

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes
MASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences et Technologies**
Filière : **Electrotechnique**
Spécialité : **Electrotechnique industrielle**

Présenté par
MADENE Lounes
AMROUN Rayan

Thème :
Etude et simulation D'un émulateur photovoltaïque.

Mémoire soutenu publiquement le 29/06/2024 devant les membres de jury composé de :

M^{me} F. MEGHERBI-BITAM
Professeur, U.M.M.T.O, Présidente

M^{elle} R. KACHENOURA
MCB, U.M.M.T.O, Encadreur

M^r M. SI BRAHIM
MCA, U.M.M.T.O, Examineur

Remerciements

Au terme de notre travail, nous tenons à remercier tout particulièrement et exprimer notre gratitude à notre encadreur M^{elle} R. KACHENOURA qui a été d'une grande générosité et d'une patience inépuisable, qui nous a orienté, guidé et aidé tout au long de notre travail.

Nos remerciements vont ensuite aux membres du jury, M^{me} F. MEGHERBI et M^r M. SI BRAHIM qui ont eu l'amabilité d'examiner notre mémoire.

Et à toutes les personnes qui nous ont aidées.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Mes très chers parents qui m'ont toujours encouragé et soutenu

Mes sœurs Célia et Mélissa

Mon petit frère Danny

A toute ma famille et en particulier ma tante bien-aimée (Fetta)

Mes amis(es) proches et lointains

MADENE Lounes

Je dédie ce mémoire à :

Mes très chers parents qui m'ont toujours encouragé et soutenu

Mon petit frère Amine

A toute ma famille

Mes amis(es)

AMROUN Rayan

Table des matières

b.	Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque :	19
V.	Les avantages et les inconvénients de l'Energie photovoltaïque :	20
a.	Avantages du photovoltaïque :	21
b.	Inconvénients du photovoltaïque :	21
VIII.	Simulation des panneaux photovoltaïques sous Matlab :	22
	Conclusion :	27
Chapitre III	Etude, modélisation et simulation d'un convertisseurs multi-niveau	28
	Introduction :	29
I.	Analyse du principe de fonctionnement et des limites de convertisseur nbb à trois niveaux :	29
•	Principe de fonctionnement du mode Buck et du mode Boost :	31
II.	Le dimensionnement d'un système photovoltaïque de 10 kW :	32
1.	Estimation de la production d'énergie :	32
2.	Surface occupée :	32
	Choix de l'onduleur :	32
3.	Considérations de câblage et de protection :	33
4.	Calcul de la production annuelle :	33
	Exemple concret :	33
III.	Prix des panneaux photovoltaïques en Algérie :	33
1.	Coût des panneaux photovoltaïques :	33
2.	Coût de l'onduleur :	34
3.	Coût de l'installation et autres équipements :	34
4.	Coût total estimé :	34
IV.	Une transition en douceur entre les différents modes :	34
a.	CAS : $\Delta d_1 \leq \delta_1, \Delta d_2 \leq \delta_2$	34
V.	Application d'une commande sous Matlab/Simulink :	36
	CONCLUSION :	41
Chapitre IV	Simulation de l'émulateur	42
	Introduction :	43
I.	Principe de fonctionnement de l'émulateur PV :	43
II.	Principe de fonctionnement du contrôleur choisi :	44
1.	Mode Buck :	44
2.	Mode boost :	45
III.	Simulation de l'émulateur sous Matlab :	46
	Conclusion :	49
	Conclusion Générale	50
	Références Bibliographiques	53

Liste des Figures

Chapitre I :

Figure. I.1 : Un émulateur de source photovoltaïque.....	2
Figure. I.2 : Circuit équivalent d'un émulateur photovoltaïque.....	4
Figure. I.3 : Emulateur de source de photovoltaïque proposé par Nagayoshi.....	6
Figure. I.4 : Principe d'un émulateur basé sur l'électronique de puissance.....	7
Figure. I.5 : Principe d'un émulateur basé sur l'électronique de puissance.....	8
Figure. I.6 : Détails du bloc d'alimentation d'énergie Émulateur de PV proposé par Khouzam et Hoffman.....	8

Chapitre II

Figure II.1 : Cellule au Silicium Monocristallin.....	13
Figure II.2 : Cellule au Silicium Polycristallin.....	14
Figure II.3 : Cellule au Silicium amorphe (couche mince).....	15
Figure II.4: Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS.....	15
Figure II.5: Cellule multi jonction.....	16
Figure II.6: Caractéristiques d'une jonction PN polarisée sous différents éclairagements.....	17
Figure II.7 : Comportement d'une cellule photovoltaïque.....	18
Figure II.8 : Différents types de module photovoltaïque.....	19
Figure II.9 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	20
Figure II.10 : Schéma de simulation sous Matlab.....	23
Figure II.11 : Paramètres de simulation sous Matlab.....	24
Figure II.12 : Radiation par rapport au temps.....	24
Figure II.13 : Radiation par rapport au temps.....	25
Figure II.14 : Puissance générée et la tension des panneaux photovoltaïques.....	26
Figure II.15 : Le rapport cyclique et la valeur moyenne par rapport au temps.....	27

Liste des Figures

Chapitre III :

Figure III.1 : Topologie du TL-CNIBB proposé. Topologie du TL-CNIBB proposé.....	29
Figure III.2 : Tous les états de TL-CNIBB.....	30
Figure III.3 : Mode Buck traditionnel ou mode Boost.....	31
Figure III.4 : Stratégie de transition en douceur.....	34
Figure III.5 : Relation entre le gain de tension et le signal de commande VCtrl.....	35
Figure III.6 : Schéma de simulation du convertisseurs Buck/Boost.....	36
Figure III.7 : Schéma de la tension de sortie Vc par rapport aux temps.....	37
Figure III.8 : Schéma du rapport cyclique Alpha α par rapport aux temps.....	38
Figure III.9 : Schéma de la Tension d'entrée du transistor f11 par rapport au temps.....	39
Figure III.10 : Schéma de la Tension d'entrée du transistor f21 par rapport au temps.....	40

