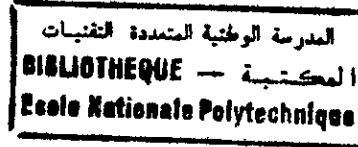




ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



Thèse

Présentée par

Linda HASSAINE

Pour l'obtention du titre de

MAGISTER EN ELECTRONIQUE

Option: Electricité Solaire

Thème

***Modélisation et Simulation d'un Système de
Conditionnement de Puissance pour la
Poursuite du Point de Puissance Maximale
dans les Systèmes Photovoltaïques***

Soutenue, le 24 Juin 2002

Devant la commission composée de :

Mr M. MEHENNI	Maître de Conférences (ENP)	Président
Mr M. HADDADI	Maître de Conférences (ENP)	Rapporteur
Mr A. MALEK	Maître de Recherche (CDER)	Rapporteur
Mr C. LARBES	Phd (ENP)	Examineur
Mr M.S AÏT CHEIKH	Chargé de Cours (ENP)	Examineur
Mr R. ZERGUI	Chargé de Cours (ENP)	Examineur
Mr M. BELHAMEL	Directeur de Recherche (CDER)	Invité

الهدف من هذه الدراسة يكمن في تمثيل و تقليد النظام الكهروضوئي، العامل في النقطة ذات القدرة القصوى للمولد لإمداد الشحنة بأكبر طاقة منتجة، مع أخذ بعين الإعتبار تغييرات الإشعاع الشمسي و درجة الحرارة (تص/تص) لإتجاز هذا العمل مع التكيف الأمثل للمولد الكهروضوئي مع الشحنة، يتوجب إدراج محول التقليد أنجز باستعمال برنامج . تحقق أنه الأحسن تكييفا للأنظمة الكهروضوئية « boost »المحول المضخم التي سمحت لنا بالحصول على نموذج للمولد الكهروضوئي مقرر « ABM » بواسطة مكتبته « Pspice » « boost » بالمحول .
النتائج المحصل عليها ذات قيمة معتبرة للعمل بتلاؤم لدى هذا النظام في النقطة ذات القدرة القصوى

Résumé

Le but de ce travail consiste à modéliser et simuler un système photovoltaïque fonctionnant au point de puissance maximale du générateur pour délivrer le maximum de l'énergie produite à la charge, en tenant compte des variations du flux solaire et de la température. Pour la réalisation d'un tel système et une bonne adaptation du générateur PV à la charge, il est nécessaire d'intercaler un convertisseur DC/DC. Le convertisseur 'boost' s'avère le mieux adapté pour les systèmes PV. La simulation a été menée en utilisant le logiciel Pspice avec la bibliothèque ABM, qui a permis d'obtenir le modèle simulé du générateur PV couplé à ce convertisseur. Les résultats obtenus sont appréciables pour un fonctionnement adéquat du système au point de puissance maximale.

Abstract

Photovoltaic power use a maximum power point tracking (MPPT) in order to deliver the highest power to the load when changes in insolation and temperature occur. It overcomes the problem of mismatch between the solar cells and the given load. This work presents a circuit-based model of PV generator using Analog Behavior Modelling (ABM) of Pspice. The insolation and temperature are introduced as parameters in this model. The use of DC/DC 'boost' converter as a maximum power point tracker is of great interest, it is continuously matches the output characteristics of PV generator to the load. The obtained simulation results show the powerfulness of Pspice in helping the design process and in investigating a real way in order to achieve a better maximum power tracking.

Mots clés: Systèmes photovoltaïques - Poursuite du point de puissance maximale - Système de conditionnement de puissance - Modélisation - Simulation.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Dédicaces

A mes très chers parents

A mes frères et sœurs

A mes neveux et nièces

A toute ma famille

A mes ami(e)s

AVANT PROPOS

Ce travail entre dans le cadre de la Convention de Collaboration entre le Laboratoire Photovoltaïque du Centre de Développement des Energies Renouvelables de Bouzaréah (Alger) et le Laboratoire des Dispositifs de Communication et Conversion Photovoltaïque de L'Ecole Nationale Polytechnique (E.N.P. - El Harrach).

*Ce travail a été effectué au Laboratoire Photovoltaïque (C.D.E.R.) sous la direction scientifique du **Dr M. HADDADI**, Maître de Conférence à l'E.N.P. d'El Harrach et du **Dr A. MALEK**, Maître de Recherche et Chef du Laboratoire Photovoltaïque. Je tiens à leurs exprimer mes plus vifs remerciements, et surtout ma profonde et respectueuse reconnaissance par l'intérêt et la bienveillance avec lesquels ils ont dirigé mes recherches.*

*Je remercie **Dr M. BELHAMEL**, Directeur de Recherche et Directeur du Centre de Développement des Energies Renouvelables de m'avoir offert la possibilité d'effectuer des études de Post-Graduation et de son soutien moral.*

*Mes remerciements vont au **Dr M. MEHENNI**, Maître de Conférence au Département d'Electronique de l'Ecole Nationale Polytechnique, qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de soutenance.*

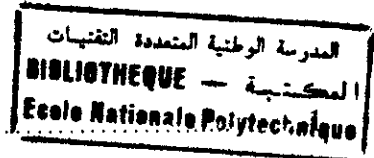
*Mes remerciements vont également à **Mr C. LARBES**, PhD et Chargé de Cours, à **Mr M.S. AIT CHEIKH**, Chargé de Cours, à **Mr R. ZERGUI**, Chargé de Cours, au Département d'Electronique de l'Ecole Nationale Polytechnique, en acceptant de faire partie du jury d'examen pour la soutenance de ce travail.*

*Je tiens à remercier **Mr A. CHOUDER**, Attaché de Recherche au Centre de Développement des Energies Renouvelables, pour son aide précieuse et ses conseils avisés tout au long de ce travail.*

*Je remercie également ma **FAMILLE** pour leur soutien moral durant toute la durée de préparation du diplôme de Magister.*

Je remercie également toutes les personnes qui m'ont apportées leur soutien moral et leurs encouragements, pour l'accomplissement de ce travail.

Tables des Matières



Introduction Générale.....

Chapitre 1 : Le Système Photovoltaïque

1.1	Introduction.....	3
1.2.	Générateur photovoltaïque.....	3
1.2.1	La cellule photovoltaïque.....	3
1.2.1.1	Définition et principe.....	3
1.2.1.2	Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	4
1.2.2	Caractéristique électrique d'un générateur photovoltaïque.....	5
1.2.2.1	Courant de court-circuit.....	6
1.2.2.2	Tension de circuit ouvert.....	7
1.2.2.3	Adaptation d'impédance.....	7
1.2.3	Réseau de caractéristiques.....	8
1.2.3.1	Influence de la résistance série.....	8
1.2.3.2	Influence de la résistance shunt.....	9
1.2.3.3	Influence du flux.....	9
1.2.3.4	Influence de la température.....	10
1.2.4	Modules photovoltaïques.....	11
1.3	Stockage électrique.....	12
1.3.1	Accumulateur au plomb.....	12
1.3.2	Caractéristiques d'un accumulateur au plomb.....	14
1.4	Système de conditionnement de la puissance.....	14
1.4.1	Modes de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque.....	15
1.4.2	Techniques de régulation dans un système photovoltaïque.....	16
1.4.2.1	Régulation à coupure.....	16
1.4.2.2	Régulation à coupure partielle.....	17
1.4.2.3	Régulation à modulation de largeur d'impulsion.....	18
1.4.2.4	Régulation à optimisation de puissance.....	18
1.4.3	Conversion continue/alternative.....	19
1.5	Conclusion.....	19

Chapitre 2 : Modélisation et Simulation du Générateur Photovoltaïque

2.1	Introduction.....	20
2.2	Modélisation de l'élément de base du générateur photovoltaïque.....	20
2.3	Outil de simulation.....	21
2.4	Développement du modèle mathématique.....	22
2.4.1	Equation des grandeurs du modèle de la cellule.....	22
2.4.2	Modèle de la température de la cellule T_c	24
2.4.3	Modèle du courant photogénéré de la cellule I_{ph}	24
2.4.4	Modèle du courant de saturation de la diode I_{sat}	25
2.4.5	Modèle du courant de la diode I_D	25

2.4.6	Modèle global.....	25
2.5	Simulation du Modèle global.....	27
2.5.1	Courbes caractéristiques I-V et P-V du générateur.....	27
2.5.2	Influence des paramètres.....	28
2.5.2.1	Influence du flux solaire sur la caractéristique I-V.....	29
2.5.2.2	Influence du flux solaire sur la caractéristique P-V.....	30
2.5.2.3	Influence de la température sur la caractéristique I-V.....	30
2.5.2.4	Influence de la température sur la caractéristique P-V.....	31
2.6	Conclusion.....	32

Chapitre 3 : Stratégies de Commande pour la Poursuite de Point de Puissance Maximale

3.1	Introduction.....	33
3.2	Différentes méthodes utilisées pour la poursuite du point de puissance maximale.....	33
3.2.1	Méthode de la Dérivée de la Puissance.....	34
3.2.2	Méthode de comparaison de phase.....	36
3.2.3	Méthode utilisant la cellule pilote.....	37
3.2.4	Méthode dite 'Perturber et observer'.....	40
3.3	Conclusion.....	41

Chapitre 4 : La Conversion de Puissance

4.1	Introduction.....	42
4.2	Généralités sur les convertisseurs DC-DC	42
4.2.1.	Hacheur dévolteur 'Buck Converter'.....	42
4.2.1.1	Mode de conduction continue.....	43
4.2.1.2	Mode de conduction discontinue.....	44
4.2.2	Hacheur survolteur 'Boost Converter'.....	46
4.2.2.1	Mode de conduction continue.....	46
4.2.2.2	Mode de conduction discontinue.....	48
4.3	Comparaison des performances des deux types de convertisseurs pour les systèmes photovoltaïques.....	50
4.3.1	Introduction	50
4.3.2	Rendement énergétique du convertisseur.....	50
4.3.3	Résultats de simulation.....	50
4.4	Conception d'un hacheur survolteur.....	51
4.5	Simulation du générateur couplé au 'Boost'.....	52
4.6	Conclusion.....	55

Chapitre 5 : Modèle Dynamique du Système et Processus de la Poursuite

5.1	Introduction.....	56
5.2	Modélisation du convertisseur 'Boost' par la valeur moyenne dans l'espace d'état	56
5.3	Modèle dynamique du générateur photovoltaïque couplé au convertisseur de puissance.....	59
5.3.1	Représentation du modèle dynamique dans l'espace d'état.....	59
5.3.1.1	Fonction de transfert du système en boucle ouverte.....	61
5.3.1.2	Analyse du système en boucle ouverte	62
5.3.2	Modélisation par la valeur moyenne	65
5.4	Détermination du correcteur	68
5.5	Système en boucle fermée.....	69
5.6	Analyse du système en boucle fermée.....	69
5.7	Processus de la poursuite du point de puissance maximale.....	71
5.7.1	Description du schéma.....	72
5.7.2	Fonctionnement du système.....	72
5.7.3	Algorithme de contrôle.....	73
5.8	Résultats de simulation.....	75
5.9	Conclusion.....	77
	Conclusion Générale.....	78
	Références Bibliographiques	80

Nomenclature

I_{ph}	Courant photogénéré (A)
I_D	Courant de diode (A)
I_{sat}	Courant de saturation (A)
A	Facteur d'idéalité de la diode
q	Charge de l'électron (C)
k_B	Constante de Boltzman ($J K^{-1}$)
T	Température de jonction (K)
R_s	Résistance série (Ω)
R_{sh}	Résistance shunt (Ω)
I_{CC}	Courant de court-circuit (A)
V_{CO}	Tension de circuit ouvert (V)
P	Puissance du générateur (W)
P_{max}	Puissance maximale (W)
P_{opt}	Puissance optimale (W)
R_{opt}	Résistance optimale (Ω)
A, B	Coefficients de correction du courant et la tension
K	Coefficient de proportionnalité
S	Surface de la cellule (m^2)
I_{opt}	Courant optimum (A)
V_{opt}	Tension optimale (V)
FF	Facteur de forme
I_{PV}	Courant du générateur photovoltaïque (A)
I_{bat}, V_{bat}	Courant et tension aux bornes de la batterie (A, V)
V_{sbD}, V_{sbC}	Tension de début et de fin de charge (V)
V_{shC}, V_{shD}	Tension de début et fin de décharge (V)
T_c	Température de la cellule (K)
T_r	Température de référence (K)
T_a	Température ambiante (K)
I_t	Coefficient de température
n_p et n_s	Nombres de cellules en parallèle et en série
E_g	Energie du gap (eV)
ϕ	Flux solaire (Wm^{-2})
V_L	Tension de la charge (V)
D	Rapport cyclique
I_E	Courant d'entrée (A)
V_E	Tension d'entrée (V)
V_S	Tension de sortie (V)
L	Inductance de la bobine (H)
C	Capacité (F)
Q	Commutateur
R	Résistance (Ω)
R_L	Résistance de la charge (Ω)

t	Temps (s)
Ton	Période (commutateur fermé) (s)
Toff	Période (commutateur ouvert) (s)
$I_L, i_L(t)$	Courant aux bornes de la bobine (A)
$I_C, i_C(t)$	Courant aux bornes de la capacité (A)
L_c et R_c	Inductance critique (H) et Résistance critique (Ω)
$I_{Lmax}, I_{Lmin}, I_{Lmoy}$	Courant maximum, minimum, moyen aux bornes de la bobine (A)
R_{nom}	Résistance nominale (Ω)
$v_{out}(t), V_{out}, V_s$	Tension de sortie (V)
$i_{out}(t), I_{out}, I_s$	Courant de sortie (A)
$v_c(t), V_c$	Tension aux bornes de la capacité (V)
v_Q, i_Q	Tension et courant aux bornes du commutateur (V, A)
f	Fréquence (Hz)
$I_E, i_e(t)$	Courant d'entrée (A)
V_X	Tension (V)
η_c	Rendement de conversion
$\eta_{\text{convertisseur}}$	Rendement énergétique du convertisseur
$P_{\text{convertisseur}}$	Puissance du convertisseur (W)
D_{on}, D_{off}	Rapport cyclique (commutateur fermé et ouvert)
ξ	Coefficient d'amortissement
$\omega, \omega_1, \omega_2$	Fréquence de coupure ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)
ω_n, ω_r	Pulsation naturelle et pulsation de résonance ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)
φ_m	Phase du correcteur (deg)
t_r	Temps de réponse (s)
ΔG	Marge de gain (db)
$\Delta \Phi$	Marge de phase (deg)
A, A_{on}, A_{off}	Matrice d'évolution
B, B_{on}, B_{off}	Matrice de commande
$x(t)$	Vecteur d'état
$u(t)$	Vecteur de commande
s	Variable de Laplace
Q	Facteur de résonance (db)
$\tilde{u}, \tilde{x}, \tilde{d}$	Grandeurs en signaux faibles



INTRODUCTION GENERALE



Aujourd'hui, tous les spécialistes recommandent un approvisionnement énergétique basé de plus en plus sur le rayonnement solaire afin d'assurer un développement durable dans le contexte énergétique. Mais pour l'exploitation de cette source d'énergie solaire, il faut des technologies efficaces, économiques et favorables à l'environnement, qui permettent sa conversion en formes d'énergie secondaires.

La conversion photovoltaïque est la transformation directe du rayonnement solaire en électricité, de type continu et directement utilisable. Le système photovoltaïque est donc un système énergétique qui utilise cette forme de conversion pour diverses applications [1, 6, 7].

Grâce à sa structure modulaire, la technique photovoltaïque est la mieux adaptée à une utilisation décentralisée nécessitant une puissance réduite. Les installations photovoltaïques sont actuellement fiables et robustes, laissant prévoir une longue durée de vie. Les inconvénients de cette technique sont essentiellement le coût élevé des cellules photovoltaïques et leur faible rendement de conversion.

Pour une gestion optimale de l'énergie disponible à la sortie du générateur photovoltaïque 'GPV', les techniques d'optimisation permettent d'augmenter le rendement énergétique de l'ensemble de l'installation photovoltaïque. Les techniques de régulation et de contrôle assurent la fonction d'adaptation d'impédance, en transférant à la charge la puissance électrique maximale issue du générateur photovoltaïque, et ce quel que soit les variations de l'éclairement et de la température.

Le générateur, composé de cellules photovoltaïques interconnectées, fonctionne dans une large gamme de tension et de courant. Il ne fournit sa puissance électrique maximale qu'en un seul point de fonctionnement bien déterminé sur la caractéristique courant - tension. Ce point est appelé le *point de puissance maximale*. Pour une optimisation de la gestion de la production électrique, il est donc indispensable de se positionner en ce point, lequel malheureusement peut fluctuer en fonction des changements climatologiques, comme la température et l'éclairement [4].

Pour la poursuite efficace de ce point, Il est recommandé d'incorporer un dispositif électronique, entre le générateur photovoltaïque et la charge, lors de son fonctionnement dont la fonction principale est la poursuite du point de puissance maximale du générateur photovoltaïque, appelée communément MPPT 'Maximum Power Point Tracking'. Ce dispositif est un convertisseur DC-DC de type dévolteur ou survolteur.

Le maintien de ce point de fonctionnement au point de puissance maximale est assuré par un contrôle continu du rapport cyclique du convertisseur de puissance. Néanmoins, ce dispositif nécessite beaucoup d'attention que ce soit sur l'aspect dimensionnement et sur l'aspect contrôle et asservissement, pour éviter l'instabilité du système.

La présente recherche consiste en une modélisation et une simulation de l'ensemble d'un système photovoltaïque pour la poursuite du point de puissance maximale, basé sur l'étude d'un système de conditionnement de puissance. Ce système se compose principalement d'un convertisseur continu-continu survolteur 'Boost Converter', commandé par la technique de modulation de largeur d'impulsion 'PWM', d'un générateur photovoltaïque et d'une batterie qui sera considérée dans la présente étude comme une charge.

Pour la simulation des composants du système photovoltaïque et de son fonctionnement comportementale, le logiciel Pspice, avec l'option 'A.B.M.' est utilisé comme outil de simulation. L'approche de la 'Modélisation Analogique Comportementale' 'A.B.M' - *Analog Behavior Modelling*- permet l'analyse du comportement des circuits électriques à partir de leurs modèles mathématiques et de résoudre les équations des systèmes linéaires et non linéaires, même pour les systèmes les plus complexes dans leurs formes implicites et explicites. Ces équations sont converties en circuits électriques et résolues par Pspice en utilisant l'analyse DC, l'analyse temporelle et l'analyse fréquentielle [23].

Les différentes étapes de cette recherche sont mentionnées ci-après.

Dans le première chapitre, nous présentons les principaux éléments composant le système photovoltaïque et une étude détaillée des principales grandeurs caractéristiques influençant le comportement et le fonctionnement d'un tel système. Ces informations sont d'une importance certaine pour la modélisation et la simulation des divers éléments constitutifs d'une installation photovoltaïque.

Le second chapitre présente la modélisation et la simulation du générateur photovoltaïque, ainsi que le tracé de ses courbes caractéristiques Courant - Tension et Puissance - Tension, tout en tenant compte des influences des paramètres climatologiques (flux solaire et température). Ceci permet d'obtenir le modèle du générateur qui sera utilisé dans la simulation de l'ensemble GPV – MPPT - Charge.

Le troisième chapitre est consacré à une revue de l'ensemble de techniques et méthodes, utilisées pour la poursuite du point de puissance maximale tout en présentant leurs avantages et leurs inconvénients [28].

Dans le quatrième chapitre, une étude détaillée des convertisseurs DC-DC est présentée. Une comparaison des performances énergétiques des deux types de convertisseurs est ainsi établie pour un choix de la topologie appropriée à notre système.

Le modèle dynamique en boucle fermée du générateur photovoltaïque couplé au convertisseur de puissance, le processus de la poursuite du point de puissance maximale ainsi que les résultats de simulation et leurs discussions sont présentés en dernier chapitre.

Enfin, une conclusion et des perspectives sont proposées.

Chapitre 1

Le Système Photovoltaïque

CHAPITRE 1

LE SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

1.1 Introduction

Le système photovoltaïque est un système énergétique qui utilise la transformation directe d'une énergie électromagnétique 'rayonnement solaire' par effet photovoltaïque en énergie électrique de type continu directement utilisable pour diverses applications [4, 7, 52].

Un système photovoltaïque se compose essentiellement de trois parties comme le montre la figure 1.1 : [5, 6]

- le générateur photovoltaïque,
- le système de stockage d'énergie,
- le système de conditionnement de puissance.

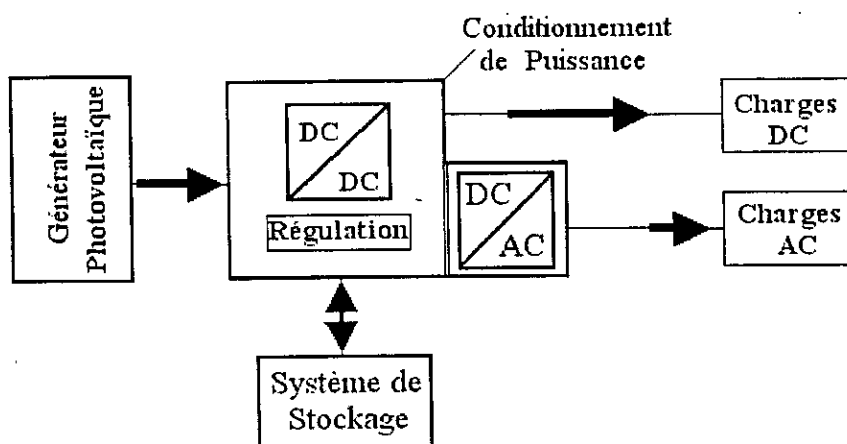


Figure 1.1 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque

1.2 Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque 'GPV' est composé par un assemblage de cellules élémentaires associées en module, lui-même associé en série / parallèle à plusieurs autres modules pour divers besoins en énergie électrique.

1.2.1 La cellule photovoltaïque

1.2.1.1 Définition et principe

La cellule photovoltaïque est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque. La cellule la plus répandue est réalisée à base de silicium monocristallin. Son rôle est de transformer l'énergie solaire en électricité de type continu. Le processus de transformation du rayonnement solaire en électricité est appelé l'effet photovoltaïque. La cellule photovoltaïque est donc un dispositif transformant une partie de l'énergie lumineuse, issue

INTRODUCTION GENERALE

Aujourd'hui, tous les spécialistes recommandent un approvisionnement énergétique basé de plus en plus sur le rayonnement solaire afin d'assurer un développement durable dans le contexte énergétique. Mais pour l'exploitation de cette source d'énergie solaire, il faut des technologies efficaces, économiques et favorables à l'environnement, qui permettent sa conversion en formes d'énergie secondaires.

La conversion photovoltaïque est la transformation directe du rayonnement solaire en électricité, de type continu et directement utilisable. Le système photovoltaïque est donc un système énergétique qui utilise cette forme de conversion pour diverses applications [1, 6, 7].

Grâce à sa structure modulaire, la technique photovoltaïque est la mieux adaptée à une utilisation décentralisée nécessitant une puissance réduite. Les installations photovoltaïques sont actuellement fiables et robustes, laissant prévoir une longue durée de vie. Les inconvénients de cette technique sont essentiellement le coût élevé des cellules photovoltaïques et leur faible rendement de conversion.

Pour une gestion optimale de l'énergie disponible à la sortie du générateur photovoltaïque 'GPV', les techniques d'optimisation permettent d'augmenter le rendement énergétique de l'ensemble de l'installation photovoltaïque. Les techniques de régulation et de contrôle assurent la fonction d'adaptation d'impédance, en transférant à la charge la puissance électrique maximale issue du générateur photovoltaïque, et ce quel que soit les variations de l'éclairement et de la température.

Le générateur, composé de cellules photovoltaïques interconnectées, fonctionne dans une large gamme de tension et de courant. Il ne fournit sa puissance électrique maximale qu'en un seul point de fonctionnement bien déterminé sur la caractéristique courant - tension. Ce point est appelé le *point de puissance maximale*. Pour une optimisation de la gestion de la production électrique, il est donc indispensable de se positionner en ce point, lequel malheureusement peut fluctuer en fonction des changements climatologiques, comme la température et l'éclairement [4].

Pour la poursuite efficace de ce point, il est recommandé d'incorporer un dispositif électronique, entre le générateur photovoltaïque et la charge, lors de son fonctionnement dont la fonction principale est la poursuite du point de puissance maximale du générateur photovoltaïque, appelée communément MPPT 'Maximum Power Point Tracking'. Ce dispositif est un convertisseur DC-DC de type dévolteur ou survolteur.

Le maintien de ce point de fonctionnement au point de puissance maximale est assuré par un contrôle continu du rapport cyclique du convertisseur de puissance. Néanmoins, ce dispositif nécessite beaucoup d'attention que ce soit sur l'aspect dimensionnement et sur l'aspect contrôle et asservissement, pour éviter l'instabilité du système.

La présente recherche consiste en une modélisation et une simulation de l'ensemble d'un système photovoltaïque pour la poursuite du point de puissance maximale, basé sur l'étude d'un système de conditionnement de puissance. Ce système se compose principalement d'un convertisseur continu-continu survolteur 'Boost Converter', commandé par la technique de modulation de largeur d'impulsion 'PWM', d'un générateur photovoltaïque et d'une batterie qui sera considérée dans la présente étude comme une charge.

Pour la simulation des composants du système photovoltaïque et de son fonctionnement comportementale, le logiciel Pspice, avec l'option 'A.B.M.' est utilisé comme outil de simulation. L'approche de la 'Modélisation Analogique Comportementale' 'A.B.M' - *Analog Behavior Modelling*- permet l'analyse du comportement des circuits électriques à partir de leurs modèles mathématiques et de résoudre les équations des systèmes linéaires et non linéaires, même pour les systèmes les plus complexes dans leurs formes implicites et explicites. Ces équations sont converties en circuits électriques et résolues par Pspice en utilisant l'analyse DC, l'analyse temporelle et l'analyse fréquentielle [23].

Les différentes étapes de cette recherche sont mentionnées ci-après.

Dans le premier chapitre, nous présentons les principaux éléments composant le système photovoltaïque et une étude détaillée des principales grandeurs caractéristiques influençant le comportement et le fonctionnement d'un tel système. Ces informations sont d'une importance certaine pour la modélisation et la simulation des divers éléments constitutifs d'une installation photovoltaïque.

Le second chapitre présente la modélisation et la simulation du générateur photovoltaïque, ainsi que le tracé de ses courbes caractéristiques Courant - Tension et Puissance - Tension, tout en tenant compte des influences des paramètres climatologiques (flux solaire et température). Ceci permet d'obtenir le modèle du générateur qui sera utilisé dans la simulation de l'ensemble GPV - MPPT - Charge.

Le troisième chapitre est consacré à une revue de l'ensemble de techniques et méthodes, utilisées pour la poursuite du point de puissance maximale tout en présentant leurs avantages et leurs inconvénients [28].

Dans le quatrième chapitre, une étude détaillée des convertisseurs DC-DC est présentée. Une comparaison des performances énergétiques des deux types de convertisseurs est ainsi établie pour un choix de la topologie appropriée à notre système.

Le modèle dynamique en boucle fermée du générateur photovoltaïque couplé au convertisseur de puissance, le processus de la poursuite du point de puissance maximale ainsi que les résultats de simulation et leurs discussions sont présentés en dernier chapitre.

Enfin, une conclusion et des perspectives sont proposées.

Chapitre 1

Le Système Photovoltaïque

CHAPITRE 1

LE SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

1.1 Introduction

Le système photovoltaïque est un système énergétique qui utilise la transformation directe d'une énergie électromagnétique 'rayonnement solaire' par effet photovoltaïque en énergie électrique de type continu directement utilisable pour diverses applications [4, 7, 52].

Un système photovoltaïque se compose essentiellement de trois parties comme le montre la figure 1.1 : [5, 6]

- le générateur photovoltaïque,
- le système de stockage d'énergie,
- le système de conditionnement de puissance.

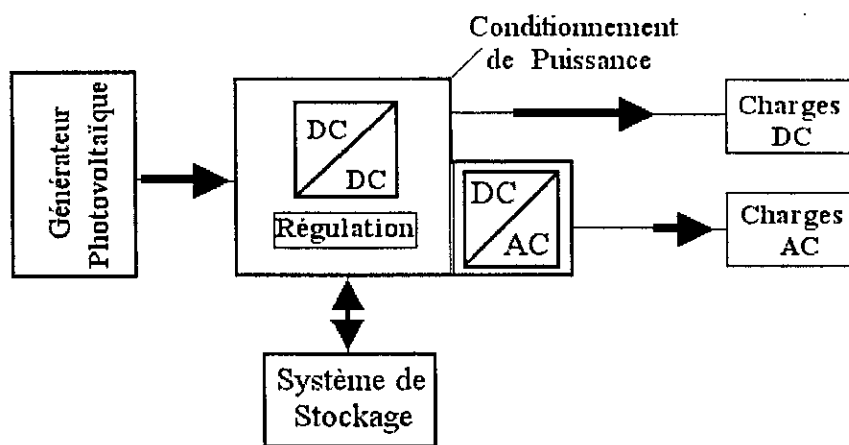


Figure 1.1 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque

1.2 Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque 'GPV' est composé par un assemblage de cellules élémentaires associées en module, lui-même associé en série / parallèle à plusieurs autres modules pour divers besoins en énergie électrique.

1.2.1 La cellule photovoltaïque

1.2.1.1 Définition et principe

La cellule photovoltaïque est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque. La cellule la plus répandue est réalisée à base de silicium monocristallin. Son rôle est de transformer l'énergie solaire en électricité de type continu. Le processus de transformation du rayonnement solaire en électricité est appelé l'effet photovoltaïque. La cellule photovoltaïque est donc un dispositif transformant une partie de l'énergie lumineuse, issue

du soleil par exemple, en énergie électrique. La proportion d'énergie transformée constitue le rendement de conversion de cette cellule.

