

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE ABDERAHMAN MIRA DE BEJAIA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

**SPECIALITE** : ELECTROTECHNIQUE.

**Niveau**: MASTER 2

**Option**: ENERGIES RENOUVELABLES

**Mémoire de fin de cycle**

**THEME**

# Commande Basée Sur la Passivité et l'assignation d'interconnexion et d'amortissement d'un Générateur Photovoltaïque

---

**Présenté par :**

Mr. ACHOURI BILLAL.  
Mlle. SLAIM DIHIA.

**Promoteur :**

Mr. ACHOUR A/Y.

**Devant le jury :**

Mr. ABDI S/M.  
Mr. MELLAHI A.

Soutenu le 27/06/2013.

## Remerciement

*Avant tout, on remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.*

*On tient à exprimer nos sincères remerciements à notre encadreur Dr. ACHOUR A/Y qui y a proposé et dirigé ce travail, pour son aide précieuse et orientation.*

*On remercie monsieur le président de jury, ainsi que les membres de jury d'avoir accepté de juger notre travail.*

*Enfin, on remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à notre formation et à l'élaboration de ce modeste mémoire.*

# Dédicaces

*Je tiens à dédier ce travail :*

❖ *Aux deux êtres qui me sont les plus chères dans ma vie pour, leur générosité, leur soutien et leur patience face aux moments difficiles traversés au cours de ma vie : ma mère et mon père, MERCI.*

❖ *A mes sœurs : Hakima, Karima et Nawel ;*

❖ *A mes frères, Razik, Riad, à mes cousins et cousines Rafik, dilaW, Mourad, Adel, Lounis, Lamine, Nassim, Amirouche, Fodel, Nadjim, Lyazid, Zizi Wakhli, Lamia, Lynda, Lyna, Lity Asma, et tous le reste .*

❖ *A tout la famille ACHOURI et ACHOUR, cousins, cousines, oncles et tantes.*

❖ *A ma très chère nièce Meriem (Maya) ;*

❖ *A mes amis : Sofiane Aissani, Sofiane khelfaoui, Hana, Hamida, Hania, Takhelfawthe, et a toute les filles que je connais.*

❖ *A mon binôme Dibia.*

❖ *A toute la promotion 2013 électrotechnique.*

❖ *A toute la famille du CSP Aokas et le club CFA.*

❖ *Enfin à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*Billal*

## Dédicaces

*Je dédie ce travail à.*

- ❖ *Mes très chers parents sans qui je ne serai pas ce que je suis aujourd'hui.*
- ❖ *Mon cher frère Makhlouf.*
- ❖ *Toute ma grande famille.*
- ❖ *Tous ceux qui me sont chers.*
- ❖ *Mes amies et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.*
- ❖ *Aussi sans oublier mon binôme Billal.*

*Dihia*

# Sommaire :

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Premier chapitre : Les générateurs photovoltaïques</b>	
I.1 Introduction :.....	3
I.2 Définition de l'énergie solaire photovoltaïque : .....	3
I.3 Définition d'un système solaire photovoltaïque: .....	3
I.4. Les différents types d'un système solaire : .....	4
I.5. Les principaux composants d'un système solaire photovoltaïque :.....	4
I.5.1 Panneau solaire:.....	4
I.5.2 Système de stockage: .....	6
I.5.3 Le système de contrôle (régulateur) :.....	6
I.5.4 Le système de conversion:.....	6
I.6. Energie photovoltaïque : .....	6
I.6.1 Cellule photovoltaïque :.....	6
I.6.2 Type de cellule : .....	7
I.6.3 Effet photovoltaïque :.....	8
I.6.4. Les différentes caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque: .....	8
I.6.4.1 La caractéristique courant-tension :.....	8
I.6.4.2 Paramètres externes d'une cellule solaire photovoltaïque :.....	10
I.7. Architecture classique d'un module photovoltaïque :.....	13
I.7.1 Regroupement des cellules en série : .....	13
I.7.2 Regroupement des cellules en parallèle : .....	14
I.8 Avantages et inconvénients d'une installation PV : .....	14
I.9. Utilisation des systèmes solaires :.....	15
I.10. Modélisation d'un générateur solaire photovoltaïque :.....	16
I.10.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque à une diode : .....	16
I.10.2 Modélisation d'un module photovoltaïque :.....	17
I.11. Simulation d'une cellule et d'un générateur photovoltaïque: .....	18
I.11.1 Simulation d'une cellule :.....	18
I.11.2 Simulation d'un générateur photovoltaïque:.....	19
I.11.3 Influence de l'ensoleillement:.....	20
I.11.4 Influence de la température:.....	21

I.12 Conclusion :	22
-------------------	----

## **Chapitre II: Les convertisseurs statiques appliqués aux photovoltaïques**

II.1 Introduction :	23
II.2 Le convertisseur DC/DC :	23
II.2.1 Hacheur dévolteur (Buck) :	24
II.2.2 Modèle mathématique d'un convertisseur buck :	25
II.2.3 Modèle approximé du convertisseur Buck :	26
II.2.4. Calcul des grandeurs électriques :	27
II.3. Hacheur survolteur (Boost) :	29
II.3.1 Modèle mathématique d'un convertisseur boost :	30
II.3.2 Modèle approximé du convertisseur Boost:	31
II.3.3.Calcul des grandeurs électriques :	31
II.4. Hacheur « survolteur-dévolteur » Buck-Boost :	33
II.4.1 Modèle mathématique d'un convertisseur buck boost :	34
II.4.2 Modèle approximé du convertisseur buck Boost:	35
II.4.3. Calcule des grandeurs électriques :	35
II.5. Convertisseur continue alternatif (Onduleur) :	37
II.5.1 Onduleur de tension à un créneau par alternance :	37
II.5.2 Onduleur MLI à porteuse triangulaire :	37
II.5.3 Formulation mathématique de l'onduleur :	39
II.6 Résultat de simulation :	40
II.7 Interprétation des figures :	41
II.8 Conclusion :	42

## **Chapitre III: Commande basée sur la passivité (CBP-AIA)**

III.1 Introduction :	43
III.2 Concept d'une MPPT « Maximum Power Point Tracking » :	43
III.3 Principe de fonctionnement d'un étage d'adaptation DC-DC :	44
III.4 Gestion de la MPPT :	44
III.5. Classification des Commandes MPPT :	45
III.5.1 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche :	46
III.5.2 Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée :	46
III.6. Différents MPPT solaire photovoltaïque :	47

III.6.1 Méthode de perturbation et observation :	47
III.6.2 Méthode par incrémentation des conductances :	49
III.6.3 Méthode courant constant (CC-MPPT) :	50
III.6.4 Méthode tension constante (CV-MPPT) :	50
III.6.5 MPPT à base de logique floue :	51
III.7 Commande basée sur la passivité :	52
III.7.1 L'origine de la passivité :	52
III.7.2 Définition du système passif :	52
III.7.3 Système hamiltonien commandé par port (HCP) :	53
III.8 Commande basée sur la passivité et l'assignation d'interconnexions et d'amortissement (CBP-AIA) pour un convertisseur continu-continu élévateur:	54
III.8.1 Modèle HCP d'un convertisseur continu-continu élévateur:	54
III.8.2 Calcul de la commande CBP-AIA :	55
III.8.3 Détermination du point d'équilibre désiré $x_*$ :	57
III.9 Test de simulation de la CBP-AIA appliqué au convertisseur élévateur:	58
III.10 Effet de la variation de la charge sur la tension de sortie :	61
III.11 Tests de simulation de la CBP-AIA implémenté sur le GPV	64
III.12 Interprétation des résultats :	69
III.13 Conclusion :	70
<b>Conclusion générale</b>	71
<b>Références bibliographiques</b>	73

## Liste des figures

Figure (I.1) : Panneau solaire.

Figure (I.2) : Boîte de dérivation.

Figure (I.3) : Circuit imprimé d'une boîte de dérivation 8ES24.

Figure (I.4) : Schéma de principe du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

Figure (I.5) : Schéma équivalent d'une cellule solaire.

Figure (I.6) : Caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  d'une cellule solaire.

Figure (I.7) : Schéma d'une cellule élémentaire.

Figure (I.8) : caractéristique résultante d'un regroupement de ( $N_s$ ) cellules en serie.

Figure (I.9) : Caractéristique résultante d'un regroupement de ( $N_p$ ) cellules en parallèle.

Figure (I.10) : Schéma équivalent simplifié d'une cellule solaire photovoltaïque.

Figure (I.11) : Caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque.

Figure (I.12) : Caractéristique  $P(V)$  de la cellule photovoltaïque.

Figure (I.13) : Caractéristique courant-tension de panneau photovoltaïque.

Figure (I.14) : Caractéristique  $P(V)$  de panneau photovoltaïque.

Figure (I.15) : Influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I=f(V)$ .

Figure (I.16) : Influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P=f(V)$ .

Figure (I.17) : Influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$ .

Figure (I.18) : Influence de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$ .

Figure (II.1) : Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck.

Figure (II.2) : Formes d'ondes de convertisseur Buck.

Figure (II.3) : Ondulation du courant en fonction de  $\beta$ .

Figure (II.4) : Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost.

Figure (II.5) : Formes d'ondes de convertisseur Boost.

Figure (II.6) : ondulation de tension.

Figure (II.7) : Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck-Boost.

Figure (II.8) : Formes d'ondes de convertisseur Buck-Boost.

Figure (II.9) : Principe de la modulation de la largeur d'impulsion.

Figure (II.10) : Schéma onduleur de tension.

Figure (II.11) : Variation de la tension de sortie du hacheur en fonction du temps pour différentes valeurs de  $\beta = u$ .

Figure (II.12) : Tension de sortie de l'onduleur.



Figure (III.1) : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT.

Figure (III.2) : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température.

Figure (III.3) : Caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$  d'un panneau solaire.

Figure (III.4) : Organigramme de l'algorithme P&O.

Figure (III.5) : Organigramme de l'algorithme incrémentation de conductance.

Figure (III.6) : Schéma explicatif de l'algorithme en logique floue.

Figure (III.7) : Circuit électrique du hacheur élévateur.

Figure (III.8) : Signal de commande (u) pour une consigne (37.5V).

Figure (III.9) : Rapport cyclique ( $\beta$ ) pour une consigne (37.5 V).

Figure (III.10) : Réponse de la tension de sortie du convertisseur Boost avec la tension de consigne 37.5V.

Figure (III.11) : Signal de commande pour un saut de consigne (37.5v, 75V).

Figure (III.12) : Rapport cyclique pour un saut de consigne (37.5V, 75V).

Figure (III.13) : Réponse de la tension de sortie pour un saut de consigne (37.5V, 75V).

Figure (III.14) : Réponse de la tension de sortie pour une consigne et une variation de charge croissante.

Figure (III.15) : Réponse de la tension de sortie pour une consigne et une variation de charge décroissante.

Figure (III.16) : Réponse de la tension de sortie pour un saut de consigne et à une variation de charge croissante.

Figure (III.17) : Réponse de la tension de sortie pour un saut de consigne et à une variation de charge décroissante.

Figure (III.18) : Réponse de la puissance de sortie à une variation de l'éclairement.

Figure (III.19) : Réponse de la puissance pour une variation de la température.

Figure (III.20) : Réponse de la puissance de sortie pour une variation de la température et de l'éclairement.

Figure (III.21) : Tension de sortie du panneau pour une variation brusque de l'éclairement ( $200W/m^2 - 1000W/m^2$ ).

Figure (III.22) : Réponse de la tension de sortie pour une variation brusque de l'éclairement ( $200W/m^2 - 1000W/m^2$ ).

Figure (III.23) : Réponse de la puissance de sortie pour une variation brusque de l'éclairement ( $200\text{W/m}^2$  -  $1000\text{W/m}^2$ ).

Figure (III.24) : Tension du panneau pour des variations brusques de l'éclairement ( $200\text{W/m}^2$  -  $600\text{W/m}^2$  -  $1000\text{W/m}^2$ ).

Figure (III.25) : Réponse de la tension de sortie pour des variations brusques de l'éclairement ( $200\text{W/m}^2$  -  $600\text{W/m}^2$  -  $1000\text{W/m}^2$ ).

Figure (III.26) : Réponse de la puissance de sortie pour des variations brusques de l'éclairement ( $200\text{W/m}^2$  -  $600\text{W/m}^2$  -  $1000\text{W/m}^2$ ).

## Liste des symboles

FF : facteur de forme.

$f_p$  : Fréquence de la porteuse.

$F_r$  : fréquence de référence.

$I_{ph}$  : Photo-courant de la cellule.

$I_{cc}$  : courant de court circuit.

$I_d$  : le courant traversant la diode.

$I_s$  : le courant de saturation inverse de la diode.

$I_r$  : le courant dérivé par la résistance shunt.

$I_M$  : courant maximum.

$I_{mo}$  : Courant d'un module photovoltaïque.

$I_L$  : courant dans l'inductance.

$I_C$  : courant dans la capacité.

$I_s$  : courant à la sortie.

$I_{d,moy}$  : Courant moyenne traversant la diode.

$I(V)$  : caractéristique courant-tension.

$K$  : constant Boltzman.

$m$  : Indice de modulation.

$N_s$  : nombre de cellules en serie.

$N_p$  : nombre de cellule en parellele.

$n$  : facteur d'idéalité de la photopile.

$P(V)$  : caractéristique puissance-tension.

$P_M$  : puissance maximale.

$q$  : charge de l'électron.

$R_s$  : résistance série.

$R_{sh}$  : résistance shunt.

$r$  : Coefficient de réglage.

$T$  : température de la jonction.

$V_{co}$  : Tension de circuit-ouvert.

$V_M$  : tension maximale.

$V_{op}$  : tension optimale du panneau.

$V_{mo}$  : Tension d'un module photovoltaïque.

$V_L$  : tension de l'inductance.  
 $\Psi$  : L'éclaircissement.  
 $\eta$  : Rendement d'une cellule.  
 $\gamma$  : Coefficient de température.  
 $\varphi$  : Coefficient de courant.  
 $\beta$  : Rapport cyclique.  
 $V_{pv}$  : tension du panneau.  
 $P_{pv}$  : puissance du panneau.  
 $u_s$  : vecteur d'entrée.  
 $y_s$  : vecteurs de sortie.  
 $x$  : vecteur d'état.  
 $x_1$  : le flux dans l'inductance.  
 $x_2$  : la charge dans la capacité.  
 $u$  : le signal de contrôle continue.  
 $J_a$  : matrice d'interconnection ajoutée.  
 $R_a$  : matrice d'amortissement ajoutée.  
 $H(x)$  : énergie naturelle.  
 $H_a(x)$  : énergie ajoutées par le contrôleur.  
 $J_d$  : matrice d'interconnection désiré.  
 $R_d$  : matrice d'amortissement désiré.  
 $C$  : capacité.  
 $R$  : résistance.  
 $L$  : inductance.  
 $E$  : tension d'entrée.  
 $V^*$  : tension désiré.  
BF : boucle fermée.  
BO : boucle ouvert.  
PV : panneau photovoltaïque.  
MPPT: Maximum Power Point Tracking.  
P&O : perturbation et observation.  
HCP : hamiltonien commandé par port.  
CBP : commande basé sur la pasivité.

CBP-AIA : commande basé sur la passivité et l'assignation d'interconnection et d'amortissement.

## Introduction générale :

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ainsi que les pays en voie de développement ne cessent de se multiplier. Cette production a triplé depuis les années 60 à nos jours. La plus grande majorité de la production mondiale d'énergie provient de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre. En plus la consommation excessive des stocks des ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Le rayonnement solaire est répartie sur toute la surface de la terre, sa densité n'est pas grande et ne cause aucun conflit entre les pays contrairement au pétrole. Les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Un tel système se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

Beaucoup de recherches scientifiques ont été menées dans le secteur des sources d'énergie illimitées, telles que la production de l'énergie électrique par le processus photovoltaïque. Dans ce dernier cas, la conception, l'optimisation et la réalisation des systèmes photovoltaïques sont des problèmes d'actualité puisqu'ils conduisent sûrement à une meilleure exploitation de l'énergie solaire.

Lors de la connexion directe des modules photovoltaïques à la charge (batteries,...), des pertes importantes d'énergie fournies peuvent avoir lieu, suite au fait que le générateur photovoltaïque ne fonctionne plus dans les conditions optimales. Actuellement, le problème majeur de la production d'énergie électrique par cette technique est, d'une part, la conception et la réalisation des systèmes photovoltaïques, permettant de faire fonctionner les modules photovoltaïques dans des conditions optimales, et d'autre part, la conception et la réalisation des circuits qui permettent de détecter un éventuel dysfonctionnement, suite aux brusques variations de l'éclairement ou de la charge, tout en assurant un fonctionnement optimal du système photovoltaïque.

Pour cela, il faut extraire le maximum de puissance du générateur PV, puissance disponible au niveau du générateur photovoltaïque 'GPV' est en général non puisée par la charge. Une bonne rentabilité du 'GPV' peut être réalisée si celui-ci travaille au maximum de

puissance tout le temps. Or, le point de puissance maximum varie selon plusieurs paramètres comme l'éclairement  $\Psi$ , la température  $T$  et la nature de la charge. Ce type de variation est aléatoire. Une commande MPPT (maximum power point tracking), associée à une technique adéquate, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, quelque soient les conditions météorologiques (température et éclairement), et quelle que soit la charge, la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum ( $I_{opt}$ ,  $V_{opt}$ ). Le générateur peut à tout instant avoir sa courbe de puissance modifiée, donc sa puissance optimale. La MPPT doit répondre à l'exigence de rechercher le MPP (maximum power point) et de maintenir un fonctionnement aux alentours de ce point.

Dans ce mémoire, on analyse la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande basée sur la passivité et l'assignation d'interconnexion et d'amortissement assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque. L'objectif de ce travail est de contribuer à une meilleure compréhension des performances de convertisseur DC-DC (Hacheur Boost) adapté par la commande (CBP-AIA) lors qu'il est couplé à un générateur photovoltaïque et améliorer sa tension de sortie afin d'obtenir une bonne source qu'on peu utiliser comme un générateur d'électricité.

Pour décrire cela, notre mémoire est présenté en trois chapitres :

- ✓ Dans le premier chapitre, on donne des généralités sur les systèmes photovoltaïques, on présente le principe de l'effet photovoltaïque, les avantages et les inconvénients, la cellule PV et ses paramètres. En suite on illustre quelques simulations pour la cellule photovoltaïque et l'influence des conditions climatiques sur les caractéristiques  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$ .
- ✓ L'étude de quelques types de convertisseurs statiques (DC-DC) qui sont utilisés dans les systèmes photovoltaïques (onduleur hacheur) est présentée au deuxième chapitre.
- ✓ Le troisième chapitre évoque les différentes techniques de commandes des GPV d'une manière générale et on a détaillé la commande basée sur la passivité et l'assignation d'interconnexion et d'amortissement (CBP-AIA) et on termine notre travail par une conclusion générale.

## **I.1 Introduction :**

L'énergie électrique produite par le processus photovoltaïque est le résultat de la conversion de cette énergie existante dans le rayonnement solaire. Cette conversion est assurée par des cellules photovoltaïques généralement à base de silicium cristallin car il reste l'élément le plus abondant sur terre sous forme de silice non toxique. Ces cellules sont considérées comme des convertisseurs instantanés de l'énergie solaire en énergie électrique, mais un composant passif si la cellule est mise en obscurité. La cellule solaire ne peut être assimilée à aucun autre générateur classique d'énergie électrique de type continu car elle n'est ni une source de tension constante ni une source de courant constant. La cellule possède des caractéristiques électriques non linéaires qui dépendent de l'éclairement et de la température.

L'énergie photovoltaïque malgré sa noblesse, elle reste toujours produite à faible quantité vu le rendement de la cellule photovoltaïque qui ne dépasse pas « 18 % » dans le cas pratique, ce qui mène à l'utilisation d'une commande « MPPT » « maximum power point tracking » pour la poursuite du maximum de puissance que peut produire le générateur photovoltaïque. Ce maximum est assuré par un convertisseur statique, qui est commandé par une MPPT, reliant le générateur photovoltaïque et la charge qui est contrôlé pour différents modes de fonctionnement.

Dans ce chapitre on développe et on explique le principe de base des systèmes photovoltaïques et les principaux éléments qui le constituent pour la production de l'électricité par le processus photovoltaïques, et la variation de l'énergie produite sous l'influence de la température et de l'ensoleillement.

## **I.2 Définition de l'énergie solaire photovoltaïque :**

L'énergie solaire est une forme d'énergie renouvelable, provient de la transformation directe d'une partie de rayonnement solaire en électricité, et cette conversion s'effectue par le biais d'une cellule photovoltaïque [1].

## **I.3 Définition d'un système solaire photovoltaïque:**

Le système solaire photovoltaïque est un système composé de plusieurs éléments aptes à transformer une partie du rayonnement solaire reçue, directement ou indirectement en énergie électrique [2].



## **I.4. Les différents types d'un système solaire :**

Il existe deux différents types de systèmes solaires [2].

### **➤ Le système solaire à conversion directe :**

Le système solaire à conversion directe permet de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique avec l'utilisation d'une seule technologie nommée photopile (effet physique de certains matériaux « effet photovoltaïque »).

L'effet photovoltaïque fut observé la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell Téléphone, aux États-Unis, parviennent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire ou de base d'un système photovoltaïque. Le mot "**photo**" vient du grec qui veut dire lumière et "**voltaïque**" vient du nom d'un physicien italien Alessandro Volta qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité et on a aussi nommé l'unité de tension électrique le "volt" [2]. La production d'électricité se fait sans bruit, sans partie mécanique et sans que les produits toxiques soient libérés.

### **➤ Le système solaire à conversion indirecte:**

Le système solaire à conversion indirecte permet de convertir l'énergie lumineuse des rayonnements solaires en énergie électrique avec l'intermédiaire de deux technologies au minimum. Comme exemple le passage de l'énergie lumineuse à l'énergie thermique puis à l'énergie électrique.

## **I.5. Les principaux composants d'un système solaire photovoltaïque :**

Un système solaire photovoltaïque est généralement constitué de trois ou quatre éléments principaux [3].

### **I.5.1 Panneau solaire:**

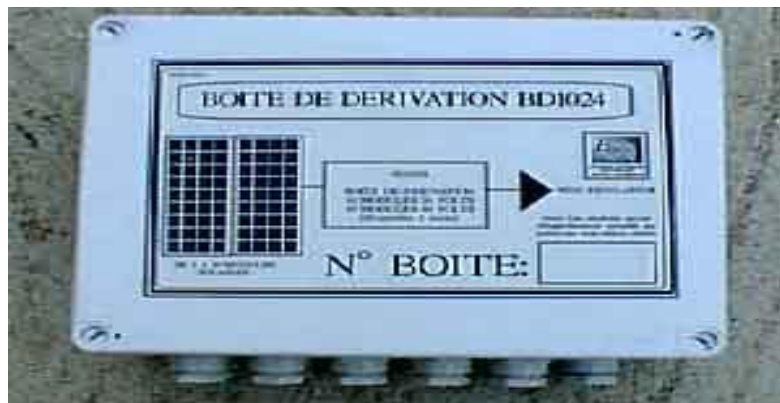
Le panneau solaire est l'association de plusieurs modules photovoltaïques. Le module photovoltaïque est par définition un ensemble de photopiles, qui sont les éléments principaux nécessaires à la production d'électricité d'origine photovoltaïque, assemblés pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. Ils peuvent être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité du courant d'utilisation.

Ces panneaux sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.