Chapitre IV :

Figure IV.1 : Principe de fonctionnement de l'émulateur PV.....	43
Figure IV.2 : Le schéma de simulation sous Matlab.....	46
Figure IV.3 : Radiation par rapport au temps (Profil 1).....	47
Figure IV.4 : Radiation par rapport au temps (Profil 2).....	47
Figure IV.5 : La puissance débité par rapport au temps.....	48
Figure IV.6 : Le courant débité et la tension par rapport au temps.....	49

Introduction Générale

Introduction Générale

Au cours des dernières décennies, la croissance de la consommation mondiale d'électricité est étroitement liée aux progrès de l'industrie, des transports et des communications. La majeure partie de cette électricité provient de sources non renouvelables telles que le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium, dont le renouvellement est très lent à l'échelle humaine. Cette dépendance comporte un risque d'épuisement à court terme, en particulier avec une demande en constante augmentation dépassant déjà l'offre, entraînant des fluctuations des prix mondiaux, notamment dans le secteur pétrolier.

De plus, cette consommation énergétique a un impact environnemental important, générant d'importantes émissions de gaz à effet de serre, principalement à partir d'hydrocarbures et de charbon, contribuant ainsi au changement climatique et à la pollution. Cette situation pousse à explorer des solutions innovantes pour répondre aux besoins énergétiques tout en réduisant les dommages environnementaux. Les énergies renouvelables suscitent donc un intérêt croissant tant chez les producteurs d'énergie que chez les autorités publiques.

Contrairement aux ressources non renouvelables, les énergies renouvelables se régénèrent naturellement et indéfiniment à l'échelle humaine. Actuellement, l'énergie solaire se distingue par son abondance et sa capacité de régénération infinie. Elle peut être exploitée sous forme thermique ou convertie en électricité grâce à l'effet photovoltaïque.

Cependant, malgré son potentiel, l'utilisation de l'énergie photovoltaïque reste limitée en raison du coût élevé des panneaux solaires et des défis techniques tels que les interruptions intermittentes et les faibles rendements des systèmes de conversion. Ces obstacles ont stimulé la recherche en vue de rendre les sources photovoltaïques plus compétitives, notamment en réduisant les coûts et en améliorant la fiabilité des systèmes. [1]

Dans le premier chapitre, nous avons parlé de l'état de l'art des émulateurs photovoltaïques ainsi que les différents circuits d'émulateurs qui existent.

Dans le deuxième chapitre, nous avons parlé de la modélisation et de la simulation des cellules photovoltaïques.

Pour le troisième chapitre, nous avons analysé convertisseur TL-CNIBB à trois niveaux afin de comprendre son principe de fonctionnement et ses limites. Puis, nous avons procédé à l'étude de deux modes Buck\Boost. Cette étude nous aidera à mieux comprendre la stratégie de modulation adoptées par chaque mode. Enfin, l'application d'une commande sous Matlab/Simulink nous permet de modéliser et d'analyser efficacement les comportements des systèmes électroniques,

Enfin le quatrième et dernier chapitre est consacré à la simulation de l'ensemble des éléments constituant l'émulateur, à savoir le modèle des cellules.

Nous avons fini notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I
Etat de l'art des émulateurs
photovoltaïques

Introduction :

L'expansion rapide du secteur photovoltaïque souligne l'importance vitale des dispositifs spécialisés pour les essais en laboratoire, notamment pour les constructeurs et les laboratoires dédiés à l'électronique de puissance des panneaux solaires. Pour faire face aux enjeux de charges non linéaires et d'énergie réactive, le recours à des émulateurs photovoltaïques en laboratoire est une méthode efficace pour effectuer des mesures et des tests précis tout en minimisant les dépenses. Il est maintenant essentiel de créer des émulateurs fiables pour progresser dans le secteur photovoltaïque. Cela nécessite une modélisation exacte des générateurs et la mise en place de systèmes de contrôle adéquats. [2]

I. Définition d'un émulateur photovoltaïque :

Un émulateur photovoltaïque est un appareil de pointe qui fait appel à la simulation numérique pour reproduire le fonctionnement d'une réelle source d'énergie solaire. Il imite les caractéristiques électriques de cette source en se basant sur des modèles mathématiques spécifiques d'installations photovoltaïques, incluant les changements de tension et de courant causés par divers facteurs tels que le climat, les ombres partielles et les variations dynamiques. [3]