Certaines cellules photovoltaïques utilisent d'autres types de matériaux semi-conducteurs, comme le silicium multicristallin et amorphe, l'arséniure de gallium ou un matériau en couches minces, qui produisent des porteurs de charge (électrons et trous) en absorbant des photons.

Si l'on applique une tension aux bornes d'un matériau photoconducteur éclairé, un courant circulera et sera sensible à la longueur d'onde du rayonnement lumineux : le matériau se comporte comme un dipôle passif.

Pour réaliser un dispositif actif, tel qu'une cellule solaire, il est nécessaire de réaliser, à la surface du semi-conducteur, une jonction P-N (ou diode de surface). Le champ électrique sépare les porteurs de charge, entraînant les trous dans le sens du champ et les électrons en sens inverse.

La tension interne de la diode constitue la source de potentiel, et les photoporteurs, la source de courant. La tension de sortie, de l'ordre du $\frac{1}{2}$ volt, et les densités de courant étant faibles, expliquent l'intérêt de réaliser des modules photovoltaïques regroupant différentes cellules élémentaires [4].

1.2.1.2 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

Pour une représentation physique adéquate, les sources de tension ou de courant doivent toujours être utilisées en connexion avec : [4]

- une résistance série dans le cas d'une source de tension (Figure 1.2a).
- une résistance shunt dans le cas d'une source de courant (Figure 1.2b).

Chacune de ces deux résistances représente la résistance interne de la source correspondante. Une cellule photovoltaïque éclairée est par contre schématisée par un générateur de courant imparfait (qui présente une conductance shunt et une résistance série parasite) montée en parallèle sur une diode imparfaite (Figure 1.2c).

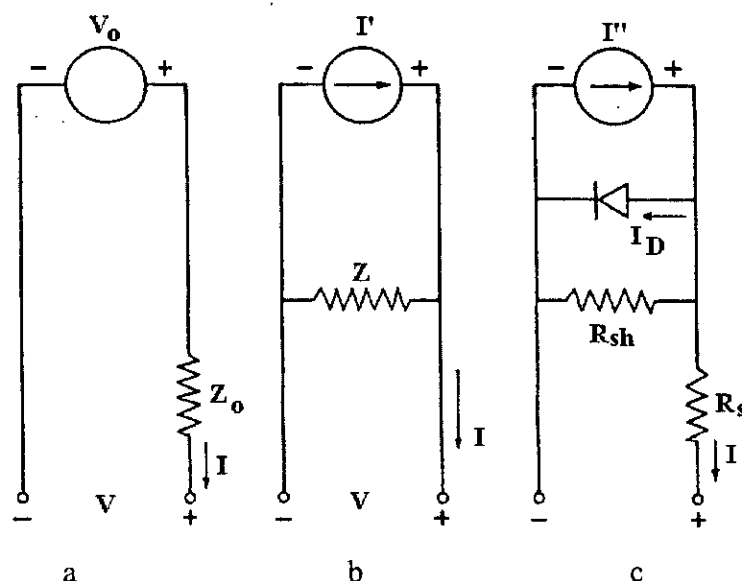


Figure 1.2 : Schéma d'une cellule photovoltaïque
a) source de tension, b) source de courant, c) générateur photovoltaïque

Sous éclairement, le courant I'' sera égal au courant photogénéré I_{ph} . La caractéristique courant - tension d'une cellule photovoltaïque peut être mise sous la forme mathématique :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \tag{1.1}$$

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{A k_B T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \tag{1.2}$$

sachant que : I_{ph} [A] est le photocourant , I_D [A] le courant de diode, I_{sat} [A] le courant de saturation, A le facteur d'idéalité de la diode, q [C] la charge électrique, k_B [JK⁻¹] la constante de Boltzman, T [K] la température de la jonction, R_s [] la résistance série et R_{sh} [] la résistance shunt. Il est à noter que le courant dans la R_{sh} est négligé (R_{sh} infini).

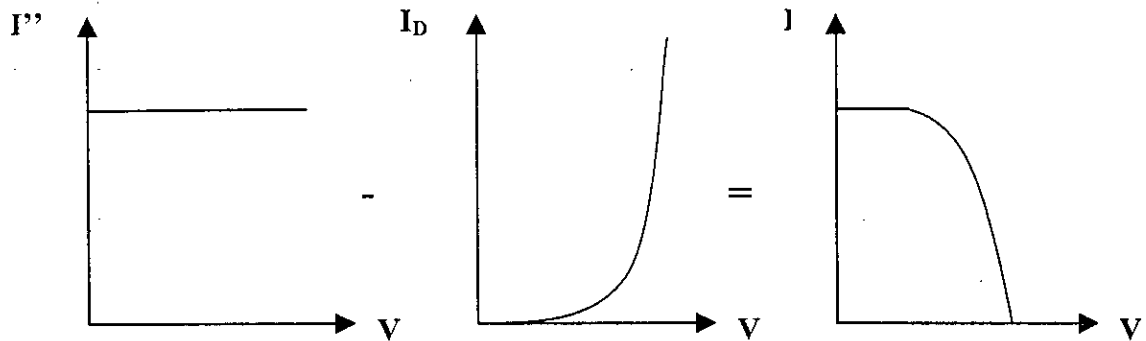


Figure 1.3 : Caractéristique courant - tension d'une cellule photovoltaïque éclairée

Sous obscurité, la cellule photovoltaïque n'est pas un élément actif. Elle fonctionne comme une jonction P-N, c'est-à-dire comme une diode, elle ne produit donc ni courant, ni tension.

Dans ce cas, si on la connecte à un élément externe, la théorie montre que la tension et le courant sont reliés par l'expression suivante :

$$I_D = I_{sat} \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{A k_B T}\right) - 1 \right] \tag{1.3}$$

Dans le cas d'un générateur photovoltaïque, qui se compose de n_s cellules identiques en série et de n_p cellules identiques en parallèle, c'est-à-dire constitué en un certain nombre de modules interconnectés entre eux en série/parallèle, la caractéristique courant - tension résultante peut être obtenue à partir de la caractéristique d'une seule cellule et ce, en multipliant point par point, chacune des valeurs de la tension par le coefficient n_s et chacune des valeurs du courant par le coefficient n_p .

1.2.2 Caractéristique électrique d'un générateur photovoltaïque

La caractéristique courant - tension, illustrée dans la figure 1.4, décrit le comportement de la cellule photovoltaïque sous l'influence des conditions météorologiques (niveau d'éclairement et température ambiante).

La courbe de la cellule solaire $I = f(V)$ passe par les trois points importants, à savoir :

- le courant de court-circuit I_{CC} en M;
- la tension de circuit-ouvert V_{CO} en S;
- la puissance maximale P_{max} en A.

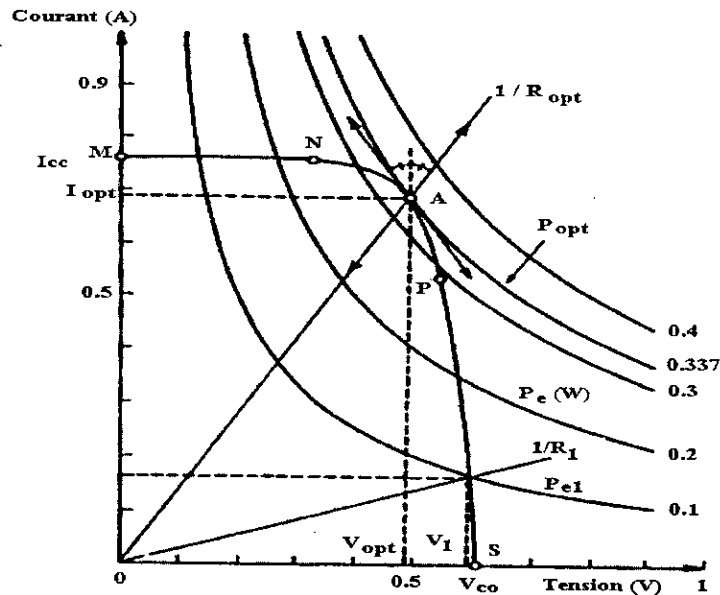


Figure 1.4 : Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire avec courbes d'équi-puissance et droites de charge

La figure 1.4 montre bien qu'une cellule photovoltaïque ne peut être assimilée à aucun générateur classique (générateur de tension ou générateur de courant).

On peut la considérer comme un générateur à tension constante dans la partie verticale de sa caractéristique et comme une source de courant constant dans la partie horizontale de cette caractéristique.

1.2.2.1 Courant de court-circuit

Le courant de court circuit I_{CC} de la cellule photovoltaïque est exprimé par l'expression suivante, lorsque la tension est nulle ($V = 0$) :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{q(R_s I_{cc})}{A k_B T}\right) - 1 \right] - \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}} \quad (1.4)$$

A un niveau d'éclairement standard (égal à 1 kWm^{-2}), l'effet de la résistance série est négligeable (point M de la figure 1.4). Dans ce cas, le courant de court-circuit peut être considéré comme étant équivalent au photocourant I_{ph} , c'est-à-dire proportionnel à l'éclairement ϕ (Figure 1.5a) :

$$I_{cc} = I_{ph} = K \cdot \phi \quad (1.5)$$

où K est une constante et ϕ est exprimé en Wm^{-2} .

1.2.2.2 Tension de circuit-ouvert

Dans le cas du circuit-ouvert (point S de la figure 1.4), la tension de circuit-ouvert peut être exprimée analytiquement suivant la formule :

$$V_{co} = \frac{A k_B T}{q} \ln \left(\frac{I_{ph} + I_{sat}}{I_{sat}} \right) \quad (1.6)$$

Si la résistance série est nulle et la résistance shunt est infinie, l'expression (1.6) devient :

$$V_{co} = \frac{A k_B T}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_{sat}} \right) \quad (1.7)$$

La tension de circuit-ouvert V_{co} correspond en fait, à la chute de tension dans la jonction P-N; lorsqu'elle est traversée par le photocourant I_{ph} .

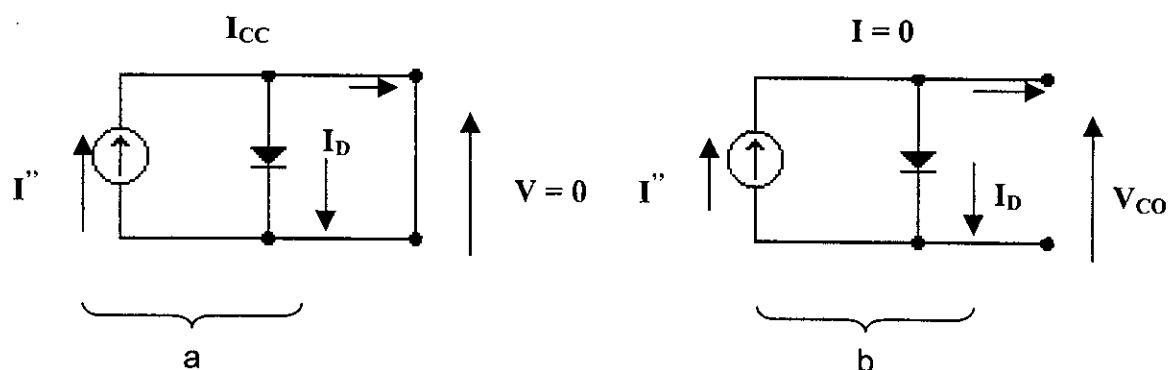


Figure 1.5 : Schéma de la cellule photovoltaïque
a) dans le cas du court-circuit, b) dans le cas du circuit ouvert

1.2.2.3 Adaptation d'impédance

Si on considère la caractéristique courant - tension de la cellule photovoltaïque pour un niveau de flux solaire ϕ et à une température T fixe et si l'on place une charge variable R aux bornes de cette cellule, le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule et celle de la charge.

La caractéristique d'une charge résistive est une droite de pente égale à $1/R$ (sachant que $I/V = 1/R$).

La puissance délivrée à cette charge ne dépendra que de la valeur de la résistance R . La puissance maximale est obtenue pour $R = R_{opt}$ (point A de la figure 1.4) lorsque la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule est tangente à l'une des courbes d'équi-puissance.

$$P_{max} = V_{max} \times I_{max} \quad (1.8)$$

- Si la valeur de la charge R est petite, la cellule photovoltaïque travaillera dans la région MN de la courbe représentée dans la figure 1.4. C'est la région où la cellule se

comporte comme une source de courant constant presque égal au courant de court-circuit.

- Si la valeur de la charge R est élevée, la cellule photovoltaïque travaillera dans la région PS de la courbe, dans laquelle la cellule se comporte comme un générateur à tension constante presque égale à la tension de circuit-ouvert.

Remarque : Le but recherché, en conséquence, est de faire en sorte que le point de fonctionnement appartienne à la région NP de la caractéristique courant - tension du générateur photovoltaïque (Figure 1.4). En vue d'obtenir une puissance proche de la puissance optimale P_{opt} , on agit sur la valeur de la charge R .

1.2.3 Réseau de caractéristiques

Cinq paramètres gouvernent le comportement électrique d'une cellule, ou d'un générateur photovoltaïque. Ces paramètres sont les suivants [4, 5]:

- La résistance série R_s .
- La résistance shunt R_{sh} .
- Le courant de saturation I_{sat} .
- Le flux ϕ
- La température T .

Pour un flux ϕ égal à 1 kWm^{-2} , ces paramètres peuvent être considérés comme indépendants, excepté le courant de saturation I_{sat} qui dépend directement de la température de la cellule T .

1.2.3.1 Influence de la résistance série

D'une valeur en général très petite, la résistance série agit donc sur la pente de la caractéristique dans la zone où la cellule se comporte comme un générateur de tension (Figure 1.6). Elle ne modifie pas la tension de circuit-ouvert, lorsqu'elle est anormalement élevée, elle peut diminuer notablement la valeur du courant de court-circuit.

La valeur de la résistance série est fonction de la résistivité du matériau semi-conducteur, des résistances de contact des électrodes et de la résistance de la grille collectrice.

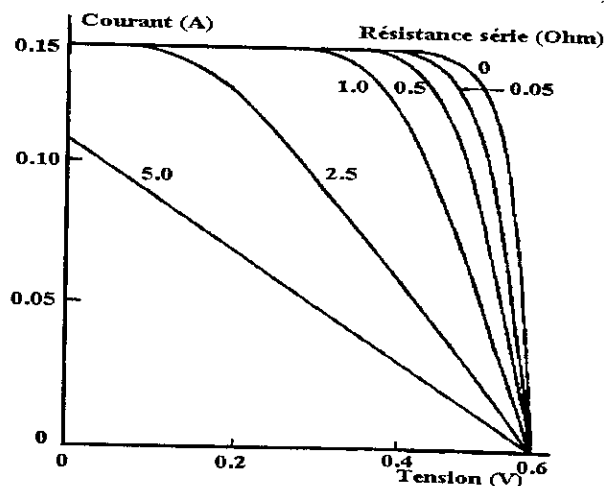


Figure 1.6 : Influence de la résistance série sur la caractéristique d'une cellule PV

1.2.3.2 Influence de la résistance shunt

Il s'agit le plus souvent d'une conductance de fuite. C'est comme si l'on devait soustraire au photocourant, outre le courant de diode, un courant supplémentaire proportionnel à la tension développée.

La résistance shunt est en général très élevée. On peut facilement percevoir une anomalie à la lecture de la caractéristique par la présence d'une légère pente au voisinage du point de courant de court-circuit (Figure 1.7).

Une résistance shunt trop faible aura un impact sur la tension de circuit-ouvert de la cellule; en outre, une cellule PV dont la résistance shunt est trop faible ne donnera plus de tension sous faible éclairement.

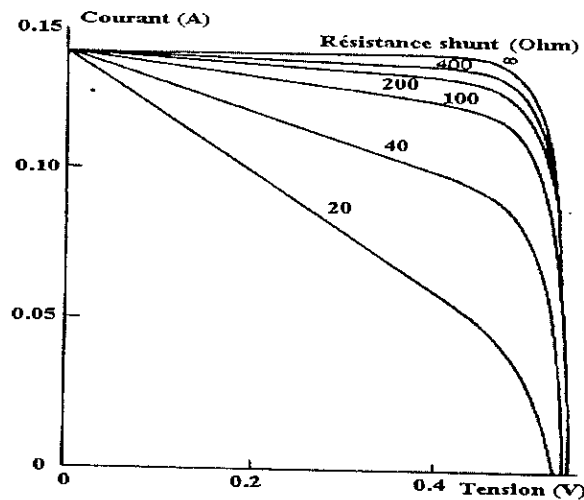


Figure 1.7 : Influence de la résistance shunt sur la caractéristique d'une cellule PV

Remarque : La valeur de la résistance série étant très faible et celle de la résistance shunt très élevée, leurs effets sont donc négligeables dans la plupart des cas.

1.2.3.3 Influence du flux

Les fabricants de cellules solaires (modules) fournissent en général quelques courbes (I - V) qui correspondent d'une part, de la variation de la caractéristique I - V en fonction du flux avec une température fixe, et d'autre part, ils fournissent les mêmes caractéristiques avec une température variable, à éclairement constant. D'après l'expression du courant photogénéré I_{ph} , il est clair que ce courant a une forte dépendance vis-à-vis de l'éclairement.

La figure 1.8 représente la caractéristique $I = f(V) = I_{ph} - I_D$, tracée pour différentes valeurs du flux solaire [7]

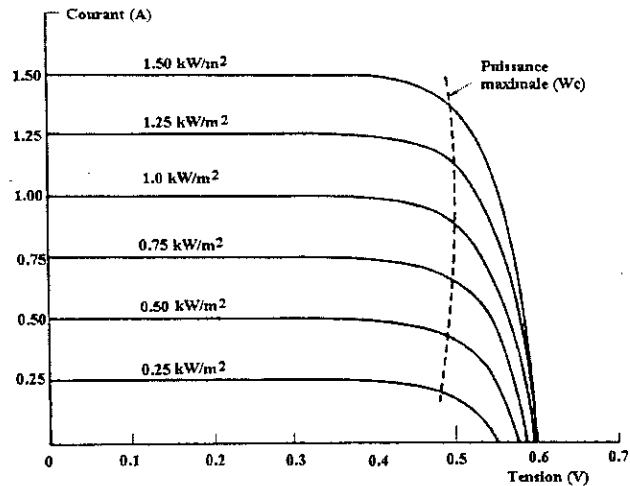


Figure 1.8 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique d'une cellule PV

- A un faible niveau d'éclairement, le courant de court-circuit I_{CC} est proportionnel à l'éclairement solaire (la résistance R_s étant négligée). Il est de l'ordre de 30 mAcm^{-2} pour une cellule réalisée en silicium monocristallin sous un flux égal à 1 kWm^{-2} et à la température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.
- La tension de circuit ouvert augmente lentement avec l'augmentation du flux. Elle ne dépend pas de la surface éclairée mais du matériau utilisé seulement. Sa valeur est de l'ordre de 590 mV sous un flux égal à 1 kWm^{-2} et une température égale à $25 \text{ }^\circ\text{C}$ pour une cellule en silicium monocristallin.
- La puissance optimale du module photovoltaïque est proportionnelle au flux.

On constate aussi que les points de puissance optimale se situent sur une courbe dont l'allure est assez proche d'une droite verticale (courbe en pointillé, Figure 1.8).

1.2.3.4 Influence de la température

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules photovoltaïques. Ne serait-ce que parce qu'une cellule exposée à un flux de 1 kWm^{-2} n'en transforme en électricité que 12 % au plus, le reste étant réfléchi (6 à 8 %) ou dissipé en chaleur (80 à 82 %).

Ainsi, si la cellule photovoltaïque n'est pas correctement ventilée, elle peut monter très haut en température et ses performances électriques peuvent se dégrader.

La figure 1.9 montre l'influence de la température sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule.

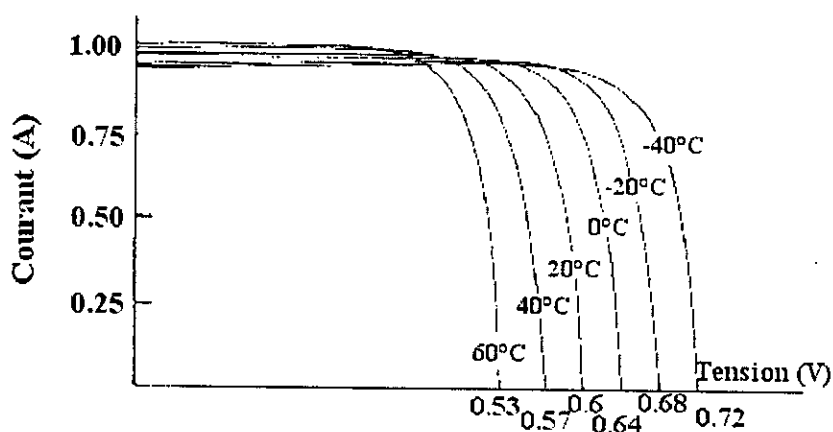


Figure 1.9 : Influence de la température sur la caractéristique d'une cellule photovoltaïque et pour un éclairement constant

On observe une augmentation du photocourant, notamment à cause de la diminution de la largeur de la bande interdite E_g . Cette augmentation est de l'ordre de $25 \mu\text{A}/\text{cm}^2 \cdot \text{K}$, soit une variation de $+0,1 \%$ par K [4, 7].

En même temps, on assiste à une augmentation notable du courant de saturation de diode puisque :

$$I_{\text{sat}} = A_0 T^3 \exp\left(\frac{E_g}{k_B T}\right) \quad (1.9)$$

Cette augmentation entraîne une diminution nette de la tension de circuit-ouvert (environ $-2,2 \text{ mV}$ par K, soit une variation relative de $-0,4 \%$ par K).

L'augmentation de température se traduit donc au total par une baisse relative de la puissance disponible de $-0,35 \%$ par K et par une légère modification de la valeur de la charge permettant d'extraire cette puissance maximale.

1.2.4 Modules photovoltaïques

Les propriétés particulières des modules photovoltaïques requièrent un certain nombre de grandeurs caractéristiques suivantes :

Puissance crête

La puissance crête d'un module photovoltaïque est la puissance électrique qu'il peut fournir s'il est fermé sur sa charge optimale et soumis à une irradiance de $1000 \text{ W}/\text{m}^2$, alors que la température des cellules est de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Elle s'exprime en Watt-crête (Wc).

Rendement de conversion

Le rendement de conversion est défini par le rapport suivant :

$$\eta = \frac{P_{\text{opt}}}{S \phi} \quad (1.10)$$

Sachant que la puissance électrique optimale P_{opt} délivrée par le module photovoltaïque est exprimée en watts, ϕ le flux reçu, en watts par mètre carré et la surface effective de la cellule S , en mètre carré.

Les valeurs typiques du rendement de conversion η pour une cellule photovoltaïque sont comprises entre 12 et 14 % réalisée en silicium monocristallin, tandis que pour une cellule réalisée en silicium polycristallin, ce rendement est de 11 %.

Facteur de forme

Le facteur de forme FF est défini par le rapport suivant [4, 6] :

$$FF = \frac{I_{max} V_{max}}{I_{CC} V_{CO}} \quad (1.11)$$

Il détermine la forme de la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule photovoltaïque et sa valeur doit être supérieure à 0,7 pour une bonne cellule. Le facteur de forme est donc un paramètre utile pour établir et élaborer des tests de contrôle de qualité.

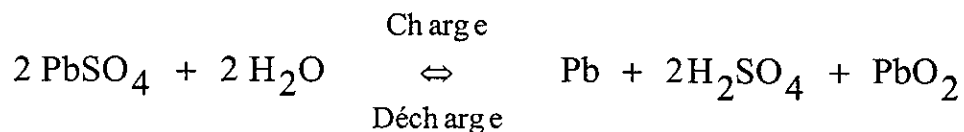
1.3 Stockage électrique

Une certaine quantité d'énergie électrique doit être mise en réserve pour pallier au caractère intermittent de l'énergie solaire reçue et à l'irrégularité de la puissance requise pour une utilisation ultérieure. Parmi les procédés de stockage d'énergie les plus adaptés aux installations photovoltaïques, il reste le stockage électrochimique. Le stockage le plus approprié est effectué par l'intermédiaire d'éléments de batterie ou d'accumulateurs au plomb.

1.3.1 Accumulateur au plomb

L'élément d'accumulateur au plomb est constitué d'un faisceau de plaques positives constituées de bioxyde de plomb (PbO_2), d'un faisceau de plaques négatives à base de plomb spongieux (Pb), et baignant dans une solution d'acide sulfurique H_2SO_4 .

La réaction réversible suivante (ou double sulfatation) traduit le principe de fonctionnement de l'accumulateur au plomb :



Au cours de la charge, la concentration en acide décroît, la force électromotrice de l'élément de batterie diminue, la résistance interne augmente. Par contre, à la décharge, la solution se régénère, la réaction inverse se produit.

En fin de charge, un processus d'électrolyse de l'eau provoque un dégagement d'hydrogène accompagné de vapeurs d'acide.

Il existe plusieurs types d'accumulateurs au plomb, mais tous présentent des caractéristiques communes. Les accumulateurs recommandés dans les applications photovoltaïques sont de type stationnaire et fonctionnent soit en mode flottant 'floating', car ils sont maintenus constamment en charge et ne subissent qu'une forte décharge qu'occasionnellement ou soit en mode de cyclage, c'est-à-dire en un cycle de charge et en un cycle de décharge [4, 5].

Les caractéristiques principales d'un accumulateur sont données ci-après.

Capacité

C'est la quantité maximale d'énergie restituable par l'accumulateur ou plus pratiquement, le nombre d'ampère- heures que peut débiter un accumulateur pour un courant et une tension de fin de décharge définis.

La capacité est donc proportionnelle à la quantité de matière active mise en jeu. Elle varie selon le régime de charge et de décharge, et surtout de la température.

Tension d'utilisation

C'est la tension aux bornes d'un élément d'accumulateur à laquelle l'énergie est stockée et restituée normalement. Les limites de la tension de l'élément sont respectivement de 2,3-2,5 V pour la fin de charge et de 1,7-1,8 V pour la décharge, cela pour une température de 20 °C.

Auto-décharge

Elle représente la perte en capacité, donc d'énergie en laissant l'élément de batterie au repos (sans charge) pendant un temps donné. Elle est due à la présence de systèmes parasites, qui s'ajoutent au système électrochimique de base.

L'auto-décharge croît :

- avec le vieillissement naturel de l'accumulateur,
- à la suite d'erreurs de manipulation (décharge trop profonde avec inversion de polarité, recharge à l'envers,..)
- à la suite de la rareté de l'entretien, d'une concentration d'acide non conforme,
- en fonction de la température,
- avec l'adjonction d'eau non distillée.

Durée de vie

La durée de vie d'un élément d'accumulateur est le nombre de cycles de charge et de décharge. Le rôle de la batterie est de pouvoir être chargée, et puis déchargée un certain nombre de fois, avant que ses caractéristiques ne se détériorent. Elle peut s'exprimer en années ou en nombre de cycles.

Rendement

On distingue deux rendements :

- Le rendement en quantité d'électricité (ou rendement faradique): C'est le rapport entre le nombre d'ampères-heures fournis par un accumulateur et celui qu'il faut restituer pour la remise à l'état initial de l'élément. Ce rendement varie pratiquement de 0,7 à 0,95 suivant le type de la batterie [4].

- Le rendement énergétique: C'est le rapport entre l'énergie électrique exprimée en wattheures restituée et l'énergie électrique fournie. Il est toujours inférieur au rendement faradique et varie suivant les types de batterie entre 0,45 et 0,8.

1.3.2 Caractéristique d'un accumulateur au plomb

Les caractéristiques tension - temps des accumulateurs au plomb pour différents régimes durant le processus de charge et de décharge sont représentées par les courbes ci après :

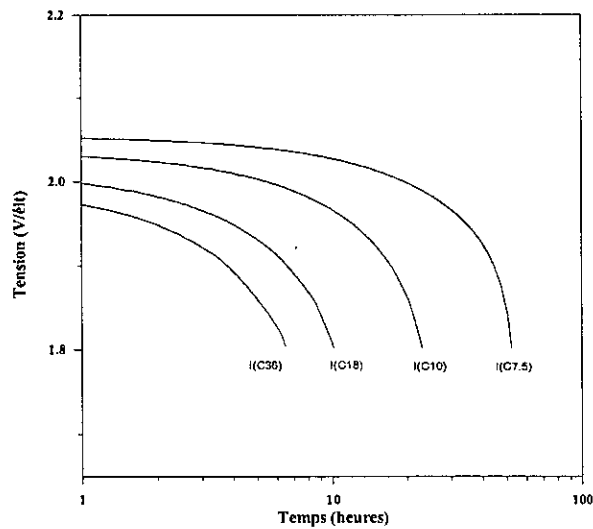


Figure 1.10 : Courbes de décharge de la batterie

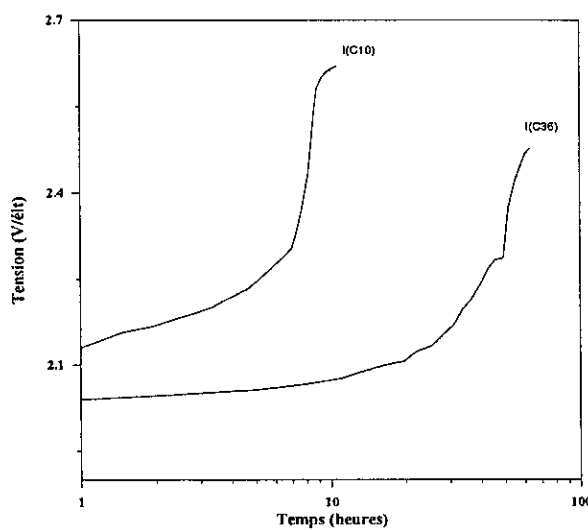


Figure 1.11 : Courbes de charge de la batterie

1.4 Système de conditionnement de la puissance

Suivant la nature du système photovoltaïque, le système de conditionnement de puissance permet d'assurer plusieurs fonctions, telles que :

- La régulation et le contrôle de l'état de charge de la batterie d'accumulateurs: deux procédés sont envisagés :
 - La régulation en courant et la régulation en tension, le contrôle de la charge et de la décharge de la batterie d'accumulateurs,

- le couplage optimal entre le générateur photovoltaïque et la batterie d'accumulateurs avec le contrôle de charge et de décharge [3].
- La conversion de l'énergie électrique continue en énergie alternative (DC-AC) [1, 2, 4].

