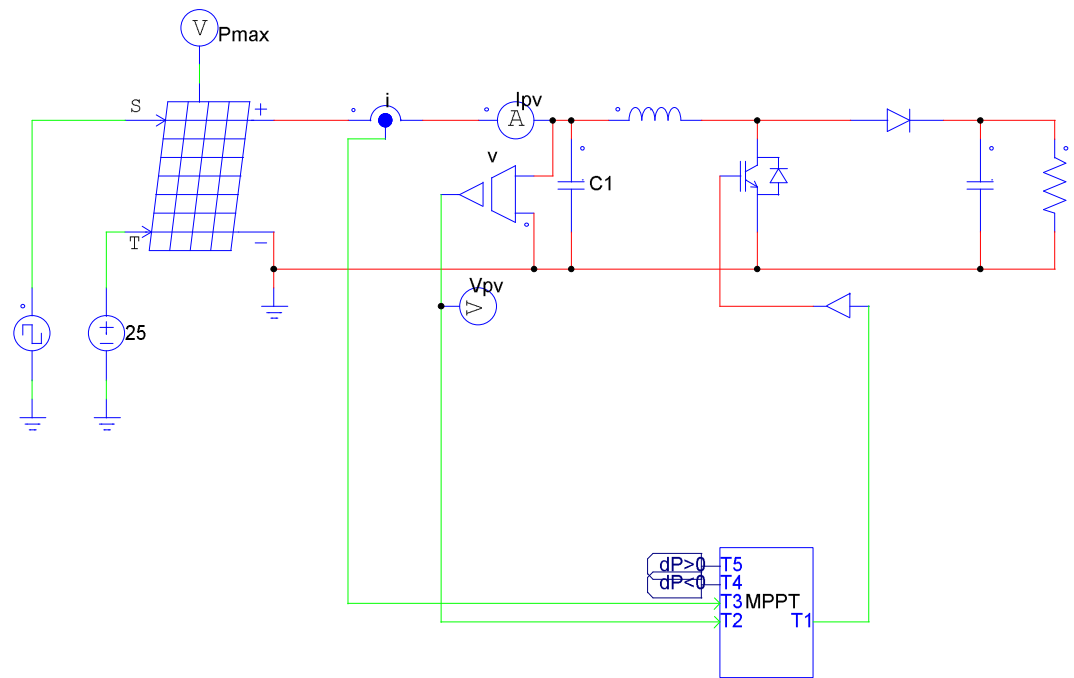
Figuré (V.5): Schéma du convertisseur DC/DC sur PSIM

Ce convertisseur est à modulation de largeur d'impulsion (MLI). Son fonctionnement est le suivant : Pendant le temps αT (α étant le rapport cyclique de transformation et T la période de hachage), le transistor est conducteur et la diode bloquée, l'inductance se magnétise et le courant qui la traverse croît. Pendant le temps $(1-\alpha T)$, le transistor est bloqué et la diode conductrice. La capacité à l'entrée du convertisseur sert à maintenir la tension constante en filtrant les variations de tension dues au hachage.

Avec : $C_1 = 500\mu\text{F}$ $C_2 = 1000\mu\text{F}$, $R=10\ \Omega$, $L = 0.3\text{mH}$

V.4. Le schéma de simulation avec la méthode de la perturbation et observation en utilisant le correcteur PI :

Pour effectuer la simulation nous avons utilisé le même modèle du utilisé dans le deuxième chapitre.



Figuré (V.6) : Schéma de simulation avec le MPPT perturbation et observation.

Avec :

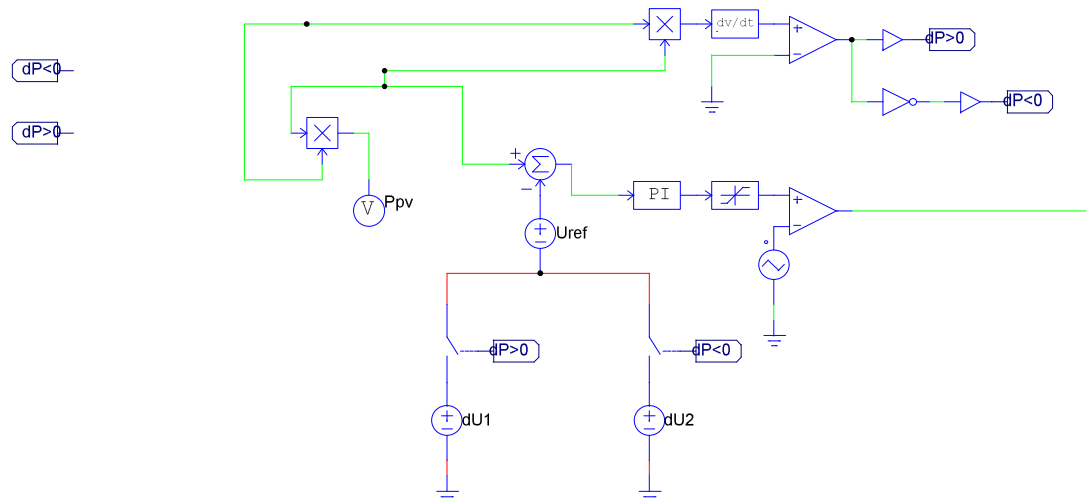


Figure (V.7) : le block MPPT.

V.4.1. Méthode de régulation du correcteur PI:

Il existe différentes méthodes de réglage des actions d'un régulateur PI suivant le type de système.

Nous avons choisit la méthode suivante :

- **Méthode par approches successives : [28]**

Elle consiste à modifier les actions du régulateur et à observer les effets sur la mesure enregistrée, jusqu'à obtenir la réponse optimale. On règle l'action proportionnelle, puis l'action intégrale. Cette technique présente l'intérêt d'être simple et utilisable sur n'importe quel type de système.

En pratique le réglage par étape des actions proportionnelle, intégrale, tout en observant l'évolution de la mesure, suite à des changements de consigne (tests en asservissement), ou suite à des variations de grandeurs perturbatrices (tests en régulation)

- Si le gain de l'action proportionnelle est élevé, le système devient moins stable, diminue l'erreur statique et améliore la rapidité
- Le correcteur PI améliore la précision mais diminue la stabilité par perte de phase et ralentit le système par diminution de la bande passante.