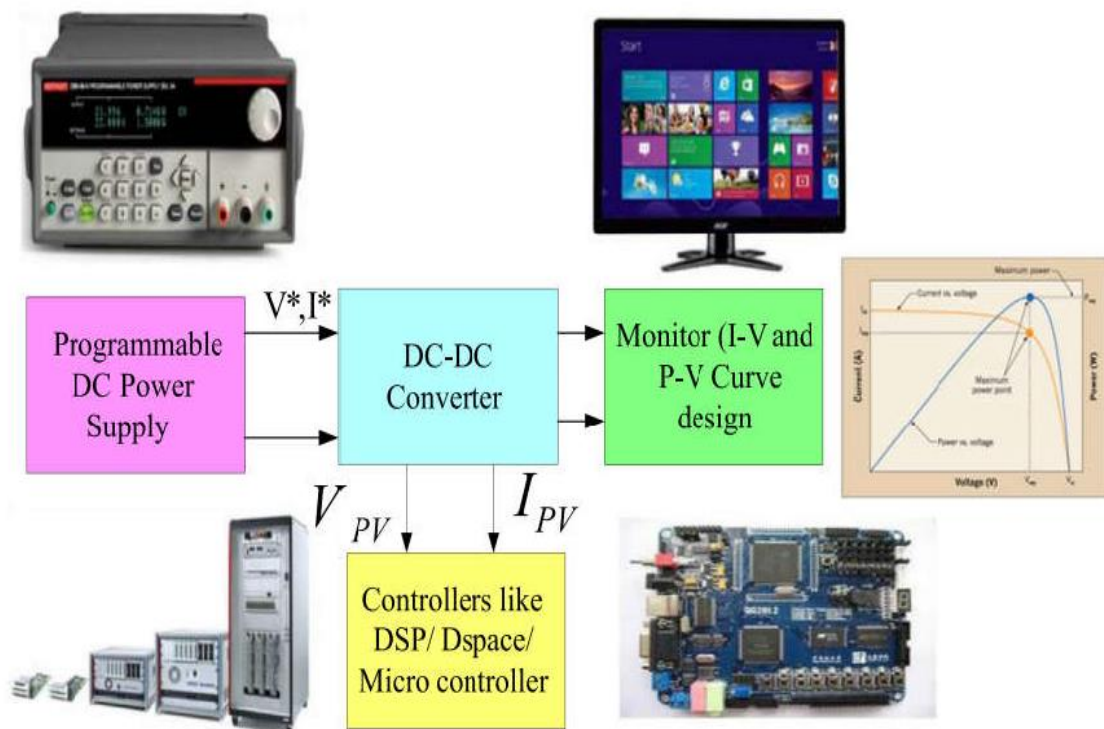


Figure. I.1 : Un émulateur de source photovoltaïque.

II. Notion d'un émulateur photovoltaïque :

La Décomposition de la simulation d'un émulateur photovoltaïque se fait en deux parties :

La première partie s'agit de la compréhension des caractéristiques du générateur, tandis que la seconde se concentre sur leur reproduction à l'aide d'amplificateurs de puissance, influençant ainsi la puissance maximale produite.

Généralement, on peut déterminer les attributs d'une chaîne de panneaux solaires en se basant sur un modèle de cellules photovoltaïques ou en générant une base de données basée sur des courbes observées dans divers contextes environnementaux. L'étape initiale nécessite une évaluation détaillée de la modélisation du système photovoltaïque et de la détermination des paramètres, thème traité dans le prochain chapitre. Dans la littérature technique, diverses techniques sont évoquées pour simuler des émulateurs de source d'énergie solaire. On peut notamment mentionner :

- L'adaptation d'un générateur de tension dont la résistance interne change en fonction du courant par une loi exponentielle ;
- Le renforcement du courant et de la tension au sein d'une cellule ;
- Le recours à un circuit similaire au générateur photovoltaïque, constitué d'une source de courant constant ainsi que de diverses résistances et diodes.

Néanmoins, ces méthodes comportent des contraintes en matière de souplesse face aux fluctuations du courant lumineux, de la température et d'autres facteurs liés au dispositif photovoltaïque. Certaines ne conviennent pas à l'émulation de panneaux solaires supérieurs à un kilowatt. Par exemple, la technique des trois points nécessite une quantité excessive de diodes et d'appareils de courant à haute tension. C'est pourquoi l'étude des émulateurs photovoltaïques se concentre sur l'emploi de sources d'énergie actives adéquates, dans le but d'obtenir des caractéristiques plus adaptables en termes de souplesse.

D'un point de vue conceptuel, les émulateurs photovoltaïques se réfèrent à des convertisseurs électroniques d'énergie dont la tension et le courant d'entrée sont ajustés pour reproduire le fonctionnement des générateurs solaires. Autrement dit, l'impédance visuelle aux bornes du convertisseur est régulée et ajustée pour correspondre à l'impédance réelle de tous les panneaux de la structure photovoltaïque.[4]

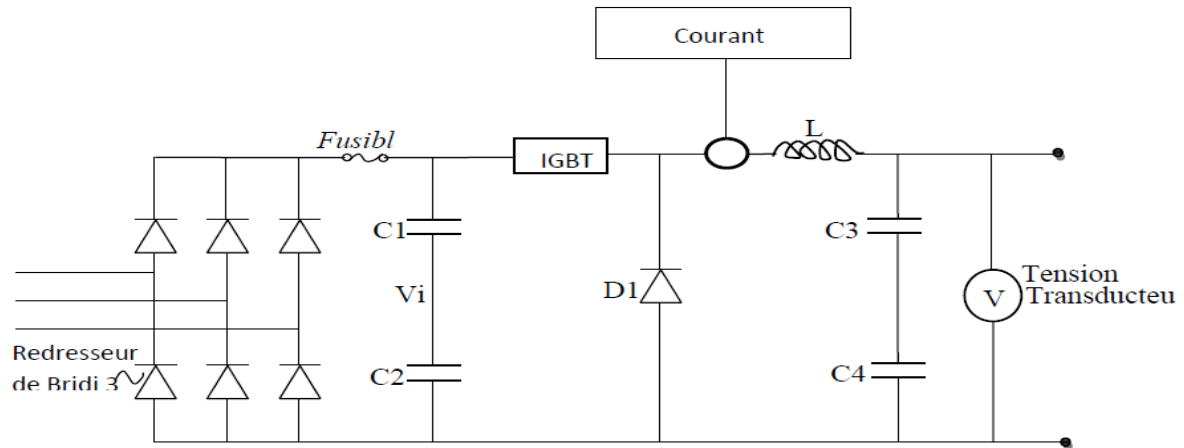


Figure.I.2 : circuit équivalent d'un émulateur photovoltaïque. [4]

III. Développement de l'émulateur photovoltaïque :

Divers émulateurs photovoltaïques ont vu le jour grâce aux avancées technologiques, utilisant diverses configurations matérielles et des algorithmes de régulation pour reproduire le fonctionnement d'un panneau solaire. Quelques-uns de ces appareils font appel à des sources d'alimentation personnalisées ou des variantes adaptées du standard.

La majorité de ces émulateurs se basent sur un modèle mathématique de la cellule solaire, en employant des paramètres précis pour produire les courbes spécifiques entre tension et courant. Cette technique autorise une reproduction exacte du comportement d'un panneau solaire dans des conditions de radiance et de température différentes.

