

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

## **UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**

**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES**  
**DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



# **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**Pour l'obtention du diplôme de Master**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Génie Electrique**

**Spécialité : Réseaux Electrique et Haute tension**

## **THÈME**

# **Etude et conception d'un émulateur solaire**

**Préparé par : M Kermia Mohamed Hamza**

**Devant le Jury :**

<b>Nom et prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
<b><i>Meslem Youcef</i></b>	Pr	Président
<b><i>Nasri Djilali</i></b>	MCB	Examineur
<b><i>Gouichiche Abdelmadjid</i></b>	MCB	Encadreur
<b><i>Safa Ahmed</i></b>	MAB	Co-Encadreur

**PROMOTION 2015 /2016**

## Remerciements

*Mes plus vifs remerciements vont à Mr Ahmed Safa, pour sa disponibilité dans les moments difficiles.*

*Je remercie vivement Mr Gouichiche, pour ses conseils, sa gentillesse et son aide.*

*Je témoigne ma reconnaissance à Mr Meslem Youcef, professeur à l'Université de Tiaret pour l'honneur qu'il nous fait de présider le jury.*

*Je remercie profondément Mr D. Nasri, pour avoir accepté d'examiner ce travail, pour ses conseils et sa confiance.*

*Un grand hommage à tous les chercheurs du laboratoire LGEP pour leurs confiances leur simplicités leurs amitiés, merci infiniment.*

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail*

*À ma très chère mère.*

*À mon très cher père, que je ne saurai jamais remercier.*

*À mes chers frères et sœurs.*

*À mes proches et tous mes amis.*

*À tous les membres de la famille **Kermia***

*À Tous ceux qui me sont chers.*

Liste des tableaux

Liste d'abréviation

Liste des figures

Introduction général..... 1

## Chapitre 1

1.1.Introduction .....	3
I.1. L'énergie solaire photovoltaïque (PV) .....	3
I.1.1. Les cellules PV.....	3
I.1.2. Principe de fonctionnement .....	5
I.1.3. Module solaire.....	5
I.2.Le Rayonnement solaire .....	7
I.2.1. Orientation des modules et son influence sur la production .....	9
I.3. Potentiels et production envisageable.....	9
I.4.Potentiel solaire en Algérie.....	9
I.5.Evolution de L'utilisation de l'énergie PV .....	10
I.6.Configuration du système PV (type de raccordement).....	11
I.6.1. Installation PV raccordée au réseau public .....	11
I-6-2. Installation PV autonome .....	13
I.7.L'énergie PV et la recherche scientifique.....	14
I.7.1. Des recherches pour l'énergie photovoltaïque de demain .....	14
I.7.2. L'efficacité énergétique, axe majeur de la recherche .....	15
I.7.3. L'émulateur de solaire PV (simulateur).....	15
I.7.4. Pourquoi on émule un système énergétique renouvelable .....	15
1.2.Conclusion .....	16

## Chapitre 2

2.1.Introduction.....	18
II.1. Structure de l'émulateur photovoltaïque.....	18
II.2. Modélisation d'un system photovoltaïque.....	19
II.2.1. Modèle à une diode.....	19
II.2.2. Modèle de PV utilisé dans la structure de l'émulateur .....	20
II.3. Modélisation du Convertisseur DC-DC (Hacheur).....	21

II.3.1. Modelé Statique.....	21
II.3.2. Modèle dynamique.....	24
II.4. Fonction De transféré Du Convertisseur.....	26
II.5. Commande De Convertisseur En Boucle Fermée.....	28
II.6. Résultats de simulation.....	29
II.7. Simulation de l'émulateur PV.....	31
.II.7.1. Influence de l'éclairement.....	32
II.7.2. Influence de la température.....	33
2.2.Conclusion.....	34

### Chapitre 3

3.1. Introduction.....	35
III.2. Protocole de réalisation.....	35
III.2.1 Choix des composants.....	35
III.2.1.1 Carte arduino.....	35
III.2.1.2 Transistors MOSFET.....	36
III.2.2 Implémentation sous Proteus.....	37
III.2.3 Software implémentation.....	38
III.2.3.1 L'acquisition du courant et de la tension.....	39
III.2.3.2 Modèle de PV.....	39
III.2.3.3 Commande de l'hacheur.....	39
III.2.4 Résultats expérimentaux.....	39
3.2 .Conclusion.....	43
Conclusion general.....	44
Annex (A)	
Annex (B)	
Bibliographie	

## Liste des figures

### Chapitre 1

Figure.1 1: A gauche, une cellule solaire monocristalline. A droite, une cellule solaire polycristalline.....	4
Figure.1 2 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire .....	5
Figure.1 3 : Courbe I-V et de puissance en fonction de la tension d'une cellule solaire .....	6
Figure.1 4 : Relation entre la courbe I-V et le niveau de rayonnement. ....	7
Figure.1 5 : Relation entre la courbe I-V et le niveau de température. ....	7
Figure.1 6 : Vue schématique des différents types de rayonnements. ....	8
Figure.1. 7 : Puissance PV installée cumulée de 2000 à 2012.....	10
Figure.1. 8 : Nouvelle capacité PV installée de 2000 à 2012. ....	11
Figure.1. 9 : Installation PV raccordée au réseau public .....	13
Figure.1. 10 : Vue schématique d'un système autonome. ....	14

### Chapitre 2

Figure.2 1: Schéma synoptique du l'émulateur solaire.....	18
Figure.2 2: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	19
Figure.2 3: Convertisseur série (buck).....	21
Figure.2 4: Convertisseur série (buck) idéal .....	22
Figure.2 5: Interrupteur est en position 1 .....	22
Figure.2 6: Interrupteur est en position 2.....	23
Figure.2 7: Forme d'onde de la tension au borne de l'inductance « $v_L$ » .....	24
Figure.2 8: Forme d'onde de courant qui circule dans la capacité « $i_C$ » .....	24
Figure.2 9: Schéma canonique équivalent du modèle dynamique hacheur série idéal.....	24
Figure.2 10: convertisseur Buck en boucle fermée.....	28
Figure.2 11: schéma bloc convertisseur Buck en boucle fermée .....	28
Figure.2 12: représente la réponse fréquentielle avec $g(s)=1$ .....	30
Figure.2 13: la réponse fréquentielle avec un régulateur PI .....	30
Figure.2 14: Tension et Courant de sortie.....	31
Figure.2 15: émulateur PV sous Matlab-Simulink.....	31
Figure.2 16: caractéristiques $p(t)$ et $V(t)$ d'un émulateur solaire .....	32
Figure.2 17: caractéristiques $I(t)$ et $p(v)$ d'un émulateur solaire.....	32
Figure.2 18: caractéristiques $p(t)$ et $I(t)$ d'un émulateur solaire .....	33
Figure.2 19: caractéristiques $V(t)$ d'un émulateur solaire.....	33

### Chapitre 3

Figure.3. 1 : schéma global de l'émulateur solaire.....	35
Figure.3. 2 : Brochages de la carte Arduino Uno .....	36
Figure.3. 3 : transistor de type MOSFELT IRF 840.....	37
Figure.3. 4 :émulateur solaire sous Proteus .....	38
Figure.3. 5 :banc d'essai expérimentale de l'émulateur solaire.....	40
Figure.3. 6 :réponse dynamique du résultat expérimental .....	41
Figure.3. 7 : réponse dynamique obtenu par Proteus.....	42
Figure.3. 8 :caractéristiques (I-V) (Matlab , Proteus) et l'expérimentation .....	42
Figure.3. 9 : caractéristiques (P-V) (Matlab , Proteus) et l'expérimentation.....	43

## Liste des tableaux

### Chapitre 2

Tableau (2.1) : Grandeurs de le hacheur.....29

### Chapitre 3

Tableau (3.1) : abréviation Mosfet.....37

Tableau (3.2) : paramètres du panneau PV émulé.....40

Tableau (3.3) : le matérielle de manipulation.....47

### *List des abréviations*

$V_{oc}$	: Tension du circuit ouvert
$I_{sc}$	: Courant de court-circuit
DC – DC	: Convertisseur continu-continu
PV	: Photovoltaïque
$I_{mpp}$	: Courant pour la puissance maximale (courant maximum power point)
$V_{mpp}$	: tension pour la puissance maximale (tension maximum power point)
AM	: Air mass
$P$	: Puissance
MPP	: Maximum power point (point de puissance maximale)
CC	: Court-circuit
UV	: Ultraviolet
EVA	: Ethylene-Vinyl Acetate (éthylène-acétate de vinyle)
MPPT	: Maximum Power Point Tracking (Point de Puissance Maximale)
CA	: Courant Alternatif
$I$	: Courant
$V$	: Tension
$T$	: température réelles
$G$	: Rayonnement solaire
$E_q$	: Equation
LGEP	: Laboratoire de Génie Electrique et des Plasmas
$I_{mes}$	: Courant mesuré
$V_{mes}$	: Tension mesuré
$V_{ref}$	: Tension de référence
PI	: Intégration proportionnelle

# Introduction générale

## Introduction générale

L'énergie solaire est un gisement important, mais sa mise en œuvre reste extrêmement chère et complexe. Elle est cependant déjà compétitive dans des zones dépourvues de réseaux électriques. L'énergie éolienne représente un gisement limité et ne pourra sans doute dépasser 10% de la production électrique, et toujours de façon intermittente et aléatoire. La biomasse est une voie intéressante, mais difficile de développer à grande échelle. Les autres sources (géothermie, vagues, marées...) semblent incapables de répondre à une demande forte. Le stockage de l'énergie (hydrogène notamment) est loin d'être maîtrisé. Il représente un défi technologique important, et pourrait rendre les énergies intermittentes plus intéressantes dans l'avenir.

Enfin, la fusion thermonucléaire représente une source massive, mais risque de ne pas être disponible avant la fin du siècle. Les alternatives aux énergies fossiles présentent leurs propres inconvénients, mais il n'est pas certain que nous ayons encore le choix. Les producteurs d'énergie adoptent donc progressivement des modèles plus durables dans lesquels l'énergie solaire jouera un rôle essentiel. Tirer parti de l'énergie du soleil reste un défi pour l'homme. Sous forme de rayonnement, il apporte une quantité d'énergie impressionnante à la Terre : chaque heure, la Terre reçoit l'équivalent de la consommation annuelle en énergie de l'humanité. La production de cellules PV s'améliore sans cesse grâce aux avancées technologiques et à l'évolution des procédés industriels. Les coûts de production doivent être réduits considérablement pour pénétrer sur les principaux marchés de l'électricité. Par conséquent, le principal effort de la recherche et de développement technologique et industriel est dirigé sur la réduction du coût de production, et la maximisation du rendement des modules solaires. L'alternance du rayonnement solaire et les conditions climatiques, ainsi que le temps requis, par les chercheurs, pour effectuer leurs travaux de recherche pose de véritables problèmes pour la recherche dans le domaine de l'énergie solaire.

Afin de pallier à ces problèmes, l'utilisation d'un émulateur pourrait être la meilleure solution. Dans ce domaine prometteur, plusieurs types d'émulateurs ont été conçus, on peut citer, à titre d'exemple, les modules solaires avec émulateur de soleil dont le support du module solaire est constitué d'un module solaire poly cristallin et d'un projecteur halogène servant à simuler le soleil.

Dans le cadre des travaux de recherches du laboratoire de génie électrique et plasmas (LGEP) qui concernent les smart grid, le développement d'un tel dispositif (émulateur solaire) devrait être nécessaire pour l'avancement de ces recherches. Cependant, le travail présenté dans ce mémoire a pour objectif de concevoir et réaliser un émulateur solaire qui émule le comportement d'un panneau solaire réel.

## Introduction générale

Ainsi le travail est organisé comme suit :

Le 1<sup>er</sup> chapitre sera consacré à une description succincte des principales filières d'énergies renouvelables, plus particulièrement l'énergie solaire. A la fin de ce chapitre nous discuterons l'intérêt pour la conception d'un émulateur solaire.

Le 2<sup>ème</sup> chapitre présentera une étude théorique détaillée sur la structure de l'émulateur proposé dans ce travail. Le cœur de cette architecture est le convertisseur DC/DC. Des résultats de simulation sont également présentés pour vérifier la faisabilité de notre système.

Le 3<sup>ème</sup> chapitre sera consacré à la description détaillée du banc d'essais expérimental réalisé, ainsi nous présenterons les résultats obtenus à l'issue de cette réalisation.

Et nous concluons notre travail avec une conclusion générale et des perspectives.

# Chapitre I : Généralité sur l'énergie solaire photovoltaïque

## 1.1.Introduction

Environ 80% de notre énergie provient des sources d'énergie non renouvelables, tel que les énergies fossiles. Ces dernières ont été produites par la biomasse emmagasinée sur Terre il y a plus de 200 millions d'années. Ces sources d'énergie fossile génèrent de la pollution et du gaz à effet de serre, lorsqu'elles sont converties en électricité ou en chaleur. Cela a donc des effets néfastes sur l'atmosphère et accroît le réchauffement climatique. Heureusement, ces ressources étant limitées, notre dépendance des sources d'énergie fossiles arrive à sa fin. Le soleil fournit une formidable quantité d'énergie à la terre, ce qui affecte notre vie de plusieurs manières. Le rayonnement solaire incident génère les vents, les courants océaniques, l'évaporation, la condensation (pluies), et régule la température de la Terre. L'énergie résiduelle se dissipe et est donc perdue. L'exemple suivant illustre l'immense quantité d'énergie fournie par le soleil : La quantité d'énergie consommée chaque année par les êtres humains dépasse  $4.6 \times 10^{20}$  (joules), ce qui correspond à la quantité d'énergie reçue par la Terre en une heure. L'énergie photovoltaïque permet de convertir l'énergie solaire en électricité. Cette conversion ne génère aucune émission puisque aucun produit secondaire n'est émis lors de la production d'énergie [1].

## 1.1. L'énergie solaire photovoltaïque (PV)

Ce type d'énergie est produite par les capteurs solaires, elle représente la production d'électricité à partir de la lumière du soleil, sa conversion est réalisée grâce à des cellules photovoltaïques. Une cellule est en fait une fine tranche de silicium recouverte d'un maillage métallique permettant de transporter le courant produit. L'assemblage de ces cellules entre deux plaques de verres constitue un panneau photovoltaïque [1].

### 1.1.1. Les cellules PV

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique, qui est exposé à la lumière (photons), et produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. La tension obtenue est en fonction de la lumière incidente. La cellule photovoltaïque délivre une tension continue [1].

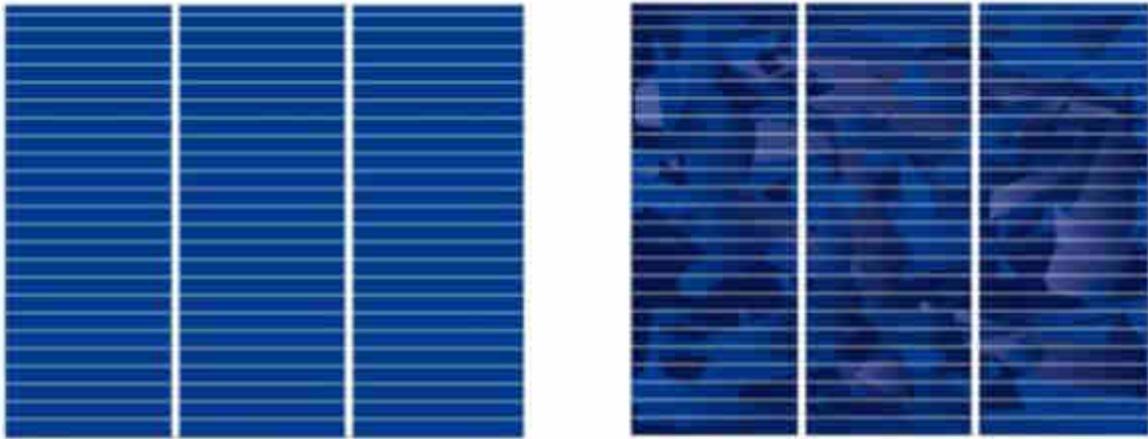


Figure.1 1 : A gauche, une cellule solaire monocristalline. A droite, une cellule solaire poly cristalline

La différence entre les deux cellules.

- La structure monocristalline produit une couleur homogène, tandis que la cellule poly cristalline montre les différentes couleurs correspondant à l'orientation de chaque cristal.

### I.1.2. Principe de fonctionnement

Lorsque des matériaux semi-conducteurs sont exposés à la lumière du soleil, les électrons excités passent de la bande de valence à la bande de conduction, générant des particules chargées nommées trous. En dopant le silicone, c'est-à-dire en ajoutant de minuscules quantités d'autres matériaux (tels que du bore ou du phosphore) à la structure cristalline, on forme des semi-conducteurs de type p (positive) ou n (négative), respectivement.

L'association de ces derniers en une jonction p-n génère un champ électrique dans le semi-conducteur, qui est capable de séparer les électrons et les trous et de créer un courant continu (CC) sortant des cellules solaires par les contacts. La figure (1.2) illustre ce processus [1].

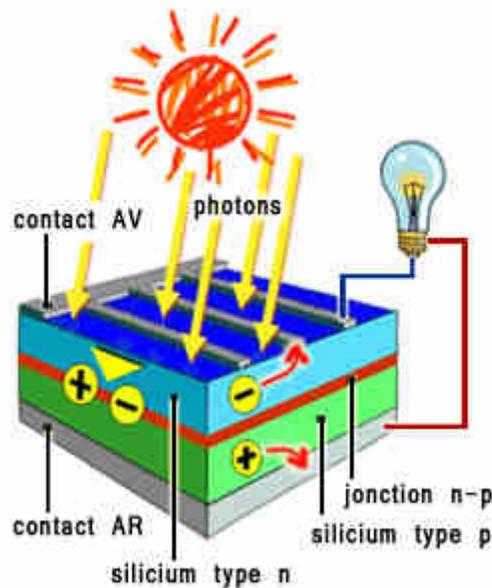


Figure.1 2. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

La lumière solaire touche les cellules solaires. Une partie de la lumière est réfléchiée à la surface et une autre partie traverse la cellule solaire sans être affectée. Le reste est absorbé en générant des paires d'électrons-trous, séparés par un champ électrique et amenés vers les contacts. Certaines paires d'électrons-trous se recombinent avant d'arriver sur les contacts et chauffent la cellule solaire.

### I.1.3. Module solaire

Les modules solaires se composent de cellules solaires regroupées en série et en parallèle, afin d'obtenir la puissance finale souhaitée, déterminée par le courant et la tension du module. Les cellules solaires sont incorporées dans un châssis en aluminium selon un en capsulage verre – film EVA - cellule solaire – feuille de Tedlar, pour les protéger des conditions météorologiques. Des diodes by-pass sont placées sur la face arrière du module, afin de minimiser les pertes de puissance provoquées par l'ombrage.