1.4.1 Modes de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque

Si on considère que l'ensemble des éléments mis en jeu dans un système photovoltaïque sont directement couplés (en absence d'un dispositif de contrôle) (Figure 1.12), plusieurs modes de fonctionnement peuvent se présenter :

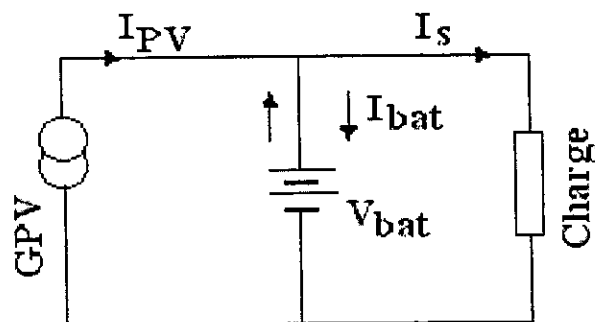


Figure 1.12 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque

- Si l'éclairement est suffisamment abondant, $I_{PV} > I_S$, la batterie et la charge sont alimentés simultanément. La tension de la batterie a tendance donc à augmenter.
- En cas d'égalité entre le courant I_{PV} et le courant d'utilisation I_S , la batterie n'est pas sollicitée, et la charge est directement alimentée par le générateur.
- Si l'éclairement est suffisamment faible, $I_{PV} < I_S$, la charge est alimentée à la fois par la batterie et le générateur.
- Si le courant du générateur est nul, $I_{PV} = 0$ (générateur à l'obscurité), la batterie est alors sollicitée par la charge.

Lorsqu'on fait une analyse des comportements de ce système, on peut noter quelques remarques :

- La batterie doit être utilisée dans les limites de charge et de décharge définies. Par conséquent, la prévision d'organes d'information protégeant la batterie est largement recommandée (éléments de coupure commandés par une technique de commande adéquate).
- Dans le cas où le générateur ne produit pas, la batterie débite dans le générateur, si la tension de la batterie est supérieure à la tension de circuit-ouvert du générateur. Le générateur devient récepteur et risque une altération de cet élément. Il est indispensable d'intercaler un élément qui s'oppose à cet effet (diodes anti-retour).

1.4.2 Techniques de régulation dans un système photovoltaïque

1.4.2.1 Régulation à coupure

Cette technique consiste en la commande en 'tout ou rien' des deux interrupteurs, qui assurent le couplage direct respectivement entre le générateur photovoltaïque et la batterie d'une part et entre la batterie et la charge d'autre part. Le premier interrupteur peut être monté soit en série, soit en parallèle, comme le montre la figure suivante.

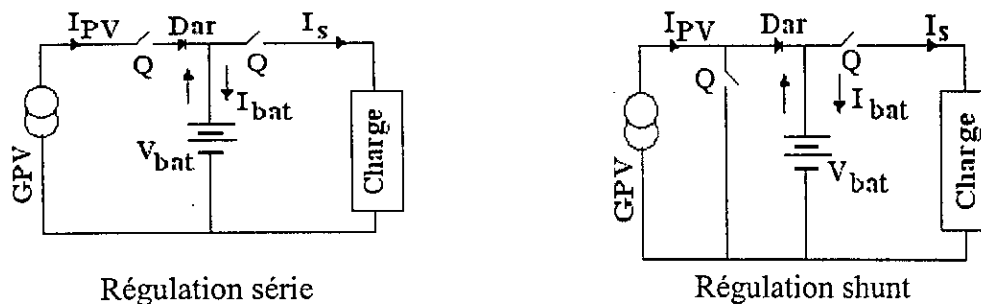


Figure 1.13 : Schéma du système de régulation à coupure

Le principe de fonctionnement de ce système de régulation à coupure se base sur les deux hystérésis correspondants aux processus de charge et de décharge de la batterie comme il est montré sur la figure 1.14.

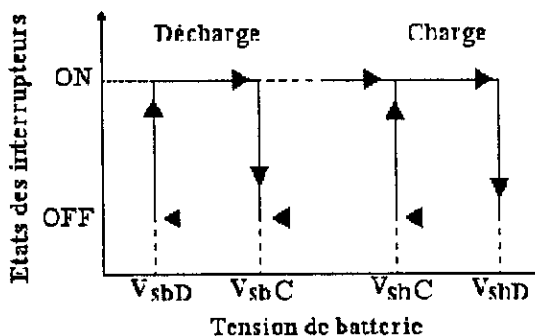


Figure 1.14 : Cycles d'hystérésis de charge et de décharge

Cas de la charge : Lors de la charge, le premier interrupteur Q est à l'état fermé (ON), la connexion générateur - batterie est établie. Le générateur photovoltaïque débite un courant et sans interruption. Le système de régulation mesure donc la tension aux bornes de la batterie. Lorsque cette dernière atteint la valeur du seuil haut V_{shD} (tension de fin de charge ou tension de seuil haut de déconnexion), et pour protéger la batterie contre les surcharges, cet interrupteur Q s'ouvre (Off), ce qui permet la déconnexion du générateur photovoltaïque de la batterie. La liaison générateur - batterie ne se rétablit que lorsque la tension redevient inférieure à la valeur du seuil haut V_{shC} (tension de seuil haut de reconnexion).

Cas de décharge : Lors de la décharge, le deuxième interrupteur Q se ferme (ON), la batterie restitue régulièrement l'énergie stockée à la charge, tant que l'énergie fournie par

le générateur est faible. Afin d'éviter que la batterie ne se décharge profondément, c'est-à-dire dans le cas où la tension est en dessous du seuil de décharge V_{sbD} (tension de décharge ou tension de seuil bas de déconnexion), la liaison batterie- utilisation est interrompu en mettant cet interrupteur Q à l'état ouvert (OFF) et ce qui permet à nouveau la reconnexion de la charge lorsque la tension atteint la valeur du seuil bas de reconnexion V_{sbC} .

Les avantages de cette technique peuvent être résumés comme suit : - une consommation propre faible, - une implémentation simple de cette technique. Par contre, cette technique présente des inconvénients, à savoir : une adéquation dans la charge de la batterie due à la coupure brusque du courant de charge; une nécessité d'ajouter des éléments pour que l'énergie excédentaire se dissipe (régulation parallèle), limitant ainsi son utilisation aux systèmes solaires de faible puissance; une mauvaise adaptation entre le générateur photovoltaïque et la batterie.

1.4.2.2 Régulation à coupure partielle

Le principe de cette technique de régulation consiste à fractionner le générateur photovoltaïque en plusieurs branches identiques associées en parallèle et connectées à la batterie par des interrupteurs placés également en parallèle (Figure 1.15).

En vue de réaliser une fin de charge complète de la batterie avec un courant décroissant, la régulation à coupure partielle est mise en œuvre pour permettre d'atteindre la pleine charge de la batterie.

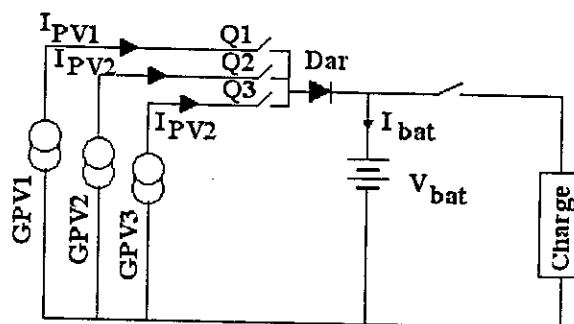


Figure 1.15 : Schéma d'un système de régulation à coupure partielle

Le fonctionnement de chacun de ces interrupteurs se fait selon un cycle d'hystérésis précédemment défini, permettant ainsi la déconnexion ou la connexion graduelle du générateur photovoltaïque, tenant compte de l'état de charge de la batterie.

En début de la charge, l'ensemble du générateur photovoltaïque débite. En phase de fin de charge, le courant commence à diminuer par palier et ce, par la déconnexion graduelle des branches du générateur successivement, jusqu'à l'annulation du courant. Quant à la décharge, il s'effectue de la même manière, en gardant le même procédé qu'en régulation à coupure décrite précédemment.

La technique de régulation à coupure partielle présente deux principaux avantages, qui sont: la simplicité d'implémentation autour de circuits analogiques, et la consommation propre faible. Cette technique présente certains inconvénients, comme une utilisation limitée aux systèmes photovoltaïques de grande puissance, et la présence de plusieurs éléments de coupure (relais) rendant le système encombrant.

1.4.2.3 Régulation à modulation de largeur d'impulsion

Dans le cas de la technique de régulation à modulation de largeur d'impulsion 'PWM', la phase de fin de charge de la batterie se fait avec un courant réduit et continu pour approcher idéalement de la pleine charge de la batterie.

Son principe de fonctionnement se base sur la commande 'PWM' d'un convertisseur DC/DC de type parallèle intercalé entre le générateur et la batterie. Le schéma de principe d'un tel dispositif est représenté en figure 1.16.

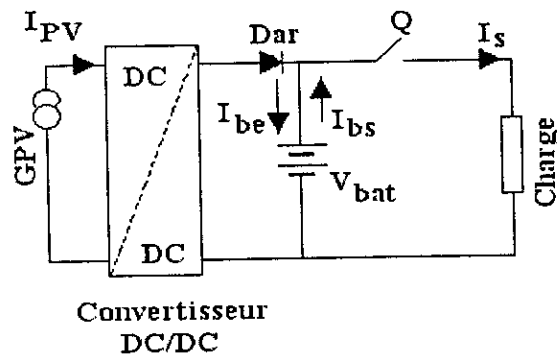


Figure 1.16 : Schéma synoptique de la régulation à modulation de largeur d'impulsion

Au début de la charge, le convertisseur DC/DC n'est pas opérationnel, la liaison générateur - batterie est assurée par l'intermédiaire d'un relais électromagnétique en tout ou rien. Le courant entrant dans la batterie est égal au courant délivré par le générateur de courant. Lorsque la tension de batterie atteint la valeur de 2,28 V/élément, le relais coupe la liaison générateur - batterie, et le convertisseur DC/DC entre en fonctionnement. Ce convertisseur est asservi pour délivrer à la batterie une tension en mode flottant et un courant décroissant.

L'obtention du signal de commande PWM est effectué en comparant un signal en dent de scie avec un signal continu, qui est l'image de la tension de la batterie. Il présente un rapport cyclique variable, dont les impulsions sont larges au début puis deviennent étroites au fur et à mesure de l'augmentation de la tension de la batterie. Le deuxième interrupteur Q est un relais électromagnétique, qui assure la décharge de la batterie vers la charge.

1.4.2.4 Régulation à optimisation de puissance

Contrairement aux techniques de régulation données précédemment, la technique à optimisation de puissance permet de gérer au mieux l'énergie disponible à la sortie du générateur photovoltaïque. Ce type de régulation assure une fonction d'adaptation d'impédance, en transférant la puissance électrique maximale issue du générateur photovoltaïque à la batterie, quelles que soient les variations d'éclairement et de température.

Il est recommandé d'incorporer un dispositif électronique, dont la fonction principale est la poursuite du point de puissance maximale du générateur photovoltaïque, appelée couramment MPPT 'Maximum Power Point Tracking'. Ce dispositif est un convertisseur DC-DC de type série ou parallèle (Figure 1.17).

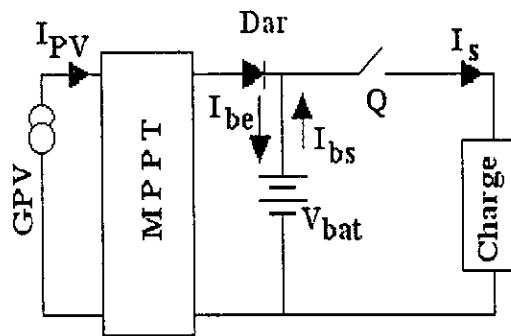


Figure 1.17 : Schéma de la régulation à optimisation de puissance 'MPPT'

1.4.3 Conversion continue/alternative

Les charges alimentées en courant alternatif nécessitent donc un convertisseur de type continu/alternatif (DC-AC) adapté à leurs caractéristiques. Ce convertisseur transforme en énergie électrique alternative, une énergie de type continu provenant soit de la batterie d'accumulateurs, soit directement du générateur photovoltaïque via le dispositif de régulation et de contrôle.

Le convertisseur DC-AC est appelé couramment 'onduleur'. C'est un dispositif électronique qui utilise les composants de puissance, tels que les MOSFET, BJT, IGBT etc. Il doit délivrer un signal le plus proche possible du signal sinusoïdal et avec une fréquence fixe. En effet pour les fonctionnements de la plupart des charges, la présence de certains harmoniques est néfaste. A cet effet, toute approche de commande doit prendre en compte les contraintes suivantes :

- La distorsion harmonique en régime permanent doit être rigoureusement minimisée,
- Le terme fondamental de la tension de sortie doit être réglé à une valeur de référence.

Dans les systèmes de pompage photovoltaïque, fonctionnant au fil du soleil, utilisent dans la plupart des cas, un onduleur triphasé, dont l'entrée est connectée à un générateur photovoltaïque et à la sortie une moto-pompe d'exhaure d'eau.

Dans les autres systèmes photovoltaïques, l'onduleur peut être de type monophasé.

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté chacune des parties composant le système photovoltaïque, à savoir : l'étude descriptive et détaillée des principaux paramètres caractéristiques pouvant influencer le comportement et le fonctionnement d'une installation photovoltaïque. Ces informations sont d'une importance certaine pour la suite de l'étude, quant à la modélisation et la simulation des divers éléments, à mener dans les prochains chapitres.

Chapitre 2

Modélisation et Simulation du Générateur Photovoltaïque

CHAPITRE 2

MODELISATION ET SIMULATION DU GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

2.1 Introduction

L'objet de ce chapitre porte sur l'étude de la modélisation et la simulation du module photovoltaïque composant le générateur, en tenant compte de l'influence du flux solaire et de la température sur les caractéristiques I-V et P-V de ce dernier.

2.2 Modélisation de l'élément de base du générateur photovoltaïque

Pour effectuer l'adaptation entre le générateur photovoltaïque permettant de transférer le maximum de la puissance fournie à l'utilisation, il est nécessaire d'étudier et d'adjoindre un système de conditionnement de puissance, alliant à la fois la gestion optimisée de l'énergie, sa conversion, la régulation et le contrôle [1, 12].

Le premier objectif de ce travail consiste en une étude de modélisation et de simulation de l'élément de base d'un générateur photovoltaïque, qui est la cellule photovoltaïque. La détermination de l'ensemble des modèles mathématiques relatifs au circuit électrique de la cellule, avec les divers paramètres influents sur son comportement, la simulation du modèle de cette cellule, en tenant compte de la variation des paramètres est d'une importance certaine pour la réalisation de ce travail [14].

▪ **Modèle mathématique d'une cellule solaire**

La description mathématique de la caractéristique I-V d'une cellule solaire est obtenue à partir de la physique de la jonction PN.

L'un des modèles les plus simples, relatif à la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule photovoltaïque est une équation dite à une exponentielle [4, 10].

Elle est généralement admise comme modèle qui décrit parfaitement le comportement de la cellule, plus particulièrement les cellules fabriquées à base de silicium monocristallin. Le schéma du circuit électrique équivalent est présenté à la figure 2.1.

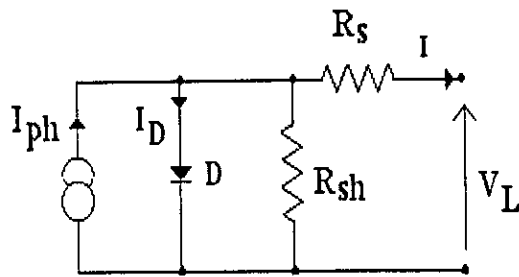


Figure 2.1 : Schéma du circuit équivalent de la cellule

Ce modèle mathématique de la cellule est représenté par une équation non linéaire, qui donne une forme implicite au courant généré par cette cellule.

Le courant fourni reste malgré tout difficile à déterminer. Il est représenté par l'équation 2.1 [4, 14].

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{q(V_L + R_s I)}{A k_B T}\right) - 1 \right] - \frac{V_L + R_s I}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

Les grandeurs mises en jeu dans cette équation, comme le courant photogénéré I_{ph} et le courant de saturation I_{sat} sont fortement altérés par les paramètres météorologiques, le flux solaire et surtout la température.

2.3 Outil de simulation

Dans le but de trouver un modèle qui retrace fidèlement le fonctionnement de la cellule et par conséquent le générateur photovoltaïque, l'approche originale que nous avons développée est l'utilisation d'un logiciel de simulation de type orienté circuit où les principales grandeurs météorologiques T_a et ϕ sont introduites dans ce modèle comme paramètres d'entrée, et il est recueilli en sortie les deux grandeurs électriques I et V de la cellule photovoltaïque [23].

Le schéma synoptique de la figure suivante illustre l'approche suivie.

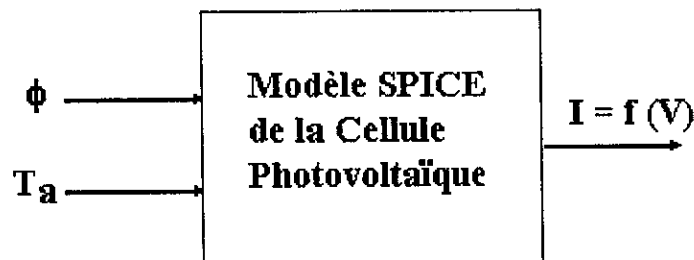


Figure 2.2 : Schéma synoptique de l'approche suivie pour la simulation

Nous utilisons dans notre simulation le logiciel SPICE (Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis), qui est un logiciel de simulation de circuits développé à l'Université de Californie. Plusieurs versions de SPICE pour micro-ordinateurs et stations de travail sont actuellement disponibles.

PSpice de MicroSim Corporation est probablement la version la plus 'populaire' de SPICE grâce à ses interfaces conviviales et sa capacité de simuler des circuits digitaux. C'est cette version que nous avons utilisée.

Le logiciel PSpice comprend plusieurs modules :

- Schematics: Module de saisie de schéma
- PSpice: Module de simulation
- Probe: Module de traçage de courbe.

La figure suivante illustre l'interaction entre ces modules.

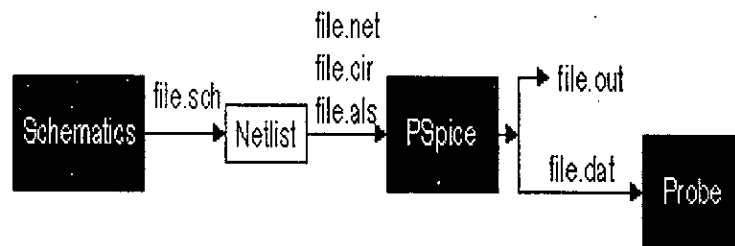


Figure 2.3 : Schéma fonctionnel de Pspice

PSpice dispose d'une option particulière l'ABM (Analog Behaviour Modelling) qui permet d'utiliser des blocs synoptiques dans les simulations. C'est cette option que nous exploitons dans notre travail.

L'ABM permet l'analyse du comportement des circuits électriques à partir de leurs modèles mathématiques. Elle peut être utilisée pour résoudre les équations des systèmes linéaires et non linéaires, même pour les systèmes les plus complexes dans leurs formes implicite et explicites. Ces équations vont être converties en circuits électriques et résolues par Pspice en utilisant l'analyse DC, l'analyse temporelle ou bien l'analyse fréquentielle.

L'ABM a aussi la possibilité d'évaluer des expressions représentant des circuits à fonctions variables (tension, courant, temps de simulation) utilisant des sources de tension et de courant contrôlés.

2.4 Développement du modèle mathématique

2.4.1 Equation des grandeurs du modèle de la cellule

Les principales équations utilisées dans le modèle mathématique de la cellule sont les suivantes : [10, 15, 17]

- Le courant photogénéré I_{ph} de la cellule photovoltaïque de base est donnée par la relation 2.2. Cette équation est valable pour un certain nombre de cellules associées en parallèle [44].

$$I_{ph} = \{I_{cc} \cdot \phi_n + I_t (T_c - T_r)\} n_p \quad (2.2)$$

- Tout en sachant que le courant total I produit par la cellule est la différence du courant photogénéré I_{ph} et du courant de diode I_D . Le courant de la diode est donnée par l'équation 2.3.

$$I = I_{ph} - I_D \quad (2.3)$$

$$I_D = \left\{ I_{sat} \exp \left(\frac{q V_L / n_s}{A k_B T_c} - 1 \right) \right\} n_p \quad (2.4)$$

- L'équation donnant le courant de saturation de la diode est la suivante :

$$I_{sat} = I_0 \left(\frac{T_c}{T_r} \right)^3 \frac{q E_g}{B k_B} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_c} \right) \quad (2.5)$$

Avec :

I_{ph} : le courant photogénéré [A];

ϕ_n : le flux solaire normalisé { niveau de base = 1000 W/m² };

I_t : le coefficient de température du courant de court-circuit I_{cc} { 23 10⁻⁴ AK⁻¹ };

I_{cc} : le courant de court-circuit { = 3,15 A };

I_D : le courant de la diode [A];

I_{sat} : le courant de saturation [A];

q : la charge de l'électron { 1.6 10⁻¹⁹ J/K };

k_B : la constante de Boltzman;

A { = 2,36 } et B { = 3,15 } sont des coefficients adimensionnels tenant compte de la fabrication et du matériau semi-conducteur utilisé.

I_0 : le courant de saturation inverse à la température de référence { 2,2 10⁻⁵ A };

T_c : la température de la cellule [K];

T_r : la température de référence { $T_r = 300$ K };

n_p et n_s sont respectivement le nombre de cellules en parallèle et en série;

E_g : l'énergie du gap du semi conducteur en silicium { = 1,12 eV };

ϕ : le flux solaire [W/m²];

T_a : la température ambiante;

V_L : la tension aux bornes de la charge.

2.4.2 Modèle de la température de la cellule T_c

Le modèle mathématique représentant la température de la cellule, faisant partie intégrante du modèle général de la cellule, est une équation qui dépend fortement du flux solaire et de la température ambiante. L'équation de ce modèle est donnée ci-après : [10, 50]

$$T_c = 273 + \phi/4 + 0,9 T_a \tag{2.6}$$

Le schéma représentatif du modèle de la température cellule en utilisant Pspice est donné par la figure ci-dessous. Ce schéma servira pour effectuer la simulation de cette température de la cellule.

La température ambiante et le rayonnement solaire sont considérés comme des variables paramétriques lorsqu'on utilise le logiciel Pspice .

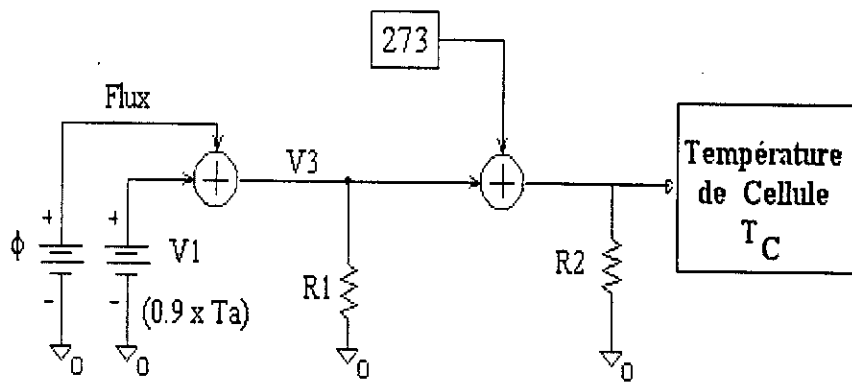


Figure 2.4 : Schéma du modèle de la température cellule

2.4.3 Modèle du courant photogénéré de la cellule I_{ph}

Le modèle mathématique du courant photogénéré de la cellule photovoltaïque I_{ph} , représenté par l'équation 2.2, est principalement fonction du flux solaire et de la température de la cellule. Le schéma bloc de ce modèle, qui nous a permis de réaliser la simulation en exploitant l'option 'ABM' de Pspice est donné par la figure ci-dessous.

Il est à remarquer que ce modèle tient compte du modèle de la température de la cellule déterminé précédemment.

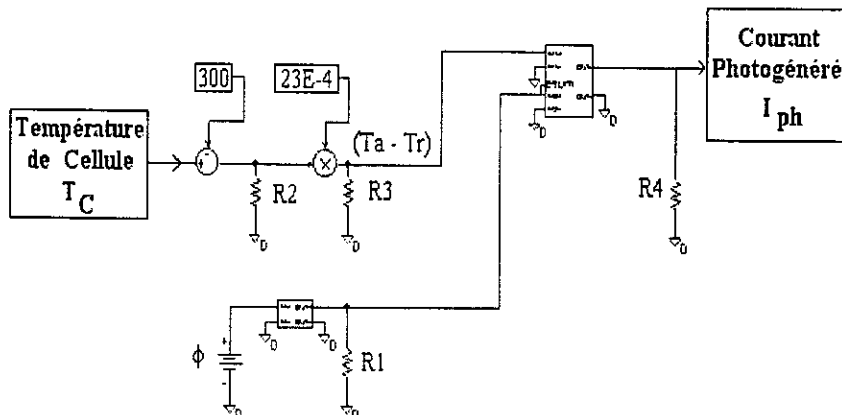


Figure 2.5 : Schéma du modèle du courant photogénéré

2.4.4 Modèle du courant de saturation de la diode I_{sat}

D'après l'équation 2.4, le courant de saturation I_{sat} de la diode est fortement dépendant de la température. Il est indispensable d'introduire son modèle dans l'exploitation du modèle du courant de la diode I_D .

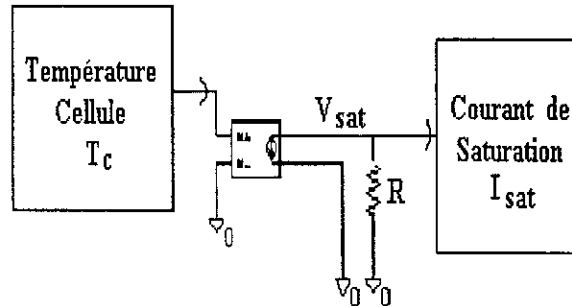


Figure 2.5 : Schéma du modèle du courant de saturation

2.4.5 Modèle du courant de la diode I_D

L'équation 2.3 permettant le calcul du courant de la diode I_D donne le modèle mathématique. Ce modèle est représenté par la figure suivante. Il fait appel à la connaissance de la température de la cellule T_c et du courant de saturation de la cellule I_{sat} , par l'intermédiaire de leur modèle respectif.

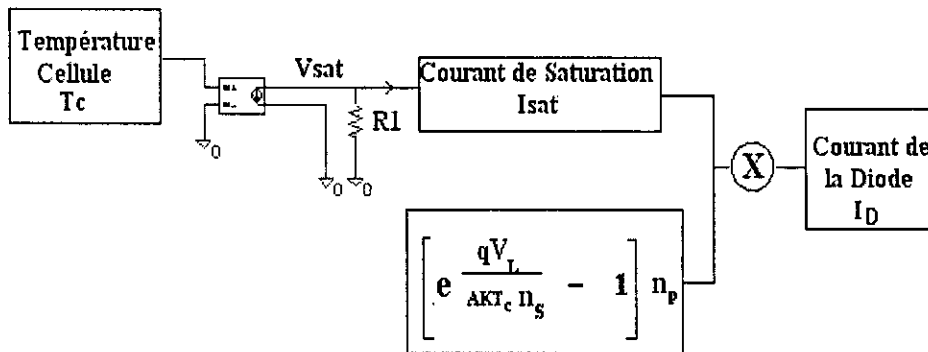


Figure 2.6 : Schéma du modèle du courant de la diode

2.4.6 Modèle global

Le courant I fourni par la cellule photovoltaïque est obtenu en regroupant l'ensemble des modèles établis précédemment, comme le montre la figure ci-dessous:

2.5 Simulation du modèle global

2.5.1 Courbes caractéristiques I-V et P-V du générateur

Une fois décrit l'ensemble des modèles relatifs à la cellule ou au module photovoltaïque, et simulé par le Pspice, on peut tracer leurs courbes caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$.

Par ailleurs, il est tenu compte également de l'influence des paramètres 'température et flux solaire' sur ces deux caractéristiques.

• Caractéristique $I = f(V)$

En utilisant le logiciel de simulation Pspice, la courbe caractéristique $I = f(V)$ de la cellule photovoltaïque a été obtenue en effectuant la simulation selon le modèle mathématique établi précédemment (Equation 2.1), est représentée sur la figure 2.8.

Cette représentation obtenue peut faire l'objet soit d'une seule cellule ou soit d'un groupe de cellules connectées en série (module photovoltaïque composée de 36 cellules au silicium monocristallin). Cette dernière découle directement de l'ensemble des équations mathématiques dont les modèles ont été étudiés à cet effet.