Certains émulateurs intègrent des cartes de traitement de signaux numériques (DSP) et des dispositifs de contrôle digital pour leur régulation. Quelques-uns utilisent une unique cellule solaire comme point de référence, combinée à un amplificateur de courant pour reproduire le fonctionnement d'un module photovoltaïque complet. Une autre méthode implique d'utiliser une table de recherche, dans laquelle les valeurs de courant et de tension du panneau solaire sont préalablement consignées et interpolées de façon linéaire pour réguler l'émulateur.

Ces simulations ont été conçues pour des objectifs d'enseignement et commerciaux, proposant généralement une mouillabilité qui facilite la liaison en série ou en parallèle afin de reproduire un système photovoltaïque complet. Ils servent aussi à examiner des dispositifs photovoltaïques installés sur des satellites.

Dans des conditions spatiales extrêmes, les ingénieurs et concepteurs nécessitent des réponses rapides et exactes pour reproduire le fonctionnement de leurs dispositifs photovoltaïques. C'est pourquoi les émulateurs photovoltaïques constituent une alternative privilégiée pour ces applications essentielles. [5]

IV. Les avantages des émulateurs photovoltaïques :

Il est impératif pour les concepteurs de reproduire rapidement et exactement le comportement de leur dispositif photovoltaïque dans ces conditions extrêmes d'environnement. C'est la raison pour laquelle les émulateurs photovoltaïques se sont imposés comme une option privilégiée pour effectuer ces simulations essentielles. [6]

- Les émulateurs photovoltaïques présentent de multiples bénéfices dans la recherche, le développement et la vérification des dispositifs photovoltaïques. On peut mentionner parmi ces avantages :
- Ils requièrent un espace restreint pour leur fonctionnement.
- Ils facilitent une simulation précise et simplifiée des conditions météorologiques.
- Ils permettent d'imiter diverses caractéristiques des cellules solaires.
- Ils sont efficaces pour les ajustements.
- Grâce à leur programmation, ils intègrent des défenses contre les surcharges et les courts-circuits qui peuvent se produire pendant les tests. [5]

V. Classification des émulateurs photovoltaïque :

1. Circuit d'émulateur basé sur les amplificateurs opérationnels :

On peut classer les émulateurs photovoltaïques sur la base de leur composition matérielle, en mettant l'accent sur le convertisseur de puissance employé pour leur mécanisme d'opération. Les émulateurs utilisant des amplificateurs fonctionnels, des régulateurs en série et des convertisseurs de commutation sont fréquemment indiqués dans les spécifications techniques. Un cas pratique sera exposé pour mettre en lumière ce concept. [2]

➤ **Émulateur de source PV proposé par Nagayoshi :**

Une méthode similaire est adoptée, proposant un ensemble de caractéristiques (I, V) dont la composante fondamentale repose sur un amplificateur linéaire de courant continu. Le circuit emploie une petite cellule photovoltaïque en tant que générateur des caractéristiques (I, V) et offre une amplification distincte de la tension et du courant pour effectuer le processus d'émulation photovoltaïque. Le schéma de celui-ci est présenté dans la **Figure. I.3.** [2]

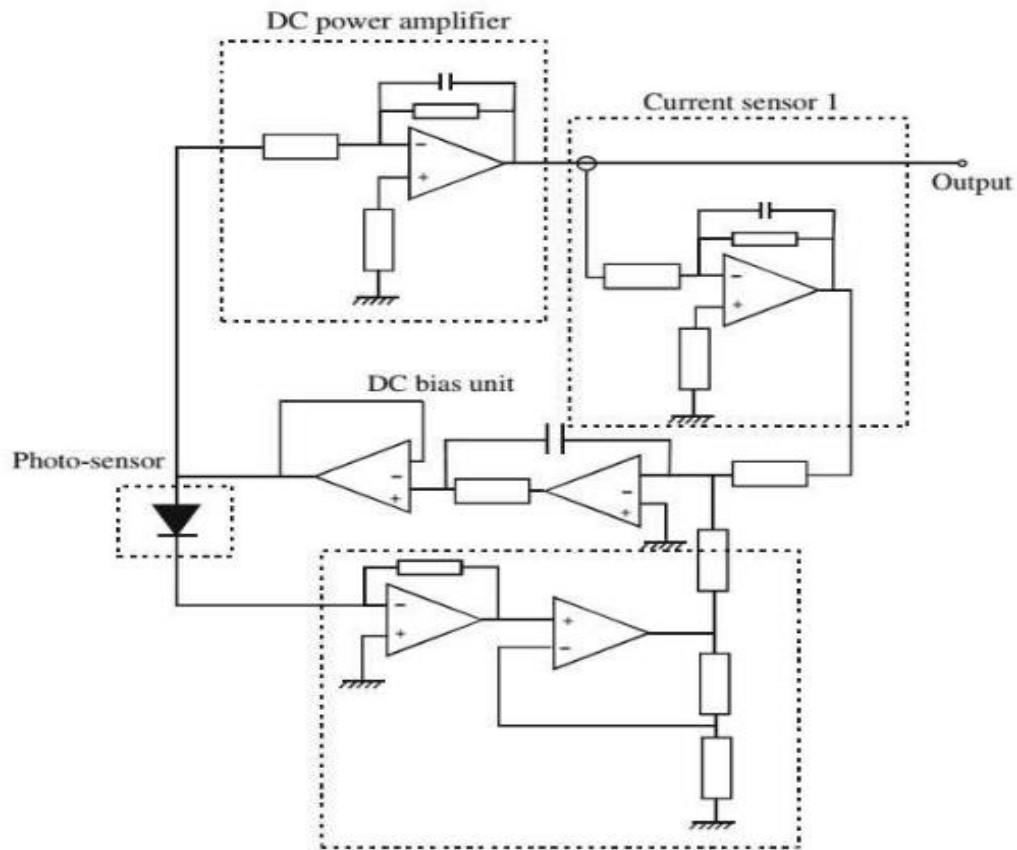


Figure.I.3 : Émulateur de source de photovoltaïque proposé par Nagayoshi [2]

