



Université ABBES LAGHROUR Khenchela  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Industriel  
جامعة عباس لغرور خنشلة  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم الهندسة الصناعية



**N° Série :** .....

## Mémoire de fin d'étude

*Pour l'obtention du diplôme de Master*

**Filière : Automatique**

**Spécialité : Automatique et informatique industrielle**

**Présenté par**

**RAHALI Abdelbasset**

**SEBAA Hichem**

**THEME**

**Simulation d'un émulateur photovoltaïque  
raccordé au convertisseur DC-DC type BUCK**

*Soutenu le 06/09/2020 devant la commission d'examen composée de :*

**Mr. BEDDIAF abdelaziz**

MCB à l'Université de Khenchela Président

**Mr. Menadi abdelkarim**

MCB à l'Université de Khenchela Encadreur

**Mr. Saidi abdelkader**

MCB à l'Université de Khenchela Examineur

*Promotion 2019/2020*

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## ***Remerciements***

*Nous remercions en premier lieu Dieu tout puissant de nous avoir accordé la puissance et la volonté pour achever ce travail.*

*Nous adressons nos sincères remerciements à notre superviseur monsieur le docteur :MENADI Abdelkrim.*

*Nous vous remercions vivement pour votre soutien, vos conseils judicieux et votre aide précieuse.*

*Veillez trouver, chère professeur, le témoignage de notre grande Reconnaissance et de notre profond respect.*

*Nous tenons également à remercier les membres de jury Madame : AOURAGH Salima et Monsieur : BEDDIAF. Abdelaziz d'avoir accepté d'examiner notre travail.*

*Enfin, nous voulons témoigner que ce travail restera une expérience formatrice.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

✚ À ma mère aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que tu avais consenti pour mon, malheureusement tu n'es plus là. Mais tu es dans mon cœur à tout jamais, je pense à toi en silence.

✚ À mon père, puisse Dieu, le Très Haut, t'accordes santé, bonheur et longue vie.

✚ À toute la famille SEBAA, spécialement mes chers enfants Lujain et Mouataz.

***SEBAA Hichem***

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

✚ *Ma très chère mère qui a été à mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie, que Dieu puisse m'aider à l'honorer, la servir et la combler.*

✚ *Mon très cher père.*

✚ *Mes très chers frères et sœurs.*

✚ *Toute la famille **RAHALI**.*

✚ *Tous mes amis.*

✚ *Mon binôme **SEBAA Hichem** qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail.*

✚ *Toute la promotion 2020.*

***RAHALI Abdelbasst***

# *Liste des figures*

## **Chapitre I : Généralités sur les panneaux photovoltaïques**

Figure I.1 : Schéma synoptique d'un système thermique	5
Figure I.2 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque	6
Figure I.3 : types de cellules photovoltaïques	7
Figure I.4 : Constitution d'un générateur photovoltaïque	9
Figure I.5 : Composition d'un module solaire photovoltaïque	10
Figure I.6 : (a) Schéma d'un panneau solaire photovoltaïque avec diodes de protections (b) Défaillance d'une des cellules du module PV et activation de la diode by-pass et mise en évidence du courant de circulation.	11
Figure I.7 : Constituants d'une cellule solaire	11
Figure I.8 : Structure (gauche) et diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque	12
Figure I.9 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale	13
Figure 1.10 : Schéma électrique équivalent de la cellule photovoltaïque modèle à deux diodes	14
Figure I.11 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle	14
Figure I.12 : Association de ns cellules PV en série	15
Figure I.13 : Caractéristique courant tension de ns cellule en série	15
Figure I.14 : Association de np cellules en parallèle	15
Figure I.15 : Caractéristique courant tension de np cellule en parallèle	16
Figure I.16 : Association des cellules mixtes (série-parallèle)	16
Figure I.17 : Caractéristique d'un assemblage série/parallèle de et cellules	16
Figure I.18 : Les courbes $I = f(V)$	17

## **Chapitre II : Convertisseur DC-DC**

Figure II.1 : Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour	20
Figure II.2 : Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe pour différentes charges DC	21

Figure II.3 : Principe de l'adaptation d'impédance par MPPT	22
a) En utilisant les paramètres d'entrés	
b) En utilisant les paramètres de sorties	
Figure II.4 : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost	23
Figure II.5 : Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé	23
Figure II.6 : Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert	24
Figure II.7 : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck	26
Figure II.8 : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck-Boost	27
Figure II.9 : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur	27
Figure II.10 : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Sepic	29
Figure II.11 : Evolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique des convertisseurs	30
Figure II.12 : Evolution du gain en tension en tenant compte des éléments parasites des convertisseurs	30

### **Chapitre III : Modélisation d'un émulateur photovoltaïque**

Figure III.1 : Modèle à diode unique d'une cellule PV	33
Figure III.2 : Schéma équivalent d'un modèle à une diode (L5p) de la cellule	34
Figure III.3 : Hacheur dévolteur type Buck	37
Figure III.4 : Schéma de principe de la régulation de tension d'un convertisseur DC/DC	40
Figure. III.5 : Schéma bloc de la boucle de réglage	41
Figure. III.6 : Comparaison de la valeur de consigne avec la valeur réelle	42
Figure III.7 : Configuration générale d'un amplificateur de réglage	43
Figure III.8 : Schéma bloc d'un régulateur	44
Figure III.9 : Réponse harmonique (module) pour un régulateur PI	44
Figure III.10 : Réponse harmonique (phase) pour un régulateur PI	44
Figure III.11 : Réponse harmonique (phase) pour un régulateur PI	45
Figure III.12 : Schéma de principe du régulateur PI	45
Figure III.13 : Réponse harmonique du régulateur PI : $R1=10k$ , $R2=100k$ , $C2=10Nf$	46
Figure III.14 : Réponse indicielle du régulateur PI : $R1=10k$ , $R2=100k$ , $C2=10Nf$	47
Figure III.15 : Modulation de largeur d'impulsion	49

## Chapitre IV : Simulation d'un émulateur photovoltaïque sous Matlab - SIMULINK

Figure IV.1 : Principe du fonctionnement de l'émulateur photovoltaïque	50
Figure IV.2 : Model de l'émulateur photovoltaïque sous Matlab-Simulink	51
Figure IV.3 : Les caractéristiques $V(t)$ , $V_{ref}(t)$ et $V_s(t)$ pour une température de $0^{\circ}\text{C}$	52
Figure IV.4 : La caractéristique du rapport cyclique $\alpha$ en fonction du temps pour une température de $0^{\circ}\text{C}$	52
Figure IV.5 : Les Caractéristiques $V_{s, ref}$ et $V$ en fonction du temps pour une température de $25^{\circ}\text{C}$	53
Figure IV.6 : Les Caractéristiques du rapport cyclique du temps pour une température de $25^{\circ}\text{C}$	53
Figure IV.7 : Les Caractéristiques $V_{ref}$ , $V_s$ et $V$ en fonction de temps pour une température de $50^{\circ}\text{C}$	54
Figure IV.8 : Les Caractéristiques du rapport cyclique $\alpha$ en fonction du temps pour température de $50^{\circ}\text{C}$	54
Figure IV.9 : Les Caractéristiques $V_{ref}$ , $V_s$ et $V$ en fonction de temps pour un éclairement de $700\text{w/m}^2$	55
Figure IV.10 : La caractéristique du rapport cyclique $\alpha$ en fonction du temps pour un éclairement de $700\text{w/m}^2$	55
Figure IV.11 : Les Caractéristiques $V_{ref}$ , $V_s$ et $V$ en fonction du temps pour un éclairement de $800\text{w/m}^2$	56
Figure IV.12 : La caractéristique du rapport cyclique $\alpha$ en fonction du temps pour un éclairement de $800\text{w/m}^2$	56
Figure IV.13 : Les Caractéristiques $V_{ref}$ , $V_s$ et $V$ en fonction du temps pour éclairement de $900\text{w/m}^2$	57
Figure IV.14 : La caractéristique du rapport cyclique $\alpha$ en fonction du temps pour un éclairement de $900\text{w/m}^2$	57

# *Liste des tableaux*

## **Chapitre II : Convertisseur DC-DC**

<b>Tableau II.1</b> : Récapitulatif des caractéristiques des convertisseurs continu-continu	31
---	----

# *Listes des Acronymes et Symboles*

## *Liste des Abbreviations*

AC	Alternating current
AM	Air masse
DC/AC	Conversion continu/alternative
DC/DC	Conversion continu/continu
GPV	Générateurs Photovoltaïque
HC	Hill climbing
Income	Incrémentation de conductance
MLI	Modulation de largeurs impulsions
PPM	Point de puissance maximale
DC	Direct curent
MPPT	Maximum Power Point Tracking
P&O	Perturbation et observation
PF	Point de fonctionnement
PI	Régulateur proportional integral
PV	Photovoltaïque
SMC	Sliding Mode Control
SSV	Système à structure variable
STC	Standard test conditions
W <sub>c</sub>	Watt-crête
I-V	Courant-tension
P-V	Puissance-tension

## *Symboles*

$\Delta E$	Changement d'erreur
$\Delta \alpha$	Changement du Rapport cyclique du convertisseur
$q$	Charge élémentaire de l'électron
$k_v$	Coefficient de température de la tension en circuit ouvert
$k_i$	Coefficient de température du courant de court-circuit
$\delta$	Coefficient empirique

$K_i$	Coefficient integral du régulateur
$K_p$	Coefficient proportionnel du régulateur
$u_n$	Commande discontinue
$u_{eq}$	Commande equivalent
$k_b$	Constante de Boltzmann
$i_{opt}$	Courant optimale de la cellule
$i_d$	Courant dans la diode
$i_{pv}$	Courant de la cellule PV
$i_{sc}$	Courant de court-circuit de la cellule
$I_s$	Courant de saturation de la diode
$I_o, V_o$	Courant et tension du bus continu
$I_{max}$	Courant maximale dans l'inductance
$I_{min}$	Courant minimale dans l'inductance
$I_{opt}$	Courant optimal du GPV
$G$	Eclairement
$E$	Erreur
$a$	Facteur d'idéalité de la jonction
$FF$	facteur de forme de la cellule PV
$V$	Fonction de LYAPUNOV
$sign$	Fonction signe
$Z_d$	Impédance différentielle
$L, C_1, C_2$	Inductance, condensateur d'entrée, condensateur de sortie
$\Delta V_s$	L'ondulation de la tension de sortie
$\Delta i_L$	L'ondulation du courant dans l'inductance
$f$	La fréquence de découpage
$u$	Loi de commande
$N_p$	Nombre de branches en parallèle
$n_s$	Nombre de cellules en série
$N_s$	Nombre de modules en série
$\nabla$	Opérateur gradient

$T_d$	Période de découpage
$i_{ph}$	Photo courant
$v_t$	Potentiel thermodynamique
$P_e$	Puissance effectivement délivrée par le panneau
$p_{in}$	puissance incidente du rayonnement solaire
$p_{max}$	Puissance maximale
$P_{charge}$	Puissance transmise à la charge
$\alpha$	Rapport cyclique du convertisseur
$\eta$	Rendement de la cellule PV
$\eta_{mpppt}$	Rendement de la commande MPPT
$\eta_{PV}$	Rendement de la conversion photons-électrons du panneau
$\eta_{conv}$	Rendement du convertisseur
$\eta_{total}$	Rendement énergétique total
$R_{opt}$	Résistance optimale
$r_p$	Résistance parallèle de la cellule
$R_p$	Résistance parallèle du module PV
$r_s$	Résistance série de la cellule
$R_s$	Résistance série du module PV
$A_{eff}$	Surface active du panneau
$S$	Surface de glissement
$T$	Température de jonction des cellules
$t$	Temps
$v_{opt}$	Tension optimale de la cellule
$v_{pv}$	Tension de cellule PV
$v_{oc}$	Tension circuit ouvert de la cellule
$V_{pv}$	Tension du GPV
$V_{opt}$	Tension optimale du GPV
$V_e, V_s$	Tensions d'entrée et de sortie du convertisseur
$T_r$	Transposée d'une matrice
$x$	Variable d'état

## ملخص

يتطلب اختبار أنظمة تحويل الطاقة الكهروضوئية والتحقق منها ألوًا كهروضوئية (PV) في بيئة معملية. تكتسب أهمية نظام الاختبار المرن الذي يلغي هذه اللوحات ويحاكي الخصائص الديناميكية للمصادر الكهروضوئية في الوقت الفعلي. تقدم هذه المقالة خوارزمية جديدة لمحاكاة الخصائص الكهروضوئية باستخدام محول تنازلي DC-DC في وضع التحكم الحالي. تتعقب الخوارزمية النقطة على خصائص PV و-I-V تحت الأحمال المتغيرة عن طريق إنشاء المرجع الحالي المقابل. يستخدم هذا التيار المرجعي لتوليد نبضات البوابة لمحول DC-DC ، والذي يعمل كمصدر تيار ثابت لمحاكاة اللوحة الكهروضوئية. في النظام المقترح ، تم دمج التباين في الوقت الفعلي للإشعاع ودرجة الحرارة كمعلومات إدخال متغيرة للوقت لمحاكي PV. تمت محاكاة الخوارزمية المقترحة رقمياً باستخدام منصة MATLAB / SIMULINK . يتم عرض نتائج المحاكاة والأجهزة التي توضح كفاءة النظام المقترح في ظل التحميل الديناميكي والظروف البيئية.

الكلمات الرئيسية DC / DC محول باك، PV محاكي، (MPP) نقطة طاقة قصوى.

## Résumé

Les tests et la validation des systèmes de conversion d'énergie photovoltaïques nécessitent des panneaux photovoltaïques (PV) dans un environnement de laboratoire. Un système de test flexible, qui élimine ces panneaux et émule les caractéristiques dynamiques des sources PV en temps réel, gagne en importance. Cet article présente un nouvel algorithme pour l'émulation des caractéristiques PV à l'aide d'un convertisseur abaisseur DC-DC en mode de contrôle de courant. L'algorithme suit le point sur les caractéristiques du PV du V-I sous des charges variables en générant la référence de courant correspondante. Ce courant de référence est utilisé pour la génération d'impulsions de grille pour le convertisseur DC-DC, qui agit comme une source de courant constant pour émuler le panneau PV. Dans le système proposé, la variation en temps réel de l'irradiance et de la température est incorporée en tant que paramètres d'entrée variant dans le temps vers l'émulateur PV. L'algorithme proposé a été simulé numériquement à l'aide de la plate-forme MATLAB / SIMULINK. Les résultats de la simulation et du matériel sont présentés montrant l'efficacité du système proposé dans des conditions de chargement et d'environnement dynamiques.

**Mots clés** - Convertisseur abaisseur DC / DC, émulateur PV, point de puissance maximale (MPP).

## Abstract

Testing and validation of Photovoltaic based energy conversion systems requires Photovoltaic (PV) panels in laboratory environment. A flexible testing system, which eliminates these

panels and emulating the dynamic characteristics of PV sources in real time are gaining importance. This paper presents a new algorithm for emulation of PV characteristics using a DC-DC buck converter in current control mode. The algorithm tracks the point on the V-I characteristics of the PV under varying loads by generating the corresponding current reference. This reference current is used for the generation of gate pulses for the DC-DC converter, which acts like a constant current source to emulate the PV panel. In the proposed system, real time variation of irradiance and temperature are incorporated as a time varying input parameters to the PV emulator. The proposed algorithm has been simulated numerically using MATLAB/SIMULINK platform and is experimentally verified on a laboratory test bench consisting of a DC-DC buck converter of 50 W rating with AT'mega328 as a core controller. Both simulation and hardware results are presented showing the effectiveness of the proposed system under dynamic loading and environmental conditions.

Keywords—DC/DC Buck converter, PV Emulator, Maximum Power Point (MPP).

# *Sommaire*

Introduction générale	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les panneaux photovoltaïques</b>	
I.1 Introduction	3
I.2 Historique	3
I.3 Énergie solaire	4
I.3.1 Energie solaire photovoltaïque	4
I.3.2 Énergie solaire thermique	5
I.4 Effet photovoltaïque	5
I.5 Différents éléments d'un système photovoltaïque	6
I.6 Les types de panneaux solaires photovoltaïques	6
I.6.1 Panneaux solaires à cellules de silicium monocristallin	7
I.6.2 Panneaux solaires à cellules de silicium poly cristallins	8
I.6.3 Panneaux solaires à cellules amorphes	8
I.7 Générateur photovoltaïque	9
I.7.1 Module photovoltaïque	9
I.7.2 Composition d'un module solaire photovoltaïque	10
I.7.3 Cellule photovoltaïque	11
I.7.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	12
I.7.5 Cellule solaire idéal	13
I.7.6 Cellule solaire a deux diodes	13
I.7.7 Cellule solaire réelle	14
I.8 Association des cellules photovoltaïques	14
I. 9 Les différentes caractéristiques d'une cellule solaire	17
I.9.1 Courant de court-circuit $I_{sc}$	17
I.9.2 Tension de circuit ouvert $V_{co}$	17
I.9.3 Puissance maximale $P_m$	17
I.9.4 Facteur de forme FF	17
I.9.5 Rendement de conversion $\eta$	18
I.10 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	18
I.10.1 Avantages	18
I.10.2 Inconvénients	18
I.11 Conclusion	19

## **Chapitre II : Convertisseur DC-DC**

II.1 Introduction	20
II.2 Connexion directe générateur photovoltaïque-charge	20
II.3 Connexion indirecte GPV-charge par le biais d'un étage d'adaptation	21
II.4 Etages d'adaptations	23
II.4.1 Convertisseur Boost	23
II.4.2 Convertisseur Buck	25
II.4.3 Convertisseur Buck-Boost	26
II.4.4 Convertisseur Cuk	27
II.4.5 Convertisseur Sepic	28
II.4.6 Récapitulatif d'analyse et choix du convertisseur	29
II.5 Conclusion	31

## **Chapitre III : Modélisation d'un émulateur photovoltaïque**

III.1 Introduction	32
III.2 Modélisation l'émulateur PV	32
III.2. 1 Modèles mathématique de la cellule PV	32
III.2.2 Modèle à une seule diode	34
III.2.3 Le modèle simplifié	36
III.3 Modélisation d'un convertisseur DC/DC (Hacheur Buck)	37
III.3.1 Modèle mathématique du convertisseur Buck	37
III.3.2 Dimensionnement du convertisseur Buck	39
III.4 Stratégies de commande	40
III.5 Le régulateur	40
III.5.1 Amplificateur opérationnel	42
III.5.2 Comparaison de la valeur de consigne et de la valeur réelle	42
III.5.3 Configuration générale d'un amplificateur de réglage	43
III.5.4 Fonction de transfert	44
III.5.5 Réponse harmonique	44
III.5.5.1 Régulateur PI	45
III.5.5.2 Fonction de transfert	45
III.5.5.3 Réalisation pratique	45
III.5.5.3 Réponse harmonique	46
III.5.5.4 Réponse indicielle	47
III.6 Modulation de largeur d'impulsion	48

III.6.1 La MLI numérique	48
III.6.2 Principe de réalisation	48
III.7 Conclusion	49

## **Chapitre IV : Simulation d'un émulateur photovoltaïque sous Matlab – SIMULINK**

IV.1 Introduction	50
IV.2 Le Système de contrôle et de conception du convertisseur DC-DC	50
IV.3 Le Modèle de l'émulateur photovoltaïque sous Matlab-Simulink	50
IV.4 Présentation et interprétation des résultats de simulation de l'émulateur PV	51
IV.5 Conclusion	58
Conclusion générale	59
Bibliographie	60
Annexe	62

---

## Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ainsi que les pays en voie de développement ne cessant de se multiplier. Cette production a triplé depuis les années 60 à nos jours.

La totalité de la production mondiale d'énergie provient de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution.

Dans le cadre de développement durable, face au double enjeu planétaire posé par l'épuisement prochain des ressources énergétiques fossiles et les problèmes posés vis-à-vis du respect de l'environnement, de fortes incitations poussent au développement des énergies renouvelables.

Il existe plusieurs ressources en énergies renouvelables : l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire thermique et photovoltaïque, l'énergie produite par les vagues et la houle, la géothermie et la biomasse.

Ces ressources sont pratiquement inépuisables et propres et s'opposent à cet effet aux énergies fossiles.

Cependant, il y a aussi quelques inconvénients potentiels de ces systèmes en Algérie, à savoir les prix élevés des panneaux et le faible rendement énergétique de conversion, en plus les systèmes PV génèrent une puissance dépendante du changement des conditions climatiques, telles que le rayonnement solaire et la température des panneaux et de la variation de la charge. D'autre part, le fonctionnement des systèmes PV dans les laboratoires est restreint.

L'objet de ce mémoire est de mettre à la disposition des utilisateurs, un émulateur PV simulera les caractéristiques de courant et de tension d'un panneau photovoltaïque dans des conditions variables. Avoir des caractéristiques électriques cohérentes reproduites, ce qui facilite l'analyse et l'optimisation du système avec ces émulateurs PV.

Tout type de caractéristiques de panneau PV avec son modèle à l'échelle peut émuler avec les paramètres dépendants éliminent le besoin de panneaux photovoltaïques coûteux.

De nos jours, les émulateurs PV sont disponibles dans le commerce et tant d'universités ont proposé des émulateurs PV avec différents algorithmes [22] - [27], L'émulateur PV avec des circuits analogiques utilisant un capteur photo qui amplifie la tension de sortie est développé [22] - [23].

---

Certains émulateurs PV sont basés sur la résistance de charge avec la comparaison de résistance des cellules PV [24] - [25]. La table de recherche est utilisée dans les émulateurs PV pour stocker la résistance, la tension, les données de courant à chaque point des caractéristiques du V-I et un algorithme de recherche est développé pour trouver la tension de référence à une résistance de charge donnée [26].

Certains émulateurs PV sont également développés en utilisant alimentations programmées avec interface informatique [28] [29].

Dans ce mémoire, nous présentons un émulateur panneaux photovoltaïques accordé au convertisseur (abaisseur) DC-DC type BUCK.

Le mémoire rédigé, relatif à ce travail, est architecturé en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente l'état de l'art, La caractérisation du modèle de la photopile, le fonctionnement du GPV, le principe de la conversion PV. En plus, on va clarifier l'influence des conditions météorologiques sur caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) de la cellule PV.

Le deuxième chapitre décrit une étude préliminaire des convertisseurs DC/DC, leur principe de fonctionnement et les différents types existants. Nous avons aussi présenté leur modèle mathématique ainsi que leur commande. Cependant, nous avons choisi un seul convertisseur de type BUCK.

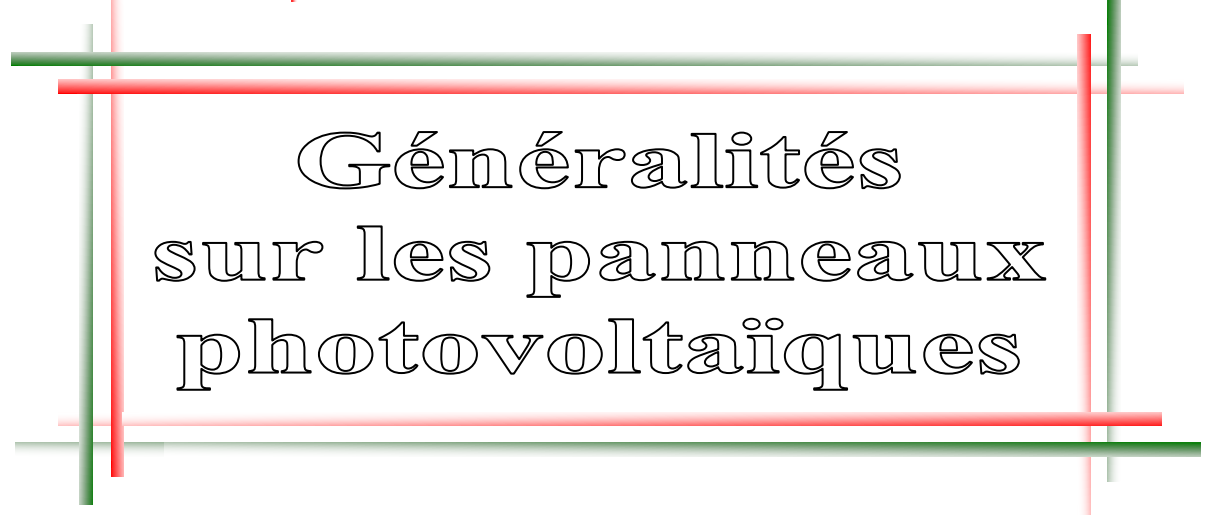
Dans le troisième chapitre on va décrire une modélisation mathématique afin de tracer les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) de la cellule PV.