V.4. 2. Résultats de simulation :

Les résultats de simulation sont illustrés dans les figures suivantes :

a) Le courant I_R :

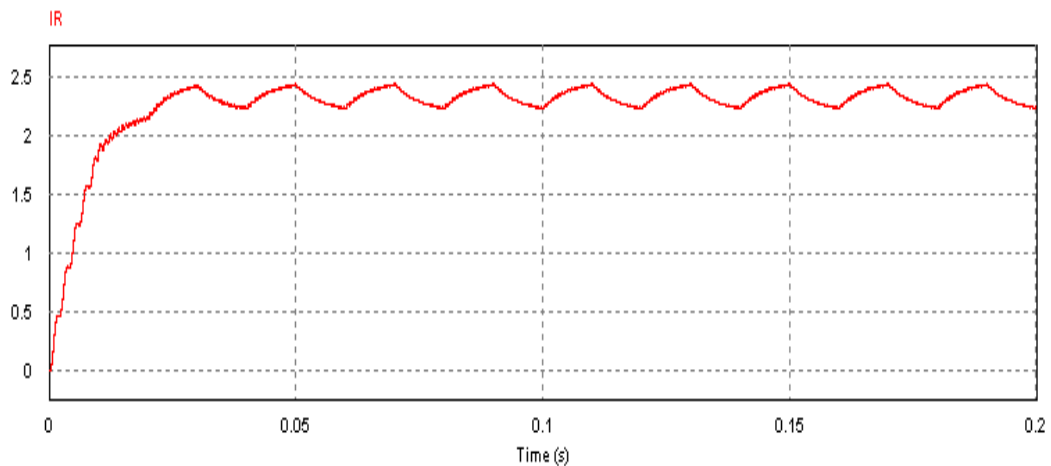


Figure (V.8): Courant I_R : optimisé

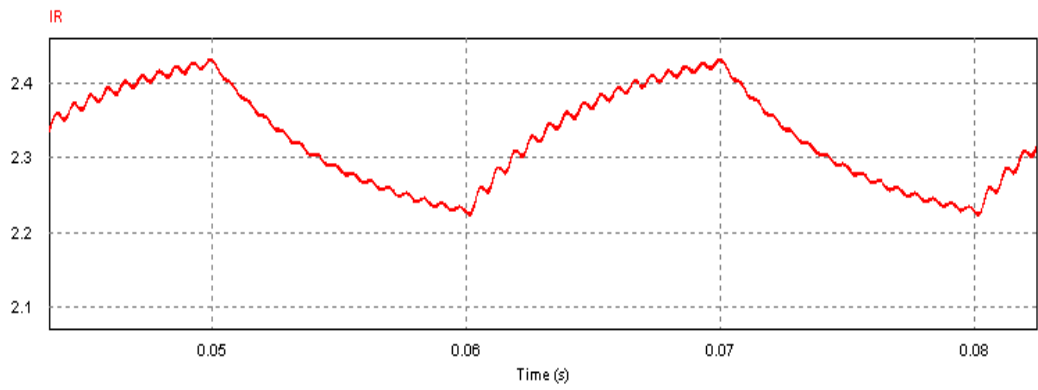


Figure (V.9): Oscillations du courant I_R optimisé

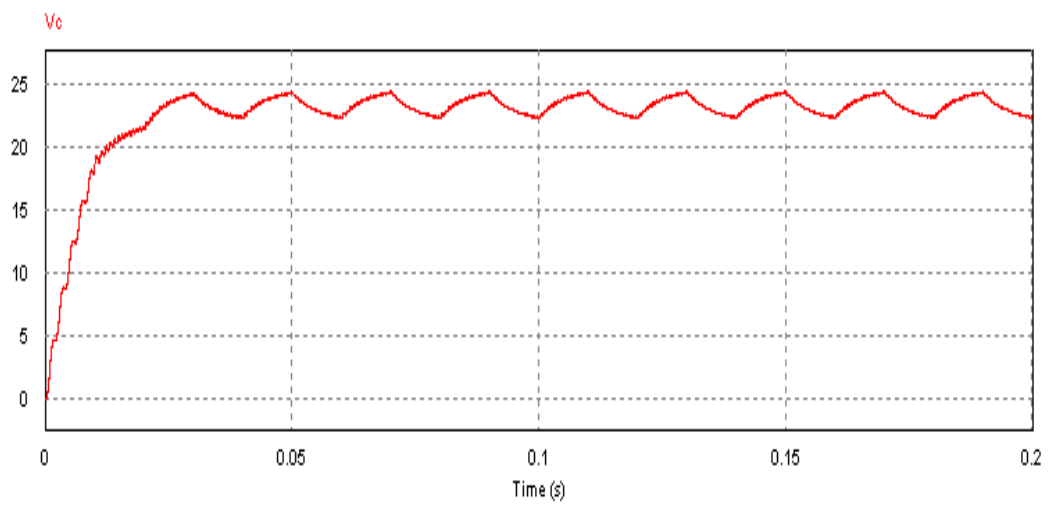


Figure (V.10): La tension v_c aux bornes de la charge

b) Le courant du générateur I_{pv} :

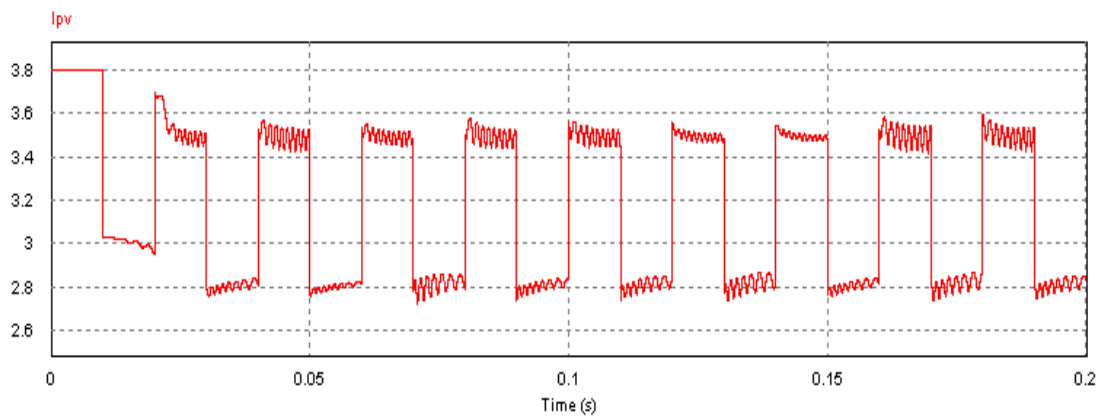


Figure (V.11): forme du courant I_{pv} en fonction du temps

c) La tension V_{pv} aux bornes du générateur :