L'emploi d'un amplificateur opérationnel permet d'augmenter la tension et le courant générés par la source, aux valeurs les plus hautes déterminées par la sélection des amplificateurs. En outre, cet amplificateur dispose d'une large bande passante qui rend la reproduction des coupures plus précise. Cependant, il est impossible de reproduire correctement les effets indésirables associés au potentiel de jonction ou à l'inductance des fils sans se baser sur la cellule photovoltaïque utilisée en tant qu'échantillon. Effectivement, la configuration en parallèle ou en série des cellules photovoltaïques altère la capacité de jonction et l'inductance parasite. Cela implique qu'une simple amplification de tension ou de courant ne considère pas ces effets. [2]

2. Circuits basés sur les régulateurs linéaires :

Ce genre de circuit génère la tension finale en utilisant un appareil capable d'ajuster la tension continue, associé à une suite de résistances changeantes qui évaluent les baisses de tension. Par conséquent, la tension de sortie demeure constamment en dessous de celle d'alimentation. On peut mettre en place cette contrainte en employant un transistor de puissance qui opère dans sa zone active, ce qui lui confère la capacité d'agir comme un amplificateur de classe A. Cependant, un effet similaire, bien que moins exact, peut aussi se produire en se basant uniquement sur une série de résistances. [2]

➤ **Émulateur de source de PV proposé par Mukerjee et Dasgupta :**

Un circuit à faible coût est employé en tant qu'émulateur photovoltaïque pour analyser l'algorithme MPPT. Son fonctionnement repose sur une alimentation à tension continue variable, ce changement est réalisé de manière approximative en fonction d'une résistance variable. Ce circuit présente une conduite similaire à celle d'un générateur photovoltaïque. La base du système est formulée par la **figure I.4 [2]**

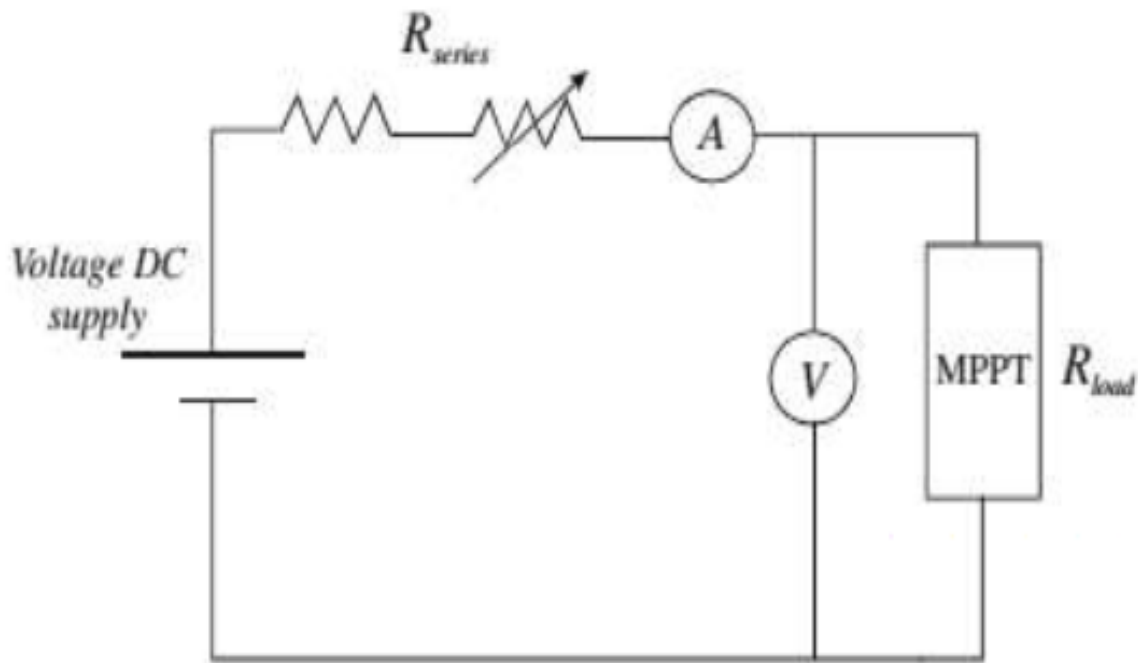


Figure. I.4 : Émulateur de source PV proposé par Mukerjee et Dasgupta [2]

3. Circuits basés sur des convertisseurs d'électronique de puissance :

Ce circuit produit la tension de sortie grâce à un mécanisme régulant la tension continue, associé à une variété de résistances pour quantifier les baisses de tension. Par conséquent, la tension de sortie reste constamment en dessous de celle d'alimentation. On peut atteindre cet objectif en utilisant un transistor de puissance qui opère dans sa zone active, ce qui lui donne la capacité d'agir comme un amplificateur de classe A. Néanmoins, on peut aussi obtenir un effet comparable, bien que moins exact, en se basant uniquement sur une suite de résistances. [2]

➤ **Émulateur de source photovoltaïque proposé par Khouzam et Hoffman :**

Une conception d'un prototype photovoltaïque qui repose sur un convertisseur en mode commuté, doté d'un contrôle numérique. Ce dispositif est capable de reproduire en direct un générateur photovoltaïque, en prenant en considération les propriétés globales du système, sa dimension, ainsi que les conditions particulières liées à la lumière, à la température et au vieillissement du solaire.