Les paramètres choisis sont :

- Flux solaire $\phi = 1000 \text{ W/m}^2$
- Température ambiante $T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

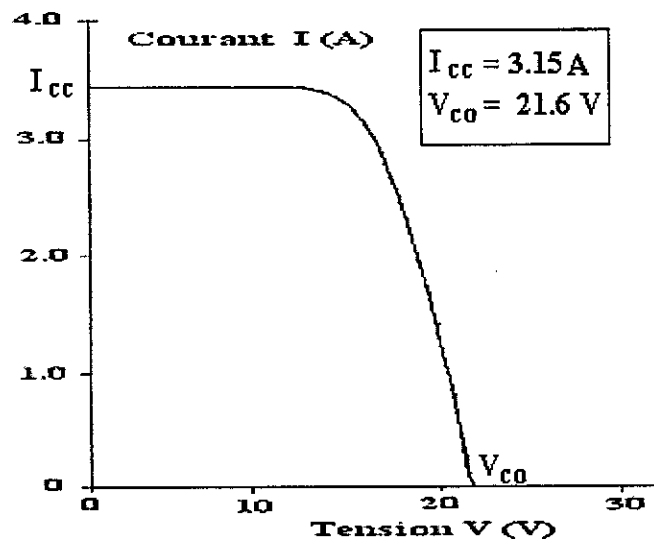


Figure 2.8 : Caractéristique Courant - Tension $\{ I = f(V) \}$
d'un module pour $\phi = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

Les résultats de simulation obtenus pour la courbe caractéristique du module photovoltaïque montrent que les valeurs du courant de court-circuit et de la tension en circuit ouvert sont proches des valeurs trouvées dans la littérature [2, 4].

- **Caractéristique $P = f(V)$**

La courbe caractéristique $P = f(V)$, représentant la puissance de sortie de la cellule photovoltaïque ou d'un groupe de cellules connectées en série en fonction de la tension V , est obtenue par simulation en utilisant le même logiciel que précédemment. Cette caractéristique a été obtenue en effectuant le produit de la tension par le courant généré $\{P = V \times I\}$ selon le modèle mathématique établi précédemment.

Les paramètres choisis sont :

- Flux solaire $\phi = 1000 \text{ W/m}^2$
- Température ambiante $T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

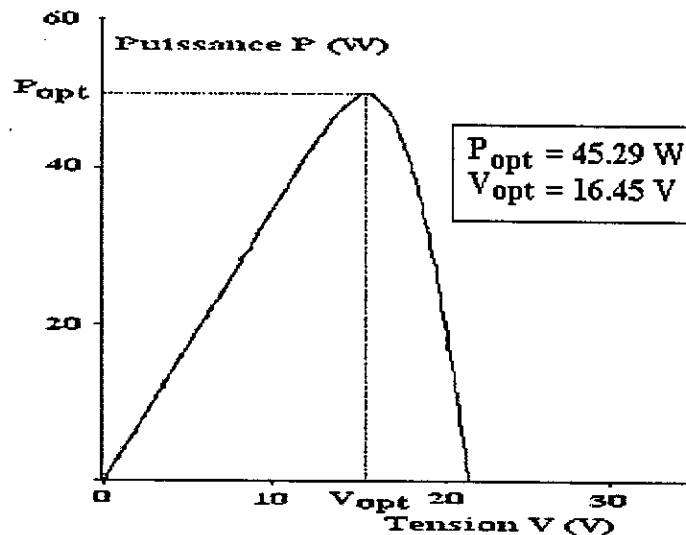


Figure 2.9 : Caractéristique Puissance - Tension $\{P = f(V)\}$
d'un module pour $\phi = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

La courbe caractéristique $P - V$, simulée montre que la puissance optimale et la tension optimale se rapprochent des valeurs caractéristiques d'un module d'environ 50 Watts, aux conditions standards.

2.5.2 Influence des paramètres

Pour la mise en évidence de l'influence des paramètres météorologiques ϕ et T_a , la méthodologie adoptée pour la réalisation de la simulation de la cellule ou d'un module photovoltaïque est la suivante :

- dans un premier temps, la température ambiante est fixée à une valeur de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, puis on fait varier le flux solaire dans une certaine gamme (entre $0,100$ à 1 kWm^{-2}), ce qui nous indiquerait l'influence du principal paramètre météorologique sur le comportement du générateur;
- dans une deuxième étape, le flux solaire est fixé à une valeur constante de 1000 W/m^2 , puis on fait varier le paramètre climatologique T_a pour y voir l'effet dû à ce phénomène.

2.5.2.1 Influence du flux solaire sur la caractéristique I - V

La caractéristique $I = f(V)$ de la cellule photovoltaïque ou d'un module, est établie par simulation, en faisant varier le paramètre flux solaire ' ϕ ' entre 1000 et 100 W/m^2 . Nous obtenons à cet effet un faisceau de courbes caractéristiques I-V de la même allure, comme représenté dans la figure ci-dessous.

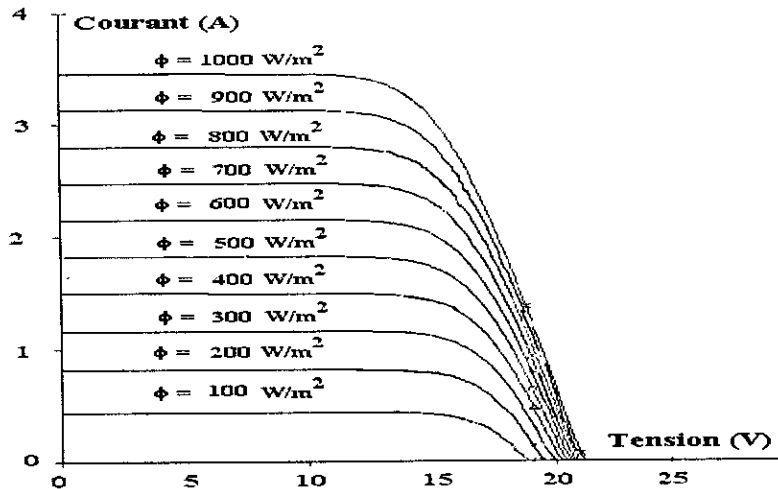


Figure 2.10 : Influence de flux solaire sur la caractéristique courant – tension

Les valeurs du courant de court-circuit et de la tension en circuit ouvert pour chacune des caractéristique I - V, en fonction du flux solaire, sont résumées au tableau 2.1. Ces valeurs sont prises de la courbe caractéristique représentée en figure 2.10.

Tableau 2.1 : Valeurs de I_{cc} et V_{co} pour chaque niveau de flux

Flux solaire ϕ (W/m^2)	Courant de court-circuit I_{cc} (A)	Tension de circuit ouvert V_{co} (V)
1000	3,154	21,539
900	2,858	21,329
800	2,561	21,119
700	2,264	21,049
600	1,967	20,769
500	1,668	20,699
400	1,367	20,280
300	1,061	20,070
200	0,744	20,000
100	0,400	19,300

Nous remarquons que l'influence de la décroissance du flux solaire fait diminuer fortement la valeur du courant de court-circuit I_{cc} . Par contre, une diminution plus faible de la tension de circuit ouvert V_{co} lorsque ce flux diminue, est constatée. Le point de puissance optimale s'abaisse par conséquent.

2.5.2.2 Influence du flux solaire sur la caractéristique P - V

La caractéristique P - V, représentant la puissance de sortie du module photovoltaïque par rapport à la tension V, obtenue par simulation pour étudier l'effet de la variation du flux solaire dans la même gamme, est donnée sur la figure ci-après.

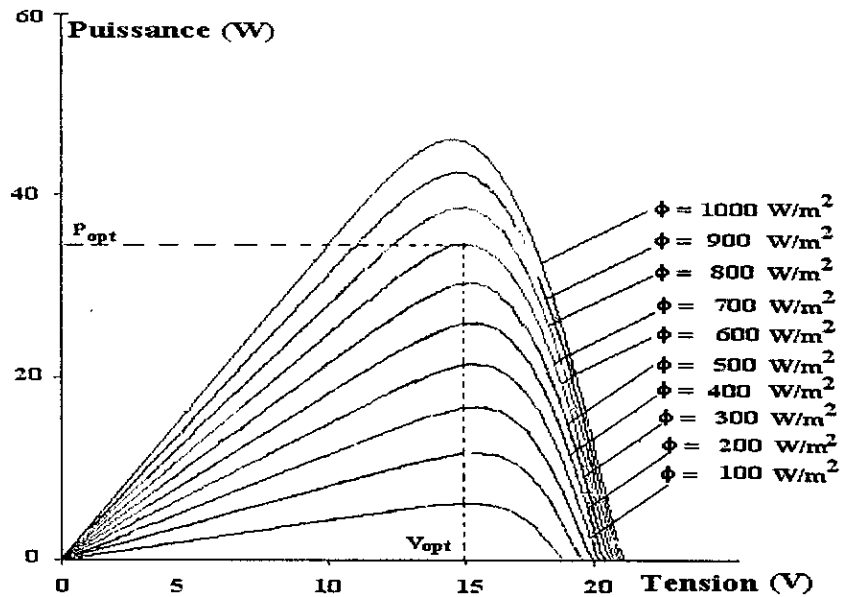


Figure 2.11 : Influence du flux sur la caractéristique puissance - tension

Nous obtenons donc un faisceau de courbes caractéristiques $P = f(V)$ de même allure. Nous constatons que le point de puissance optimale se trouve sur une droite presque verticale et que la puissance optimale diminue avec la décroissance du flux solaire.

2.5.2.3 Influence de la température sur la caractéristique I - V

La caractéristique I-V du module photovoltaïque, est établie par simulation, en faisant varier la température ambiante T_a sur un intervalle compris entre 10 et 40 °C. Le flux solaire est maintenu constant à la valeur de 1000 W/m^2 .

Nous obtenons donc des courbes caractéristiques I - V pour chaque variation de température et dont l'allure est identique, comme cela est représenté dans la figure ci-dessous.

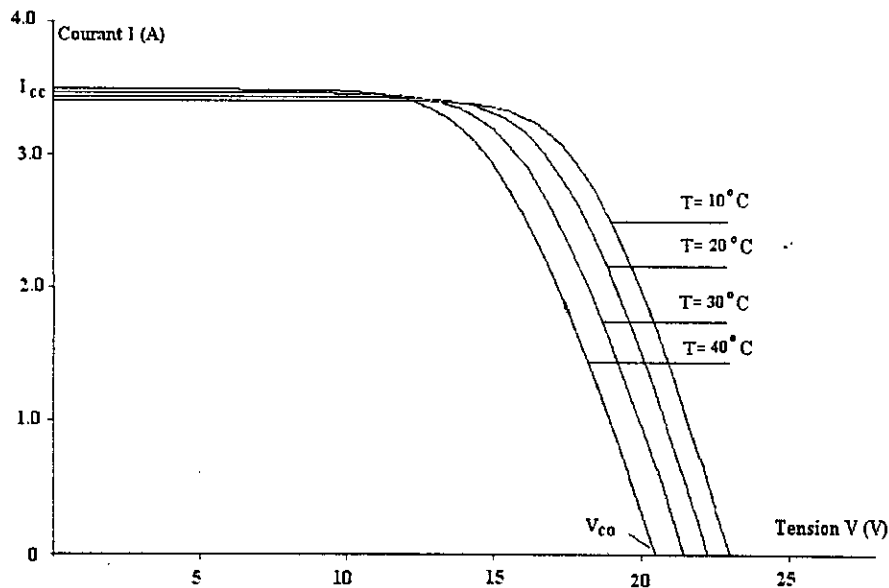


Figure 2.12 : Influence de la température ambiante T_a sur la caractéristique I - V

Les valeurs du courant de court circuit et de la tension en circuit ouvert pour chaque caractéristique I - V, fonction de T_a , sont données dans le tableau 2.2. Ces valeurs sont prises de la courbe ci-dessus.

Tableau 2.2 : Valeurs de I_{cc} et V_{co} pour différentes températures

Température T_a (° C)	Courant de court-circuit I_{cc} (A)	Tension de circuit ouvert V_{co} (V)
40	3,180	20,350
30	3,160	21,259
20	3,137	22,168
10	3,112	22,867

On note que lorsque la température ambiante T_a augmente, la tension de circuit ouvert V_{co} diminue, qu'on peut visualiser sur le faisceau de caractéristiques I - V. Par contre, le courant de court-circuit I_{cc} demeure pratiquement constant. Le point de puissance optimale s'abaisse par conséquent.

2.5.2.4 Influence de la température sur la caractéristique P - V

L'effet de la variation de la température ambiante, est aussi visualisé sur la caractéristique P - V { puissance de sortie en fonction de la tension } de la cellule.

La courbe est obtenue par cette simulation, en faisant varier la température de 10°C à 40 °C, et en gardant le flux solaire à la valeur standard de 1000 W/m².

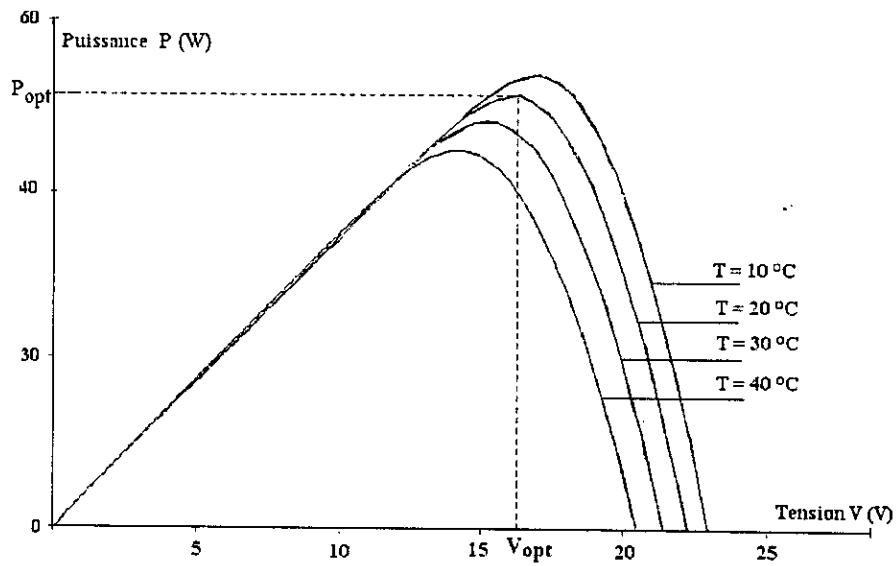


Figure 2.13 : Influence de la température ambiante T_a sur la caractéristique P - V

Nous constatons que lorsque la température augmente, la puissance optimale diminue, de même que la tension optimale.

2.6 Conclusion

La modélisation et la simulation du générateur photovoltaïque effectuée dans ce chapitre et l'étude de l'influence du flux solaire et de la température sur des courbes caractéristiques I - V et P - V permettent de connaître son comportement pour un meilleur suivi de la poursuite de point de puissance maximale.

Chapitre 3

Stratégies de Commande pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale

CHAPITRE 3

STRATEGIES DE COMMANDE POUR LA POURSUITE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE

3.1 Introduction

Pour obtenir un meilleur rendement dans le fonctionnement des générateurs photovoltaïques, la technique, appelée 'Poursuite de Point de Puissance Maximale – MPP', qui consiste à transférer de façon optimale toute la puissance électrique à extraire de cette source d'énergie photovoltaïque vers la charge à alimenter doit être utilisée dans toutes applications utilisant ces générateurs, et deviendra nécessaire et même indispensable

Selon la théorie du transfert optimal de puissance, la puissance fournie à la charge est maximale quand l'impédance interne de la source solaire est bien adaptée à l'impédance de la charge. Ainsi, l'impédance vue du côté de convertisseur (peut être ajusté en contrôlant le rapport cyclique D), il est nécessaire d'adapter l'impédance interne du générateur solaire lorsque le système est exigé pour fonctionner près du MPP du générateur solaire [1, 2, 15].

Comme on l'a vu, les générateurs photovoltaïques présentent une caractéristique courant-tension, non linéaire qui varie avec la température et le flux solaire, à tout instant.

Il est donc difficile de localiser le point de puissance maximale sur cette caractéristique. La méthode de localisation conventionnelle de ce point de puissance est appelée généralement la poursuite du point de puissance maximale ou 'MPPT - Maximum Power Point Tracking'.

Plusieurs techniques et méthodes ont ainsi été mises au point et développées par des chercheurs. Ces méthodes pour la recherche de ce point de puissance maximale sont présentées ci-après.

3.2 Différentes méthodes utilisées pour la poursuite du point de puissance maximale

L'unité de contrôle et de régulation permet d'optimiser l'énergie issue du générateur photovoltaïque pour la transférer à la charge. Le système servant d'interface entre le générateur photovoltaïque et la charge à alimenter est un convertisseur DC-DC commandé en fermeture et en ouverture (ON/OFF), afin que le fonctionnement puisse s'effectuer au point de puissance maximale 'MPP' du générateur, quelles que soient les perturbations climatologiques (éclairage et température).

Les techniques de contrôle employées pour la poursuite du point de puissance peuvent être des méthodes analogiques et numériques. Ces techniques de recherche de ce point sont rapportées dans la littérature [12, 24, 25], entre autres :

- la méthode de la Dérivée de la Puissance,
- la méthode de ‘Comparaison de Phase’,
- la méthode de la Cellule Pilote,
- la méthode dite ‘Perturber et Observer’.

3.2.1 Méthode de la Dérivée de la Puissance

Cette méthode est basée sur la recherche de l’extremum de la courbe de puissance $P = f(V)$ obtenue directement de la caractéristique du générateur photovoltaïque $I = f(V)$. Le point de puissance maximale ‘MPP’ est obtenu lorsque la dérivée de la puissance par rapport à la tension s’annule.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (3.1)$$

L’étude du signe de ce gradient de la puissance est directement déterminé à partir du signe de dP/dt et du signe de dV/dt . La valeur de la pente donne alors une information précise sur la position du point de fonctionnement par rapport au point maximum. [24, 42]

Deux cas sont à distinguer :

- dP/dV est positif; dans ce cas le point de fonctionnement se trouve à gauche du ‘MPP’, alors il faudrait augmenter la tension pour s’approcher de ce point ‘MPP’;
- dP/dV est négatif; le point de fonctionnement se trouve donc à droite du ‘MPP’, alors il faudrait diminuer la tension pour s’approcher du ‘MPP’.

Dans un premier temps, on détermine par calcul la puissance délivrée par le générateur, et cela à partir des données mesurées de la tension et du courant fournis par les modules.

Dans un deuxième temps, lorsqu’on utilise par exemple, un multiplieur, analogique ou numérique, visualisé dans le schéma ci-après, on procède à la vérification du signe de la dérivée dP/dt ainsi que le signe de dV/dt .

Le sens de variation de ces deux grandeurs peut être connu en utilisant les différentiateurs représentés sur ce schéma.

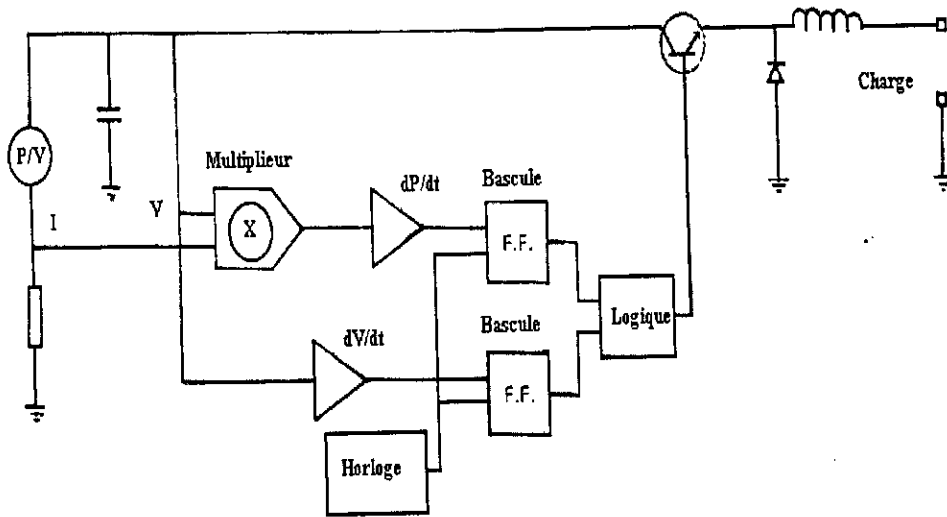


Figure 3.1 : Schéma du système MPP basé sur la dérivée de la puissance

- Si le point de fonctionnement se trouve initialement sur le point (a). Il a tendance à se déplacer vers le point (b) (Fig. 3.2), ce qui veut dire que les deux grandeurs dP/dt et dV/dt sont toutes deux de signe négative. L'action à entreprendre dans ce cas est de diminuer le rapport cyclique **D** pour revenir dans le sens inverse (c'est-à-dire vers le point de puissance maximale).

$$D = \frac{V_S}{V_g} \tag{3.2}$$

- Dans le cas où les deux grandeurs dP/dt et dV/dt sont toutes deux positives, ce qui se traduit sur la courbe caractéristique $I = f(V)$ par un déplacement du point de fonctionnement de (a) vers (c), le rapport cyclique **D** est donc diminué davantage pour atteindre le point de puissance maximale.

- Dans le cas où les deux grandeurs dP/dt et dV/dt sont de signe inverse, c'est-à-dire dP/dt négatif et dV/dt positif, qui se traduit par le déplacement du point de fonctionnement de (d) vers (e).

Cela nous amène à mener une action sur une augmentation du rapport cyclique **D** pour atteindre le point de puissance maximale.

- Dans le cas où les deux grandeurs dP/dt et dV/dt sont de signe inverse, c'est-à-dire dP/dt positif et dV/dt négatif, se traduisant par le déplacement du point de fonctionnement de (d) vers (f).

L'action à entreprendre sera d'augmenter le rapport cyclique **D** pour atteindre le point de puissance maximale.

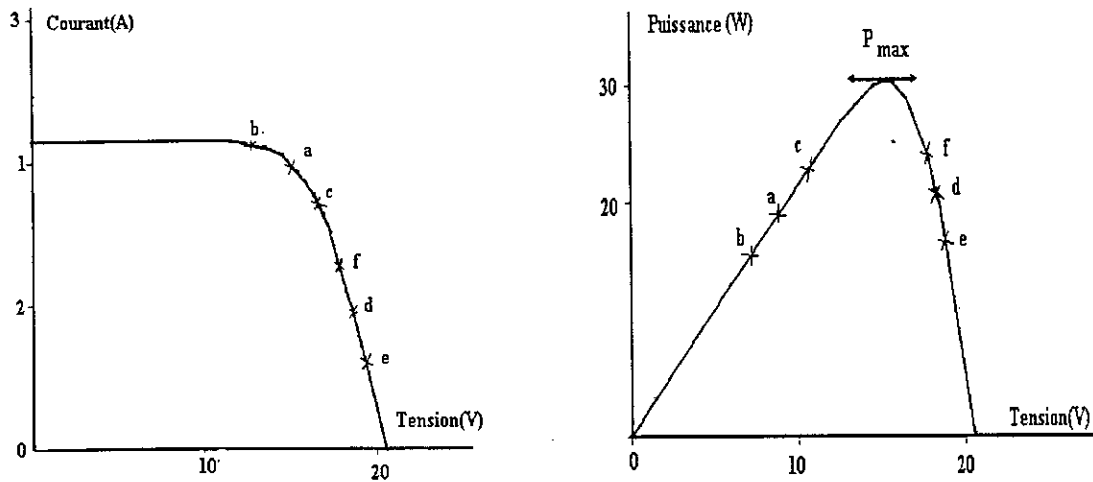


Figure 3.2 : Courbe caractéristique I - V et P - V

Le tableau suivant récapitule toutes les actions à effectuer sur le commutateur.

Tableau 3.1 : Action à entreprendre

Signe dV/dt	Signe dP/dt	Action à effectuer sur le commutateur
-	-	Ouvert 0
+	+	Ouvert 0
+	-	Fermé 1
-	+	Fermé 1

Le principal inconvénient de cette méthode est l'instabilité du système qui est dû principalement à la mesure de la dérivée de la puissance.

Des solutions sont apportées pour pallier à cet inconvénient par un ajout de certains éléments de mémoire et par une implémentation par microprocesseur. Mais il resterait toujours que cette méthode ne facilite pas la convergence du point de fonctionnement ainsi mesuré vers le point de puissance maximale, mais que ce point oscille autour de ce dernier.

3.2.2 Méthode de comparaison de phase

Le but de cette méthode consiste à faire varier le rapport cyclique D qui est égal à V_s / V_g par l'ajout ou le soustraction d'un signal carré ou sinusoïdal de fréquence f , et à l'aide d'un comparateur de phase délivrant la différence de phase entre la puissance P et la tension V aux bornes du générateur.

La différence de phase entre ces deux grandeurs P et V , désignées par la caractéristique $P = f(V)$ ainsi représentée ci-dessous, nous amène à distinguer deux situations :

- si le signal de comparaison de phase est nul, le point de puissance maximale se trouve toujours à droite du point de fonctionnement actuel, cela veut dire que ces deux grandeurs sont en phase.
- si dans le cas où les deux grandeurs sont en opposition de phase, le point de puissance maximale est à gauche du point de fonctionnement actuel, le rapport cyclique D doit être grand pour rattraper le point de puissance maximale.

La figure ci-dessous illustre le principe :

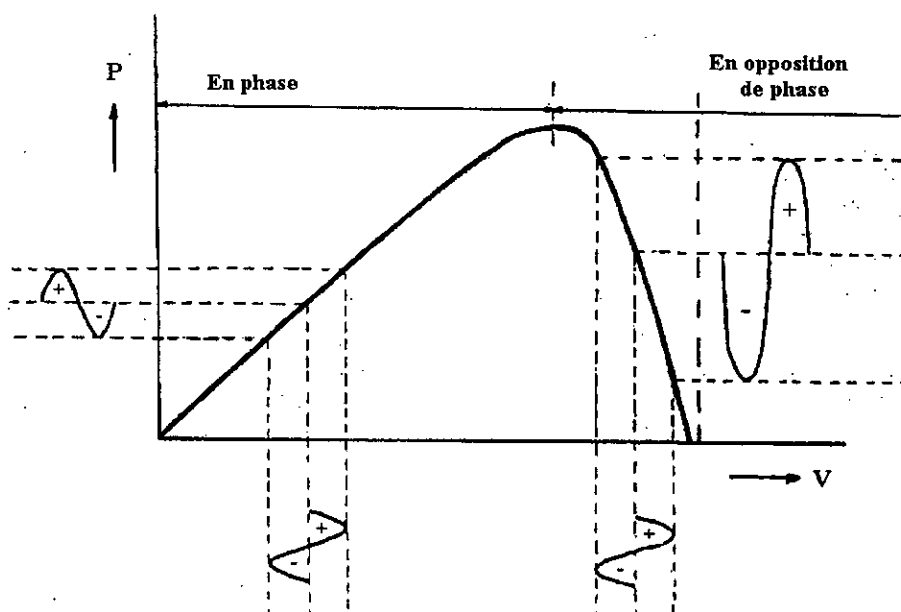


Figure 3.3 : Schéma de principe de la technique de la comparaison de phase

3.2.3 Méthode utilisant la cellule pilote

Le principe de la 'cellule pilote' est essentiellement basé sur l'utilisation d'une unité photovoltaïque de même nature que le générateur photovoltaïque contrôlé dans le but de le faire fonctionner au point de puissance optimale [15, 48].

Cette unité est constituée principalement d'une cellule photovoltaïque élémentaire au silicium monocristallin ou polycristallin ou d'un ensemble de cellules de même matériau que le champ de modules. Elle est électriquement séparée du champ de modules photovoltaïques principal.

Le point de fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque est atteint lorsqu'on asservit la tension de sortie V_{opt} à la tension de circuit ouvert V_{co} de la cellule pilote, ou lorsqu'on asservit le courant I_{opt} produit par les modules par rapport au courant de court-circuit I_{cc} de la cellule pilote.

Les valeurs de la tension et du courant fourni par le générateur photovoltaïque sont alors respectivement des multiples de la tension de circuit ouvert V_{co} et du courant de court-circuit I_{cc} de la cellule pilote.

Les figures ci-dessous montrent que les rapports V_{opt}/V_{co} et I_{opt}/I_{cc} n'excèdent pas 2 %.

La figure 3.4 représentant la variation de la courbe caractéristique $I = f(V)$ du générateur photovoltaïque lorsque la température varie et que le flux est constant à la valeur standard ($\phi = 1000 \text{ W/m}^2$). Le rapport de la tension correspondant au point de puissance maximum à la tension de circuit ouvert V_{co} est pratiquement constant.

On remarque que le rapport V_{opt}/V_{co} varie entre 0,75 à 0,78 pour une variation de température de 60 °C, tandis que pour le courant, le rapport I_{opt}/I_{cc} varie entre de 0,80 à 0,82.

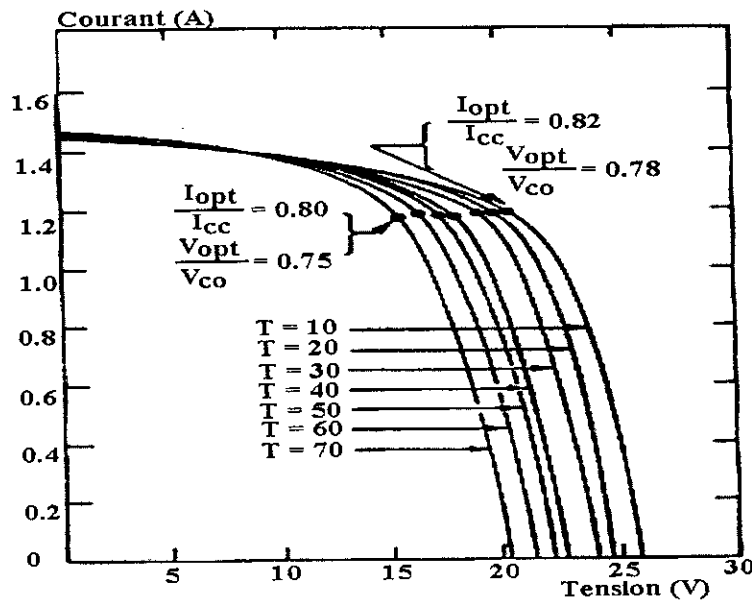


Figure 3.4 : Courbes I-V d'un module photovoltaïque connecté à une charge
Eclairement constant ($\phi = 1000 \text{ W/m}^2$), température variable

Tandis que dans la figure 3.5 ci-après, on a représenté la même courbe caractéristique $I = f(V)$ du générateur photovoltaïque, mais avec un flux variable et à une température constante qui est égale à 30 °C. Les mêmes constatations sont ainsi faites sur les rapports précédents.