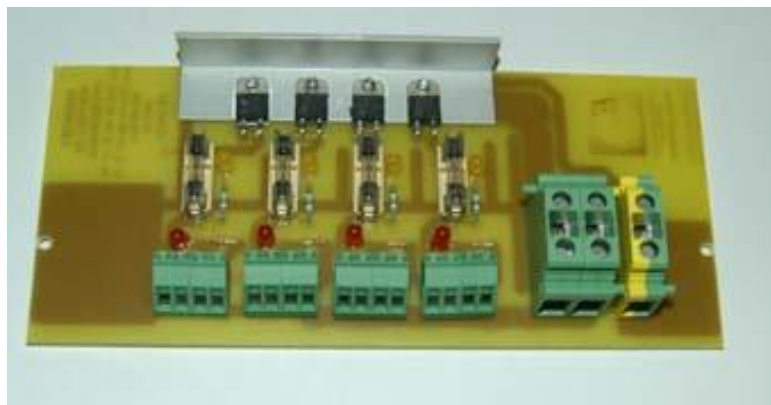


**Figure I.1 :** Panneau solaire [4].

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, de ce fait, on a besoin des boîtes de dérivation. Ces dernières sont fixées sur les structures de montage, c'est elles qui reçoivent tous les câbles des sorties des modules solaires, elles effectuent également les connexions pour obtenir la tension de sortie voulue, elles peuvent comporter diverses protections (diodes antiparallèles, diodes séries, fusibles de protection, parafoudres, témoin de fonctionnement) [5].



**Figure I.2 :** Boîte de dérivation [5].



**Figure I.3 :** Circuit imprimé d'une boîte de dérivation 8ES24 [5].

### **I.5.2 Système de stockage:**

Ce système a pour rôle de stocker l'énergie générée par le générateur photovoltaïque. Pour pouvoir l'utiliser lorsque le générateur photovoltaïque ne satisfait pas la demande (la nuit ou par mauvais temps par exemple), et comme il peut fournir à l'installation des puissances plus importantes que celle fournies par le générateur photovoltaïque.

Le système de stockage d'énergie n'est pas toujours présent parmi les composants d'un système photovoltaïque, car il peut être indisponible et cela selon les besoins.

### **I.5.3 Le système de contrôle (régulateur) :**

Le système de contrôle assure la sécurité et le fonctionnement optimal de la batterie et tout le système photovoltaïque.

### **I.5.4 Le système de conversion:**

Le système de conversion qu'on utilise dans le système photovoltaïque est composé d'un hacheur (dévolteur, survolteur ou les deux au même temps). Ils ont un rôle de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe.

Ces convertisseurs sont disposés généralement entre le panneau photovoltaïque et la charge qui seront détaillés dans la prochaine partie.

## **I.6. Energie photovoltaïque :**

### **I.6.1 Cellule photovoltaïque :**

Le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques est le silicium.

Le silicium est produit sous forme de barres nommées « lingots » de section ronde ou carrée. Ces lingots sont ensuite sciés en fines plaques qui sont appelées « wafers ». Après un traitement pour enrichir en éléments dopants et ainsi obtenir du silicium semi conducteur de type « P » ou « N », les wafers sont « métallisés », des rubans de métal sont incrustés en surface et reliés à des contacts électriques. Une fois métallisés les wafers deviennent des cellules photovoltaïques.

La cellule PV est donc composée d'une partie dopée de type « N », qui permet au matériau de libérer facilement des électrons (charge -), ce qui se fait généralement avec du phosphore, et une partie dopée de type « P » à l'aide de Bore. Dans ce cas, le matériau crée facilement des lacunes électroniques appelées trous (charge +).

### **I.6.2 Type de cellule :**

#### ➤ **Silicium Monocristallin :**

Les cellules en silicium monocristallin représentent la première génération des générateurs photovoltaïques. Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé d'un seul cristal.

Pour le fabriquer, on fond du silicium en forme de barreau, lors d'un refroidissement lent et maîtrisé, on obtient un monocristallin. On découpe en suite le cristal en wafer (tranche de silicium), après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction « P-N », dépôt de couche anti-reflet, pose des collecteur), le wafer devient cellule.

Les monocristallins sont en général, celles qui ont les meilleures performances. Ainsi les cellules solaires commercialisées obtenues avec le procédé décrit peuvent atteindre un rendement de 15% à 18% [2].

#### ➤ **Silicium polycristallin :**

Le silicium polycristallin, est obtenu par reprise des chutes de silicium monocristallin issues des opérations d'équarrissage. Elles ont un rendement de 13% à 15%, mais leur coût de production est moins cher que les cellules monocristallines.

Les chutes sont placées dans un creusé porté à (+1430 °C). Après la phase de fusion, le fond du creusé est refroidi [6]. On oriente de bas en haut la solidification, pour lui donner une structure colonnaire multi-cristallin à gros grains. Le lingot obtenu est ensuite découpé, en briques qui sont ensuite assemblées pour être transformées.

L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication.

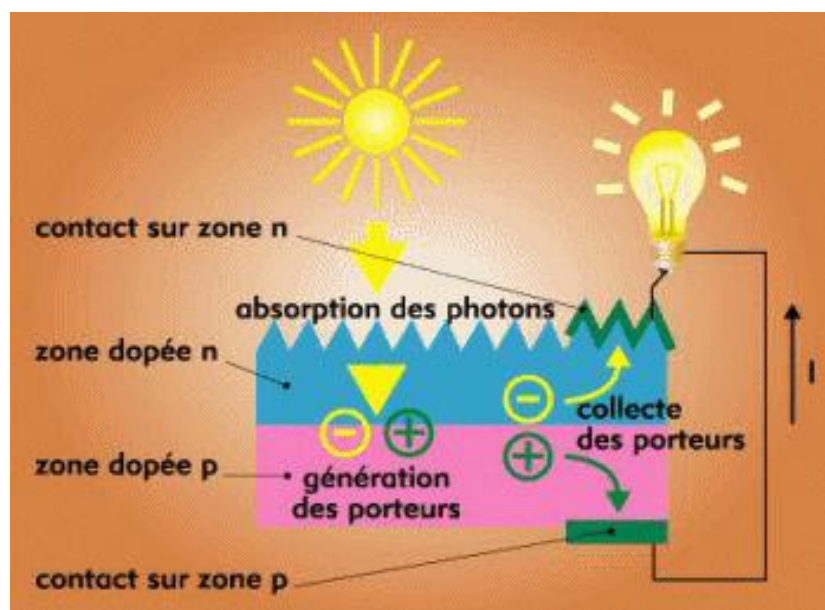
#### ➤ **Silicium amorphe :**

Le silicium amorphe a une structure atomique désordonnée c'est à dire non cristallin avec une efficacité entre 5% et 10%. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.

Ce type de silicium a l'avantage d'être moins coûteux que le polycristallin et le monocristallin.

### I.6.3 Effet photovoltaïque :

C'est la conversion de l'énergie que transportent les photons de la lumière en énergie électrique. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. La tension ainsi générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [7].



**Figure I.4 :** Schéma de principe du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [8].

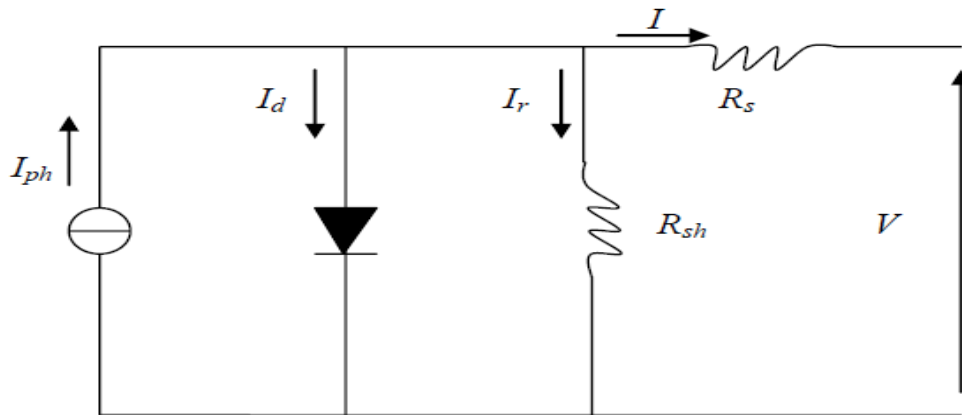
Quand des photons tombent sur la surface d'un semi conducteur il peut être réfléchi comme il peut être absorbé, soit en totalité ou en quasi-totalité.

### I.6.4. Les différentes caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque:

#### I.6.4.1 La caractéristique courant-tension :

Dans la littérature, une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série  $R_s$  et  $R_{sh}$  comme le montre le schéma équivalent de la figure (I.5). La résistance série est dû à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts faces avant et arrière. La résistance shunt est une

conséquence de l'état de surface le long de la périphérie de la cellule, elle est réduite à la suite de pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si elle est profonde), lors du dépôt de la grille métallique ou des prises de contacts sur la face diffusée de la cellule [2].



**Figure I.5 :** Schéma équivalent d'une cellule solaire équivalent [2].

Le courant de la photopile a pour expression [2], [9] :

$$I = I_{ph} - I_d - I_r \quad (I.1)$$

Avec

$$I_{ph} = I_{cc} \left( \frac{\Psi}{1000} \right) \quad (I.2)$$

$I_{ph}$  : Photo-courant de la cellule, proportionnel à l'éclairement  $\Psi$ .

$I_{cc}$  : courant de court circuit.

$\Psi$  : L'éclairement ( $\text{W/m}^2$ ).

$$I_d = I_s \left( e^{\frac{q(V+R_s I)}{nKT}} - 1 \right) \quad (I.3)$$

$I_d$  : le courant traversant la diode.

On peut faire apparaître le Potentiel thermodynamique :

$$V_T = \frac{nKT}{q} \quad (I.4)$$

$I_s$  : le courant de saturation inverse de la diode

$q$  : charge de l'électron ( $1.6 \cdot 10^{-19}$  C)

$K$  : constant Boltzman ( $1.3854 \cdot 10^{-23}$  JK<sup>-1</sup>)

$n$  : facteur d'idéalité de la photopile, compris entre 1 et 2 dans la pratique [9].

$T$  : température de la jonction en °K.

$$I_r = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (I.5)$$

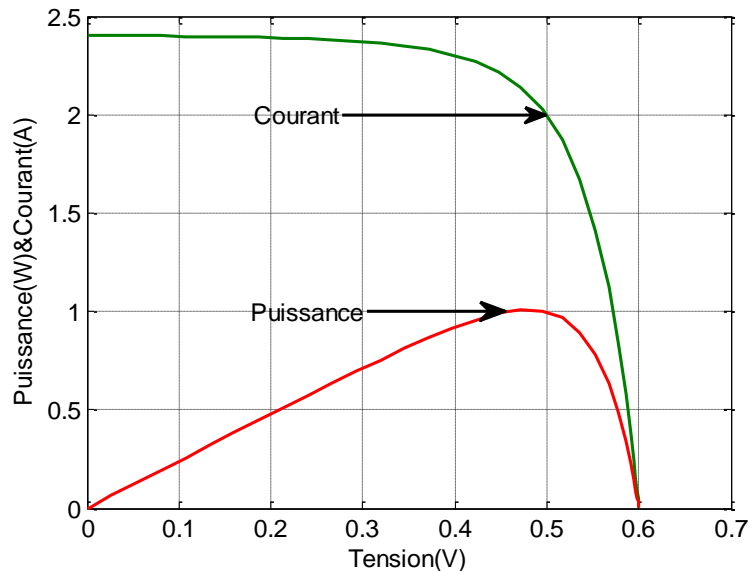
$I_r$  : le courant dérivé par la résistance shunt.

$I_{cc}$  : courant de court-circuit pour une irradiation solaire standard de 1000 W/m<sup>2</sup>.

A partir de ces différentes équations, on peut déduire l'expression implicite du courant délivré par une cellule photovoltaïque ainsi que sa caractéristique courant-tension.

$$I = I_{cc} \left( \frac{\Psi}{1000} \right) - I_s \left( e^{\left( \frac{V + R_s I}{V_T} \right)} - 1 \right) - \left( \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (I.6)$$

On peut ainsi retrouver l'allure des caractéristiques courant-tension  $I(V)$  et  $P(V)$  d'une cellule Solaire.



**Figure I.6** : Caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  d'une cellule solaire.

#### I.6.4.2 Paramètres externes d'une cellule solaire photovoltaïque :

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique [2].

##### ➤ Courant de court circuit :

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal ( $R_s$  nulle et  $R_{sh}$  infinie), ce courant se confond avec le photo courant  $I_{ph}$  dans le cas contraire, en annulant la tension  $V$  dans l'équation (I.2), on obtient:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{(R_s I_{cc})}{V_T}} - 1 \right) - \left( \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}} \right) \quad (I.7)$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme  $I_s \left( e^{\frac{(R_s I_{cc})}{V_T}} - 1 \right)$  devant  $I_{ph}$ , on obtiendra cette expression approcher du courant de court-circuit :

$$I_{cc} = \left( \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \right) \quad (I.8)$$

➤ **Tension de circuit ouvert :**

C'est la tension  $V_{co}$  pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{V_{co}}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad (I.9)$$

Dans le cas idéal, ( $R_{sh} \rightarrow \infty$ ) sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = V_T \cdot \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (I.10)$$

➤ **Puissance optimale et facteur de forme :**

La puissance utile maximale  $P_M = V_M \cdot I_M$  s'obtient en optimisant le produit courant tension, soit :

$$\frac{I_M}{V_M} = - \left( \frac{dI}{dV} \right)_M \quad (I.11)$$

Le facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage, il est défini par:

$$FF = \left( \frac{V_M \cdot I_M}{V_{co} \cdot I_{cc}} \right) \quad (I.12)$$

Ce facteur montre la déviation de la courbe courant-tension par rapport à un rectangle qui est donné par la figure (I.7). Le courant maximum ( $I_M$ ) et la tension maximale ( $V_M$ ) s'obtiennent à partir des équations (I.6) et (I.11). Pour cela, on distingue deux cas :



- Si  $R_{sh}$  est infinie la dérivation mène à la résolution de l'équation non linéaire en  $I_M$ , et permet donc le calcul de  $V_M$ .

- Si  $R_{sh}$  est considérée finie, la dérivation mène à la résolution d'une équation non linéaire en  $V_M$ .

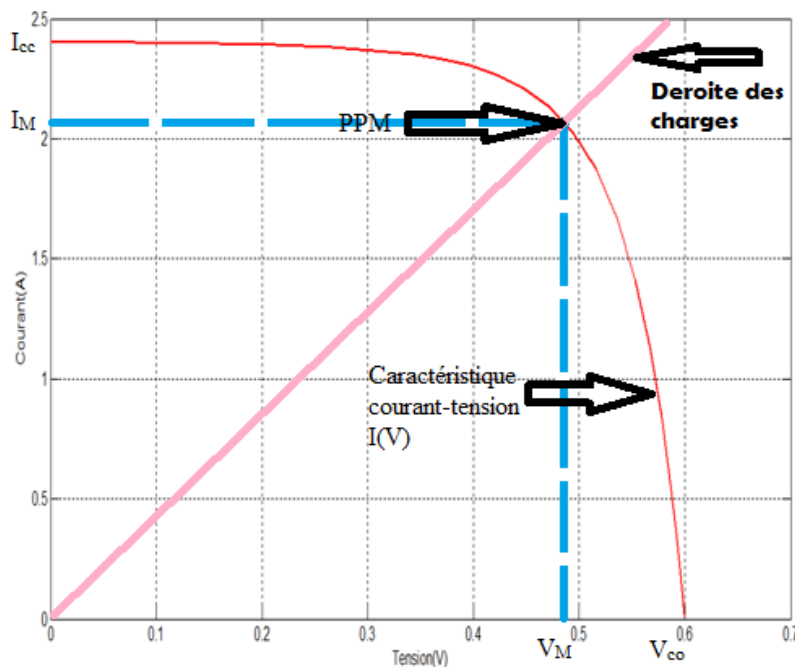
La puissance des modules photovoltaïques s'exprime en Watts-crête. Cette dernière représente la puissance que peut fournir un module lorsqu'il est fermé sur sa charge nominale (optimale), sous un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$  et à une température de  $25^\circ\text{C}$ .

### ➤ Le rendement :

Le rendement ( $\eta$ ), des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_o$ .

$$\eta = \frac{P_M}{P_o} \quad (I.13)$$

Avec  $P_o$  est la puissance incidente. Elle est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. La droite passant par l'origine et le point de puissance maximale a une pente qui correspond à la charge optimale de la photopile comme le montre la figure (I.7).

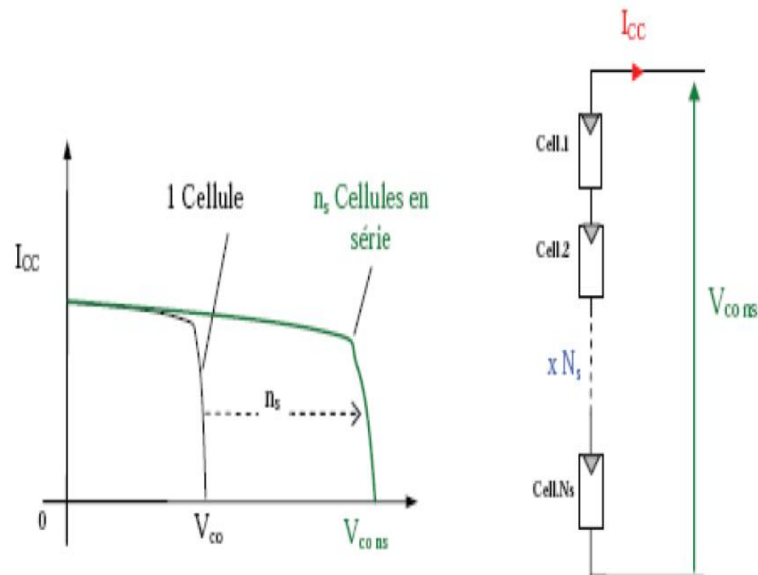


**Figure I.7 :** Schéma d'une cellule élémentaire [2].

## I.7. Architecture classique d'un module photovoltaïque :

### I.7.1 Regroupement des cellules en série :

Dans une association série, les cellules sont traversées par le même courant. La caractéristique résultant du groupement série et obtenue par l'addition de tension à un courant donnée. Cette caractéristique est illustrée par la figure suivante.



**Figure I.8 :** caractéristique résultante d'un regroupement de ( $N_s$ ) cellules en série [9].

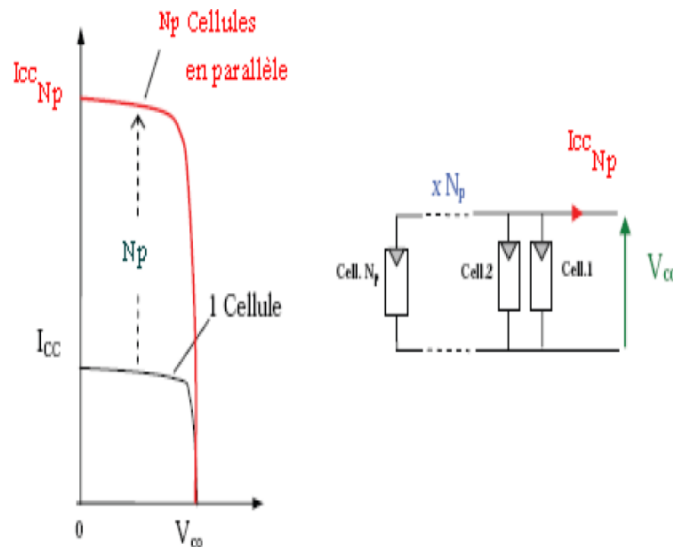
L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble. Les panneaux commerciaux sont constitués des cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellule en série afin d'obtenir une tension optimale du panneau  $V_{op}$  proche de celle d'une tension de batterie de 12V [10].

Si les cellules des modules en série ne sont pas identiques ou si certaines cellules sont partiellement ombragées (couvertes), la tension des modules est légèrement diminuée.

Il convient de placer une diode parallèle (by-pass) au niveau de chaque module pour éviter la destruction de la cellule, et elle limite la tension inverse par sa tension directe puisqu'elle devienne passante.

### I.7.2 Regroupement des cellules en parallèle :

Dans une association parallèle, les cellules étant soumises à la même tension, La caractéristique résultant du groupement parallèle et obtenue par l'addition de courant à une tension donnée. Cette caractéristique est illustrée par la figure suivante.



**Figure I.9 :** Caractéristique résultante d'un regroupement de ( $N_p$ ) cellules en parallèle [9].

Le courant d'utilisation total des modules est plus faible, si les modules en parallèle ne sont pas identique ou si quelques cellule d'un module sont ombragées. On dispose ainsi d'une diode anti-retour pour éviter la dissipation du courant des branches performantes sur la branche moins performante, et elle empêche aussi le gaspillage d'une partie de puissance produite par les modules fonctionnant normalement.

### I.8 Avantages et inconvénients d'une installation PV :

#### ➤ Les avantages:

- L'énergie lumineuse est renouvelable et est gratuite.
- Offre une solution pratique pour obtenir de l'électricité à moindre coût de la matière transformée.
- Une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

➤ **Inconvénients :**

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement électrique diminue avec le temps (20% de moins au bout de 20 ans).
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le coût du système photovoltaïque augmente.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %, avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour les faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.
- Tributaire des conditions météorologiques.

### **I.9. Utilisation des systèmes solaires :**

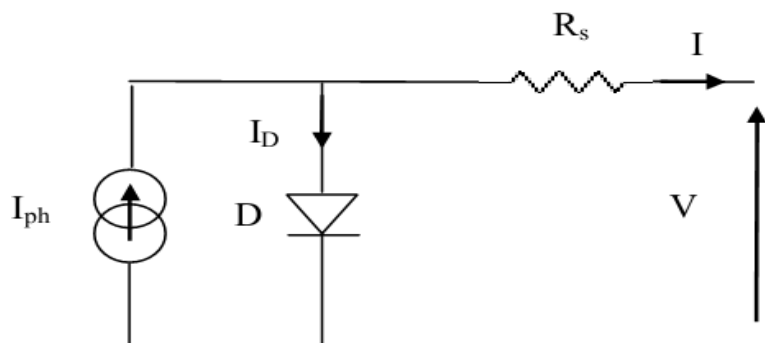
- L'éclairage (autoroutes, arrêts d'autobus,...) ;
- Les communications (Stations de relais de téléphone, bornes d'appel d'urgences sur autoroutes, téléphones mobiles,...) ;
- La fourniture d'électricité pour des sites éloignés du réseau normal (Forêts, montagnes,...) ;
- Capteurs isolés (Infos météorologique, enregistrements sismiques, recherche scientifique,...);

- Pour de petites stations de pompage ou d'irrigation ;
- Chargement des batteries de voitures (les batteries normales, ou de voitures électriques..) ;
- Protection contre la corrosion (car les pipe-lines et autres tuyaux enfouis sous terre ou dans L'eau perdent des ions et rouillent, on peut les protéger en appliquant une différence de Potentiel, donc un courant électrique) ;
- Compensation du facteur de puissance dans les réseaux électriques de distribution ;
- Evidemment l'utilisation de cellules photovoltaïques est plus efficace dans les régions très ensoleillées, telles que les Etats-Unis ou les pays du sud en général, mais cela ne veut pas Dire qu'on ne peut pas les utiliser dans le reste du monde.

## I.10. Modélisation d'un générateur solaire photovoltaïque :

### I.10.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque à une diode :

La résistance shunt peut être négligée puisque, habituellement, elle est très grande comparée à la résistance série en particulier pour les cellules monocristallines de silicium [2]. On aura alors le modèle de la figure (I.10)



**Figure I.10 :** Schéma équivalent simplifié d'une cellule solaire photovoltaïque [11].

L'équation (I.11) devient

$$I = I_{cc} \left( \frac{\Psi}{1000} \right) - I_s \left( e^{\left( \frac{V+R_s I}{V_t} \right)} - 1 \right) \quad (I.14)$$

Selon [2], on peu écrire :

$$I = I_{cc} \left\{ 1 - C_1 \left[ e^{\left( \frac{V}{C_2 \cdot V_{co}} \right)} - 1 \right] \right\} \quad (I.15)$$

Avec

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_M}{I_{cc}}\right) \cdot e^{\left(\frac{-V_M}{C_2 \cdot V_{co}}\right)} \quad (I.16)$$

$$C_2 = \frac{\left(\frac{V_M}{V_{co}} - 1\right)}{\ln\left(1 - \frac{I_M}{I_{cc}}\right)} \quad (I.17)$$

Avec, I et V respectivement courant et tension de la cellule photovoltaïque;  $I_M$  et  $V_M$  respectivement courant maximal et tension maximale que peut générer la cellule photovoltaïque sous  $25^\circ\text{C}$  et  $1000\text{W/m}^2$  ;  $I_{cc}$  : courant de court circuit de la cellule photovoltaïque à  $25^\circ\text{C}$  et  $1000\text{W/m}^2$ .