Les cellules (et modules) solaires se distinguent par leurs caractéristiques électriques, elles se comportent de la même manière que les diodes et leurs caractéristiques électriques sont donc représentées à l'aide de courbes courant - tension (courbe I-V).

La figure (1.3) illustre la courbe I-V d'une cellule solaire et montre le comportement électrique des différentes plages de courant - tension.

$I_{sc}$  : représente le courant de court-circuit, autrement dit la valeur pour laquelle le courant est au maximum et la tension est égale à zéro.

## Chapitre I : Généralité sur l'énergie solaire photovoltaïque

$V_{oc}$  : représente la tension du circuit ouvert, autrement dit la valeur pour laquelle la tension est à son maximum et le courant est égal à zéro. La ligne verte représente la courbe de puissance résultante ( $Puissance = Courant \times tension$ ).

Le point maximal de puissance MPP (pour "maximum power point") correspond à la valeur de courant et de tension pour laquelle la puissance de la cellule solaire est à son maximum.

Le maximum de la ligne verte donne la valeur de courant du MPP ( $I_{mpp}$ ) qui permet d'obtenir la valeur de tension du MPP ( $V_{mpp}$ ), à partir de la courbe I-V [1].

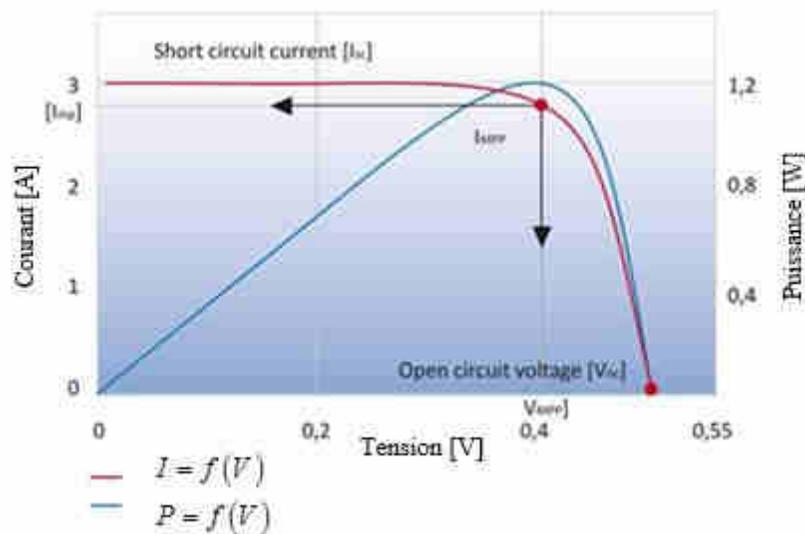


Figure.1 3 : Courbe I-V et de puissance en fonction de la tension d'une cellule solaire

La courbe I-V d'un module dépend considérablement du rayonnement incident. Le courant de sortie d'une cellule solaire est directement lié au rayonnement incident : plus le rayonnement est important, plus la production de paires électrons – trous est élevée, et plus le courant augmente.

D'autre part, la tension varie légèrement avec les variations de rayonnement. La figure (1.4) montre les courbes I-V d'un module solaire selon différents niveaux de rayonnement et la figure (1.5) montre les courbes I-V d'un module solaire selon différents niveaux de température [2]

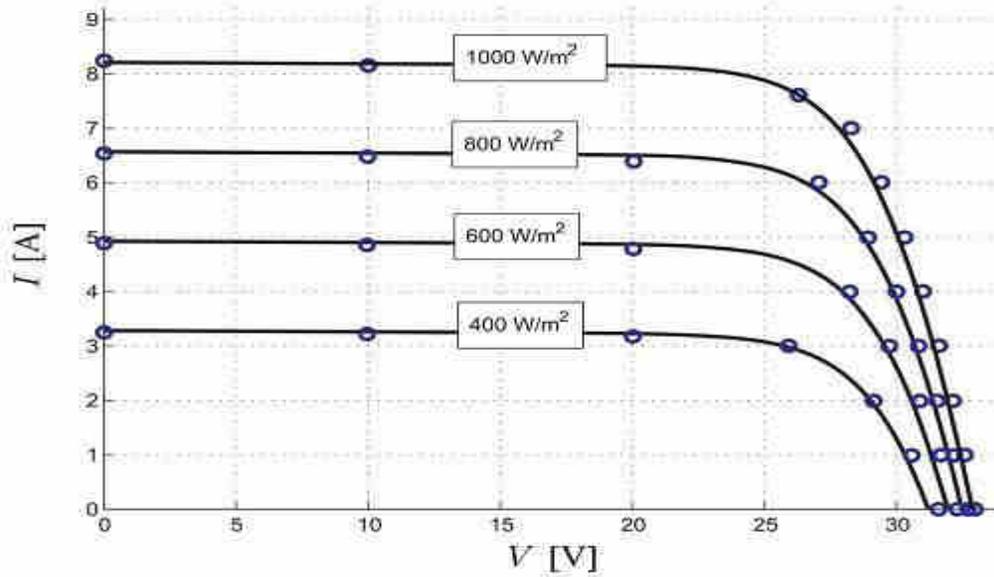


Figure.1 4 : Relation entre la courbe I-V et le niveau de rayonnement

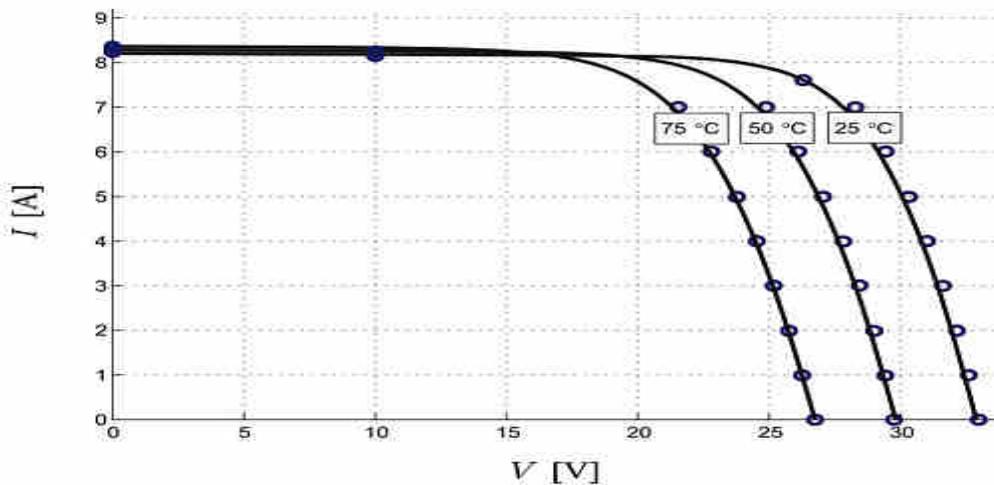


Figure.1 5 : Relation entre la courbe I-V et le niveau de température

## I.2. Le Rayonnement solaire

Le soleil rayonne dans toutes les régions du spectre, des ondes audio aux rayons gamma. Nos yeux sont sensibles aux longueurs d'ondes d'environ 400 à 750 nm. Dans ce spectre étroit, appelé spectre visible, le soleil émet environ 45 % de l'énergie totale rayonnée. La constante solaire, définie comme la densité de flux énergétique du rayonnement solaire hors atmosphère est égale à 1360(W / m<sup>2</sup>).

## Chapitre I : Généralité sur l'énergie solaire photovoltaïque

La constante solaire de surface est définie comme la densité de flux énergétique du rayonnement solaire reçue par une surface au niveau de la mer exposée au soleil vertical, par temps clair. Cette constante solaire de surface est égale à  $1000(W/m^2)$ .

La masse d'air ou masse d'air optique (AM pour "air mass") définit le parcours d'un rayon de lumière solaire à travers l'atmosphère (perpendiculaire). Lorsque le soleil est à une hauteur  $90^\circ$  (à midi, lors de l'équinoxe de printemps ou d'automne), la valeur AM est égale à 1. Sinon, la valeur AM augmente lorsque la hauteur du soleil diminue.

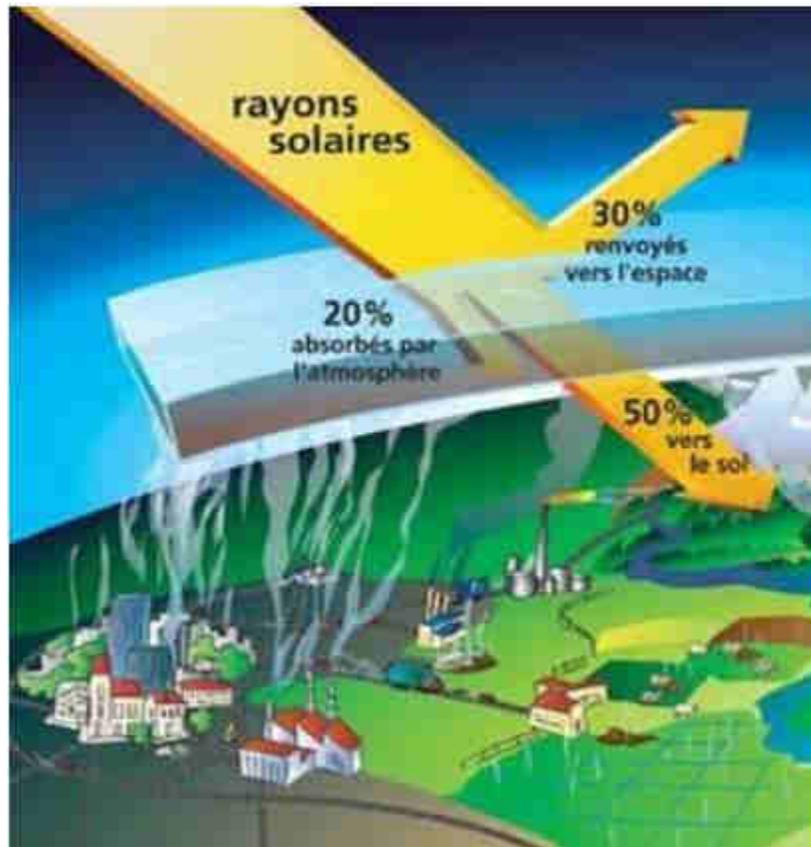


Figure.1 6 : *Vue schématique des différents types de rayonnements*

La figure (1.6) montre les différents types de rayonnements présents à la surface de la Terre. Le rayonnement direct est celui d'un temps clair et ensoleillé. Cependant, par temps nuageux, on a généralement un faible rayonnement direct ou un rayonnement diffus. L'intensité du rayonnement varie de quelques centaines de  $(W/m^2)$  (temps nuageux) à  $1000(W/m^2)$  (temps clair). Les modules solaires PV sont capables d'absorber les rayonnements directs et diffus. Cependant, les technologies basées sur les cristaux sont plus sensibles au rayonnement direct qu'au rayonnement diffus. Les technologies à couches fines (ou à film fin)

## Chapitre I : Généralité sur l'énergie solaire photovoltaïque

montrent de meilleures performances avec le rayonnement diffus que celles à cristaux, mais leur rendement général reste plus faible.

L'albédo représente la quantité de lumière réfléchiée dans l'environnement du système PV. Des valeurs d'albédo élevées impliquent des valeurs de réflexion plus élevées et un rayonnement diffus important.

L'albédo varie de 0 (absence de réflexion) pour les corps noirs à 0,8 – 0,9 pour la neige fraîche [1].

### I.2.1. Orientation des modules et son influence sur la production

L'orientation et l'inclinaison des modules PV déterminent en grande partie la quantité de rayonnement reçue par la surface. Elles influent sur la quantité d'énergie produite au final et il est très important de les prendre en compte. Si les modules ne sont pas montés sur un trackeur (ou suiveur) solaire, qui suit la position du soleil, afin d'obtenir un rayonnement élevé, ils doivent alors faire face au Sud (dans l'hémisphère nord) et au Nord (dans l'hémisphère sud). Cela permet de garantir le niveau de rayonnement maximum d'un champ pendant l'année. Dans les régions proches de l'équateur, l'orientation n'est pas importante, mais un minimum de 10° d'inclinaison est nécessaire [1].

### I.3. Potentiels et production envisageable

La production d'une installation PV est généralement calculée en ( $KWh / Kwc \cdot an$ ). L'unité kilowatt crête ( $KWc$ ) est la quantité d'électricité produite par un module photovoltaïque en conditions de test standard. Les installations PV sont évaluées selon leur taille en ( $KWc$ ), unité indiquant la quantité d'énergie (en  $KWh$ ) produite chaque année par un ( $KWc$ ) installé. Selon la technologie choisie, un ( $KWc$ ) représente une zone recouverte par des modules PV sur 6 à 20 m<sup>2</sup>. Cette valeur dépend fortement du mode d'installation du système et du niveau de rayonnement. Le niveau de rayonnement des installations PV des pays du nord, tels que l'Allemagne, n'étant pas très élevé, ces dernières ne produisent qu'entre 700 et 1100 ( $KWh / Kwc \cdot an$ ). En revanche, les installations PV situées dans des pays plus ensoleillés produisent entre 1400 et 1800 ( $KWh / Kwc \cdot an$ ). Actuellement, les plus grands producteurs sont l'Inde, l'Afrique du Sud et quelques régions du Moyen-Orient, qui dépassent les 2000 ( $KWh / Kwc \cdot an$ ) [1].

### I.4. Potentiel solaire en Algérie

En Algérie cela fait longtemps que l'on entend parler des bienfaits de l'énergie solaire mais l'exploitation de cette énergie reste assez marginale car il n'y a pas assez de moyens débloqués pour aider cette industrie récente à émerger dans un des plus gros pays producteurs de gaz et de pétrole. Le potentiel solaire en Algérie, est le plus important de tout le bassin méditerranéen :

## Chapitre I : Généralité sur l'énergie solaire photovoltaïque

- 169.440 TWh/an.
- 5.000 fois la consommation Algérienne en électricité.
- 60 fois la consommation de l'Europe des 15 (estimée à 3.000 TWh/an).

Energie moyenne reçue par kWh/m<sup>2</sup>/an :

- Régions côtières 1700.
- Hauts plateaux 1900.
- Sahara 2650.

### I.5. Evolution de L'utilisation de l'énergie PV

Au cours de la dernière décennie, l'énergie solaire PV a montré son énorme potentiel. La quantité de puissance PV installée a rapidement augmenté. Actuellement, la puissance PV installée à l'échelle mondiale est d'environ 100 GW. La figure (1.7) montre la puissance PV installée cumulée.

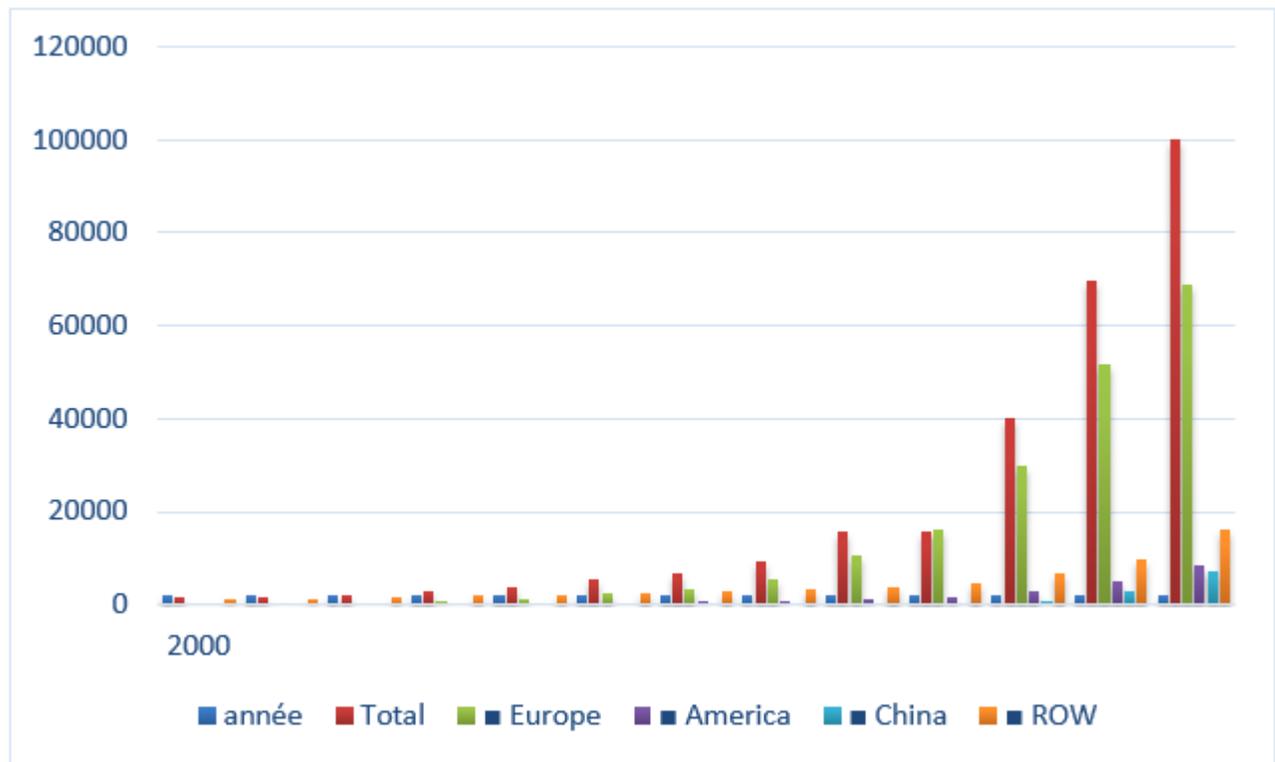


Figure.1. 7 : Puissance PV installée cumulée de 2000 à 2012

Grâce à d'importantes subventions en Allemagne, Espagne et Italie, la capacité du marché s'est accrue de manière exponentielle. Ainsi, les 15 GW installés en UE en font de loin le plus vaste marché

## Chapitre I : Généralité sur l'énergie solaire photovoltaïque

mondial. La tendance du marché est un déplacement vers de nouveaux marchés étendus, tels que les USA, l'Inde et la Chine. Ces pays joueront un rôle important dans le proche avenir du PV.