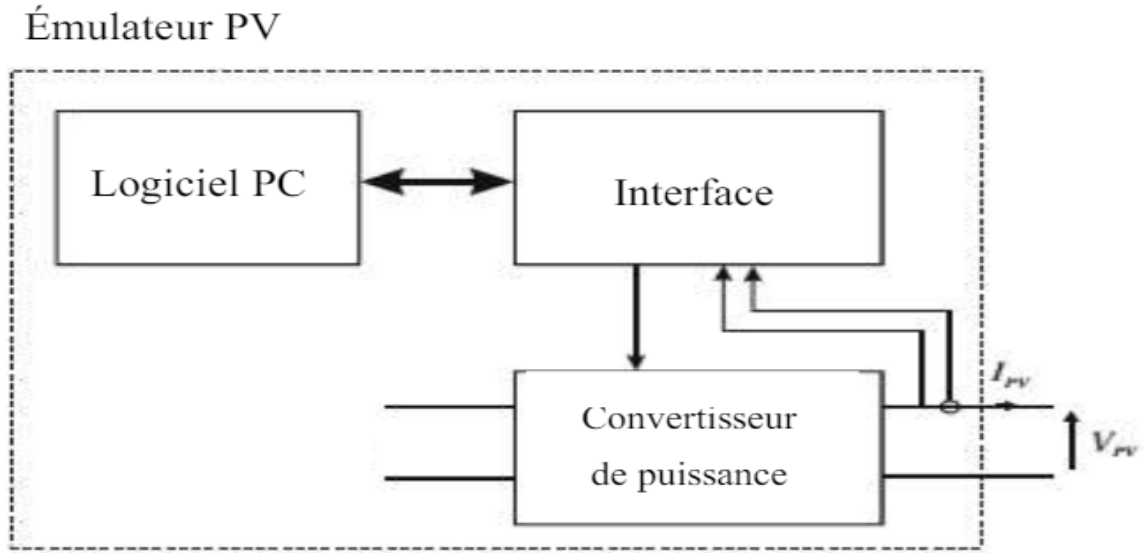


Figure. I.5 : Principe d'un émulateur basé sur l'électronique de puissance. [2]

On peut introduire toutes ces informations dans un ordinateur pour que la sortie du convertisseur soit régulée pour reproduire le point de fonctionnement approprié. [2]

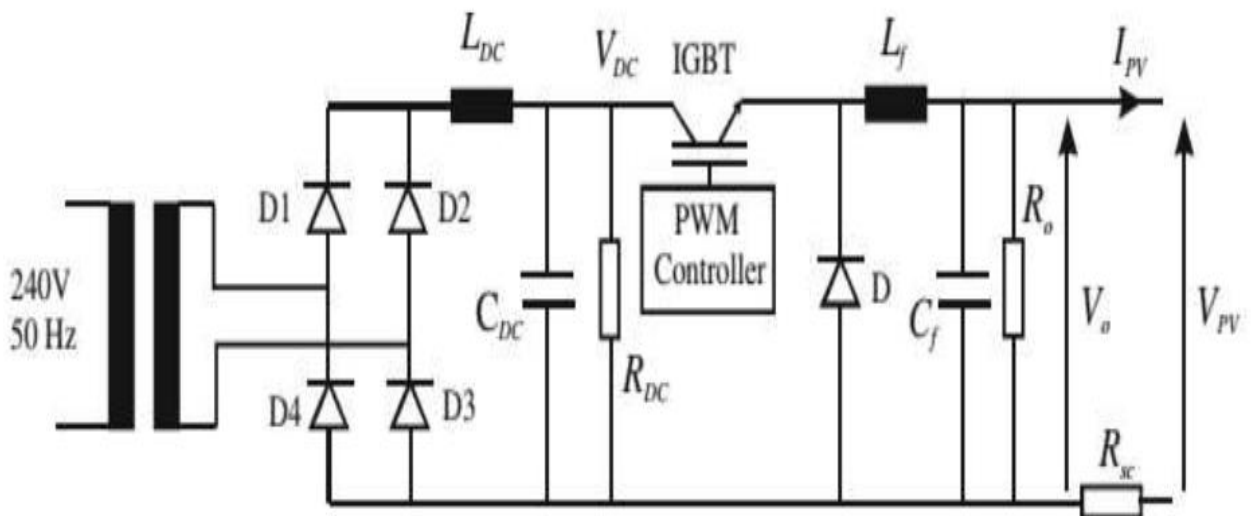


Figure. I.6 : Détails du bloc d'alimentation d'énergie (Émulateur de PV proposé par Khouzam et Hoffman). [2]

Le dispositif comprend un pré-régulateur, un convertisseur DC/DC en mode commutateur

générant plusieurs Watt (alimentation), une interface informatique et un logiciel pour la modélisation et le contrôle. L'innovation dans la mise en place de cet émulateur réside dans le recours à une modélisation mathématique pour décrire la caractéristique finale de la source photovoltaïque. [2]

VI. Certaines approches pour l'émulation des systèmes

photovoltaïques et les avantages d'un émulateur photovoltaïque :

Au fil du temps, une large sélection d'émulateurs photovoltaïques a vu le jour. Pour reproduire le comportement d'un panneau solaire, diverses méthodes matérielles et algorithmes de contrôle ont été utilisés. Ces émulateurs ont été élaborés sur la base d'alimentations sur mesure ou de révisions modifiées des aliments commerciaux. La majorité d'entre eux se basent sur un modèle mathématique de cellule solaire, en prenant en considération ses spécificités, pour déterminer les caractéristiques de courant et de tension de l'émulateur. Ce modèle offre la possibilité de reproduire le fonctionnement d'un panneau solaire dans différentes conditions liées à l'irradiation et à la température. Pour gérer l'émulateur photovoltaïque, d'autres dispositifs se servent de cartes DSP et de commandes numériques. Quelques émulateurs utilisent une seule cellule solaire comme point de départ, combinée à un amplificateur de courant pour reproduire un module complet. D'autres encore mettent en œuvre une méthode de table de recherche, où les valeurs discrètes de courant et de tension du panneau solaire sont stockées en mémoire, puis interpolées linéairement pour contrôler l'émulateur. [7]