Pour pouvoir tracer la courbe caractéristique, il faut connaître le courant de court circuit  $I_{cc}$  et la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , et le point de puissance maximal.

A fin de tenir compte des variations de la température, de l'ensoleillement et de la résistance parasite on construit un circuit qui régit des équations des variations du courant et de la tension en fonction des variations de la température et de l'ensoleillement qui sont les suivantes [12]:

$$\Delta I = \varphi \left(\frac{\Psi}{E_{ref}}\right) \cdot \Delta T + \left(\frac{\Psi}{E_{ref}} - 1\right) \cdot I_{cc} \quad (I.18)$$

$$\Delta V = -\gamma \cdot \Delta T - R_s \cdot \Delta I \quad (I.19)$$

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (I.20)$$

$$V_{new} = V_{ref} + \Delta V \quad (I.21)$$

$$I_{new} = I_{ref} + \Delta I \quad (I.22)$$

Avec :  $\gamma$  et  $\varphi$  sont respectivement les coefficients de température pour la tension et le courant.

### I.10.2 Modélisation d'un module photovoltaïque :

Le module photovoltaïque est l'association en série ou/et en parallèle des cellules.

$$V_{mo} = N_s \cdot V_{ph} \quad (I.23)$$

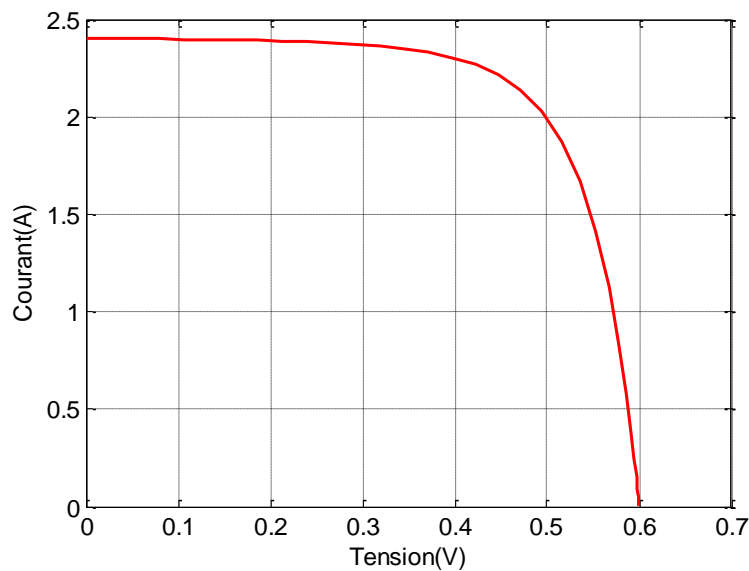
$$I_{mo} = N_p \cdot I_{ph} \quad (I.24)$$

## I.11 Simulation d'une cellule et d'un générateur photovoltaïque:

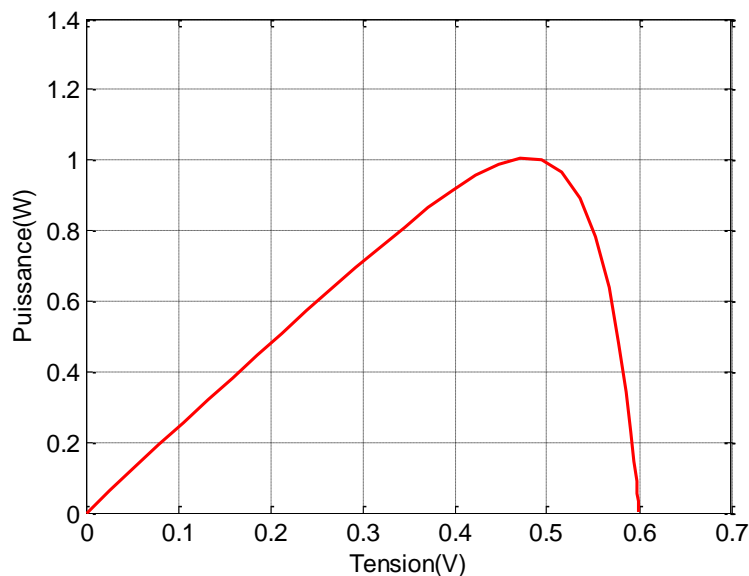
### I.11.1 Simulation d'une cellule:

La cellule est caractérisée par ( $I_{cc}=2.4$  A,  $I_M=2.1$  A,  $V_{co}=0.6$  V,  $V_M=0.48$  V).

Les deux figures (I.11), (I.12) montrent le résultat de la simulation d'une cellule photovoltaïque à une température de 25°C et un ensoleillement de 1000 W/m<sup>2</sup>.



**Figure I.11 :** Caractéristique courant-tension I(V) de la cellule photovoltaïque.

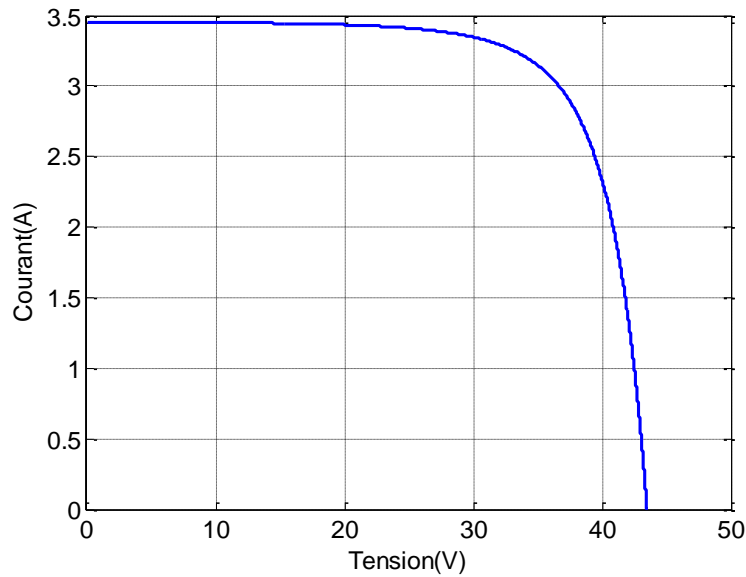


**Figure I.12 :** Caractéristique puissance-tension P(V) de la cellule photovoltaïque.

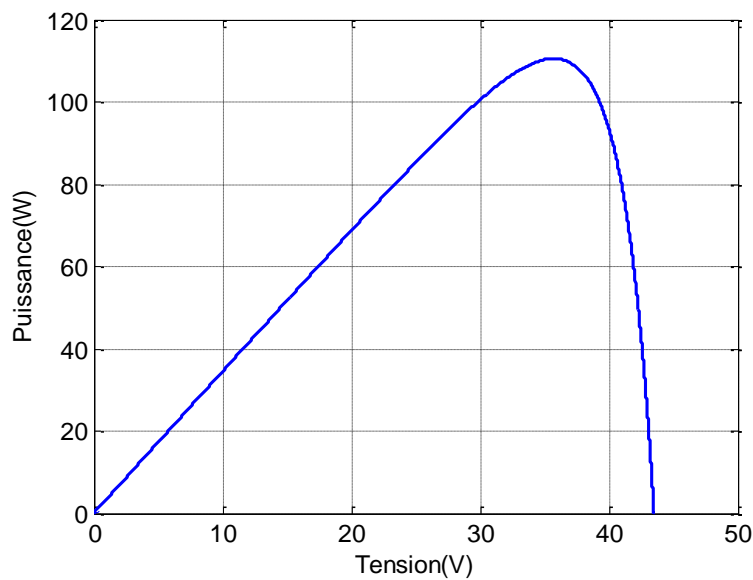
### I.11.2 Simulation d'un générateur photovoltaïque:

Le générateur photovoltaïque est composé de 72 cellules en série.

Les deux figures (I.13) (I.14) illustrent le résultat de la simulation d'un générateur photovoltaïque à une température de 25°C et un ensoleillement de 1000 W/m<sup>2</sup>.



**Figure I.13 :** Caractéristique courant-tension I(V) de panneau photovoltaïque.



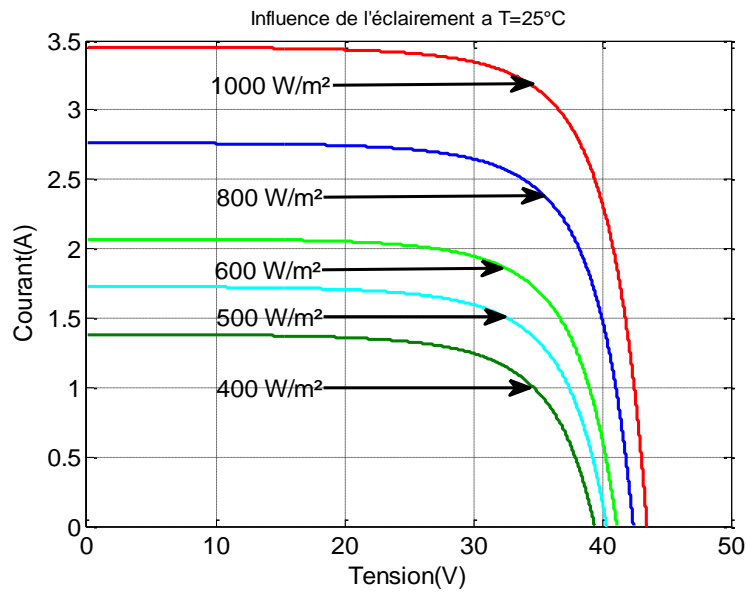
**Figure I.14** Caractéristique puissance-tension P(V) de panneau photovoltaïque.



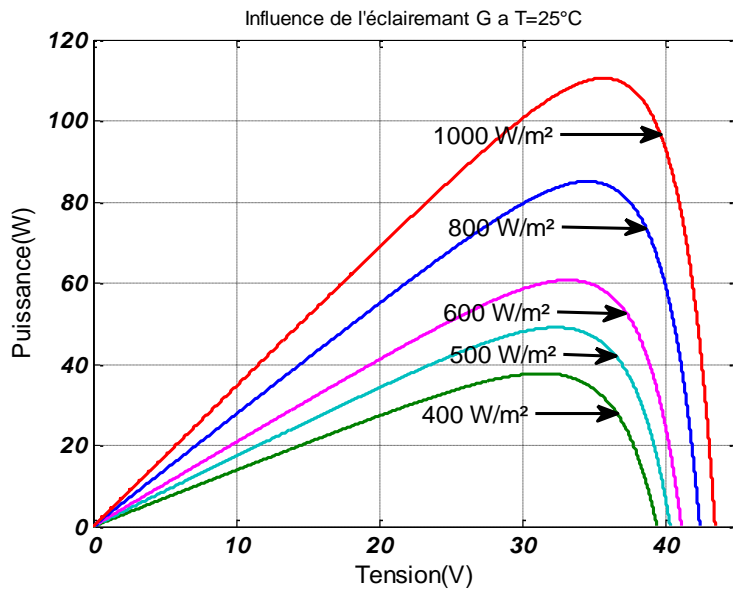
### I.11.3 Influence de l'ensoleillement:

On remarque dans les deux figures (I.15) et (I.16) que le courant de court circuit est proportionnel à la variation de l'éclairement, par contre la tension de circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment constante même à faible éclairement.

Cette variation importante du courant en fonction de la variation de l'éclairement engendre la variation de la puissance délivrée par le panneau.



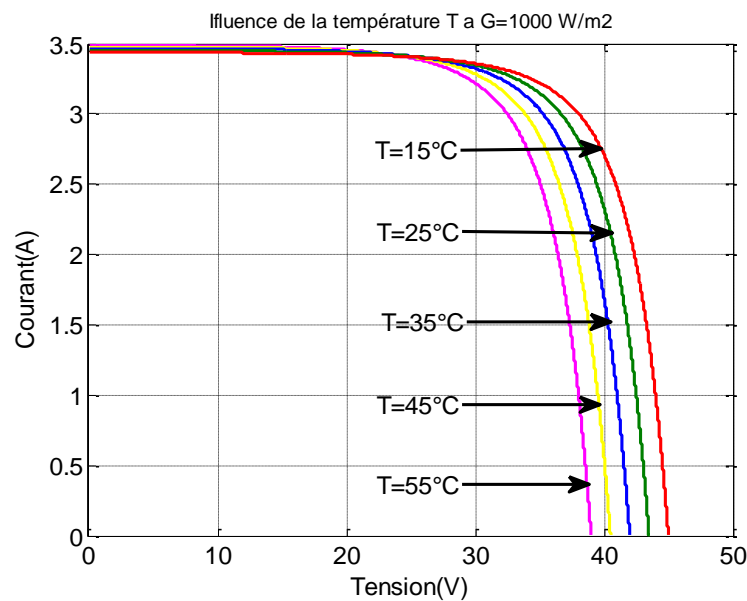
**Figure I.15 :** Influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I=f(V)$ .



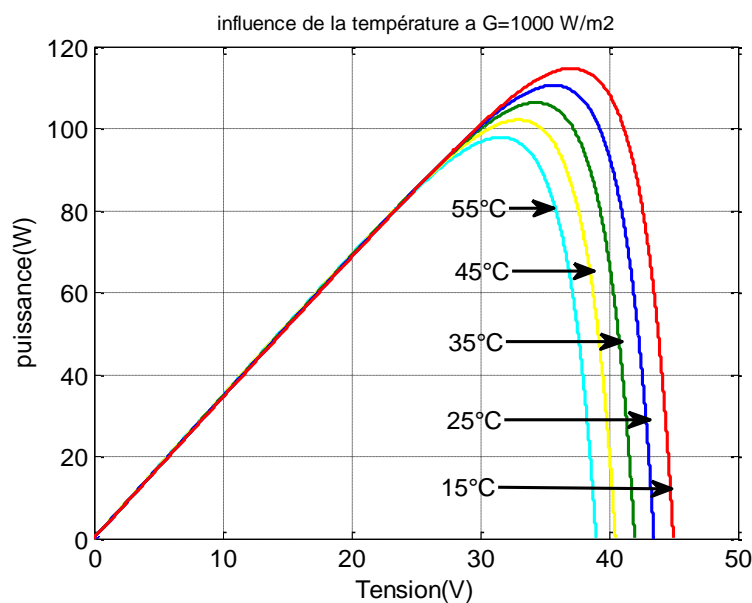
**Figure I.16 :** Influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P=f(V)$ .

### I.11.4 Influence de la température:

Les figures (I.17) et (I.18) présentent le comportement du même module sous un ensoleillement de  $1000 \text{ w/m}^2$  à des températures entre  $15^\circ\text{C}$  et  $55^\circ\text{C}$ . On remarque que la variation de la température influe beaucoup plus sur la tension et peu sur le courant, quant la température augmente le courant de court circuit augmente légèrement et la tension diminue considérablement. Cette diminution importante de la tension en fonction de l'augmentation de la température explique la diminution de la puissance.



**Figure I.17 :** Influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$



**Figure I.18 :** Influence de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$ .

### **I.12 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types des systèmes photovoltaïques existant, leurs composants principaux et leurs modèles mathématiques qui régissent les cellules et les panneaux photovoltaïques.

On a aussi présenté les différents résultats de simulation des grandeurs importantes d'un générateur PV (voir la puissance et le courant en fonction de la tension) pour les conditions STC (Standard Test conditions) qui sont, une température de 25°C et un ensoleillement de 1000 W/m<sup>2</sup>.

Ainsi l'influence de la variation des paramètres externes, sur les caractéristiques I(V) et P(V), qui sont la température et l'ensoleillement.

Dans le prochain chapitre on aura à illustrer les différents convertisseurs les plus utilisés dans le domaine des énergies renouvelables avec les différentes configurations et leurs modes de fonctionnements.

## II.1 Introduction :

L'évolution de la recherche dans le domaine de l'électronique de puissance, a fait des convertisseurs statiques très performants. Ces derniers ont contribué largement à la maturité des systèmes photovoltaïques car leur présence est indispensable dans le cas des systèmes raccordés aux réseaux de distribution de l'énergie électrique et des systèmes hybrides (autonomes) avec stockage.

L'onduleur est un convertisseur (DC/AC) utilisé pour le raccordement des panneaux photovoltaïques aux réseaux de distribution. Il transforme le courant continu produit par les panneaux en courant alternatif avec les caractéristiques du réseau en tension, courant, fréquence et impédance, pour que les appareils électriques puissent s'en servir.

Pour les convertisseurs (DC/DC) on trouve leur utilité dans les systèmes hybrides autonomes et les systèmes avec stockage car le stockage se fait en continu, aussi en les trouvant dans les systèmes raccordés aux réseaux. Ici on parle du Hacheur avec ces trois types abaisseur, élévateur, abaisseur-élévateur (Buck, Boost, Buck-Boost).

L'avancée technologique dans le domaine de l'électronique de puissance a fait des convertisseurs statiques des systèmes très performants et une fiabilité qui ne cesse d'augmenter, car certains constructeurs avancent des durées de vie voisines de 5 ans avec des rendements supérieurs à 95%. Ces deux paramètres influent positivement sur la production de l'énergie électrique et sur la rentabilité des systèmes photovoltaïques.

Dans ce présent chapitre on présente quelques convertisseurs statiques comme l'onduleur et le hacheur avec leurs différents types. Et on détaille le hacheur élévateur (Boost) car il fait l'objet de notre travail.

## II.2 Le convertisseur DC/DC :

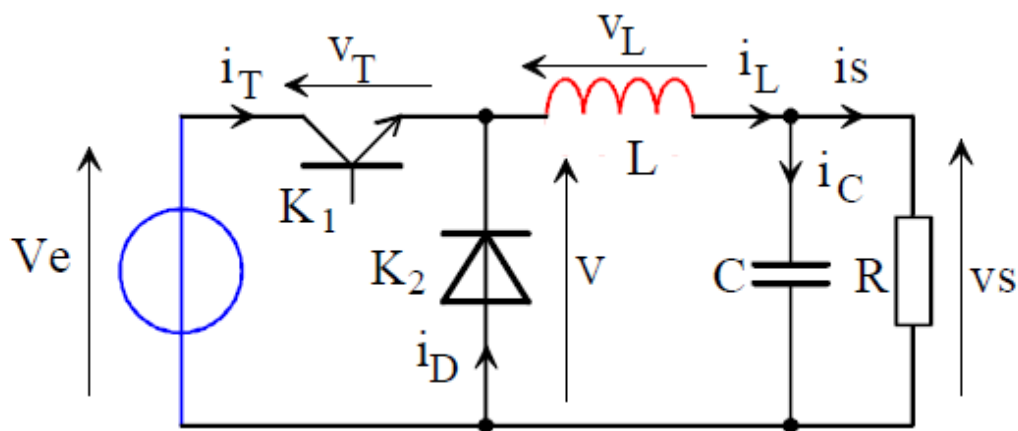
Le convertisseur « continu-continu » ou le hacheur est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue. Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit dévolteur, dans le cas contraire, il est dit survolteur. Le convertisseur dévolteur-surveolteur

combine les propriétés des configurations de dévolteur et du survolteur. Il peut être employé pour augmenter ou diminuer une tension continue d'entrée [13].

Ces convertisseurs comporte un interrupteur à amorçage et à blocage commandés (transistor bipolaire, transistor MOS ou IGBT...) et un interrupteur à blocage et amorçage spontanés (diode).

### II.2.1 Hacheur dévolteur (Buck) :

Le hacheur dévolteur appelé aussi hacheur abaisseur au fait que la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée. La figure II.1 présente le Circuit électrique de convertisseur Buck.



**Figure II.1** : Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck [14].

Le fonctionnement de ce type de hacheur peut être divisé en deux configurations suivant l'état de fonctionnement de l'interrupteur commandé [15] [16].

Pendant l'état passant ou « à l'état ON », l'interrupteur « K1 » est fermé. L'inductance est parcourue par un courant qui croît linéairement, et emmagasine de l'énergie tandis que la diode polarisée en inverse est bloquée. Cette phase dure de  $0$  à  $\beta T$ , avec  $\beta$  est le rapport cyclique, il représente la durée de la période  $T$  pendant la quelle l'interrupteur  $K_1$  conduit, est compris entre  $0$  et  $1$ .

Lors de l'état bloqué ou « l'état OFF », l'interrupteur est ouvert. La diode devient passante, assurant ainsi la continuité du courant à travers l'inductance, durant cette phase l'inductance est parcourue par un courant qui décroît, on dit alors que l'inductance restitue l'énergie préalablement emmagasiné à la charge. Et dure de  $\beta T$  à  $T$ .

Lorsque se convertisseur fonctionne en mode de conduction continue, on a les formes d'ondes des courants et des tensions présenté sur la figure suivant [17].

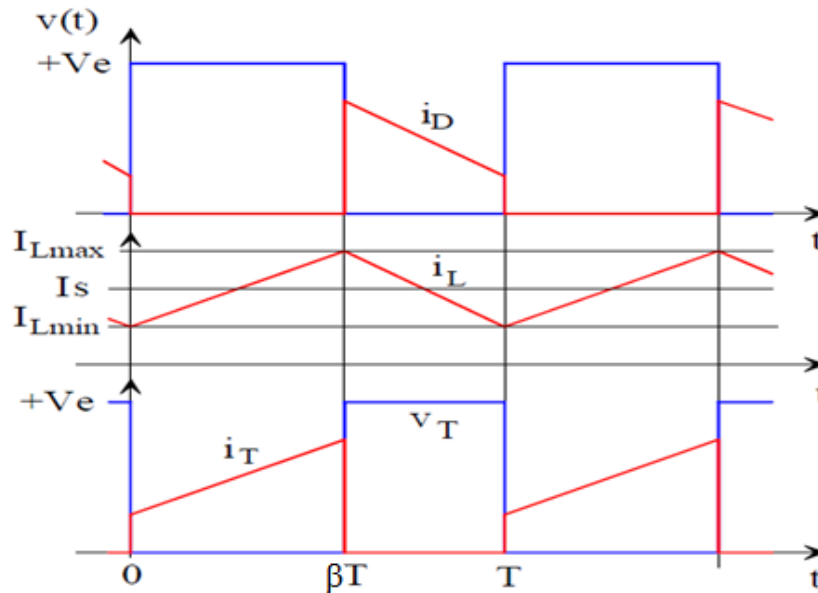


Figure II.2 : Formes d'ondes de convertisseur Buck.

### II.2.2 Modèle mathématique d'un convertisseur buck :

On applique la loi de kirchhoff sur le circuit électrique équivalent pour les deux périodes de fonctionnement afin de retirer les équations suivantes [18] :

$$\text{De } t = 0 \text{ à } t = \beta T : \quad \left\{ \begin{array}{l} V_L = L \frac{di_L}{dt} = V_e - V_s \\ i_c = c \frac{dV_c}{dt} = i_L - i_s \end{array} \right. \quad (II.1)$$

$$\text{De } t = \beta T \text{ à } t = T : \quad \left\{ \begin{array}{l} V_L = L \frac{di_L}{dt} = -V_s \\ i_c = c \frac{dV_c}{dt} = i_L - i_s \end{array} \right. \quad (II.2)$$

### II.2.3 Modèle approximé du convertisseur Buck :

Les systèmes d'équations de base (II.1) (II.2) représentent le convertisseur Buck pour une période  $\beta T$  et  $(1-\beta)T$  respectivement. Le convertisseur oscillant entre ces deux états avec une fréquence élevée, cherchons une représentation dynamique approximée valable pour les deux états  $\beta T$  et  $(1-\beta)T$ . estimant que la variation des variables dynamique  $i_c$ ,  $V_L$  est de forme linéaire, en d'autre termes nous pouvons faire une approche exponentielle par un segment ( $e^\varepsilon \approx 1 + \varepsilon$  si  $\varepsilon \ll 1$ ) et aussi la dérivée de ces grandeurs sera constante.