Le quatrième chapitre est dédié à la simulation de l'émulateur photovoltaïque sous Matlab-SIMULINK en utilisant un hacheur Buck et sa validation en comparant les courbes caractéristiques à celles du panneau photovoltaïque.



# Chapitre I

---



## Généralités sur les panneaux photovoltaïques

## I.1 Introduction

La chaîne de conversion PV ou système PV est un ensemble d'éléments qui sert à la production d'électricité à partir du rayonnement solaire. Un GPV alimente une charge continue ou alternative via une interface d'électronique de puissance. Il est capable de fournir une puissance allant d'un milliwatt à quelques mégawatts. Le composant de base de ce système s'appelle : cellule PV ou photopile. Il produit de l'énergie électrique à chaque fois qu'il reçoit de l'éclairement. Il faut remarquer que la photopile n'est pas une pile car elle ne stocke pas d'énergie ni sous forme chimique ni sous une autre forme. Par contre, elle constitue un convertisseur instantané de la lumière vers l'électricité.

Dans ce chapitre, on présente globalement le fonctionnement du GPV, le principe de la conversion PV. On décrira une modélisation mathématique afin de tracer les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) de la cellule PV en montrant l'influence des conditions météorologiques (éclairement et température).

## I.2 Historique

**1839** : Edmond Becquerel est le premier scientifique à mettre en évidence les effets électriques dans une pile que produisent les rayons solaires. L'effet photovoltaïque est obtenu grâce à l'absorption des photons qui composent la lumière du soleil par un matériau semi-conducteur constitué d'électrons. [1]

**1883** : La fabrication de la première cellule solaire en matériaux semi-conducteurs est attribuée à Charles Fritts en 1883. Cette cellule atteignait un rendement de 1 %, et utilisait de l'or et du sélénium, matériaux coûteux. [2]

**1905** : Einstein découvre que l'énergie des quantas de lumière est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique. Il aura un prix Nobel suite à son ouvrage "Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière". [1]

**1954** : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites. [3]

**1958** : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace. [3]

**1973** : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware. [3]

**1983** : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie. [3]

**1995** : Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001. [3]

**2010 à 2016** : la puissance installée du parc photovoltaïque mondial a été Multipliée par 6 entre fin 2010 (50 GW) et fin 2016 (305 GW)

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". [4]

### **I.3 Énergie solaire**

L'énergie solaire est l'énergie transmise par le soleil sous la forme de lumière et de chaleur, cette énergie peut être convertie en chaleur ou en électricité, on distingue deux moyens principaux de convertir l'énergie solaire :

- Conversion en électricité : énergie solaire photovoltaïque.
- Conversion en chaleur : énergie solaire thermique.

#### **I.3.1 Énergie solaire photovoltaïque :**

Désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux solaires photovoltaïques. Elle résulte de la conversion directe dans un semi-conducteur (le silicium, le CdTe, l'AsGa, le CIS, etc.) d'un photon en électron. [5]

### I.3.2 Énergie solaire thermique

Désigne l'énergie récupérée sous forme de chaleur à partir de la lumière du soleil. L'énergie solaire thermique peut être utilisée de façon passive ou active. On parle de solaire thermique passif pour les installations permettant de chauffer directement un bâtiment par ses surfaces vitrées (effet de serre) et/ou l'accumulation de chaleur sur des murs exposés au rayonnement solaire.

Le solaire thermique actif consiste à récupérer la chaleur du soleil dans des panneaux solaires ou capteurs solaires thermiques dans lesquels circule un fluide caloporteur. Ce fluide chauffé dans les panneaux solaires peut stocker sa chaleur dans un ballon à accumulation, qui alimente ensuite un circuit de chauffage. [6]

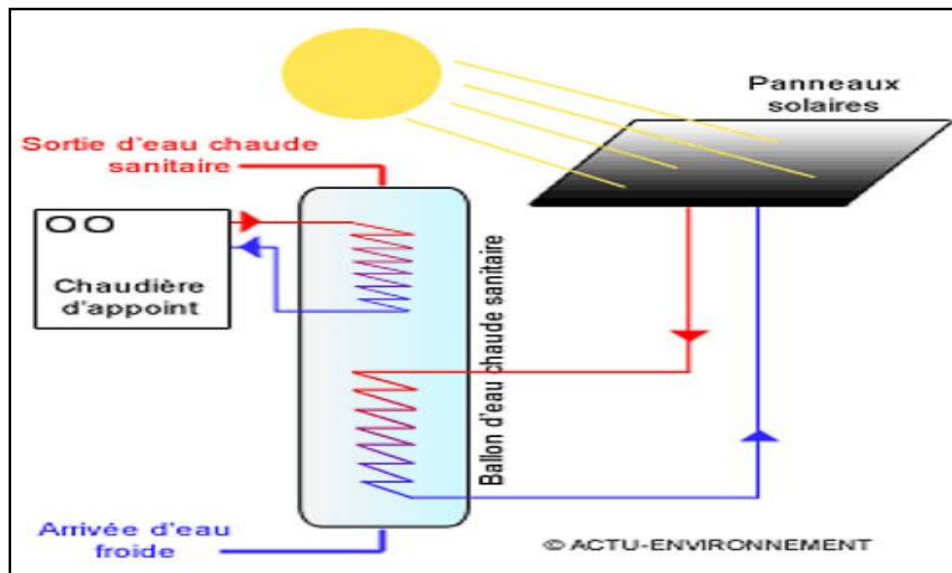


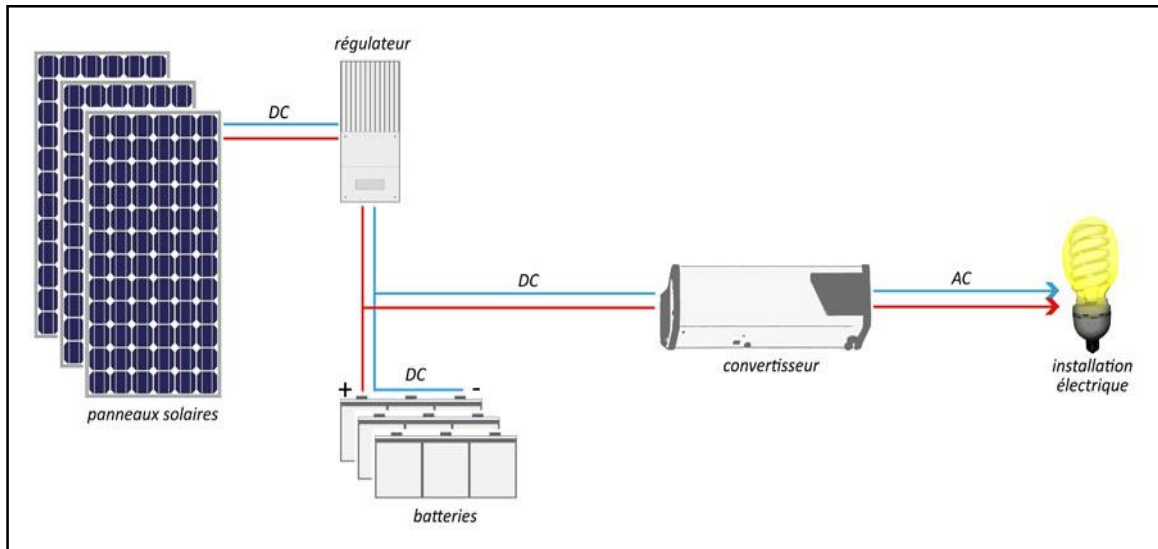
Figure I.1 : Schéma synoptique d'un système thermique.

### I.4 Effet photovoltaïque

La conversion d'énergie solaire PV repose sur un phénomène physique appelé : effet photovoltaïque, qui est la conversion directe de la lumière en électricité quand des photons frappent une cellule faite généralement du silicium. Cette dernière est un composant électronique semi-conducteur dans lequel l'absorption des photons, grains élémentaires de la lumière, libère des "électrons" chargés négativement et des "trous" chargés positivement. Ces charges électriques sont séparées par un champ électrique interne et collectées par une grille à l'avant et un contact à l'arrière. La cellule PV constitue ainsi un générateur électrique élémentaire. [2]

## I.5 Différents éléments d'un système photovoltaïque

En général, un système photovoltaïque est composé d'un ensemble de modules photovoltaïques, d'un régulateur de charge, d'une ou plusieurs batteries et un onduleur et une charge (figure I.2).



**Figure I.2 :** Schéma synoptique d'un système photovoltaïque.

- Le générateur photovoltaïque (GPV) (panneaux solaires) représente la partie de production d'énergie électrique.
- Le régulateur est un circuit électronique dont le rôle est de gérer les flux de courant : courant venant des panneaux en vue de charger la batterie et courant venant de la batterie vers les consommateurs. Il gère la charge et la décharge de la batterie en déconnectant le panneau quand les batteries sont chargées ou en coupant l'alimentation aux consommateurs quand la batterie est trop déchargée.
- Les batteries sont utilisées pour le stockage d'énergie en vue d'une utilisation directe d'un courant continu (DC) avec une charge DC.

## I.6 Les types de panneaux solaires photovoltaïques

Il existe plusieurs types de panneaux solaires photovoltaïques sur le marché à usage domestique. Les types les plus courants sont :

- Panneaux photovoltaïques monocristallins.
- Panneaux solaires poly cristallins.
- Panneaux solaires à couches minces.



**Figure I.3 :** types de cellules photovoltaïques.

Environ 90% de la technologie photovoltaïque est basée sur l'utilisation d'une certaine variation de silicium. Dans le cas des panneaux solaires destinés à un usage domestique, ce pourcentage est encore plus élevé.

La principale différence entre les différents types de plaques photovoltaïques est la pureté du silicium utilisé. Plus le silicium est pur, mieux ses molécules sont alignées et mieux il convertit l'énergie solaire en électricité.

De cette façon, une relation directe s'établit entre la pureté du silicium et l'efficacité des panneaux solaires. Inversement, l'augmentation de la pureté du silicium implique des processus plus coûteux.

Le silicium cristallin est la base des cellules monocristallines et poly cristallines.

### **I.6.1 Panneaux solaires à cellules de silicium monocristallins**

Dans les panneaux solaires monocristallins, les cellules solaires en silicium monocristallin (mono-Si) sont assez faciles à reconnaître en raison de leur coloration et de leur aspect uniforme, ce qui indique une grande pureté du silicium.

Dans ce type de panneaux photovoltaïques, les cellules monocristallines sont constituées de blocs de silicium ou de lingots, de forme cylindrique.

Par la suite, dans le but de réduire les coûts de fabrication des cellules photovoltaïques monocristallines et d'optimiser leurs performances, les quatre côtés des blocs cylindriques sont découpés pour fabriquer des feuilles de silicium. Cette coupe est ce qui leur donne ce look caractéristique.

L'un des moyens les plus simples de distinguer clairement un panneau solaire monocristallin d'un panneau poly cristallin est que dans les cellules poly cristallines, les cellules n'ont pas de coins arrondis et sont parfaitement rectangulaires.

La différence fondamentale entre une cellule solaire monocristalline et une cellule solaire polycristalline est la composition du cristal de silicium. Les cellules monocristallines sont constituées d'un seul type de cristal de silicium, c'est-à-dire que lorsque le cristal a été fabriqué, la croissance du cristal de silicium lui-même était contrôlée de sorte qu'il ne se formait que dans une seule direction, réalisant un alignement assez parfait de tous les composants du verre.

En revanche, dans les cellules polycristallines, la croissance du cristal de silicium n'est pas contrôlée, ce qui fait que le cristal croît dans toutes les directions créant un ensemble de différents cristaux liés entre eux.

### **I.6.2 Panneaux solaires à cellules de silicium polycristallins**

Les panneaux photovoltaïques polycristallins, contrairement aux panneaux monocristallins, n'utilisent pas la méthode Czochralski dans leur fabrication. Dans ce type de panneau solaire, le silicium brut est fondu et versé dans un moule carré. Il est ensuite refroidi et découpé en feuilles parfaitement carrées.

Les premiers panneaux solaires en silicium polycristallin sont apparus sur le marché en 1981.

Les panneaux solaires à base de cellules polycristallines ont une longue histoire dans l'industrie, depuis leur fabrication a commencé dès les années 1980.

Son plus grand avantage sur les cellules monocristallines provient d'un processus de production à moindre coût, ce qui abaisse le prix final de ces systèmes.

Les cellules photovoltaïques des panneaux solaires polycristallins sont plus abordables. En revanche, ils présentent certains inconvénients : la plus faible tolérance à la chaleur de ces cellules signifie qu'elles ont une efficacité inférieure à l'alternative monocristalline.

Plus précisément, on estime que les panneaux qui incluent ces cellules ont un rapport d'efficacité d'un maximum de 16%, principalement en raison de la plus faible quantité de silicium qu'elles incorporent.

L'effet négatif que les températures élevées provoquent sur ces cellules, ce qui les rend encore moins attractifs que les cellules monocristallines pour les utilisateurs résidant dans des zones chaudes, ainsi que leur moindre efficacité par rapport à l'espace, apparaissent également comme des inconvénients de ces systèmes.

### **I.6.3 Panneaux solaires à cellules amorphes**

La base de ces panneaux est de déposer plusieurs couches de matériau photovoltaïque sur une base. Selon le matériau utilisé, on peut trouver des panneaux en couches minces de silicium

amorphe (a-Si), de telluride de cadmium (CdTe), de cuivre, d'indium, de gallium et de sélénium (GIS / CIGS) ou des cellules photovoltaïques organiques (OPC).

Selon le type, un module en couche mince a une efficacité de 7-13%. Parce qu'ils ont un grand potentiel d'utilisation domestique, ils sont de plus en plus demandés.

## I.7 Générateur photovoltaïque

Un générateur PV est défini par tout l'assemblage des cellules solaires, des connexions, des pièces de protection et des supports, etc. Le terme « générateur PV » peut être donc représenté par n'importe quel dispositif PV (cellules solaires, modules, panneaux,...).

### I.7.1 Module photovoltaïque

Un module photovoltaïque est composé de plusieurs cellules solaires reliées les unes aux autres (figure I.4). Généralement, chaque cellule photovoltaïque ne peut pas produire qu'une tension continue nominale de 0,5V à 0,6V en circuit ouvert et une puissance nominale voisine de 1.5Wc. Pour satisfaire les besoins des charges couramment utilisées, il faut envisager un assemblage de plusieurs cellules photovoltaïques soit en série soit en parallèle. Cet assemblage forme ce qu'on appelle « module solaire » ou « module photovoltaïque ».

Le dimensionnement du système solaire détermine le nombre de modules à mettre soit en parallèle afin d'accroître le courant en conservant la tension, soit en série afin d'augmenter la tension en conservant le courant, et pour avoir une satisfaction en courant et en tension, un groupement mixte « série- parallèle » est obligatoire.

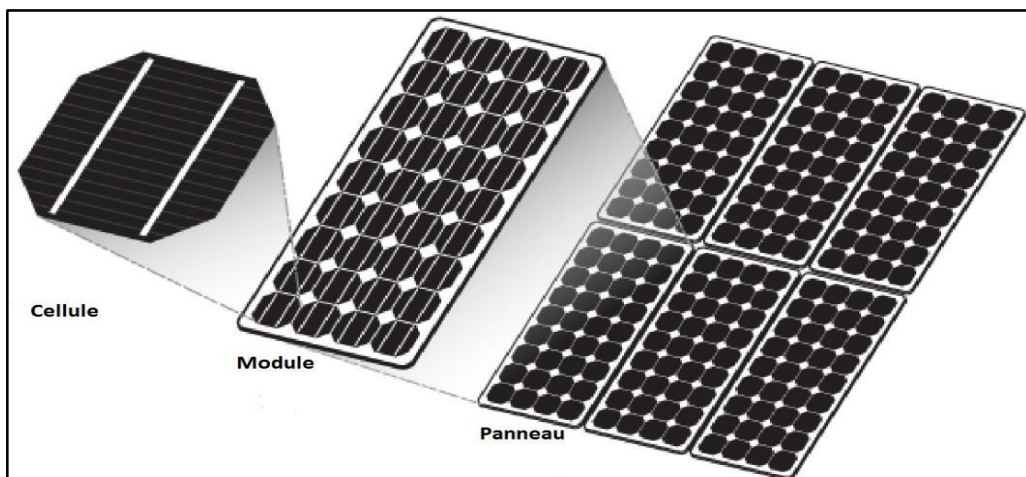
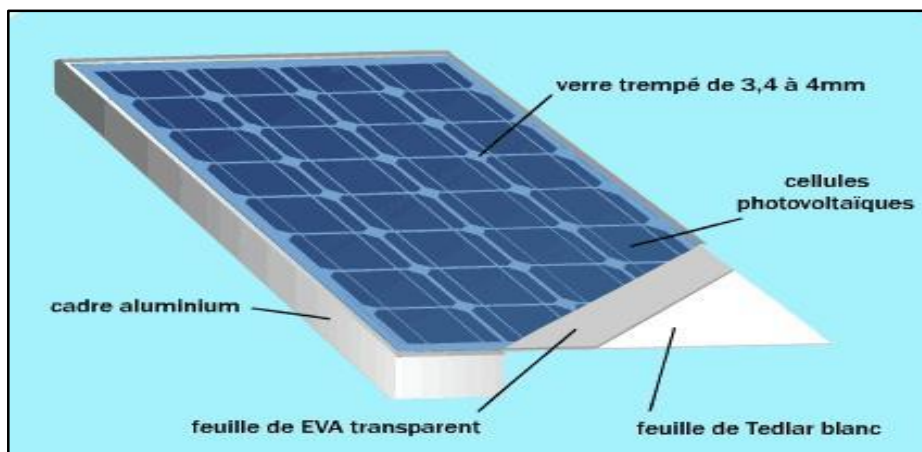


Figure I.4 : Constitution d'un générateur photovoltaïque.

### I.7.2 Composition d'un module solaire photovoltaïque

Un module solaire photovoltaïque est composé généralement de cinq éléments (figure I.5) :

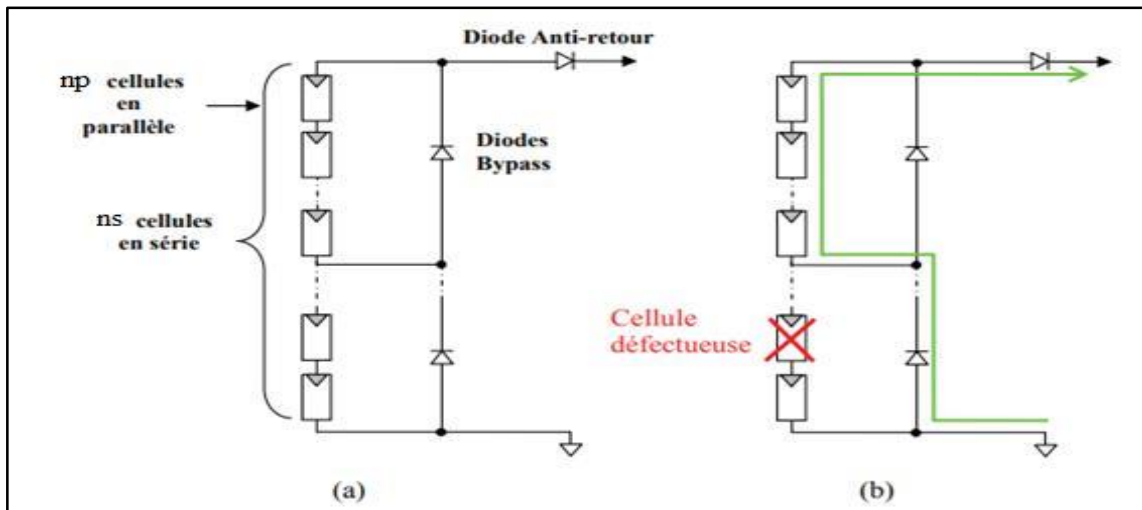
- Cadre aluminium : l'aluminium est recyclable à l'infini.
- Verre trempé : est un matériau recyclable à 100 %, utilisé pour la protection du module et il représente 75% de la composition du panneau.
- Feuille de l'EVA (EVA : Ethylène-Acétate de Vinyle) transparent : pour résister aux intempéries et à l'humidité.
- Cellules photovoltaïque : c'est le composant électronique qui produit de l'électricité principalement à base de Silicium, elle est réutilisable jusqu'à 4 fois.
- Feuille de Tedlar blanc : pour plus de résistance mécanique des grands modules.



**Figure I.5 :** Composition d'un module solaire photovoltaïque.

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en séries et en panneaux en parallèles. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles (figure I.6).

- **La protection par diodes parallèles (diode by-pass) :** a pour but de protéger une série de cellules dans le cas d'un déséquilibre lié à la défektivité d'une ou plusieurs des cellules de cette série ou d'un ombrage sur certaines cellules.
- **La diode série (diode anti-retour) :** placée entre le module et la batterie, empêche pendant l'obscurité le retour de courant vers le module.

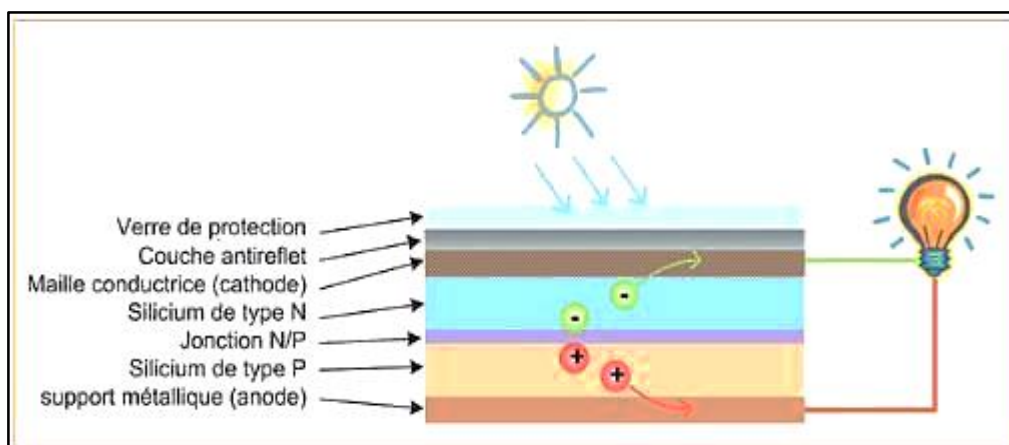


**Figure I.6 :** (a) Schéma d'un panneau solaire photovoltaïque avec diodes de protections.

(b) Défaillance d'une des cellules du module PV et activation de la diode by-pass et mise en évidence du courant de circulation.