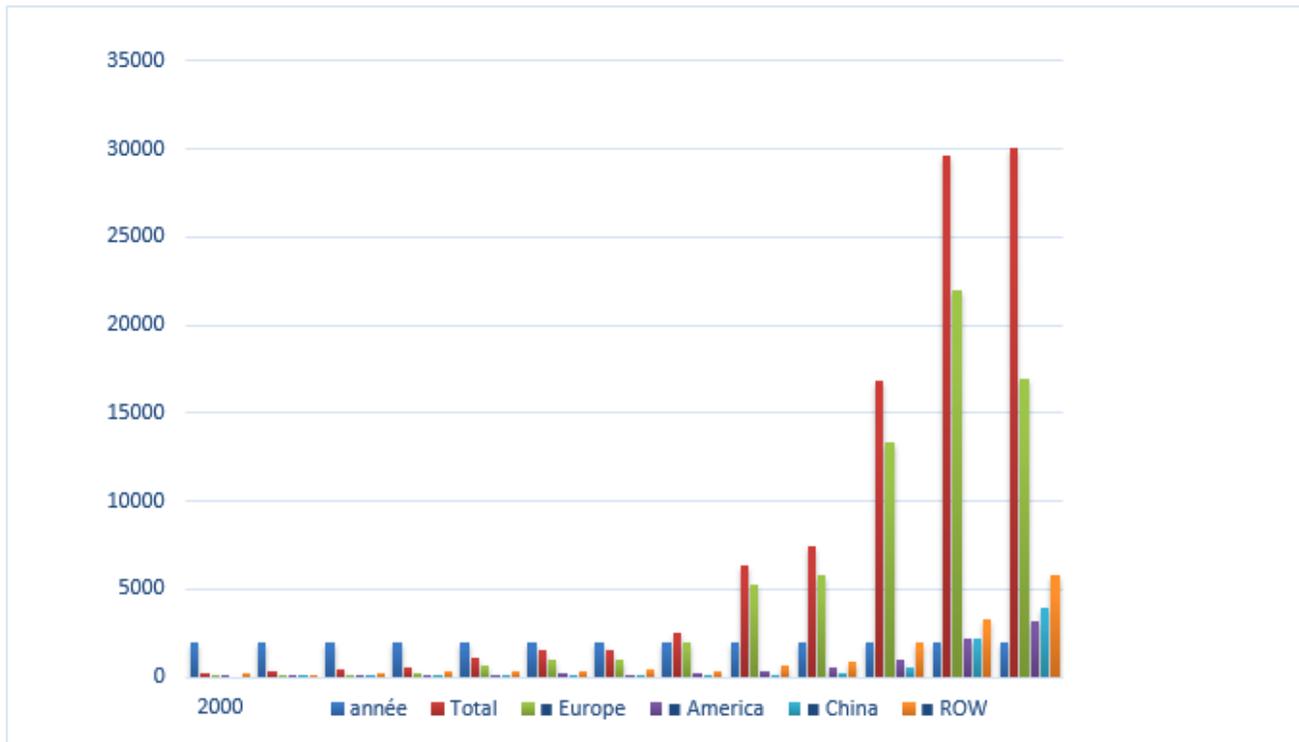


Figure.1. 8 : Nouvelle capacité PV installée de 2000 à 2012

La figure (1.8) montre la nouvelle capacité PV installée. L'augmentation de la capacité annuelle installée est liée à une forte baisse du prix des composants. Depuis 2006, le coût d'un système PV a baissé de plus de 50%. Ainsi, le prix final standard en 2006 était autour de 5500 à 6000 (€/KWh) pour un système résidentiel, tandis qu'il était de 2400 à 2700 (€/KWh) en 2011. L'industrie ayant toujours la capacité de réduire les marges, on s'attend à de nouvelles réductions du prix des systèmes PV. La parité réseau, autrement dit, le moment à partir duquel le prix du PV sera le même que celui des sources d'énergie conventionnelles, sera atteinte ces prochaines années.

### I.6. Configuration du système PV (type de raccordement)

#### I.6.1. Installation PV raccordée au réseau public

Les cellules photovoltaïques sont raccordées en série ou en parallèle, afin d'obtenir le courant et la tension souhaités pour le module PV. Les modules sont également raccordés en série ou en parallèle,

## Chapitre I : Généralité sur l'énergie solaire photovoltaïque

afin d'accroître leur courant ou tension de sortie respective. Le champ PV est équipé de quelques protections électriques contre les court-circuités, les travaux de maintenance ou en cas (peu probable) d'éclairs. Les modules sont assemblés sur des structures (généralement en aluminium anodisé) les fixant sur un toit ou au sol. Les systèmes au sol suivent généralement l'angle d'inclinaison des modules, afin d'optimiser le rayonnement incident pendant l'année.

Certains systèmes au sol utilisent des suiveurs (à un ou deux axes), permettant de suivre la trajectoire du soleil et d'augmenter la quantité de rayonnement solaire reçue à la surface des modules. Les systèmes sur toit fixent généralement les modules parallèlement au toit, si la pente est suffisante pour obtenir de bons niveaux de rayonnement. Il existe également des systèmes inclinés pour toits plats.

Les modules sont interconnectés à l'aide de câbles électriques en cuivre standard. La section transversale des câbles dépend de la puissance du champ PV. Les protections para surtension et parafoudre doivent être installées au plus tard à ce moment-là. Le champ PV est ensuite raccordé à l'onduleur, qui convertit le courant continu (CC) en courant alternatif (CA). L'onduleur incorpore des MPPT (Maximum Power Point Trackers – suiveurs de points de puissance maximale) permettant de suivre le courant et la tension de sortie du champ, qui change constamment. Le courant et la tension de sortie change principalement en raison des conditions, telles que l'éclairement et la température.

La sortie de l'onduleur est ensuite raccordée à un compteur qui enregistre la quantité d'énergie ayant alimenté le réseau.

Il existe deux modes de raccordement au réseau : "Full feed-in" ou "net metering". Le premier est couramment utilisé en Allemagne, et le second principalement aux USA, bien qu'il soit désormais également autorisé en Allemagne. "Full feed-in" signifie que la production totale du champ PV alimente le réseau, sans possibilité de consommation personnelle. Un compteur sert à mesurer l'énergie vendue et une autre mesure la consommation énergétique.

Le "net metering" en revanche n'utilise qu'un seul compteur pour la consommation et la production. L'énergie produite est d'abord consommée sur site. En cas d'excédent, elle alimente le réseau ; si la quantité d'énergie requise localement excède la production du champ PV, l'énergie supplémentaire est fournie par le réseau. Le schéma de la figure (1.9) montre les différences entre ces deux méthodes.

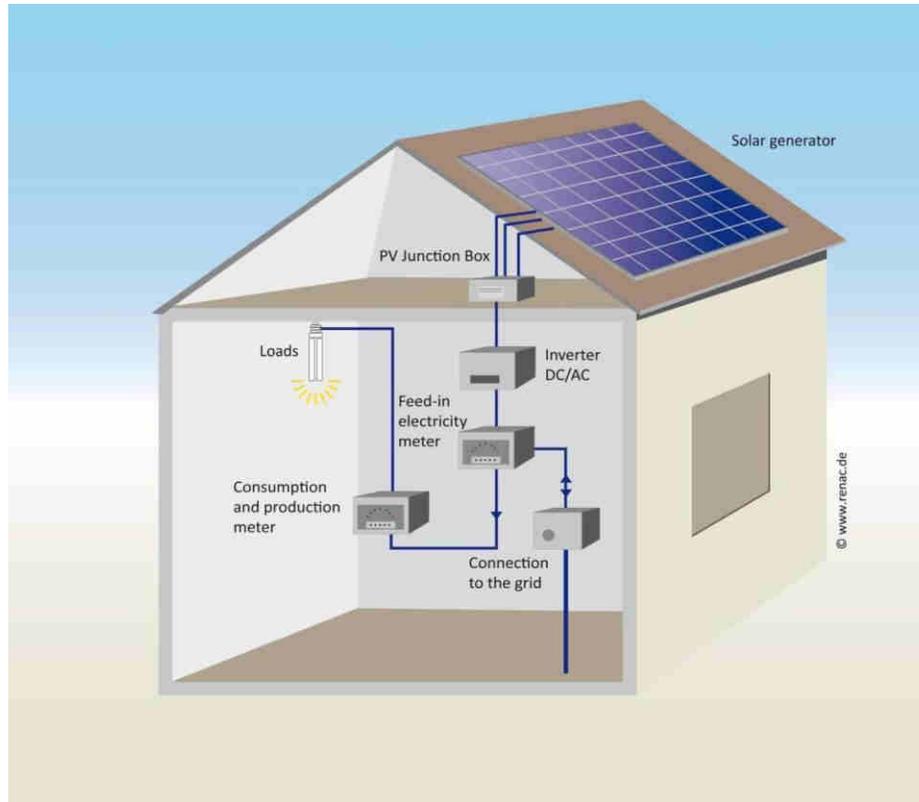


Figure.1. 9 : *Installation PV raccordée au réseau publique*

### **I-6-2. Installation PV autonome**

Le principe de fonctionnement d'une installation PV autonome (non raccordée au réseau) diffère complètement des systèmes PV raccordés. Dans ce cas, l'énergie n'alimente pas un réseau, mais est soit emmagasinée dans des batteries, soit localement consommée immédiatement. Le champ PV diffère légèrement des systèmes raccordés et sa taille est généralement beaucoup plus petite, particulièrement pour les petites applications autonomes, telles que les SHS (Solar Home System). Les modules PV sont interconnectés par des câbles en cuivre et assemblés sur des structures en acier inoxydable, tout comme pour les systèmes raccordés au réseau. Les protections para surtension, fusibles et éventuelles protections parafoudre doivent être installées en DC et AC, le cas échéant. La sortie du champ PV est ensuite raccordée à un contrôleur qui régule la charge et la décharge des batteries, la température, l'état de charge et la vitesse de décharge. Les batteries sont donc raccordées à un onduleur qui convertit le courant continu entrant en courant alternatif. Cet onduleur n'est nécessaire qu'en cas d'utilisation de charges en AC.

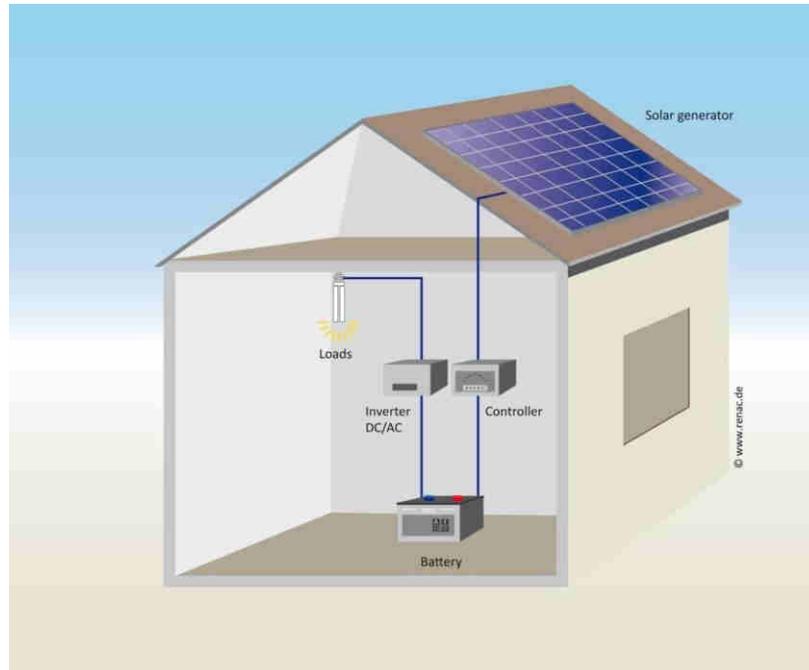


Figure.1. 10 : *Vue schématique d'un système autonome*

### **I.7.L'énergie PV et la recherche scientifique**

L'énergie est un facteur fondamental dans le développement social et économique d'un pays. La nécessité d'un avenir énergétique tel que préconisé lors du dernier sommet de la terre sur le développement durable impose aux Etats des réformes profondes des secteurs énergétiques qui devraient conduire à une importance accrue du rôle de l'efficacité énergétique et de la contribution des énergies renouvelables dans les bilans énergétiques.

Les énergies renouvelables, inépuisables et propres, s'imposent dans ces conditions comme une priorité.

#### **I.7.1. Des recherches pour l'énergie photovoltaïque de demain**

D'un point de vue fondamental, il ne fait aucun doute que beaucoup de recherches dans ce domaine restent à développer bien que l'on assiste à une recrudescence de l'activité depuis quelques années. Le domaine des multi-jonctions permettant une utilisation plus complète du spectre solaire en est encore à ses débuts. Il s'agit surtout d'encourager des procédés permettant de développer ces technologies à des coûts sensiblement inférieurs à ceux d'aujourd'hui ; en effet, ces coûts limitent les applications des dispositifs multi-jonctions à des niches commerciales.

## Chapitre I : Généralité sur l'énergie solaire photovoltaïque

En ce qui concerne les couches minces il faut trouver de nouvelles couches Semi-conductrices à base de produits abondants sur terre et non toxiques.

Ces nouvelles compositions doivent être adaptées à des dépôts aisément industrialisables. Les technologies dites de troisième génération (nanoparticules, polymères conducteurs, etc.) sont elles aussi récentes, c'est probablement dans ce domaine qu'il y a actuellement le plus d'activité. Des progrès sont encore largement possibles et de nouvelles voies sont à explorer. En dehors de ces recherches à caractère fondamental mais pouvant rapidement déboucher sur des technologies nouvelles, d'autres domaines plus technologiques méritent d'être développés. L'amélioration des modules ne suffit pas à elle seule à permettre le développement de la production d'énergie photovoltaïque, il faut aussi baisser le coût de la pose et adapter les réseaux électriques à la production d'énergies intermittentes. De plus, on ne verra se développer cette énergie alternative que si des technologies de stockage de l'électricité sont envisageables localement ou au niveau des réseaux [3].

### **I.7.2. L'efficacité énergétique, axe majeur de la recherche**

Les énergies renouvelables, qui font désormais l'objet de nombreuses recherches de pointe dans le monde Il s'agit d'assurer une efficacité énergétique accrue par des technologies propres et de développer des alternatives aux technologies fondées sur l'usage des énergies fossiles. Les énergies renouvelables sont analysées du point de vue de leur rendement et de leurs émissions. L'éolien et le solaire offrent des rendements inégaux, alors que la biomasse produit des émissions mais est plus respectueuse du climat que les énergies fossiles. La stratégie nationale de recherche énergétique privilégie ainsi l'efficacité énergétique, l'énergie solaire, le stockage d'énergie.

La recherche scientifique et le développement dans ce domaine marchent toujours ensemble, c'est pour ça les efforts des chercheurs sont orientés vers ce domaine des énergies renouvelables surtout l'énergie solaire PV et dans ces dernières années des nouvelles techniques et dispositifs sont utilisés dans la recherche comme l'émulateur solaire PV [1].

### **I.7.3. L'émulateur de solaire PV (simulateur)**

Un émulateur solaire photovoltaïque est un dispositif électrique qui peut émuler le comportement réel d'un panneau photovoltaïque.

### **I.7.4. Pourquoi on émule un système énergétique renouvelable**

Le marché des énergies renouvelables a augmenté rapidement au cours de la dernière décennie en particulier, la production d'électricité par l'énergie solaire est encouragée dans de nombreux pays et est considérée comme un objectif stratégique pour les gouvernements.

## Chapitre I : Généralité sur l'énergie solaire photovoltaïque

Pour cette raison, la demande d'équipements appropriés pour les systèmes PV d'essai a été à la hausse. Les tests d'Équipement solaire précoce, tels que les onduleurs et maximum trackers power point (MPPT), était possible dans des conditions réelles les conditions météorologiques en raison de la faible puissance de ces anciens systèmes. Cependant, il est difficile de tester PV moderne systèmes qui génèrent des centaines de kilowatts de puissance en raison de l'espace, le coût et la météo dépendance de l'équipement de test.

Par conséquent, et dans le cadre de nos thématiques de recherches au laboratoire de génie électrique et plasmas(LGEP) qui concernent les smart grid, il est nécessaire de développé des circuits d'émulation, qui présentent des caractéristiques électriques similaires à un système PV réel [4].

Les avantages de l'émulateur de PV sur le panneau solaire se résument comme suit :

- Le coût élevé du système complet.
- La gestion de tout le système, le temps de démarrage, les contraintes de sécurité.
- L'émulateur PV nécessite moins d'espace.
- Les conditions atmosphériques peuvent être facilement simulées.
- Différents types de caractéristiques de cellules solaires peuvent être simulées.
- Les émulateurs PV peuvent être utilisés à des fins d'étalonnage.
- Être un dispositif programmable, l'émulateur de PV peut se protéger en cas de surcharge ou de court-circuit, qui sont normalement devrait avoir lieu au cours des essais.

### 1.2.Conclusion

Pour résumer, le photovoltaïque est une source d'énergie sans émission qui jouera très prochainement un rôle important dans le parc énergétique. Dans quelques années, l'augmentation des prix de l'électricité provenant des sources d'énergies conventionnelles et la baisse drastique du prix des composants PV fera qu'il sera plus rentable de produire de l'énergie PV que d'acheter l'énergie des exploitants réseau.

Ce chapitre a présenté les notions de base du l'énergie PV et rayonnement solaire et de la conversion de l'énergie photovoltaïque. Il a également exposé les principales technologies PV disponibles.

## Chapitre I : Généralité sur l'énergie solaire photovoltaïque

Ce chapitre a aussi montré les différents principes de fonctionnement des installations PV raccordées au réseau et des installations PV autonomes. Enfin, il a présenté l'émulateur solaire et l'intérêt de développer un émulateur solaire PV.

Dans le chapitre suivant on présentera une étude sur les convertisseurs DC-DC (les hacheurs) leurs simulations et modélisations.

### 2.1. Introduction

Un émulateur PV est un circuit électrique qui permet d'émuler les caractéristiques réel d'un panneau solaire. Plusieurs structures peuvent être envisagées, nous nous sommes intéressés à l'architecture qui est basée sur un convertisseur DC-DC (Buck convertter). Une modélisation détaillée de chaque partie de cette structure sera présentée. A la fin de ce chapitre des tests des simulations seront établis pour valider la faisabilité de notre système (émulateur PV) [5].

### II.1. Structure de l'émulateur photovoltaïque

L'architecture de l'émulateur PV proposé dans ce travail est schématisé par la figure (2.1). Il est constitué d'un convertisseur DC/DC, un modèle PV et un régulateur PI.