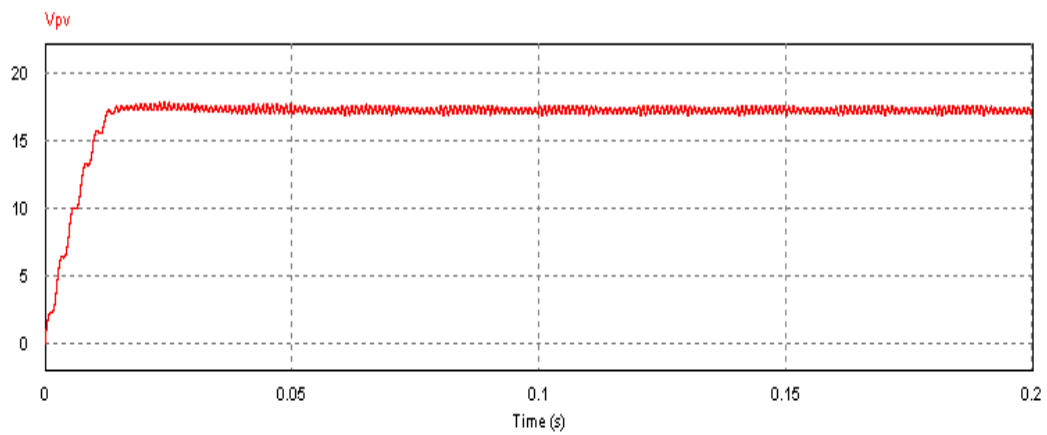


Figure (V.12): Tension aux bornes du générateur.

d) La caractéristique $I(V)$ lors d'un saut de l'éclairement:

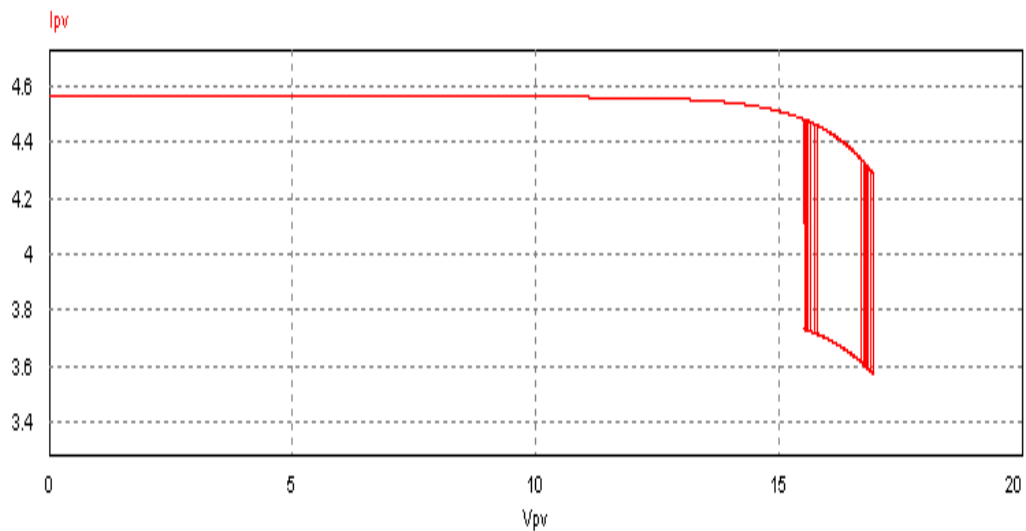


Figure (V.13) : la caractéristique $I(V)$ lors d'un saut d'éclairement de 200 à $800W/m^2$

e) La caractéristique $P(V)$ lors de la variation de l'éclairement:

Les résultats de simulation sont illustrés dans la figure suivante :

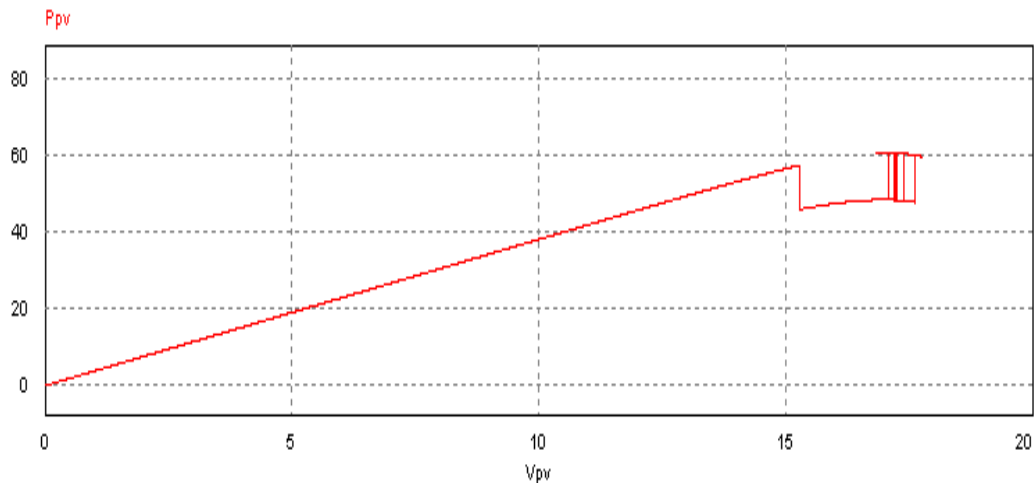


Figure (V.14) : la caractéristique $P(V)$ lors d'un saut d'éclairement 200 à 800W/m^2

V.4.3. Interprétation des résultats :

La puissance débitée par le générateur PV dépend du point de fonctionnement de ce dernier, c'est le produit de l'intensité du courant débité et la tension entre ses bornes. De la, on peut tirer la caractéristique courant-tension P-V.

Le maximum de puissance peut être suivi en effectuant des comparaisons à chaque instant avec la tension de référence, une fois le point de puissance maximale est atteint, il va se maintenir sur ce point jusqu'à la détection d'une nouvelle variation de la valeur de la tension afin de situer sur le PPM. Cependant, elle présente des oscillations importantes autour du PPM qu'elle engendre en régime établi. De plus, elle présente des pertes de recherche du PPM lors de changement rapide des conditions climatiques (le PPM se déplace vers des directions fausses)

V.5. Simulation du système avec le MPPT prédictif :

Nous avons présenté dans le chapitre(III) les équations de prédictions du courant I_{PV} et de la tension de sortie v_c .

On se basant sur le modèle d'équations nous avons effectué la simulation du système. Avec : $C_1 = 500\mu\text{F}$ $C_2 = 1000\mu\text{F}$, $R=10\ \Omega$, $L = 0.3\text{mH}$.