### I.7.3 Cellule photovoltaïque

La cellule PV (photopile) est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériau semi-conducteur et réaliser à partir de deux couches, une dopée P (Positif, dopée au Bore par exemple), et l'autre dopée N (Négatif, dopée au Phosphore par exemple). Créant ainsi une jonction PN, et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Une cellule est constituée d'un empilage de couches : Verre de protection, couche antireflet, maille conductrice (cathode), Silicium dopé N, jonction NP, Silicium dopé P et un support métallique (anode), comme illustré par la figure (I.7)



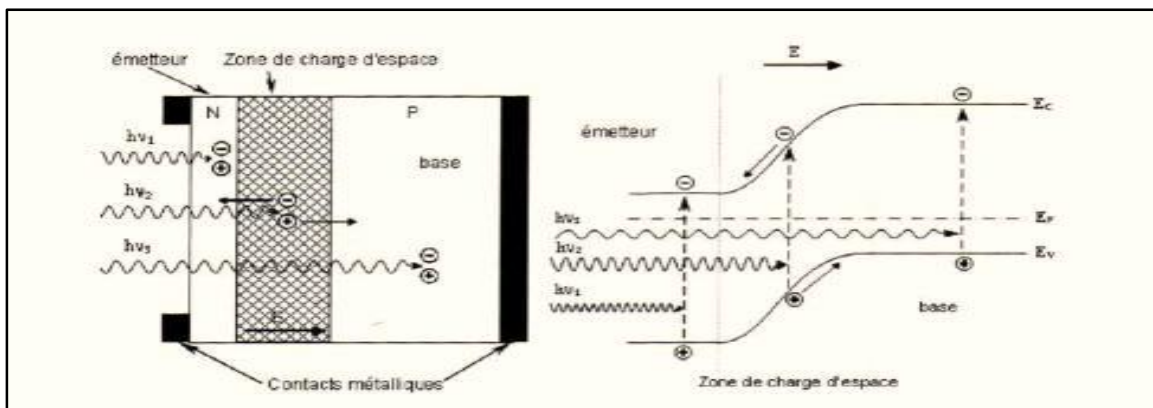
**Figure I.7 :** Constituants d'une cellule solaire.

### I.7.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ;
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur ;
- Collecte des particules générées dans le dispositif ;

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électron/trou créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction PN. D'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure (I.8).



**Figure I.8** : Structure (gauche) et diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque.

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones N et P et dans la zone de charge d'espace. Les photo-porteurs auront un comportement différent suivant la région :

- Dans la zone N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace, sont envoyés par le champ électrique dans la zone P (pour les trous) ou dans la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura un photo-courant de diffusion.

- Dans la zone de charge d'espace, les paires électron/trou créés par les photons incidents sont dissociés par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P. On aura un photo-courant de génération.

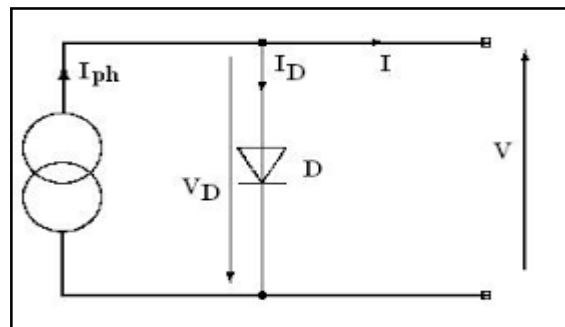
Ces deux contributions ensemble ont pour résultat de donner un photo-courant total  $I_{ph}$ . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [7].

### I.7.5 Cellule solaire idéale

Si la caractéristique de la jonction est de la forme  $= I_s(e^{\frac{qv}{kt}} - 1)$ .

On peut admettre qu'en présence de lumière il y a apparition d'une photo-courant supplémentaire,  $I_{ph}$  dont le sens est opposé au courant direct. En branchant un circuit extérieur sur la cellule claire, on recueille ce courant. Le courant sous lumière vaut [8] :

$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{qv}{kT}} - 1 \right) \quad (I.1)$$



**Figure I.9 :** Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.

Et la tension  $V$  est donnée par :

$$V = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{I_{ph} + I_s}{I_s} - I \right) \quad (I.2)$$

### 1.7.6 Cellule solaire a deux diodes

Dans une cellule solaire réelle, le phénomène de recombinaison représente des pertes importantes ; lesquelles ne peuvent pas être convenablement modélisées en utilisant le modèle à une diode.

La considération de ces pertes conduit à introduire une diode supplémentaire [9.10].

Le modèle à une diode est facile à mettre en œuvre, mais moins précis que le modèle à deux diodes.

La méthode itérative décrite dans [11] est la meilleure. Cependant, sa précision se détériore pour des faibles irradiations, notamment aux voisinages de la tension de circuit ouvert [9].

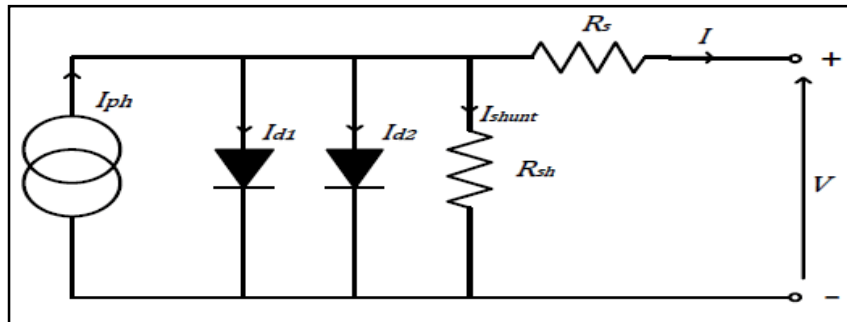


Figure 1.10 : Schéma électrique équivalent de la cellule photovoltaïque Modèle à deux diodes.

**I.7.7 Cellule solaire réelle**

La figure (I .11) présente le schéma équivalent d’une cellule solaire réelle, = où deux résistances parasites sont introduits dans ce schéma, elles vont influencer la caractéristique **I(V)** de la cellule.

La premier est la résistance série **R<sub>s</sub>** cette résistance est liée de l’impédance des électrodes et de la base, il en résulte que la tension **V** aux bornes de la cellule est différente de la tension aux bornes de la jonction.

La deuxième est la résistance shunt **R<sub>sh</sub>** qui correspondre aux pertes dans la surface et pertes dues aux défauts dans le matériau, il en résulte qu’une partie du courant **I<sub>ph</sub>** sera drivée par cette résistance et il ne pourra être délivré à la charge. L’équation de la caractéristique **I(V)** de la cellule photovoltaïque compte tenu des résistances **R<sub>s</sub>** et **I<sub>sh</sub>** s’écrit donc [12] :

$$I(V) = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{I.3}$$

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{q(V+R_s I)}{kT}} - 1 \right) - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \tag{I.4}$$

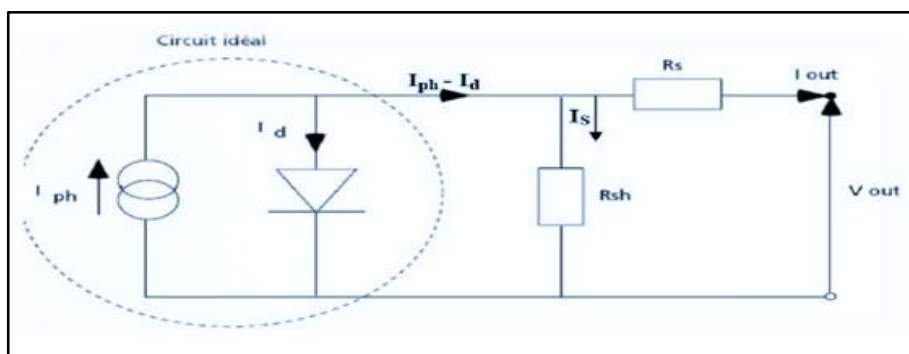


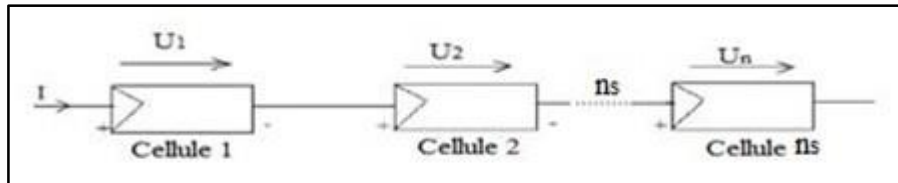
Figure I.11 : Schéma équivalent d’une cellule photovoltaïque réelle.

**I.8 Association des cellules photovoltaïques**

Il existe trois types d’association des cellules PV :

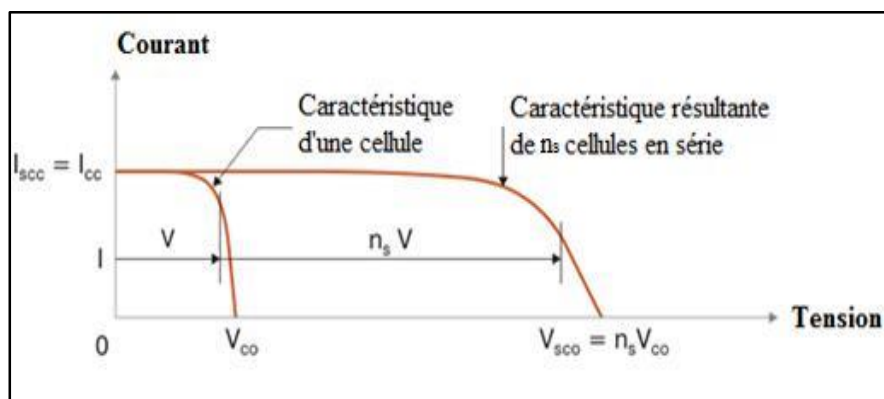
### ▪ Association en série :

L'association de  $n_s$  cellules en série (figure I.12) permet d'augmenter la tension (la somme des tensions) tout en conservant le courant d'une cellule.



**Figure I.12 :** Association de  $n_s$  cellules PV en série.

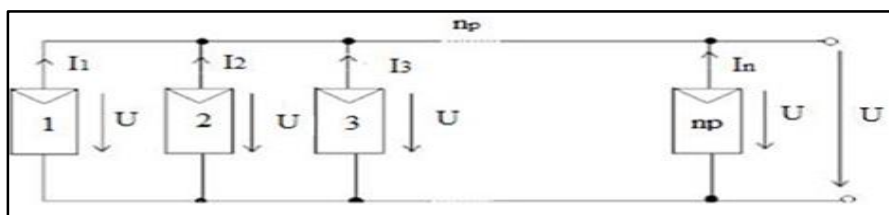
La caractéristique  $I(V)$  du module solaire dans ce cas a la forme suivante (figure I.13) :



**Figure I.13 :** Caractéristique courant tension de  $n_s$  cellule en série.

### ▪ Association en parallèle :

L'association de  $n_p$  cellules en parallèle (figure I.14) permet d'augmenter le courant (la somme des courants) tout en conservant la tension d'une cellule.



**Figure I.14 :** Association de  $n_p$  cellules en parallèle.

La caractéristique  $I(V)$  du module solaire dans ce cas a la forme suivante (figure I.15)

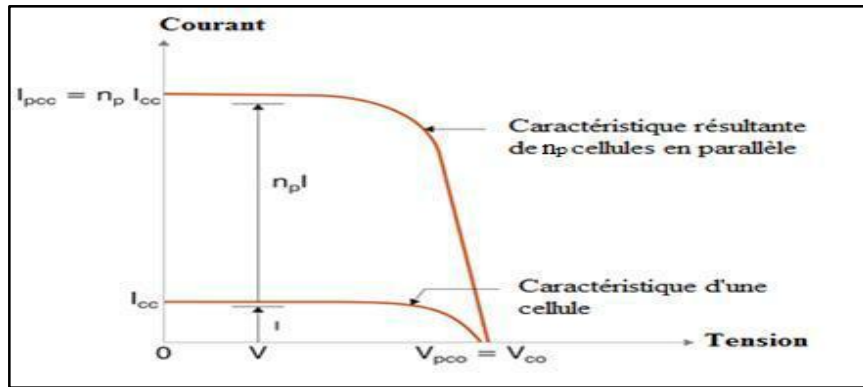


Figure I.15 : Caractéristique courant tension de  $n_p$  cellule en parallèle.

▪ Association mixte (série-parallèle) :

L'association mixte (figure I.16) est basée sur le branchement des cellules en série et en parallèle, qui permet d'augmenter le courant et la tension en même temps.

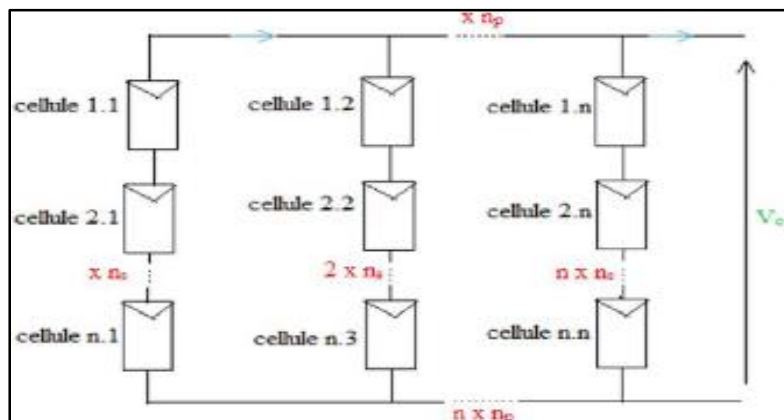


Figure I.16 : Association des cellules mixtes (série-parallèle).

La caractéristique  $I(V)$  d'un module solaire peut être considérée comme le résultat d'une association d'un réseau de  $(n_s * n_p)$  cellules en série/parallèle (figure I.17).

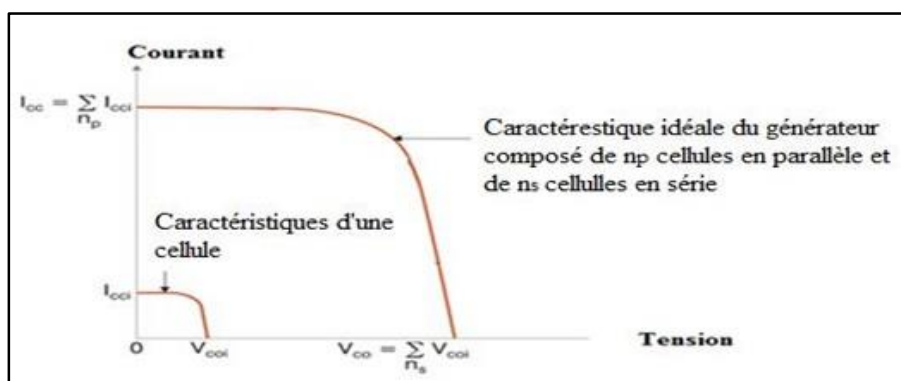


Figure I.17 : Caractéristique d'un assemblage série/parallèle de  $n_s$  et  $n_p$  cellules.

## I. 9 Les différentes caractéristiques d'une cellule solaire

### I.9.1 Courant de court-circuit $I_{sc}$

Le courant de court-circuit est le courant débité par la cellule sous éclairement en court-circuit la sortie.

C'est-à-dire que  $I_{sc} = (V=0)$  Pour une cellule solaire idéale le courant de court-circuit est égal au courant photovoltaïque  $I_{ph}$ .

### I.9.2 Tension de circuit ouvert $V_{co}$

Pour une cellule solaire idéale la tension de circuit ouvert est donné [13] ;

$$V_{CO} = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \approx V_{CO} = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (I.5)$$

### I.9.3 Puissance maximale $P_m$

La puissance débitée par une cellule solaire est maximum quand le produit [14]  $V.I$  est maximum. Si  $V_m$  et  $I_m$  sont la tension et le courant pour les quels on a ce maximum, la puissance maximale est la surface du plus grand rectangle de côté  $V_m$  et  $I_m$  qu'on peut inscrire sous la courbe  $I(V)$  (figure.I.18).

$$P_m = I_m V_m \quad (I.6)$$

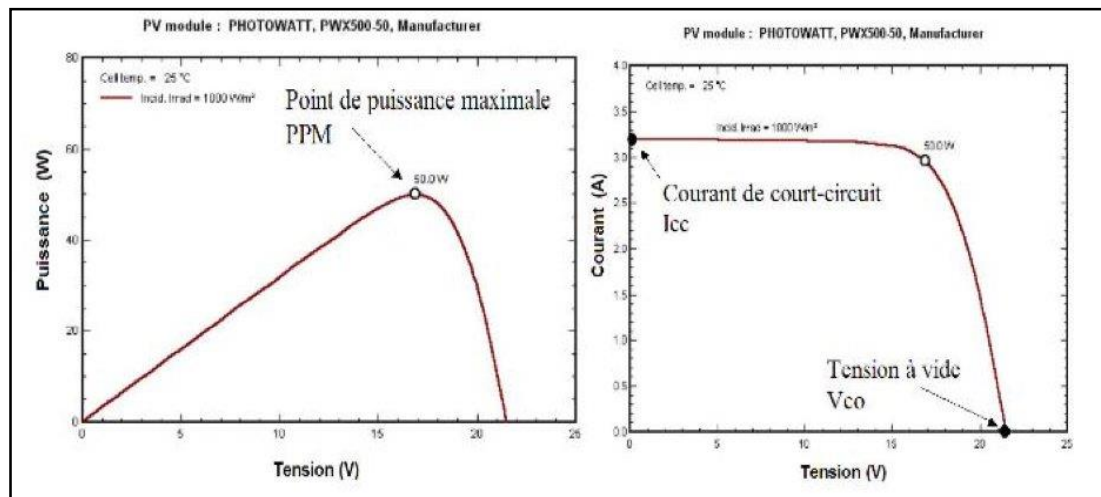


Figure I.18 : Les courbes  $I = f (V)$ .

### I.9.4 Facteur de forme FF

Le point de fonctionnement usuel d'une cellule solaire est un point de la courbe  $I(V)$  qui correspond à une puissance maximale dissipée par la charge. On appelle facteur de forme FF (Fill Factor), la quantité [15].

$$FF = \frac{P_m}{I_{sc}V_{co}} \quad (I.7)$$

### I.9.5 Rendement de conversion $\eta$

Enfin, le rendement d'une cellule photovoltaïque est donné par le rapport entre la puissance débitée au point de puissance maximale et la puissance lumineuse disponible

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} \quad (I.8)$$

Où :

$i$  est la puissance incidente du rayonnement solaire au sol.

## I.10 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

### I.10.1 Avantages

Une haute fiabilité ; les modules sont garantis pendant 25 ans par la plupart des constructeurs.

- Elle ne comporte pas de pièces mobiles, qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux ;
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt ;
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé ;
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique, car le produit final est non polluant, silencieux, peu de déchet.

### I.10.2 Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé ;
- L'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions ;
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28 %) ;
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées ;

Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système

restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

## **I.11 Conclusion**

Ce chapitre nous a permis d'explorer le principe de la conversion photovoltaïque ainsi que les différentes technologies utilisées pour y parvenir.

Des aspects aussi bien technologiques qu'électriques ont été abordés afin de mieux comprendre l'ensemble du mécanisme de conversion photovoltaïque.


Nous avons vu dans ce chapitre des notions générales sur l'énergie photovoltaïque, tous les éléments ont été introduits (cellule, module, panneau, champ PV) pour permettre une bonne compréhension du fonctionnement des systèmes PV.

Nous avons vu aussi que l'énergie PV comme toutes autres a certes des avantages mais elle a aussi des inconvénients.



# Chapitre III

---



## Les convertisseurs DC – DC

## II.1 Introduction

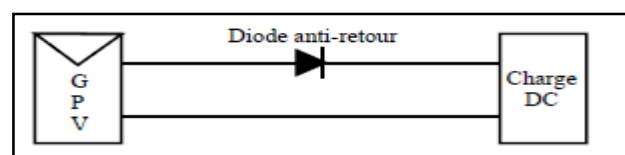
Comme exposé au premier chapitre, un GPV présente des caractéristiques I-V non linéaires et qui admettent un seul point de fonctionnement optimal dans les conditions homogènes d'éclairement et de température. Une adaptation d'impédance s'impose et cela peut se faire par un couplage direct d'une charge adaptée ou en insérant entre le GPV et la charge électrique un dispositif électronique. Ce dispositif n'est autre qu'un convertisseur statique muni d'une commande de poursuite du PPM.

Dans le but de concevoir une interface de puissance plus performante, une étude détaillée est faite sur les convertisseurs statiques DC-DC non isolés en mode de conduction continu. L'analyse porte sur le gain en courant et en tension du convertisseur ainsi que sur les contraintes sur les semi-conducteurs. Le convertisseur Boost est choisi dans cette étude grâce à sa structure simple et son rapport de transformation en tension le plus élevé par rapport aux autres topologies.

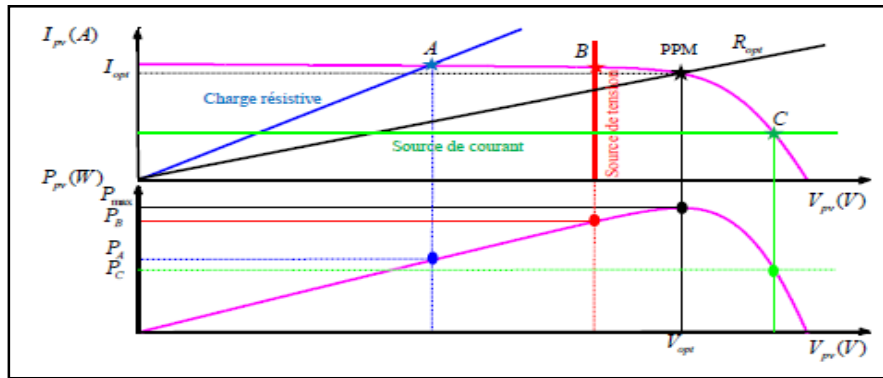
## II.2 Connexion directe générateur photovoltaïque-charge

Actuellement, beaucoup d'applications où une connexion directe entre un GPV et une charge existent encore. Cette connexion en l'absence d'électronique est simple, fiable et de faible coût. Mais, elle ne garantit pas un transfert optimal de l'énergie du GPV vers la charge.

Un autre inconvénient c'est que la connexion directe du GPV n'est pas valable sur une charge AC car le GPV fournit un courant continu. Pour la connexion d'un GPV à une charge alternative, un étage d'adaptation de type onduleur est nécessaire [26]. Cette configuration est illustrée à la figure 2.1, la diode anti-retour placée entre le GPV et la charge sert de protection. En effet, si cette charge était une batterie, lorsque le module n'est pas éclairé, celui-ci pourrait fonctionner en tant que récepteur. La batterie pourrait donc se décharger sur le GPV et en plus l'endommager.



**Figure II.1 :** Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour.



**Figure II.2 :** Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe pour différentes charges DC.

La charge DC peut être : une charge purement résistive, une charge de type source de tension ou une charge de type source de courant. Sur la figure (II.2), les caractéristiques I-V et P-V d'un GPV sont représentées ainsi que les caractéristiques I-V des trois types de charges. Les points de fonctionnement A, B, C sont les points d'intersection entre la caractéristique I-V du GPV et celles des trois types de charge. Le fonctionnement optimal s'obtient pour le PPM qui correspond à la tension optimale  $V_{opt}$  et au courant optimal  $I_{opt}$ . Pour ces trois points, les puissances fournies par le générateur sont respectivement  $P_A$ ,  $P_B$ ,  $P_C$ .

Ces puissances sont toutes des valeurs de puissances inférieures à la puissance maximale disponible  $P_{max}$ .

Donc, il faut remédier à ce problème par l'ajout d'un étage d'adaptation.

### II.3 Connexion indirecte GPV-charge par le biais d'un étage d'adaptation

Lors de la construction d'un système PV, l'une des préoccupations majeures de conception est de trouver l'adaptation optimale entre les caractéristiques électriques des modules solaires, batteries et charge électrique.

Une telle adaptation peut être aisément obtenue si la courbe de charge pouvait suivre les points du réseau de caractéristiques I-V des modules PV pour lesquels la puissance délivrée par ces modules devient maximum.

La puissance maximale produite par les modules PV varie en fonction des fluctuations du rayonnement solaire. Par conséquent, la charge devra être reliée aux modules PV par le biais d'un convertisseur MPPT qui puisse suivre les PPM.

On constate que la pente en tout point de la caractéristique I-V du générateur est négative.