La plage de variation est pratiquement nulle pour le rapport de la tension de circuit ouvert au point de puissance maximale, et elle est de + 3 % pour le rapport du courant au point de puissance maximale.

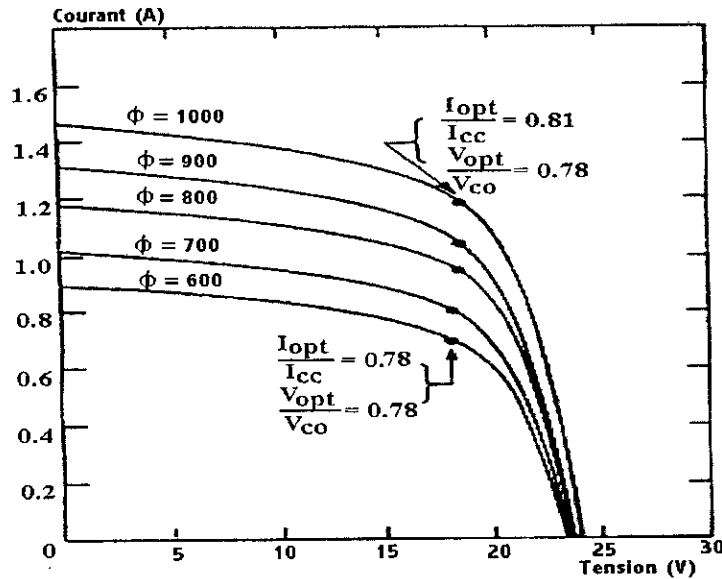


Figure 3.5 : Courbes I-V d'un module photovoltaïque connecté à une charge
Eclaircement variable et température constante (T = 30 °C)

Le schéma de principe de l'implémentation de cette méthode est illustré par la figure ci-dessous.

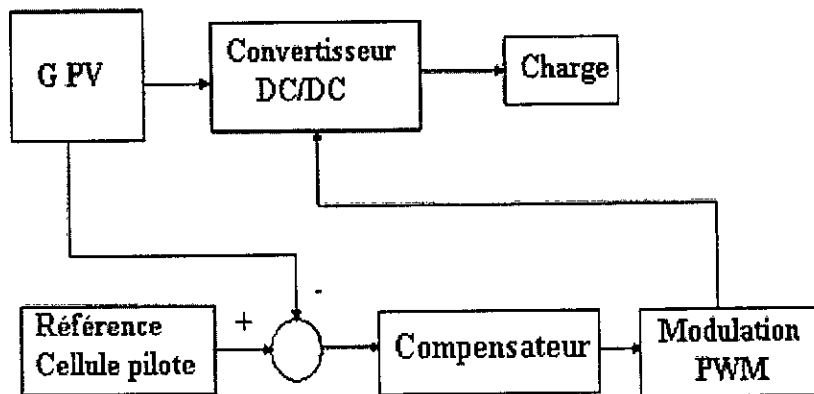


Figure 3.6 : Schéma de principe de la cellule pilote

Il est démontré que le rendement est plus élevé dans le cas où l'asservissement est pris par rapport à la tension de circuit ouvert, car le courant de court-circuit de cellule pilote entraîne son échauffement, et par conséquent sa température diffère de la température du générateur photovoltaïque [24].

L'avantage de cette méthode réside dans sa simplicité de la mise en œuvre et de son fonctionnement pour la connaissance des grandeurs caractéristiques optimales du générateur. Néanmoins, la difficulté réside dans la manière de faire travailler cette cellule de référence dans les mêmes conditions climatiques que le générateur, ce qui limite grandement ses performances et son rendement énergétique.

3.2.4 Méthode dite 'perturber et observer'

Diverses techniques de poursuite du point de puissance ont été considérées dans des applications photovoltaïques de puissance. De ces dernières, la méthode de perturbation et d'observation, qui consiste à déplacer périodiquement le point de fonctionnement vers le point de puissance maximale, soit en augmentant, ou soit en diminuant la tension du générateur, est souvent utilisée dans la plupart de ces installations photovoltaïques.

La variable à maximiser, qui est la puissance du générateur, est prise par rapport à une tension de référence V_{ref} . Dans ce cas-ci, la tension de fonctionnement est changée et la puissance est mesurée. Si la valeur mesurée de la puissance excède la mesure précédente, l'étape suivante consiste à varier la tension dans le même sens. Si la variable contrôlée diminue, cela consiste à faire varier la tension dans le sens opposé.

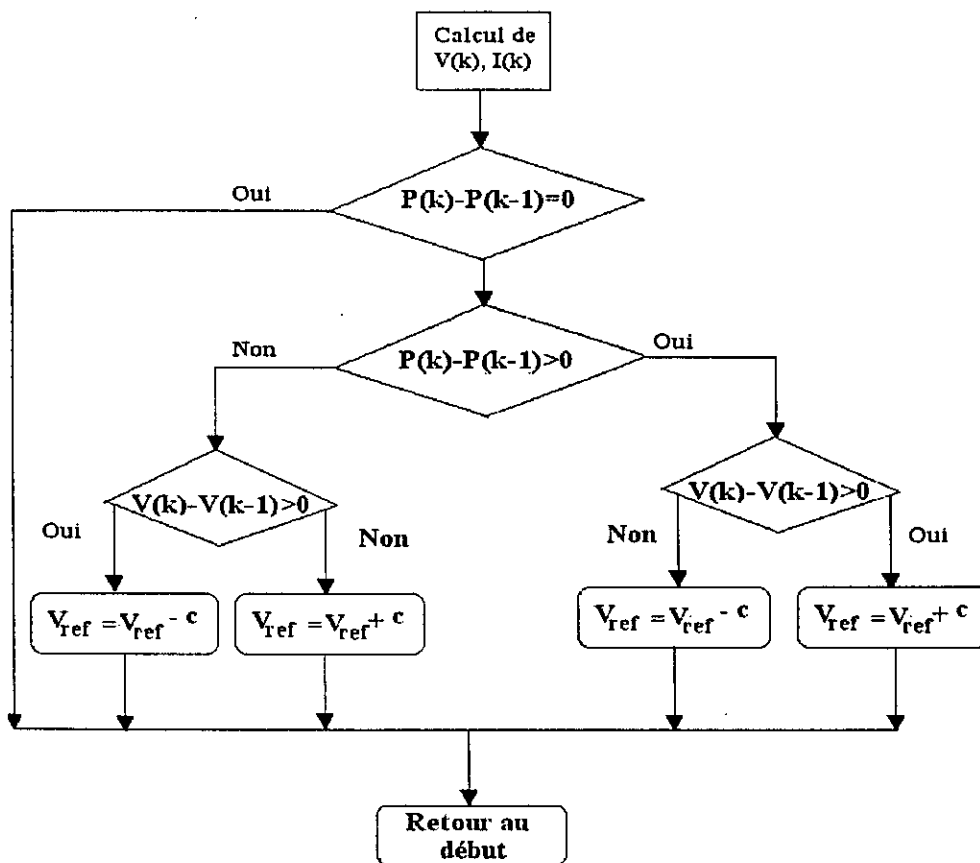


Figure 3.7 : Organigramme de principe de la méthode 'Perturber et Observer'

L'organigramme de contrôle du système de poursuite du point de puissance maximale montré à la figure 3.7 illustre les détails des procédés de décision. Si une perturbation donnée mène à une augmentation ou à une diminution de la puissance de sortie du générateur, la prochaine perturbation est réalisée dans le même sens (rajout d'une tension additionnelle constante c) ou dans le sens opposé (diminution d'une même valeur c). De cette façon, le système de poursuite du point de puissance maximale cherche continuellement le point de puissance maximum.

3.3 Conclusion

Après avoir passé en revue l'ensemble des techniques et des méthodes utilisées pour la poursuite de point de puissance maximale, avec leurs avantages et leurs inconvénients, le choix consiste en l'utilisation de la méthode de la cellule pilote dans la suite de notre travail. Cette méthode est facile à mettre en œuvre, dans le cas de la simulation par Pspice.

Chapitre 4

La Conversion de Puissance

CHAPITRE 4

LA CONVERSION DE PUISSANCE

4.1 Introduction

Le générateur photovoltaïque ne fournit sa pleine puissance qu'en un seul point de fonctionnement bien déterminé dans la caractéristique I-V. En effet, il serait judicieux de se positionner en ce point précis, mais malheureusement il fluctue dans de larges proportions à cause des variations de température et de l'éclairement. Pour pallier à ce problème et augmenter le rendement énergétique du système, un dispositif électronique, basé sur un convertisseur DC-DC, est intercalé entre le générateur photovoltaïque et la charge. Le maintien de ce point de fonctionnement au point de puissance maximale est assuré par le contrôle continu du rapport cyclique de ce convertisseur de puissance. Néanmoins, ce dispositif nécessite beaucoup d'attention que ce soit sur l'aspect dimensionnement et sur celui du contrôle et d'asservissement afin d'éviter l'instabilité du système [1, 2, 3, 15, 17].

Dans ce chapitre, nous donnerons les principales caractéristiques des convertisseurs DC-DC de type dévolteur et survolteur. Une comparaison des performances entre ces deux types de dispositifs doit être établie pour choisir la topologie appropriée utilisée dans les systèmes photovoltaïques.

A cet effet, un dimensionnement d'un convertisseur survolteur 'Boost Converter' sera réalisé, pour connaître le fonctionnement de ce dernier qui sera couplé au générateur photovoltaïque, et dont l'objectif est de déterminer l'influence du rapport cyclique sur le point de puissance maximale.

4.2 Généralités sur les convertisseurs DC-DC

Les convertisseurs DC-DC étudiés dans ce chapitre concernent principalement les hacheurs dévolteurs et survolteurs. Ces convertisseurs sont caractérisés dans leur fonctionnement par les deux modes suivants [8, 41, 42] :

- Un mode de conduction continue
- Un mode de conduction discontinue.

4.2.1 Hacheur dévolteur 'Buck Converter'

Le rôle principal de ce type de convertisseur est de transformer une tension d'entrée continue, généralement grande, en une tension de sortie continue, plus faible.

La topologie de base d'un hacheur dévolteur est illustrée sur la figure ci-dessous :

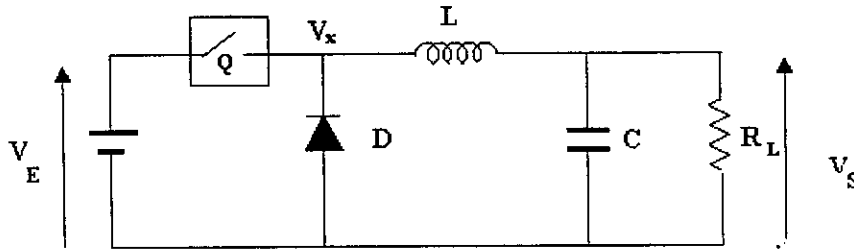


Figure 4.1 : Schéma de base d'un hacheur dévolteur

Où V_E et V_S sont respectivement la tension d'entrée et de sortie. Le commutateur principal, noté 'Q', est commandable à l'ouverture et à la fermeture. Le filtre passe bas, LC, sert à éliminer les harmoniques générées par le phénomène de commutation. Les pertes dans ce circuit sont négligées. La puissance d'entrée est donc égale à la puissance de sortie :

$$V_E \cdot I_E = \frac{V_S^2}{R_L} \tag{4.1}$$

4.2.1.1 Mode de conduction continue

Dans ce mode d'opération, le courant circulant dans la bobine, dans les deux phases de commutation, n'atteint jamais la valeur zéro. Cette situation est schématisée par la figure ci-dessous :

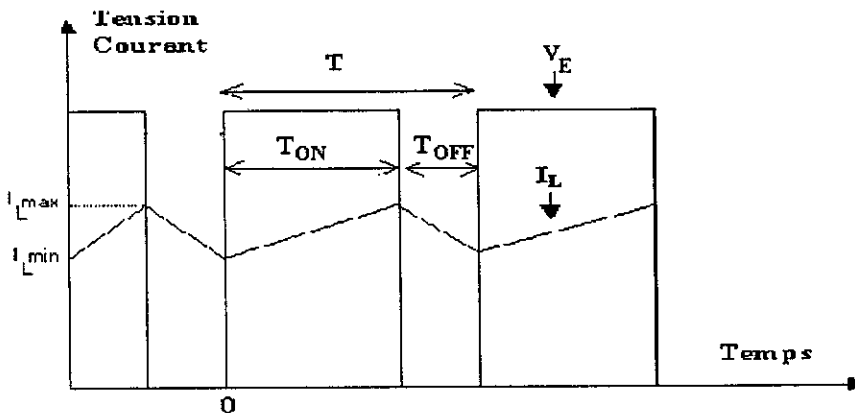


Figure 4.2 : Forme d'onde du courant en conduction continue

La variation de courant pendant une période de commutation obéit à la relation suivante :

$$dI_L = \frac{1}{L} \left[\int_{T_{ON}} (V_x - V_S) dt + \int_{T_{OFF}} (V_x - V_S) dt \right] \tag{4.2}$$

En régime permanent, la variation de courant dI_L est nulle, ce qui nous permet d'écrire :

$$\int_0^{T_{ON}} (V_E - V_S) dt + \int_{T_{ON}}^{T_{ON} + T_{OFF}} (-V_S) dt = 0 \tag{4.3}$$

Ce qui nous permettra d'avoir une relation entre la tension d'entrée et la tension de sortie :

$$\frac{V_S}{V_E} = \frac{T_{ON}}{T} \quad (4.4)$$

Le rapport cyclique D est défini par la relation suivante :

$$D = \frac{T_{ON}}{T} \quad (4.5)$$

La relation entre la tension d'entrée et la tension de sortie devient alors :

$$V_S = D V_E \quad (4.6)$$

Si le circuit est supposé sans pertes, la puissance générée par la source est transmise en totalité à la charge, ce qui nous permet d'écrire la relation suivante :

$$V_E \times I_E = V_S \times I_S \quad (4.7)$$

D'où la relation liant le courant d'entrée au courant de sortie :

$$I_E = D \times I_S \quad (4.8)$$

Le graphe ci-dessous illustre l'évolution de la tension de sortie en fonction du rapport cyclique D :

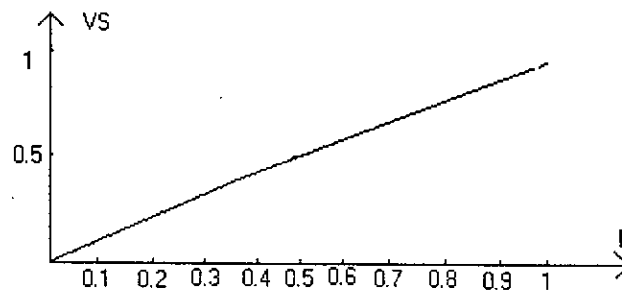


Figure 4.3 : Evolution de la tension de sortie en fonction du rapport cyclique

Le hacheur dévolteur présente donc une caractéristique linéaire entre la tension de sortie et le rapport cyclique.

4.2.1.2 Mode de conduction discontinue

Ce mode est caractérisé par le passage du courant de la bobine par la valeur zéro. Avant d'examiner ce cas de figure, faisons le point sur la conduction limite illustré par la figure suivante :

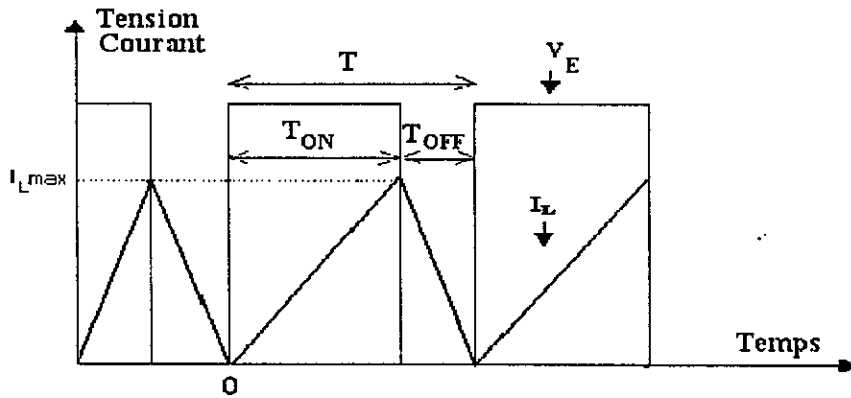


Figure 4.4 : Formes de courant de la bobine à l'état limite

Le courant dans la bobine L demeure toujours positif, cependant la continuité est assurée par le commutateur ou la diode. Pendant le temps $t = T_{ON}$, le courant de la bobine, I_L , atteint son maximum, noté I_{Lmax} . Il est donné par l'expression suivante :

$$I_{Lmax} = (V_E - V_S) \frac{T_{ON}}{L} \tag{4.9}$$

Le courant moyen correspondant à la conduction limite est donné par l'équation ci-après.

$$I_{Lmoy} = V_E \frac{(1-D)D}{2L} \times T \tag{4.10}$$

Le cas de la conduction discontinue surgit lorsque le courant de la bobine, I_L , s'annule pendant la phase $t = T_{OFF}$, schématisée par la figure suivante :

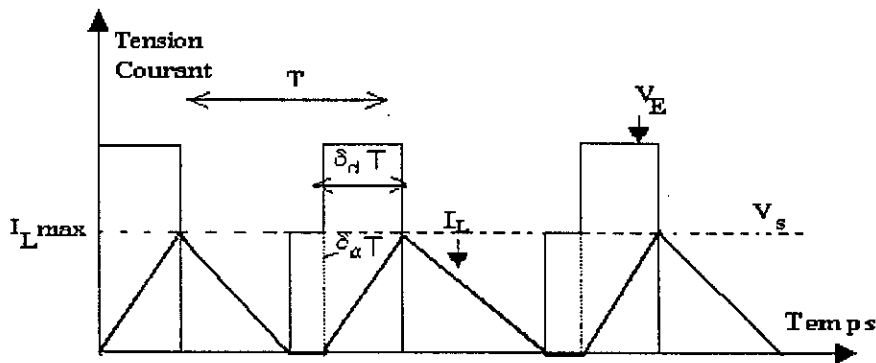


Figure 4.5 : Formes d'onde en conduction discontinue

Le courant moyen en sortie est donné par la formule ci-dessous:

$$I_{Lmoy} = \frac{V_E \times D \times \delta_d \times T}{2L} \tag{4.11}$$

et la relation de la tension de sortie à l'entrée par :

$$\frac{V_S}{V_E} = \frac{D^2}{D^2 + \left(\frac{2LI_{Lmoy}}{V_E \times T} \right)} \quad (4.12)$$

De la relation (4.12) et en posant $K = \frac{2.L}{V_E \times T}$, la figure 4.6 montre l'effet de la discontinuité du courant sur la caractéristique de transfert.

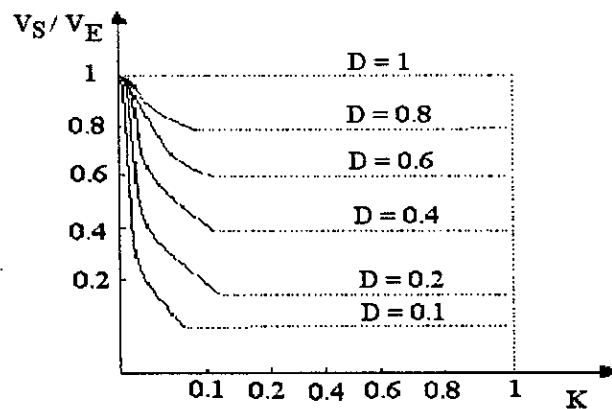


Figure 4.6 : Caractéristique de transfert en conduction discontinue

4.2.2 Hacheur survolteur 'Boost Converter'

Le schéma de la figure 4.7 représente la configuration d'un hacheur survolteur. Ce circuit est utilisé lorsqu'on désire une tension de sortie plus grande que la tension d'entrée.

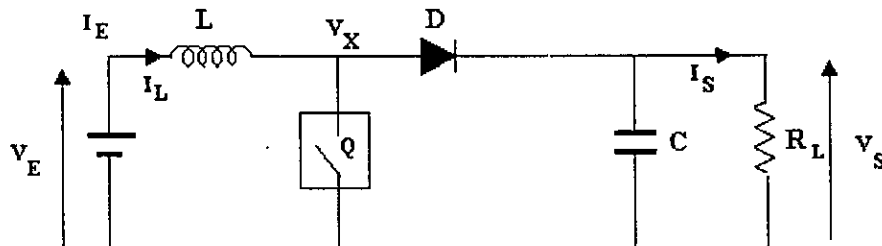


Figure 4.7 : Schéma de base d'un hacheur survolteur

4.2.2.1 Mode de conduction continue

Lorsque le commutateur Q est en position fermé, c'est-à-dire $0 < t < T_{ON}$, le schéma équivalent du convertisseur dans cette phase, est représenté par la figure ci-dessous.

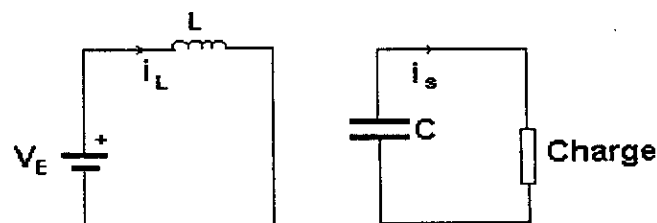


Figure 4.8 : Schéma équivalent pendant $0 < t < T_{ON}$

Pendant le temps où le commutateur **Q**, est fermé, la diode **D** est polarisée en inverse. Le courant, I_L , croît linéairement de I_{Lmin} jusqu'à I_{Lmax} dû à l'application, à ces bornes, de la tension continue V_E . Si le circuit est considéré sans pertes, nous avons :

$$P_E = P_S \quad (4.13)$$

L'évolution du courant dans la bobine est donnée par la relation suivante :

$$V_E = L \frac{I_{Lmax} - I_{Lmin}}{T_{ON}} = L \frac{\Delta I}{T_{ON}} \quad (4.14)$$

L'énergie électromagnétique stockée dans la bobine est donc :

$$E = \frac{1}{2} L (\Delta I)^2 = \frac{1}{2L} V_E^2 T_{ON}^2 \quad (4.15)$$

Le courant de sortie, I_S , est complètement fourni par la capacité **C**, c'est pourquoi, une grande capacité, **C**, est indispensable en sortie.

Lorsque le commutateur ou le transistor **Q** est en position ouvert, c'est-à-dire $T_{ON} < t < T$, et sachant que le courant I_L ne peut pas changer instantanément, la tension aux bornes de la bobine, change de polarité pour maintenir le courant constant dans la bobine. La tension à ses bornes devient alors :

$$V_L = V_E - V_S \quad (4.16)$$

L'énergie stockée dans la bobine charge la capacité de sortie et produit ainsi une tension supplémentaire en sortie. L'évolution du courant dans cette phase est donnée par la relation suivante :

$$V_E - V_S = L \frac{I_{Lmin} - I_{Lmax}}{T_{OFF}} \quad (4.17)$$

d'où :

$$V_E T_{ON} - (V_S - V_E) T_{OFF} = 0 \quad (4.18)$$

Soit **D** le rapport cyclique donné par :

$$D = \frac{T_{ON}}{T} \quad (4.19)$$

La relation entre la tension de sortie et la tension d'entrée est donnée par l'expression suivante :

$$\frac{V_S}{V_E} = \frac{1}{1 - D} \quad (4.20)$$

Le schéma de la figure ci-dessous représente les formes d'ondes en mode de fonctionnement continu du 'Boost - Converter'.

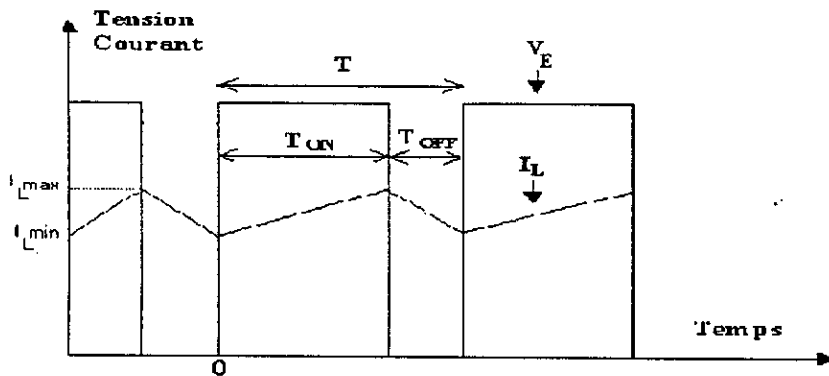


Figure 4.9 : Formes d'ondes en mode de conduction continue

4.2.2.2 Mode de conduction discontinue

Pendant ce mode de conduction, l'inductance critique, L_C , est calculée comme suit :

$$V_E \times I_E = \frac{V_S^2}{R_L} \quad (4.21)$$

Le courant dans la bobine deviendra alors:

$$I_L = \frac{\Delta I}{2} = \frac{V_E \times D}{2fL_C} \quad (4.22)$$

Puisque le courant moyen d'entrée est égale au courant moyen traversant la bobine, donc

$$V_E \frac{V_E \times D}{2fL_C} = \frac{V_S}{R_L} \quad (4.23)$$

d'où l'inductance critique est donnée par la relation suivante :

$$L_C = \frac{R_L D (1-D^2)}{2f} \quad (4.24)$$

Le mode de fonctionnement du hacheur survolteur peut basculer en mode discontinu si la résistance de charge croît au-delà d'une certaine valeur, appelée résistance critique R_C qui est donnée par la relation suivante :

$$R_C = \frac{R_{nom}}{D (1-D)^2} \quad (4.25)$$

où R_{nom} est la résistance nominale, définie par $R_{nom} = 2.f.L$.

Dans les figures ci-dessous, sont schématisées les différentes formes d'ondes, des tensions et des courants, dans les deux modes de fonctionnement d'un hacheur survolteur.

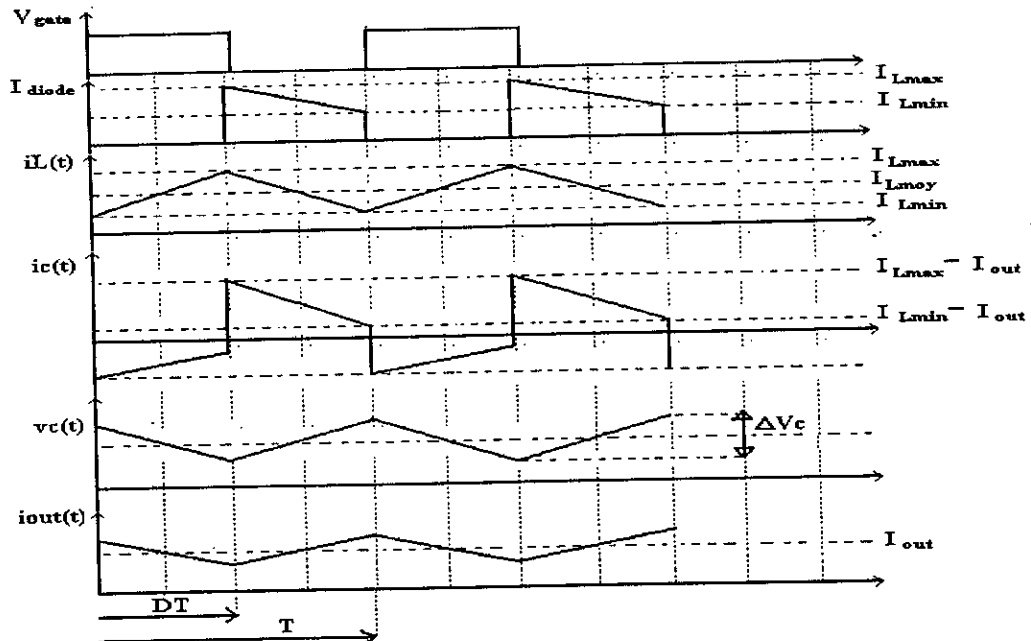


Figure 4.10 : Formes d'ondes d'un hacheur survolteur en conduction continue

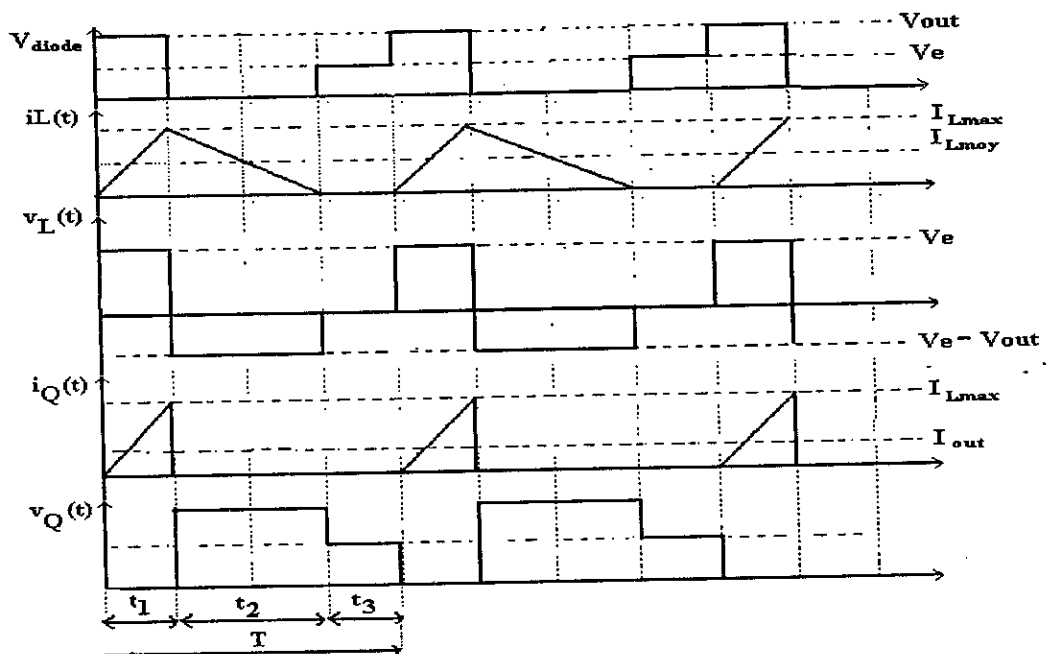


Figure 4.11 : Formes d'ondes d'un hacheur survolteur en conduction discontinue

4.3 Comparaison des performances des deux types de convertisseurs pour les systèmes photovoltaïques

4.3.1 Introduction

Une étude comparative entre les convertisseurs DC-DC de type 'Boost' et 'Buck' dans les systèmes photovoltaïques est effectuée en se basant sur le rendement énergétique. Il est montré que la poursuite du point de puissance maximale basée sur la configuration de convertisseur de type 'boost' a pour conséquence un meilleur rendement en puissance et une utilisation efficace des modules solaires. [32]

En effet, le dispositif de poursuite du point de puissance maximale est conçu à base de ces topologies 'Buck' ou 'Boost'. Le convertisseur dévolteur 'Buck' est généralement employé pour abaisser la tension de sortie, tandis que le convertisseur survolteur 'Boost', est utilisé pour élever la tension de sortie. Par ailleurs, la topologie 'Buck' est efficace pour les systèmes utilisant une énergie conventionnelle. Par contre, la topologie 'Boost' est plus appropriée aux systèmes photovoltaïques, afin d'extraire le maximum de puissance possible des modules photovoltaïques.