V.5.1. Schéma de simulation :

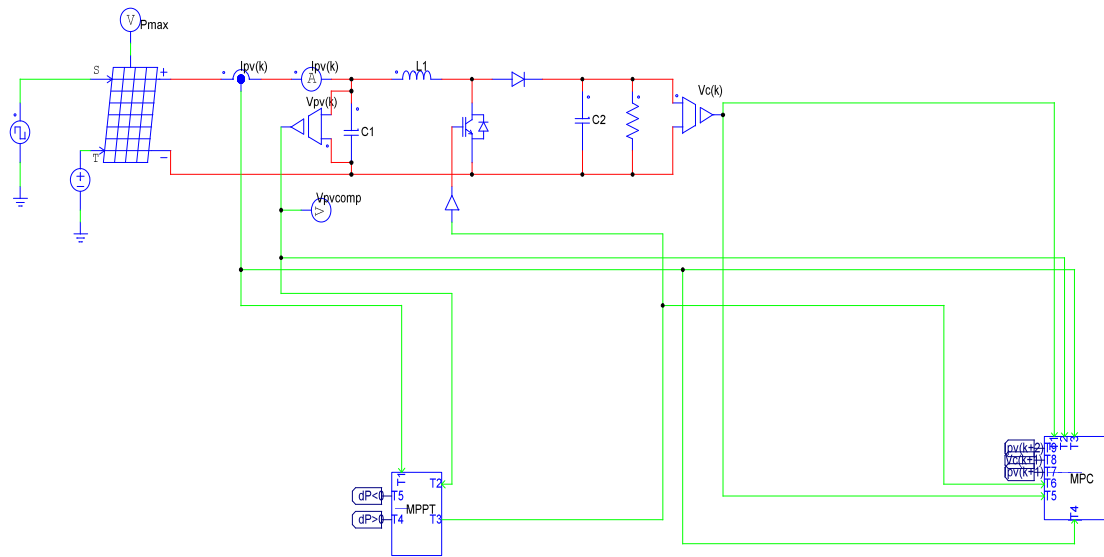
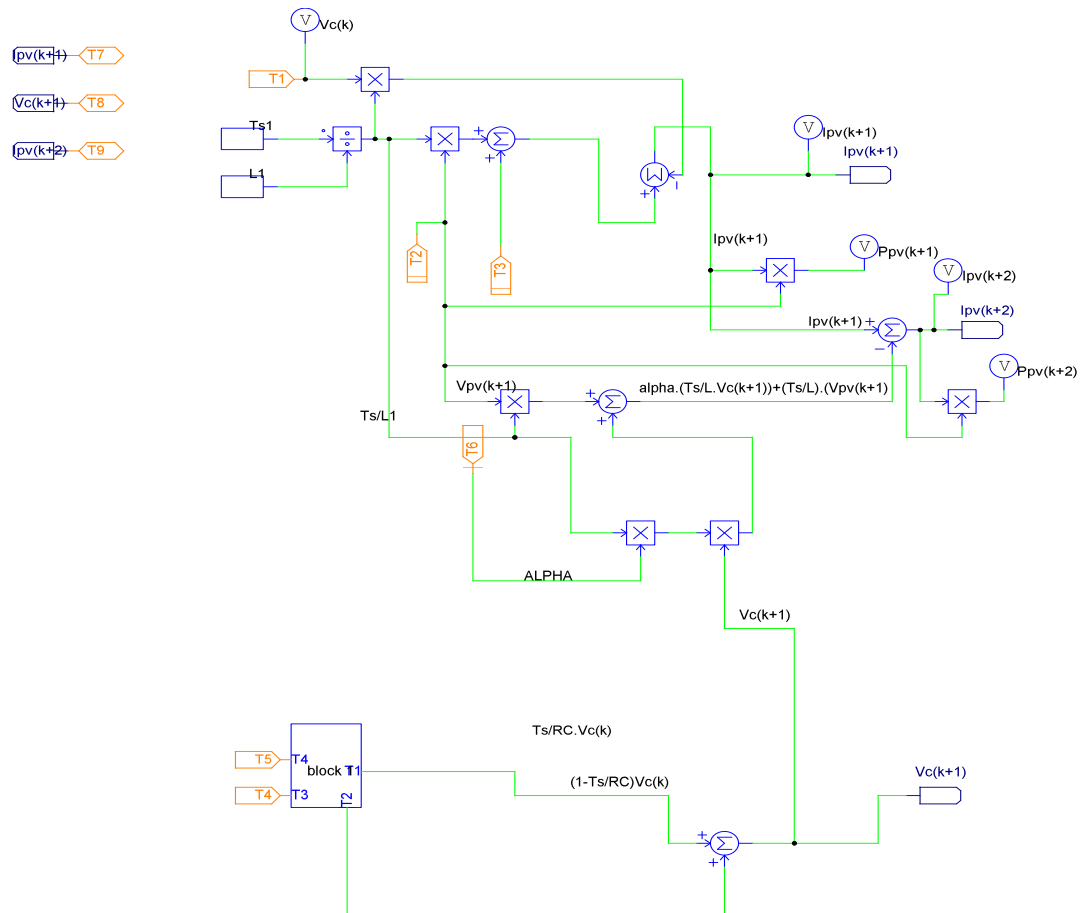
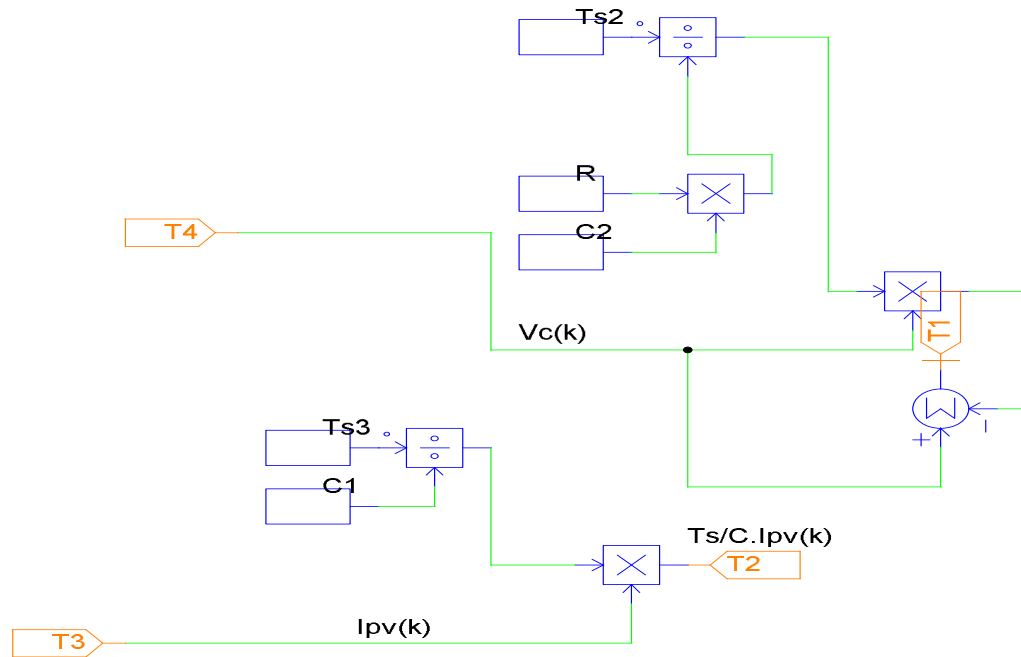


Figure (V.15) : simulation du système avec la stratégie de commande MPPT prédictive à deux pas de calcul.