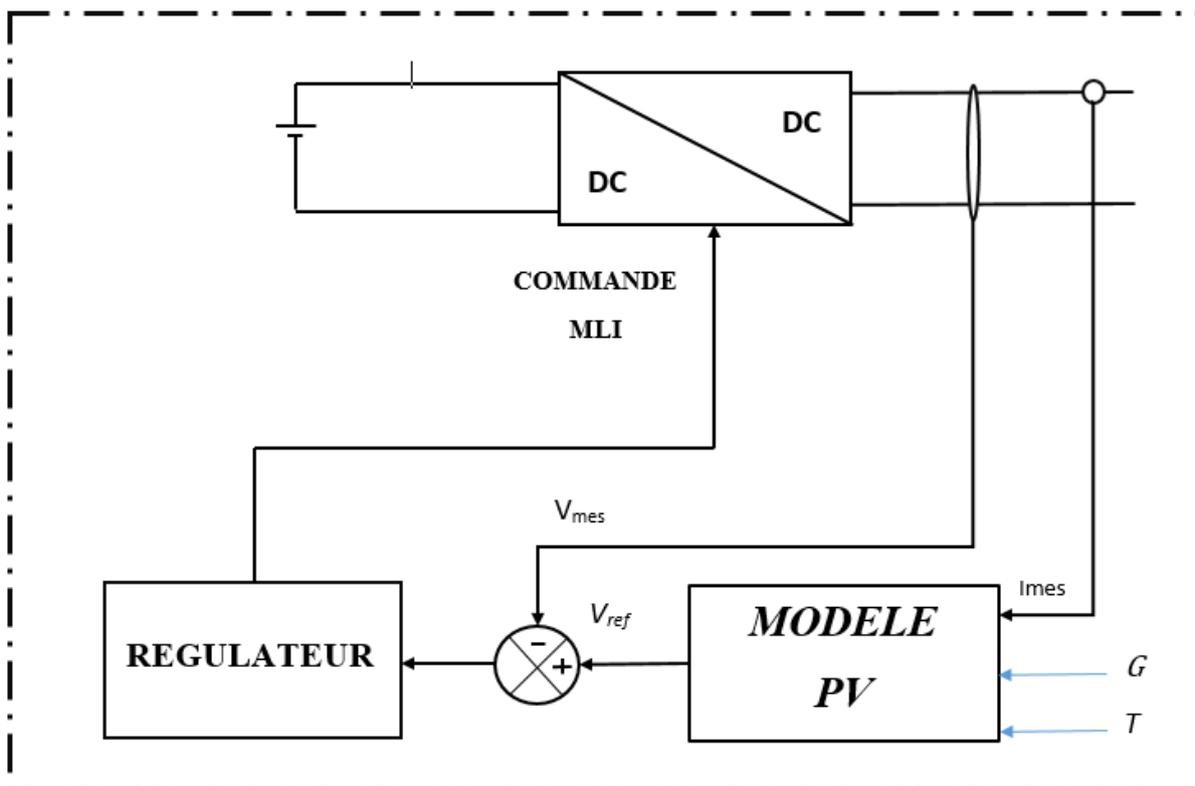


Figure.2 1: Schéma synoptique de l'émulateur solaire

Le bloc de modèle PV calcule la tension de référence en fonction du comportement I-V du panneau photovoltaïque. Les entrées sont les vecteurs du rayonnement solaire, la température et le courant fournis par l'étage de puissance de la charge. Ce modèle est à base de cellule photovoltaïque à diode et une résistance de shunt (5 paramètres). Cependant, l'équation de la cellule solaire ne peut être résolue de façon explicite en général pour son courant de sortie. Pour cette raison, les méthodes

## Chapitre II : Modélisation et simulation de l'émulateur solaire

numériques sont nécessaires pour obtenir la solution de la relation I-V du panneau photovoltaïque.

Dans cette étude, la méthode de Newton-Raphson est utilisée pour calculer la tension de sortie en fonction de l'irradiation solaire, la température et du courant de sortie. Pour le bloc régulateur PI, la différence entre la tension de référence et les échantillons de la tension de charge fournit l'entrée pour le régulateur PI pour obtenir un rapport cyclique approprié. Jusqu'à présent, la plupart des chercheurs ont simulé leur propre émulateur PV en utilisant un convertisseur DC / DC [6,7,8].

Toutefois, toute modification du convertisseur DC / DC, tel que la charge, la fréquence, l'inductance et les valeurs de capacité de commutation, exige le calcul de la solution de notre modèle PV mathématique. D'autre part, la structure du système de l'émulateur PV présenté dans ce chapitre est très flexible en terme de ses aspects de conception.

Dans la suite de ce chapitre nous allons détailler chaque partie de cette structure (émulateur PV).

### II.2. Modélisation d'un system photovoltaïque

#### II.2.1. Modèle à une diode

Nous avons utilisé un modèle d'une diode bien connue incorporant la résistance shunt comme illustré sur la figure (2.2).

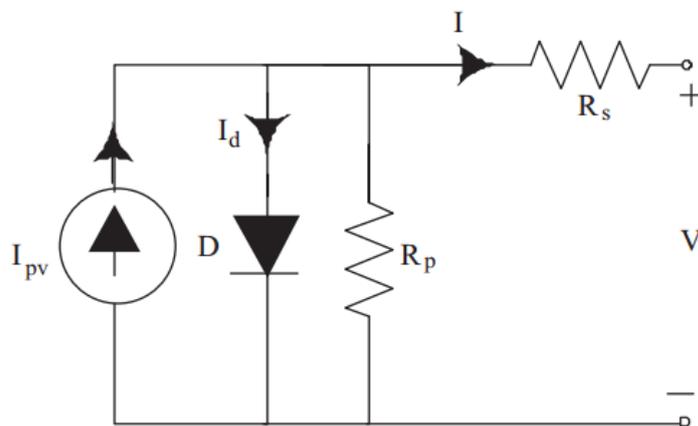


Figure.2 2: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Ce modèle offre un bon compromis entre la simplicité et la précision et une grande puissance. En utilisant ce modèle pour la simulation de dispositifs photovoltaïques avec un convertisseur de puissance. Son équation caractéristique est donné par  $E_q$  (2.1) [8].

$$I = I_{pv} - I_o \left[ \exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t A}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (2.1)$$

## Chapitre II : Modélisation et simulation de l'émulateur solaire

Avec :

$I_{pv}$  : Courant photoélectrique [ A ]

$I_o$  : Courant de saturation de la Diode [ A ]

$V_t$  : Tension thermique de jonction [ V ]

$V$  : Tension de sortie [ V ]

$R_s$  : Résistance série de cellules [  $\Omega$  ]

$R_p$  : La résistance de shunt (parallèle) [  $\Omega$  ]

$A$  : Facteur d'idéalité de la diode

$V_t = kT / q$ ,  $q$  est la charge de l'électron [  $1.602 \times 10^{-19} C$  ] où  $k$  est la constante de Boltzmann [  $1,38 \times 10^{-23} J / K$  ], et  $T$  est la température de la cellule [ K ].

Dans le modèle ci-dessus, le courant photoélectrique,  $I_{pv}$ , comprend des termes pour gérer les variations du rayonnement et la température, et le courant de saturation de la diode,  $I_o$ , comprend un terme pour gérer les changements de température [13]. Le modèle ci-dessus est complété par les équations suivantes. Le courant photoélectrique est défini par  $E_q$  (2.2):

$$I_{pv} = \frac{G}{G_n} (I_{scn} + K_i (T - T_n)) \quad (2.2)$$

Où  $I_{scn}$  est le courant de court-circuit à les conditions de test standard ( $T_n = 25^\circ C$ ,  $G_n = 1000 (w / m^2)$ ) et  $T$  et  $T_n$  sont les températures réelles et la consigne en (K), respectivement;  $G (w / m^2)$  est le rayonnement sur la surface du dispositif et  $G_n$  est le rayonnement nominal; et  $K_i$  est le coefficient température pour le courant du court-circuit (A / K).

La dépendance du courant de saturation de la diode à la température est exprimée comme par  $E_q$  (3).

$$I_o = \frac{I_{scn} + K_i (T - T_n)}{\exp((V_{ocn} + K_v (T - T_n) / AV_t) - 1)} \quad (2.3)$$

## Chapitre II : Modélisation et simulation de l'émulateur solaire

Où  $V_{ocn}$  est la tension en circuit ouvert (tension nominal) et  $I_{scn}$  est le courant de court-circuit [8].

### II.2.2. Modèle de PV utilisé dans la structure de l'émulateur

Dans la figure (2.2), le modèle de PV utilise le courant mesuré pour calculer la tension de référence. Donc d'après le modèle de panneau l'équation (2.3), on peut considérer l'équation comme  $f(V)=0$ , [8]. Avec ;

$$f(V) = -I + I_{pv} - I_o \left[ \exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t A}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (2.4)$$

Cette équation est non linéaire, d'où la nécessité de faire appel à des méthodes itératives telle que la méthode de Newton-Raphson. L'Algorithme de Newton-Raphson est donné par (annexe a) :

$$V_{i+1} = V_i - \frac{f(V_i)}{f'(V_i)} \quad (2.5)$$

### II.3. Modélisation du Convertisseur DC-DC (Hacheur)

Dans cette partie, nous allons développer le modelé statique et dynamique d'un hacheur série (Buck). La figure (2.3) illustre le schéma électrique du convertisseur. Il est basé sur deux interrupteurs (mosfet et diode) qui fonctionnent en complémentaire durant une période, un filtre LC et une résistance prise comme une charge [9].

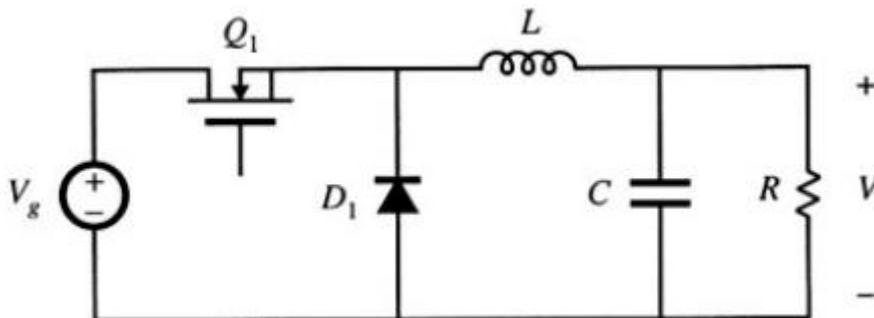


Figure.2 3: Convertisseur série (buck)

#### II.3.1. Modelé Statique

Supposons que les interrupteurs sont idéaux, alors le convertisseur peut être représenté comme suite :

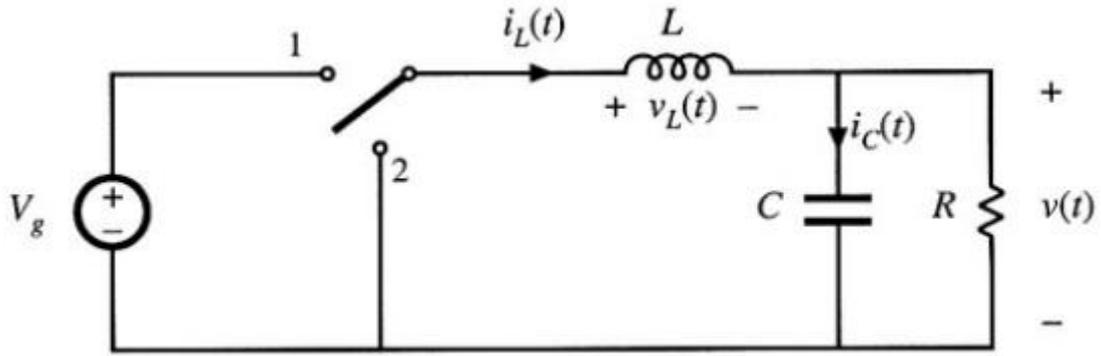


Figure.2.4: *Convertisseur série (buck) idéal*

Le mode de fonctionnement durant une période :

$0 < t < DT_s$  Interrupteur 1 fermée

$DT_s < t < T_s$  Interrupteur 2 fermée avec  $D = \text{rapport cyclique}$

Afin d'établir les équations qui décrivent le fonctionnement du hacheur, nous allons se baser sur la technique qui considère que les ondulations sont négligeable (Small Ripple Approximation), que la valeur moyenne de la tension au borne du l'inductance durant le régime permanent est nulle, et que la valeur moyenne du courant dans le condensateur est nulle. Cette technique est connue sous le nom « Inductance Second Balance, Capacitor Charge Balance » [9].

- durant l'intervalle :  $0 < t < DT_s$

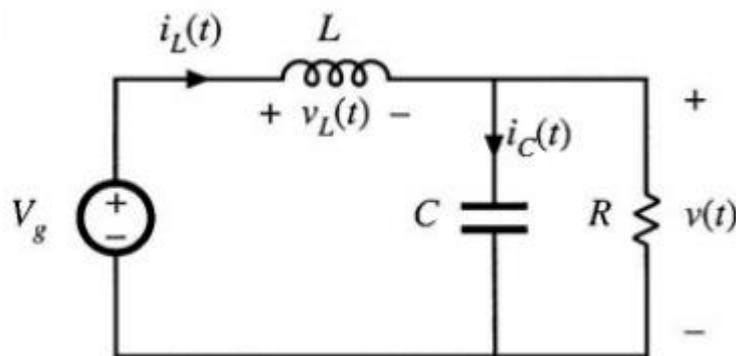


Figure.2.5 : *Convertisseur série (buck) idéal*

Pendant le premier intervalle en développe les deux équations «  $V_L, I_C$  ».

$$v_L = v_g - v \tag{2.6.1}$$

## Chapitre II : Modélisation et simulation de l'émulateur solaire

$$i_c = i_L - \frac{v}{R} \quad (2.7.1)$$

En négligeant les perturbations les équations Eq(2.7.1) et Eq(2.6.1) deviendront

$$V_L = V_g - V \quad (2.6.2)$$

$$I_c = I_L - \frac{V}{R} \quad (2.7.2)$$

- durant l'intervalle :  $DT_s < t < T_s$

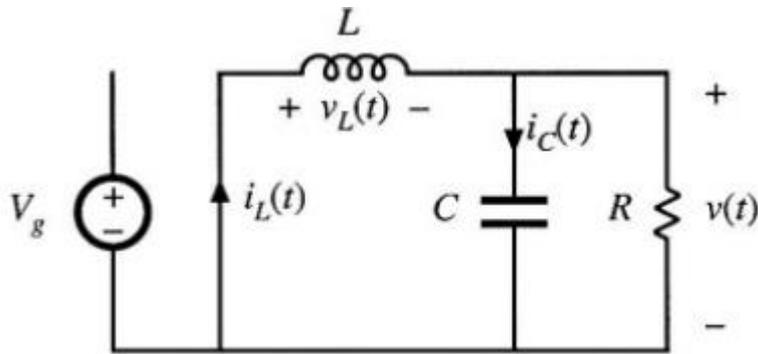


Figure.2 6: Interrupteur est en position 2

Pendant le deuxième intervalle en développe les deux équations «  $V_L, I_c$  ».

$$v_L = -v \quad (2.8.1)$$

$$i_c = -\frac{v}{R} \quad (2.9.1)$$

En négligeant les perturbations les équations deviendront :

$$V_L = -V \quad (2.8.2)$$

$$I_c = -\frac{V}{R} \quad (2.9.2)$$

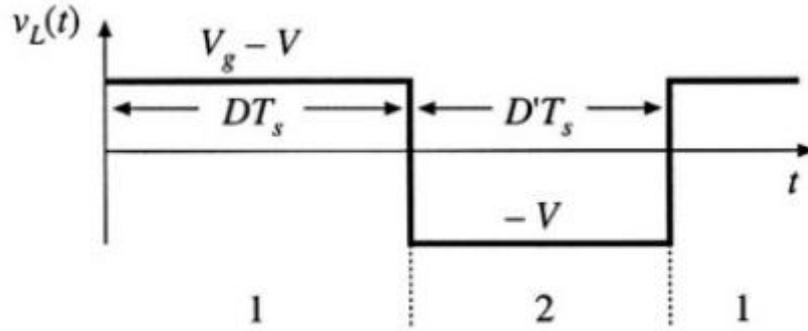


Figure.2 7: *Forme d'onde de la tension au borne de l'inductance « v<sub>L</sub> »*

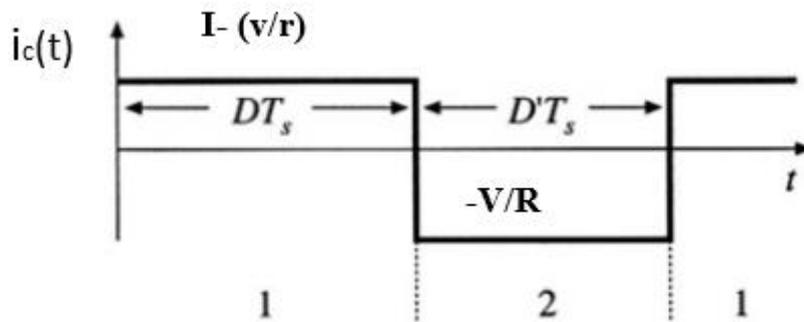


Figure.2 8: *Forme d'onde de courant qui circule dans la capacité « i<sub>c</sub> »*

Appliquant la technique de « Capacitor Charge Balance and Inductance Second Balance »

$$\langle V_L \rangle = 0 = \frac{1}{T_s} \left[ DT_s \times (V_g - V) + (1 - D) \times T_s \times (-V) \right] \quad (2.10.1)$$

$$V = DV_g \quad (2.10.2)$$

$$\langle I_c \rangle = 0 = \frac{1}{T_s} \left[ DT_s \times \left( I - \frac{V}{R} \right) + T_s (1 - D) \times \left( -\frac{V}{R} \right) \right] \quad (2.11.1)$$

$$I = \frac{V}{DR} \quad (2.11.2)$$

### II.3.2. Modèle dynamique

D'un point de vue dynamique, il est nécessaire de linéariser notre système autour d'un point de fonctionnement (small signal analysis). Les grandeurs du convertisseur sont définies comme suite [9]:

## Chapitre II : Modélisation et simulation de l'émulateur solaire

$$\left. \begin{aligned} v_g(t) &= V_g + \tilde{v}_g(t) \\ d(t) &= D + \tilde{d}(t) \\ v(t) &= V + \tilde{v}(t) \\ i_L &= I_L + \tilde{i}_L(t) \\ v_L(t) &= V_L + \tilde{v}_L(t) \\ i_c(t) &= I_c + \tilde{i}_c(t) \end{aligned} \right\} (2.12)$$