L'objectif est d'extraire l'énergie maximum possible à partir de la source et de la fournir à la charge. Par conséquent, on travaille avec des tensions et des courants d'entrée aussi près que possible des valeurs maximales V_{\max} et I_{\max} (tension et courant maximum) de la caractéristique I-V du générateur photovoltaïque.

4.3.2 Rendement énergétique du convertisseur de puissance

Le rendement énergétique du convertisseur est le rapport entre la puissance de ce convertisseur et la puissance maximale produite par le générateur photovoltaïque, en négligeant toutes les pertes, dont l'expression de ce rendement est donnée ci-après :

$$\eta_{\text{convertisseur}} = \frac{P_{\text{convertisseur}}}{P_{\max}} \quad (4.26)$$

L'expression de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque est la suivante :

$$P_{\max} = V_{\max} I_{\max} \quad (4.27)$$

4.3.3 Résultats de simulation

La simulation en utilisant le logiciel 'Pspice' a été appliquée sur les deux types de convertisseurs en variant le rapport cyclique D (Figure 4.12).

Pour déterminer la puissance du convertisseur, les valeurs de la bobine et de la capacité ont été calculées en se basant sur les équations principales données dans les paragraphes précédents. L'ondulation de la tension est fixée à 5 %, tandis que celle du courant a été fixée à 0,1 %. Quant à la fréquence de commutation des convertisseurs, elle a été choisie à

0,781 kHz, tenant compte des pertes de commutation d'une part, de la taille de la bobine et de la capacité d'autre part. Une diode rapide et un commutateur ont été utilisés.

Par ailleurs, en exploitant le modèle du générateur établi précédemment, la puissance maximale du générateur photovoltaïque est déterminée, après avoir effectué la simulation de ce dernier.

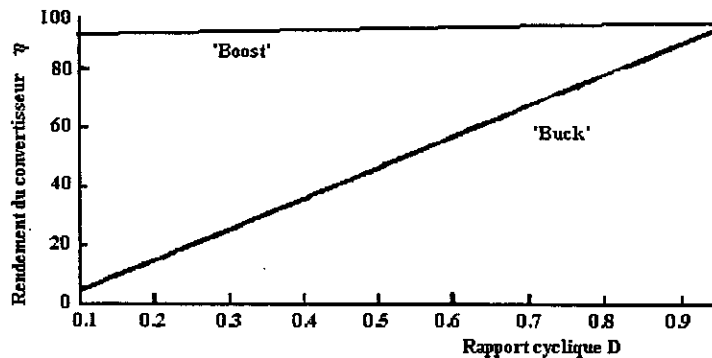


Figure 4.12 : Rendement du convertisseur 'boost' et 'buck'

Ces résultats montrent que le rendement énergétique du convertisseur 'Boost' est plus élevé que celui du convertisseur 'Buck'. Seulement pour des rapports cycliques élevés le convertisseur 'Buck' approche le rendement énergétique du convertisseur 'Boost'. On remarque aussi que pour le convertisseur 'Boost', le rendement énergétique varie peu avec le rapport cyclique.

4.4 Conception d'un hacheur survoleur 'Boost converter'

Pour la conception et le calcul des éléments du convertisseur de puissance choisi, à savoir la capacité et la bobine du hacheur survoleur, on prend un type de module photovoltaïque, dont les caractéristiques sont données au tableau ci-dessous :

Tableau 4.1 : Caractéristiques du module photovoltaïque

Paramètre	Valeur
I_{cc}	3.43 A
V_{co}	21.28 V
I_{opt}	3.16 A
V_{opt}	16.65 V
P_{max}	52.66 W
FF	72
η_c	14.63
R_s	0.9 Ω

Calcul des valeurs de la capacité et de la bobine

En se basant sur l'énergie stockée dans la bobine et la capacité pendant une période de commutation, de la tension requise en sortie et de l'ondulation de courant admissible, les valeurs de la capacité **C** et de la bobine **L** sont alors déterminées par les relations suivantes:

$$C = \frac{I_s D T}{\Delta V_s} \tag{4.28}$$

$$L = \frac{V_s D T}{\Delta I} \tag{4.29}$$

En utilisant ces relations et à partir des caractéristiques données dans le tableau précédent, la tension de sortie V_s étant fixée à 24 volts, on peut alors déterminer les valeurs de la capacité et de la bobine. Ces valeurs sont les suivantes :

$$C = 3536 \mu\text{F} \qquad L = 127,8 \mu\text{H}$$

4.5 Simulation du générateur photovoltaïque intégrant le hacheur survolteur

Le schéma synoptique de générateur photovoltaïque associé au convertisseur de puissance est donnée sur la figure 4.13. La simulation de ce système est réalisé dans le but de déterminer l'influence du rapport cyclique sur la variation des tensions optimales V_{PV} du générateur photovoltaïque.

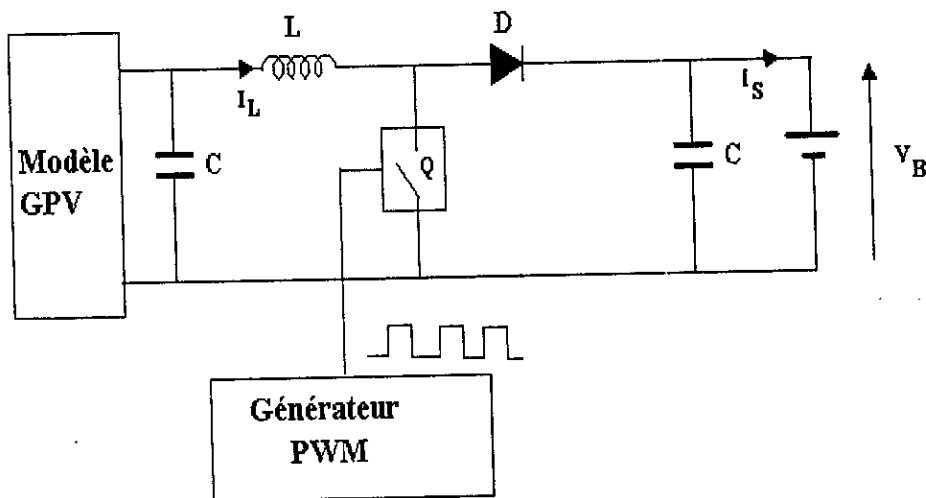


Figure 4.13 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque intégrant le convertisseur 'boost'

Les résultats de simulation sont obtenus en variant le rapport cyclique **D** pour des flux et températures variables. Le tableau 4.2 récapitule l'ensemble des résultats de simulation de ce système pour flux variable.

Tableau 4.2 : Résultats de simulation du système précédent pour différents niveaux de flux et température fixe

Flux ϕ (mW/m ²)	Rapport cyclique D	Tension optimale du générateur PV prélevées sur la courbe I – V V_{opt} (V)	Tension optimale du générateur PV avec un hacheur survolteur V_{opt} (V)
1000	0,3140	16,450	15,378
900	0.3154	16,430	15,302
800	0,3156	16,425	15,273
700	0,3159	16,418	15,175
600	0,3166	16,400	14,886
500	0,3179	16,370	14,500
400	0,3187	16,370	14,340
300	0,320	16,300	13,760
200	0,3265	16,164	13,533
100	0,340	15,822	12,703

Les courbes des résultats de simulation pour deux niveaux de flux sont représentées ci-dessous :

$\phi = 1000 \text{ W/m}^2$

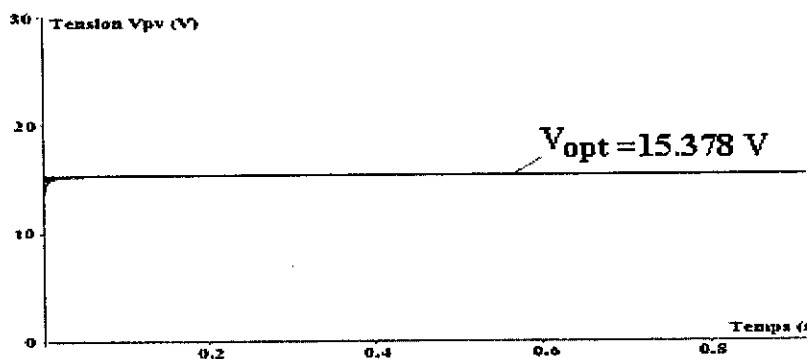


Figure 4.14 : Tension optimale du générateur photovoltaïque V_{opt} pour

$\phi = 500 \text{ W/m}^2$

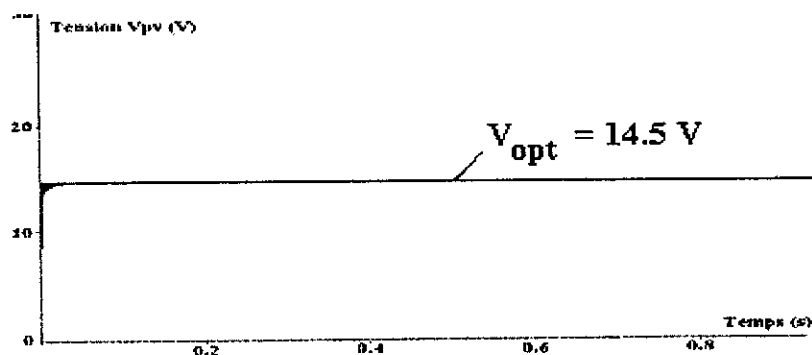


Figure 4.15 : Tension optimale du générateur photovoltaïque V_{opt}

Par ailleurs, un tableau récapitulatif des résultats de simulations du générateur photovoltaïque avec hacheur survolteur 'boost' pour le calcul de la tension optimale du générateur photovoltaïque pour différentes valeurs de la température est représenté ci-dessous :

Tableau 4.3 : Simulation avec température variable et flux constant

Température T (°C)	Rapport cyclique D	Tension optimale du générateur PV relevées sur la courbe I-V V_{opt} (V)	Tension optimale du générateur PV avec un hacheur survolteur V_{opt} (V)
40	0,400	14,400	13,072
30	0,366	15,206	14,344
20	0,333	16,000	15,544
10	0,295	16,904	16,820

Les courbes des résultats de simulation obtenus pour différentes températures sont représentées sur les figures ci-dessous :

T = 20 °C

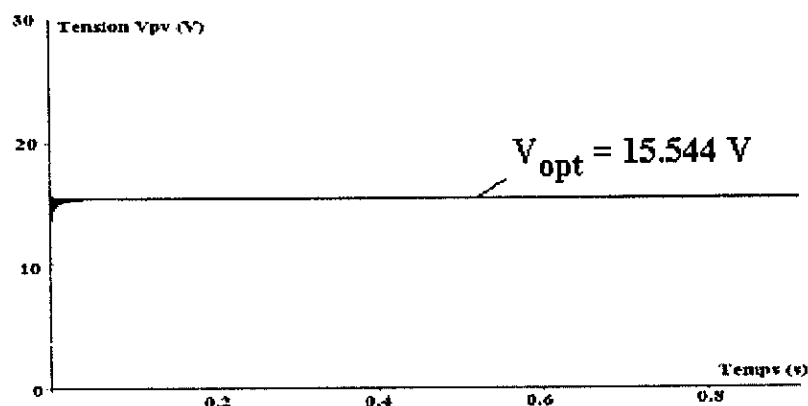


Figure 4.15 : Tension optimale du générateur V_{opt}

T = 40 °C

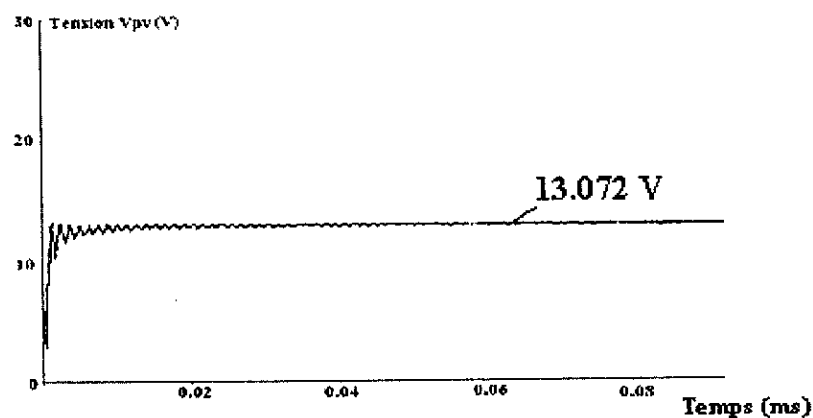


Figure 4.16 : Tension optimale du générateur V_{opt}

D'après ces résultats de simulation obtenus, on constate dans les deux cas que le rapport cyclique D est un paramètre déterminant pour l'obtention de la valeur optimale de la tension du générateur V_{pv} . Ce qui prouve qu'une régulation adéquate et un contrôle continu de ce rapport cyclique doivent être impérativement réalisées.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, les principales caractéristiques des convertisseurs 'buck' et 'boost' étudiés ont été données, ainsi qu'une comparaison de leurs performances dans les systèmes photovoltaïques. Par ailleurs, un design d'un convertisseur 'boost' et sa réalisation ont été effectués, suivi d'une simulation du générateur PV intégrant le convertisseur 'boost', pour la détermination de la tension optimale en tenant compte des variations du flux solaire et de la température montre qu'un contrôle continu du rapport cyclique est indispensable.

Une modélisation de ce convertisseur et la détermination du modèle dynamique du système pour la poursuite de point de puissance maximale sera effectuée dans le chapitre suivant.

Chapitre 5

Modèle Dynamique du Système et Processus de la Poursuite

CHAPITRE 5

MODELE DYNAMIQUE DU SYSTEME
ET PROCESSUS DE LA POURSUITE

5.1 Introduction

Pour concevoir d'une manière convenable le système photovoltaïque intégrant le convertisseur 'boost', une étude de modélisation de son comportement dynamique est nécessaire. En effet, il est indispensable de déterminer l'influence de la variation des différentes grandeurs du système, comme la tension d'entrée $v_e(t)$, la charge R_L et le rapport cyclique $d(t)$.

Malheureusement, l'étude directe du comportement dynamique de ce convertisseur dans son environnement est compromise à cause de la nature non linéaire dû au processus de commutation. Cette contrainte peut être contournée en utilisant :

- la technique de modélisation par la valeur moyenne dans l'espace d'état permettant d'analyser le modèle en signaux faibles [28, 30] peut faire l'objet d'une étude d'asservissement classique, en déterminant la fonction de transfert du système.
- la technique de la valeur moyenne, dont l'objet est de substituer au circuit d'origine du processus de commutation, un circuit linéaire équivalent [19, 29].

5.2 Modélisation du convertisseur 'boost' par la valeur moyenne dans l'espace d'état

Le principe de la modélisation d'un convertisseur de puissance, par la valeur moyenne dans l'espace d'état, est de représenter ce dernier par des équations en signaux faibles.

En tenant compte de la figure 4.7, représentant le schéma du convertisseur 'boost', ce dernier prendra deux topologies différentes pendant une période de fonctionnement. Ces deux topologies sont les suivantes :

Etat 1

Cet état est caractérisé par la fermeture de 'Q' pendant le temps $t = dT$. Le circuit prend alors la forme représentée sur la figure 5.1.

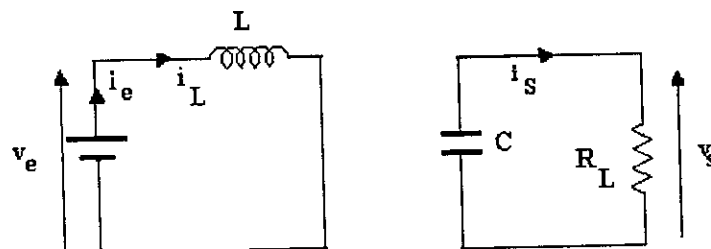


Figure 5.1 : Schéma équivalent du convertisseur 'boost' à l'état ON

La représentation d'état de ce circuit dans cet intervalle de temps t est donnée par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_e}{dt} \\ \frac{dv_c}{dt} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_L C} \end{bmatrix}}_{A_{on}} \begin{bmatrix} i_e \\ v_c \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}}_{B_{on}} v_e \quad (5.1)$$

où les matrices notées A_{on} et B_{on} représentent la topologie du circuit à l'état fermé ON.

Etat 2

Cet état est caractérisé par l'ouverture du commutateur principal pendant le temps $t = (1 - d) T$. La représentation du circuit dans cet état est indiquée dans la figure suivante :

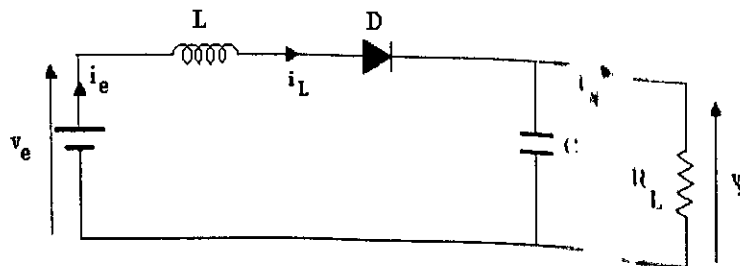


Figure 5.2 : Schéma équivalent du convertisseur "buck" à l'état OFF

La représentation dans l'espace d'état de ce circuit est donnée par l'équation ci-après :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_c}{dt} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{R_L C} \end{bmatrix}}_{A_{off}} \begin{bmatrix} i_e \\ v_c \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}}_{B_{off}} v_e \quad (5.2)$$

où les matrices A_{off} et B_{off} représentent la topologie du circuit à l'état ouvert OFF.

Le phénomène de commutation fait basculer, à chaque intervalle de temps, le convertisseur de puissance dans ces deux topologies structurellement différentes. Par conséquent, l'étude transitoire et celle de l'asservissement sont rendues très complexes. Il est proposé de remplacer les deux équations par une seule équation [20, 30]. Ceci est obtenu par l'approximation linéaire sur plusieurs intervalles de fonctionnement des grandeurs caractéristiques, par leurs valeurs moyennes.

Le modèle mathématique, décrivant le fonctionnement du convertisseur de puissance sur plusieurs périodes est représenté par l'équation d'état suivantes

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (5.3)$$

Où $A = D \cdot A_{on} + (1 - D) \cdot A_{off}$ (5.4)

et $B = D \cdot B_{on} + (1 - D) \cdot B_{off}$ (5.5)

Ces approximations sont valides sous deux conditions, qui sont mentionnées ci-après :

Première condition: Les variables d'états doivent évoluer d'une manière approximativement linéaire dans les deux cas de figure précédents.

Deuxième condition: Les ondulations dues à la commutation sont négligeables devant les valeurs moyennes des variables d'états comme montré dans la figure ci-dessous.

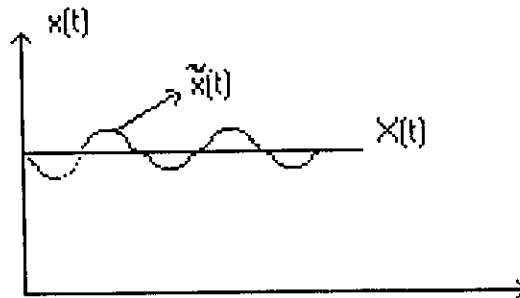


Figure 5.3 : Représentation du signal $x(t)$

De plus, il est supposé que la fréquence naturelle du circuit composant le convertisseur est nettement inférieure à la fréquence de commutation des commutateurs. Cela justifie les suppositions précédentes car le circuit LC joue le rôle d'un filtre passe bas, d'où la rejection des signaux dont la fréquence est proche de celle de la fréquence de commutation.

En effet, les grandeurs caractérisant le convertisseur, sont exprimées par les relations suivantes :

$$x(t) = X + \tilde{x} \quad (5.6)$$

$$u(t) = U + \tilde{u} \quad (5.7)$$

$$d(t) = D + \tilde{d} \quad (5.8)$$

X est la valeur moyenne de la grandeur, et \tilde{x} exprime cette valeur en signaux faibles.

L'équation dans l'espace d'état du modèle pour les signaux faibles est donnée par l'expression ci-après [28, 30] :

$$\frac{d\tilde{x}}{dt} = A\tilde{x}(t) + B\tilde{u}(t) + [(A_{on} - A_{off})X + (B_{on} - B_{off})U]\tilde{d}(t) \quad (5.9)$$

Cette équation montre de quelle manière une telle variation dans le vecteur d'entrée ou dans le rapport cyclique influence la trajectoire du vecteur d'état.

5.3 Modèle dynamique du générateur photovoltaïque couplé au convertisseur 'boost'

Le système -générateur couplé au 'boost'- faisant l'objet de ce travail, est représenté par le schéma de la figure suivante, sur lequel le générateur photovoltaïque est remplacé par son courant i_{PV} et sa résistance série r_s . La résistance interne de la capacité, **ESR**, est supposée négligeable, ainsi que la tension aux bornes de la diode v_D . Quant à la charge, on considère une batterie, spécifiée par sa tension nominale V_B et dont les perturbations sont presque négligeables.

Il est à souligner que seul le Mode de Conduction Continu (C.C.M.) est considéré dans cette étude.

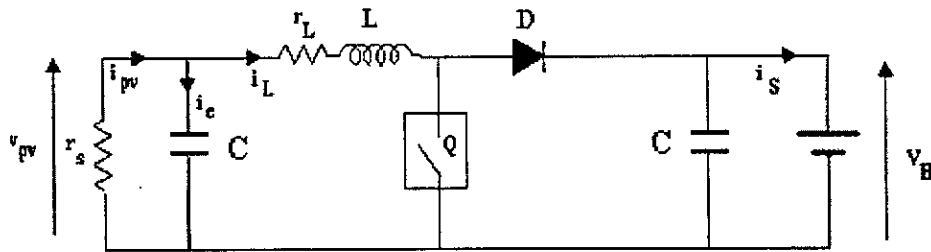


Figure 5.4 : Circuit équivalent du générateur photovoltaïque couplé au 'boost'

On établit le modèle mathématique du système à étudier en signaux faibles, et ce par la méthode dite "Modélisation par la valeur moyenne en signaux faibles dans l'espace d'état".

5.3.1 Représentation du modèle dynamique dans l'espace d'état [41]

Pour déterminer les matrices d'état du modèle, on tient compte de la topologie du commutateur 'Q'.

Commutateur fermé $0 \leq t \leq T_{on}$

- Le courant i_{PV} du générateur photovoltaïque est égal à :

$$i_{PV} = i_c + i_L \quad (5.10)$$

$$i_{PV} = C \frac{dv_{PV}}{dt} + i_L \quad (5.11)$$

- La tension d'entrée v_{PV} du générateur photovoltaïque est égale à :

$$v_{PV} = -r_s \times i_{PV} \quad (5.12)$$

avec r_s : résistance série du générateur.

Des deux relations précédentes, la tension aux bornes du générateur peut être déterminée par la relation suivante :

$$v_{PV} = -r_s C \frac{dv_{PV}}{dt} - r_s i_L \quad (5.13)$$

Ce qui nous permettra de déterminer donc le premier vecteur dans l'espace d'état.

$$\frac{dv_{PV}}{dt} = -\frac{v_{PV}}{r_s C} - \frac{i_L}{C} \quad (5.14)$$

Tandis que pour le second vecteur, il est déterminé par :

$$v_{PV} = L \frac{di_L}{dt} + r_L i_L \quad (5.15)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_{PV}}{L} - \frac{r_L}{L} i_L \quad (5.16)$$

La matrice du modèle dans l'espace d'état est donnée par :

$$\begin{bmatrix} \frac{dv_{PV}}{dt} \\ \frac{di_L}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{r_s C} & -\frac{1}{C} \\ \frac{1}{L} & -\frac{r_L}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{PV} \\ i_L \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

Commutateur ouvert $T_{on} \leq t \leq T$

- La tension aux bornes du générateur satisfait donc à la relation suivante :

$$v_{PV} = L \frac{di_L}{dt} + r_L i_L + V_B \quad (5.18)$$

- Le vecteur d'état donnant le courant dans la bobine est représenté par l'équation ci-dessous:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_{PV}}{L} - \frac{r_L}{L} i_L - \frac{V_B}{L} \quad (5.19)$$

La matrice d'état en T_{off} est donnée ci-après :

$$\begin{bmatrix} \frac{dv_{PV}}{dt} \\ \frac{di_L}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{r_s C} & -\frac{1}{C} \\ \frac{1}{L} & -\frac{r_L}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{PV} \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{L} \end{bmatrix} V_B \quad (5.20)$$

Pour déterminer la matrice globale, on utilise les relations données précédemment

$$A = D A_{on} + (1 - D) A_{off} \quad (5.21)$$

$$B = D B_{on} + (1 - D) B_{off} \quad (5.22)$$

d'où la matrice globale du système :

$$\begin{bmatrix} \frac{dv_{PV}}{dt} \\ \frac{di_L}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{r_s C} & \frac{-1}{C} \\ \frac{1}{L} & \frac{-r_L}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{PV} \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-(1-D)}{L} \end{bmatrix} V_B \quad (5.23)$$

L'expression donnant l'équation d'état en signaux faibles est représentée comme suit :

$$\frac{d\tilde{x}}{dt} = A\tilde{x}(t) + B\tilde{u}(t) + [(A_{on} - A_{off})X + (B_{on} - B_{off})U] \tilde{d}(t) \quad (5.24)$$

Par analogie à cette expression la matrice du système peut s'écrire de la manière suivante:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\tilde{v}_{PV}}{dt} \\ \frac{d\tilde{i}_L}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{r_s C} & \frac{-1}{C} \\ \frac{1}{L} & \frac{-r_L}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{v}_{PV} \\ \tilde{i}_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-1}{L} \end{bmatrix} v_B + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} V_B \tilde{d} \quad (5.25)$$

Ceci nous permet d'écrire le vecteur d'état décrivant la représentation de Laplace :

$$s v_{PV} = -\frac{1}{r_s C} v_{PV} - \frac{1}{C} i_L \quad (5.26)$$

$$s i_L = \frac{1}{L} v_{PV} - \frac{r_L}{L} i_L - \frac{(1-D)}{L} v_B + \frac{1}{L} V_B \tilde{d} \quad (5.27)$$

5.3.1.1 Fonction de transfert du système en boucle ouverte "BO"

La fonction de transfert de l'entrée, v_{PV} , par rapport à la perturbation du rapport cyclique \tilde{d} est donnée par:

$$\frac{v_{PV}}{\tilde{d}} = \frac{-r_s}{(r_s + r_L)} \frac{V_B}{\left(\frac{s^2 (r_s L C)}{(r_L + r_s)} + \frac{s(L + r_L r_s C)}{(r_L + r_s)} + 1 \right)} \quad (5.28)$$

En remplaçant la tension de sortie V_B par la relation qui la relie à la tension d'entrée optimale du générateur V_{PV} .

$$V_B = \frac{V_{PV}}{1 - D} \quad (5.29)$$

La fonction de transfert deviendra alors :

$$\frac{v_{PV}}{\tilde{d}} = \frac{-r_s}{(1 - D)(r_s + r_L)} \frac{V_{PV}}{\left(\frac{s^2 (r_s L C)}{(r_L + r_s)} + \frac{s (L + r_L r_s C)}{(r_L + r_s)} + 1 \right)} \quad (5.30)$$

La fonction de transfert ainsi obtenue est du second ordre, écrite sous la forme canonique suivante :

$$\frac{v_{PV}}{\tilde{d}} = \frac{-r_s}{(1 - D)(r_s + r_L)} \frac{V_{PV}}{\left(\frac{s^2}{\omega_n^2} + 2 \xi \frac{s}{\omega_n} + 1 \right)} \quad (5.31)$$

où la pulsation naturelle est donnée par l'expression suivante :

$$\omega_n^2 = \frac{1 - r_L}{r_s L C} \quad (5.32)$$

La pulsation de résonance est exprimée par la relation suivante :

$$\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - 2\xi^2} \quad (5.33)$$

Et le coefficient d'amortissement est donné par l'équation suivante :

$$\xi = \frac{L + r_L r_s C}{2(1 - D)} \quad (5.34)$$

5.3.1.2 Analyse du système en boucle ouverte

Le schéma de simulation "Pspice" permettant la détermination de la réponse fréquentielle (gain, phase), ainsi que la réponse temporelle de la fonction de transfert du système étudié est donnée par la figure suivante.