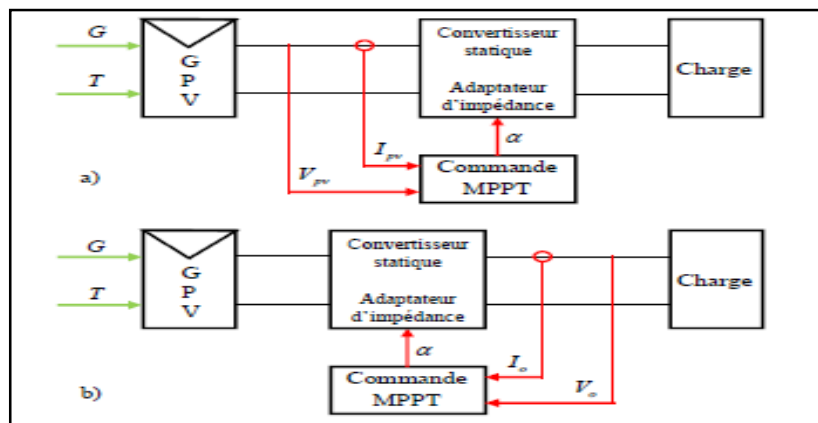
Autrement dit, l'impédance différentielle  $Z_d = \frac{dv}{di}$  du GPV est toujours négative de part et d'autre du PPM. En ce dernier point de fonctionnement optimal, où la pente de la caractéristique P-V devient nulle, cette impédance vaut :

$$Z_{dopt} = \frac{dv}{di} = -\frac{V_{opt}}{I_{opt}} \quad (\text{II.1})$$

Alors, seule une charge dont la caractéristique passe par le point  $(I_{opt}, V_{opt})$  permet d'extraire la puissance optimale. La valeur de cette charge vaut alors :

$$R_{OPT} = \frac{V_{OPT}}{I_{OPT}} = f(G, I) \quad (\text{II.2})$$

L'utilisation optimale consiste alors à ce que la charge conserve à chaque instant sa valeur optimale  $R_{opt}$  lorsque les conditions varient. Dans le cas général, il y a peu de chance pour que la charge réelle suive naturellement ces variations. Il y a donc lieu d'effectuer en permanence l'adaptation d'impédance nécessaire en insérant, entre le générateur et la charge électrique, un dispositif adaptateur d'impédance comme illustré dans la figure (II.3). Il est présenté deux cas de figures (a) et (b), dans la première, la commande MPPT utilise les paramètres d'entrées [3, 27, 28], et dans la seconde, la poursuite du PPM est basée sur les paramètres de sorties. La dernière structure est généralement conçu pour des systèmes ayant comme charge une batterie [29, 30].



**Figure II.3 :** Principe de l'adaptation d'impédance par MPPT

a) En utilisant les paramètres d'entrés ;

b) En utilisant les paramètres de sorties.

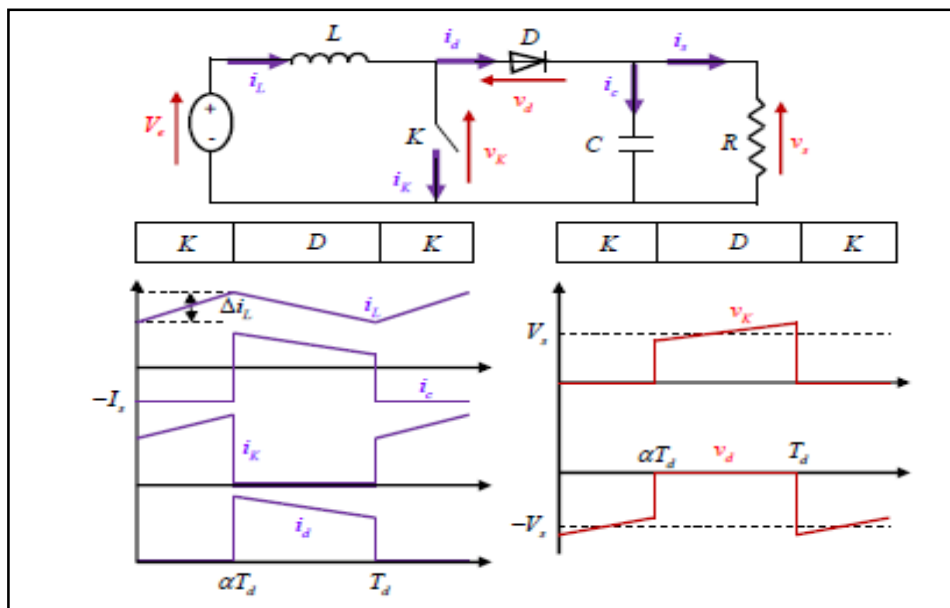
Ces adaptateurs d'impédance sont des convertisseurs DC-DC avec les différentes topologies possibles. On s'intéresse juste aux hacheurs sans isolation galvanique qui sont dépourvus de transformateur tels que : hacheur dévolteur ou abaisseur de tension (Buck), hacheur survolteur ou élévateur de tension (Boost), hacheur abaisseur élévateur de tension (Buck-Boost, Cuk, Sepic).

## II.4 Etages d'adaptations

### II.4.1 Convertisseur Boost

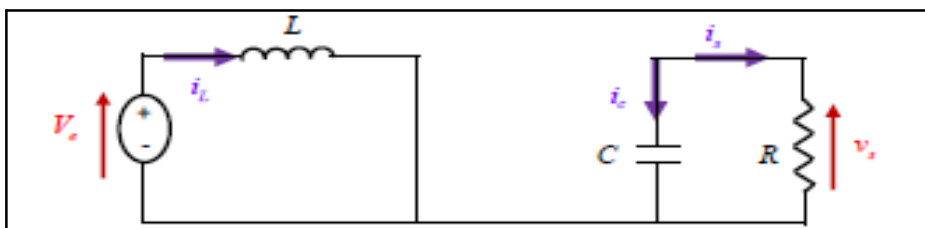
On considère un convertisseur DC-DC de type Boost. Il est composé essentiellement d'un interrupteur  $K$  (comme IGBT ou MOSFET) et d'une diode  $D$ . L'interrupteur  $K$  est commandé par un signal à modulation de largeur d'impulsion (MLI) de période de découpage fixe  $T_d$  et de rapport cyclique variable  $\alpha$ .

La conduction des deux interrupteurs est complémentaire, quand  $K$  est fermé  $D$  est ouvert ; et quand  $K$  est ouvert,  $D$  est fermé. Durant chaque période,  $K$  est fermé de l'instant 0 à  $\alpha T_d$  et ouvert de  $\alpha T_d$  à  $T_d$ . On distingue deux modes de fonctionnement selon que le courant dans l'inductance s'annule (conduction discontinue) ou pas (conduction continue). On s'intéresse au second cas qui est le plus important. La figure (II.4) donne le schéma de principe de ce convertisseur, les intervalles de conduction de l'interrupteur et de la diode ainsi que les formes d'ondes de ses courants (à gauche) et tensions (à droite).



**Figure II.4 :** Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost.

Lorsque l'interrupteur  $K$  est fermé ( $0 < t < \alpha T_d$ ) le circuit du convertisseur devient (Figure II.5) :



**Figure II.5 :** Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé.

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e \quad (\text{II.3})$$

$$i_L = I_{min} + \frac{V_e}{L} t \quad (\text{II.4})$$

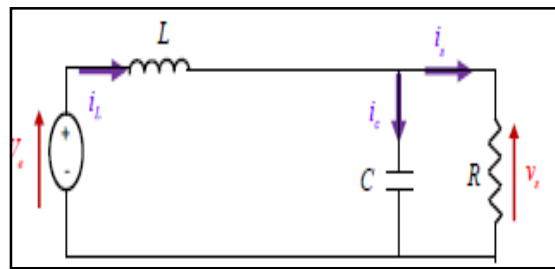
Avec :

$I_{min}$  : la valeur minimale du courant dans l'inductance.

À l'instant  $t = \alpha T_d$ , le courant dans l'inductance atteint sa valeur maximale  $I_{max}$

$$I_{max} = I_{min} + \frac{V_e}{L} \alpha T_d \quad (\text{II.5})$$

Lorsque l'interrupteur  $K$  est ouvert ( $\alpha T_d < t < T_d$ ), le circuit du convertisseur sera comme montré dans la Figure (II.6).



**Figure II.6 :** Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert.

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e - V_s \quad (\text{II.6})$$

$$i_L = I_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha T_d) \quad (\text{II.7})$$

À l'instant  $t = T_d$ , le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale  $I_{min}$

$$I_{min} = I_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} (1 - \alpha) T_d \quad (\text{II.8})$$

Soit  $\Delta i_L = I_{max} - i_{min}$  l'ondulation du courant dans l'inductance.

En faisant l'égalité des valeurs de l'ondulation du courant tirées des équations (II.5) et (II.8), on peut déduire la valeur moyenne de la tension de sortie  $V_s$  :

$$V_s = \frac{1}{1 - \alpha} V_e \quad (\text{II.9})$$

On remarque qu'on peut contrôler la tension de sortie du convertisseur en faisant varier sa tension d'entrée ou son rapport cyclique. Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1, alors le montage fonctionne en élévateur de tension.

En appliquant le principe de conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur, on peut établir la valeur moyenne du courant dans l'inductance en fonction du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique :

$$I_l = \frac{1}{1-\alpha} I_s \quad (\text{II.10})$$

De l'expression (II.5), on exprime l'ondulation de courant dans l'inductance :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_e}{L} T_d = \frac{\alpha V_e}{L f} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

$f$ : la fréquence de découpage.

Pendant la première séquence de fonctionnement ( $0 < t < \alpha T_d$ ), seul le condensateur donne de l'énergie à la charge, on peut écrire :

$$C \frac{dV_s}{dt} = -i_s \quad (\text{II.12})$$

Alors l'ondulation de la tension de sortie peut être exprimée par :

$$\Delta V_s = \frac{\alpha I_s}{C \cdot f} = \frac{\alpha V_e}{(1-\alpha) R C f} \quad (\text{II.13})$$

D'après l'analyse des deux séquences de fonctionnement, on constate que les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes en courant et en tension.

$$I_{k.max} = i_{d.max} = I_{max} = I_l + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (\text{II.14})$$

$$V_{k.max} = |V_{d.max}| = V_{s.max} = V_s + \frac{\Delta V_s}{2} = \frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (\text{II.15})$$

## II.4.2 Convertisseur Buck

On procède de la même manière dans l'étude du convertisseur Buck. La figure (II.7) montre la structure et les formes d'ondes du courant et de la tension de ce convertisseur qui est caractérisé par la disposition en série de l'interrupteur avec la source.

La tension de sortie en valeur moyenne, l'ondulation de courant dans l'inductance et l'ondulation de la tension de sortie sont donnés respectivement par :

$$V_s = \alpha V_e \quad (\text{II.16})$$

$$\Delta i_l = \frac{\alpha(1-\alpha) \cdot V_e}{L \cdot f} \quad (\text{II.17})$$

$$\Delta V_s = \frac{\Delta i_l}{8 C f} = \frac{\alpha(1-\alpha) \cdot V_e}{8 C L f^2} \quad (\text{II.18})$$

Le convertisseur est donc abaisseur en tension.

Le courant moyen traversant l'inductance est égal au courant moyen dans la charge :

$$I_L = I_s \quad (1.19)$$

Les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes.

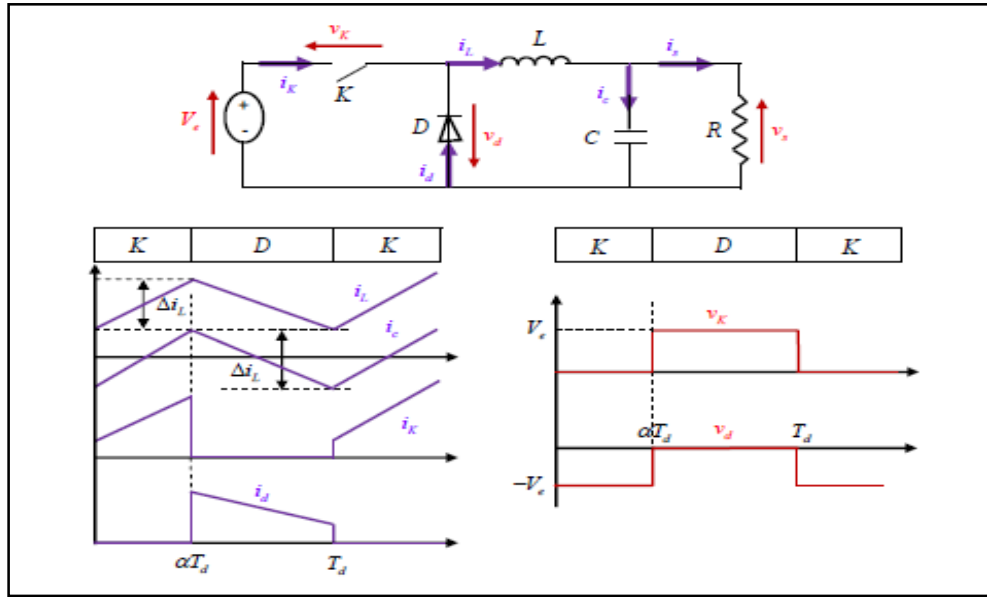


Figure II.7 : Formes d’ondes des courants et tensions du convertisseur Buck.

En tension, on a :

$$V_{k.max} = |V_{d.max}| = V_e \tag{II.20}$$

Et en courant :

$$i_{k.max} = i_{d.max} = i_{L.max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \tag{II.21}$$

### II.4.3 Convertisseur Buck-Boost

La topologie et les formes d’ondes de courant et de tension obtenues de ce convertisseur sont présentées à la figure (II.8). La tension de sortie moyenne est donnée par :

$$V_s = \frac{\alpha V_e}{1-\alpha} \tag{II.22}$$

L’ondulation de courant dans l’inductance est donnée par :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha V_e}{L f} \tag{II.23}$$

Et l’ondulation de la tension de sortie :

$$\Delta V_s = \frac{\alpha I_s}{C.f} = \frac{\alpha^2 V_e}{(1-\alpha)RCf} \tag{II.24}$$

La tension de sortie du convertisseur Buck-Boost est négative par rapport à la tension d’entrée. Son amplitude peut être supérieure ou inférieure à celle de la tension d’entrée selon la valeur du rapport cyclique. C’est un abaisseur-élevateur-inverseur en tension. Le courant moyen traversant l’inductance est donné par :

$$I_L = \frac{I_s}{1-\alpha} \tag{II.25}$$

Les contraintes en tension et en courant sur l’interrupteur commandé et la diode sont les mêmes

$$V_{k.max} = |V_{d.max}| = V_{s.max} + V_e = \frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} \tag{II.26}$$

$$i_{k.max} = i_{d.max} = i_{L.max} = \frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta i_L}{2} \tag{II.27}$$

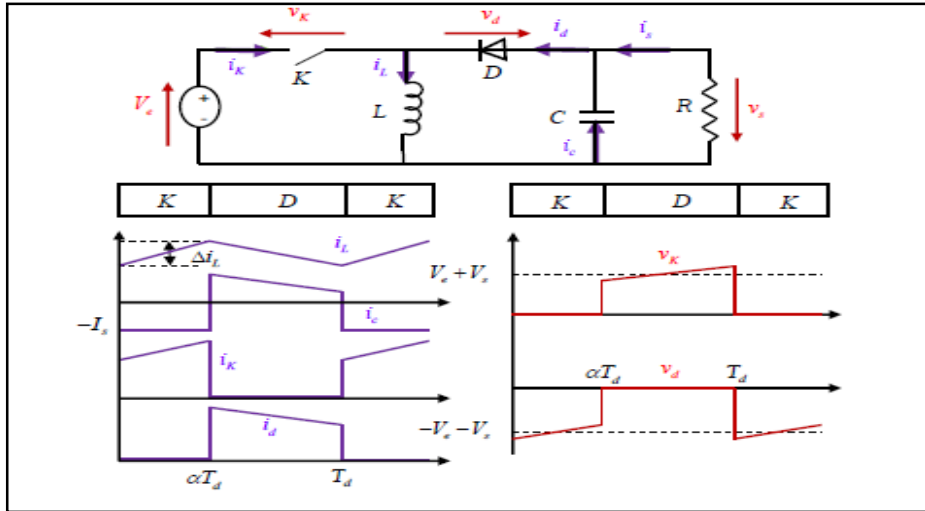


Figure II.8 : Formes d’ondes des courants et tensions du convertisseur Buck-Boost.

### II.4.4 Convertisseur Cuk

La figure (II.9) illustre le circuit électrique du convertisseur Cuk et ses formes d’ondes de courant et de tension. La tension de sortie moyenne est donnée par :

$$V_s = \frac{\alpha V_e}{1-\alpha} \tag{II.28}$$

On remarque que le rapport de transformation est similaire à celui du Buck-Boost. De même, on peut dire que c’est un montage abaisseur-élevateur-inverseur en tension.

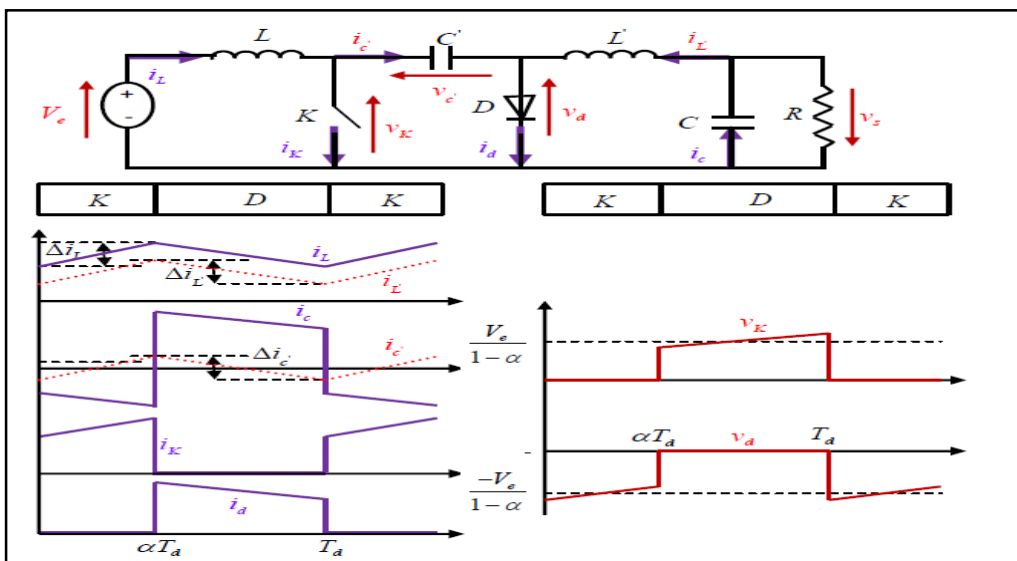


Figure II.9 : Formes d’ondes des courants et tensions du convertisseur.

Cuk L'expression reliant les courants moyens est :

$$I_L = \left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right) \hat{I}_L = \left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right) I_S \quad (\text{II.29})$$

Les ondulations de courant dans les deux inductances :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_e}{L_f} \quad (\text{II.30})$$

$$\Delta i_{\hat{L}} = \frac{\alpha V_e}{\hat{L}f} \quad (\text{II.31})$$

L'ondulation de la tension de sortie :

$$\Delta V_S = \frac{\Delta i_{\hat{L}}}{8Cf} = \frac{\alpha V_e}{8LCf^2} \quad (\text{II.32})$$

L'ondulation de la tension aux bornes de  $C'$

$$\Delta V_{C'} = \frac{(1-\alpha)I_L}{C'f} = \frac{\alpha^2 V_e}{(1-\alpha)RC'f} \quad (\text{II.33})$$

Les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont :

$$V_{k.max} = |V_{d.max}| = V_{C'.max} = \frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_{C'}}{2} \quad (\text{II.34})$$

$$i_{k.max} = i_{d.max} = I_L + I_{\hat{L}} + \frac{\Delta i_L + \Delta i_{\hat{L}}}{2} \quad (\text{II.35})$$

## II.4.5 Convertisseur Sepic

De la même façon, on commence par donner le circuit de principe du convertisseur Sepic et ses formes d'ondes de courant et de tension obtenues en mode de conduction continu à la figure II.10. Les caractéristiques de ce convertisseur sont identiques à celles du Cuk, mais il n'est pas inverseur en tension.

La tension de sortie moyenne est donnée par :

$$V_S = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_e \quad (\text{II.36})$$

L'expression reliant les valeurs moyennes des courants est :

$$I_L = \left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right) \hat{I}_L = \left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right) I_S \quad (\text{II.37})$$

Les ondulations de courant dans les deux inductances :

$$\Delta i_L = \frac{\Delta V_e}{L_f} \quad (\text{II.38})$$

$$\Delta i_{\hat{L}} = \frac{\alpha V_e}{\hat{L}f} \quad (\text{II.39})$$

L'ondulation de la tension de sortie :

$$\Delta V_S = \frac{\alpha^2}{(1-\alpha)} * \frac{V_e}{RCf} \quad (\text{II.40})$$

L'ondulation de la tension aux bornes de  $C'$

$$\Delta V_{C'} = \frac{(1-\alpha)I_L}{C'f} = \frac{\alpha^2}{(1-\alpha)} * \frac{V_e}{RC'f} \tag{II.41}$$

Les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont :

$$V_{k.max} = |V_{d.max}| = V_{c'.max} + V_{s.max} = \frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_{C'} + \Delta V_s}{2} \tag{II.42}$$

$$i_{k.max} = i_{d.max} = I_L + I_{\hat{L}} + \frac{\Delta i_L + \Delta i_{\hat{L}}}{2} \tag{II.43}$$

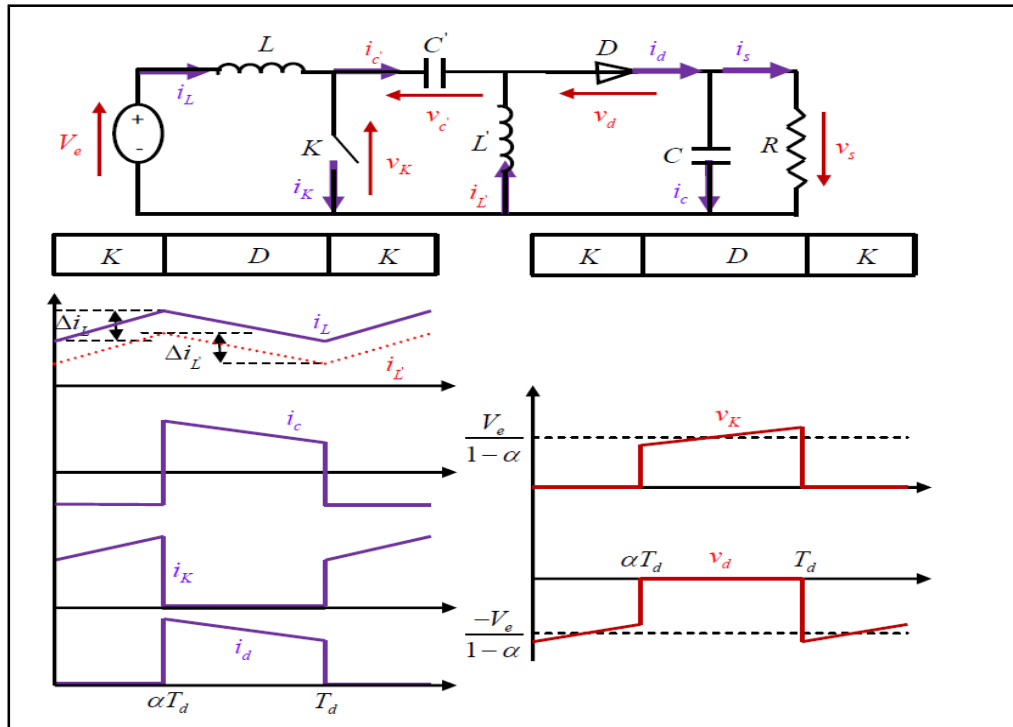
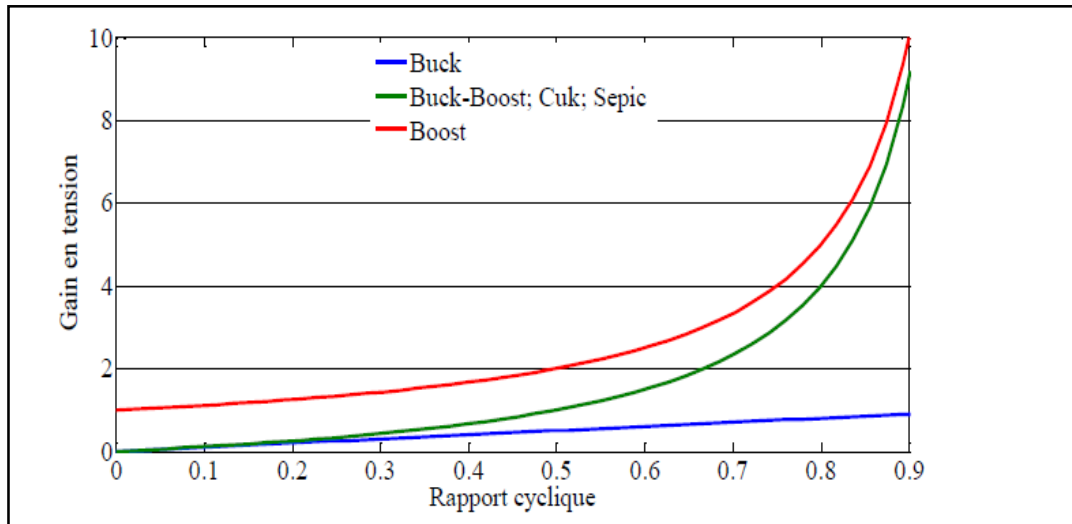


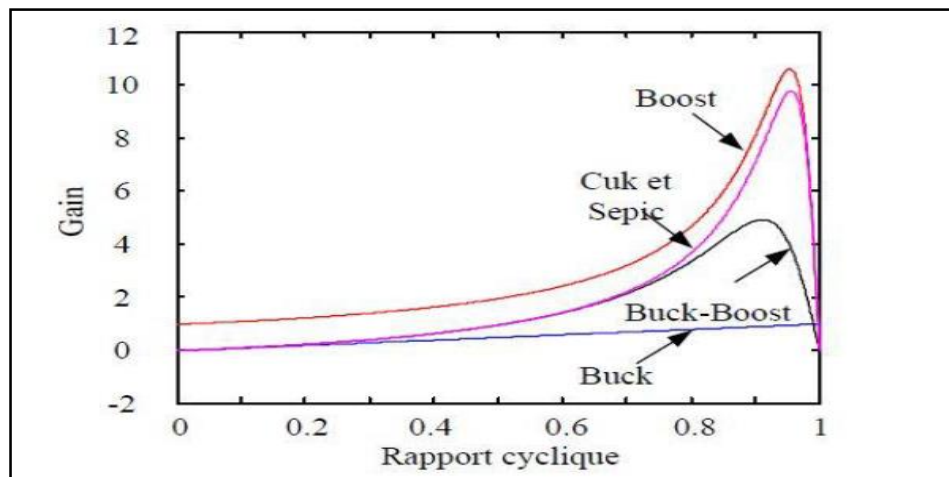
Figure II.10 : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Sepic.