Avec le schéma du block MPC :



Et le schéma du block 1 :



V.5.2. Résultats de simulation :

Les résultats de simulation sont illustrés sur les figures suivantes :

a) le courant I_R :

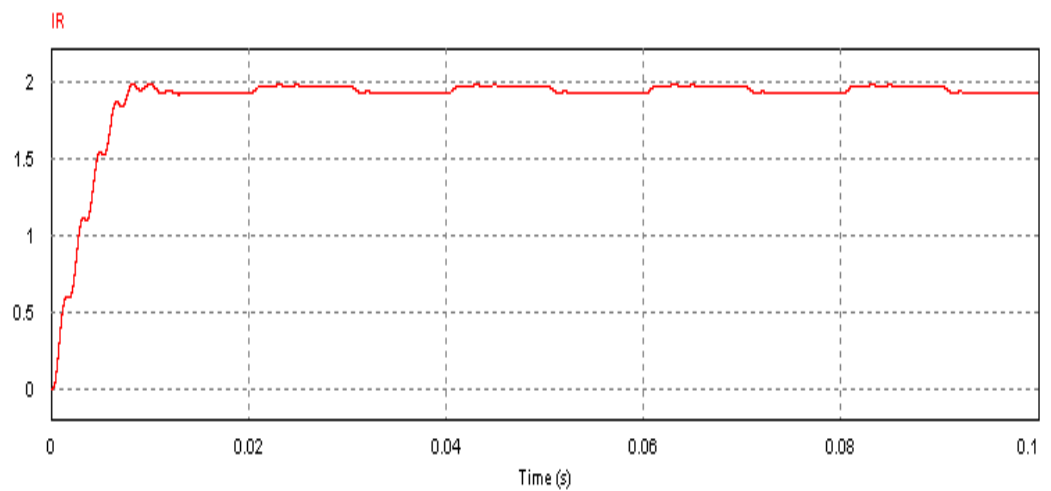


Figure (V.16): le courant de la charge résistive.

b) La tension v_c :

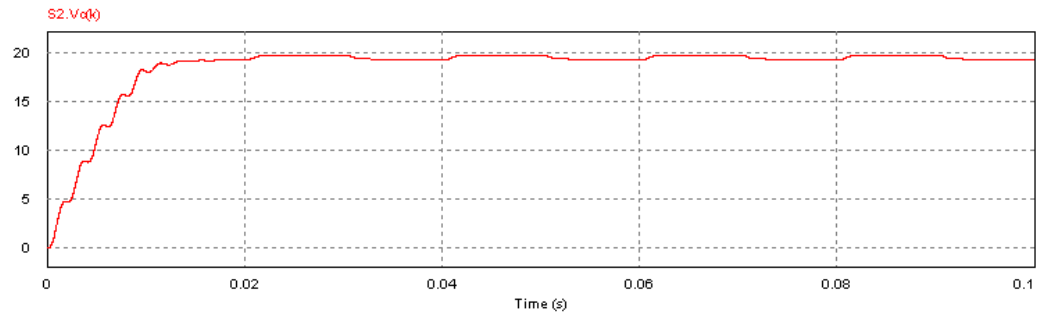


Figure (V.17): la tension aux bornes de la charge résistive.

c) La tension V_{pv} :

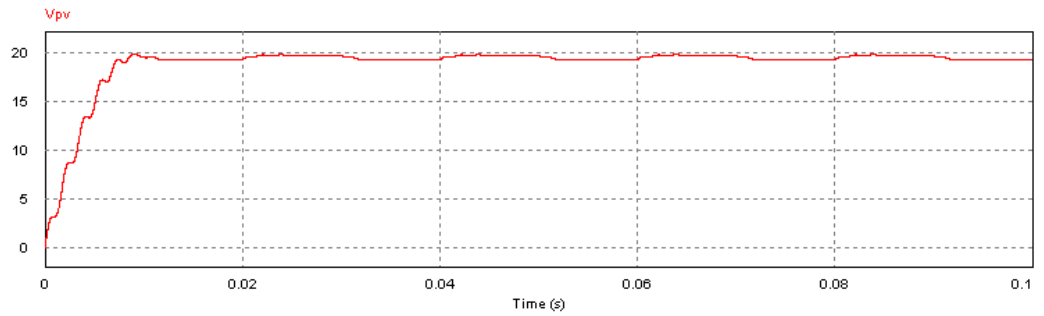


Figure (V.18): la tension aux bornes du générateur.

d) La caractéristique du courant $I_{pv}(V)$ du générateur PV :

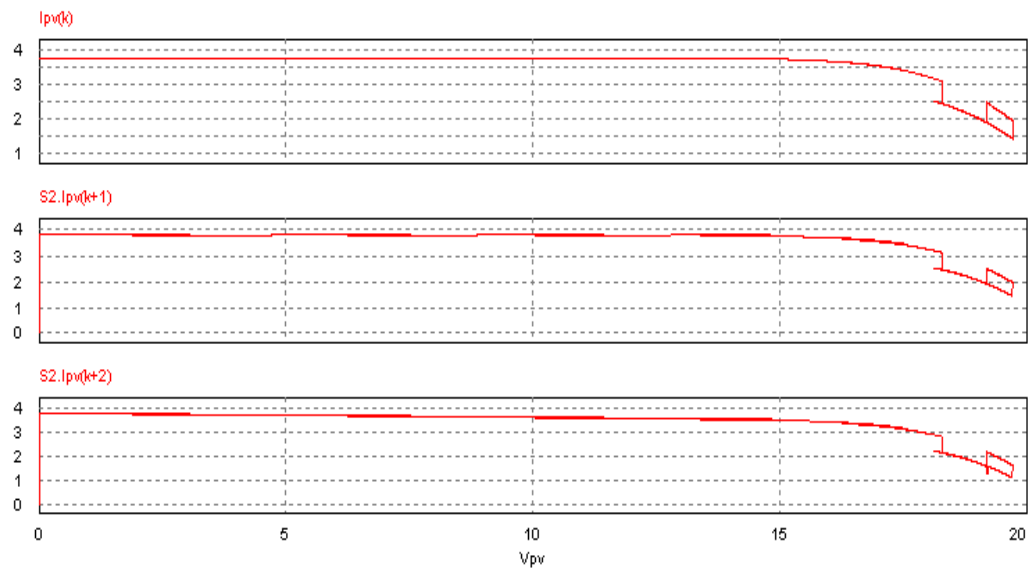


Figure (V.19) : la caractéristique $I(V)$ lors d'un saut d'éclairement 200 à 800W/m² à température constante.