Les constantes du système, prises pour cette simulation, se calculent à partir des relations (5.23, 5.24 et 5.25).

Les valeurs des constantes sont :

$$\omega_n = 1.56 \cdot 10^3 \text{ rad/s} \Rightarrow f = 248.46 \text{ Hz}$$

$$\xi = 0.35 \text{ (système pseudo - oscillatoire)}$$

$$\omega_r = 1.35 \cdot 10^3 \text{ rad/s} \Rightarrow f_r = 215.73 \text{ Hz.}$$

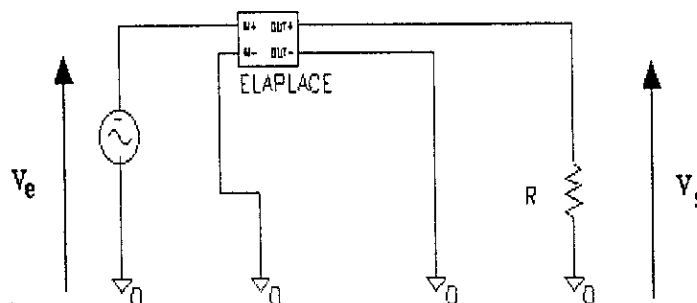


Figure 5.5 : Schéma de simulation Pspice de la fonction de transfert en "BO"

L'analyse temporelle et l'analyse fréquentielle, par Pspice, permettent de tracer la courbe de la réponse transitoire en boucle ouverte "BO", ainsi que les courbes de gain et de phase dans le diagramme de Bode.

Les résultats de simulation pour les deux types d'analyse sont représentés par les figures 5.6, 5.7 et 5.8.

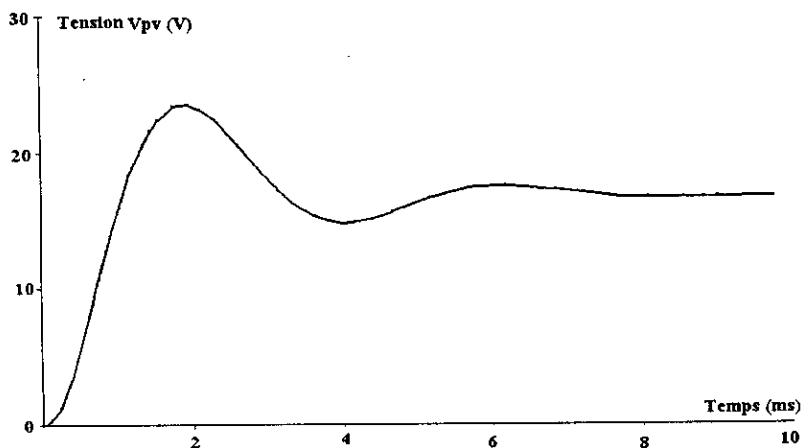


Figure 5.6 : Courbe de la réponse transitoire en "BO"

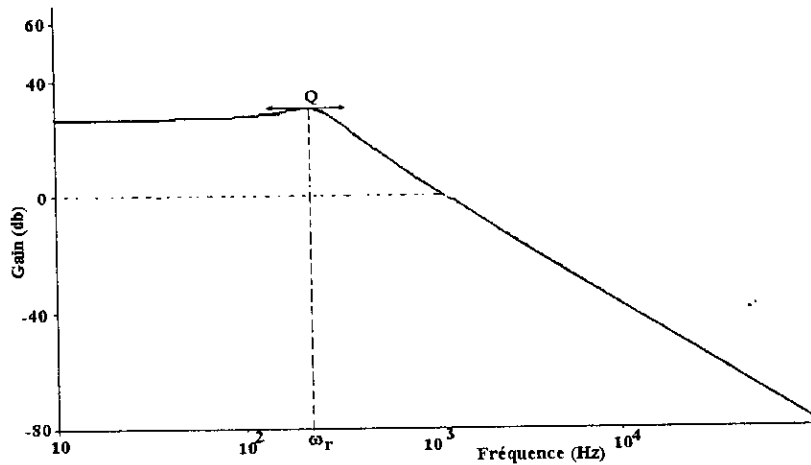


Figure 5.7 : Courbe du gain en "BO"

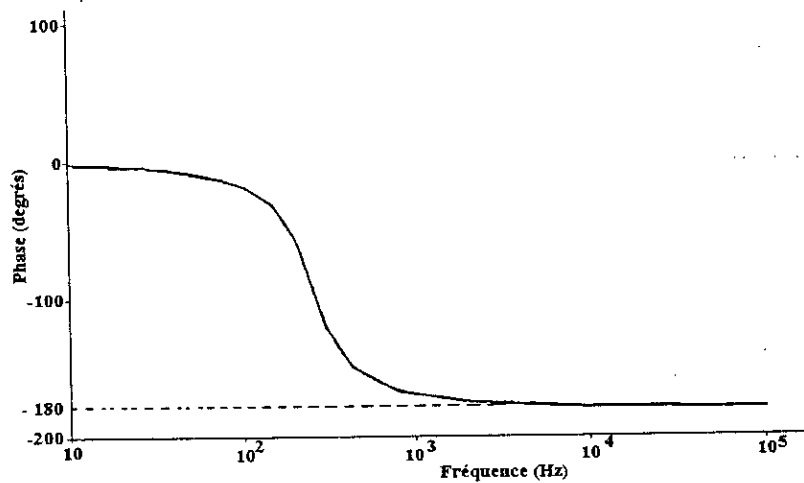


Figure 5.8 : Courbe de phase en "BO"

Le tableau ci-après résume l'ensemble des valeurs des grandeurs caractéristiques, temporelles et fréquentielles du système en boucle ouverte, obtenues dans cette simulation.

Tableau 5.1 : Grandeurs caractéristiques du système en "BO"

Marge de gain ΔG	$+\infty$
Marge de phase $\Delta \Phi$	10 deg
Temps de réponse t_r	4.24 ms
Facteur de résonance Q	4.88 db
Fréquence de résonance ω_r	217 Hz
Premier dépassement %	6.59 %

A partir de ces résultats, on constate que la marge de phase est faible, ceci a pour conséquence de ramener facilement le système à l'instabilité. Par conséquent, on conçoit qu'il est impératif d'améliorer les performances de cet asservissement en modifiant sa

réponse en fréquence pour satisfaire au mieux à l'asservissement souhaité en temps de réponse et de limitations de pics destructifs (surtensions et surintensités).

Pour ce faire, on préconise un correcteur à avance de phase dans le but est de diminuer le temps de réponse du système et ce en augmentant la bande passante du système, et de diminuer le facteur de résonance.

5.3.2 Modélisation par la valeur moyenne [19, 29]

Pour déterminer le modèle de l'étage de puissance du convertisseur 'boost', on établit le modèle du commutateur 'Q' en Mode de Conduction Continue (C.C.M.), caractérisé par le fait que le courant de la bobine n'atteigne pas la valeur zéro durant le cycle de commutation. La stratégie est donc de chercher les valeurs moyennes des signaux des éléments de commutation sur une période. Ainsi, on remplace le circuit de base par un circuit linéaire équivalent dont les grandeurs désignent les valeurs moyennes.

Le circuit de la figure ci-dessous représente le convertisseur de puissance à modéliser.

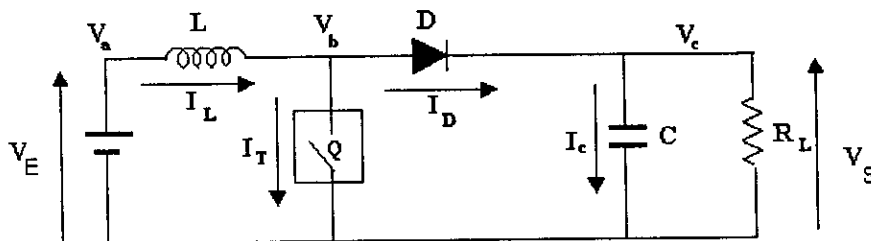


Figure 5.9 : Circuit équivalent du générateur photovoltaïque couplé au convertisseur 'boost' en considérant les valeurs moyennes

Les grandeurs caractéristiques dont on cherche les valeurs moyennes sont désignées par V_a , V_b et V_c .

Lorsque le commutateur 'Q' est fermé, la tension aux bornes de la bobine est donnée par l'équation suivante :

$$L \frac{di}{dt} = (V_a - V_b) \tag{5.35}$$

d'où le courant moyen aux bornes de la bobine est égal :

$$I_{L1} \text{ (moyen)} = \frac{1}{L} (V_a - V_b) D_{ON} \tag{5.36}$$

où

$$D_{ON} = \frac{T_{ON}}{T} \tag{5.37}$$

Lorsque le commutateur 'Q' est ouvert, le courant dans la bobine est donnée par l'équation suivante :

$$I_{L2}(\text{moyen}) = \frac{1}{L}(V_a - V_c) D_{\text{OFF}} \quad (5.38)$$

où

$$D_{\text{OFF}} = 1 - D_{\text{ON}} \quad (5.39)$$

Ceci nous donne un courant moyen, durant une période de commutation, qui est exprimé par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} I_L(\text{moyen}) &= I_{L1}(\text{moyen}) + I_{L2}(\text{moyen}) \\ &= \frac{1}{L}(V_a - V_b) D_{\text{ON}} + \frac{1}{L}(V_a - V_c) D_{\text{OFF}} \end{aligned} \quad (5.40)$$

• **Calcul du courant dans la diode sur une période de commutation**

Le courant traversant la diode pendant T_{OFF} , est égal au courant moyen de la bobine sur une période de commutation. Il est exprimé par l'équation ci-après :

$$I_D = \frac{1}{T} \int_b^{T_{\text{OFF}}} I_L(\text{moyen}) dt \quad (5.41)$$

ceci nous donne alors le courant dans la diode :

$$I_D = \frac{D_{\text{OFF}}}{D_{\text{ON}} + D_{\text{OFF}}} I_L(\text{moyen}) \quad (5.42)$$

• **Calcul du courant dans le commutateur**

Le courant traversant le commutateur 'Q' pendant T_{ON} est égal au courant moyen dans la bobine sur une période de commutation. Il est exprimé par l'équation ci-après :

$$I_T = \frac{1}{T} \int_b^{T_{\text{ON}}} I_L(\text{moyen}) dt \quad (5.43)$$

ce qui nous donne le courant traversant le commutateur :

$$I_T = \frac{D_{\text{ON}}}{D_{\text{ON}} + D_{\text{OFF}}} I_L(\text{moyen}) \quad (5.44)$$

Le modèle Pspice du système représentant les valeurs moyenne est donné par la figure 5.10.

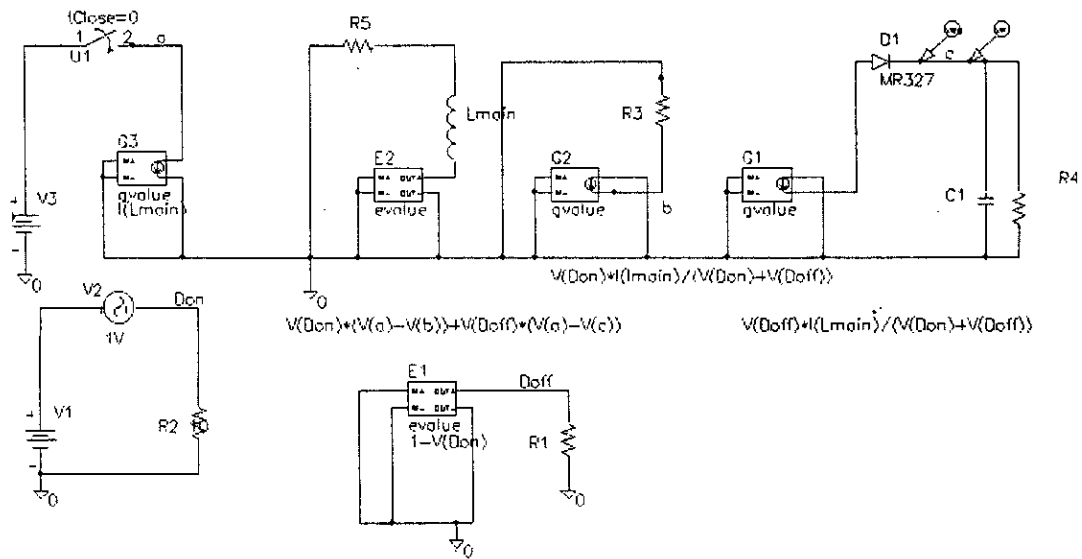


Figure 5.10 : Schéma du modèle du système en valeurs moyennes

L'analyse fréquentielle de ce modèle en valeurs moyennes permet également le tracé de la courbe du gain et de la courbe de phase dans le diagramme de Bode. Les résultats de simulation obtenus de cette analyse sont représentés sur la figure suivante (Fig. 5.11).

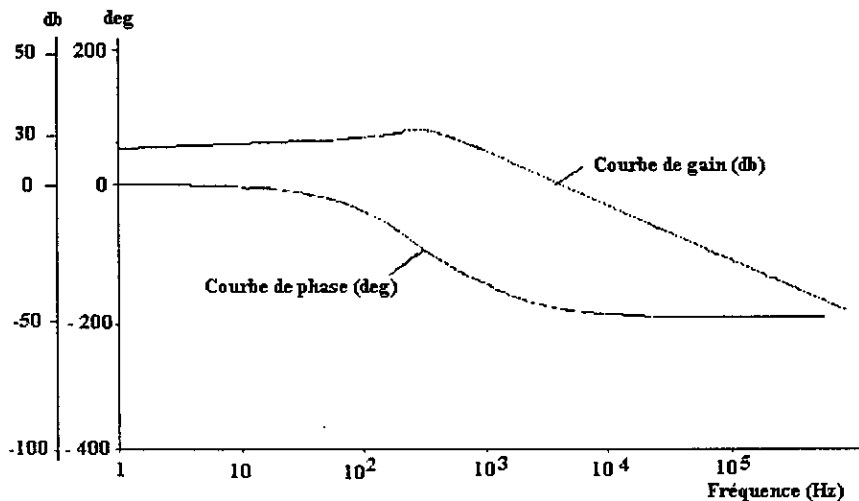


Figure 5.11 : Courbes de gain et de phase par la valeur moyenne en utilisant Pspice

Cette méthode graphique ne permet pas d'avoir les équations analytiques précises des courbes obtenues par simulation. L'étude a été basée sur la modélisation en valeur moyenne dans l'espace d'état, qui nous a permis d'avoir la forme analytique de la fonction de transfert. En effet, cette méthode a pour avantage de déterminer précisément les constantes du correcteur.

5.4 Détermination du correcteur [27, 36, 37]

Après avoir établi les marges de gain et de phase de la fonction de transfert en boucle ouverte de notre système dans le paragraphe précédent, ces dernières représentent les marges de sécurité pour ne pas risquer l'instabilité du système.

Pour rendre le système plus stable, fonctionnel continuellement en son point de puissance maximale, et le sécuriser d'une éventuelle instabilité, un correcteur à avance de phase est introduit.

Ce correcteur est déterminé par la méthode graphique dans le plan de Bode, et sa phase φ_m est prise égale à 55° [32]. Ces informations nous permettent donc de déterminer les paramètres de la fonction de transfert du correcteur.

La fonction de transfert du correcteur est donnée par l'expression suivante :

$$G_c(s) = \frac{1 + s T}{1 + s \alpha T} \quad (5.45)$$

$$\text{avec } \sin \varphi_m = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \quad (5.46)$$

Les fréquences de coupures sont les suivantes : $\omega_1 = \frac{1}{T}$ et $\omega_2 = \frac{1}{\alpha T}$

Les figures 5.7 et 5.8 représentent le tracé de Bode de la phase et de gain du correcteur.

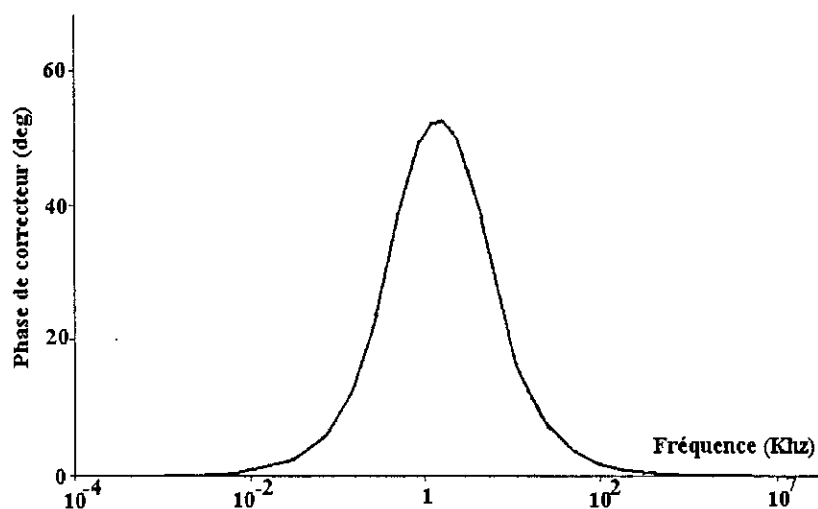


Figure 5.12 : Courbe de phase du correcteur

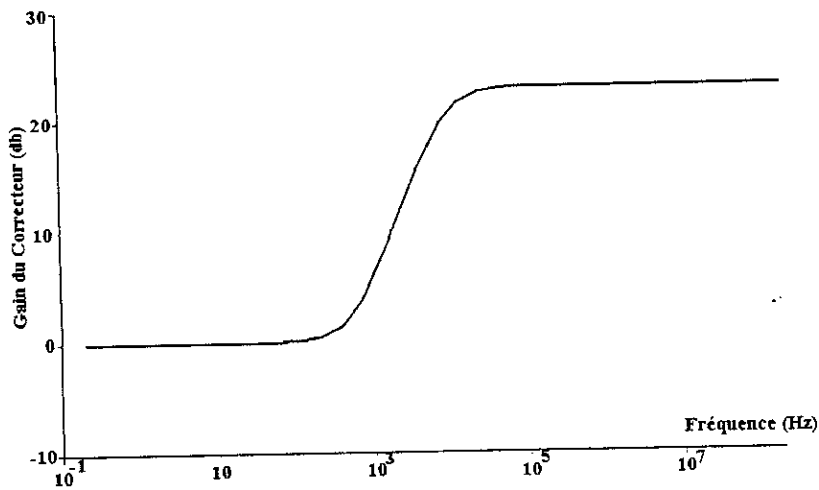


Figure 5.13 : Courbe de gain du correcteur

5.5 Système en boucle fermée 'BF'

Le schéma suivant représente le système en boucle fermée est le suivant :

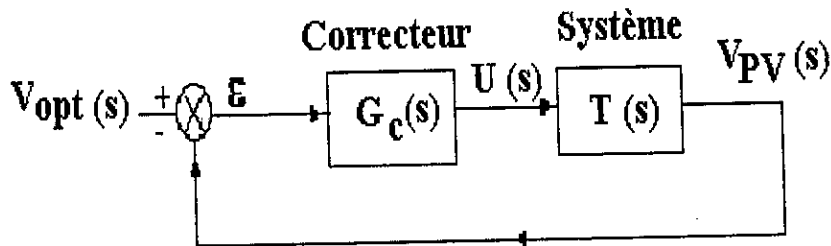


Figure 5.14 : Schéma du système asservi

La fonction de transfert en boucle fermée $F(s)$ s'exprime par la relation suivante :

$$F(s) = \frac{V_{pv}}{V_{opt}} = \frac{T(s) G_c(s)}{1 + T(s) G_c(s)} \tag{5.47}$$

5.6 Analyse du système en boucle fermée 'BF' [34, 35]

En remplaçant les constantes calculées de chacune des fonctions de transfert respectivement celle du correcteur et celle du système, la réponse temporelle ainsi que la réponse fréquentielle de la fonction de transfert en boucle fermée sont représentées par les figures suivantes :

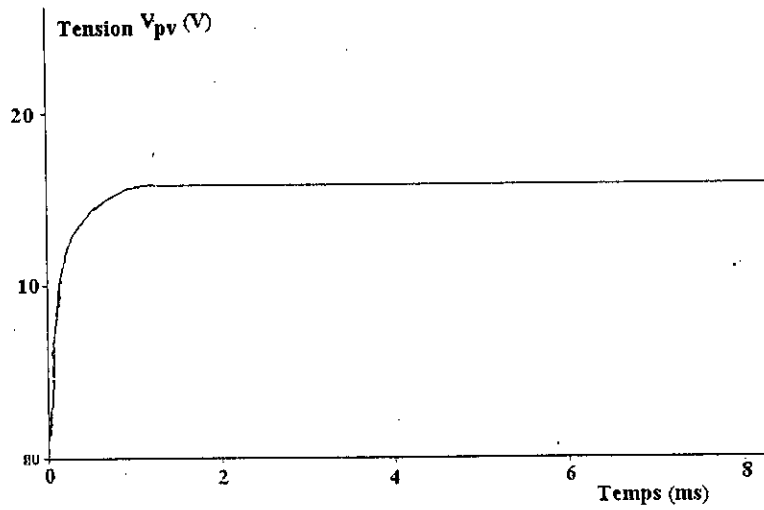


Figure 5.15 : Courbe de la réponse transitoire en "BF"

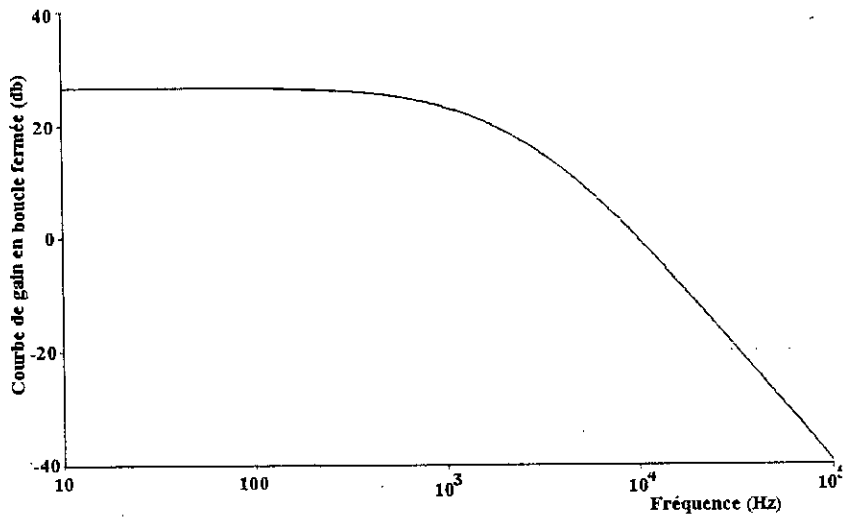


Figure 5.16 : Courbe du gain avec correcteur en "BF"

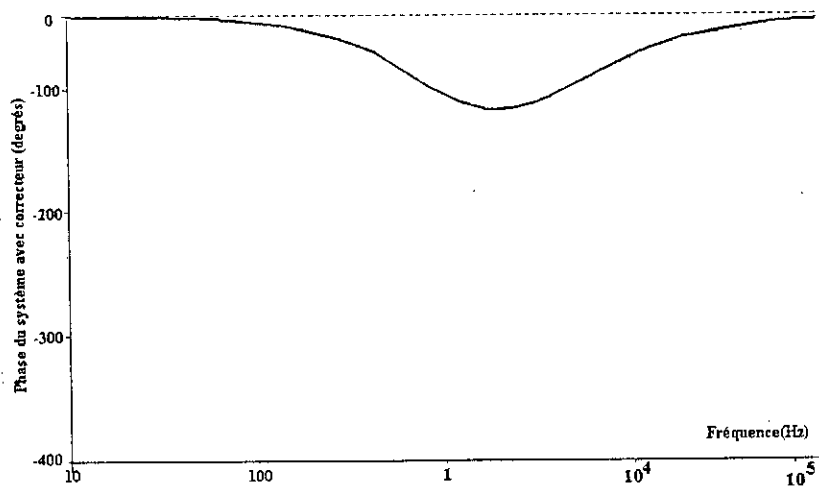


Figure 5.17 : Courbe de phase avec correcteur en "BF"

Le tableau ci-après résume l'ensemble des grandeurs caractéristiques, temporelles et fréquentielles du système en boucle fermée, obtenus dans cette simulation.

Tableau 5.2 : Grandeurs caractéristiques du système en 'BF'

Marge de phase $\Delta \Phi$	65 deg
Temps de réponse t_r	2.2 ms
Facteur de résonance Q	0 db

L'analyse temporelle du système montre que le système passe au premier ordre. Une meilleure stabilité du système est ainsi constatée par une augmentation de la bande passante, une diminution du temps de réponse et du coefficient de surtension, lequel se traduit par l'élimination des pics de surtensions et de surintensités.

5.7 Processus de la poursuite du point de puissance maximale [15, 17, 28]

Après avoir obtenu le modèle dynamique du système et déterminé sa fonction de transfert en boucle fermée, ainsi que le correcteur adéquat pour la stabilité de ce dernier, le schéma synoptique du processus pour la poursuite du point de puissance maximale dans un système photovoltaïque est représenté par la figure 5.18.

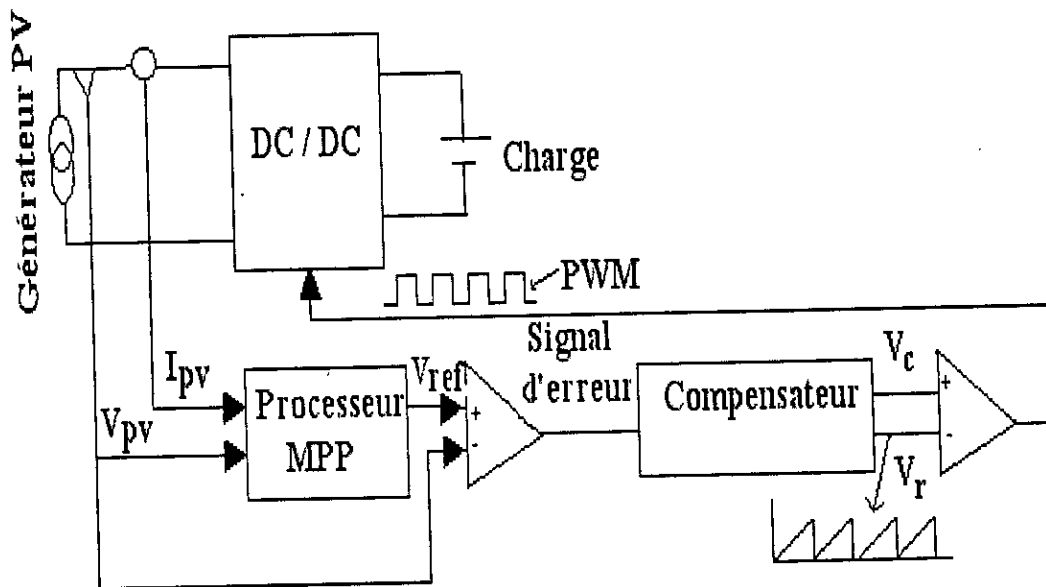


Figure 5.18 : Schéma global représentatif du système pour la poursuite de point de puissance maximale

5.7.1 Description du schéma

Le système, mentionné ci-dessus, se compose de plusieurs modules, à savoir :

- le générateur photovoltaïque,
- le convertisseur DC/DC 'boost'
- le processeur poursuite du point de puissance, MPP
- le compensateur ou (correcteur),
- la charge.

5.7.2 Fonctionnement du système

Les étapes suivies pour le fonctionnement de ce système sont données ci-après :

- **Etape 1** : Le processeur MPP permet de déterminer la puissance maximale du générateur photovoltaïque pour différents niveaux de flux solaires et pour des températures variables. La tension optimale (V_{opt}) ainsi déterminée dans cette étape sera prise comme tension de référence (V_{ref}).
- **Etape 2** : La tension de référence est alors comparée à la tension mesurée du générateur couplé au convertisseur 'boost'. Le but recherché dans cette étape est de pouvoir effectuer la correction de l'erreur entre ces deux tensions et de ramener la tension du générateur photovoltaïque à la tension V_{ref} .
- **Etape 3** : Le signal d'erreur obtenu dans l'étape précédente est alors compensé par le correcteur déterminé précédemment pour l'obtention du signal de commande (V_c).
- **Etape 4** : Ayant obtenu ce signal de commande, il est alors comparé à un signal rampe (V_r) pour l'obtention du signal de commande PWM, commandant l'ouverture et la fermeture du commutateur 'Q', ce qui permettrait d'ajuster le rapport cyclique 'D'.

5.7.3 Algorithme de contrôle

Pour la poursuite du point de puissance maximale, la méthode de la cellule pilote 'Look up Table' étudiée précédemment est utilisée.

Celle-ci permet de calculer à chaque fois la tension de référence (V_{ref}) à partir des tensions optimales connues pour différents flux, mises sous forme de tables, et comparées aux valeurs mesurées, afin de suivre continuellement le point de puissance et de le ramener au point de puissance maximale.