### II.4.6 Récapitulatif d'analyse et choix du convertisseur

Un panneau solaire PV est un générateur d'électricité continu basse tension. Il est préférable de mettre un dispositif élévateur de tension comme étage adaptateur d'impédance entre la source et la charge. Tous les convertisseurs cités précédemment excepté le Buck, peuvent jouer ce rôle d'élévateur de tension. D'ailleurs, les structures Buck-Boost, Cuk et Sepic sont élévatrices pour un rapport cyclique supérieur à un demi. Si on regarde à la complexité des structures, le Boost est le plus simple. Les contraintes en tension et en courant sur les interrupteurs et les diodes sont presque similaires pour les différentes topologies élévatrices.



**Figure II.11 :** Evolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique des convertisseurs.



**Figure II.12 :** Evolution du gain en tension en tenant compte des éléments parasites des convertisseurs.

Si on les compare du point de vue gain en tension, aussi le Boost prend la première place comme le montre la figure (II.11) qui donne l'évolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique.

Enfin, une comparaison de ces convertisseurs est donnée par le Tableau (II.1) qui récapitule l'analyse faite auparavant sur les différents convertisseurs. On peut remarquer aussi que la diode D présente dans les convertisseurs Sepic et Boost peut jouer le rôle de protection du GPV ce qui permet de dispenser de la diode anti-retour et de faire des économies par rapport aux autres topologies. Pour mieux différencier entre les convertisseurs, HUANG a tracé le gain en tension en fonction du rapport cyclique (Figure II.12) en tenant compte des éléments parasites des convertisseurs.

Paramètres Convertisseurs	Gain en tension $\frac{V_s}{V_e}$	Contraintes en tension $V_{K,\max} =  V_{d,\max} $	Contraintes en courant $i_{K,\max} = i_{d,\max}$
Boost	$\frac{1}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2}$	$\frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta i_L}{2}$
Cuk	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_{c'}}{2}$	$I_L + I_{L'} + \frac{\Delta i_L + \Delta i_{L'}}{2}$
Sepic	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_{c'} + \Delta V_s}{2}$	$I_L + I_{L'} + \frac{\Delta i_L + \Delta i_{L'}}{2}$
Buck-Boost	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2}$	$\frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta i_L}{2}$
Buck	$\alpha$	$V_e$	$I_L + \frac{\Delta i_L}{2}$

**Tableau II.1** : Récapitulatif des caractéristiques des convertisseurs continu-continu.

## II.5 Conclusion

Les panneaux photovoltaïques sont déterminés par leurs caractéristiques courant / tension et puissance / tension, et sont fortement non linéaires.

Ces caractéristiques dépendent des conditions météorologiques et de la grosseur. Ils n'admettent qu'un seul point de fonctionnement optimal. L'analyse des différents transformateurs statiques et des différentes techniques menées dans le chapitre précédent nous a permis de choisir entre les transformateurs et de développer une nouvelle méthode pour trouver le point de puissance maximum.

Dans ce chapitre, nous avons entamé la partie la plus importante et la plus délicate de cette étude, qui est le comportement du convertisseur de puissance (DC/DC).

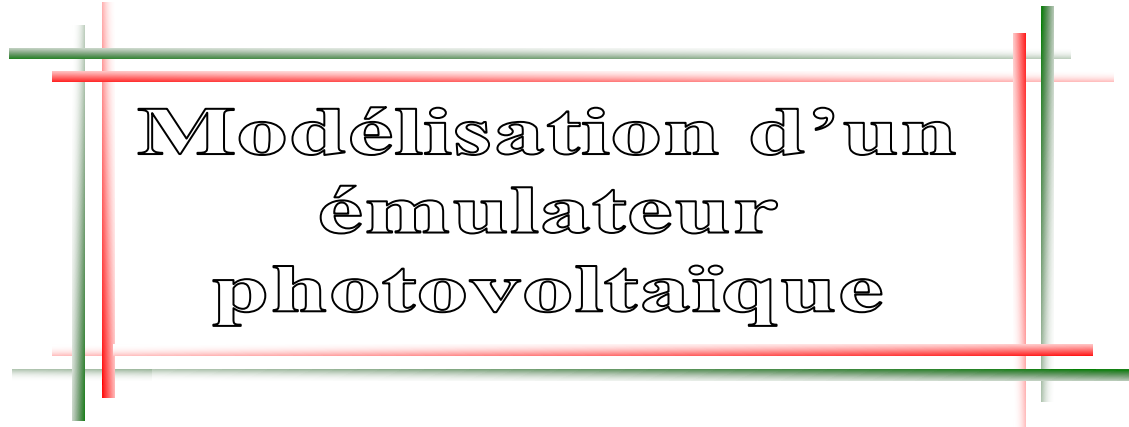
Nous avons choisis dans notre projet le convertisseur dévolteur (Buck) parce que le comportement non linéaire des convertisseurs dévolteur (Buck) est précisément analysé afin de mieux comprendre et choisir des lois de commande.

Ces dernières sont déterminées selon les exigences pour atteindre certains niveaux de performances.



# Chapitre III

---



Modélisation d'un  
émulateur  
photovoltaïque

### III.1 Introduction

La modélisation mathématique des cellules solaires est indispensable pour toute opération d'optimisation du rendement ou de diagnostic du générateur photovoltaïque.

Le module photovoltaïque est représenté généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés expérimentalement en utilisant la caractéristique courant-tension, I-V. La détermination précise de ces paramètres reste un challenge pour les chercheurs, ce qui a conduit à une grande diversification dans les modèles électriques, proposés pour représenter la cellule photovoltaïque.

Dans ce chapitre, nous avons observé que les caractéristiques d'un module solaire montrent que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température. En plus de ces dépendances, le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une valeur de la tension et du courant de fonctionnement, la position de ce point de fonctionnement dépendant à son tour de l'ensoleillement, de la température ainsi de la charge.

### III.2 Modélisation l'émulateur PV

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque.

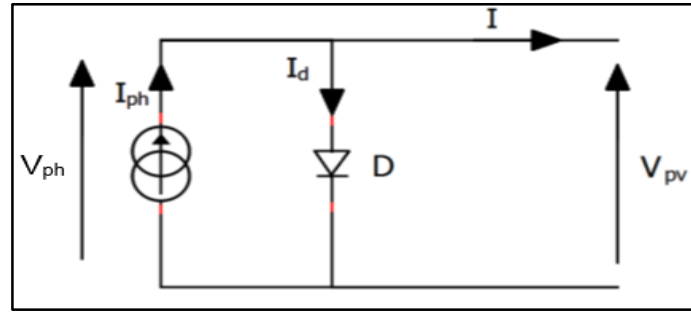
Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel. Les modules PV sont habituellement branchés en série parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur.

Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules.

Ainsi la caractéristique V-I du générateur PV est basée sur celle d'une cellule élémentaire modélisée par son circuit équivalent [23].

#### III.2.1 Modèles mathématique de la cellule PV

Le modèle à diode unique illustré sur (figure III.1), est utilisé comme équivalent PV. Ce modèle offre un bon compromis entre simplicité et précision. .



**Figure III.1 :** Modèle à diode unique d'une cellule PV.

Les tableaux pratiques sont composés de plusieurs cellules PV connectées et donc de l'inclusion de paramètres supplémentaires à la base.

L'application de la loi de Kirchhoff et de l'expression du courant de la diode mène à l'expression mathématique.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (\text{III.1})$$

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

$$I_d = I_s \left[ \exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right] \quad (\text{III.2})$$

Le courant débité équivaut à :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V_{pv}}{V_{t,n}}\right) - 1 \right] \quad (\text{III.3})$$

Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression (II-1) :

$$I_s = I_{s.ref} \cdot \left(\frac{T_c}{T_{c.ref}}\right)^3 \exp\left[\left(\frac{q \cdot E_{gap}}{n \cdot K}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_{c.ref}}\right) - \left(\frac{1}{T_c}\right)\right] \quad (\text{III.4})$$

Avec :

$I_{pv}$  : Courant fourni par la cellule PV

$I_{ph}$  : Courant photo-généré

$I_d$  : Courant traversant la diode

$I_s$  : Courant de saturation de la diode dépendant de la température

$V_{ph}$  : Tension délivrée par la cellule PV

$V_{pv}$  : tension délivrée par la cellule PV

K : est la constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/K)

q : est la charge de l'électron ( $q=1,6 \times 10^{-19}$  C) et T (en Kelvin) est la température du module

$I_{s.ref}$  : Le courant photonique sous condition de référence

$T_{c.ref}$ : La température de cellule, réelle et à la condition de référence

Le courant photovoltaïque de la cellule est calculé à partir de :

$$I_{pv} = (I_{pv,n} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (\text{III.5})$$

Et le courant de fuite de la diode est calculé à partir de :

$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + K_I \Delta T}{\exp\left(\frac{(V_{oc,n} + K_V \Delta T)}{aV_t}\right) - 1} \quad (\text{III.6})$$

Où :

$I_{pv,n}$  : Est le courant généré par la lumière à l'état nominal (généralement 25°C et 1000 W / m<sup>2</sup>)

$T_n$  : Est la température nominale

$G$  : Est l'irradiance à la surface de l'appareil (W / m<sup>2</sup>)

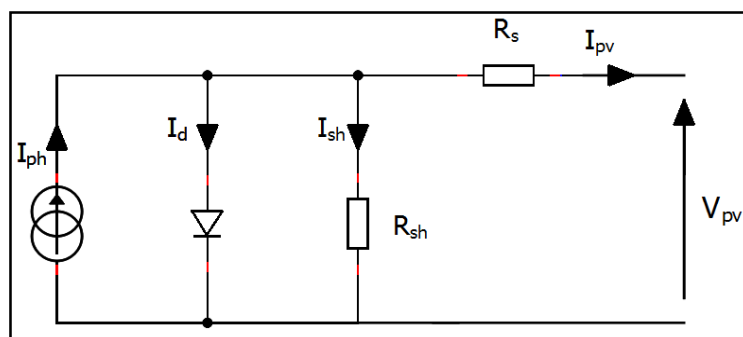
$G_n$  : Est irradiance nominale (W / m<sup>2</sup>)

$K_I$  : Est le coefficient de température du courant de court-circuit

### III.2.2 Modèle à une seule diode

La cellule photovoltaïque est représentée par un circuit équivalent contenant une source de courant idéale qui modélise la conversion du rayonnement solaire en énergie électrique, branchée avec une diode qui représente les propriétés physiques des semi-conducteurs des cellules et deux résistances (shunt et série).

La résistance parallèle prend compte des effets, tels que le courant de fuite par les bords de la cellule, elle est réduite par la pénétration des impuretés métallique dans la jonction (surtout si cette pénétration est profonde) et la résistance série est due à la contribution des résistances de bas et de la jonction et des contacts face avant et arrière [24].



**Figure III.2** : Schéma équivalent d'un modèle à une diode (L5p) de la cellule.

L'équation reliant le courant délivré par une cellule PV est donnée par la loi de Kirchhoff, tel que :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

La photo courant  $I_{ph}$  dépend de l'éclairement  $G$  et de la température ambiante de la cellule  $T_c$ , il est donnée par :

$$I_{ph} = I_{cc} + K_1(T_c - T_{ref}). G \quad (\text{III.8})$$

Où :

$I_{cc}$  : Le courant de court-circuit à 25°C et 1000W/m<sup>2</sup>

$K_1$  : Le coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule

$G$  : L'éclairement solaire, exprimé en W/m<sup>2</sup>

$T_{ref}$  : La température de référence, c'est la température de fonctionnement nominale de la cellule, elle est donnée par le constructeur

Le courant de la diode  $I_d$  est donné par la formule de SCHOCKLEY, tel que :

$$I_d = I_s \left[ \exp \left( \frac{q(V+I.R_S)}{K.T_c.A} \right) - 1 \right] \quad (\text{III.9})$$

Enfin, le courant traversant la résistance shunt peut s'écrire sous la forme suivante :

$$I_{sh} = \frac{V+I.R_S}{R_{sh}} \quad (\text{III.10})$$

En remplaçant (III-8), (III-9) et (III-10) dans l'équation (III-7), le courant  $I$  devient :

$$I = [I_{cc} + K_1(T_c - T_{ref})].G - I_s \left[ \exp \left( \frac{q(V+I.R_S)}{K.T_c.A} \right) - 1 \right] - \frac{V+I.R_S}{R_{sh}} \quad (\text{III.11})$$

Avec :

$I_s$  : Le courant de saturation

$q$  : La charge d'un électron ( $1.6 * 10^{-19}$  C)

$K$  : La constante de Boltzmann ( $1.38 * 10^{-23}$  j/k)

$T_c$  : La température de la cellule

$A$  : Le facteur d'idéalité qui dépend de la technologie des cellules PV

$R_s$  : La résistance série

$R_{sh}$  : La résistance parallèle (Shunt).

Le courant de la saturation  $I_s$  varie avec température de la cellule, ce qui est décrit par :

$$I_s = I_{si} \left( \frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[ \frac{q.E_G \left( \frac{1}{T_{ref}} \right)^{-1} / T_c}{K.A} \right] \quad (\text{III.12})$$

Où :

$I_{SI}$  : Le courant de saturation inverse, à la température et l'éclairement de référence

$E_G$  : Bande passante du semi-conducteur utilisé, elle est exprimée en V

Le courant de saturation  $I_{SI}$  peut être obtenu avec la relation suivante :

$$I_{si} = I_{cc} / \left[ \exp \left( \frac{q.V_{co}}{K.A.T_c} \right) - 1 \right] \quad (III.13)$$

$V_{co}$  : La tension de la cellule à vide :

Selon Huan –Liang Tsai, pour un module constituant  $N_s$  cellules branchées en série et  $N_p$  cellules reliées en parallèle, l'équation (III-11) devient alors :

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_s \left[ \exp \left( \frac{q \left( \frac{V}{N_s} + \frac{I.R_s}{N_p} \right)}{K.A.T_c} \right) - 1 \right] - \frac{V N_p + I.R_s}{R_{sh}} \quad (III.14)$$

### III.2.3 Le modèle simplifié

La résistance  $R_{sh}$  est inversement proportionnelle au courant qui la traverse (courant de fuite). En générale, le rendement (efficacité) d'un module photovoltaïque est insensible à la variation de la résistance  $R_{sh}$  que l'on peut considérer comme infinie.

En revanche, une légère variation de la résistance série  $R_s$  affecte fortement la puissance délivrée par un module photovoltaïque.

L'équation (III-14) peut être réécrite comme suit :

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_s \left[ \exp \left( \frac{q(V + I.R_s)}{K.T_c.A.N_s} \right) - 1 \right] \quad (III.15)$$

Avec :

$$I_s = I_{si} \left( \frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[ \frac{q.E_G \left( \frac{1}{T_{ref}} \right)^{-1/T_c}}{K.A} \right] \quad (III.16)$$

Et :

$$I_{si} = I_{cc} / \left[ \exp \left( \frac{q.V_{co}}{N_s K.A.T_c} \right) - 1 \right] \quad (III.17)$$

Pour une cellule idéale ( $R_s = 0$ ) et ( $R_{sh} = \text{infinie}$ ) l'équation (III.14) devient :

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_s \left[ \exp \left( \frac{qV}{K.T_c.A.N_s} \right) - 1 \right] \quad (III.18)$$

- Expression de la tension  $V$  :

A partir de l'équation du courant (III.17), l'expression de la tension  $V$  s'écrit comme

Suit :

$$V = \frac{K.A.T_c.N_s}{q} \ln \left( 1 + \frac{I_{ph}}{I_s} - \frac{I}{N_p.I_s} \right) \quad (\text{III.19})$$

### III.3 Modélisation d'un convertisseur DC/DC (Hacheur Buck)

Dans cette partie nous présentons le principe de convertisseurs DC/DC (Buck), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités. Ce type de convertisseurs n'est constitué que par des éléments réactifs (Selfs, Capacités) qui, dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie.

C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement. [25]

Le hacheur abaisseur est un convertisseur DC-DC. La tension de sortie est inférieure à celle d'entrée d'où son nom. L'interrupteur  $K1$  peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [22].

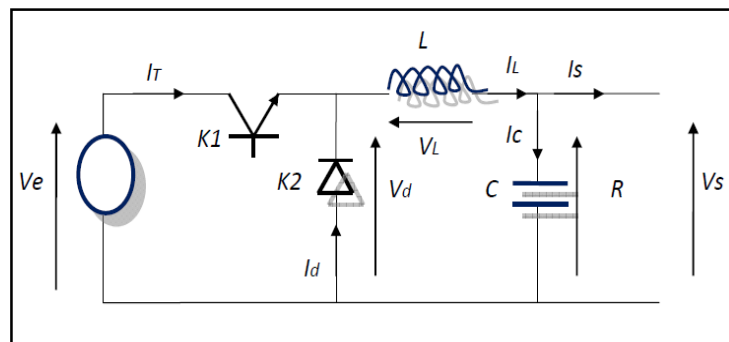


Figure III.3 : Hacheur dévolteur type Buck.

#### III.3.1 Modèle mathématique du convertisseur Buck

La modélisation de ce convertisseur passe par l'analyse des différentes séquences du fonctionnement que nous supposons de durées fixées par la commande  $u$ .

$u=1$  lorsque l'interrupteur est fermé et  $u=0$  lorsque l'interrupteur est ouvert.

L'interrupteur contrôlable  $K$  pouvant être fermé (passant) ou ouvert (bloqué), on peut définir la notion de rapport cyclique. Le rapport cyclique  $\alpha$  est défini comme le temps  $T_{on}$  pendant lequel l'interrupteur  $K$  est fermé divisé par la période de fonctionnement du montage  $T$ , soit :

$$\alpha = \frac{T_{on}}{T} \quad (\text{III.20})$$

On définit également le temps pendant lequel l'interrupteur K est ouvert (bloqué) par :

$$T_{off} = T - T_{on} \quad (III.21)$$

- Dans Le 1er temps  $0 < t < \alpha T$

$$\frac{LdI_L(t)}{dt} = V_d - V_o \quad (III.22)$$

Donc :

$$I_L(t) = \frac{V_d - V_o}{L} \min, \quad t \text{ tend vers } T_{on} :$$

$$T_{on} = \frac{L \Delta I_L}{V_d - V_o} \quad (III.23)$$

$V_o$  : La tension de sortie du convertisseur.

$V_i$  : La tension à l'entrée de convertisseur.