Cette approche nous permet de décomposé l'expression de la valeur moyen de la dérive de la variable dynamique  $x$  sur les deux périodes  $\beta T$  et  $(1-\beta)T$

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T = \frac{dx}{dt} \cdot \alpha T + \frac{dx}{dt} \cdot (1 - \beta)T \quad (II.3)$$

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

en d'autres termes cette approximation est valable si les périodes  $\beta T$  et  $(1-\beta)T$  sont très faibles devant la constante de temps du circuit  $C^*R$ ,  $L/R$  [19].

En appliquant la relation (II.3) sur les systèmes d'équations (II.1) et (II.2), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} T = \beta T (V_e - V_s) - (1 - \beta) T \cdot V_s \\ c \frac{dV_c}{dt} T = \beta T (i_L - i_s) + (1 - \beta) T (i_L - i_s) \end{cases} \quad (II.4)$$

Pour qu'on puisse interconnecter le convertisseur avec les autres blocs de simulation, on arrange les équations précédentes, on obtient les expressions suivant :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{\beta}{L} V_e - \frac{1}{L} V_s \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{c} i_L - \frac{1}{Rc} V_s \end{cases} \quad (II.5)$$

## II.2.4. Calcul des grandeurs électriques :

### a) La tension moyenne :

$$\langle V_L \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T V_L dt = \frac{1}{T} \left( \int_0^{\beta T} (V_e - V_s) dt - \int_{\beta T}^T V_s dt \right)$$

$$\langle V_L \rangle = \frac{1}{T} \left( (V_e - V_s) \cdot \beta T - V_s (T - \beta T) \right)$$

$$\langle V_L \rangle = \beta(V_e - V_s) - V_s(1 - \beta)$$

En régime permanent  $\langle V_L \rangle = 0$  donc :

$$V_s = \beta \cdot V_e \quad (II.6)$$

### b) Ondulation du courant et de tension:

Ondulation du courant:

$$i_L = \frac{1}{L} \int_0^{\beta T} V_L dt$$

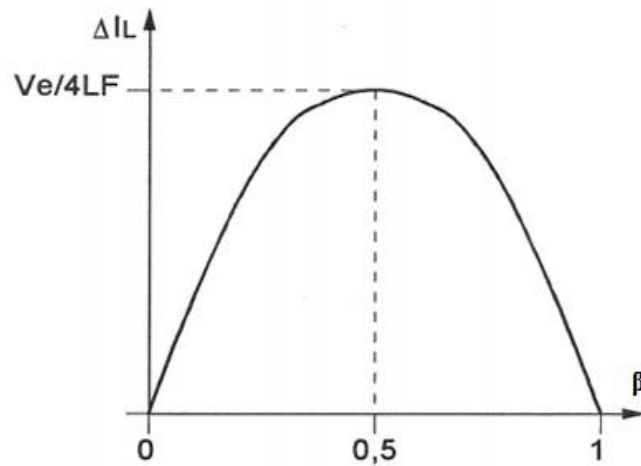
$$i_L = \frac{(V_e - V_s)\beta T}{L} + I_{mi} = I_{max}$$

$$\Delta I_L = I_{max} - I_{min} = \frac{(1 - \beta)\beta}{L \cdot f} V_e \quad (II.7)$$

Cette ondulation de courant est maximale pour  $\beta = \frac{1}{2}$  est vaut  $\Delta I_L = \frac{V_e}{4 \cdot L \cdot f}$

La forme de  $\Delta I_L(\beta)$  est représentée sur la figure :





**Figure II.3 :** Ondulation du courant en fonction de  $\beta$  [20].

Ondulation de tension [21]:

$$\Delta V_s = \frac{\Delta I_L}{8. c. f} = \frac{\beta(1 - \beta). V_e}{8. c. L. f^2} \quad (II. 8)$$

Le courant moyen traversant l'inductance est égal au courant moyen dans la charge [14].

$$I_L = I_s \quad (II. 9)$$

### c) Contraintes sur les interrupteurs:

Les contraintes en tension et en courant sur les interrupteurs commandés et la diode sont les même [20].

$$V_{k,max} = V_{d,max} = V_e \quad (II. 10)$$

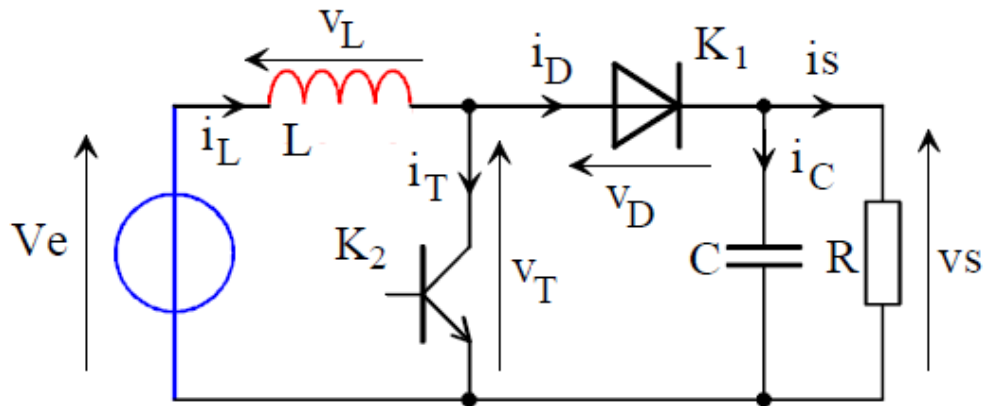
$$i_{k,max} = i_{d,max} = i_{L,max} = I_s + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (II. 11)$$

Le courant traverse la diode :

$$I_{d,moy} = (1 - \beta)I_s \quad (II. 12)$$

### II.3. Hacheur survolteur (Boost) :

Le hacheur survolteur appelé aussi élévateur de tension dont la tension de sortie supérieure à la tension d'entrée. La figure (II.4) présente le circuit électrique d'un convertisseur boost.



**Figure II.4** : Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost [14].

L'inductance permet de lisser le courant appelé sur la source. La capacité  $C$  permet de limiter l'ondulation de tension en sortie.

Lorsque le transistor  $K_2$  est fermé le courant dans l'inductance du hacheur augment linéairement, et au fur et à mesure elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période, et à cet instant la diode ( $D$ ) est bloquée.

Lorsque le transistor  $K_2$  est ouvert, la diode devient passante, l'inductance s'opposant à la diminution de courant  $I_L$ , génère une tension qui s'ajoute à la tension de la source, qui s'applique sur la charge  $R$  à travers la diode  $D$ .

Les formes d'ondes sont de la forme suivante :

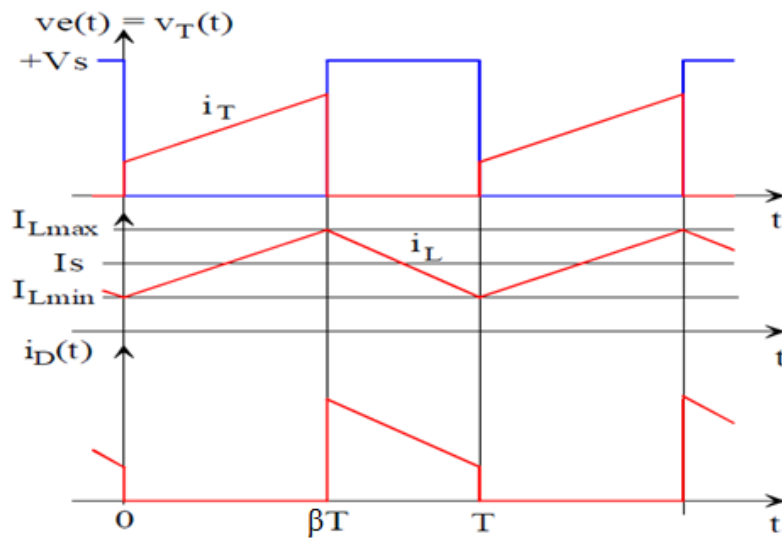


Figure II.5 : Formes d'ondes de convertisseur Boost.

### II.3.1 Modèle mathématique d'un convertisseur boost :

Comme pour le circuit buck on applique la loi de Kirchhoff afin d'obtenir les équations suivantes sur les deux périodes de fonctionnement :

Pour la première période de  $[0 ; \beta T]$

$$\left\{ \begin{array}{l} i_c = C \frac{dV_s}{dt} = -i_s \\ V_L = L \frac{di_L}{dt} = V_e \end{array} \right. \quad (II.13)$$

Pour la deuxième période de  $[\beta T ; T]$

$$\left\{ \begin{array}{l} i_c = C \frac{dV_s}{dt} = i_L - i_s \\ V_l = L \frac{di_L}{dt} = V_e - V_s \end{array} \right. \quad (II.14)$$

### II.3.2 Modèle approximé du convertisseur Boost:

En applique la relation (II.3) sur le système d'équation (II.13) et (II.14) en obtient le modèle approximé du convertisseur boost :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 \frac{dV_s}{dt} T = -i_s \beta T + (i_L - i_s)(1 - \beta)T \\ L \frac{di_L}{dt} T = V_e \beta T + (V_e - V_s)(1 - \beta)T \end{array} \right. \quad (II.15)$$

On arrange les équations précédentes, on obtient les expressions suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV_s}{dt} = \frac{1}{C} (1 - \beta) i_L - \frac{1}{RC} V_s \\ \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} V_e - (1 - \beta) \frac{V_s}{L} \end{array} \right. \quad (II.16)$$

### II.3.3. Calcul des grandeurs électriques [22] :

a) Tension moyen :

$$\begin{aligned} \langle V_L \rangle &= \frac{1}{L} \int_0^T V_L dt = \frac{1}{L} \left( \int_0^{\beta T} V_e dt + \int_{\beta T}^T (V_e - V_s) dt \right) \\ \langle V_L \rangle &= \frac{1}{T} (V_e \cdot \beta T + (V_e - V_s) \cdot (T - \beta T)) \\ \langle V_L \rangle &= V_e \cdot \beta + (V_e - V_s) \cdot (1 - \beta) \end{aligned}$$

En régime permanent  $\langle V_L \rangle = 0$  donc :

$$V_s = \frac{1}{1 - \beta} V_e \quad (II.17)$$

Pour  $\beta$  compris entre 0 et 1, la tension de sortie est toujours supérieure à  $V_e$ , le montage est élévateur de tension

### b) Ondulation du courant et de tension :

Ondulation du courant [14] :

$$i_L = \frac{1}{L} \int_0^{\beta T} V_L dt$$

D'où :

$$i_L = \frac{\beta \cdot V_e}{L \cdot f} + I_{min} = I_{max}$$

Et finalement :

$$\Delta I_L = I_{max} - I_{min} = \frac{\beta \cdot V_e}{L \cdot f} \quad (II.18)$$

Ondulation de tension [20] :

L'ondulation de tension, en sortie résulte du courant dans le condensateur qui est présenté sur la figure suivante.

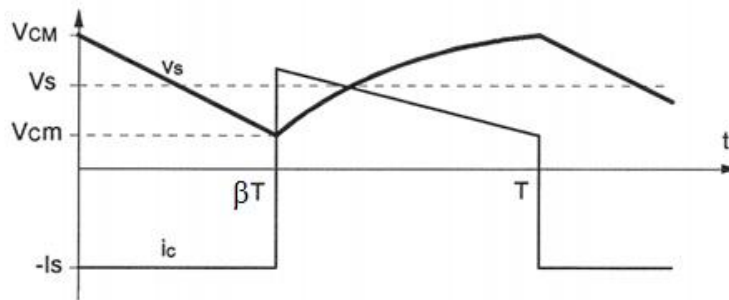


Figure II.6 : Ondulation de tension

Pour  $0 < t < \beta T$   $V_s = V_{max} - \frac{I_s}{C} t$

En  $t = \beta T$   $V_s = V_{max} - \frac{I_s}{C} \beta T$

D'où  $\Delta V_s = V_{max} - V_{min} = \frac{I_s}{C} \beta T$

Finalement :

$$\Delta V_s = \frac{\beta \cdot I_s}{C \cdot f} = \frac{\beta \cdot V_e}{(1 - \beta) \cdot R \cdot C \cdot f} \quad (II.19)$$

Le courant moyen traversant l'inductance est [9] :

$$I_L = \frac{I_s}{1 - \beta} \quad (II.20)$$

### c) Contraintes sur les interrupteurs:

Les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes. En tension on a [20], [22] :

$$V_{k,max} = |V_{d,max}| = V_{s,max} = \frac{V_e}{1-\beta} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (II.21)$$

Et en courant :

$$i_{k,max} = i_{d,max} = i_{L,max} = \frac{I_s}{1-\beta} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (II.22)$$

Le courant moyen traversant la diode est :

$$I_{d,moy} = I_s \quad (II.23)$$

## II.4. Hacheur « survolteur-dévolteur » Buck-Boost :

Le convertisseur « Buck-Boost » est également appelé hacheur « abaisseur-élévateur » de la tension. Il est caractérisé par son aptitude à fournir une tension plus faible, ou plus élevée que celle appliquée en son entrée. Ceci dépend de la valeur du rapport cyclique.

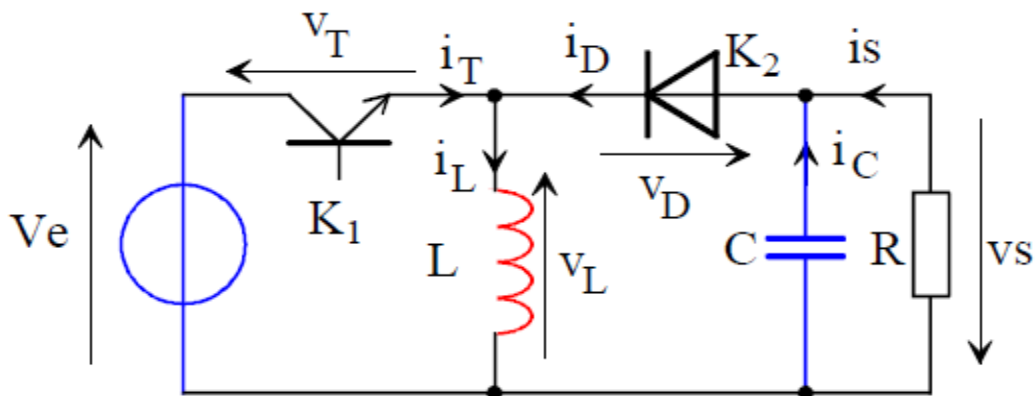


Figure II.7 : Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck-Boost [14].

Lors de la première partie du cycle de fonctionnement, de 0 à  $\beta.T$ , l'interrupteur commandé est fermé (passant). La diode est ouverte et l'inductance stocke l'énergie fournie par le générateur d'entrée.

Lors de la seconde partie du cycle, de  $\beta.T$  à  $T$ , on ouvre l'interrupteur commandé et la diode devient passante. L'inductance restitue son énergie à la charge.

Les formes d'ondes sont de la forme suivante :

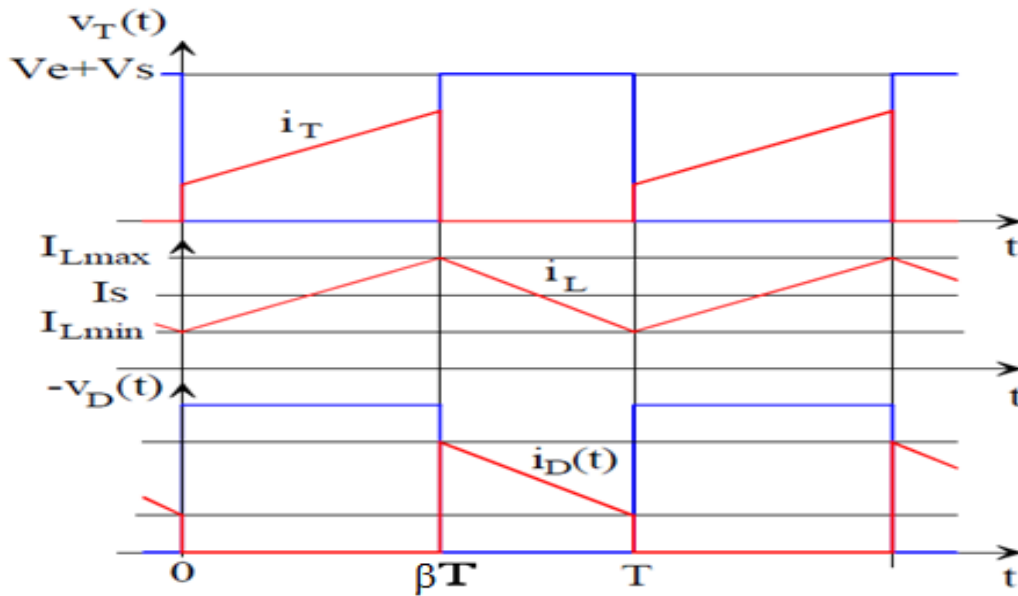


Figure II.8 : Formes d'ondes de convertisseur Buck-Boost.

### II.4.1 Modèle mathématique d'un convertisseur buck boost :

En applique la loi de kirchhoff dans le circuit pour obtenir les équations suivantes [22]:

De  $t = 0$  à  $t = \beta T$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_L = L \frac{di_L}{dt} = V_e \\ i_s = -C \frac{dV_s}{dt} \\ i_c = C \frac{dV_s}{dt} = -\frac{V_s}{R} \end{array} \right. \quad (II.24)$$

De  $t = \beta T$  à  $t = T$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_L = L \frac{di_L}{dt} = V_s \\ i_s = -i_L - C \frac{dV_s}{dt} \\ i_c = C \frac{dV_s}{dt} = -i_s - \frac{V_s}{R} \end{array} \right. \quad (II.25)$$

### II.4.2 Modèle approximé du convertisseur buck Boost:

En applique la relation (II.3) sur le système d'équation (II.25) et (II.26) en obtient le modèle approximé du convertisseur boost :

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} T = V_e \beta T + V_s (1 - \beta) T \\ i_s T = -C \frac{dV_s}{dt} \beta T + (-i_L - C \frac{dV_s}{dt}) (1 - \beta) T \\ C \frac{dV_s}{dt} T = -\frac{V_s}{R} \beta T + (-i_s - \frac{V_s}{R}) (1 - \beta) T \end{cases} \quad (II.26)$$

Pour qu'on puisse interconnecter le convertisseur avec les autres blocs de simulation, on arrange les équations précédentes, on obtient les expressions suivant :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{\beta}{L} V_e + \frac{(1-\beta)}{L} V_s \\ i_s = -(1 - \beta) i_L - C \frac{dV_s}{dt} \\ \frac{dV_s}{dt} = -(1 - \beta) \frac{i_s}{C} - \frac{1}{RC} V_s \end{cases} \quad (II.27)$$

### II.4.3. Calcule des grandeurs électriques :

#### a) Tension moyenne de sortie

$$\langle V_L \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T V_L dt = \frac{1}{T} \left( \int_0^{\beta T} V_e dt + \int_{\beta T}^T V_s dt \right)$$

$$\langle V_L \rangle = \frac{1}{T} (V_e \cdot \beta T + V_s (T - \beta T))$$

$$\langle V_L \rangle = V_e \cdot \beta + V_s (1 - \beta)$$

En régime permanent  $\langle V_L \rangle = 0$  donc :

$$V_s = \frac{\beta}{1 - \beta} V_e \quad (II.28)$$



**b) Ondulation du courant et de tension :**

Ondulation du courant :

$$i_L = \frac{1}{L} \int_0^{\beta T} V_L dt$$

$$i_L = \frac{1}{L} V_e \cdot \beta T + I_{min} = I_{max}$$

$$\Delta I_L = \frac{\beta \cdot V_e}{L \cdot f} \quad (II.29)$$

Ondulation de tension [14] :

$$\Delta V_s = \frac{\beta \cdot I_s}{C \cdot f} = \frac{\beta^2 \cdot V_e}{(1 - \beta) \cdot R \cdot C \cdot f} \quad (II.30)$$

La tension de sortie est négative par rapport à la référence de la source d'entrée. Son amplitude peut être supérieure ou inférieure à celle de la tension d'entre selon que le rapport cyclique est supérieur ou inférieur à 0.5. ce montage est couramment utilisé dans des ensembles d'alimentation de faible puissance pour délivrer une tension négative, à partir d'un bus d'alimentation positif [20].

Le courant moyen traversant l'inductance a pour valeur [14]:

$$I_L = \frac{I_s}{1 - \beta} \quad (II.31)$$

**d) Contraintes sur les interrupteurs :**

Les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes en tension et en courant [20].

En tension on a :

$$V_{k,max} = |V_{d,max}| = V_{s,max} + V_e = \frac{V_e}{1 - \beta} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (II.32)$$

En courant on a :

$$i_{k,max} = i_{d,max} = i_{L,max} = \frac{I_s}{1 - \beta} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (II.33)$$

Le courant moyen traversent la diode est :

$$I_{d,moy} = I_s \quad (II.34)$$

## II.5 Convertisseur continue alternatif (Onduleur) :

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion de l'énergie de forme continue à la forme alternative [23]. On distingue deux types d'onduleurs :

Les onduleurs de tension imposent à la charge une tension alternative à partir d'une source de tension continue.

Les commutateurs de courant imposent à la charge un courant alternatif à partir d'une source de courant continue. Ces onduleurs, peuvent fonctionner à la fréquence imposée à la charge, on parle alors d'un créneau par alternance ou à une fréquence supérieure et on parle alors de MLI (Modulation de largeur d'impulsions).

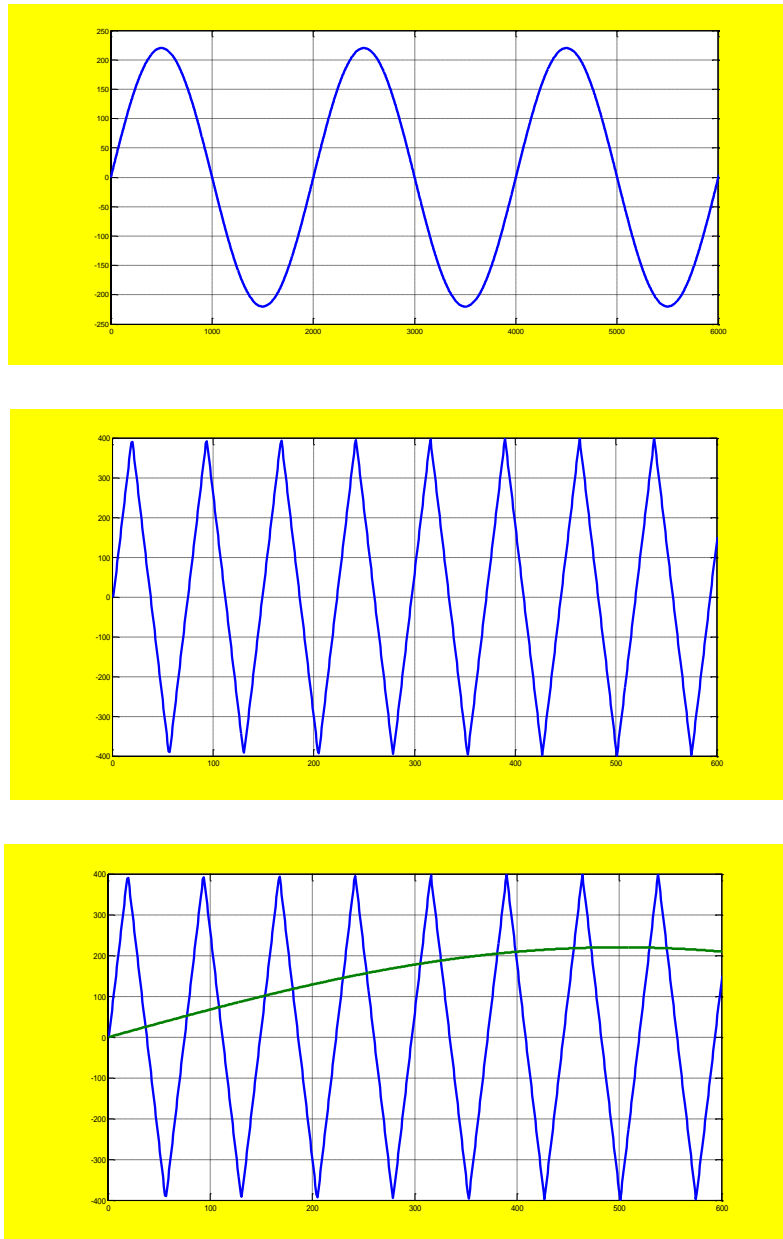
### II.5.1 Onduleur de tension à un créneau par alternance :

Ces onduleurs sont utilisés pour des applications de forte puissance. Le fait de ne commuter qu'une fois par alternance limite les pertes dans les composants actifs.