D'après l'analyse du convertisseur en régime statique on peut écrire :

$$\langle v_L \rangle = \left[ d \times (v_g - v) + (1-d) \times (-v) \right] \quad (2.13)$$

$$\langle i_c \rangle = \left[ d \times \left( i - \frac{v}{R} \right) + (1-d) \times \left( -\frac{v}{R} \right) \right] \quad (2.14)$$

On remplace les variables définis dans l'équation (2.12), par leurs grandeurs dans les équations (2.13) et (2.14) dans on obtient les deux équations suivantes :

$$L \frac{d\langle I + \tilde{i}_L(t) \rangle}{dt} = (D + \tilde{d}(t)) \left[ (V_g + \tilde{v}_g(t)) - (V + \tilde{v}(t)) \right] + (D' - \tilde{d}(t)) (-V - \tilde{v}(t)) \quad (2.15.1)$$

$$L \frac{d\langle I + \tilde{i}_L(t) \rangle}{dt} = \left[ \underbrace{DV_g - DV - D'V}_{DC\_termes} \right] + \left[ \underbrace{D\tilde{v}_g(t) - D\tilde{v}(t) + \tilde{d}(t)V_g - \tilde{d}(t)V - D'\tilde{v}(t) + \tilde{d}(t)V}_{Equation\_1^{er\_ordre}} \right] + \left[ \underbrace{\tilde{d}(t)\tilde{v}(t) - \tilde{d}(t)\tilde{v}(t) + \tilde{d}(t)\tilde{v}(t)}_{Equation\_2^{eme\_ordre}} \right] \quad (2.15.2)$$

On obtienne :

$$L \frac{d\tilde{i}(t)}{dt} = D\tilde{v}(t)_g - \tilde{v}(t) + \tilde{d}(t)V_g \quad (2.15.3)$$

$$C \frac{d\langle V + \tilde{v}(t) \rangle}{dt} = (D + \tilde{d}(t)) \left[ (I + \tilde{i}(t)) - \frac{(V + \tilde{v}(t))}{R} \right] + (D' - \tilde{d}(t)) \left( \frac{-V - \tilde{v}(t)}{R} \right) \quad (2.16.1)$$

## Chapitre II : Modélisation et simulation de l'émulateur solaire

$$C \frac{d(V+\tilde{v}(t))}{dt} = \underbrace{\left[ DI - D \frac{V}{R} + D' \left( \frac{-V}{R} \right) \right]}_{DC\_terme} + \underbrace{\left[ D\tilde{i}(t) - D \frac{\tilde{v}(t)}{R} + I\tilde{d}(t) - \tilde{d}(t) \frac{V}{R} + \tilde{d}(t) \frac{V}{R} - D' \frac{\tilde{v}(t)}{R} \right]}_{Equation\_1^{er\_ordre}} + \underbrace{\left[ \tilde{d}(t)\tilde{i}(t) - \frac{\tilde{v}(t)}{R}\tilde{d}(t) + \frac{\tilde{v}(t)}{R}\tilde{d}(t) \right]}_{Equation\_2^{eme\_ordre}} \quad (2.16.2)$$

$$C \frac{d\tilde{v}(t)}{dt} = \left[ D\tilde{i}(t) - \frac{\tilde{v}(t)}{R} + I\tilde{d}(t) \right] \quad (2.16.3)$$

D'après les équations (2.15.3) et (2.16.3), on peut construire le schéma canonique équivalent du modèle dynamique de l'hacheur série (Buck) [9].

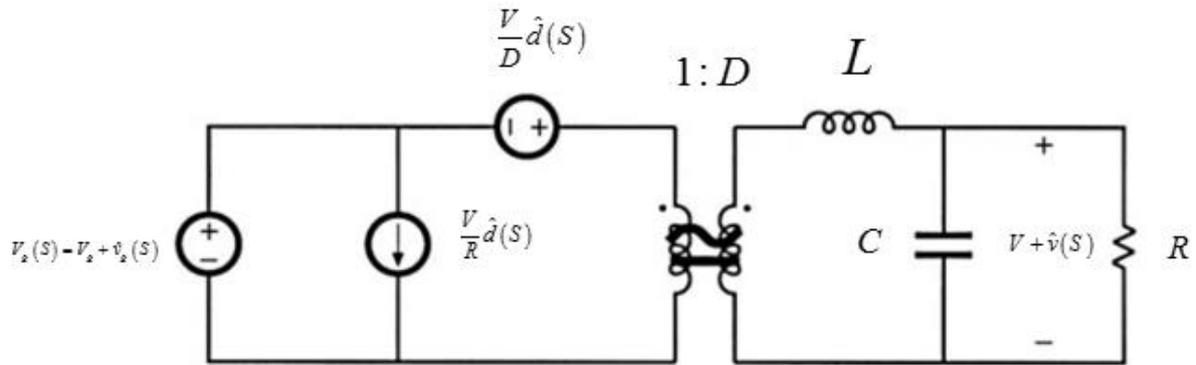


Figure.2 9: Schéma canonique équivalent du modèle dynamique hacheur série idéal

### II.4. Fonction De transféré Du Convertisseur

Dans cette partie, les fonctions de transfert du convertisseur seront développées, en se basant sur le schéma canonique développé précédemment. La sortie  $\tilde{v}$  du convertisseur dépend de deux variables à savoir  $\tilde{d}$  et  $\tilde{v}_g$ .

$$\tilde{v} = G_d \tilde{d} + G_v \tilde{v}_g \quad (2.17)$$

$$G_d = \left. \frac{\tilde{v}}{\tilde{d}} \right|_{\tilde{v}_g=0} \quad (2.18)$$

$$G_v = \left. \frac{\tilde{v}}{\tilde{v}_g} \right|_{\tilde{d}=0} \quad (2.19)$$

$$G_d = \frac{\frac{V}{D}}{1 + \frac{SL}{R} + \left( \frac{S}{\sqrt{LC}} \right)^2} \quad (2.20)$$

$$G_v = \frac{D}{1 + \frac{SL}{R} + \left( \frac{S}{\sqrt{LC}} \right)^2} \quad (2.21)$$

Les fonctions  $G_d$  et  $G_v$  peuvent être présentés sous la forme canonique d'un système 2<sup>ème</sup> ordre.

$$G_d = \frac{Gd_0}{1 + \frac{S}{Q\omega_0} + \left( \frac{S}{\omega_0} \right)^2} \quad (2.22)$$

$$G_v = \frac{G_{s0}}{1 + \frac{S}{Q\omega_0} + \left( \frac{S}{\omega_0} \right)^2} \quad (2.23)$$

Avec :  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  et  $Q = R\sqrt{\frac{C}{L}}$ ,  $Q$  (facteur de puissance).

## II.5. Commande De Convertisseur En Boucle Fermée

La structure du convertisseur en boucle fermée est donnée comme suite :

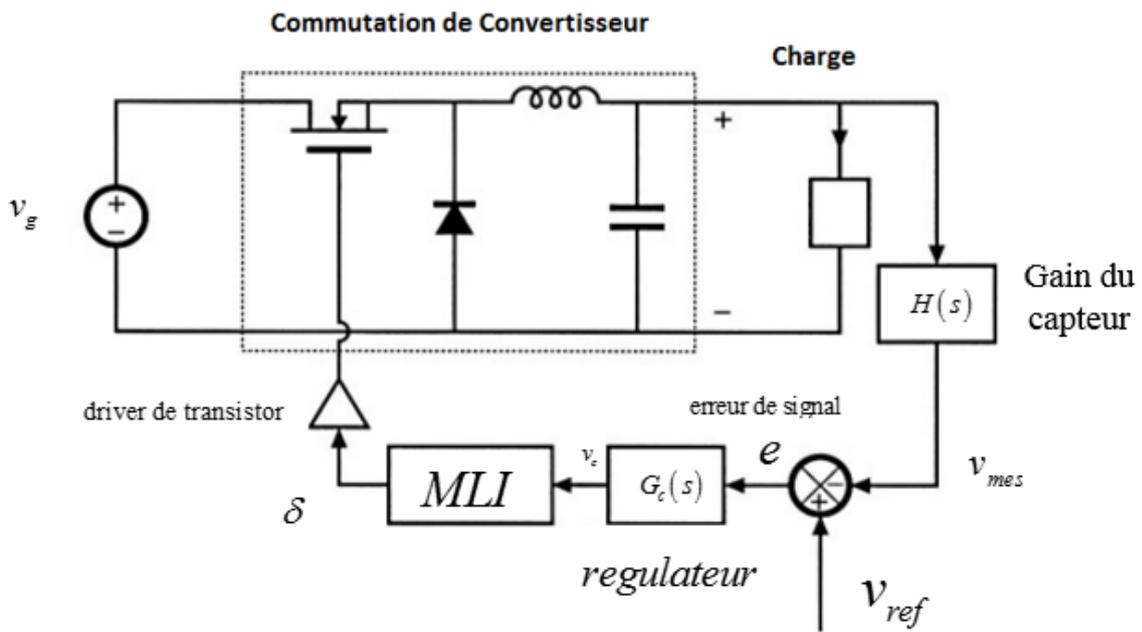


Figure.2 10: convertisseur Buck en boucle fermée

Le schéma bloc en boucle fermée du système est représenté par la figure suivante :

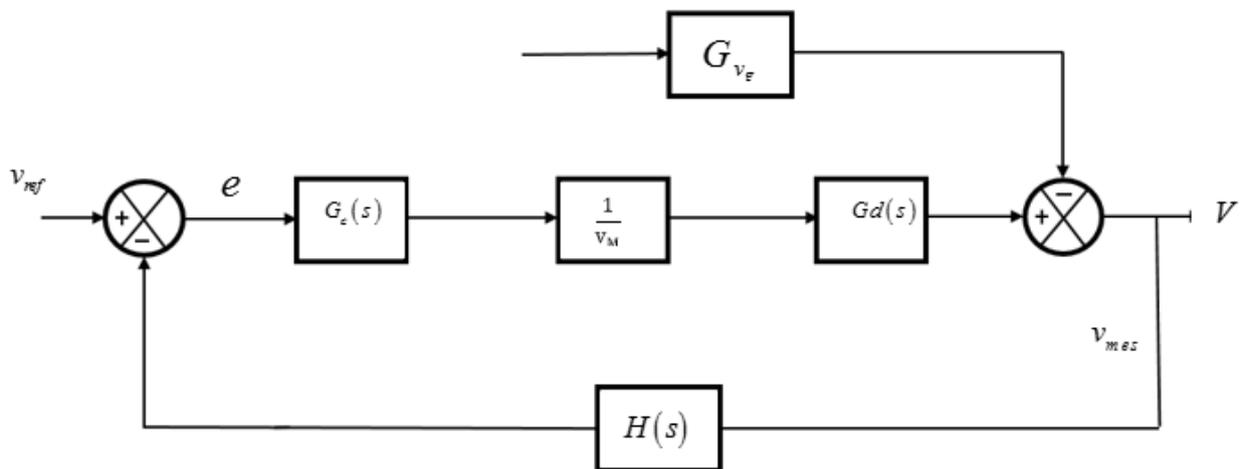


Figure.2 11: schéma bloc convertisseur Buck en boucle fermée

La fonction de transfert en boucle fermée du schéma bloc est :

$$G_{BF} : v = \frac{1}{H(s)} \frac{T_i}{1+T_i} v_{ref} + \frac{1}{1+T_i} v_g \quad (2.24)$$

## Chapitre II : Modélisation et simulation de l'émulateur solaire

Avec :  $T_i = \frac{G_c(s)Gd(s)}{V_M}$  fonction de transfert de la chaîne direct

Si on choisit  $G_c(s)$  tel que le gain de la fonction  $T_i(s)$  est très supérieur à « 1 » c'est-à-dire  $\|T_i\| \gg 1$ , on peut déduire que :

$$v = \frac{1}{H(s)} v_{ref}, \text{ avec : } \begin{cases} \frac{T_i}{1+T_i} = 1 \\ \frac{1}{1+T_i} = 0 \end{cases} \quad \|T_i\| = 1$$

### II.6. Résultats de simulation

Nous allons développer dans cette section les simulations du modèle du convertisseur en boucle fermée. Les paramètres de l'hacheur sont :

Grandeur	V <sub>g</sub>	L	C	R	V <sub>M</sub>	f <sub>s</sub>	H(s)	V <sub>ref</sub>
Valeur	50 V	1 mH	470µF	5 Ω	4 V	30 KHz	1	25 V

Tableau (2.1) : Grandeurs de l'hacheur

La figure (2.12) représente la réponse fréquentielle de la fonction de transfert en boucle fermée en considérant le régulateur  $g(s)=1$ . On peut constater que le gain de  $T_i$  est égal 1 à la fréquence 15KHz. Donc la région où la fréquence est inférieure à  $f_{cr}$  le contrôle de la sortie est acceptable.

Afin d'améliorer notre commande augmenter la fréquence  $f_s$  et assurer une marge de phase (positive), nous allons adopter un régulateur de type PI dont la fonction de transfert est égale  $G(s) = \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right)$ . La figure (2.13) illustre la réponse fréquentielle de la fonction de transfert  $T_i$  avec un régulateur PI. On peut voir clairement que la fréquence  $f_{cr}$  a augmenté ce qui garantit une grande marge de fréquence dont  $T_i \gg 1$ .

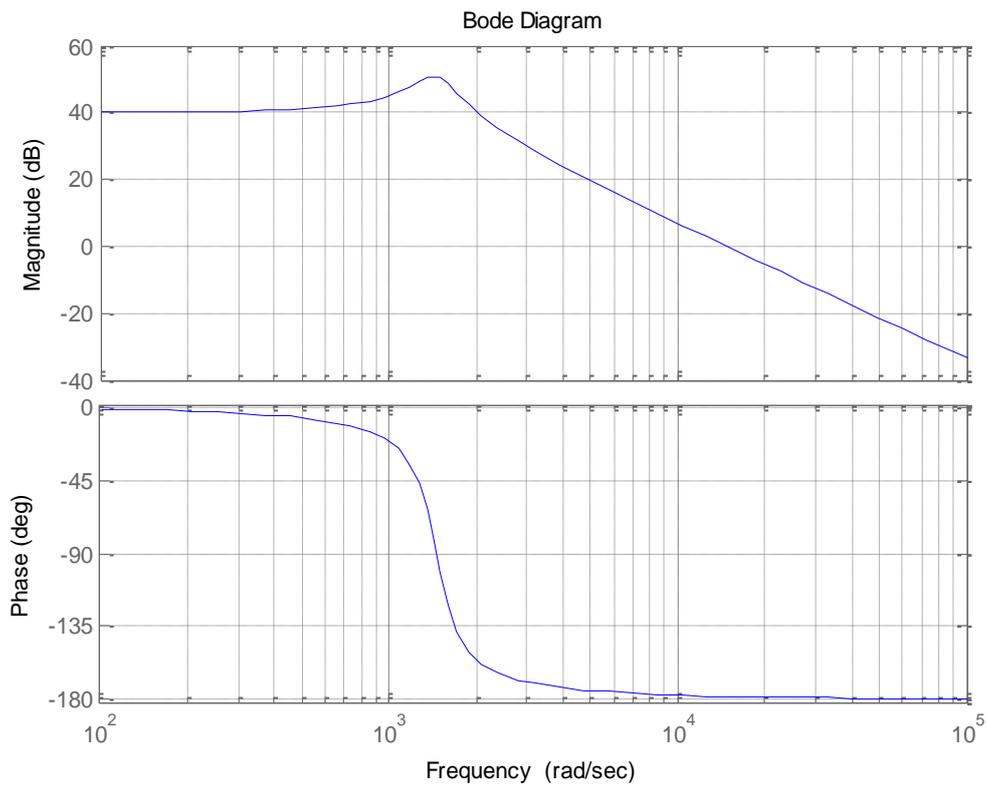


Figure.2 12: représente la réponse fréquentielle avec  $g(s)=1$

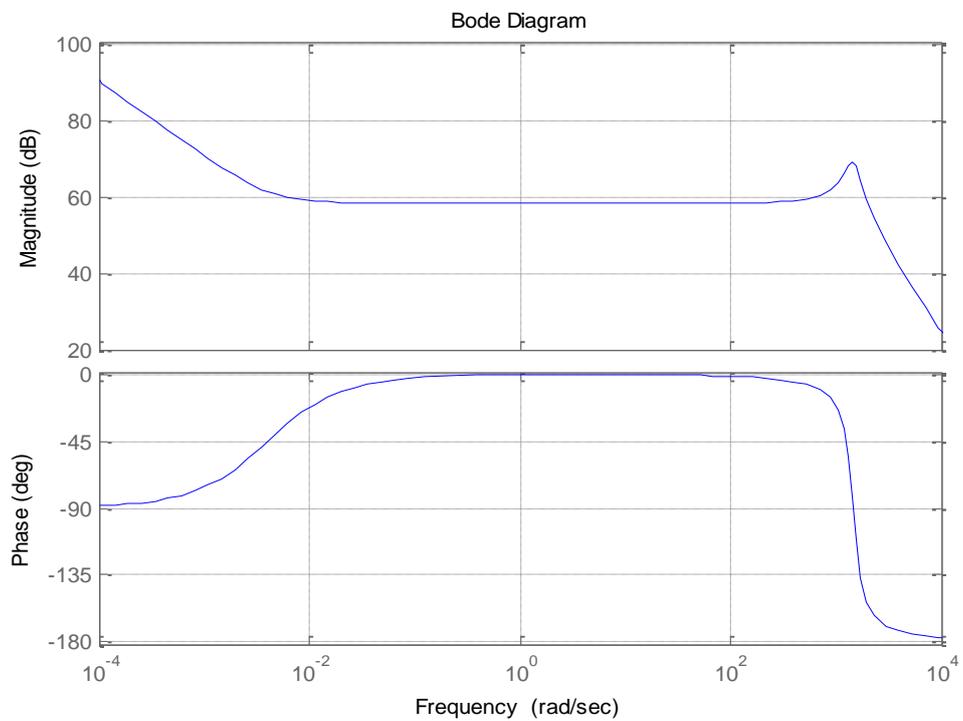


Figure.2 13: la réponse fréquentielle avec un régulateur PI

## Chapitre II : Modélisation et simulation de l'émulateur solaire

Les figures (2.14) illustrent respectivement la réponse temporelle de la tension et le courant de sortir.