- Pour le 2eme temps  $\alpha T < t < T$

$$V_o = -L \frac{dI_L(t)}{t_{off}} - L \frac{dI_L(t)}{1-\alpha} \quad (III.24)$$

$$\text{Et : } I_L(t) = -\frac{V_o}{L} t + I_L \max \quad (III.25)$$

$$T \text{ tend vers : } T_{off} = (1 - \alpha)T \quad (III.26)$$

$$I_L \min = -\frac{V_o}{L} (1 - \alpha)T + I_L \max \quad (III.27)$$

$$T_{off} = \frac{L \Delta I_L}{V_o} \quad (III.28)$$

Avec :

$$V_o = \alpha \cdot V_i \quad (III.29)$$

$$I_i = \alpha \cdot I_o \quad (III.30)$$

Où :

$V_e$  : Tension aux bornes du générateur (V)

$V_s$  : Tension de sortie du générateur (V)

$T$  : période de découpage du signal de commande de l'interrupteur  $T = \frac{1}{f}$  en secondes(s)

$\alpha$  : Rapport cyclique du signal de l'interrupteur  $\alpha = \frac{T_{on}}{T}$

$I_L \min$  : Le courant minimum dans l'inductance (A)

$I_L \max$  : Le courant maximum dans l'inductance (A)

$\Delta I_L$ : Ondulation de courant dans l'inductance (A)

$L$ : Valeur de l'inductance de lissage (H)

$C$ : Valeur du condensateur de filtrage (F)

$\Delta V_c$ : Ondulation de la tension aux bornes du condensateur (V)

### III.3.2 dimensionnement du convertisseur Buck

Calcul de l'inductance (L) et du condensateur (C)

Pour un cycle T on a :

$$\frac{1}{f} = T_{on} + T_{off} = \frac{L \cdot \Delta I_L}{V_i - V_o} + \frac{L \cdot \Delta I_L}{V_o} = \frac{V_i \cdot \Delta I_L}{V_o (V_i - V_o)} \quad (\text{III.31})$$

On trouve :

$$\Delta I_L = \frac{V_o (V_i - V_o)}{f \cdot L \cdot V_i} \quad (\text{III.32})$$

Ou :

$$\Delta I_L = \frac{V_o \cdot (1 - \alpha)}{f \cdot L \cdot V_i} \quad (\text{III.33})$$

En appliquant la loi Kirchhoff on obtient :

$$I_L = I_c + I_o \quad (\text{III.34})$$

La tension du condensateur est donnée par l'expression suivante :

$$V_c = \frac{1}{C} \int I_c dt + V_c(t = 0) \quad (\text{III.35})$$

$$\Delta V_c = V_c - V_c(t = 0) \quad (\text{III.36})$$

$$\Delta V_c = \frac{1}{C} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \frac{\Delta I_L}{4} dt = \frac{\Delta I_L T}{8C} = \frac{\Delta I_L}{8fC} \quad (\text{III.37})$$

$$\Delta V_c = \frac{V_o (V_i - V_o)}{8LC f^2 \cdot V_i} \quad (\text{III.38})$$

$$\Delta V_c = \frac{V_i \cdot \alpha (1 - \alpha)}{8LC f^2} \quad (\text{III.39})$$

Où :

$$C = \frac{T \Delta I_L \cdot L}{8 \Delta V_o} \quad (\text{III.40})$$

La valeur de ( $L$ ) est déterminée par la formule (III-33)

$$T_{off} = \frac{\Delta I_L \cdot L}{V_o} \quad \text{Avec :} \quad T_{off} = T(1 - \alpha) \quad (\text{III.41})$$

### III.4 Stratégies de commande

La loi de commande est l'un des aspects les plus importants et les plus complexes dans la conception des convertisseurs statiques. Les principaux objectifs du contrôle des hacheurs série entrelacés sont :

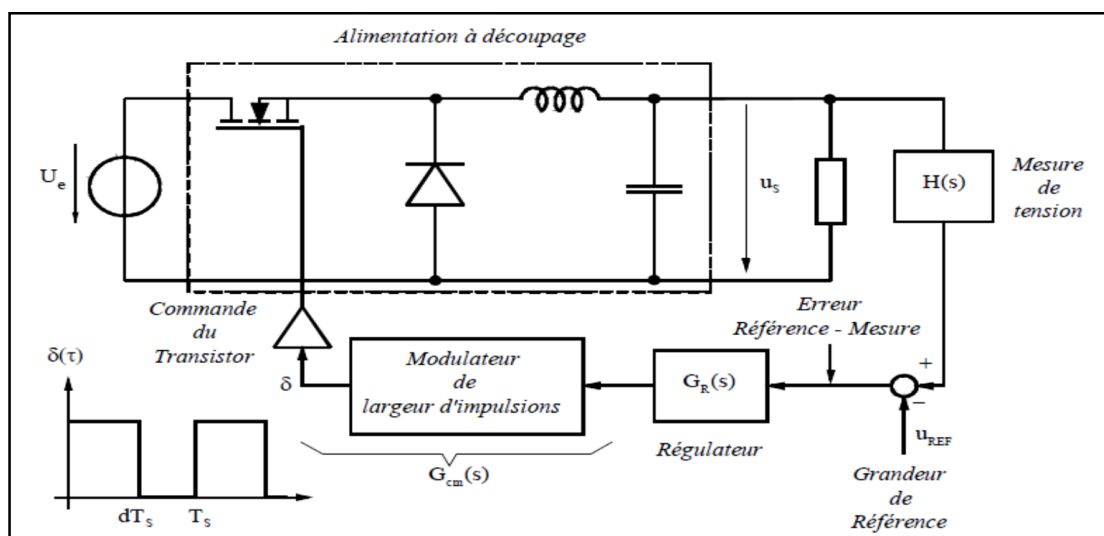
- Maintenir la tension de sortie du convertisseur VS à sa valeur de référence
- Assurer une répartition équilibrée du courant entre les différentes phases.
- Satisfaire la demande de la charge tout en assurant une dynamique rapide.
- Faible sensibilité à la variation des paramètres

Dans notre travail, et dans le but de satisfaire ces objectifs, nous avons développé deux stratégies de commande à savoir, la commande classique basée sur des correcteurs PI et la commande MLI.

### III.5 Le régulateur

Ces régulateurs ont pour tâche de comparer, en premier lieu, une valeur de consigne avec la valeur de mesure correspondante. En second lieu, le régulateur agit sur la grandeur de commande pour rendre la valeur de mesure aussi proche que possible de la valeur de consigne.

Dans ce cas, la tension de sortie du convertisseur est comparée à une valeur de consigne et, selon la charge, la température ou les variations de la tension d'entrée, la tension de sortie est maintenue à la valeur de consigne désirée la Figure (III.4).



**Figure III.4 :** Schéma de principe de la régulation de tension d'un convertisseur DC/DC

Le régulateur reçoit à son entrée la différence entre la valeur de référence (consigne) et celle de mesure (valeur réelle). Cette différence est appelée « Écart de réglage ». La Figure (III.5) représente le schéma bloc fonctionnel pour la régulation de la tension de sortie.

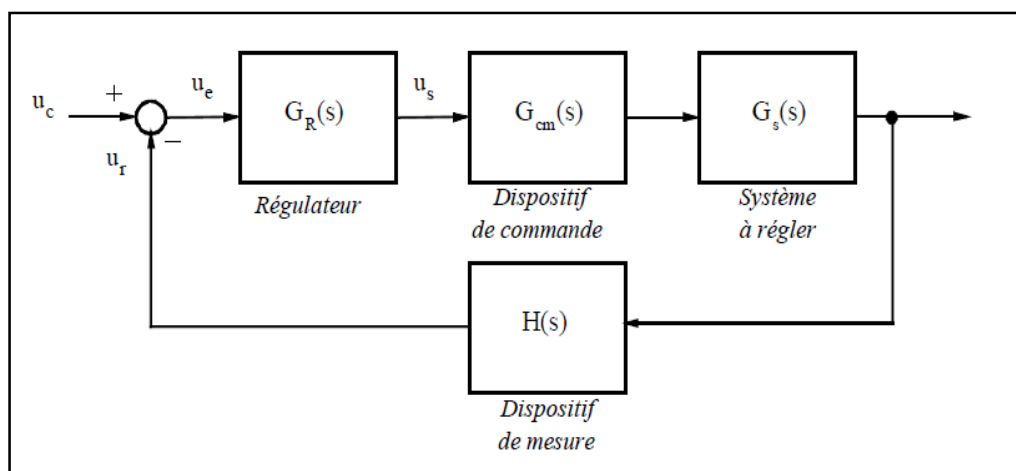
Dans ce schéma bloc, on distingue :

$G_R(s)$  : Fonction de transfert du régulateur.

$G_{cm}(s)$  : fonction de transfert du dispositif de commande (modulateur de largeur d'impulsion (PWM) et commande du transistor)

$G_s(s)$  : Fonction de transfert du convertisseur de tension du filtre et de la charge

$H(s)$  : Fonction de transfert de la mesure de tension



**Figure. III.5** : Schéma bloc de la boucle de réglage.

Les coefficients des régulateurs standards sont ajustables. Une fois ajustés, les coefficients restent fixes. L'ajustement optimal n'est donc possible que pour un point de fonctionnement du système à régler. Si les caractéristiques statiques et dynamiques de ce dernier varient dans un large domaine, il y a des points de fonctionnement où l'amortissement dans le circuit de réglage n'est plus satisfaisant, et où il peut même apparaître un risque d'instabilité. Dans ces cas critiques, on fait appel à des régulateurs adaptatifs.

Leurs coefficients sont variables en fonction d'une tension de contrôle qui doit dépendre du point de fonctionnement, de sorte que le circuit de réglage est toujours stabilisé de manière optimale. Parfois les régulateurs doivent présenter des caractéristiques non linéaires.

Il est assez souvent nécessaire de limiter la tension de sortie d'un régulateur, par exemple pour éviter une intervention trop brutale lors de l'apparition de phénomènes transitoires importants.

### III.5.1 Amplificateur opérationnel

Pour la réalisation des diverses structures de régulateurs, nous admettrons que les amplificateurs opérationnels sont idéaux. Si une caractéristique importante de l'amplificateur opérationnel peut influencer la qualité du régulateur, il en sera fait mention. Les hypothèses simplificatrices sont donc les suivantes :

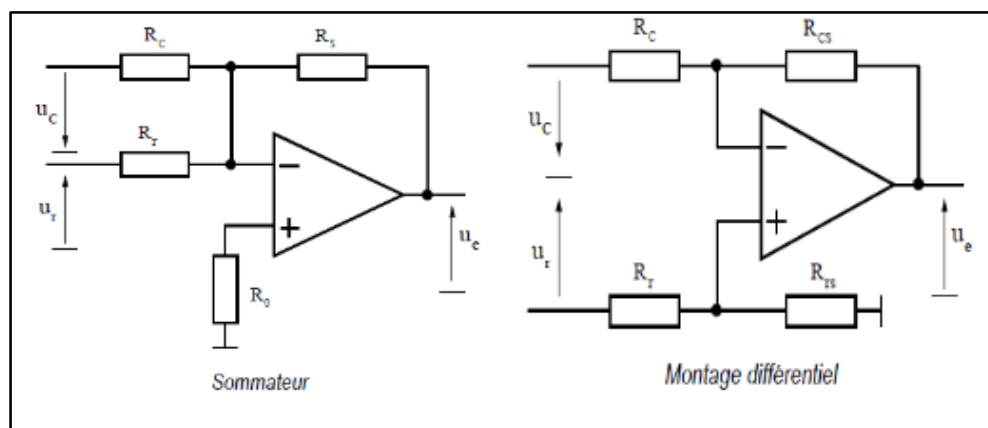
- $R_{in} \rightarrow \infty$  : Résistance d'entrée infinie
- $R_{out} \rightarrow 0$  : Résistance de sortie nulle
- $I_b(+)=I_b(-) \rightarrow 0$  : Courant d'entrée nulle

### III.5.2 Comparaison de la valeur de consigne et de la valeur réelle

La différence entre la valeur de consigne et la valeur de réelle, appelée écart de réglage est réalisée à l'aide de résistances de comparaison  $R_c$  et  $R_r$  et d'un amplificateur opérationnel utilisé en sommateur ou en montage différentiel.

La tension de consigne  $U_c$  dont la polarité dépend du point de fonctionnement est fournie par un organe de contrôle amont (potentiomètre, Convertisseur D/A, ...). La tension réelle  $U_r$  est égale à la grandeur de sortie d'un organe de mesure de la grandeur à régler. Cette tension a une polarité inversée par rapport à  $U_c$ .

Pour obtenir une comparaison précise et constante entre les valeurs de consigne et réelle, on doit en général utiliser des résistances de précision Figure (III.6).



**Figure. III.6 :** Comparaison de la valeur de consigne avec la valeur réelle

On peut établir les relations suivantes :

$$\frac{u_c}{R_c} - \frac{u_r}{R_r} - \frac{u_e}{R_s} = 0 \quad (\text{III.42})$$

$$u_e = \frac{R_s}{R_c} u_c - \frac{R_s}{R_r} u_r \quad (\text{III.43})$$

Montage différentiel

$$u(+)=u(-)=\frac{R_{rc}}{R_r+R_{rc}}u_r \quad (\text{III.44})$$

$$\frac{u_c-u(-)}{R_c}=\frac{u(-)-u_s}{R_{cs}} \quad (\text{III.45})$$

$$u_e=\frac{R_s}{R_c}u_c-\frac{R_{rs}}{R_r+R_{rc}}*\frac{R_{cs}+R_c}{R_c}*u_r \quad (\text{III.46})$$

### III.5.3 Configuration générale d'un amplificateur de réglage

Les amplificateurs de réglage sont composés d'un amplificateur opérationnel et d'un réseau de contre-réaction adéquat.

Cette contre-réaction a pour but de donner à l'amplificateur de réglage une fonction de transfert déterminée, apte à stabiliser le circuit de réglage. En plus, on réalise, sur les amplificateurs de réglage, la comparaison entre valeur de consigne et valeur réelle. Généralement on utilise des régulateurs standards tels que les régulateurs P, PD, PI et PID. Dans le cas le plus général, le montage extérieur de l'amplificateur de réglage consiste en trois quadripôles, dont deux bornes de chacun d'eux sont reliées au point zéro commun.

On peut établir les relations suivantes :

$$i_e(S)=-\frac{1}{Z_e(S)}u_e(S) \quad (\text{III.47})$$

$$i_s(S)=\frac{1}{Z_s(S)}u_s(S) \quad (\text{III.48})$$

$$i_e(S)+i_s(S)=0 \quad (\text{III.49})$$

Pour la tension de sortie, on obtient :

$$u_s(S)=\frac{Z_s(S)}{Z_e(S)}u_e(S) \quad (\text{III.50})$$

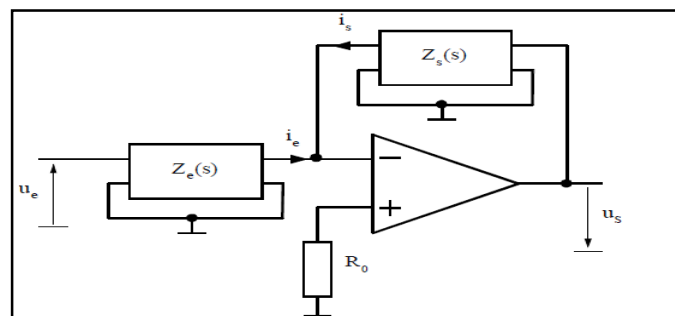


Figure III.7 : Configuration générale d'un amplificateur de réglage.

### III.5.4 Fonction de transfert

A l'aide de la fonction de transfert  $G_R(s)$  d'un régulateur, on peut écrire la relation générale

$$u_s(s) = G_R(s) \cdot u_e(s) \quad (\text{III.51})$$

Qui correspond au schéma bloc de la Figure (III.8).

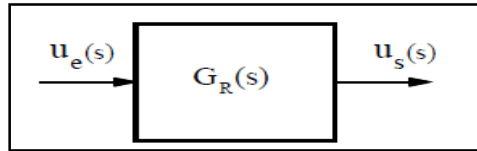


Figure III.8 : Schéma bloc d'un régulateur.

### III.5.5 Réponse harmonique

Les réponses harmoniques des régulateurs et des filtres sont souvent représentées par des portions de droites représentant les asymptotes des courbes réelles. Les allures du module et de la phase de la réponse harmonique pour un régulateur PI sont représentées sur les figures ci-dessous.

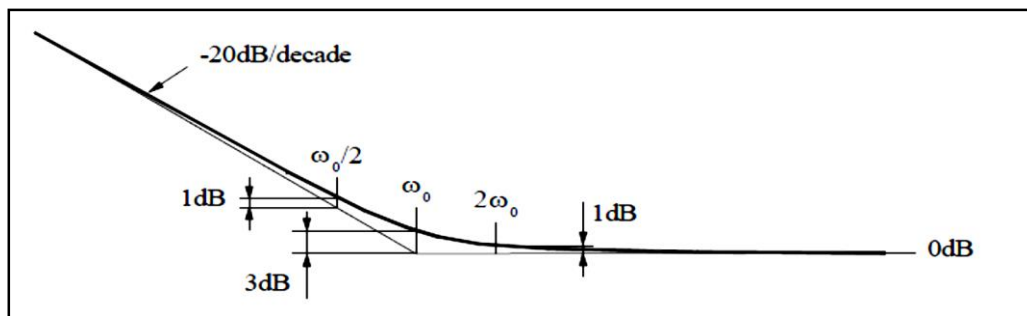


Figure III.9 : Réponse harmonique (module) pour un régulateur PI.

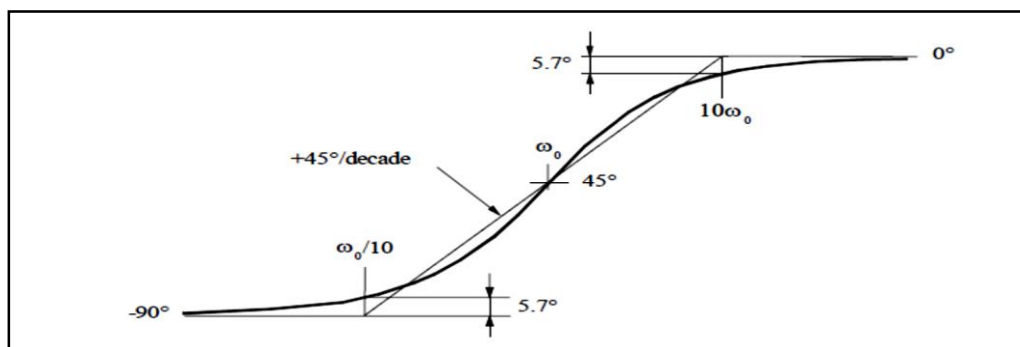
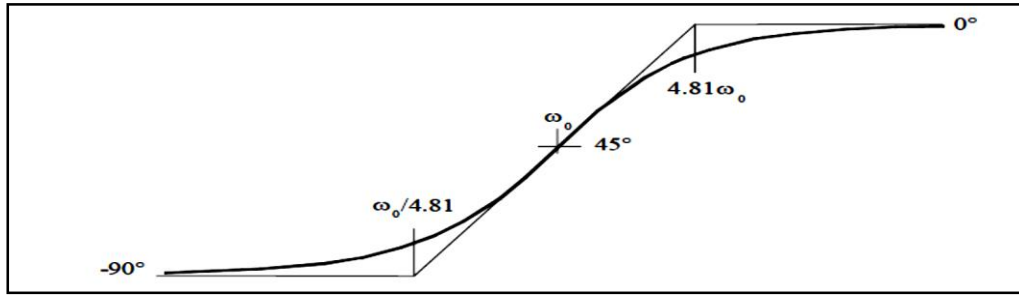


Figure III.10 : Réponse harmonique (phase) pour un régulateur PI.

Pour la phase, il peut être intéressant de tracer la tangente au point d'inflexion situé au milieu de la déviation totale de la plage angulaire.



**Figure III.11** : Réponse harmonique (phase) pour un régulateur PI

Lorsque la réponse harmonique d'un système est d'ordre supérieur à 1 et si le système possède plusieurs pôles et zéros réelles, l'approximation par des droites peut devenir insuffisante. Dans ce cas, l'utilisation de programmes informatiques (MathCad, Mathematica, Mapple, Matlab,...) dédiés aux applications mathématiques permet de tracer aisément la réponse harmonique d'un système complexe sans utiliser d'approximation par des droites. Le soin est laissé à l'étudiant d'investiguer dans ce sens.

### III.5.5.1 Régulateur PI

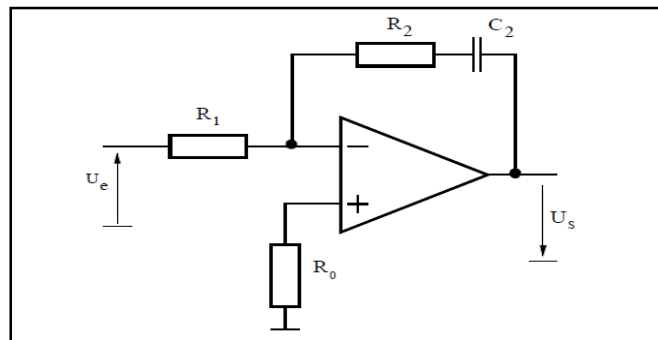
#### III.5.5.2 Fonction de transfert

La fonction de transfert du régulateur PI prend la forme générale suivante

$$G_R(S) = K_p \frac{1+s.T_i}{S.T_i} \quad (\text{III.52})$$

#### III.5.5.3 Réalisation pratique

La Figure (III.12) présente le schéma de principe d'un régulateur PI (proportionnel intégrateur).



**Figure III.12** : Schéma de principe du régulateur PI.

Il possède un circuit de contre-réaction formé d'un condensateur  $C_2$  mis en série avec la résistance  $R_2$

On peut écrire la relation générale au nœud (-) de l'amplificateur.

$$U_e \frac{1}{R_1} = U_s \frac{1+sR_2C_2}{sC_2} \quad (\text{III.53})$$

Et finalement la fonction de transfert

$$G_R(S) = \frac{U_s(S)}{U_e(S)} = \frac{R_2}{R_1} * \frac{1+SR_2C_2}{SC_2} \quad (\text{III.54})$$

Avec :

$$K_p = \frac{R_2}{R_1} \quad (\text{III.55})$$

Et :

$$T_i = R_2C_2 \quad (\text{III.56})$$

### III.5.5.3 Réponse harmonique

La réponse harmonique du régulateur PI est représentée à la Figure (III.13).

Les diverses courbes permettent de définir l'influence de chaque composant sur les résultats.

- Une variation de  $R_1$  provoque une translation verticale du module (une augmentation de  $R_1$  entraîne une translation vers le bas de la courbe).
- Une variation de  $R_2$  provoque une translation oblique (20dB/décade) du module (une augmentation de  $R_2$  entraîne une translation dans le sens décroissant des pulsations et croissant du module).
- Une variation de  $C_2$  provoque une translation horizontale du module (une augmentation de  $C_2$  entraîne une translation vers la gauche).

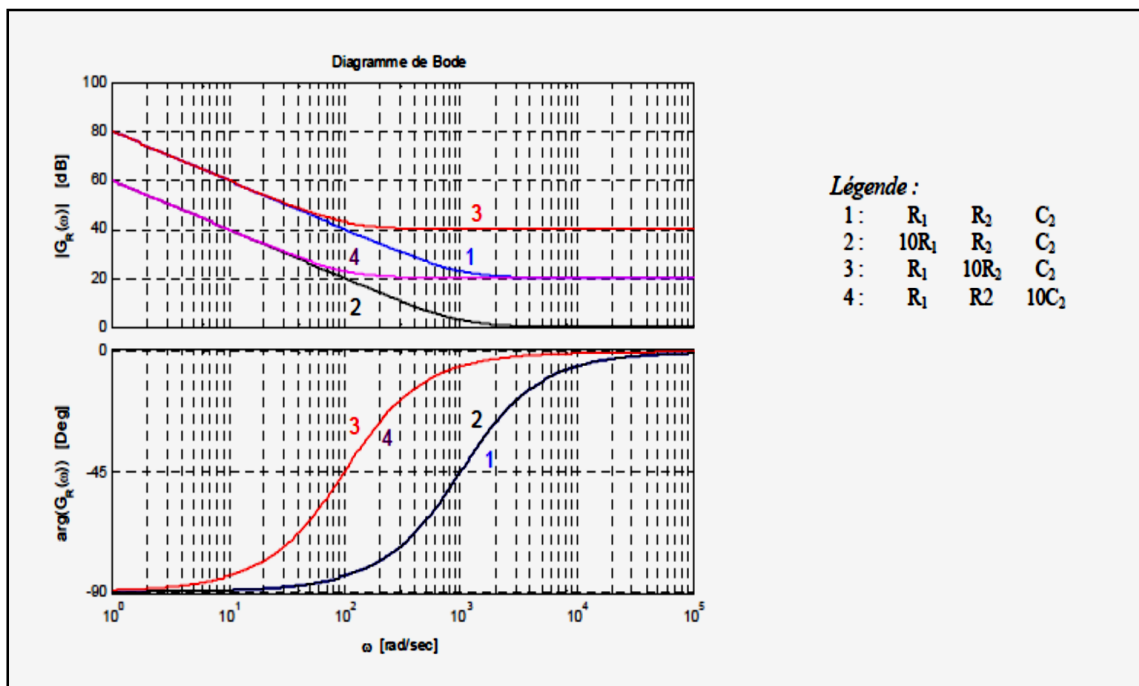


Figure .III.13 : Réponse harmonique du régulateur PI :  $R_1=10k$ ,  $R_2=100k$ ,  $C_2=10Nf$ .

### III.5.5.4 Réponse indicielle

L'expression de la fonction de transfert selon III.54 se prête particulièrement bien à la détermination de la réponse indicielle  $\gamma_R(t)$  (grandeur rapportée à la tension d'entrée).