### II.5.2 Onduleur MLI à porteuse triangulaire

La méthode de la MLI à porteuse triangulaire, compare l'erreur entre le signal (courant ou tension) sinusoïdale d'amplitude et de fréquence  $f_r$  variable, s'appelé 'référence'  $V_{ref}$  avec une onde triangulaire (porteuse) d'amplitude qui varie entre -1 et 1 et d'une fréquence  $f_p$  fixe. L'erreur passe par un correcteur avant être comparée avec la porteuse triangulaire [24].

L'intersection des deux signaux indique les instants de commutation des interrupteurs, qui sont présenté sur la figure (II.9). Si on change  $V_{ref}$  on va avoir un changement sur les instants d'interconnexions et sur la largeur d'impulsion.



**Figure II.9** : Principe de la modulation de la largeur d'impulsion (MLI).

Les propriétés de la commande MLI à porteuse triangulaire sont :

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad (II.35)$$

$$r = \frac{V_{ref}}{V_p} \quad (II.36)$$

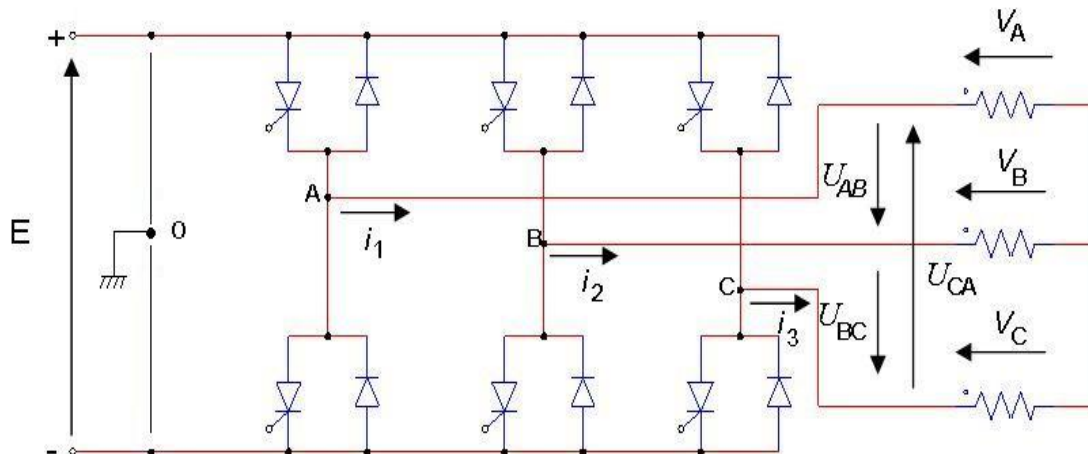
$m$  : Indice de modulation.

$f_p$  : Fréquence de la porteuse.

$r$  : Coefficient de réglage.

$V_p$  : amplitude de la porteuse

### II.5.3 Formulation mathématique de l'onduleur



**Figure II.10** : Schéma onduleur de tension.

Les tensions des phases prises par rapport au point commun. Des lois de mailles sont appliquées afin d'en déduire ces tensions composées entre phases [16].

$$\begin{cases} u_{AB} = u_{A0} - u_{B0} = v_A - v_0 - v_B + v_0 = v_A - v_B \\ u_{BC} = u_{B0} - u_{C0} = v_B - v_0 - v_C + v_0 = v_B - v_C \\ u_{CA} = u_{C0} - u_{A0} = v_C - v_0 - v_A + v_0 = v_C - v_A \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

On obtient

$$\begin{cases} u_{AB} = v_A - v_B \\ u_{BC} = v_B - v_C \\ u_{CA} = v_C - v_A \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

$$u_{AB} - u_{CA} = v_A - v_B - v_C + v_A = 2v_A - v_B - v_C \quad (\text{II.39})$$

Si le récepteur est équilibré, on peut passer des tensions composées aux tensions simples  $v_A$   $v_B$   $v_C$  à la sortie de l'onduleur.

Quelle que soit leur forme d'onde les trois courants  $i_A$ ,  $i_B$  et  $i_C$  ont une somme nulle, il faut donc que les trois fondamentaux aient une somme nulle et qu'il en soit de même pour les diverses harmoniques [5].

A cause de l'équilibre du récepteur la somme instantanée des courants est nulle:

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad (II.40)$$

Entraîne

$$v_A + v_B + v_C = 0 \quad (II.41)$$

On peut donc écrire :

$$u_{AB} - u_{CA} = v_A - v_B - v_C + v_A = 3v_A \quad (II.43)$$

De même pour  $v_B$  et  $v_C$ , on obtiendra après remplacement, les trois tensions suivantes [16] :

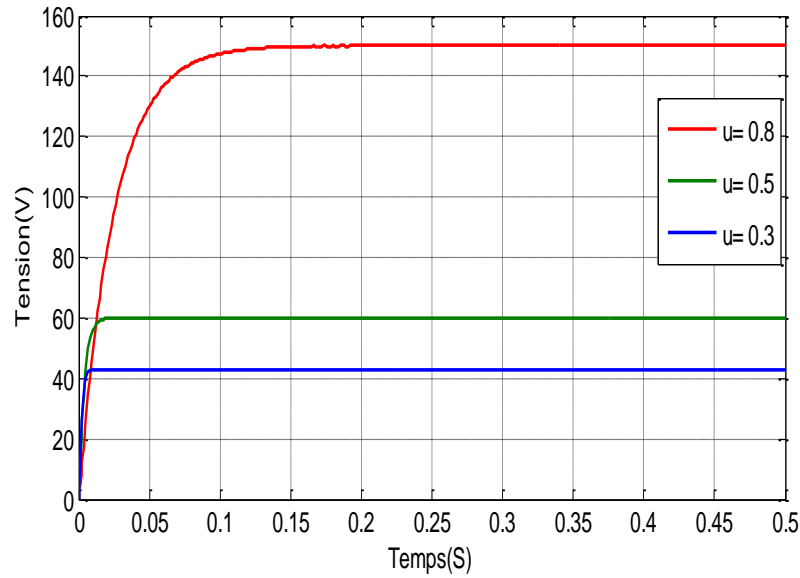
$$\left\{ \begin{array}{l} v_A = \frac{1}{3}(u_{AB} - u_{CA}) = \frac{1}{3}(2v_A - v_B - v_C) \\ v_B = \frac{1}{3}(u_{BC} - u_{AB}) = \frac{1}{3}(-v_A + 2v_B - v_C) \\ v_C = \frac{1}{3}(u_{CA} - u_{BC}) = \frac{1}{3}(-v_A - v_B + 2v_C) \end{array} \right. \quad (II.44)$$

## II.6 Résultat de simulation :

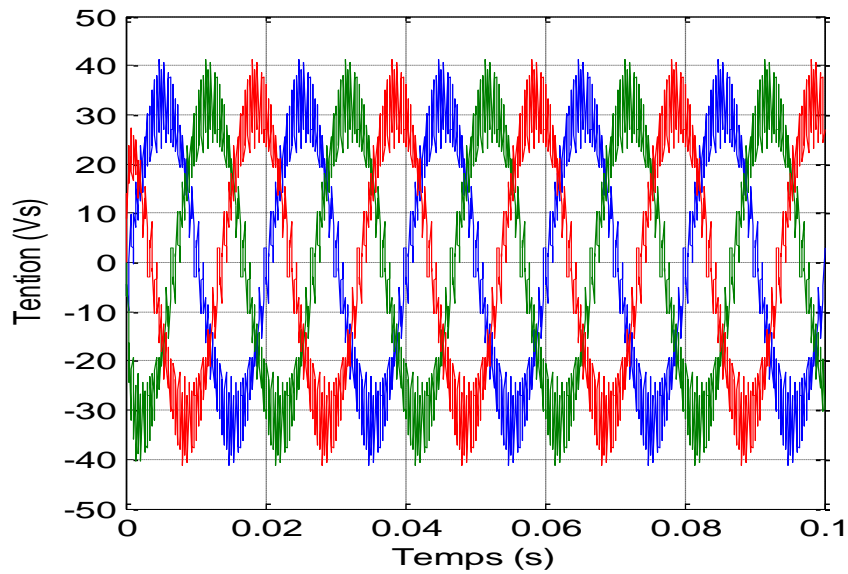
Résultat d'une simulation numérique d'un hacheur boost et d'un onduleur.

Paramètre de simulation :

- Les paramètres du hacheur :  $V_e=30$  v,  $i_e=4$  A,  $L=20$  mH,  $C=20$   $\mu$ F,  $\beta=[0.3 \ 0.5 \ 0.8]$ . le rapport cyclique dans le graphe est noté u.



**Figure II.11 :** Variation de la tension de sortie du hacheur en fonction du temps pour différentes valeurs de  $\beta = u$ .



**Figure II.12 :** Tension de sortie de l'onduleur.

## II.7 Interprétation des figures :

A partir de la figure II.11 on constate que :

- pour les différentes valeurs de  $\beta = (0.3 ; 0.5 ; 0.8)$  on constate que la tension de sortie reste supérieure à celle d'entrée, le hacheur Boost travaille en élévateur de tension.

- On remarque aussi que l'augmentation de la valeur de  $\beta = [0, 1]$  engendre l'augmentation de la tension de sortie du convertisseur.
- Pour une tension continue d'entrée  $E=30V$  on a :

Pour  $\beta=0.3$  on a la tension de  $V_s=42.85V$ .

Pour  $\beta=0.5$  on a la tension de  $V_s=60V$ .

Pour  $\beta=0.8$  on a la tension de  $V_s=150V$ .

On observe dans la figure (II.12) que la tension de sortie d'un onduleur est une tension alternative triphasée de fréquence  $f= 50Hz$  et d'amplitude  $40v$ , qui est obtenu à partir d'une source de tension continue fixe  $V_e=120 v$ .

## II.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons cité quelques équipements d'électronique de puissance (convertisseurs statiques) utilisé en adaptation avec les systèmes photovoltaïques, ainsi que, leur principe de fonctionnement et leurs modèles mathématiques qui sont indispensable pour le calcul de leurs lois de commande.

On a aussi effectué des tests de simulation pour l'onduleur triphasé et l'hacheur élévateur (Boost), car c'est le modèle qu'on a choisi pour notre étude.

Dans le chapitre suivant on développe et on calcule une commande non linéaire basée sur la passivité et l'assignation d'interconnexion et d'amortissement.

### **III.1 introduction :**

La commande basé sur la passivité (CBP-AIA) est une méthode de conception a partir de la propriété physique du système qui y est « la passivité ». Cette caractéristique est étroitement liée à la propriété fondamentale de conservation de l'énergie. Le principe de la CBP est le façonnement de l'énergie totale du système en boucle fermée plus l'injection d'un terme d'amortissement où le point de fonctionnement désiré correspond à l'optimum de cette énergie. Cette fonction est adoptée pour la démonstration de la stabilité en boucle fermée par la théorie de Lyapunov. La (CBP-AIA) conserve la propriété de passivité en boucle fermée.

Dans ce chapitre on présente, quelques méthodes MPPT, comme la méthode de perturbation et observation, méthode par incrémentation des conductances, méthode courant constant (CC-MPPT), méthode tension constant (CV-MPPT) et la commande MPPT a base de la logique floue.

Comme on a vu dans le chapitre I, les caractéristiques d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température. En plus de ces dépendances, le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement, la position de ce point de fonctionnement dépendant à son tour de l'ensoleillement et de la température ainsi que de la charge. Pour que le module fournisse sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque.

Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur) contrôlé par un mécanisme de poursuite «Maximum Power Point Tracking» (MPPT).

### **III.2 Concept d'une MPPT « Maximum Power Point Tracking » :**

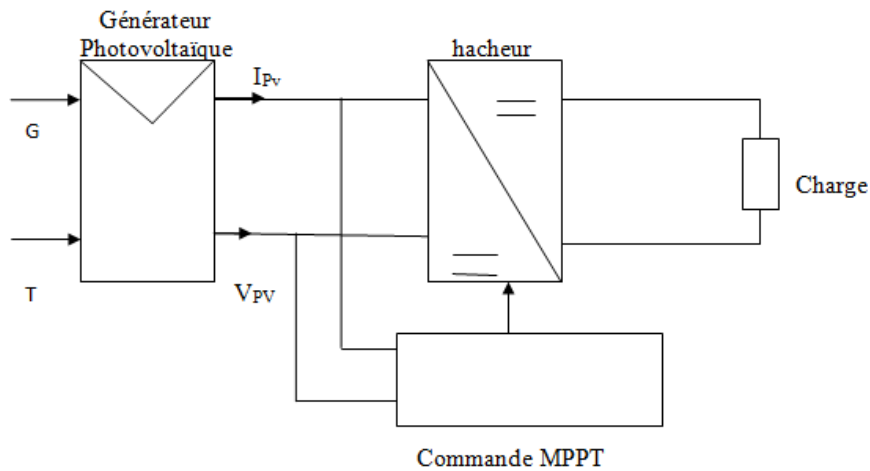
Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi quel que soient les conditions météorologiques (température et irradiation), et quel que soit la tension de la batterie associé,



la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum ( $V_{OPT}$ ,  $I_{OPT}$ ) [25].

### III.3 Principe de fonctionnement d'un étage d'adaptation DC-DC :

La figure (III.1) présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation (DC-DC) entre le générateur photovoltaïque et la charge. Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV dans des conditions météorologiques et de charge stables. Que ce soit une commande analogique ou digitale [26], le principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $\beta$  à la valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du panneau PV.



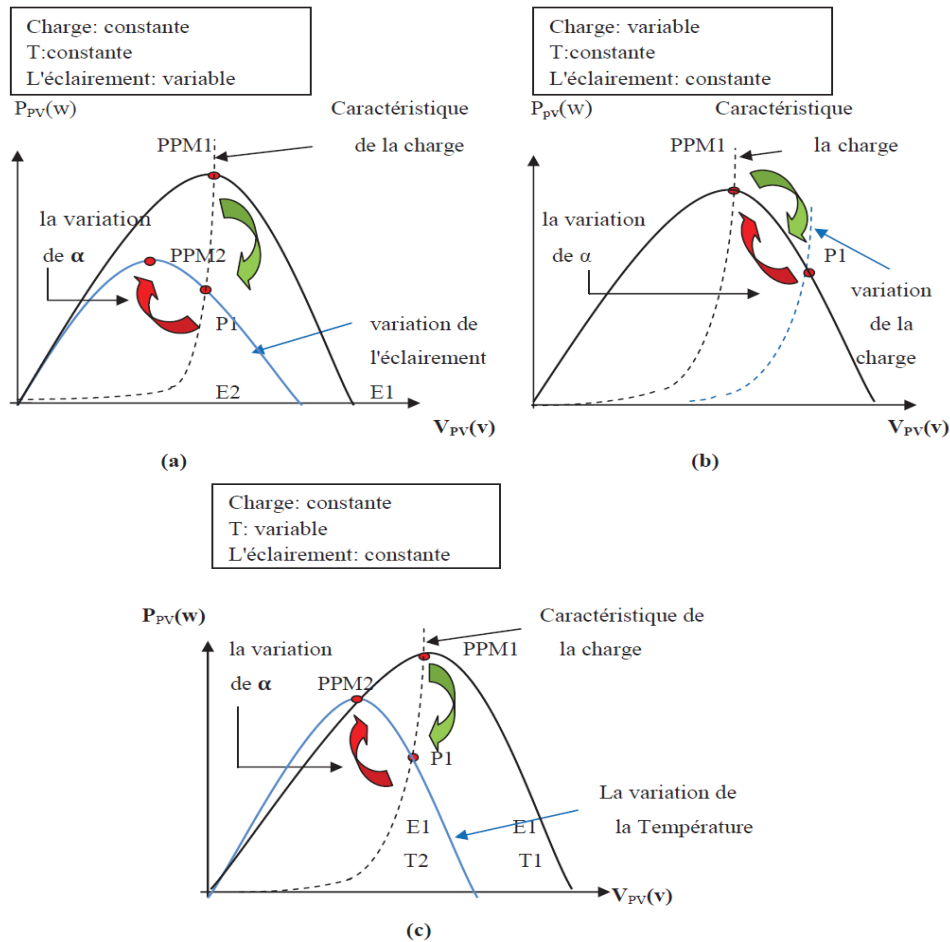
**Figure III.1 :** Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT [26].

Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge à chaque instant.

### III.4 Gestion de la MPPT :

La figure suivante présente trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal  $PPM_1$  vers un nouveau point  $P_1$  de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Dans le premier cas (a) Pour une variation d'ensoleillement, il suffit de régler la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum  $PPM_2$ . Pour une variation de charge

(cas b), le point de fonctionnement retrouve une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Enfin dans le dernier cas (c) de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV. Bien qu'il faut agir également au niveau de la commande.



**Figure III.2 :** Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température [27].

### III.5. Classification des Commandes MPPT :

Il est possible de classifier d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classifier selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT.

### III.5.1 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche :

Indépendamment des paramètres d'entrée de l'algorithme MPPT, nous pouvons trouver dans la littérature différents types de MPPT. Certaines d'entre elles sont basées sur la commande qui fait croître le point de fonctionnement du générateur PV le long de la caractéristique  $P(V)$  jusqu'à atteindre le point de puissance maximale. Dans ce type de méthodes, nous pouvons distinguer les méthodes basées sur l'incrément de conductance et les méthodes P&O. La commande Perturbe & Observe impose toujours une oscillation autour du point de puissance maximale comme le montre la figure III.3. En effet, cette oscillation est nécessaire pour connaître les variations de la puissance de sortie du générateur PV et ainsi réajuster le rapport cyclique du convertisseur statique en faisant en sorte que le point de fonctionnement du générateur PV oscille le plus près possible du point de puissance maximale, même si les conditions de fonctionnement sont inchangées. Cela entraîne des pertes en régime établi mais qui sont largement rattrapées en fonctionnement dynamique (lors de transitoires). En effet, ce type de commande réagit très rapidement sans en savoir l'origine. D'autre part, le type de commande MPPT nommé algorithme d'incrément de conductance, se base sur la dérivée de la puissance du générateur PV pour trouver la position relative du point de puissance recherchée et pour appliquer une action de contrôle adéquate au suivi de ce point. Parfois, les algorithmes établissent des approximations afin que le point d'opération du générateur PV soit le plus proche possible du point de puissance maximale, nous parlons alors des méthodes complexes assistées par ordinateur. par exemple on peut cité la commande basée sur la logique floue ( Fuzzy control), et on trouve aussi la MPPT basée sur la passivité qui contrôle l'énergie de l'erreur pour la minimiser, donc maximiser la puissance à la sortie. Ce type de commande sera l'objet de notre travail et le but de cela est d'optimiser la puissance fournie par le GPV.

### III.5.2 Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée :

- **Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS :**

Ce type de commandes MPPT effectue une recherche du MPP selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. La commande nécessite alors la mesure du courant et de la tension en entrée du convertisseur.

D'autres types de commandes MPPT sont basées sur la régulation du courant du GPV, supposant que ce dernier soit une image proportionnelle à la puissance. Ceci permet de

s'approcher le plus proche possible du courant optimal  $I_{opt}$ . Ce type de commande ayant besoin d'un seul capteur est plus facile à mettre en œuvre et a un coût bas.

- **Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur :**

Dans la littérature, il existe des algorithmes basés sur les paramètres de sortie du CS. En effet, ce type utilise la tension et le courant de sortie du CS ou alors uniquement l'un des deux. Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie sont principalement utilisées quand la charge est une batterie.

Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de  $P_{max}$  est faite à travers le rendement du convertisseur. Plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, tous les systèmes avec un seul capteur sont imprécis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial [28].

### **III.6. Différents MPPT solaire photovoltaïque :**

Dans la littérature plusieurs méthodes de poursuite de point de puissance maximum ont été proposées, mais on cite les plus utilisées [11] [28]:

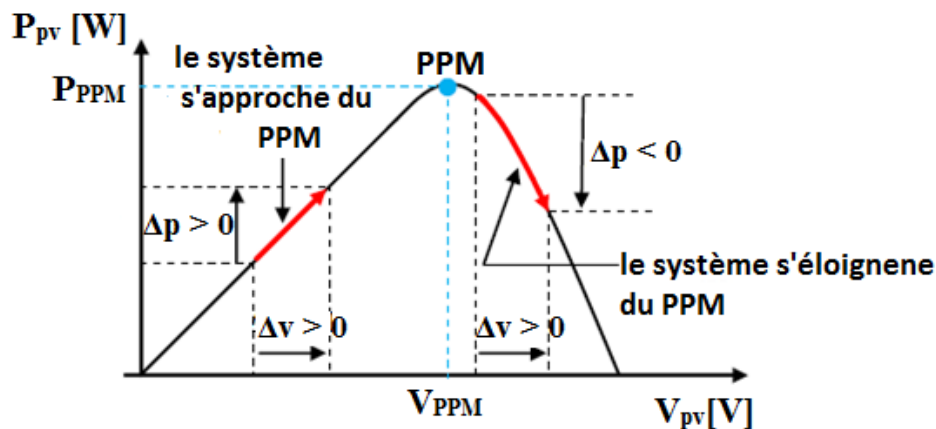
- Méthode de perturbation et observation.
- Méthode par incrémentation des conductances.
- Méthode courant constant (CC-MPPT).
- Méthode tension constant (CV-MPPT).
- La commande MPPT a base de la logique floue.
- Commande basé sur la passivité (CBP).
- Commande basée sur la passivité et l'assignation d'interconnexion et d'amortissement (CBP-AIA).

#### **III.6.1 Méthode de perturbation et observation :**

La méthode perturbation et observation « P&O » fonctionne on perturbant périodiquement la tension du panneau  $V_{PV}$  avec un  $\Delta V$  (variation de la tension de référence), ou en agissent directement sur le rapporte cyclique du convertisseur (DC-DC) et en observent la variation de l'énergie électrique délivrée à la sortie du PV.

Si la variation de la puissance  $\Delta P > 0$  alors la perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du MPP et on continue à perturber la tension dans la même direction, cela va déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP [11].

Si  $\Delta P < 0$  le point de fonctionnement s'éloigne du MPP alors on perturbe la tension avec un signe algébrique contraire au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP.



**Figure III.3 :** Caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$  d'un panneau solaire [27].

La figure (III.3) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.



**Figure III.4 :** Organigramme de l'algorithme P&O [9].

L'avantage de cette méthode qu'elle est simple et elle ne nécessite pas la connaissance de la caractéristique du générateur photovoltaïque. Son inconvénient est que le point de fonctionnement oscille au tour du MPP et elle est sensible aux grandes variations d'ensoleillements.