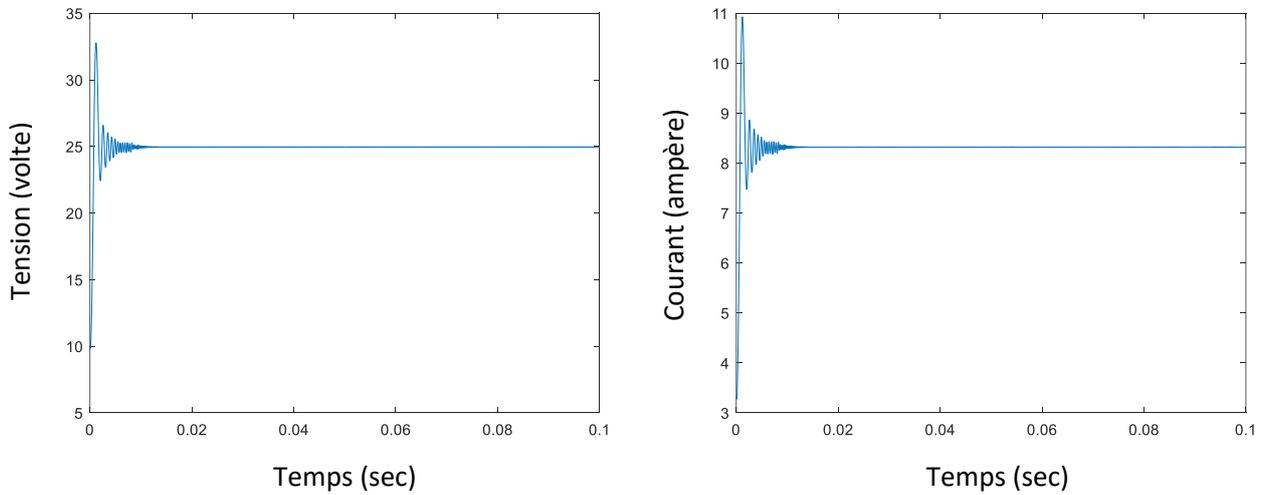


Figure.2 14: *Tension et Courant de sortie*

On constate que la sortie suit parfaitement sa référence avec une bonne dynamique (temps de réponse est de l'ordre du 0.01 seconde).

### II.7. Simulation de l'émulateur PV

Après la présentation des différentes parties de la structure émulateur PV, nous allons implémenter cette structure figure (1.15) sous Matlab-Simulink.

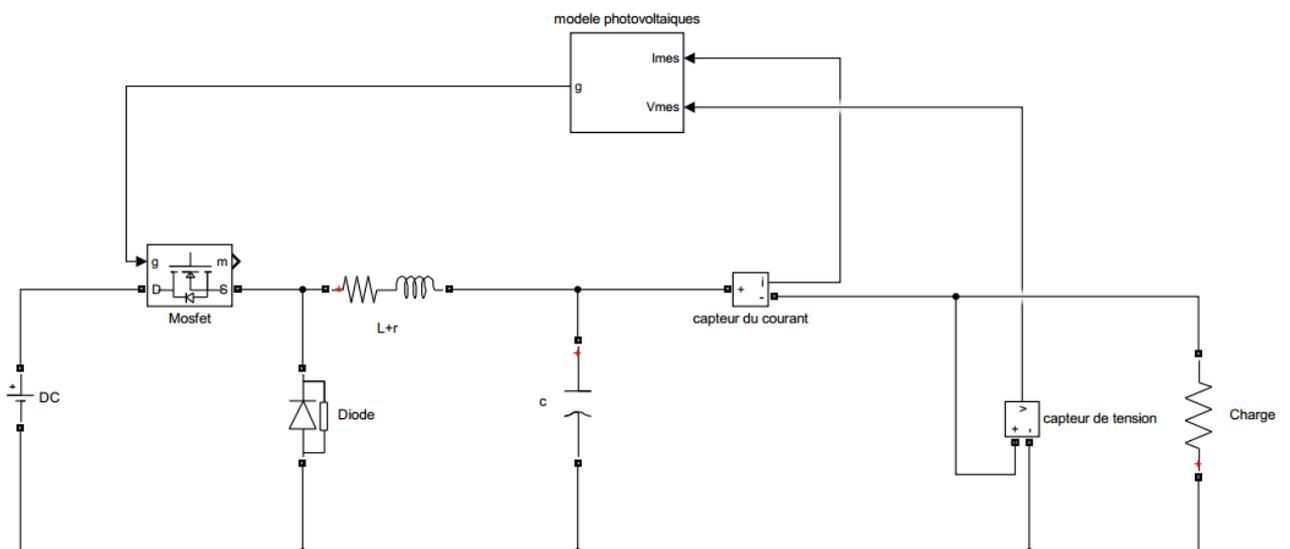


Figure.2 15: émulateur PV sous Matlab-Simulink

## Chapitre II : Modélisation et simulation de l'émulateur solaire

Plusieurs tests seront mis en œuvre afin d'étudier l'influence des différents paramètres (éclairage et la température) caractérisant le panneau solaire.

### II.7.1. Influence de l'éclairément

La figure (2.16), (2.17) présente un exemple des courbes du courant, tension et la puissance pour différents niveaux de rayonnement.

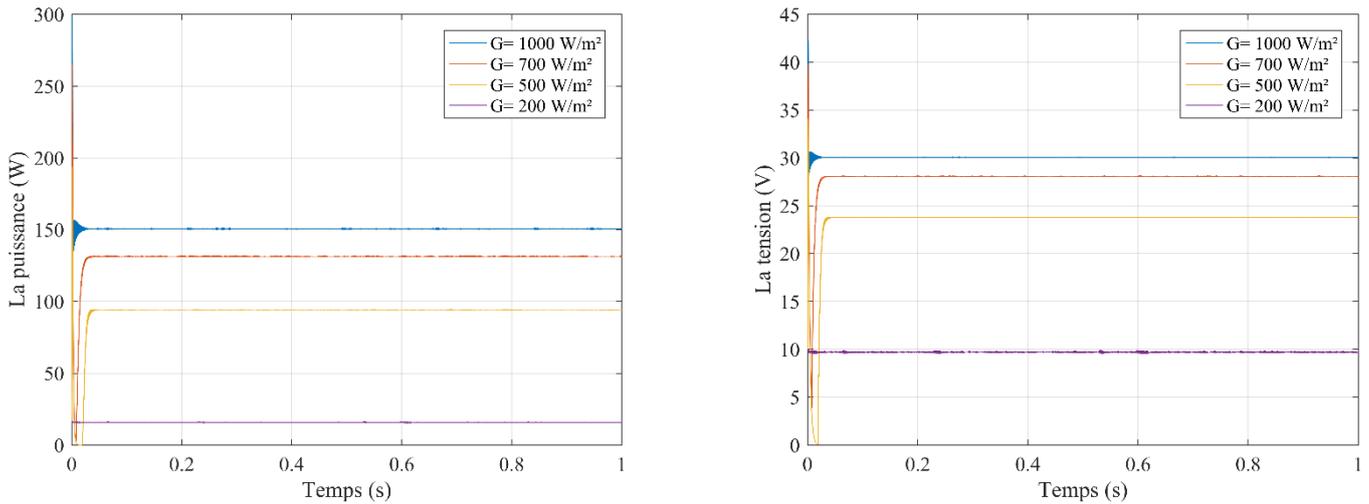


Figure.2 16: caractéristiques  $p(t)$  et  $V(t)$  d'un émulateur solaire

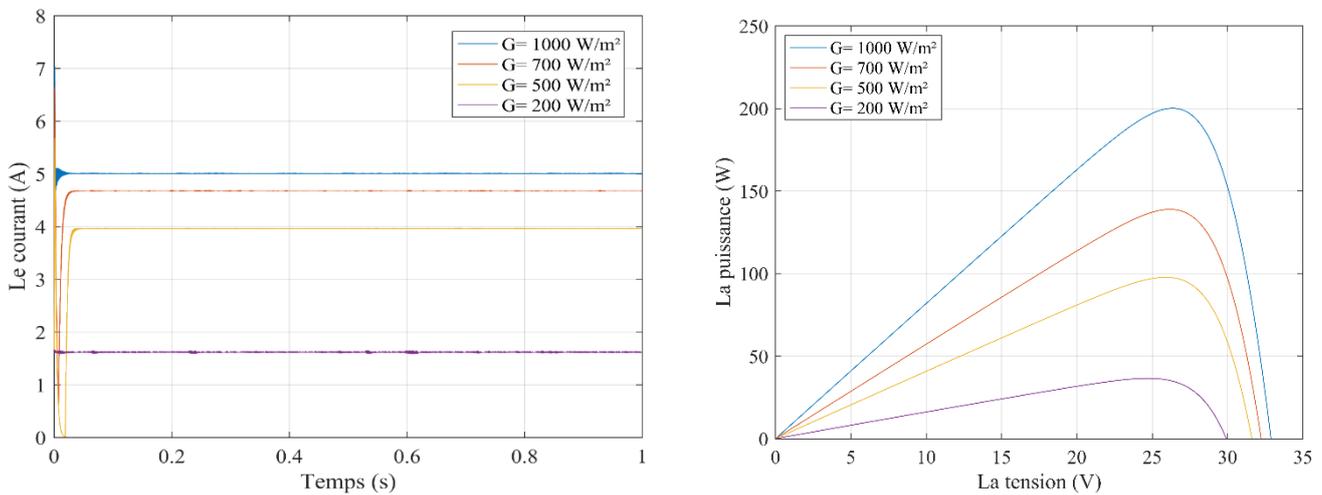


Figure.2 17: caractéristiques  $I(t)$  et  $p(v)$  d'un émulateur solaire

On voit que la puissance de sortie de notre émulateur est proportionnelle aux radiations solaires et les deux courbes qui représente le courant et la tension suivent parfaitement la puissance.

## Chapitre II : Modélisation et simulation de l'émulateur solaire

Pour un  $G = 1000(W / m^2)$  on obtienne une puissance maximale qui ne représente pas le point de fonctionnement maximal.

### II.7.2. Influence de la température

Les figures (2.18), (2.19) présentent respectivement les caractéristiques de fonctionnement de cellule PV  $p(t)$ ,  $I(t)$  et  $V(t)$  pour des différentes températures :

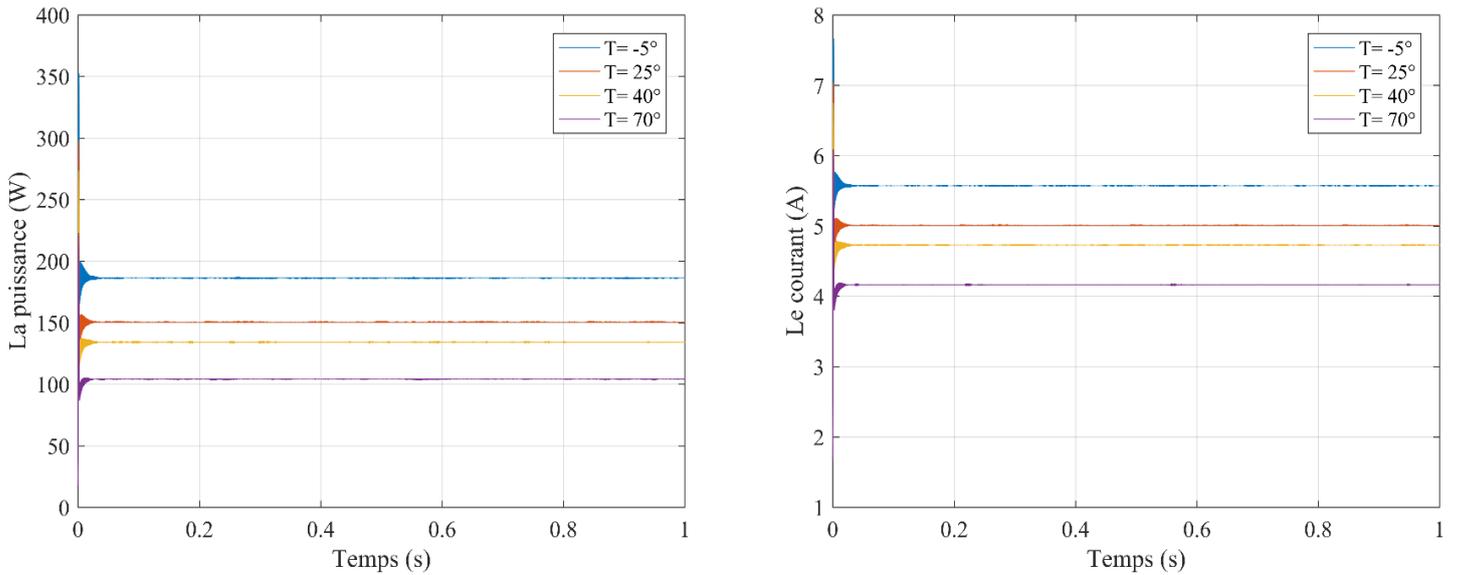


Figure.2 18: caractéristiques  $p(t)$  et  $I(t)$  d'un émulateur solaire

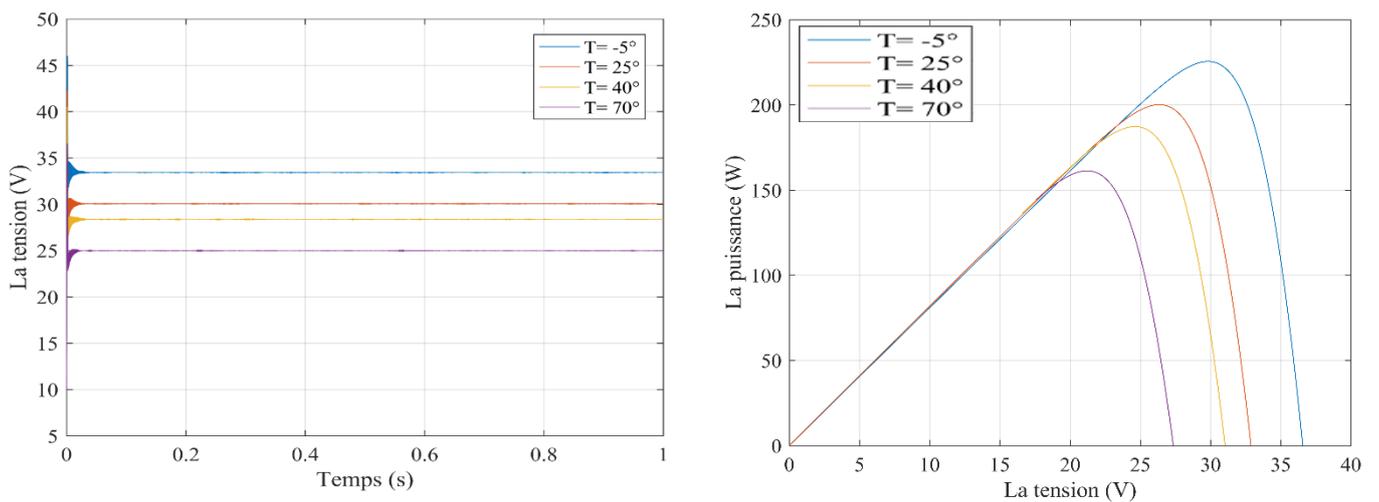


Figure.2 19: caractéristiques  $V(t)$  d'un émulateur solaire

## Chapitre II : Modélisation et simulation de l'émulateur solaire

On remarque que la variation de la température influe sur les grandeurs de sortie d'une façon inversé quand la température augmente les grandeurs diminuent et l'inverse.

### **2.2. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté un simulateur capable de modéliser l'ensemble des composants matériels et logiciels d'un émulateur solaire. Le composant matériel de l'émulateur sous-jacent que nous avons simulé est un convertisseur buck. Le composant logiciel de l'émulateur est un modèle à 5-paramètres d'un panneau PV qui est connecté à un régulateur PI. Notre système global de simulation peut produire le comportement électrique d'un PV pour diverses conditions d'éclairement solaire, et de température. La performance du modèle émulateur PV proposé a été testée dans des conditions dynamiques, et les résultats obtenus sont très satisfaisants.

## Chapitre III : Implémentation hardware

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter la réalisation expérimentale de notre émulateur solaire. Il sera question dans un premier lieu de simuler le système sous logiciel Proteus. Ensuite deux parties seront essentielles pour l'implémentation de cet émulateur : partie soft et hard. Dans la partie soft nous allons développer un code permettant de résoudre les équations de PV et commander l'hacheur via un microcontrôleur ATmega328. Dans la partie hard, nous allons essayer de mettre en œuvre la réalisation pratique de notre émulateur. A la fin des résultats expérimentaux vont être présentés.

### III.2. Protocole de réalisation

Dans la suite de cette partie nous allons développer, les éléments essentiels pour la mise en œuvre pratique de l'émulateur solaire. La figure (3.1) illustre le schéma global de notre système [8].