e)Caractéristiques P(V) avec le MPPT prédictif :

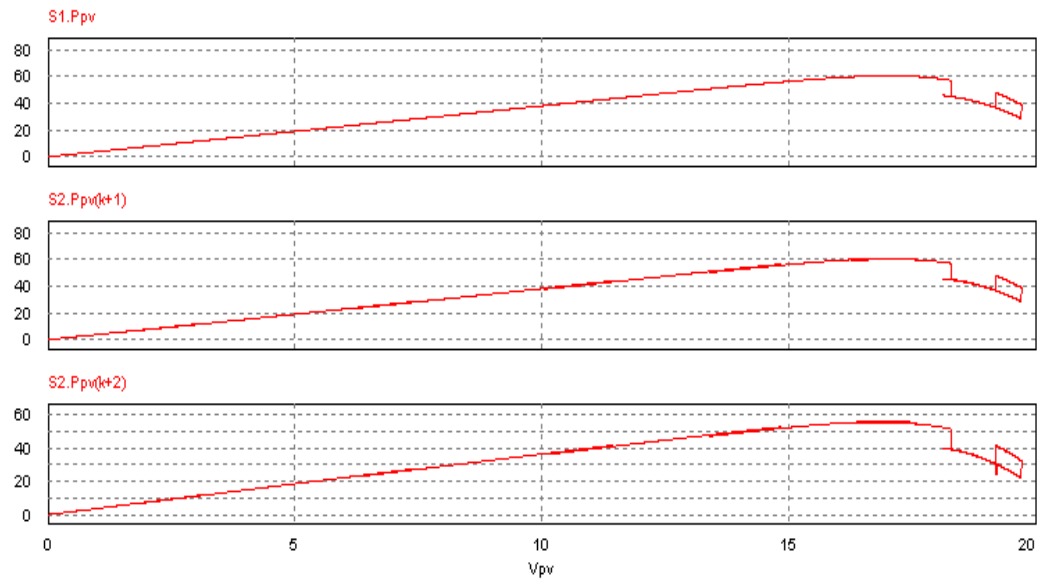
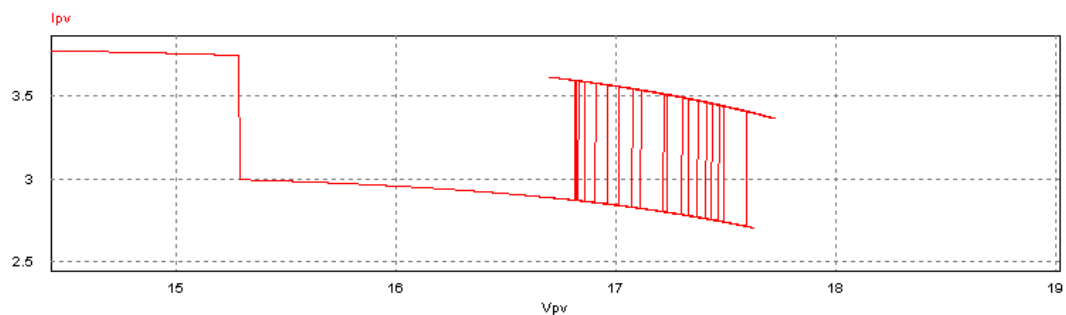


Figure (V.20): la caractéristique I(V) lors d'un saut d'éclairement 200 à 800W/m² à température constante

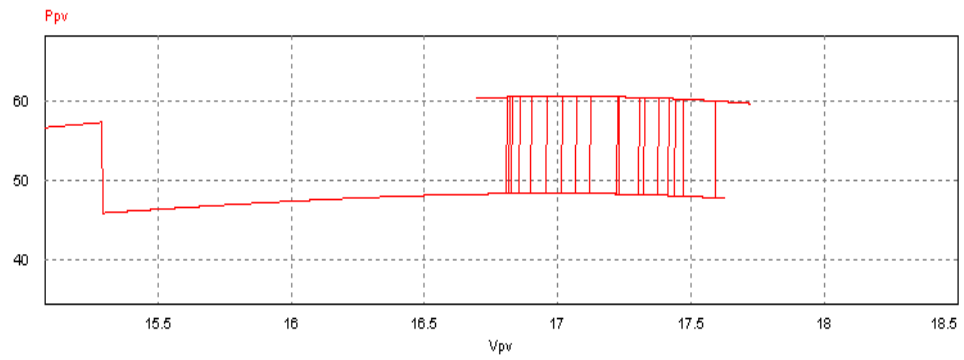
a) Interprétation des résultats :

On remarque que l'ajout du contrôleur prédictif au système nous permet de diminuer les ondulations du courant et de la tension et on voit que le transfert de la puissance délivrée par le générateur atteint son maximum plus rapidement et avec une bonne précision mieux que le MPPT.