### III.6.2 Méthode par incrémentation des conductances :

Cette méthode s'intéresse directement aux variations de la puissance en fonction de la tension. Ceci peut être décrit par les équations suivantes [9] :

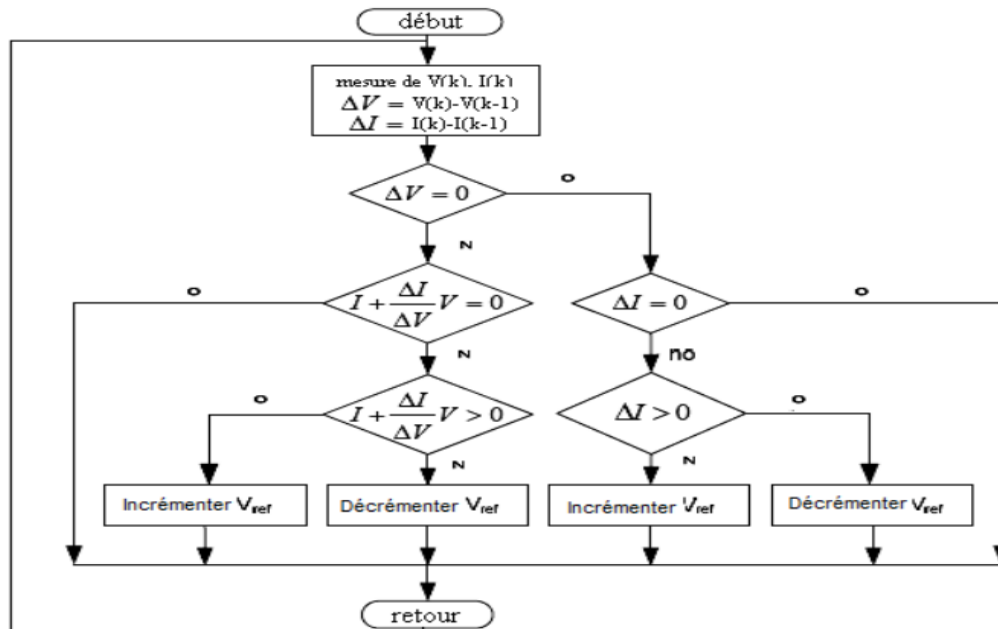
$$\frac{dP_v}{dV_p} = \frac{d(V_p \cdot I_{pv})}{dV_p} = I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_p} = 0 \quad (III.1)$$

$$\frac{dI_{pv}}{dV_p} = -\frac{I_{pv}}{V_p} \quad (III.2)$$

Le terme «  $-\frac{I_{pv}}{V_p}$  » représente l'opposé de la conductibilité instantanée du panneau photovoltaïque, et «  $\frac{dI_{pv}}{dV_p}$  » représente le terme d'incrément de conductance. Par conséquent, pour le point de puissance maximum (PPM), ces deux termes peuvent être égaux mais de signe opposé. Si le point de fonctionnement ne coïncide pas avec le point (PPM)

l'inégalité de l'équation (III.1) indique la position de la tension de fonctionnement si elle est plus grand ou inférieure à la tension de point de puissance maximum.

L'organigramme de cette méthode est donné par la figure (III.4).



**Figure III.5 :** Organigramme de l'algorithme incrémentation de conductance [9].

L'avantage principal de cette méthode est qu'elle est adaptée aux conditions climatiques instables.

### III.6.3 Méthode courant constant (CC-MPPT) :

Cette méthode consiste à utiliser un commutateur aux bornes du convertisseur, quand ce commutateur est activé, on mesure le courant de court circuit et on calcule le courant optimal et la MPPT corrige le point de fonctionnement en utilisant l'équation [11] :

$$\frac{I_m}{I_{cc}} \approx K_{ci} < 1 \quad (III.3)$$

### III.6.4 Méthode tension constante (CV-MPPT) :

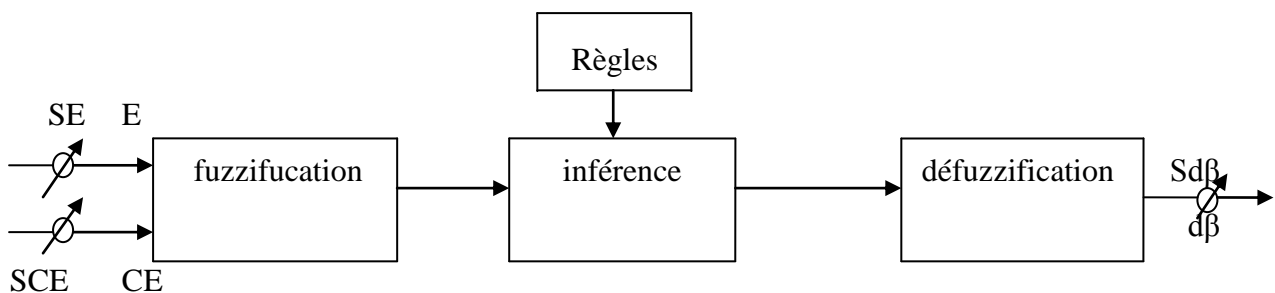
Plusieurs études ont montré que le rapport entre la tension optimale et celle en circuit ouvert est approximativement constante, cela est la base de l'algorithme à tension constante qui peut se traduire par [11] :

$$\frac{V_{mp}}{V_{oc}} = K_{cv} < 1 \quad (III.4)$$

L'algorithme CV-MPPT est simple à mettre en œuvre, le panneau solaire est temporairement isolé du MPPT pour faire la mesure de la tension du circuit ouvert  $V_{OC}$ . Ensuite, le MPPT corrige le point de fonctionnement en utilisant l'équation (III.4). Cette opération est répétée constamment pour mettre à jour la position du point de fonctionnement. L'inconvénient de cette méthode c'est qu'il est difficile de choisir une valeur optimale de  $K_{cv}$  bien que cette méthode soit simple.

### III.6.5 MPPT à base de logique floue :

Récemment, la commande par la logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point de puissance maximum MPPT, qui se reposent sur l'observation en temps réel de deux critères qui sont l'écart  $E$  de  $\frac{dP}{dV}$  par rapport à la valeur recherchée (c'est-à-dire 0) est la variation  $CE$  de cette écart. Dans chacune de ces démarches, un convertisseur est utilisé. Ces critères après inférence permettent de construire une valeur  $\beta$  qui est le rapport cyclique du convertisseur. Cette valeur  $\beta$  mené à la détermination de la valeur  $V_{MPPT}$  à chaque instant. Ainsi que  $E$  et définie comme étant l'écart entre  $\frac{dP}{dI}$  et la valeur recherchée  $\frac{dP}{dI} = 0$ . Cette dernière valeur correspond à l'unique extremum de la courbe  $p = f(I)$ . Cet extremum est un maximum. Plus  $E$  est positif, plus la valeur de  $P$  croit. Inversement, plus  $E$  est négatif, plus la valeur de  $P$  décroît. Enfin quand  $E$  tend vers 0, la valeur de  $P$  tend vers son maximum, le MPP.



SE, SCE : gain d'entrée, Sd $\beta$  : gain de sortie.

**Figure III.6** : Schéma explicatif de l'algorithme en logique floue [7].

La mise en place d'un contrôleur flou se réalise en trois étapes, qui sont :

La fuzzification, l'inférence et la défuzzification.

La fuzzification est de transformer les variables d'entrée en variables linguistiques ou variables floues.

L'inférence est une étape qui consiste à définir un rapport logique entre les entrées et la sortie.



Finalement la difuzzification fait l'opération inverse de la fuzzification.

### III.7 Commande basée sur la passivité :

La commande basée sur la passivité définit une méthode de synthèse d'un contrôleur qui stabilise le système étudié en le rendant passif. Ceci en prenant une fonction d'énergie désirée ayant un minimum au point de fonctionnement désirée en injectant des gains d'amortissement dans le système.

#### III.7.1 L'origine de la passivité :

La passivité est l'aptitude d'un système à dissiper son énergie intrinsèque (en boucle ouvert) ou extrinsèque (en boucle fermée). L'idée de la passivité est motivée par certains systèmes physiques, notamment les circuits électriques, ou ils ont des propriétés de dissipation d'énergie dans le même sens qu'un circuit électrique [5].

Bien qu'ancienne dans sa formulation, la commande passive a récemment été introduite dans le champ de l'électronique de puissance par Sira-Ramirez.

Succinctement, elle est basée sur le contrôle de la convergence de l'énergie de l'erreur vers une valeur nulle.

Sa robustesse, bien que prouvée pour certains systèmes mécaniques, n'est pas assurée en électronique de puissance car l'approche originale subit des adaptations inhérentes à la structure des convertisseurs [29].

#### III.7.2 Définition du système passif :

La passivité peut être définie comme suit [30]:

Soit un système (S) qui peut être considéré comme un opérateur «  $H_s$  » tel que:

$$H_s : L_{2e}^n \rightarrow L_{2e}^n$$

$$u_s \rightarrow y_s \quad \text{ou } L_{2e} \text{ espace de norme quadratique,}$$

$u_s$  ;  $y_s$  vecteurs d'entrée et de sortie respectivement.

**Passivité stricte a la sortie :** On dit  $H_s$  est strictement passif à la sortie si et seulement si  $\exists \beta_s \in \mathcal{R}, \delta_{s0} > 0$  et  $T_s \geq 0$  tel que:

$$\langle H_s u_s, u_s \rangle_{T_s} \geq \delta_{s0} \|H_s u_s\|_{T_s} + \beta_s, \forall u_s \in L_{2e}^n \quad (\text{III. 5})$$

Ou :

$$\langle H_s u_s, u_s \rangle = \int_0^{T_s} H_s u_s^T(\sigma) u_s(\sigma) d\sigma$$

$$y_s = H_s u_s; \|H_s u_s\|_{T_s} = \left[ \int_0^{T_s} y_s^T(\sigma) y_s(\sigma) d\sigma \right]^{1/2}; \|u_s\|_{T_s} = \left[ \int_0^{T_s} u_s^T(\sigma) u_s(\sigma) d\sigma \right]^{1/2}$$

### III.7.3 Système hamiltonien commandé par port (HCP) :

Le système hamiltonien commandé par port, permet de décrire de manière naturelle les structures physiques et les propriétés fondamentales des systèmes (lois de conservation, termes de dissipation...). La modélisation sous forme HCP incorpore les concepts d'énergie et de flux d'énergie et englobe un ensemble plus large de systèmes. La structure de ces modèles permet d'identifier des caractéristiques intéressantes (structures d'interconnexion et d'amortissement) des systèmes physiques qui peuvent être exploitées dans la synthèse de la commande.

Considérons le système non linéaire affine en la commande suivante [31]:

$$\dot{x} = f(x) + gE \quad (\text{III.6})$$

où  $x \in R^n$  est le vecteur d'état,  $f(x)$  et  $g$  sont des fonctions,  $E \in R^m$  est le vecteur d'entrée (commande). L'approche HCP consiste, tout d'abord, à identifier la fonction d'énergie naturelle  $H(x)$  du système, puis de réécrire le système non linéaire (III.6) en fonction du gradient de la fonction d'énergie.

$$\nabla H(x) = \left[ \frac{dH(x)}{x_1}, \frac{dH(x)}{x_2}, \dots, \frac{dH(x)}{x_n} \right]^T \quad (\text{III.7})$$

Ainsi, la forme HCP du système initial (III.6) est

$$\dot{x} = [J(u) - R] \nabla H(x) + gE \quad (\text{III.8})$$

$J(u)$  est une matrice antisymétrique  $J(u) = -J^T(u)$  de dimension  $n \times n$  représentant les interconnexions entre les états, et  $R$  est une matrice symétrique semi définie positive  $R = R^T \geq 0$  représentant l'amortissement naturel du système.

### III.8 Commande basée sur la passivité et l'assignation d'interconnexion et d'amortissement (CBP-AIA) pour un convertisseur continu-continu élévateur:

#### III.8.1 Modèle HCP d'un convertisseur continu-continu élévateur:

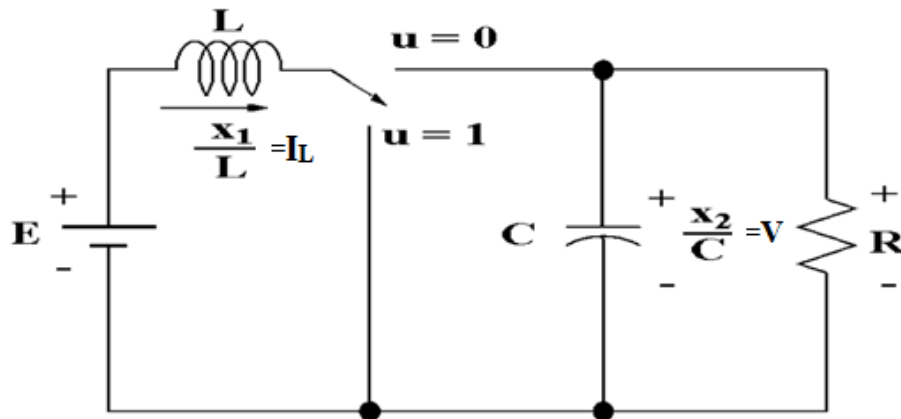


Figure III.7 : Circuit électrique du hacheur élévateur.

Les équations dynamiques de ce convertisseur élévateur sont:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{1}{C}ux_2 + E \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{RC}x_2 + \frac{1}{L}ux_1 \end{cases} \quad (III.9)$$

Ou

$x_1 = L * i_L$ : est le flux de l'inductance et  $i_L$  son courant.

$x_2 = C * V$ : la charge dans la capacité et  $V$  la tension au borne de  $C$ .

$u=1-\beta$  : le signale de commande continue et  $\beta$  le rapport cyclique.

La fonction d'énergie en boucle ouverte est donnée par la relation suivante [32]:

$$H(x) = \frac{1}{2L} x_1^2 + \frac{1}{2C} x_2^2 \quad (III.10)$$

Le modèle hamiltonien commandé par port du convertisseur élévateur (boost) à la forme suivante :

$$\dot{x} = [J(u) - R] \frac{\partial H(x)}{\partial x} + gE \quad (III.11)$$

A partir de système d'équation (III.9) en déduit les matrices suivantes:

$$J(u) = \begin{bmatrix} 0 & -u \\ u & 0 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R} \end{bmatrix}, \quad g = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

### III.8.2 Calcul de la commande CBP-AIA :

L'objectif est de calculer la CBP-AIA définie par le signal suivant :

$$U = \theta(x) \quad (III.12)$$

Qui assure au système une nouvelle structure HCP en boucle fermée (B.F) de la forme :

$$\dot{x} = [J_d(\theta(x)) - R_d] \frac{\partial H_d}{\partial x}(x) \quad (III.13)$$

$J_d$  matrice d'interconnexions en BF,  $R_d$  matrice d'amortissement en BF et  $H_d(x)$  énergie en BF.

La commande  $u$  stabilise  $x$  autour du point d'équilibre  $x_*$ , correspondant au minimum de  $H_d(x)$ , c'est-à-dire :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H_d}{\partial x}(x_*) = 0 \\ \frac{\partial^2 H_d(x_*)}{(\partial x \partial x^T)} \geq 0 \end{array} \right. \quad (III.14)$$

Les nouvelles matrices du modèle HCP (III.13) sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} J_d = -J_d^T \\ R_d = R_d^T \geq 0 \\ H_d(x) > 0, \forall x \neq 0 \end{array} \right. \quad (III.15)$$

Tel que :

$$J_d = J \quad (III.16)$$

$$R_d = R + R_a \geq 0 \quad (III.17)$$

$$H_d(x) = H(x) + H_a(x) \quad (III.18)$$

Où  $J_a$ ,  $R_a$  et  $H_a(x)$  sont respectivement, les matrices d'interconnexion, d'amortissement et l'énergie ajoutées par le contrôleur.

L'égalisation de (III.13) et (III.11) en tenant compte de (III.16) et (III.18)

$$[J_d(\theta(x)) - R_d]K(x) = R_a \frac{\partial H(x)}{\partial x} + gE \quad (III.19)$$

On pose :

$$K(x) = \frac{\partial H_a(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\theta(x)} \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC}x_2 \\ -\frac{1}{L}R_ax_2 - E + \frac{R_a}{RC}\frac{x_2}{\theta(x)} \end{bmatrix} \quad (III.20)$$

$$\frac{\partial K(x)}{\partial x} = \left[ \frac{\partial K(x)}{\partial x} \right]^T \quad (III.21)$$

La résolution de (III.20) par le logiciel de calcul symbolique MAPLE donne la solution suivante [32]:

$$H_a = c_1 x_2^{2(1-\alpha)} - (c_2 + c_3 x_1) x_2^{1-\alpha} \quad (III.22)$$

Les constantes positives  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  sont données par [32] :

$$c_1 = \frac{1}{2} \frac{Lx_{2*}^{2\alpha}}{u_*^2 R^2 C^2}, \quad c_2 = \frac{ELx_{2*}^\alpha}{RCR_\alpha u_*}, \quad c_3 = \frac{x_{2*}^\alpha}{u_* RC} \quad (III.23)$$

Et  $\alpha \in ]-1, 1[$ .

### III.8.3 Détermination du point d'équilibre désiré $x_*$ :

Notre objectif est de régler la tension au borne de la capacité à une valeur désirée ( $V_* > E$ ) [32].

A l'équilibre  $\dot{x}_1 = \dot{x}_2 = 0$ , et  $u = u_*$

De (III.9) on a :

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{1}{C} u_* x_{2*} + E = 0 \\ -\frac{1}{RC} x_{2*} + \frac{1}{L} u_* x_{1*} = 0 \end{array} \right. \quad (III.24)$$

$$(III.25)$$

A partir du circuit électrique on a la tension de sortie :

$$V = \frac{x_2}{C} \Rightarrow x_2 = CV$$

$$\text{A l'équilibre} \quad x_{2*} = CV_* \quad (III.26)$$

A partir de l'équation (III.24) on déduit :

$$x_{2*} = \frac{EC}{u_*} \Rightarrow u_* = \frac{EC}{x_{2*}} \quad (III.27)$$

On remplace (III.26) dans (III.27) on obtient :

$$u_* = \frac{E}{V_*} \quad (III.28)$$

On remplace (III.26) et (III.28) Dans (III.25) on a:

$$x_{1*} = \frac{L}{RE} V_*^2 \quad (III.29)$$

On tenant compte de la condition (III.14),

$$\left(\frac{\partial H_d(x)}{\partial x}\right)_{x=x^*} = 0 \Leftrightarrow K(x) = \left(\frac{\partial H(x)}{\partial x}\right)_{x=x^*} = \left(-\frac{\partial H_d(x)}{\partial x}\right)_{x=x^*}$$

On insère (III.20) dans (III.21) on obtient l'EDP simplifié suivante :

$$\frac{\partial \theta}{\partial x_2}(x_2) = \frac{\alpha}{x_2} \theta(x_2)$$

On résolvant l'EDP précédant par la méthode de séparations de variables on obtient le signal

$$u = \theta(x) = C_1 * x_2^\alpha \quad \text{Tel que } C_1 \text{ est une constante}$$

Qui est obtenu a partir de cette condition suivante :

$$\left(\frac{\partial^2 H_d(x)}{\partial x^2}\right)_{x=x^*} \geq 0 \Leftrightarrow \left(\frac{\partial^2 H(x)}{\partial x^2}\right) \geq \left(-\frac{\partial^2 H_d(x)}{\partial x^2}\right)_{x=x^*}$$

$$\text{Avec} \quad C_1 = \frac{u_*}{(x_2^*)^\alpha}$$

le signal de commande  $u$  du convertisseur Boost est [32]:

$$u = u_* \left(\frac{x_2}{x_2^*}\right)^\alpha \quad (III.30)$$

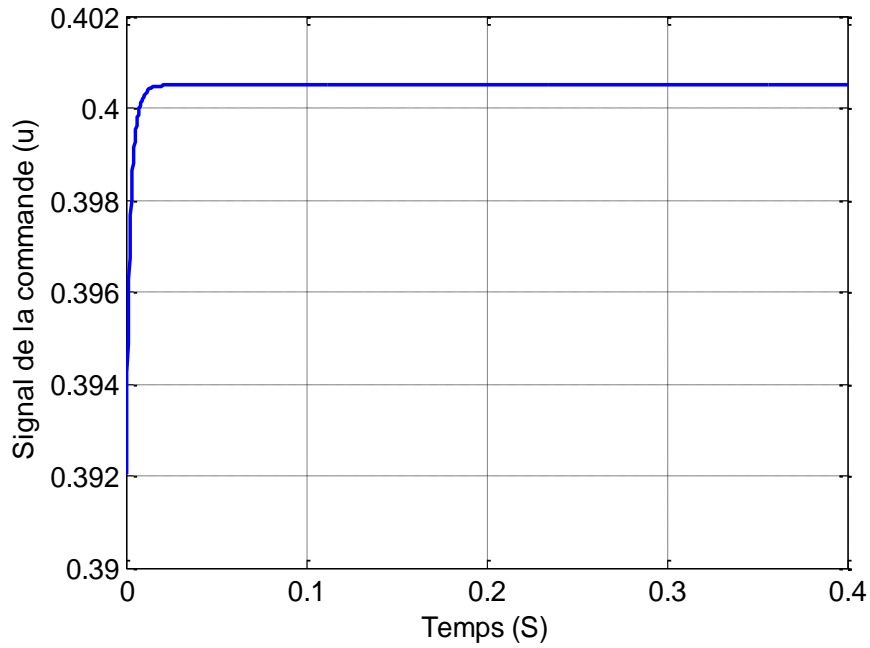
### III.9 Teste de simulation de la CBP-AIA appliqué au convertisseur élévateur:

Afin de valider la commande calculée, on a effectué des tests de simulation avec le logiciel de simulation Matlab Simulink, avec les paramètres du circuit :  $C = 20\mu F$ ;  $R = 30\Omega$ ;  $L = 20mH$ ;  $E = 15V$

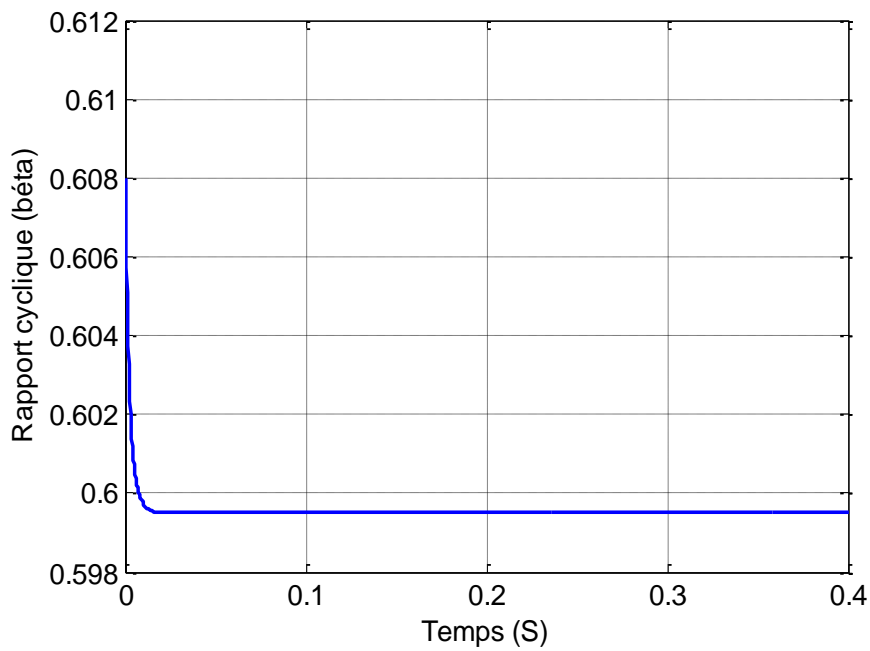
Les figures (III.8), (III.9) et (III.10) donnent respectivement le signal de commande  $u$ , le rapport cyclique  $\beta=1-u$  et la tension de sortie  $V$  du convertisseur Boost pour une tension de consigne  $V^*=37.5V$ .

On remarque que la tension de sortie du convertisseur Boost suit la tension de consigne et la commande  $u$  se stabilise à une valeur  $u=0.4005$  ainsi que le rapport cyclique.