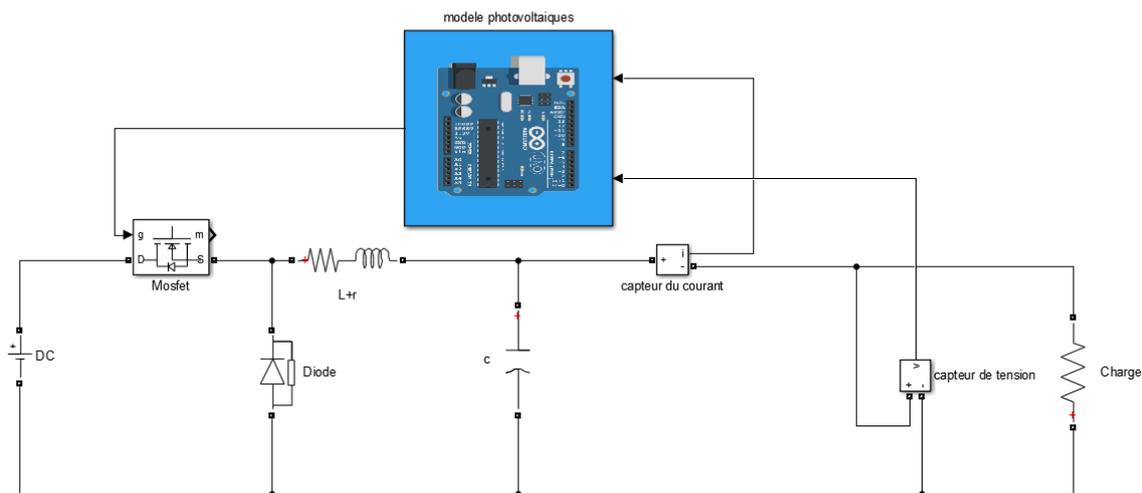


Figure.3. 1 : schéma global de l'émulateur solaire

#### III.2.1 Choix des composants

##### III.2.1.1 Carte arduino

La carte Arduino Uno est une carte à microcontrôleur basée sur l'ATmega328, elle dispose :

- De 14 broches numériques d'entrées/sorties (dont 6 peuvent être utilisées en sorties PWM (largeur d'impulsion modulée)),

## Chapitre III : Implémentation hardware

- De 6 entrées analogiques (qui peuvent également être utilisées en broches entrées/sorties numériques),
- D'un quartz 16Mhz,
- D'une connexion USB,
- D'un connecteur d'alimentation jack,
- D'un connecteur ICSP (programmation "in-circuit"),
- Et d'un bouton de réinitialisation (reset),

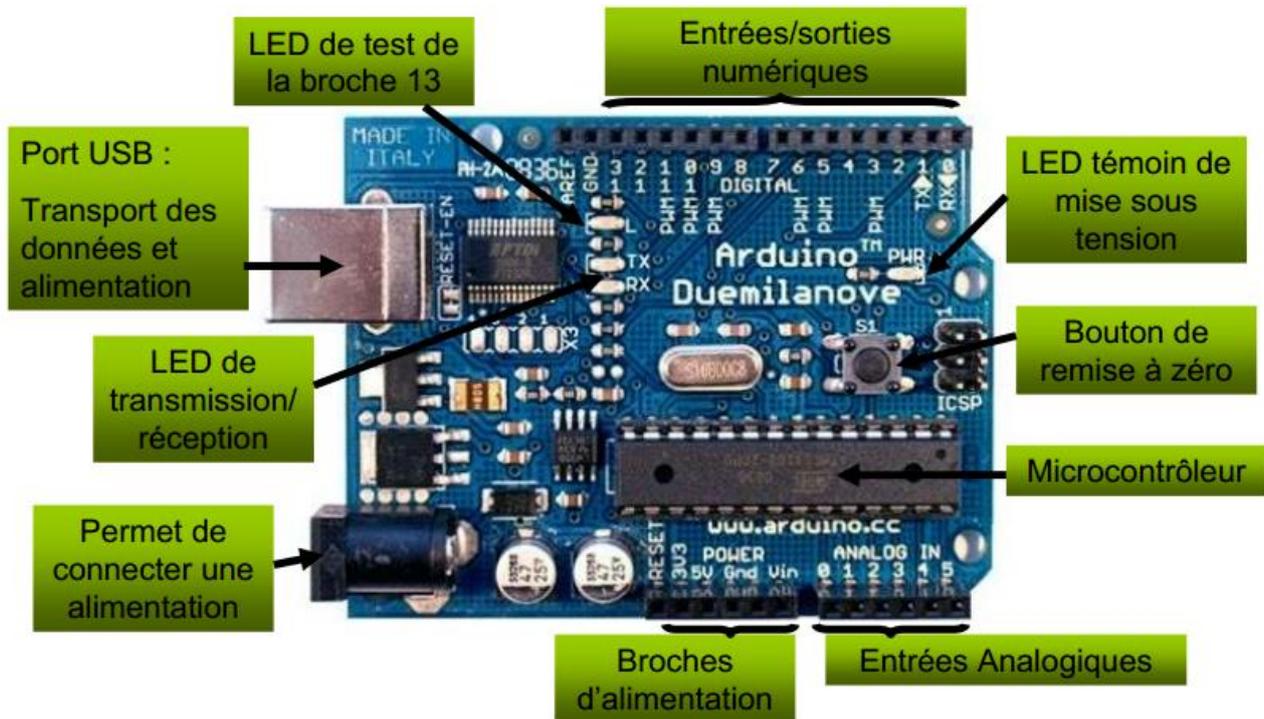


Figure.3. 2 : Broches de la carte Arduino Uno

Elle contient tout ce qui est nécessaire pour le fonctionnement du microcontrôleur pour pouvoir l'utiliser et se lancer, il suffit simplement de la connecter à un ordinateur à l'aide d'un câble USB (ou de l'alimenter avec un adaptateur secteur ou une pile, mais ceci n'est pas indispensable, l'alimentation étant fournie par le port USB) [12].

### III.2.1.2 Transistors MOSFET

Le convertisseur DC /DC utilisée pour l'émulateur solaire est basé sur un transistor de type MOSFET IRF 840, commandé par un signal MLI complété par le driver IR 2112. Nous avons porté notre choix sur ce type de transistor pour plusieurs raisons [11] :

- Il est commandé par la grille en tension et non en courant comme les transistors bipolaires,
- Il supporte une tension entre son Drain et sa Source DE 500 V,

### Chapitre III : Implémentation hardware

- Il supporte un courant de Drain de 8 A, à température ambiante et de 5A à 100°C,
- Il possède une faible résistance entre son Drain et sa Source à l'état fermé :  $R_{DS(on)} = 0.85(ohm)$  [10].

Transistor à effet de champ	Symbole
Le drain	D
La grille	G
La source	S

Tableau 3.1 : abréviation Mosfet

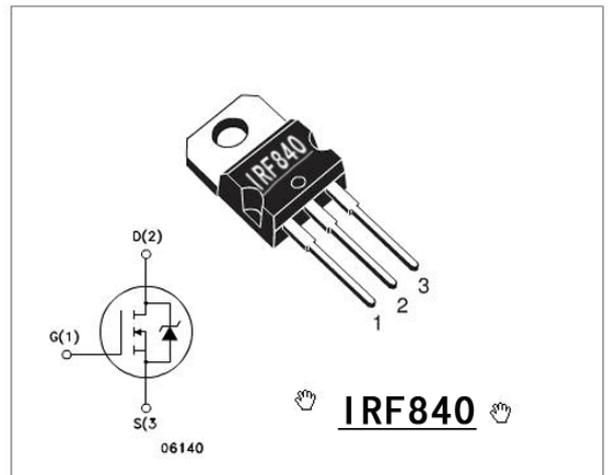


Figure.3. 3 : transistor de type MOSFELT IRF 840

#### III.2.2 Implémentation sous Proteus

Le schéma présenté dans la figure (3.1) va être implémenté sous le logiciel Proteus (figure (3.4)). L'avantage de tel logiciel et de permet de simuler le comportement physique des composants choisi pour cette réalisation.

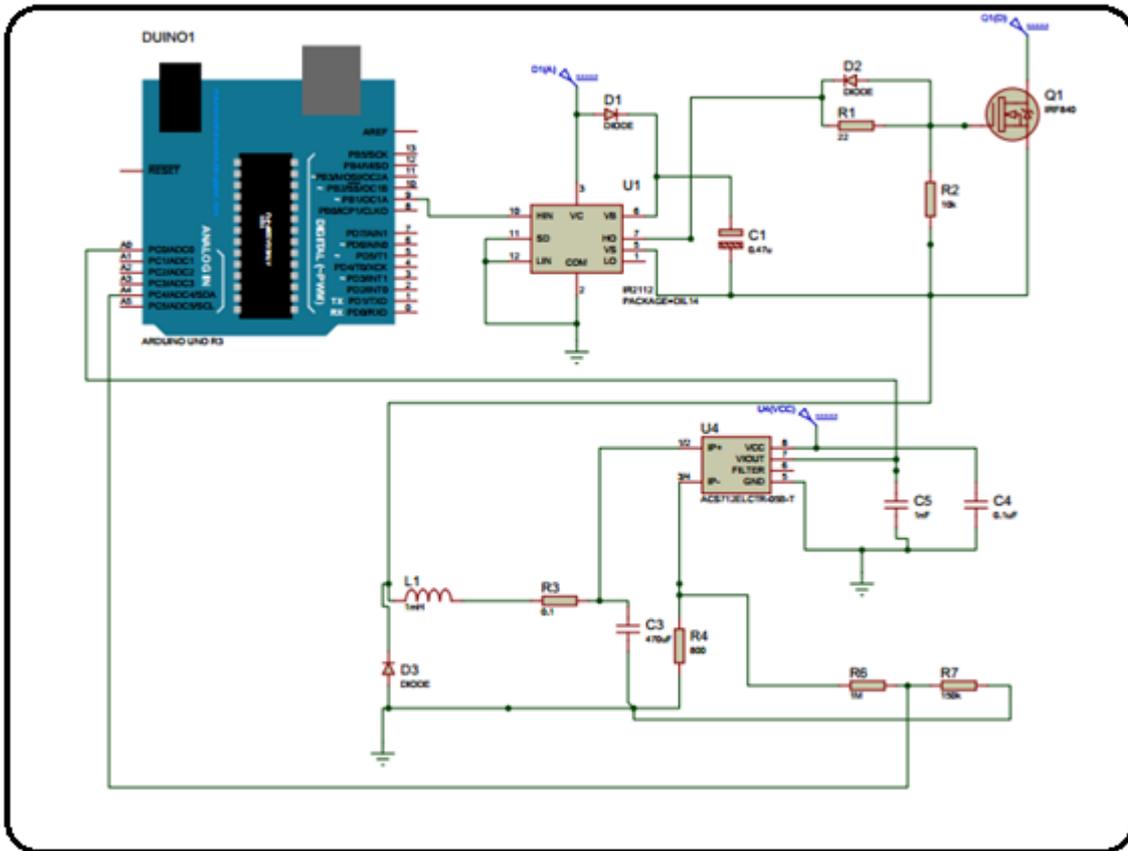


Figure.3. 4 :émulateur solaire sous Proteus

### III.2.3 Software implémentation

La programmation de l'arduino se fait via le logiciel Arduino IDE. Il est composée d'une interface graphique (éditeur de texte) et un compilateur ATmega328 qui prend en compte le langage C et C++. Le compilateur génère un fichier hexadécimal et le Arduino IDE se charge de programme directement le Uno via une connexion USB. Plusieurs bibliothèques sont proposées afin de faciliter la tâche du programmeur et d'accélérer le processus de développement.

Notre programme consiste essentiellement de trois parties essentielles :

- L'acquisition des grandeurs a mesurés : le courant et la tension de charge.
- Calcul de la tension de référence à partir du courant lu (modèle de PV).
- Calcul de la commande de l'hacheur afin de générer le rapport cyclique adéquat pour le contrôle du Mosfet.

## Chapitre III : Implémentation hardware

### III.2.3.1 L'acquisition du courant et de la tension

La mesure de courant a été faite via le capteur à effet hall de type ACS712A adapté aux applications arduino. La valeur captée va être numériser en 10 bits. Afin d'avoir une bonne mesure, nous allons prendre la moyenne de chaque dix mesure. Pour la mesure de tension nous avons utilisé un simple diviseur de tension.

### III.2.3.2 Modèle de PV

En utilisant le modèle mathématique du PV développé dans le chapitre 2. Nous avons développé un algorithme qui permet de calculer la tension de référence de l'émulateur à partir du courant. Nous avons utilisé la méthode de Newton-Raphson pour convergence rapide de la solution. La fonction développée est nommée **emu** (voir l'annexe B). Le problème de cette dernière (la méthode de Newton-Raphson) qu'elle prend un temps d'exécution important. Cependant la gestion du temps est primordial dans notre cas puisque la qualité et la stabilité de la tension de sortie dépend du déroulement du programme. Pour remédier à ce problème, nous devront avoir une gestion optimale du temps qui consiste que la fonction **V=emu (I)** doit être appelé une fois toute les 200 interruptions. Les interruptions sont générées par le timer1 a chaque période PWM (soit toute les **32μs**) [8].

### III.2.3.3 Commande de l'hacheur

On a adopté un régulateur PI qui lis la valeur de la tension de sortie, la compare avec la tension de référence générer par la fonction **V=emu (I)**. Le régulateur PI va générer le rapport cyclique D pour l'hacheur. Il s'agit d'une valeur sur 10 bit qui sert comme référence pour le registre OCR1A afin de générer un signal PWM. Le rapport cyclique est mis à jours à chaque période de PWM. Cette période est prédéfinie dans le Timer1 (31 KHz pour notre cas).

### III.2.4 Résultats expérimentaux

Afin de validé le fonctionnement de l'émulateur de panneau PV, la réalisation du système est basé sur un convertisseur abaisseur DC / DC a été réalisée dans notre laboratoire. Les détails de la manoeuvre du système PV panneau émulateur sont indiqués sur la figure (3.5). Les paramètres du panneau PV émulé sont présentés dans le tableau (3.2) et le matérielle de manipulation est présentés dans le tableau (3.3) [6] .

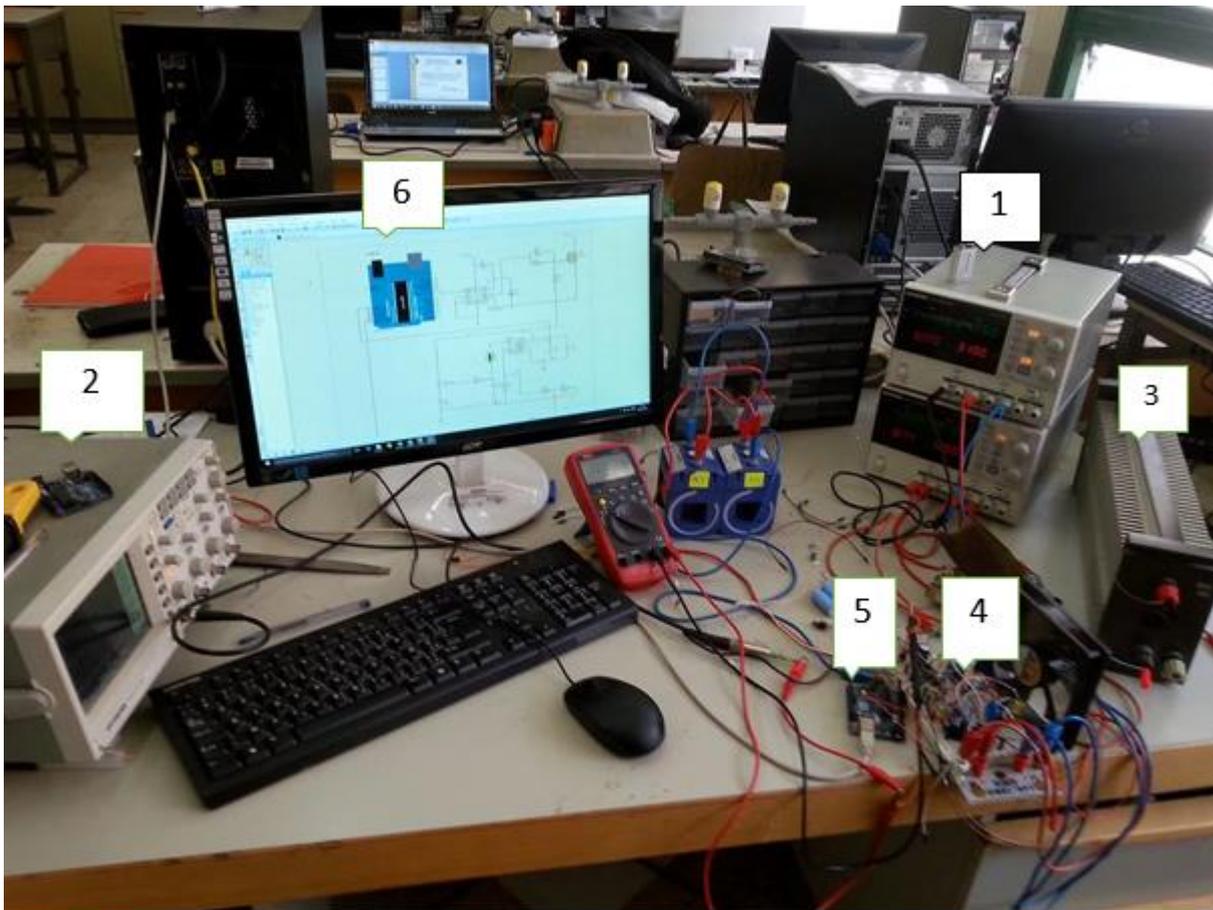


Figure.3. 5 :banc d'essai expérimentale de l'émulateur solaire

- 1) Alimentation ,2) Oscilloscope 3), Charge résistive ,4) hacheur, 5) Arduino ,(6) PC.

$I_{mp}$	7.61A
$V_{mp}$	26.3V
$P_{max,m}$	200.143W
$I_{sc}$	8.21A
$V_{oc}$	32.9V
$I_{o,n}$	$9.825 \cdot 10^{-8} A$
$I_{pv}$	8.214A
$a$	1.3
$R_p$	415.405 $\Omega$
$R_s$	0.221 $\Omega$

Tableau (3.2) : paramètres du panneau PV émulé

## Chapitre III : Implémentation hardware

Matérielles	Référence	Caractéristiques
Diode	1N4007	
	10ETF10	
Driver	IR2112	
transistor mosfet	IR840	PNP
capteur de courant	ACS712	
capacité	chimique	33 $\mu$ F 35V
		2200mF 35V
		470 $\mu$ F 60V
résistance	céramique	100nF
	rhéostats	100 $\Omega$ - 1.8A
	R	10 $\Omega$
		10K $\Omega$
		1M $\Omega$
150K $\Omega$		
inductance	L	100mH
arduino uno	ATmega328	16MHz
oscilloscope		

Tableau (3.3) : le matérielle de manipulation

Des tests de simulation par Proteus ainsi des tests expérimentaux ont été relevé sous les conditions suivante :la valeur de rayonnement solaire et la température a été réglée à  $G = 1000(W / m^2)$ ,  $T = 25^{\circ}C$  et  $R4 = 6\Omega$ .

La figure (3.6) et la figure (3.6), illustrent la réponse dynamique de l'émulateur pour une tension de référence de 25 v pour un courant  $I=8.1$ . On constate que la tension de sortie suit parfaitement la référence calculer par le mode de PV avec un temps de réponse de moins 300ms. Note que le résultat expérimental présente une réponse semblable à celle trouvée par Proteus.