V.7. Comparaison des résultats obtenus par les méthodes présentées ci-dessus sous une variation brusque d'éclairement :

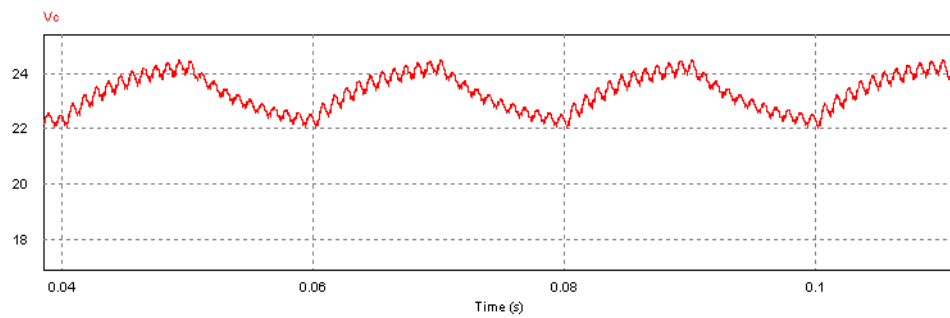


a)

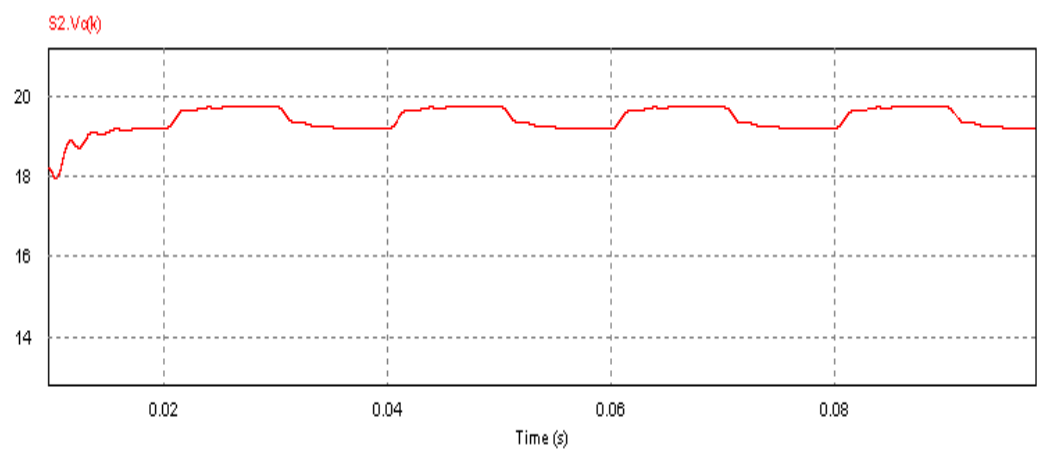


b)

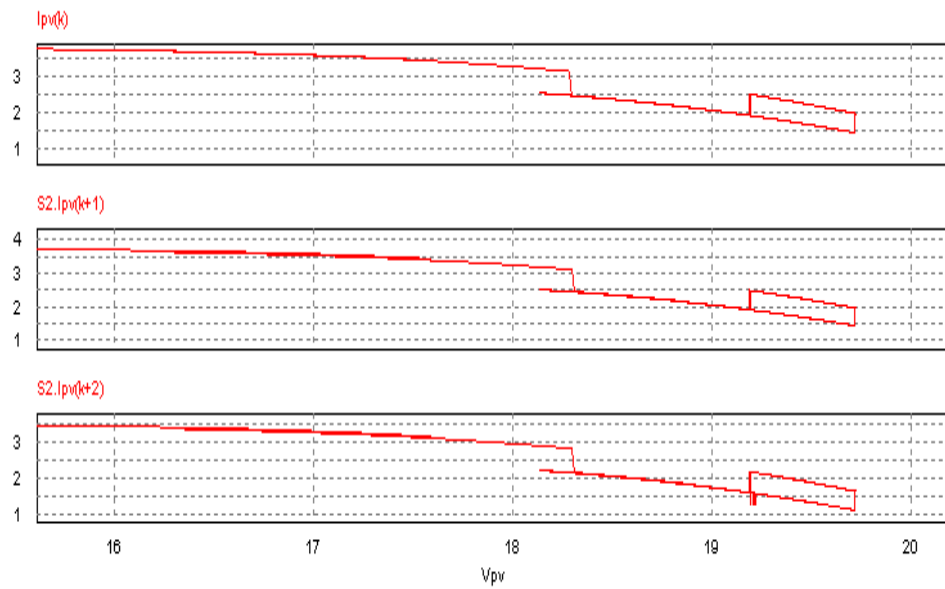
Figure(V.21) : le zoom des caractéristiques $I_{pv}(V)$ et $P_{pv}(V)$ en utilisant le MPPT seul.



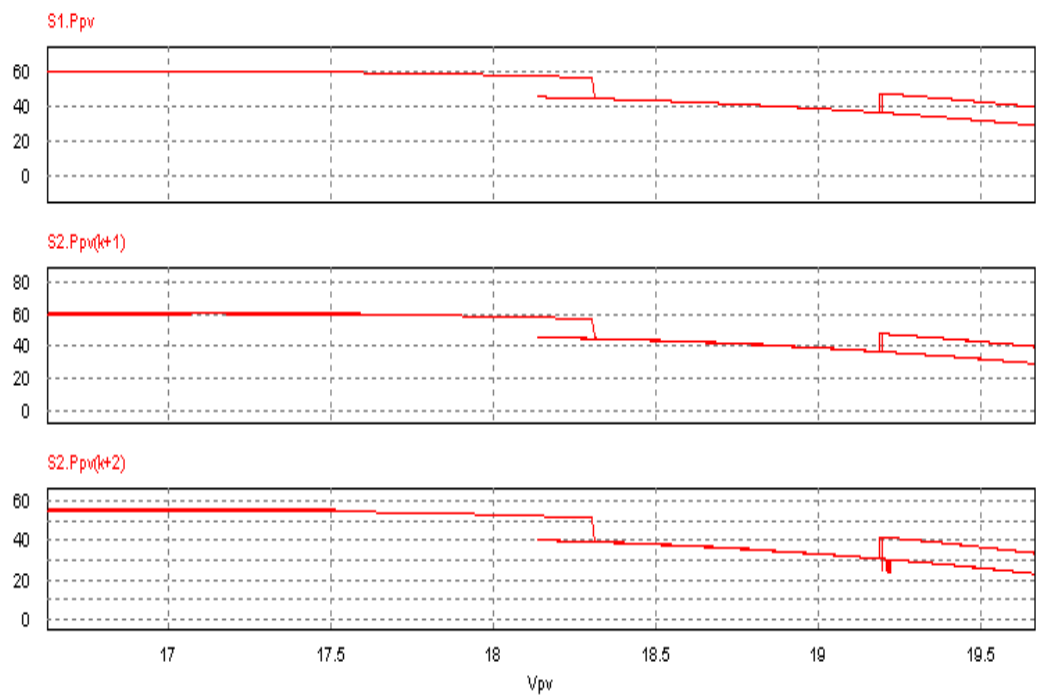
Figure(V.22) : le zoom de la tension de charge v_c en utilisant le MPPT seul



a)



b)



c)