Les figures (III.11), (III.12) et (III.13) représentent le signal de commande ( $u$ ), le rapport cyclique ( $\beta$ ) et la tension de sortie ( $V$ ) du convertisseur Boost pour un saut de consigne de (37.5V à 75V). On constate que la tension de sortie ( $V$ ) suit la tension de consigne et la commande ( $u$ ) se stabilise à son point d'équilibre ainsi que le rapport cyclique qui est le complémentaire de ( $u$ ) par rapport à 1.

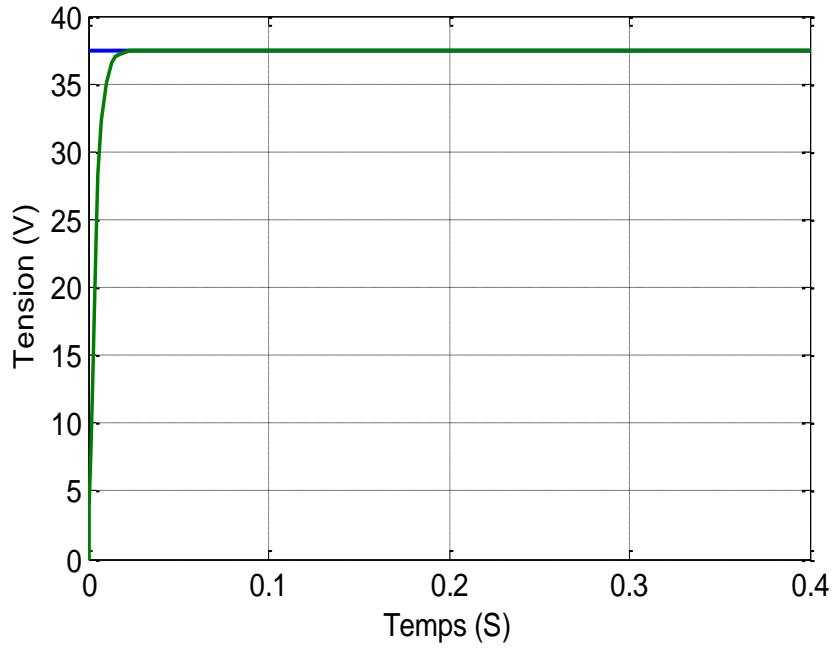


**Figure III.8** : Signal de commande ( $u$ ) pour une consigne (37.5V).

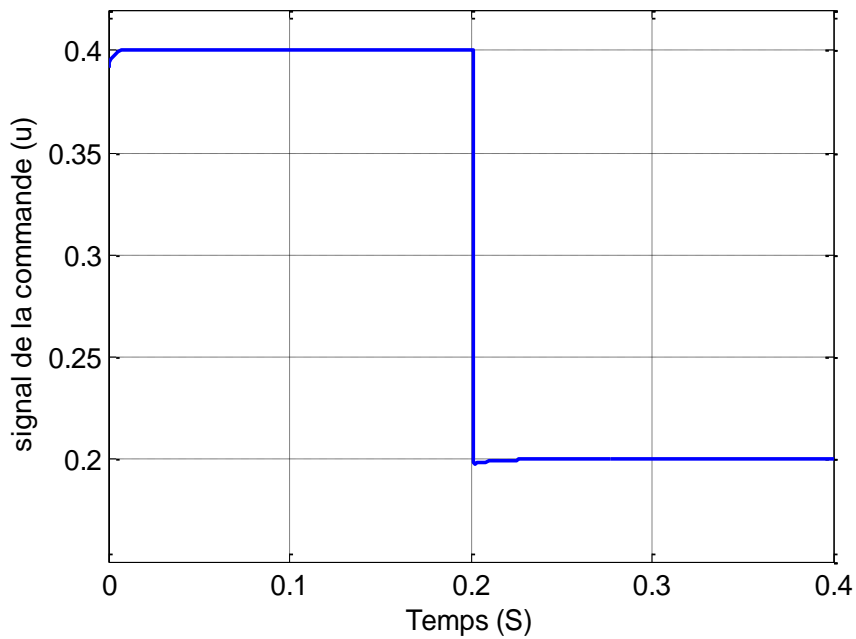


**Figure III.9** : Rapport cyclique ( $\beta$ ) pour une consigne (37.5 V)

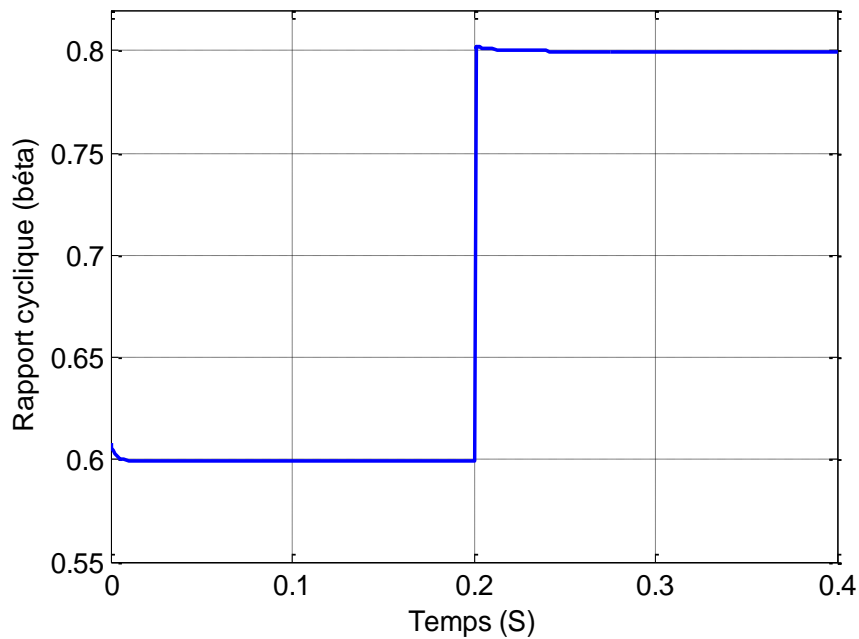




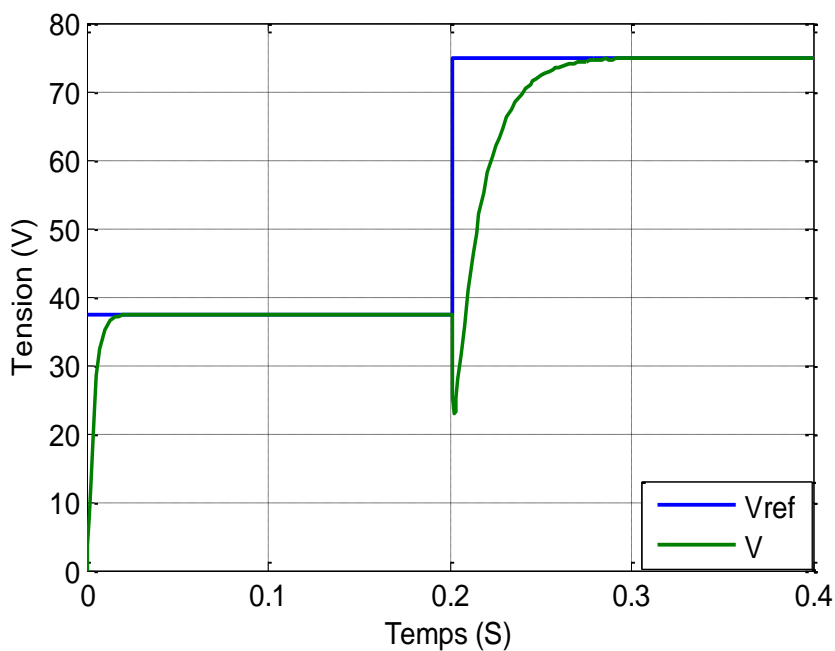
**Figure III.10** : Réponse de la tension de sortie du convertisseur Boost avec la tension de consigne 37.5V.



**Figure III.11** : Signal de commande pour un saut de consigne (37.5V, 75V)



**Figure III.12** : Rapport cyclique ( $\beta$ ) pour un saut de consigne (37.5V, 75V)



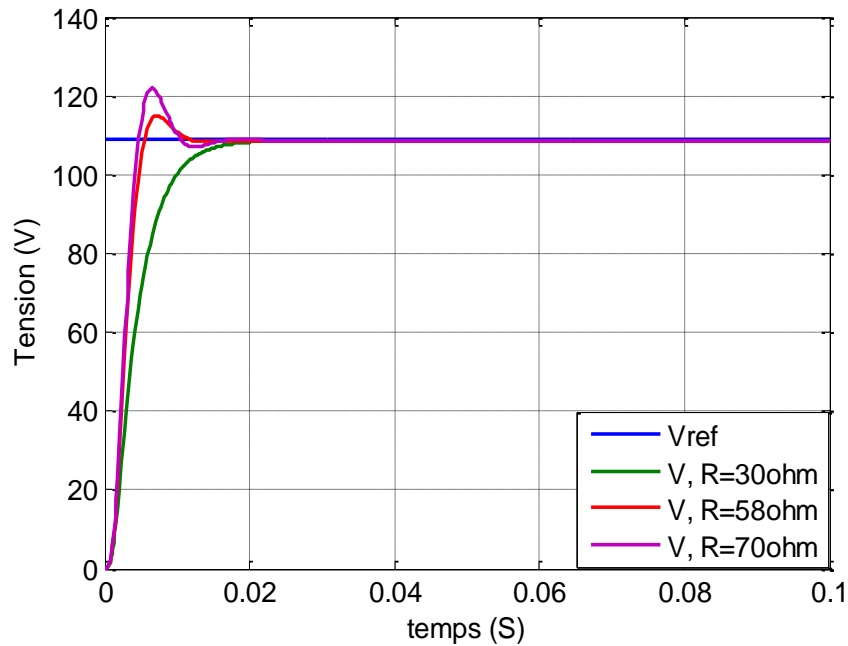
**Figure III.13** : Réponse de la tension de sortie pour un saut de consigne (37.5V, 75V)

### III.10 Effet de la variation de la charge sur la tension de sortie :

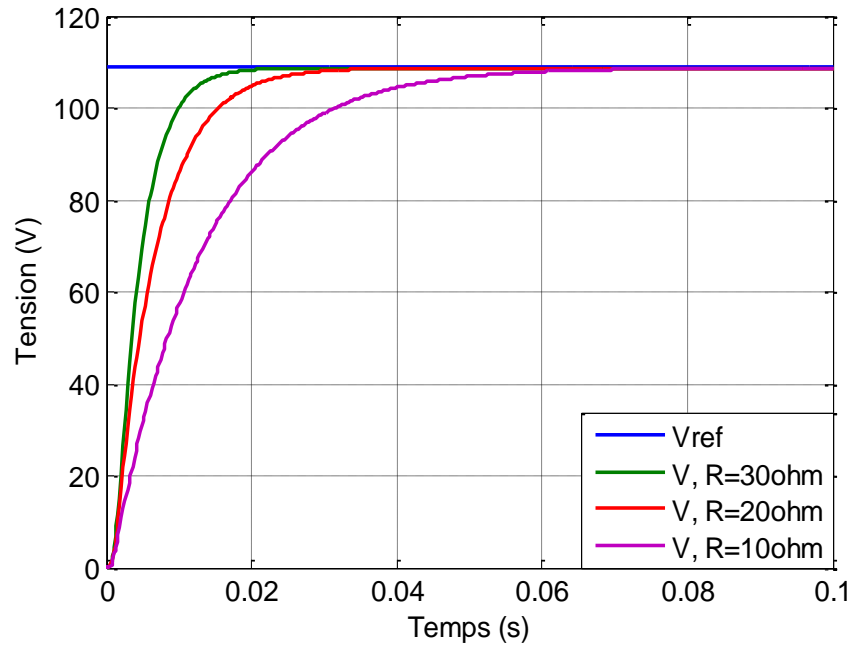
Les figures (III.14) et (III.15) représentent respectivement les tensions de sortie du convertisseur Boost pour une tension de consigne de 108.75V et des variations de la charge ( $30\Omega$ ,  $58\Omega$ ,  $70\Omega$ ) et ( $10\Omega$ ,  $20\Omega$ ,  $30\Omega$ ). On remarque que pour une résistance de  $58\Omega$  le temps de réponse de la tension de sortie est faible avec un minimum dépassement ( $<5\%$ ), et pour des

résistances supérieur à  $58\Omega$  le dépassement est  $>5\%$ . Ainsi que pour des résistances inférieure à  $30\Omega$  on constate que la tension de sortie ne représente pas de dépassements, mais le temps de réponse augmente en diminuant la résistance.

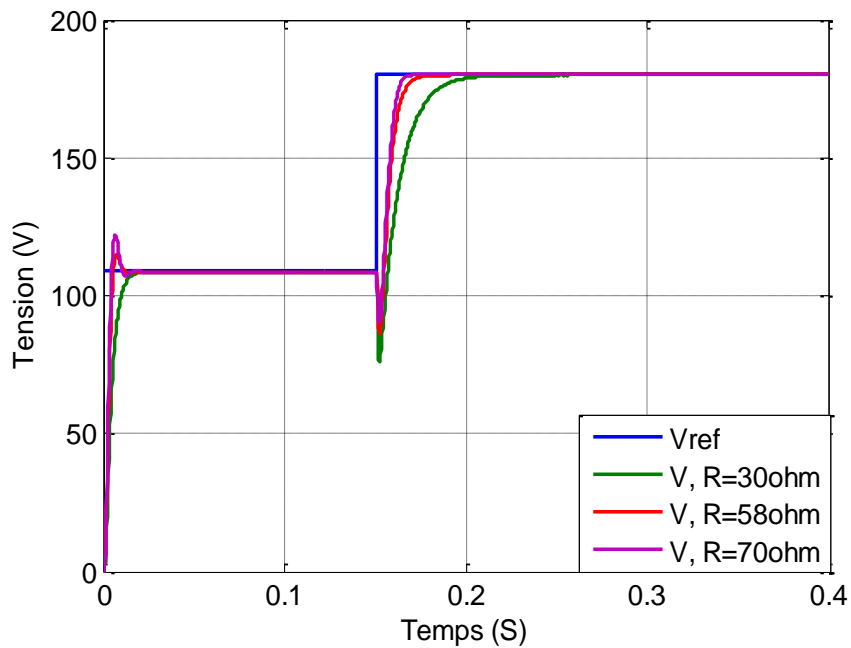
Les figures (III.16), (III.17) donnent les tensions de sortie pour un saut de consigne (108.75V, 180V) et une variation de charge ( $30\Omega$ ,  $58\Omega$ ,  $70\Omega$ ) et ( $10\Omega$ ,  $20\Omega$ ,  $30\Omega$ ). On remarque que la tension de sortie suit la consigne pour les différentes variations de la résistance.



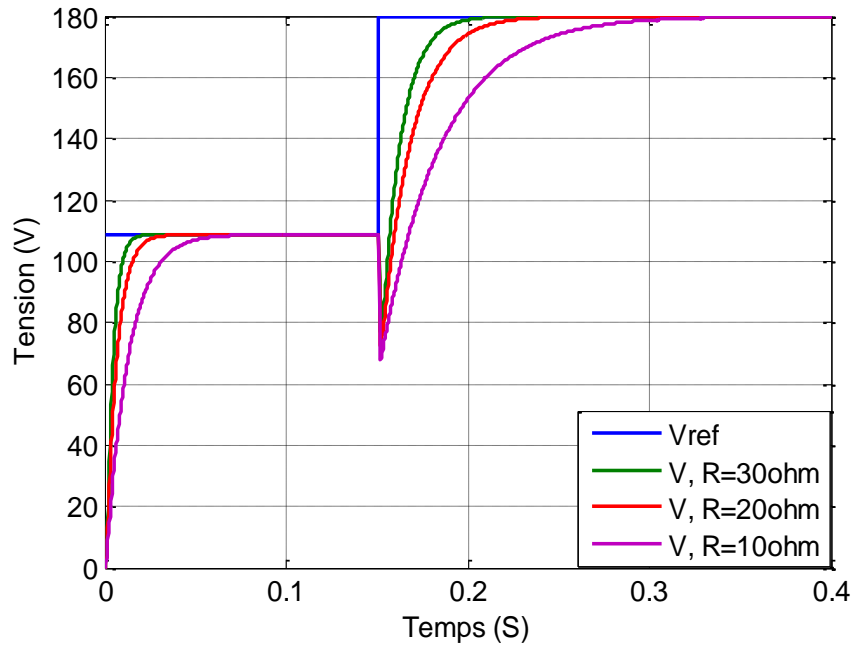
**Figure III.14** : Réponse de la tension de sortie pour une tension de consigne et une variation de charge croissante.



**Figure III.15** : Réponse de la tension de sortie pour une tension de consigne et une variation de charge décroissante



**Figure III.16** : Réponse de la tension de sortie pour un saut de consigne et à une variation de charge croissante



**Figure III.17** : Réponse de la tension de sortie pour un saut de consigne et à une variation de charge décroissante.

### III.11 Tests de simulation de la CBP-AIA implémenté sur le GPV

On a effectué des tests de simulation, pour des variations des paramètres climatique (température et éclairement).

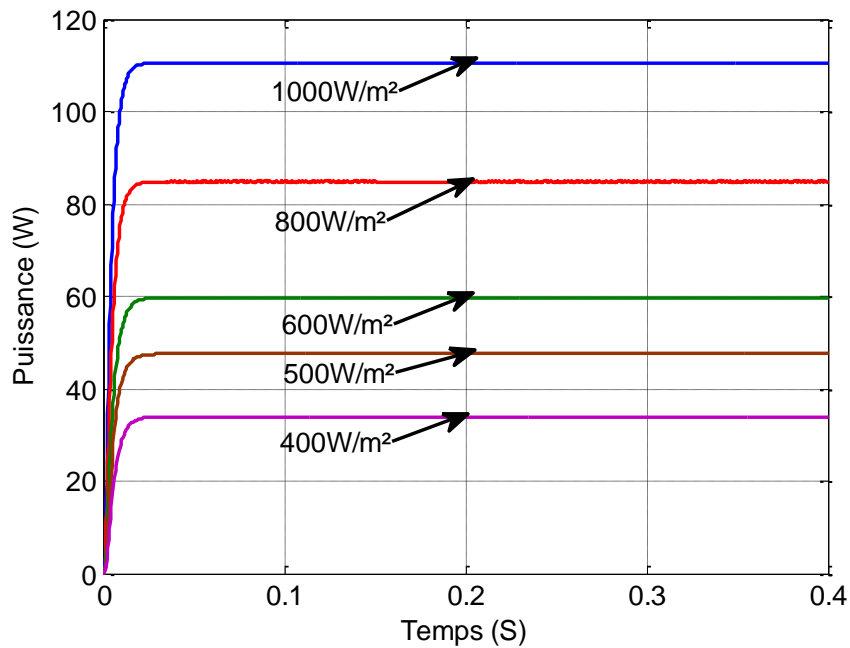
Les figures (III.18), (III.19) et (III.20) représentent la puissance de sortie du convertisseur Boost pour des variations de l'éclairement, la température et l'éclairement-température simultanément.

Les figures (III.21), (III.22) et (III.23) donnent la tension de sortie du panneau, la tension de sortie du convertisseur et la puissance de sortie du convertisseur Boost respectivement pour une variation brusque de l'éclairement ( $200\text{W/m}^2 - 1000\text{W/m}^2$ ).

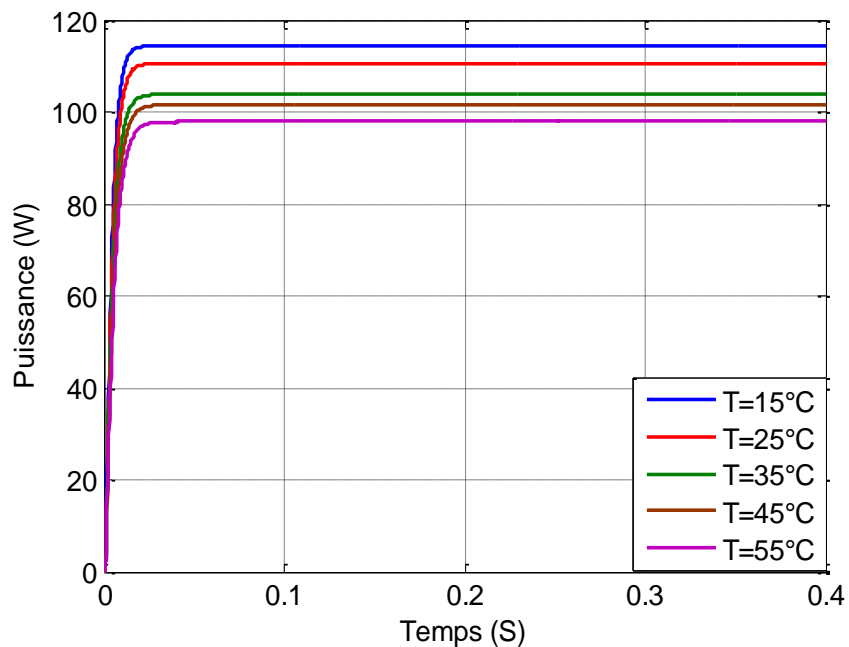
Les figures (III.24), (III.25), (III.26) représentent la tension de sortie du panneau, la tension de sortie du convertisseur et la puissance de sortie du convertisseur Boost respectivement pour une variation de l'éclairement ( $200\text{W/m}^2 - 6000\text{W/m}^2 - 1000\text{W/m}^2$ ).

On conclut à partir de ces tests que pour chaque valeur de l'éclairement ou de la température la puissance de sortie du convertisseur atteint le maximum et que la commande assure la poursuite de la puissance optimale par contre si c'est une variation brusque de l'éclairement au

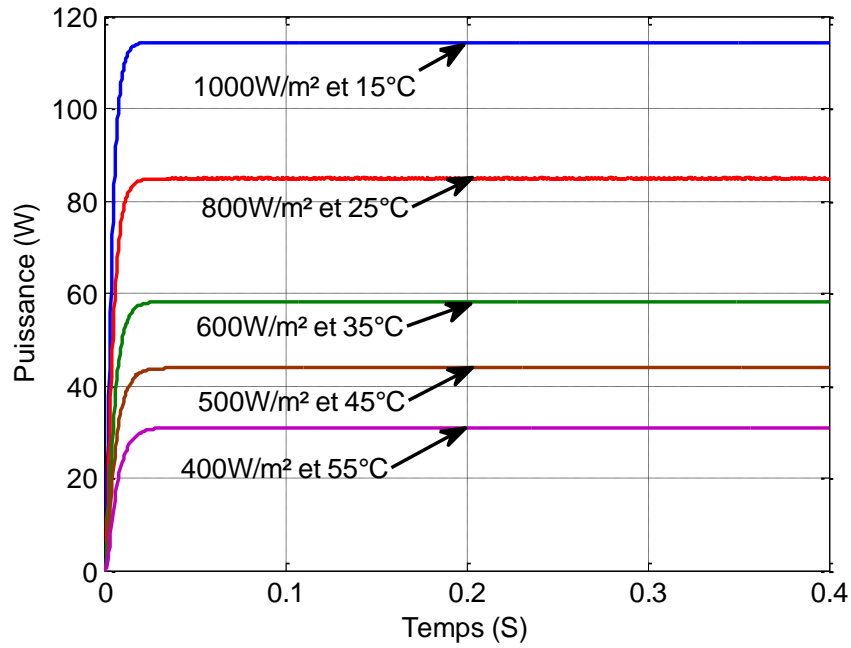
de la température la puissance de sortie n'atteint pas la puissance optimale ce qui nécessite une MPPT adapté à la CBP-AIA utilisée.