A partir de la relation générale, on obtient :

$$L[\gamma_R(t)] = \frac{1}{S} G_R(S) = \frac{K_P}{S^2.T_i} + \frac{K_P}{S} \quad (\text{III.57})$$

D'où l'on tire par la transformée de Laplace inverse :

$$\gamma_R(t) = \frac{t}{T_i/K_p} + K_p \quad (\text{III.58})$$

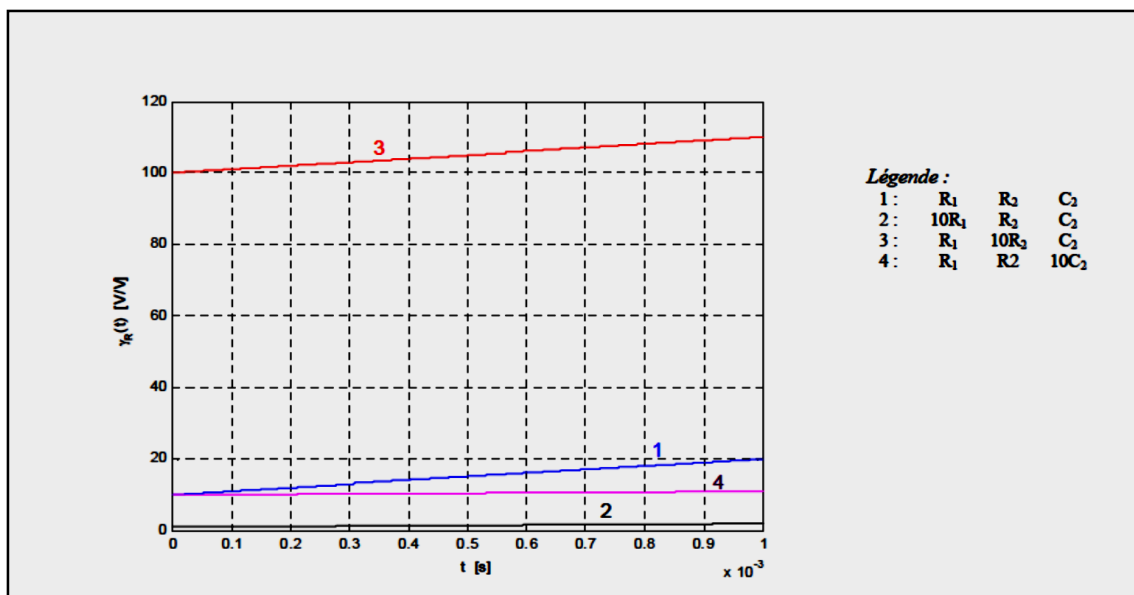
Cette réponse indicielle est représentée à la Figure (III.14) A l'instant initial ( $t=0+$ ), on observe un saut égal à  $K_p e(0+)$ , correspondant à la composante proportionnelle.

Ensuite  $\gamma_R(t)$  augmente linéairement en fonction du temps  $t$  en correspondance avec la composante intégrale.

On peut donc déterminer  $T_i$  et  $K_p$  expérimentalement à partir de la réponse indicielle.

La valeur de la réponse indicielle augmente pour  $t \rightarrow \infty$  théoriquement jusqu'à  $\gamma_R(t) \rightarrow \infty$ .

En réalité, la tension de sortie d'un amplificateur opérationnel est limitée par sa tension de saturation. Pour enregistrer expérimentalement la réponse indicielle, il est nécessaire d'appliquer à l'entrée de l'amplificateur de réglage une petite variation de la tension  $U_e$  de sorte que la tension de sortie reste, pour une grande partie du phénomène transitoire, dans les limites données par la saturation, afin de relever correctement la composante intégrale.



**Figure III.14** : Réponse indicielle du régulateur PI : R1=10k, R2=100k, C2=10nF

### III.6 Modulation de largeur d'impulsion

La modulation de largeur d'impulsions (MLI ; en anglais : Pulse Width Modulation, soit PWM), est une technique couramment utilisée pour synthétiser des signaux pseudo analogiques à l'aide de circuits à fonctionnement tout ou rien, ou plus généralement à états discrets.

Elle sert à générer un signal pseudo analogique à partir d'un environnement numérique ou analogique pour permettre un traitement de ce signal par des composants en commutation (se comportant comme des interrupteurs ouverts ou fermés).

Le principe général est qu'en appliquant une succession rapide d'états discrets avec des ratios de durée bien choisis, on peut obtenir en ne regardant que la valeur moyenne du signal n'importe quelle valeur intermédiaire

#### III.6.1 La MLI numérique

Le principe est de créer un signal logique (valant 0 ou 1), à fréquence fixe mais dont le rapport cyclique est contrôlé numériquement, la valeur moyenne de ce signal étant une grandeur analogique, égale au produit du rapport cyclique par l'amplitude maximale du signal.

#### III.6.2 Principe de réalisation

Généralement on réalise ce type de fonction à l'aide d'un microcontrôleur. Les microcontrôleurs modernes (ARM Cortex M, PIC, etc.) disposent tous de périphériques dédiées à la génération de PWM. Pour les microcontrôleurs plus anciens (8051, 68HC11), il est possible de détourner le fonctionnement d'un TIMER pour le transformer en générateur de PWM. Enfin en cas d'utilisation d'un microprocesseur, la PWM est généralement émulée.

Dans tous les cas, le principe du périphérique ou du programme d'émulation consiste à générer un signal périodique à assez haute fréquence (généralement supérieure à 20KHz pour éviter d'être dans la gamme audible, bien que cela ne soit pas obligatoire) appelé généralement porteuse (mais l'appellation est impropre) et à générer des impulsions à 1, dont le rapport entre la durée et la période, est égal à la valeur moyenne souhaitée par rapport à la valeur maximum du signal :

$$\frac{T_{on}}{T} = \frac{N}{N_{max}} \quad (III.59)$$

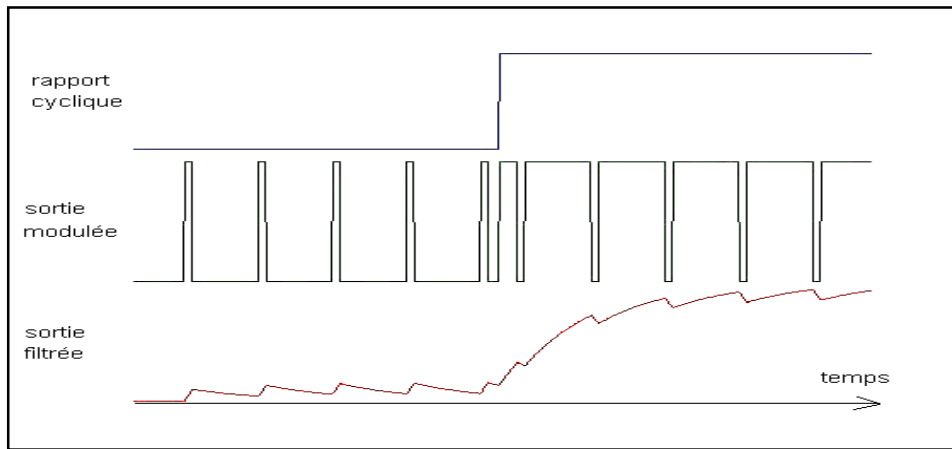
Où :

$T_{on}$  : est la durée de l'impulsion

$T$  : la période du signal

$N$  : la valeur du signal à l'instant  $t$  (analogique ou numérique)

$N_{max}$  : la valeur maximum que peut prendre  $N$



**Figure III.15** : Modulation de largeur d'impulsion.

De haut en bas : le signal de commande, le signal MLI brut, la sortie analogique après filtrage.

Dès lors la tension moyenne générée par le signal de PWM (variant entre  $E$  et  $0$ ) devient :

$$V_{moy} = \frac{1}{T} \left( \int_0^{T_{on}} E dt + \int_{T_{on}}^T 0 dt \right) = \frac{1}{T} \cdot E \cdot T_{on} = E \cdot \frac{N}{N_{max}} \quad (\text{III.60})$$

### III.7 Conclusion

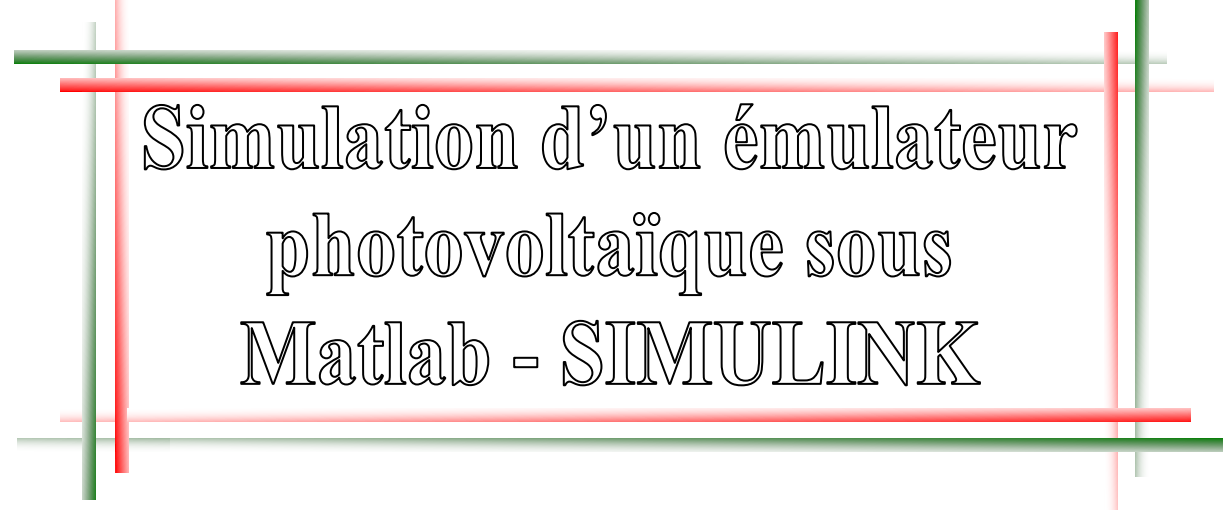
Dans ce chapitre, nous avons développé le modèle mathématique d'un générateur photovoltaïque en s'appuyant sur le schéma électrique équivalent simplifié à une seule diode.

En suite, on a étudié le comportement de convertisseur statique (Buck), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques.



# Chapitre IV

---



Simulation d'un émulateur  
photovoltaïque sous  
Matlab - SIMULINK

## IV.1 Introduction

La simulation de l'émulateur photovoltaïque sera l'objectif de ce chapitre. Dans nos deux précédant chapitres II et III respectivement, nous avons modélisé le panneau photovoltaïque et le convertisseur statique sous MATLAB-Simulink, cette étape nous permettra d'accomplir la tâche de la conception de l'émulateur du panneau photovoltaïque dans des meilleures conditions.

## IV.2 Le Système de contrôle et de conception du convertisseur DC-DC

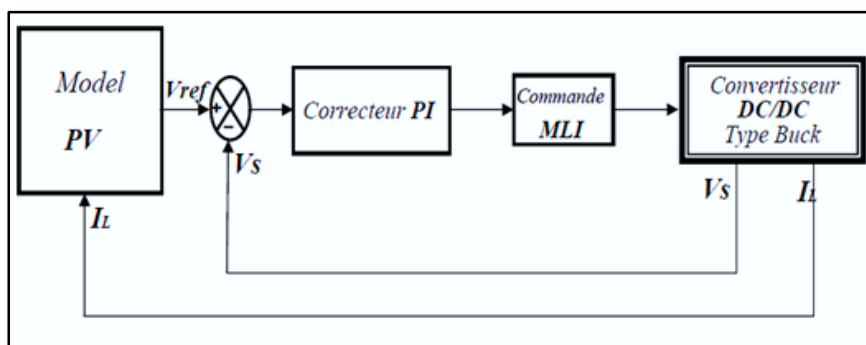
Le principe de fonctionnement de l'émulateur du panneau photovoltaïque est illustré dans la Figure IV.1.

Le courant de charge est mesuré puis imposés au niveau du modèle du panneau photovoltaïque. Ensuite, la tension de référence sera déduite à partir de ce modèle.

Enfin, la tension de charge de référence est comparée à celle mesurée et l'erreur est imposée au régulateur de tension dans lequel le rapport cyclique  $\alpha$  est récupéré.

Le bloc MLI fournit le signal de commutation pour commander le commutateur du convertisseur DC / DC.

L'irradiation solaire et la température peuvent être imposées au modèle du panneau en utilisant des fonctions quelconques. Par conséquent, Le convertisseur DC / DC abaisseur de tension muni de sa commande représente l'émulateur du comportement électrique du panneau photovoltaïque, il est entraîné selon le modèle mathématique du panneau photovoltaïque.



**Figure IV.1 :** Principe du fonctionnement de l'émulateur photovoltaïque.

## IV.3 Le Modèle de l'émulateur photovoltaïque sous Matlab-Simulink

L'architecture de l'émulateur du panneau photovoltaïque proposée est schématisée dans la Figure IV.2. L'émulateur est développé sous l'environnement Matlab-Simulink.

Les entrées du modèle sont le rayonnement solaire, la température et le courant de charge fourni par l'étage d'alimentation (Convertisseur DC / DC).

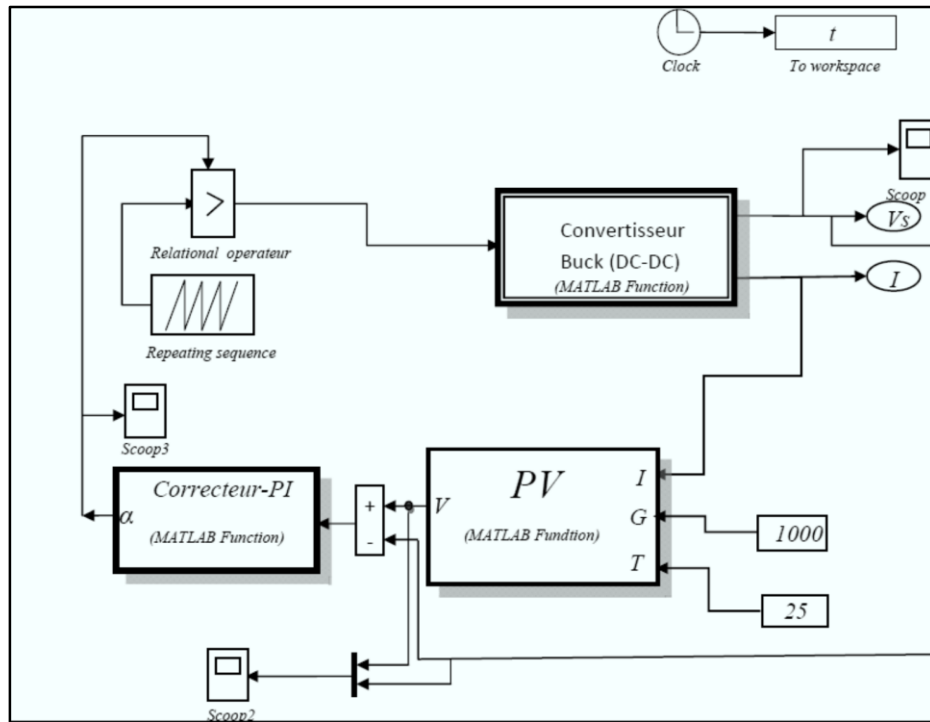


Figure IV.2 : Model de l'émulateur photovoltaïque sous Matlab-Simulink.

#### IV.4 Présentation et interprétation des résultats de simulation de l'émulateur PV

Après avoir conçu notre émulateur photovoltaïque, nous nous intéresserons à tester ce dernier, pour ce faire, des simulations seront réalisées avec deux essais différents afin de le valider

- **Premier essai :** il est effectué pour trois différentes valeurs de température ( $0^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$  et  $50^{\circ}\text{C}$ ) pour un éclairement fixé à  $1000\text{w/m}^2$ .

Les caractéristiques de la tension aux bornes de la charge  $V_s(t)$ , la tension de référence  $V_{ref}(t)$  et la tension du panneau photovoltaïque  $V(t)$  ainsi que celles du rapport cyclique seront présentées ci-dessous.

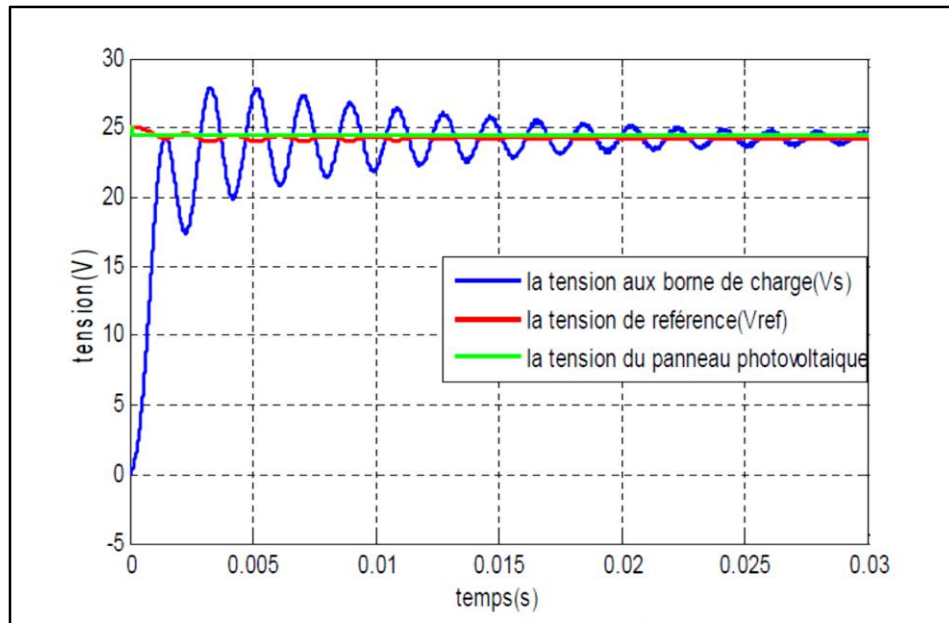


Figure IV.3 : Les caractéristiques  $V(t)$ ,  $V_{ref}(t)$  et  $V_s(t)$  pour une température de  $0^\circ\text{C}$ .

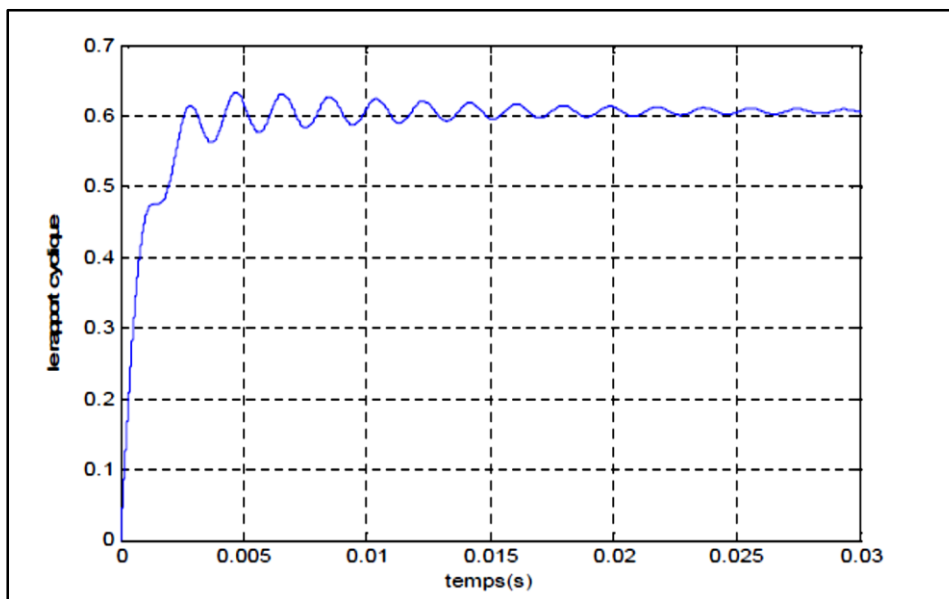
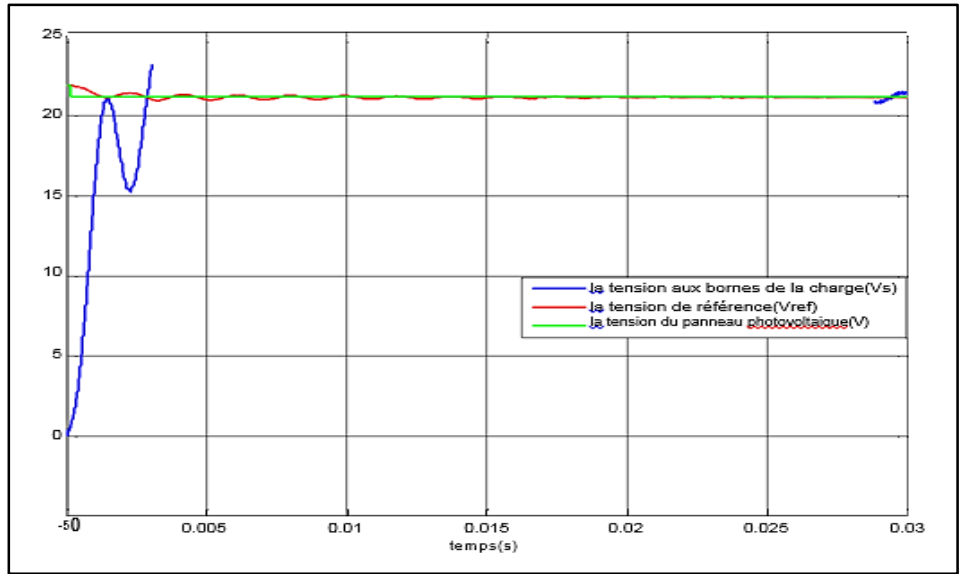
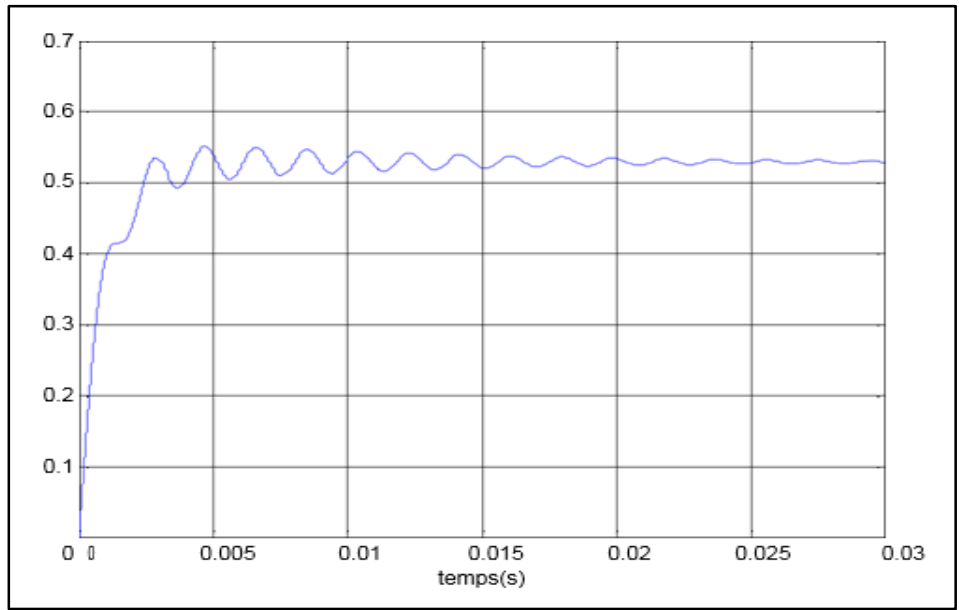


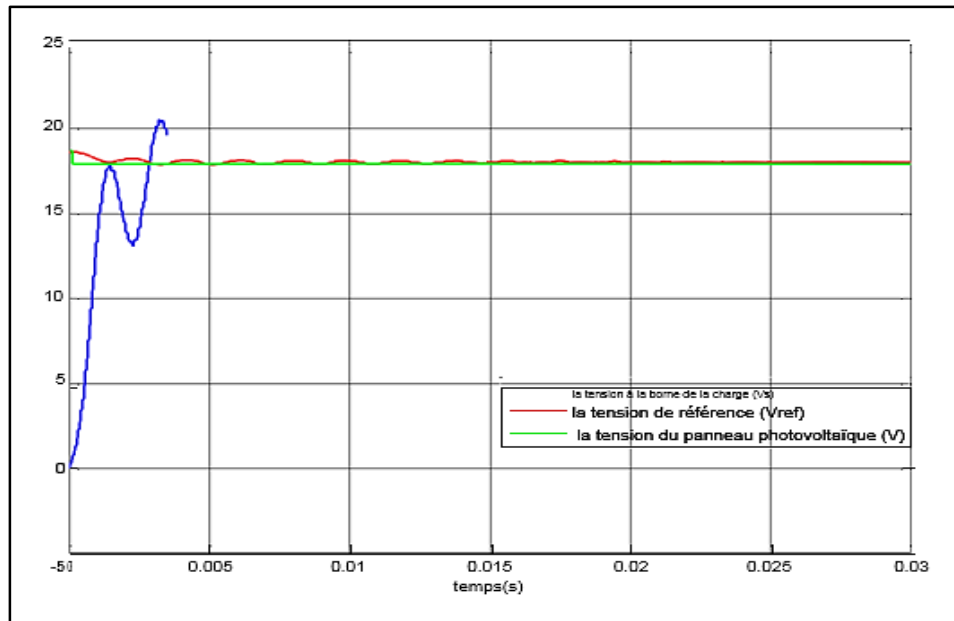
Figure IV.4 : La caractéristique du rapport cyclique  $\alpha$  en fonction du temps pour une température de  $0^\circ\text{C}$ .