L'algorithme de contrôle est présenté sur le schéma suivant :

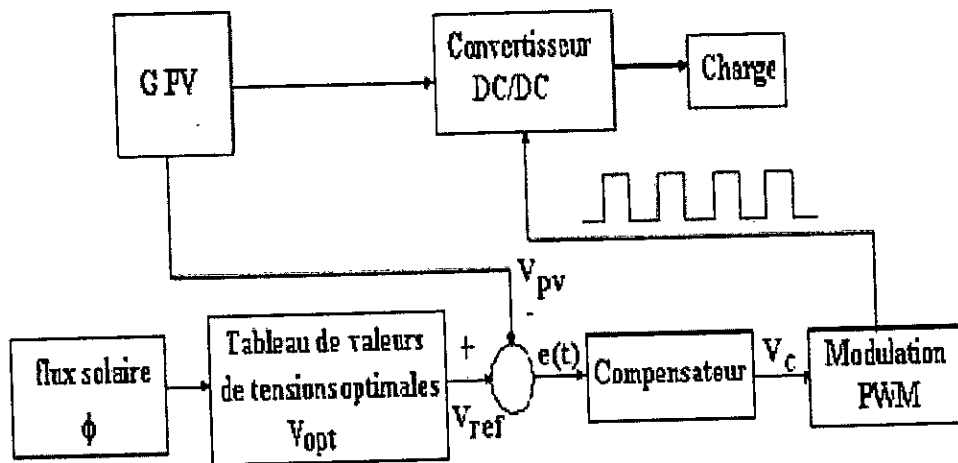


Figure 5.19 : Algorithme de contrôle

Le modèle électrique global incluant le générateur photovoltaïque, le générateur de tension optimales, le modulateur PWM est représenté sur la figure 5.20.

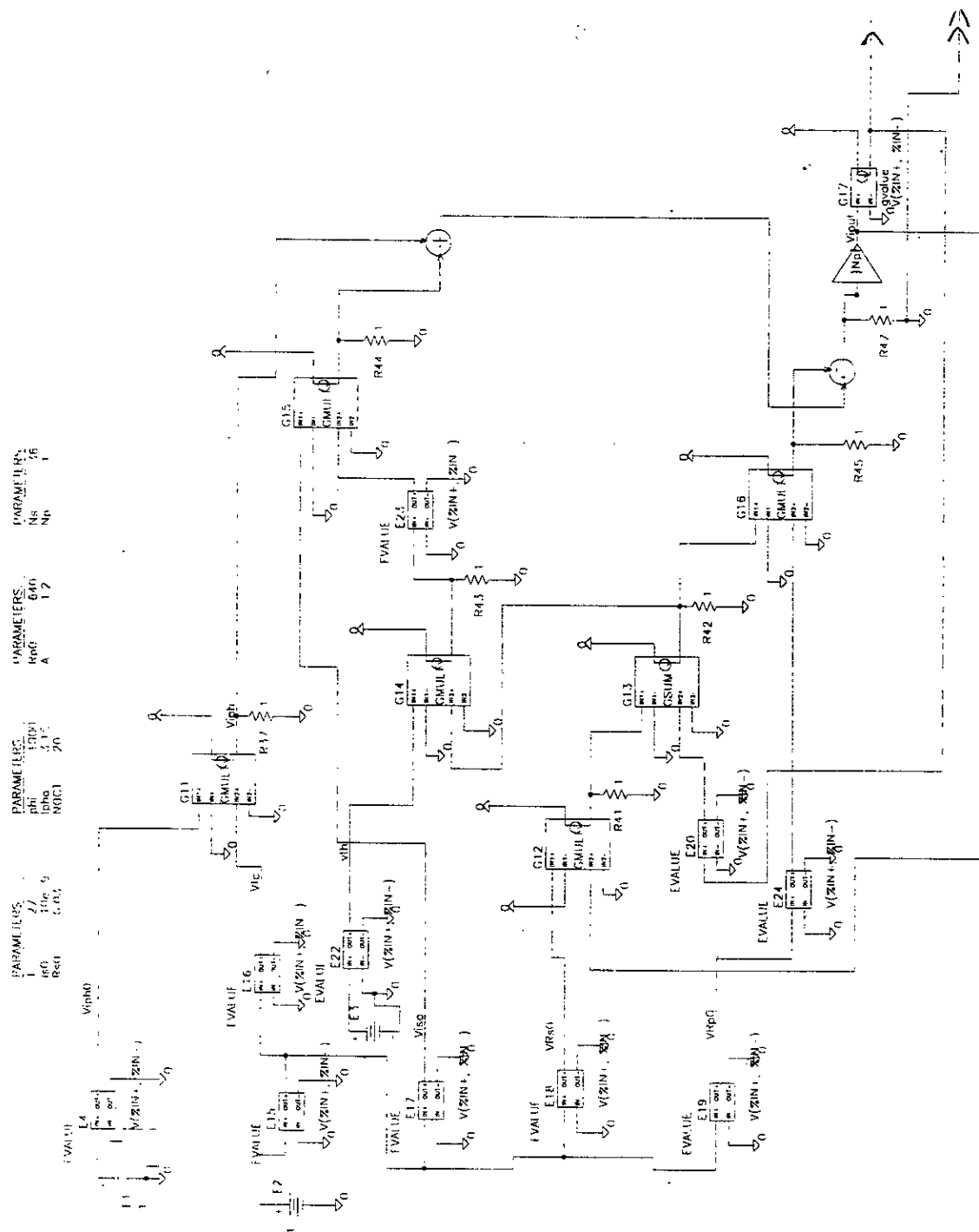


Figure 5.20 : Schéma électrique global du système

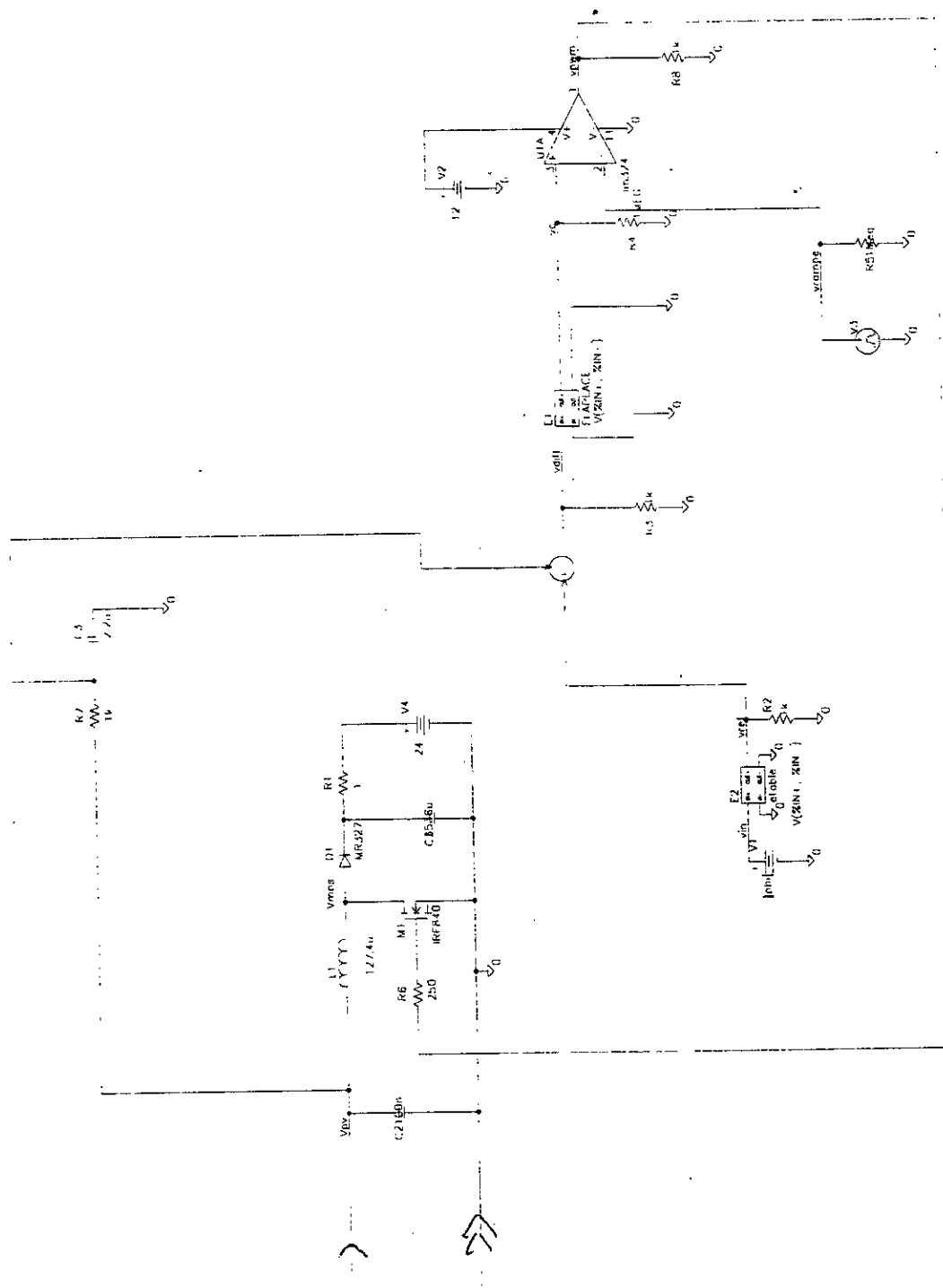


Figure 5.20 : Schéma électrique global du système (suite)

5.8 Résultats de simulation

Les figures ci-après représentent les résultats de simulation des signaux obtenus par Pspice, signal PWM et tension optimale du générateur photovoltaïque pour deux niveaux de flux ($\varphi = 1000 \text{ W/m}^2$ et 500 W/m^2).

- $\varphi = 1000 \text{ W/m}^2$

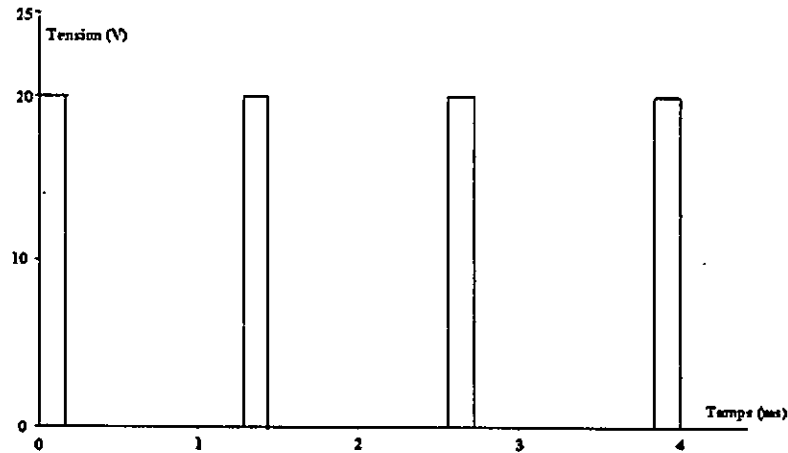


Figure 5.21 : Signal de commande PWM, $D = 0.31$

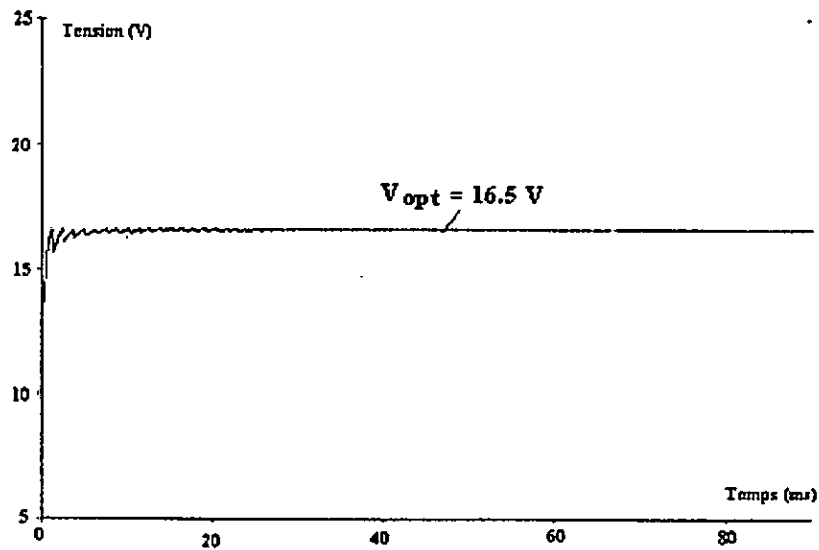


Figure 5.22 : Tension optimale du générateur photovoltaïque

$$\varphi = 500 \text{ W/m}^2$$

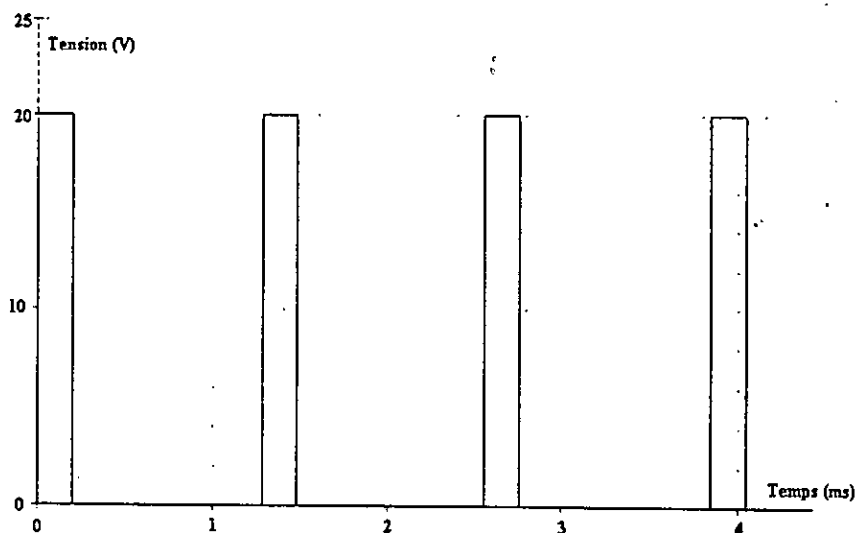


Figure 5.23 : Signal de commande PWM, $D = 0.32$

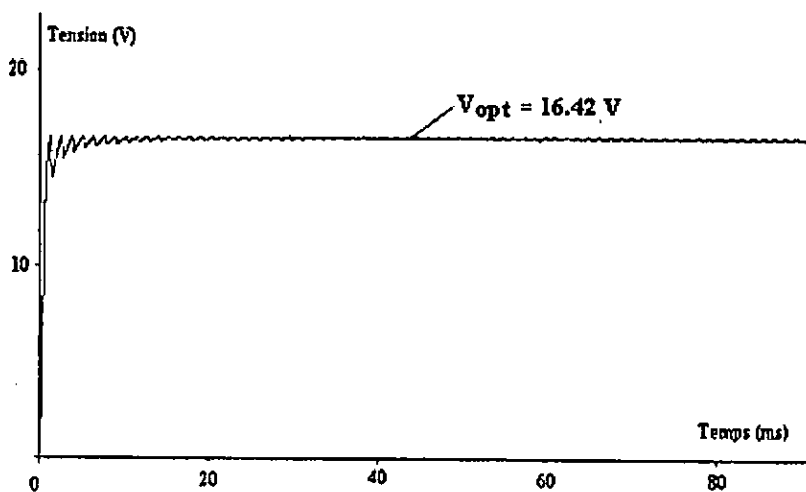


Figure 5.24 : Tension optimale du générateur photovoltaïque

Les résultats obtenus montrent que les tensions de fonctionnement du générateur de notre système étudié –GPV - MPPT - Charge– approchent d’une façon appréciable les valeurs des tensions optimales de ce générateur et ce pour chaque variation du flux solaire, comme cela est représenté sur les figures précédentes.

Par conséquent, les valeurs de tensions optimales obtenues sur les caractéristiques P-V données au tableau 4.2 sont comparées à ces nouvelles valeurs, prouvant ainsi que le modulateur PWM positionne le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque à son point de puissance maximale.

5.9 Conclusion

Les résultats obtenus de la modélisation et de la simulation du système de conditionnement de puissance 'boost' couplé au générateur photovoltaïques en boucle fermée sont satisfaisantes. L'introduction d'un correcteur a été nécessaire pour la compensation l'erreur induite dans notre système par les perturbations autour de la tension optimale.

Le modèle du système en boucle fermée fait également l'objet d'une poursuite adéquate du point de puissance maximale. Des courbes simulées ont été présentées ainsi que les tensions optimales du générateur photovoltaïque obtenues.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail s'est inscrit dans l'objectif d'améliorer le rendement d'une installation photovoltaïque et d'optimiser la gestion de l'énergie disponible à la sortie du générateur photovoltaïque en maintenant son point de fonctionnement autour d'une position optimale.

Il est donc indispensable de se positionner en ce point de puissance maximale qui malheureusement peut fluctuer en fonction des changements climatologiques, comme la température et l'éclairement.

Pour la poursuite efficace de ce point, un convertisseur de puissance DC/DC est intercalé, entre le générateur photovoltaïque et la charge, lors de son fonctionnement. Ce convertisseur nécessite beaucoup d'attention que ce soit sur l'aspect dimensionnement que sur l'aspect contrôle et asservissement, pour éviter l'instabilité du système.

Nous avons donc procédé à une étude de modélisation et de simulation de l'ensemble des éléments composant le système photovoltaïque, et particulièrement le système de conditionnement de puissance. Ce système est un convertisseur survolteur 'Boost Converter', commandé par la technique de modulation en largeur d'impulsion 'PWM'. La simulation a été menée en utilisant le logiciel Pspice avec l'option 'A.B.M.'.

L'avantage de cette approche pour la modélisation comportementale s'avère bien adaptée à notre travail, contrairement aux autres méthodes de simulation qui auraient pu être utilisées (Matlab/Simulink,..). En utilisant les résultats obtenus, il est maintenant possible de passer directement au circuit électronique et même au circuit imprimé du système simulé.

Pour aboutir aux résultats souhaités, l'étude détaillée du système photovoltaïque, plus particulièrement le générateur photovoltaïque et le système de conditionnement de puissance, établie dans le premier chapitre, nous a permis de connaître tous les paramètres qui influent sur le comportement de ce système.

Les paramètres les plus importants qui sont pris en considération dans notre travail sont l'éclairement et la température.

Le modèle du générateur tenant compte de ces paramètres, établi dans le deuxième chapitre, et l'utilisation de logiciel Pspice comme outil de simulation ont permis de bien décrire le comportement du générateur photovoltaïque.

Après avoir passé en revue toutes les stratégies de commande pour la recherche de la poursuite de ce point dans le troisième chapitre, le choix s'est porté sur l'utilisation de la méthode de la cellule pilote. Cette méthode est facile à mettre en œuvre dans le cas de la simulation par Pspice et donne des résultats appréciables dans ce travail.

L'étude des convertisseurs de puissance DC/DC et la comparaison de leurs performances énergétique montre que le convertisseur 'boost' est le mieux adapté pour les systèmes photovoltaïques.

Les résultats de simulation du générateur photovoltaïque intégrant le convertisseur boost pour la détermination de la tension optimale du générateur photovoltaïque, en tenant compte des variations du flux solaire et de la température ont montré que le contrôle continu du rapport cyclique de ce convertisseur est indispensable pour la poursuite du point de puissance maximale.

La modélisation du générateur photovoltaïque couplé au convertisseur 'boost', par la valeur moyenne en signaux faibles dans l'espace d'état et l'étude de son asservissement nous ont permis d'avoir le modèle dynamique du système en boucle fermée, et ce en déterminant la fonction de transfert de la tension d'entrée du générateur photovoltaïque par rapport au rapport cyclique. L'introduction d'un correcteur a été nécessaire pour compenser l'erreur induite dans notre système travaillant au point de puissance maximale.

Le modèle dynamique établi et le processus de la poursuite du point de puissance maximale a été soigneusement simulé. Les résultats de simulation obtenus à chacune des étapes de ce travail sont satisfaisants et appréciables.

Il existe donc des possibilités pour l'exploitation et l'application de ce modèle dans de nombreux systèmes photovoltaïques pour permettre un fonctionnement en leur point de puissance maximale.

Pour compléter ce travail, il serait utile d'introduire un modèle de l'accumulateur, siège d'un stockage d'énergie électrique, afin de simuler le fonctionnement d'une installation complète.

Il serait aussi intéressant, s'inspirant de nos résultats, d'adapter ces modèles pour étudier des onduleurs utilisables dans les installations couplées à un réseau, le courant continu devant être transformé en alternatif auparavant. De telles installations, déjà en usage dans un grand nombre de pays, sont un vecteur qui favorise le développement de l'énergie solaire photovoltaïque.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M. Barlaud, B. de Fornel, M. Gauverit et J.P. Requier, "Commande Optimale d'un Générateur Photovoltaïque - Convertisseur Statique - Récepteur", *Revue de Physique Appliquée*, N°19, pp. 905-915, Octobre 1984.
- [2] C. Boisvineau, M. Nougaret et J. Perard, "Optimisation du Fonctionnement d'un Générateur Photovoltaïque - Asservissement Extrémal de la Puissance", *Revue de Physique Appliquée*, N°17, pp. 329-336, Mai 1982.
- [3] M. Barlaud, D. Pradal et J.P. Réquier, "Recherche de la Puissance Optimale Délivrée par un Générateur Photovoltaïque à l'Aide d'un Dispositif Microprogrammé", *Entropie*, N°95, 1980.
- [4] F. Lasnier and T.G. Ang, "Photovoltaic Engineering Handbook", Edition Adam Hilger, 1990.
- [5] T. Folgelman, "Systèmes Photovoltaïques pour les Pays en Développement", Edition. Systèmes AMI, 1982.
- [6] T. Folgelman, "Installations Photovoltaïques dans l'Habitat Isolé", Edition Edisud, France, 1983.
- [7] M. Orgeret, "Les Piles Solaires : le Composant et ses Applications", Masson, Paris, 1985.
- [8] F. Labrique et G. Séguier, "Les convertisseurs de l'Electronique de Puissance", Tome 3, La conversion Continu – Continu, Tech. & Doc., Lavoisier, 1989.
- [9] F. Labrique et G. Séguier, "Les convertisseurs de l'Electronique de Puissance", Tome 4, La conversion Continu – Alternatif, Tech. & Doc., Lavoisier, 1989.
- [10] W.B. Lawrance and R. Troster, "Dynamic Simulation of a Solar Pumping System", *Renewable Energy*, Vol. 2, N°6, pp. 591-596, 1992.
- [11] R.E. Katan, V.G. Agelidis and C.V. Nayar, "Performance Analysis of a Solar Water Pumping System", *Renewable Energy*, Vol. 2, N°6, pp. 81-87, 199.
- [12] L. Van de Merwe and G. Van de Merwe, "Maximum Power Point Tracking - Implementation Strategies", *Renewable Energy*, Vol. 2, N°6, pp. 214-217, 1998.
- [13] H. Sugimoto and H. Dong, "A New Scheme for Maximum Photovoltaic Power Tracking Control", *IEEE*, pp. 691-696, 1997
- [14] J.A. Gow and C.D. Manning, "Development of a Photovoltaic Array Model for Use in Power-Electronics Simulation Studies", *IEE Proc.- Electr. Power Appli.*, Vol. 146, N°2, pp. 193-200, March 1999.

- [15] C. Hua, J. Lin and C. Shen, "Implementation of a DSP-Controlled Photovoltaic System with Peak Power Tracking", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 45, N°1, pp. 99-107, February 1998.
- [16] S.J. Chiang, K.T. Chang and C.Y. Yen, "Residential Photovoltaic Energy Storage System", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 45, N°3, pp. 385-394, June 1998.
- [17] C. Hua and J.R. Lin, "DSP-Base Controller Application in Battery Storage of Photovoltaic System", IEEE, IECON, 22th Int. Conf. on, Vol. 3, pp. 1705-1710, 1996.
- [18] K.H. Hussein et al., "Maximum Photovoltaic Power Tracking – An Algorithm for Rapidly Changing Atmospheric Conditions" Proc. Elect. Eng., Vol. 142, N°1, pp. 59-64, Jan. 1995.
- [19] Y. Amran, F. Hulichel and S. Ben-Yaakov, "A Unified Spice Compatible Average Model of PWM Converters", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 6, N°4, pp. 585-584, October 1991.
- [20] S. Hong, B. Jo and M. Youn, "Duty Cycle Generator for Average Model of Buck Converter with Current-Mode Control - Using Analog Behavioural Modelling of PSpice", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 11, N°6, pp. 785-795, November 1996.
- [21] E. Van Dijk, H.J. N. Spruijt, D.M. O'Sullivan and J. Ben Klaassens, "PWM-Switch Modelling of DC-DC Converters", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 10, N°6, pp. 659-665, November 1995.
- [22] V. Vorperian, "Simplified Analysis of PWM Converters Using Model of PWM Switch - Part 1: Continuous Conduction Mode", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 26, N°3, pp. 490-496, May 1990.
- [23] M. Cotorogea, "Implementation of Mathematical Models of Devices for Circuit Simulation in Pspice", IEEE , pp. 17-22, Oktober 1998.
- [24] J.N. Avaritsiotis, "The Efficient Exploitation of Photovoltaic Electricity", Solar Cells, Vol. 14, N°3, pp. 261-279, July 1985.
- [25] F. Huang, G. Zhimin, T. Forughian and D. Tien, "A New Microcontroller Based Solar Energy Conversion Modular Unit", IEEE, N° , pp. 697-700, February 1997.
- [26] MicroSim Pspice & Basics - User's Guide, Irvine CA, 1997.
- [27] K. Ogata, "Modern Control Engineering", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1970.
- [28] A.J. Forsyth and S.V Mollov, "Modelling and Control of DC-DC Converters", Power Engineering Journal, pp. 229-236, October 1998.
- [29] S. Ben-Yaakov and D. Adar, "Average Models as Tools for Studying the Dynamics of Switch Mode DC-DC Converters",
- [30] R.W. Erickson, "DC-DC Power Converters", Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, Power Engineering Journal, pp. 229-236, October 1998.

- [31] I. Glasner and J. Appelbaum, "Advantage of Boost Vs Buck Topology for Maximum Power Point Tracker in Photovoltaic Systems", IEEE Transactions on Energy Conversion, pp. 355-358, 1996.
- [32] M.H. Rashid, "Spice for Electronic and Electric Power", Printice-Hall, London 1993.
- [33] D. Maksimovic and R. Erickson, "Advances in Averaged Switch Modelling and Simulation", Power Electronics Conference 1999.
- [34] C. Foulard, "Etude Fréquentielle des Systèmes Continus", Techniques de l'Ingénieur, R7170, 1992.
- [35] Y. Tanguy et D. Viault, "Performances d'un Système Asservi", Techniques de l'Ingénieur, R7200, 1994.
- [36] M. Nougaret, "Principes Généraux de Correction", Techniques de l'Ingénieur, R7405, 1984.
- [37] M. Buresch, "Photovoltaic Energy Systems", McGraw-Hill Book Company, 1983.
- [38] D. Meyer and S. Biscaglia, "Development and Evaluation of 20 Watt MPP Tracking Charge Controller for PV Supplied Remote Monitoring Stations", 10th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 8-12 April, Lisbon, Portugal, 1991.
- [39] J.A. Roger et J. Pivot, "Les Générateurs Photovoltaïques Autonomes sans Batteries", Revue Physique Appliquée, Vol. 15, 1980.
- [40] J.P. Réquier, M. Barlaud, G. Chaumain et P. Rouan, "Utilisation Optimale des Générateurs Photovoltaïques", Entropie, N°96, pp. 40-47, 1980.
- [41] J.L. Dalmaso, "Electronique de Puissance", Ed. Belin.
- [42] H. Floch et B. Coll, "Hacheurs Continus - Continus", Techniques de l'Ingénieur, D3160, 1990.
- [43] W. Palz, "Electricité Solaire", Ed. Dunod-Unesco, 1983.
- [44] J.C. Gille, "Exemple de Correction", Techniques de l'Ingénieur, R7412, 1989.
- [45] A.T. Veltman, R. Klockner and K.K.W. Geers, "Equipment for Testing of Maximum Power Point Trackers under Variable, Programmable Conditions", 10th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 8-12 April, Lisbon, Portugal, 1991.
- [46] H. Mashenleni and X. F. Carlese, "Microcontroller-Based Charge Controller Stand-Alone Photovoltaic Systems", Solar Energy, Vol. 4, pp. 225-230, 1997.
- [47] P. Siarry, "Automatique de Base", Ed. Berti 1993.
- [48] M. Matsui, T. Kitano, D-H Xu and Z-q. Yang, "A New Maximum Photovoltaic Power Tracking Control Scheme Based on Power Equilibrium at DC Link", IEEE Transactions on Energy Conversion, pp. 804-809, 1999.

[49] Z.M. Salameh and D. Taylor, "Step-up Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Arrays", *Solar Energy*, Vol. 44, N°11, pp. 57-61, 1990.

[50] Q. Kou, S.A Klein and W.A. Beckman, "A Methode for Estimating the Long Term Performance of Direct-Coupled PV Pumping Systems", *Solar Energy*, Vol. 64, N°1-3, pp. 33-40, 1998.

[51] J.J Distefano, A.R. Stubberud et I.J. Williams, "Systèmes Asservis", Série Shaum, 2 Volumes, McGraw-Hill, 1983.

[52] A. Laugier et J.A. Roger, "Les Photopiles Solaires - du Matériau au Dispositif - du Dispositif aux Applications", Tech. & Doc., Paris, 1981.

[53] L. Hassaine, A. Chouder, M. Haddadi and A. Malek, "Modelling and Simulation of MPP Tracker using Pspice Analog Behavior Modelling", World Renewable Energy Congress, WREC VII, Cologne, Allemagne, 29 June - 5 July 2002.