Les avantages de l'émulateur photovoltaïque incluent :

- Un besoin réduit en espace.
- La possibilité de simuler facilement différentes conditions atmosphériques.
- La capacité de reproduire divers types de caractéristiques de cellules solaires.
- L'utilisation des émulateurs pour des opérations d'étalonnage. [7]

VII. L'utilisation des émulateurs photovoltaïques

Les émulateurs photovoltaïques ont été pensés pour répondre aux exigences aussi bien commerciales qu'éducatives. Quelques-uns d'entre eux offrent la possibilité d'être reliés en séries ou en parallèle pour reproduire un système photovoltaïque complet. En outre, ces simulateurs servent à examiner les dispositifs photovoltaïques conçus pour les satellites. Compte tenu des conditions spatiales extrêmes, les concepteurs aspirent à reproduire de manière rapide et exacte le comportement de leur dispositif photovoltaïque en orbite. Dans cette situation, ces émulateurs représentent une solution parfaite. [6]

L'état de l'art des émulateurs photovoltaïques se concentre sur le développement de systèmes capables de simuler le comportement des panneaux solaires dans différentes conditions d'ensoleillement, de température et d'angle d'incidence. Voici quelques aspects clés :

Technologies Utilisées :

- **Systèmes Électroniques de Puissance** : Utilisation de convertisseurs DC-DC pour modéliser les caractéristiques des panneaux.
- **Modélisation Numérique** : Utilisation de logiciels comme MATLAB/Simulink pour simuler le comportement photovoltaïque.

Méthodes de Simulation :

- **Modèles Statistiques** : Basés sur des données historiques pour prédire la production d'énergie.
- **Modèles Physiques** : Basés sur les principes de la physique des semi-conducteurs pour modéliser les performances des cellules solaires.

Applications :

- **Test et Validation** : Évaluation des performances des systèmes photovoltaïques avant installation.
- **Recherche et Développement** : Optimisation de nouveaux designs de panneaux et d'algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT).

Avancées Récentes :

- **Intelligence Artificielle** : Intégration d'algorithmes d'apprentissage automatique pour améliorer la précision des prédictions.
- **Matériaux Avancés** : Recherche sur des matériaux photovoltaïques émergents (comme les pérovskites) et leur comportement.

Défis :

- **Complexité de Modélisation** : Modéliser avec précision les conditions réelles d'exploitation.
- **Coûts** : Les systèmes d'émulation peuvent être coûteux à développer et à mettre en œuvre.

Normes et Régulations :

- Les émulateurs doivent souvent répondre à des normes spécifiques pour être utilisés dans des contextes industriels et de recherche.

Conclusion :

Après avoir exploré en profondeur le domaine des émulateurs photovoltaïques, il est clair que ces outils sont essentiels pour la simulation et l'optimisation des systèmes photovoltaïques. En définissant d'abord ce qu'est un émulateur et en examinant ensuite différentes méthodes et classifications, nous avons pu comprendre leur importance dans la conception et la mise en œuvre de systèmes PV.

Leur utilisation offre une flexibilité et une précision inestimables, permettant aux chercheurs, ingénieurs et concepteurs de tester et d'améliorer diverses configurations de manière efficace et économique. En fin de compte, les avantages des émulateurs photovoltaïques sont nombreux, offrant une meilleure compréhension du comportement des systèmes, une optimisation des performances et une réduction des coûts de développement. Ainsi, en exploitant pleinement ces outils, nous pouvons ouvrir la voie à une adoption plus large et plus efficace de l'énergie solaire.

Chapitre II
La cellule photovoltaïque

Introduction :

Dès 1839, Antoine Becquerel a mis en application le concept de l'effet photoélectrique (conversion directe d'énergie lumineuse en électricité) en observant qu'une chaîne d'éléments conducteurs d'électricité produisait un courant électrique spontané lorsqu'elle était exposée à une lumière. Par la suite, le sélénium et ensuite le silicium (qui ont finalement pris la relève du cadmium-tellure ou du cadmium-indium-sélénium qui avaient également fait l'objet de tests) se sont révélés capables de fabriquer les premières cellules photovoltaïques (utilisées comme posemètres photographiques dès 1914, puis 40 ans plus tard (en 1954), pour la production d'électricité). L'étude se concentre désormais sur des polymères et matériaux organiques qui pourraient (éventuellement être modulables) substituer le silicium.

I. Définition :

La cellule photovoltaïque représente l'élément semi-conducteur qui, une fois assemblé en batterie, forme un panneau solaire photovoltaïque.

Dans la cellule photovoltaïque, l'absorption des photons libère des électrons qui ont une charge négative et des « trous » qui ont une charge positive. Un champ électrique interne sépare ces charges électriques, les recueille par une grille en avant et un contact en arrière, générant ainsi un courant électrique.

La cellule photovoltaïque est un dispositif de production d'électricité basique qui convertit directement la lumière solaire en électricité. [8]

II. Les types des cellules photovoltaïques :

a. Cellule au silicium monocristallin :

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme. [9]

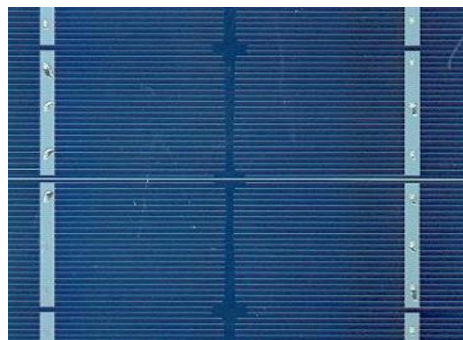


Figure.II.1: Cellule au Silicium Monocristallin. [9]**Avantage :**

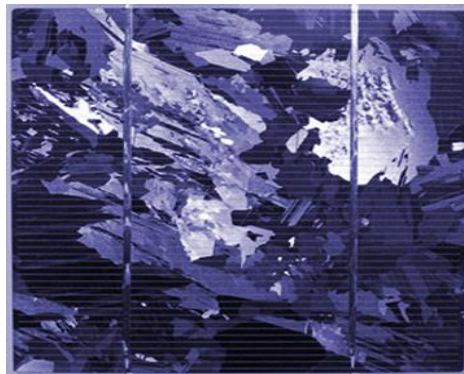
- Meilleur rendement que le polycristallin (environ 150 Wc/m²)
- Durée de vie importante (+/- 30 ans)