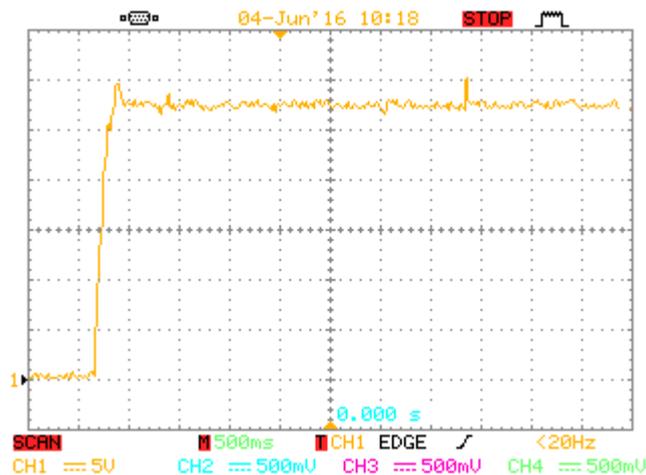


Figure.3. 6 :réponse dynamique du résultat expérimental

### Chapitre III : Implémentation hardware

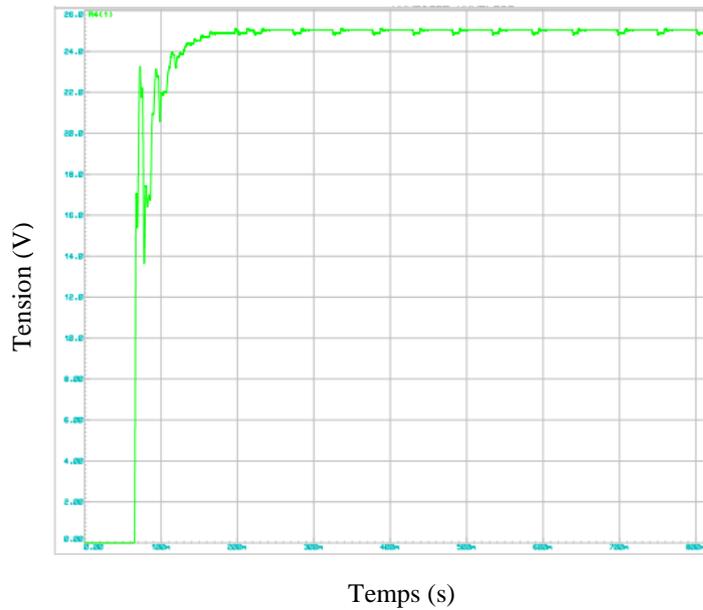
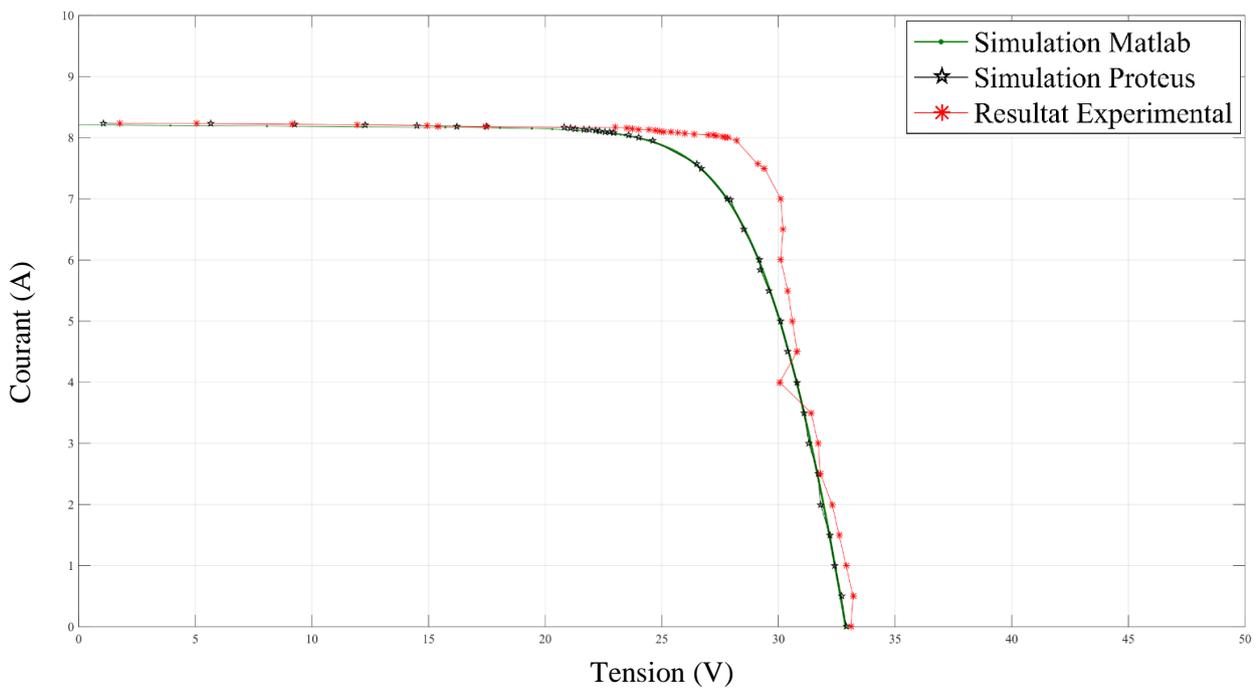


Figure.3. 7 : réponse dynamique obtenu par Proteus

La figure (3.8) et la figure (3.9) présentent les caractéristiques (I-V) et (P-V) obtenus à l'issu de simulation (Matlab et Proteus) et l'expérimentation. On constate que les résultats expérimentaux sont très proche par rapport aux résultats de simulations. Néanmoins, on a remarqué quelques différences lorsque la tension est autour de 27 v. Cette différence est due à l'imprécision de diviseur de tension. Les résultats obtenus sont très satisfaisants et banc d'essai émule réellement le comportement d'un émulateur solaire réel.



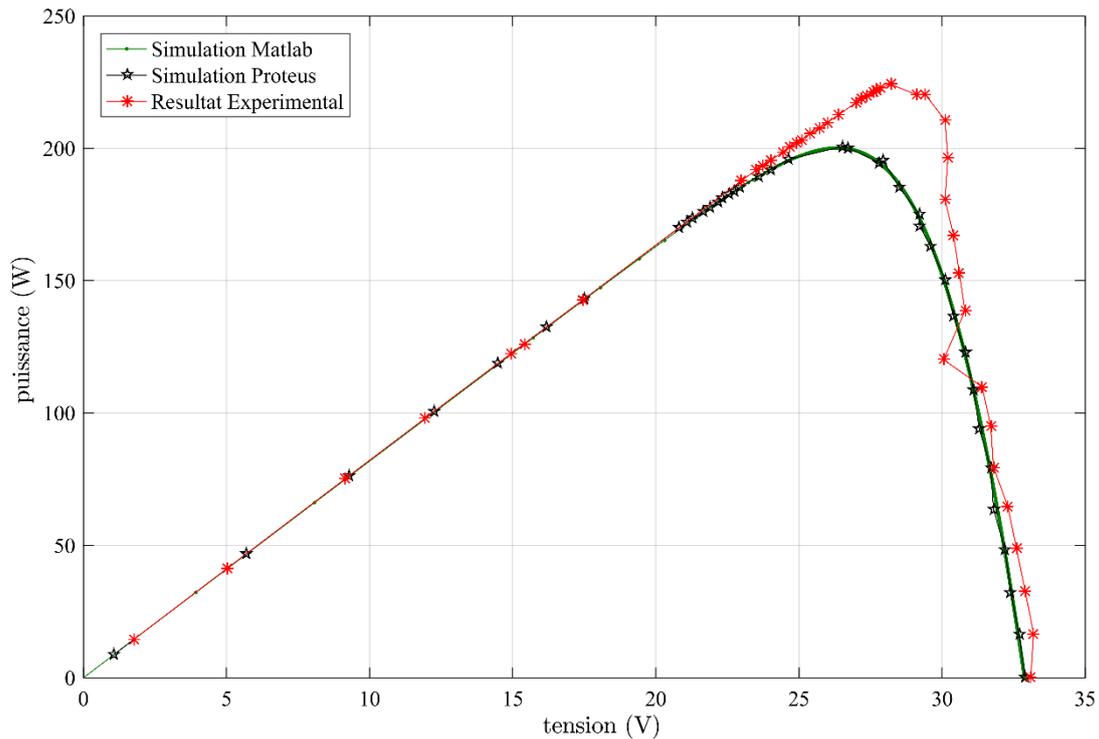


Figure.3. 9 : caractéristiques (P-V) (Matlab , Proteus) et l'expérimentation

### 3.3 Conclusion

La réalisation d'un banc d'essai expérimental émulant le comportement d'un panneau solaire réel a fait l'objet de ce dernier chapitre. La carte arduino Uno a base d'un microcontrôleur ATmega328 a joué le rôle d'un calculateur qui permet de sortir le signal MLI adéquat pour le contrôle du Mosfet du convertisseur DC/DC. Les résultats expérimentaux obtenus ont montré la validité de notre émulateur solaire.

## Conclusion Générale

L'objectif de ce travail était la conception et la réalisation d'un émulateur solaire. Ceci était dans le but de disposer d'un outil de laboratoire performant, permettant d'effectuer des travaux de recherche expérimentaux sans avoir besoin d'un module PV réel, ni entravé par des conditions climatiques défavorables (absence du soleil). L'usage d'un tel dispositif dans des applications qui concerne l'énergie solaire photovoltaïque comme les algorithmes de recherche du point de puissance maximale permet un gain considérable en temps et en coût.

Le présent mémoire a été entamé par une description générale des différentes sources d'énergie renouvelable, puis plus particulièrement l'énergie solaire. A la fin nous avons présenté les avantages de concevoir un tel dispositif (émulateur solaire).

Le deuxième chapitre a été consacré à l'étude théorique de l'architecture proposée pour l'émulateur solaire. Le système a consisté à un convertisseur Dc /Dc (buck converter) commandé de telle sorte que la tension de sortie doit correspondre au courant de la charge (caractéristique I-V). Pour réaliser cette tâche on doit faire appel au modèle d'un PV réel dont la relation entre sa tension et son courant est régi par une équation non linéaire, d'où la nécessité d'appliquer l'algorithme de Newton Raphson afin de résoudre cette équation. En plus, pour bien contrôler le convertisseur, un modèle dynamique de ce convertisseur a été présenté. Les résultats de simulation obtenus ont montré l'efficacité de notre structure.

Au dernier chapitre on a présenté les résultats expérimentaux issus des essais effectués sur notre émulateur. Et afin d'approuver la conformité des caractéristiques de ce dernier avec celles obtenus par la simulation, on a présenté dans ce chapitre les résultats des essais effectués sur l'émulateur solaire qui montrent ses différentes caractéristiques :

$I=f(V)$  et  $P=f(V)$  pour une température fixe et un éclairement fixe. Ces résultats nous ont permis de constater que ses caractéristiques sont, dans une large mesure, identiques à celles d'un vrai module photovoltaïque.

En dépit des développements effectués et les résultats obtenus, de nombreuses perspectives à ce travail peuvent être envisagées. Il s'agit tout d'abord de monter en puissance en utilisant les composants adéquats pour le convertisseur. Il serait également intéressant de développer d'autres structures d'émulateur solaire en utilisant des autres topologies de convertisseur.

## Annexe A

```
#include "TimerOne.h"
#include <math.h>

// Parametre du PV 200W
#define Rs 0.221
#define Rp 415.405
#define A 1.3
#define Ns 54
#define K 1.3806e-23
#define Q 1.6021e-19
#define Iscn 8.21
#define Ki 0.0032
#define Kv -0.1230
#define Vocn 32.9
#define Tn 298.14
#define T 298.14
#define Vt 1.3874
#define Gn 1000
#define G 1000

// Parametre du regulateur
#define Kp 7.18
#define Ki 70.18/250
#define Kd 10.188/747.8508
int commande, comp = 0;
float V = 0.0, tension, I,Ic,to, erreur, Somme_erreur,
variation_erreur, erreur_precedente ;

void setup()
{
    Timer1.initialize(32);    // initialize timer1, and set a 1/2
second period
    Timer1.pwm(9, 512);      // setup pwm on pin 9, 50% duty cycle
    Timer1.attachInterrupt(callback); // attaches callback() as a timer
overflow interrupt
}

void callback()
{
    comp++;
    if (comp > 200)
    {
        noInterrupts();
        Ic=0;
        to=0;
        for (int i=0;i<10;i++){
```

```

I = analogRead(A0);
I = (0.02441 * I - 12.50);

tension = analogRead(A4);
tension = tension * 0.03747 ;

    Ic=Ic+I;
    to=to+ tension;
}
I=Ic/10;
I=0;
tension=to/10;

if (I>8.9)
{
    V=4;
}
else {
    V = emu(I);
}
comp = 0;

}

interrupts();

Timer1.setPwmDuty(9, commande);
}
double emu(float I)
{
    noInterrupts();
    double F, IO, Ipv, V0, V, dF;
    V0 = 32.0;
    Ipv = (G / Gn) * (Iscn + Ki * (T - Tn));
    IO = (Iscn + ( Ki * (T - Tn))) / (exp((Vocn + Kv * (T - Tn)) / (A * Vt)) - 1);
    F = Ipv - I - IO * (exp((V0 + (Rs * I)) / (Vt * A)) - 1) - ((V0 + Rs) / Rp);
    while (fabs(F) > 0.1) //for (int i = 0; i < 2; i++) //
    {
        F = Ipv - I - IO * (exp((V0 + (Rs * I)) / (Vt * A)) - 1) - ((V0 + Rs) / Rp);
        dF = (-IO / (Vt * A)) * (exp((V0 + (Rs * I)) / (Vt * A)) - 1 / Rp);
        V0 = V0 - (F / dF);
        V = V0;
    }
    return V;
}

void loop()
{

```

```
erreur = V - tension ;  
Somme_erreur += erreur ;  
variation_erreur = erreur - erreur_precedente ;  
commande = Kp * erreur + Ki * Somme_erreur + Kd * variation_erreur ;  
  
erreur_precedente = erreur ;  
if (commande < 0) {  
    commande = 0 ;  
}  
  
else if (commande > 1020) {  
    commande = 1020;  
}  
}
```

## Annexe B

```
% newton raphson programme
clc
clearvars

Rs=0.221;
Rp=415.405;
A=1.3;
Ns=54;
K=1.3806503e-23;
Q=1.60217646e-19;
Iscn=8.21;
Ki=0.0032;
Kv=-0.1230;
Vocn=32.9;
Tn=298.14;
T=25+273.14;
Vt=(Ns*K*T)/Q;
Gn=1000;
G=1000;
Tv=[-5 25 40 70];
Gv=[1000 700 500 200];
for h=1:4

T=Tv(h)+273.14;
l=0:0.01:Iscn;
nn=length(l);
VV0=zeros(1,nn);
i=0;
for k=1:nn
V0=32.9;
Ipv=(G/Gn)*(Iscn + Ki*(T - Tn));
I0=(Iscn +( Ki*(T - Tn)))/(exp((Vocn + Kv*(T - Tn))/(A*Vt))-1);
F=Ipv-I(k)-I0*(exp((V0 + (Rs*I(k)))/(Vt*A))-1)-((V0 + Rs)/Rp);
while abs(F)>0.00001
    F=Ipv-I(k)-I0*(exp((V0 + (Rs*I(k)))/(Vt*A))-1)-((V0 + Rs)/Rp);
    dF=(-I0/(Vt*A))*(exp((V0 + (Rs*I(k)))/(Vt*A)))-1/Rp);
    V0=V0-(F/dF);
    V=V0;
    i=i+1
end

V
```

```
VV0(k)=V0;
end
Vg(:,h)=VV0;
Pg(:,h)=VV0.*I;
end
plot(VV0,I);axis([0 50 0 10])
% readxls
plotP(Vg,Pg)
% createfigure(VV0,I,Vpro,Ipro,Vexp,Iexp),
%
% figure()
% P=VV0.*I;
% Ppro=Ipro.*Vpro;
% Pexp=Iexp.*Vexp;
%
% createfigure(VV0,P,Vpro,Ppro,Vexp,Pexp)
```

- [1] F. Y. Melhem et I. Mougharbel, « Dimensioning a residential PV system for a cost minimization when operating under abnormal situations: Case study for Lebanon », in *Renewable Energies for Developing Countries (REDEC)*, 2014 International Conference on, 2014, p. 112–117.
- [2] Bobin. J.L., Huffer E., Nifenecker H. (juin 2010). *L'énergie de demain ; techniques, environnement, économie*. Groupe Énergie de la Société française de physique. Presses Universitaires de Grenoble.
- [3]. H. Can, « Model of a photovoltaic panel emulator in MATLAB-Simulink », *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, vol. 21, no 2, p. 300–308, 2013.
- [4] G. Bopp, H. Galber, K. Preiser, D.U. Sauer, H. Schmidt, *Energy Storage in photovoltaic stand-alone energy supply systems*, *Prog. Photovoltaics: Res. Appl.* 6 (4) (1998) 271–291.
- [5] G. Walker, « Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model », *Journal of Electrical & Electronics Engineering*, vol. 21, no. 1, pp. 49-56, 2001.
- [6] M. Cirrincione, M.C. Di Piazza, G. Marsala, M. Pucci, G. Vitale, « Real time simulation of renewable sources by model-based control of DC/DC converters », *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 1548– 1555, 2008.
- [7] O. Cifdaloz, S. Konasani, A.A. Rodriguez, M. Islam, D. Allee, « DC-DC buck converter design: a sampled-data approach », *American Control Conference*, pp. 2765–2770, 2006.
- [8] H. Can, « Model of a photovoltaic panel emulator in MATLAB-Simulink », *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, vol. 21, n° 2, p. 300–308, 2013.
- [9] R. W. Erickson et D. Maksimovic, *Fundamentals of power electronics*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [10] « datasheet irf840 ».
- [11] « datasheet ir2112 ».
- [12] « datasheet arduino ».

## ملخص

العمل المقدم في هذه الأطروحة يتمثل في دراسة وإنشاء محاكي شمسي. الهدف منه تنفيذ اختبارات تجريبية لمحاكاة السلوك الفعلي للوحة شمسية. واعتمدنا في ذلك على إنشاء محول تيار مستمر (DC / DC) الذي يتحكم فيه عن طريق أرد وينو. وبواسطة التوتر المرجعي المتحصل عليه عن طريق التيار المار في الحمولة نسيطر على إنتاج التيار الكهربائي عبر وحدة تحكم بسيطة. وأظهرت النتائج التجريبية صحة المحاكي الشمسي.

الكلمات المفتاحية: محاكي شمسي، محول تيار مستمر، أرد وينو.

## Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire traite l'analyse, la conception et la réalisation d'un émulateur solaire. Le but recherché est la mise en œuvre d'un banc d'essai expérimental qui émule le comportement réel d'un panneau solaire. La configuration adopter dans ce travail consistait à un convertisseur DC/DC (buck converter) commandé via une carte de développement Arduino. A partir du courant de la charge le microcontrôleur calcul la tension de référence (modèle de PV) afin de contrôler la tension de sortie via un régulateur de type PI. Les résultats expérimentaux ont montré la validité de notre émulateur solaire.

Mot clé : émulateur solaire, Hacheur (DC-DC), Arduino.

## Abstract

The aim of this work is the analysis, design and implementation of a solar emulator. The main objective is the implementation of an experimental testbed that emulates the behaviour of a solar panel. The configuration adopted in this work consisted of a DC / DC buck converter controlled via development board named Arduino. From the load current the microcontroller calculates the reference voltage (PV model) to control the output voltage via a PI controller. The experimental results showed the validity of our solar emulator.

Keyword: solar emulator, buck converter, Arduino