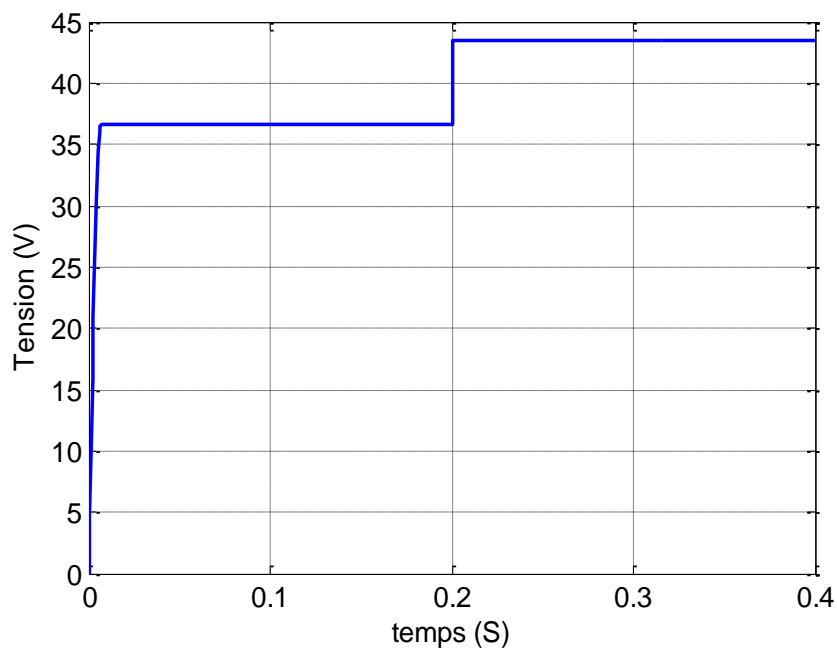
**Figure III.18** : Réponse de la puissance de sortie à une variation de l'éclairement.



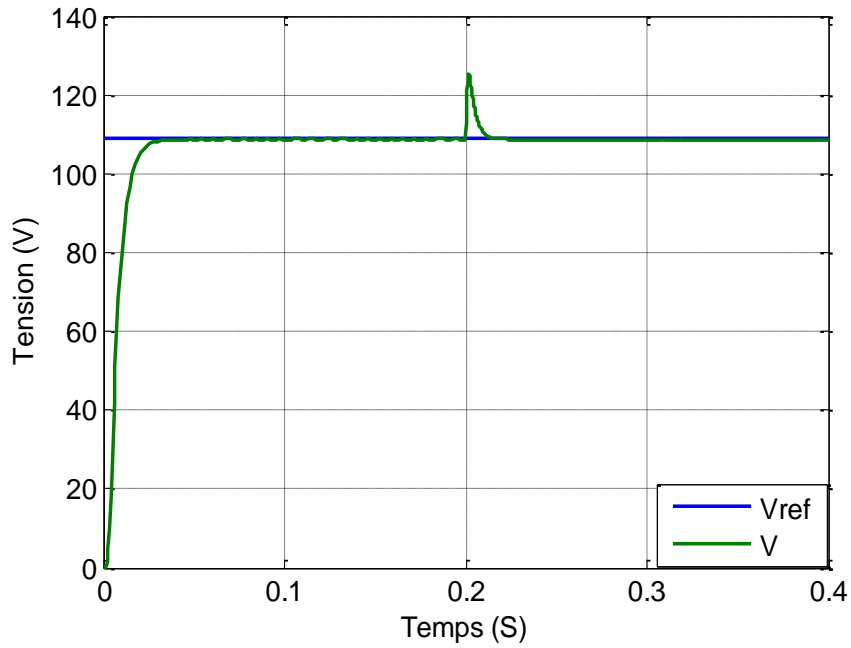
**Figure III.19** : Réponse de la puissance pour une variation de la température.



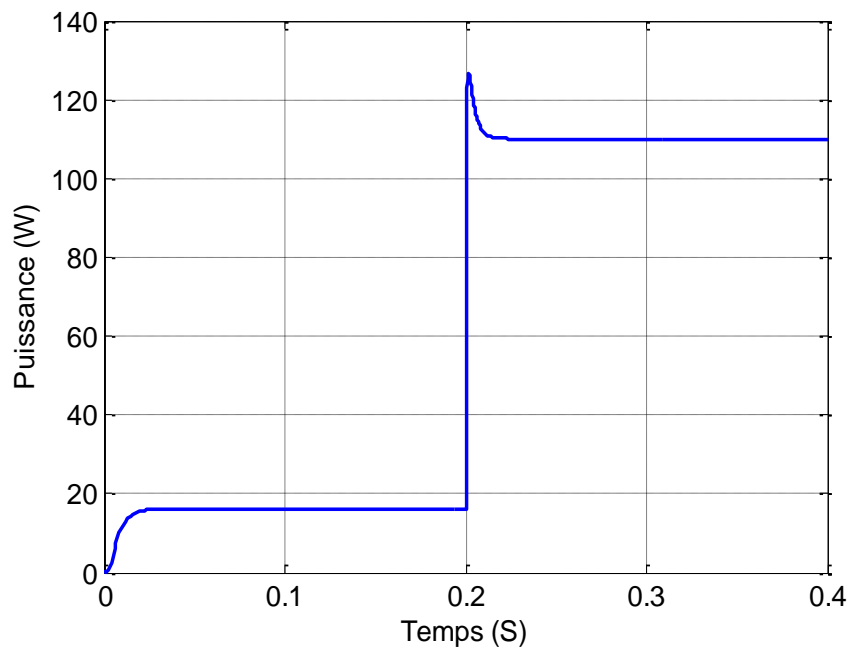
**Figure III.20** : Réponse de la puissance de sortie pour une variation de la température et de l'éclairement.



**Figure III.21** : Tension du panneau pour une variation brusque de l'éclairement (200W/m<sup>2</sup> - 1000W/m<sup>2</sup>).

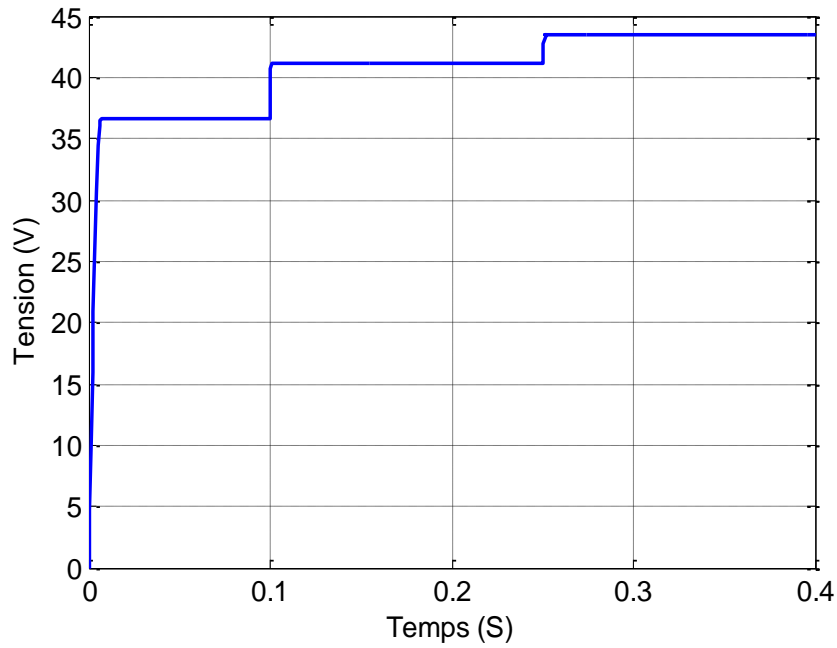


**Figure III.22** : Réponse de la tension de sortie pour une variation brusque de l'éclairement ( $200\text{W}/\text{m}^2 - 1000\text{W}/\text{m}^2$ ).

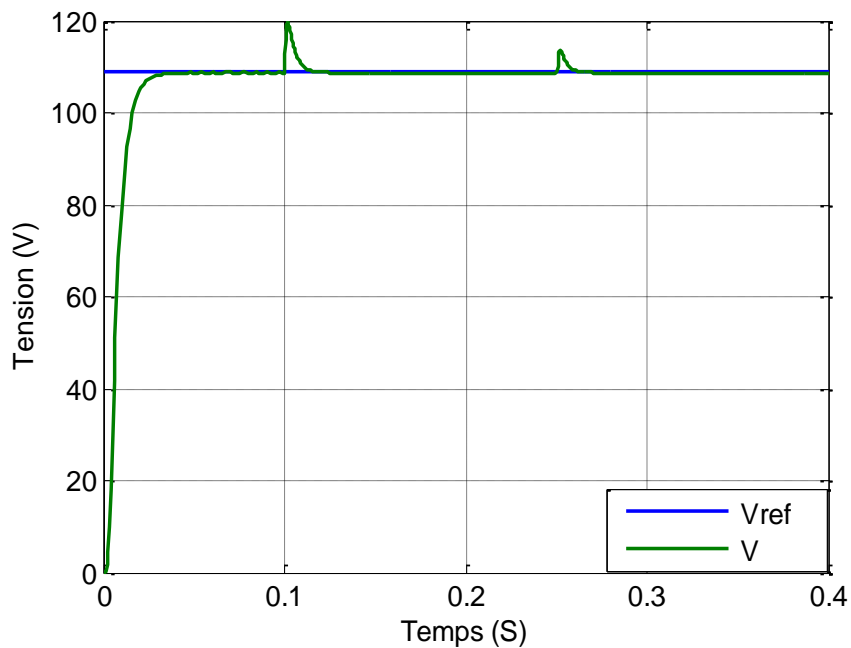


**Figure III.23** : Réponse de la puissance de sortie pour une variation brusque de l'éclairement ( $200\text{W}/\text{m}^2 - 1000\text{W}/\text{m}^2$ ).

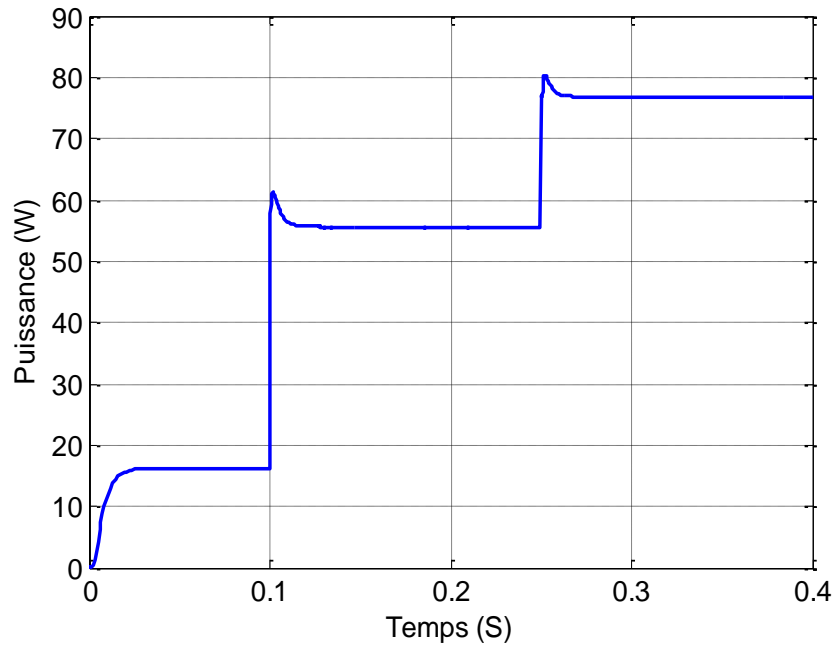




**Figure III.24** : Tension du panneau pour des variations brusques de l'éclairement ( $200\text{W/m}^2 - 600\text{W/m}^2 - 1000\text{W/m}^2$ ).



**Figure III.25** : Réponse de la tension de sortie pour des variations brusques de l'éclairement ( $200\text{W/m}^2 - 600\text{W/m}^2 - 1000\text{W/m}^2$ ).



**Figure III.26 :** Réponse de la puissance de sortie pour des variations brusques de l'éclairement ( $200\text{W/m}^2$  -  $600\text{W/m}^2$  -  $1000\text{W/m}^2$ )

### III.12 Interprétation des résultats :

- Les figures (III.10) et (III.13) donnent la réponse de la commande à des consignes fixes puis à des sauts de consignes respectivement, on constate que la tension de sortie du convertisseur Boost suit la tension imposé.
- Les figures (III.14) et (III.15) représentent la réponse de la tension de sortie à une consigne fixe et pour des variations de la charge supérieur à  $30\Omega$ , puis inférieur à  $30\Omega$  respectivement. On remarque que lorsqu'on varie la charge positivement à  $30\Omega$  la réponse est rapide mais le dépassement croit, et lorsqu'on varie la charge dans le sens contraire la réponse est lente et le dépassement décroît, ainsi que la tension de sortie suit la référence.
- La figure (III.18) donne la puissance à la sortie du convertisseur à une variation de l'éclairement. On voit que la puissance est proportionnel à la variation de l'éclairement ce qui est une réalité pour la caractéristique du générateur PV.
- La figure (III.19) représente la puissance à la sortie à une variation de la température. On remarque que de plus en plus la température augmente la puissance diminue qui correspond à la caractéristique du générateur PV.

- La puissance à la sortie du convertisseur à une variation de la température et de l'éclairement est représentée à la figure (III.20). On constate que la puissance varie proportionnellement à la variation de la température et de l'éclairement.
- Les figures (III.21), (III.22) et (III.23) donnent la réponse de la commande à une variation brusque de l'éclairement, on remarque que lors de la variation de l'éclairement de  $200\text{W/m}^2$  à  $1000\text{W/m}^2$  la puissance atteint son maximum.
- les réponses du système à une variation de l'éclairement de  $200\text{W/m}^2$  à  $600\text{W/m}^2$  puis à  $1000\text{W/m}^2$  sont données par Les figures (III.24), (III.25) et (III.26). On constat que pour une variation brusque de l'éclairement la puissance à la sortie du convertisseur n'atteint pas le maximum, ce qui nécessite l'utilisation d'une autre MPPT mieux adapté à la CBP-AIA.

### III.13 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes MPPT utilisées pour les systèmes photovoltaïques et leurs principes de fonctionnement. On a présenté aussi le modèle HCP du convertisseur Boost et la méthode de calcul de la commande basée sur la passivité et l'assignation d'interconnexion et d'amortissement.

On a aussi présenté les différents tests sur la robustesse de la commande par rapport aux variations climatique et de la charge qui nous permettent de conclure que la réponse de la commande suit la référence mais la poursuite de la puissance optimale n'est pas assurée pour certaines variations brusques des conditions climatiques, a cause de la MPPT utilisé, ce qui nécessite un autre choix bien adapté à la CBP-AIA, mais la tension de sortie suit la référence.

## Conclusion générale :

Le travail présenté porte sur la modélisation et la simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque (PV) contrôlé par une commande basée sur la passivité et l'assignation d'interconnexion et d'amortissement associée à un algorithme MPPT pour assuré la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque (GPV). Nous avons d'abord décrit et modélisé un générateur photovoltaïque, puis on a étudié son comportement vis à vis des variations climatique. Nous avons réalisé des simulations sous Matlab-Simulink pour différente cas des paramètres climatiques, à savoir la variation de la température et la variation de l'éclairement, et nous avons tracé les caractéristiques courant-tension  $I(V)$  et puissance-tension  $P(V)$ .

Ensuite nous avons fait une introduction aux convertisseurs statiques utilisés dans les systèmes photovoltaïques à savoir le hacheur et l'onduleur, et on a détaillé le hacheur élévateur car il est utilisé dans notre chaine de conversion.

On a décrit le mécanisme de la poursuite pour l'extraction de la puissance maximale sous différentes conditions de fonctionnement. On a présenté les différentes méthodes MPPT qui sont utilisées dans les systèmes photovoltaïques, (l'algorithme d'incrémentation des conductances, la méthode de perturbation et observation ... etc.).

Nous avons aussi calculé une commande basée sur la passivité et l'assignation d'interconnexion et d'amortissement (CBP-AIA) qui est le but de notre travail. La (CBP-AIA) se base essentiellement sur la représentation de l'énergie du convertisseur étudié (élévateur). La (CBP-AIA) force le comportement du convertisseur vers la dynamique désirée définit à l'aide de l'utilisation de la propriété de la passivité du modèle du convertisseur statique Boost.

Après le calcul de la (CBP-AIA) en suivant les étapes de mise en œuvre, nous avons effectué des tests pour s'assurer de la performance de la commande, et on a obtenu des résultats de simulation très concluants, de point de vue rapidité et stabilité du système en boucle fermée, ce qui confirme la théorie de Lyapunov utilisée pour le calcul de loi de la commande du convertisseur.

Les résultats de simulation montrent que la poursuite de la tension de référence est toujours assurée quelque soit la variation des paramètres d'entrée du générateur photovoltaïque qui sont la température et l'éclairement (T& $\Psi$ ).

Pour les puissances a la sortie on constate que cette dernière est assurée pour des valeurs constantes de l'éclairement et de la température, mais pour certains variations brusques de la température et ou de l'éclairement ( $T&\Psi$ ), on constate que la puissance de sortie est inférieure a la puissance d'entrée a cause de la MPPT choisie, ce qui nécessite l'utilisation d'une MPPT bien adapté a la (CBP-AIA).

Or la (CBP-AIA) est robuste par rapport aux variations de la charge et présente des performances très appréciables (stabilité et rapidité) et le suivi de la tension de référence.

En perspective il sera intéressant d'identifier la cause principale de la perte de puissance en sortie pour certaines variations brusques des conditions climatiques.

## Références bibliographique :

- [1] OTHMANE BENSEDDIK, FATHI DJALOU D « étude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque » mémoire de master, université kasdi merbah-Ouargla 2011/2012
- [2] AMEZIENE SEDEK : « implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien » mémoire de magistère, Batna juillet 2009.
- [3] [http://lionel.reynaud.free.fr/bdpv/documents/puissance\\_installation](http://lionel.reynaud.free.fr/bdpv/documents/puissance_installation).
- [4] BELHADJE MOHAMMED « modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome », mémoire de magistère, centre universitaire de Bechar 2008.
- [5] M<sup>R</sup>. GANAH REDHA ET M<sup>R</sup>. BOUKANDOUL ABDALHALIME « commande base sur la passivité d'un générateur photovoltaïque » mémoire d'ingénierie, Bejaïa 2012.
- [6] <http://energies2demain.com/solaire/photovoltaique/fabrication-des-cellules-photovoltaiques-au-silicium-cristallin>
- [7] CELINE BERNARD, CAROLINA SEBRAO – OLIVEIRA, BERNARD LAVAL, CLEMENT VAUDOUEUR « panneau photovoltaïque et algorithme MPPT a base de logique floue » Rapport rédigé dans le cadre de l'uv ba04 –énergies renouvelables Automne 2009 -responsable uv : fabrice locment.
- [8] ABDASLAM HABAREK « les panneaux solaire » mémoire scientifique, université paris-sud, 15 décembre 2009.
- [9] ABBASSEN LYES « étude de la connexion au réseau électrique d'une centrale pv » mémoire magistère, 2011.
- [10] HELALI KAMILIA « modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative ». Mémoire de magistère, Tizi-Ouzou.2011.
- [11] BOUKHERS DJAMIL « optimisation d'un système photovoltaïque application au pompage » mémoire magistère, université mentouri de Constantine, 2007.
- [12] A. BATKA, A. ATTALI « optimization of a photovoltaic pumping system based on the optimal control theory», solar energy 84 (2010) 1273–1283.
- [13] F.BELHACHAT, C.LARBES, L. BARAZANE, S. KHARZI « command neuro-floue d'un hacheur MPPT » 4 th international conference on computer integrated manufacturing cip'2007.
- [14] ROBERT BAUSIERE, FRANÇOIS LABRIQUE, GUY SEGUIER : « les convertisseurs de l'électronique de puissance », la conversion continu-continu, volume 3.

- [15] MAITE SANCHEZ RODRIGUEZ « réalisation d'un étage d'adaptation pour générateur pv a partir d'un générateur de puissance » mémoire d'ingénierie 2008.
- [16] JACQUES LAROCHE : « électronique de puissance convertisseur »,dunod
- [17] THIERRY LEQUEU « cours d'électronique de puissance » mars 2005 – [div435] – fichier : iut-edp-9.doc
- [18] MOHAMED ASSAF, D. SESHACHALAM, D. CHANDRA, R. K. TRIPATHI <<dc-dc converters via matlab/simulink>> electrical engineering department motilal nehru national institute of technology allahabad, uttar pradesh- 211004 India
- [19] SALAH MOHAMED AIT-CHEIKH «étude, investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques » thèse de doctorat d'état, décembre 2007.
- [20] <http://iut-tice.ujf-grenoble.fr/tice-espaces/geii/jpf/wupload/file/poly-dc-dc.pdf>
- [21] AMEL ZENATI « modélisation et simulation de microsystèmes multi domaines a signaux mixtes vers le prototypage virtuel d'un microsysteme autonome » thèse doctorat, a universite joseph fourier grenoble i en 2007.
- [22] THIERRY LEQUEU « calcul des convertisseurs en électronique de puissance » projet programmation 2 a l'université française robilain, 2002.
- [23] MICHEL BENSOUAM : « cours capteurs et actionneurs » master sis 1, 21 janvier 2005.
- [24] ABDELMALEK BOULAHIA « modélisation et commande des machines électriques » mémoire magister, 2009 a Constantine.
- [25] CORINNE ALONSO « contribution a l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie » mémoire en vue de l'obtention de l'habilitation a dirigé les recherches, universite Paul Sabatier – Toulouse iii le 12 décembre 2003.
- [26] SOLTANE BELAKEHAL « conception et commande des machines a aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables » thèse doctorat, universite de Constantine le 10/06/ 2010.
- [27] CABAL CEDRIC « optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédiée à la conversion photovoltaïque » thèse doctorat, Toulouse 2008.
- [28] M. BOUKLI HACENE OMAR « conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour meilleure gestion énergétique » thèse de magistère, université abou bakre belkaid-tlemcen, décembre 2011.
- [29] ESTANISLAO OYARBIDE-USABIAGA « commande passive des structures de l'électronique de puissance » thèse pour obtenir le grade de docteur de l'institut national polytechnique de Grenoble (arrête ministériel du 30 mars 1992).

[30] ACHOURI FOUZIA « commande basée sur la passivité d'un système éolienne » mémoire magister, universite Abderrahmane mira Bejaia 2010.

[31] MOHAMED KHANCHOUL « contribution au développement de la partie électromécanique d'un compresseur pour climatisation de véhicule électrique » thèse de doctorat, universite paris-sud 2012.

[32] HUGO RODRIGUEZ, ROMEO ORTEGA, GERARDO ESCOBAR, NIKITA BARABANOV « Robustly stable output feedback saturated controller for the boost dc-to-dc converter », the 38th IEEE Conference on Decision and Control, Phoenix, AZ, 7-10 december 1999, pp. 2100 – 2105, vol.3.



## Résumé

Dans ce travail, on a modélisé et la simulé le fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande non linière (CBP-AIA) associé a une MPPT assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur (PV). Dans notre travail, on a conçu un système (PV) où le générateur photovoltaïque (PV) produit, dans les conditions standards de test (CST), une puissance crête de 110W, un courant optimal de 3.15 A et une tension optimale de 35V. Les résultats de simulation obtenus sous Matlab/Simulink montrent la performance du contrôle dans le comportement dynamique des systèmes photovoltaïques.

Mots clés: Système PV – Convertisseur survolteur – CBP-AIA - Commande MPPT – Modélisation – Simulation.

## Abstract

In this work, we have modeled and simulated the electrical operation of a photovoltaic (PV) system adapted by non flax control (IDA-PBC) has an associated MPPT ensuring the continuation of the maximum power supplied by the generator (PV). In our work, we have designed a system (PV) where the PV generator (PV) product, in standard test conditions (STC), a peak power of 110W, optimum current 3.15A and a maximum voltage of 35V. The simulation results in Matlab / Simulink show the control performance in the dynamic behavior of photovoltaic systems.

Keywords: PV System - Boost Converter - IDA-PBC - MPPT Control - Modeling - Simulation.