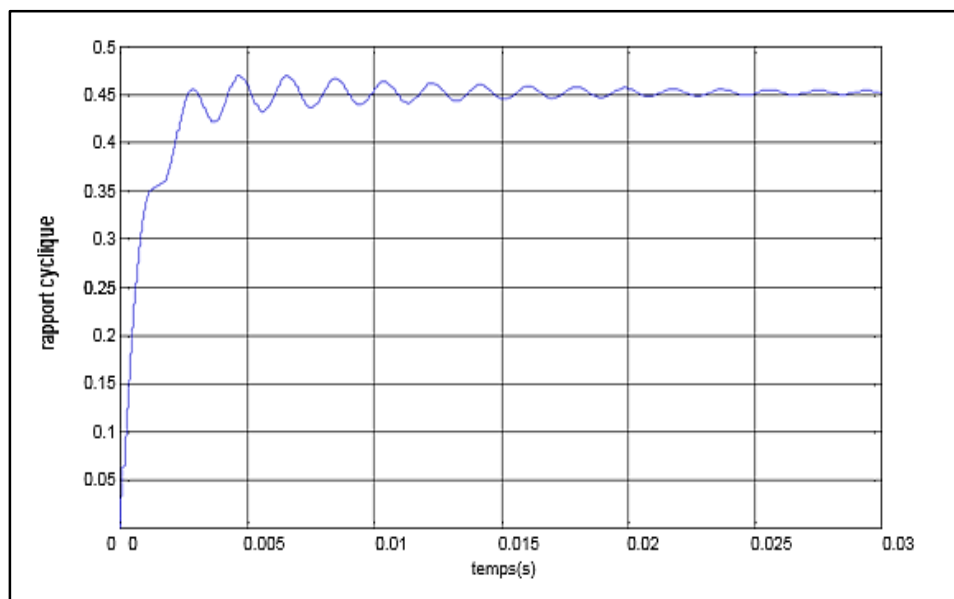
**Figure IV.5 :** Les Caractéristiques  $V_{s, \text{réf}}$  et  $V$  en fonction du temps pour une température de  $25^{\circ}\text{C}$ .



**Figure IV.6 :** Les Caractéristiques du rapport cyclique du temps pour une température de  $25^{\circ}\text{C}$ .



**Figure IV.7 :** Les Caractéristiques  $V_{ref}$ ,  $V_s$  et  $V$  en fonction de temps pour une température de  $50^{\circ}\text{C}$ .

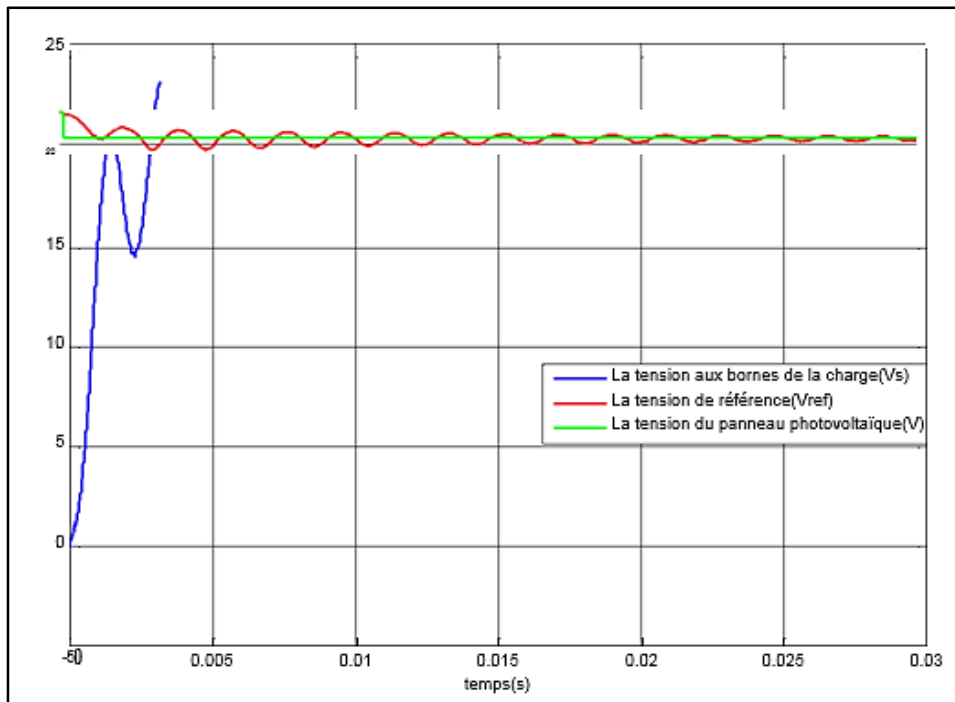


**Figure IV.8 :** Les Caractéristiques du rapport cyclique  $\alpha$  en fonction du temps pour température de  $50^{\circ}\text{C}$ .

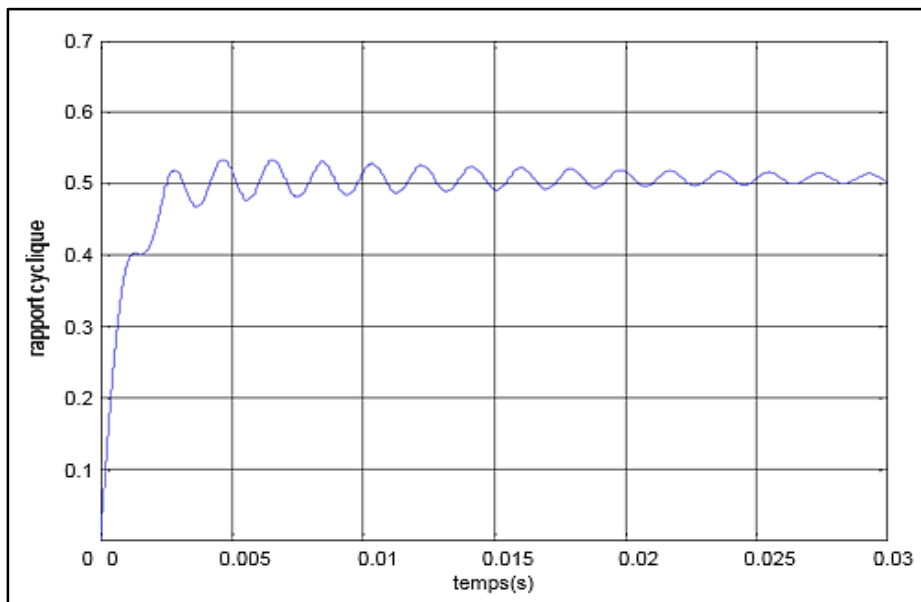
### Interprétation des courbes

En confrontant les résultats obtenus par la simulation de l'émulateur à ceux du panneau photovoltaïque pour différentes valeurs de la température on constate un bon accord entre la tension de référence et la tension du panneau photovoltaïque.

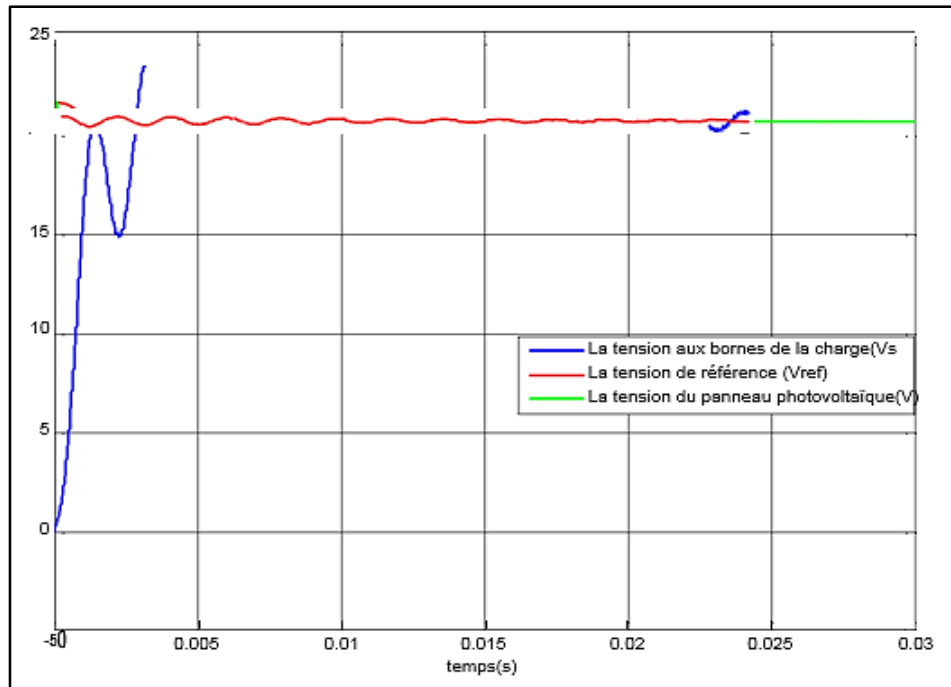
▪ **Deuxième essai :** La réponse de l'émulateur sera testée pour trois valeurs d'irradiations solaires différentes 700, 800 et 900 W/m<sup>2</sup>, la température sera fixe à 25°C.



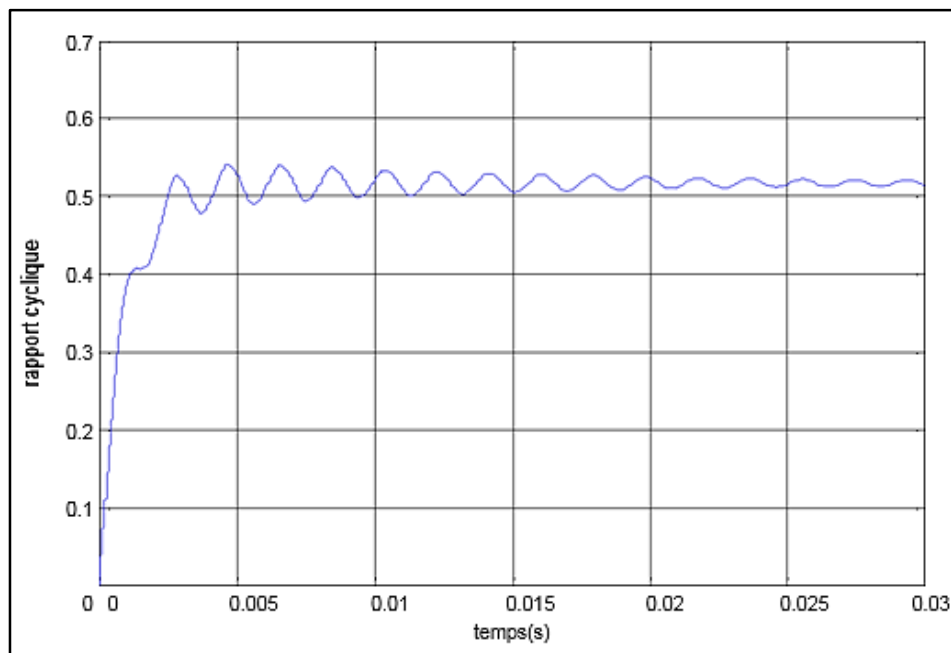
**Figure IV.9 :** Les Caractéristiques  $V_{ref}$ ,  $V_s$  et  $V$  en fonction de temps pour un éclairage de 700w/m<sup>2</sup>.



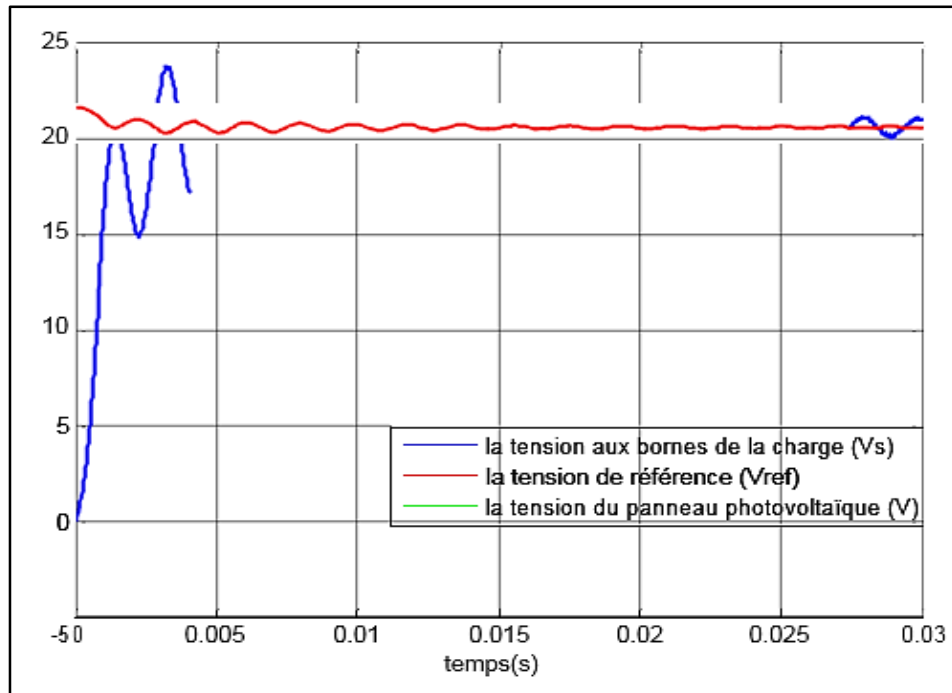
**Figure IV.10 :** La caractéristique du rapport cyclique  $\alpha$  en fonction du temps pour un éclairage de 700w/m<sup>2</sup>.



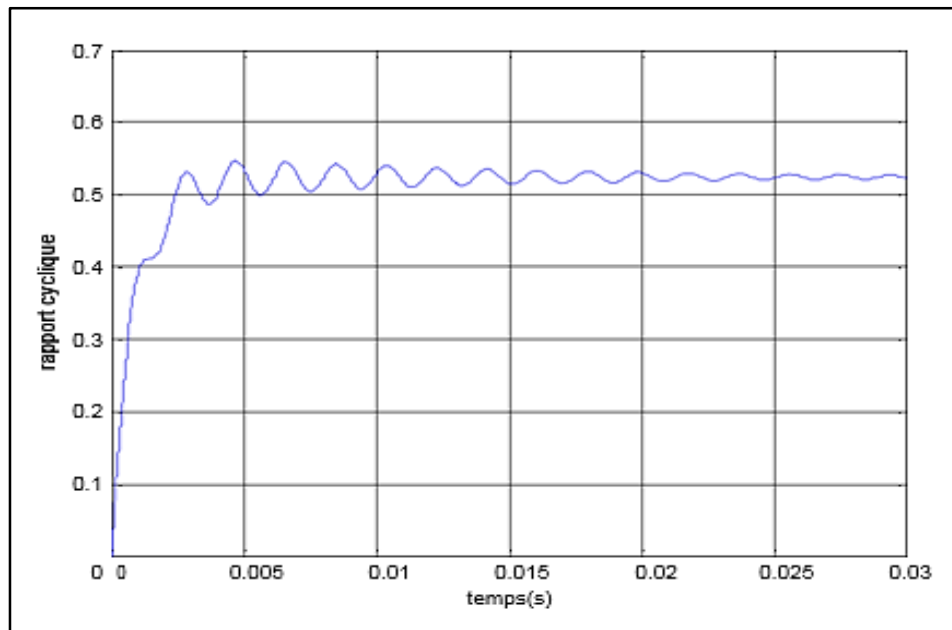
**Figure IV.11 :** Les Caractéristiques  $V_{ref}$ ,  $V_s$  et  $V$  en fonction du temps pour un éclairement de  $800\text{w/m}^2$ .



**Figure IV.12 :** La caractéristique du rapport cyclique  $\alpha$  en fonction du temps pour un éclairement de  $800\text{w/m}^2$ .



**Figure IV.13 :** Les Caractéristiques  $V_{ref}$ ,  $V_s$  et  $V$  en fonction du temps pour éclairement de  $900\text{w/m}^2$ .



**Figure IV.14 :** La caractéristique du rapport cyclique  $\alpha$  en fonction du temps Pour un éclairement de  $900\text{w/m}^2$ .

**Interprétation des courbes**

Pour différentes valeurs d'irradiations, on compare les résultats de simulation de l'émulateur à ceux du panneau photovoltaïque, on remarque que la tension du panneau et celle de l'émulateur sont en bonne harmonie.

**IV.5 Conclusion**

D'après les résultats de simulation obtenue dans ce chapitre, qui montrent que les courbes de tension sont semblables, Nous pouvons confirmer la validité de notre émulateur réalisé puisque il a le même comportement que celui du panneau quand ils sont confrontés aux mêmes conditions météorologiques (éclairage et température).

---

## Conclusion générale

Le but de notre travail est la simulation d'un émulateur photovoltaïque, capable de reproduire les caractéristiques statiques et dynamiques d'un panneau photovoltaïque réel. L'émulateur du panneau photovoltaïque a été réalisé en utilisant un hacheur abaisseur (buck) de tension. Le principe consiste à contrôler le hacheur abaisseur (buck) pour que ce dernier se comporte de la même manière qu'un panneau photovoltaïque. Par conséquent, l'émulateur est contrôlé par le modèle lui-même du panneau photovoltaïque.

Le modèle du panneau photovoltaïque et celui du hacheur ont été présentés et simulés indépendamment pour observer leurs caractéristiques et s'assurer de leurs bons fonctionnements. Ensuite, les deux modèles sont interconnectés et le système global est contrôlé par un régulateur classique du type PI.

Les résultats obtenus par l'émulateur et ceux obtenus par le modèle du panneau photovoltaïque sont satisfaisants, un bon accord entre les comportements est observé sur les figures de simulations.

Nous constatons que l'émulateur a pu reproduire les mêmes caractéristiques de tension que celles du panneau photovoltaïque pour différentes valeurs de température et d'éclairement ce qui confirme sa validité. Toutefois, une validation expérimentale s'avère indispensable pour valider l'émulateur et sa commande.

---

## ***Bibliographie***

- [1] : [http://www.ac-grenoble.fr/lycee/triboulet.romans/IMG/pdf/diapo\\_photovoltaique.pdf](http://www.ac-grenoble.fr/lycee/triboulet.romans/IMG/pdf/diapo_photovoltaique.pdf)
- [2] : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule\\_photovolta%C3%AFque#cite\\_note-futura-sciences](https://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovolta%C3%AFque#cite_note-futura-sciences)
- [3] : <https://sites.google.com/site/energiesolairedanslhabitat/l-energie-solaire>
- [4] : <https://renouvelableenr.weebly.com/faq>.
- [5] : <https://www.actu-environnement.com/>
- [6] : <https://www.climamaison.com/lexique/energie-solaire>.
- [7] [https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01164783/file/VD2\\_MAMBRINI\\_THOMAS\\_16122014](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01164783/file/VD2_MAMBRINI_THOMAS_16122014).
- [8] : <http://www.em.ucv.ro/eLEE/EN/realisations/EnergiesRenouvelables/>
- [9] : K. Ishaque, Z. Salam and H. Taheri, 'Simple, Fast and Accurate Two-Diode Model for Photovoltaic Modules', Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 95, N°2, pp. 586 - 594, 2011.
- [10] : C-T Sah, R.N. Noyce and W. Shockley, 'Carrier Generation and Recombination in Pn Junctions and Pn Junction Characteristics', Proceedings of the IRE, Vol. 45, N°9, pp. 1228 - 1243, 1957.
- [11] : A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud et I. Youm', Etude et Modélisation d'un Générateur Photovoltaïque', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11, N°3, pp. 473 - 483, 2008.
- [12] : S. M. Sze, Physics of semiconductor Devices, second edition, Copyright. C.1981 by John, Wiley and Son, Inc
- [13] : Roshanak Radbeh «Réalisation et caractérisation des cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones ». Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2008.
- [14] : <https://perso.uclouvain.be/ernest.matagne/SOLAIRE/SEM02/S02P09.HTM>
- [15] : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00978943/document>
- [16] : S. Astier, B. Dakyo, « Les système photovoltaïques autonomes non embarqués pour la production d'énergie électrique », Journées électrotechniques du club EEA, 28-29 Janvier1999, paris (France), pp 1- 19.
- [17] : A.A. Ghassami, S.M. Sadeghzadeh, A. Soleimani, "A high performance maximum power point tracker for PV Systems", Electr. Power Energy Syst. 53 (2013), pp. 237-243.
- [18] : E. Mamarelis, G. Petrone , G. Spagnuolo, 'A two-steps algorithm improving the P&O steady state MPPT efficiency', Applied Energy 113 (2014), pp. 414–421

- 
- [19] : W. Xiao, N. Ozog, and W. G. Dunford, “Topology Study of Photovoltaic Interface for Maximum Power Point Tracking”, IEEE Trans. On Industrial Electronics, vol. 54, n° . 3, 2007, pp. 1696-1704
- [20] : T. Kitano, M. Matsui, D. Xu “Power sensor-less MPPT control scheme utilizing power balance at DC link-system design to ensure stability and response”, 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON '01, vol. 2, 29 Nov.-2 Dec. 2001, pp.1309–1314.
- [21] : D. Shmilovitz, “On the control of photovoltaic maximum power point tracker via output parameters”, IEE Proceedings Electric Power Applications, vol. 152, n° 2, mars 2005, pp. 239-248.
- [22] : Daoudi Ali, « Etude et simulation d’un traqueur de puissance maximale d’un système photovoltaïque », diplôme d’ingénieur de Constantine, 2010.
- [23] : Khouf Hacem et Hamdous Yazid, « Etude de faisabilité de connexion des modules photovoltaïques au réseau de distribution en Algérie » mémoire d’ingénieur à l’Université mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2011.
- [24] : F. Yusivar, M. Y. Farabi, R. Suryadiningrat, W. W. Ananduta, and Y.Syaifudin, « Buck-converter photovoltaic simulator”, International Journal of Power Electronics and drive Système (IJPEDS), Vol.1, No.2, December 2011, pp. 156~167.
- [25] : Salah Mohamed Ait-Cheikh, « Etude, investigation et conception d’algorithmes de commande appliqués aux systèmes », diplôme d’Ingénieur en Automatique Nationale Polytechnique, 2007.
- [26] : M. Angel Cid Pastor, « conception et réalisation de modules photovoltaïques électriques » thèse de doctorat à l’institut National des Sciences appliquées de Toulouse, 2006.

---

## Annexe

### ✚ Les paramètres du panneau solaire (80M-12)

La puissance maximale ( $P_{max}$ )	80W
La tension optimale ( $V_{mp}$ )	17.1V
Le courant optimal ( $I_{mp}$ )	4.7A
Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )	4.97A
Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )	21.9V
le coefficient de la température (de court-circuit)	$2.47 \cdot 10^{-3}$
Le nombre de cellules en série	36
Le nombre de cellules en parallèle	1
Le facteur d'idéalité	1.2
La température de fonctionnement	47°C
Energie de Gap( $E_G$ )	1.11eV

### ✚ Les paramètres du convertisseur DC/DC (Buck)

valeur de l'inductance(L)	0.45mH
La valeur de la capacité(C)	200µF
La fréquence(F)	8KHz