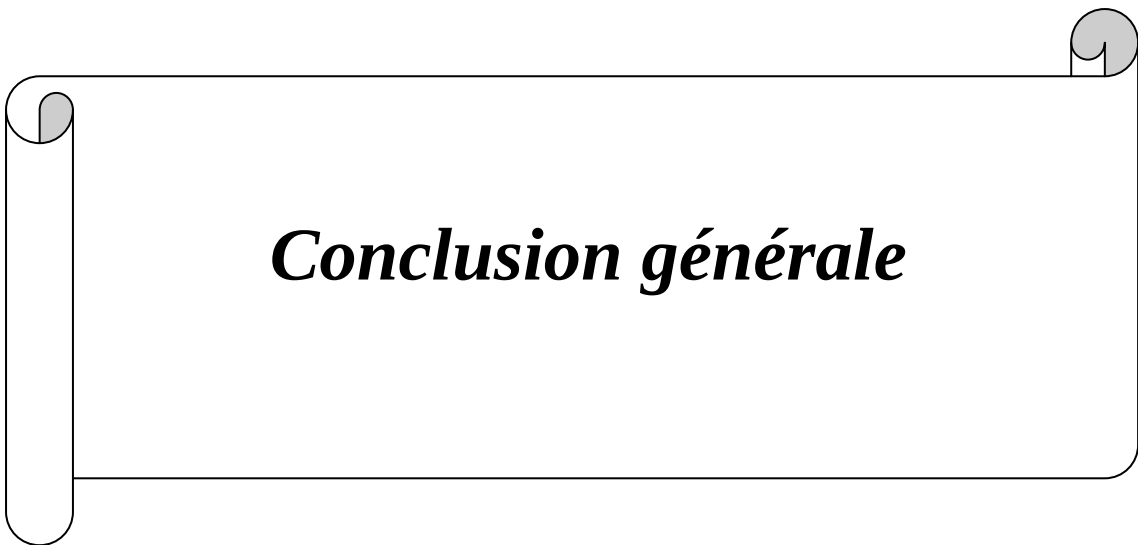
Figure(V.23) : Le zoom (a, b, c) des caractéristiques $I_{pv}(V)$ et $P_{pv}(V)$ obtenus en utilisant la stratégie de commande MPPT prédictive.

Les figures (20, 21,22) montrent que le contrôleur prédictif poursuit le point de maximale du générateur photovoltaïque avec moins d'oscillations au tour du d'elle lorsqu'on applique la variation et il est plus rapide que le MPPT.

V.8. Conclusions :

La stratégie de commande MPPT prédictive nous permet de poursuivre le point de puissance maximale avec moins d'oscillations mieux que la stratégie de commande MPPT (perturbation et observation).

On peut conclure que si on augmente le pas de calcul jusqu'à $(k+n)$ le contrôleur prédictif force le système à poursuivre le point de puissance maximale avec précision.

A decorative graphic of a scroll, rendered in black outlines with light gray shading on the rolled-up portions at the top corners. The scroll is oriented horizontally and contains the text 'Conclusion générale' in a bold, italicized serif font.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce mémoire s'articule sur l'étude des caractéristiques du générateur photovoltaïque et de ces applications.

Pour atteindre le point de fonctionnement maximum qui varie avec le rayonnement et la température, un suiveur MPPT utilisé.

Pour cela, plusieurs techniques d'algorithme d'optimisation du générateur photovoltaïque ont été présentées. Parmi ces dernière nous avons choisit la méthode de la perturbation et de l'observation pour notre étude.

Toutefois cette méthode présentée souffre de certaines insuffisances, liées notamment au retard inévitable au système commandé.

Pour palier à ce problème nous avons utilisé la technique MPPT prédictive qui résout le problème du retard et poursuit le transfert de la puissance avec rapidité et précision.

REFERENCE

Référence :

- [1] : BELHADJ Mohammed « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome » mémoire magistère Centre Universitaire de Bechar 2008.
- [2] : ABBASSENE Lyes « étude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque » mémoire magistère Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou 2011.
- [3] : Revue science et vie Mai 2009 N°1100 Mondadori France.
- [4] : CORINNE Alonso « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie » Habilitation A Dirigé Les Recherches Université de Paul Sabatier Toulouse III 2003.
- [5] : BORNi Abdelhalim « Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire » mémoire magistère Université Mentouri De Constantine 2009.
- [6] : ADAUANE Mabrouk « Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique » mémoire magistère Ecole Nationale Polytechnique 10, Alger 2008.
- [7] : AISSAOUI Nassima, BOUGHRIS Karima et BENNABI Nacera « Diagnostic des structures assurant le transfert d'énergie photovoltaïque avec une meilleure efficacité énergétique » mémoire ingénieur Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou 2011.
- [8] : A. OULD MOUHAMED Yahia « Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque » article Université de Nouakchott 2008.
- [9] : DEFAY François « Commande prédictive directe d'un convertisseur multicellulaire triphasé pour une application de filtrage actif » thèse Doctorat Université de Toulouse 2008
- [10] : V. BOITIER, P. MAUSSION « Recherche du point de puissance maximale sur les générateurs photovoltaïque » article Université de Toulouse 2009.
- [11] : M.PETIBON Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » thèse Doctorat Université de Toulouse 2009.

- [12] : ABOU EL MAATY METWALLY Aly Abd-Aal « Modelling and simulation of photovoltaic fuel cell Hybrid System » Thèse Doctorat Université de Ain Shams Egypt. 2005.
- [13] IDIRI Ghania « commandes prédictives des systèmes non linéaires dynamiques » mémoire magistère, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2011.
- [14] : NICOLAS Petit « Commande prédictive » article Ecole Centrale Paris 2006.
- [15] : TENIOU Samir « analyse de la commande prédictive floue, algorithmes et méthodologies de solutions » mémoire magistère Université Mentouri Constantine 2009.
- [16] : BEN BRAHIMI Amel « Commande prédictive généralisée d'une machine synchrone à aimant permanent » mémoire magistère université de Batna 2009.
- [17] : AKASSEWA Tchaps Singo « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage Hybride pour l'habitat énergétiquement autonome » thèse Doctorat Université Henri Poincaré, Nancy 1 2010.
- [18] : BRAHIMI Mustapha et MOUSSAOUI Nadia « Etude et réalisation d'une commande PID numérique d'un moteur à courant continu » mémoire ingénieur d'état Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou 2008.
- [19] : DAOUDI Ali « Etude et simulation d'un traqueur de puissance maximale d'un système photovoltaïque » mémoire magistère Université Mentouri Constantine 2010.
- [20] : LACHAISE Jérôme « Etude des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à pile à combustible (PAC) destinés à la traction » thèse Doctorat Institut National de Toulouse 2004.