Inconvénients :

- Plus cher que le polycristallin
- Rendement faible sous un faible éclairement [9]

b. Cellule au silicium polycristallin :

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux. [9]

**Figure.II.2:** Cellule au Silicium Polycristallin. [9]**Avantage :**

- Bon rendement (environ 100 Wc/m²)
- Durée de vie importante (+/- 30 ans)
- Moins cher que le monocristallin

Inconvénients :

- Rendement faible sous un faible éclairement [9]

c. Cellule au silicium amorphe :

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé ou marron. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires". [9]

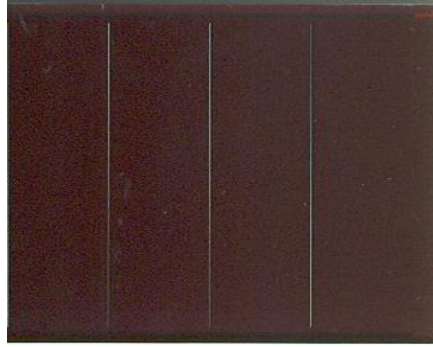


Figure.II.3: Cellule au Silicium amorphe (couche mince). [9]

Avantages :

- Fonctionnent avec un éclairage faible
- Bon marché par rapport aux autres types de cellules
- Moins sensible aux températures élevées
- Souple

Inconvénients :

- Rendement faible en plein soleil (environ 60 Wc/m^2), les cellules en couche mince nécessite une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses
- Durée de vie courte (+/- 10 ans), performances qui diminuent sensiblement avec le temps. [9]

d. Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS :

Les cellules CIS représentent une nouvelle génération de cellules solaires sous forme de films minces, de type CIS (cuivre, indium, sélénium) ou CIGS (cuivre, indium, gallium et sélénium). Les matières premières nécessaires à la fabrication de ces cellules sont plus faciles à se procurer que le silicium utilisé dans les cellules photovoltaïques classiques (bien que ce dernier soit déjà très abondant sur terre). De plus, leur efficacité de conversion énergétique est la plus élevée à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couche mince. [9]

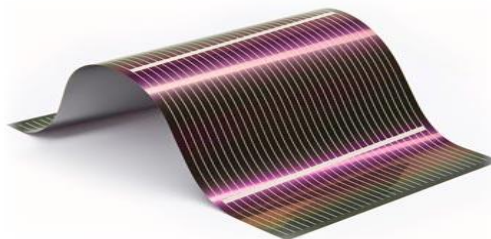


Figure.II.4: Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS. [9]

Avantages :

- Meilleurs rendements par rapport aux autres cellules photovoltaïques en couche mince
- La cellule peut être construite sur un substrat flexible

Inconvénients :

- Les cellules en couche mince ont un rendement plus faible que les cellules "épaisses" [9]

e. Cellule multi jonction :

Les cellules multi-jonction sont composées de différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire et ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de conversion. [9]

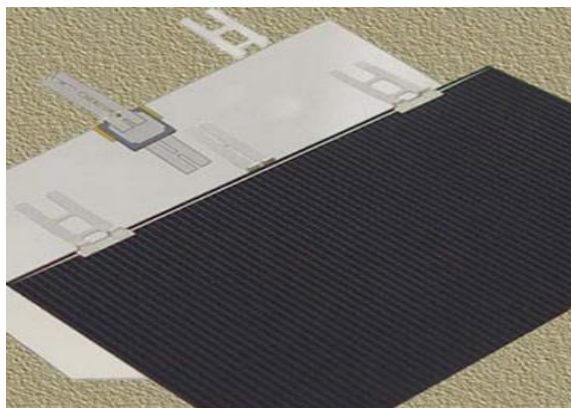


Figure.II.5: Cellule multi jonction [9]

Avantages

- Rendement inégalé

Inconvénients

- Pas ou peu d'applications commerciales. [9]

Les cellules photovoltaïques sont constituées de plusieurs éléments :

- Une fine couche semi-conductrice, telle que le silicium, qui possède une bande interdite et joue le rôle de barrière énergétique que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, permettant de varier les propriétés électroniques.
- Une couche antireflet pour maximiser la pénétration des rayons solaires.
- Une grille conductrice sur le dessus (cathode) et un métal conducteur en dessous (anode).
- Les cellules photovoltaïques les plus récentes intègrent même une combinaison de multicouches réfléchissantes sous le semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps à l'intérieur pour améliorer le rendement. [10]

III. Fonctionnement et Comportement d'une cellule photovoltaïque :

a. Fonctionnement de La jonction PN utilisée comme capteur PV :

Une jonction PN est polarisée électriquement et soumise à un rayonnement solaire pour obtenir des caractéristiques similaires à celles illustrées dans la figure II-6.

En l'absence d'éclairage, le comportement d'une cellule photovoltaïque ressemble à celui d'une mauvaise diode. Par conséquent, lors d'une polarisation directe, la barrière de potentiel est réduite et le courant des porteurs peut se propager. Seul un courant de porteurs minoritaires (courant de saturation) circule en cas de polarisation inverse. Il fluctue peu en fonction de la tension appliquée tant que celle-ci est moindre que la tension de claquage. Comme pour les jonctions traditionnelles, ces courants peuvent varier en fonction de la température de jonction. Si cette jonction PN est exposée au rayonnement solaire, des paires d'électrons-trous additionnelles se forment dans le matériau en fonction du flux lumineux.

Ce processus, également désigné sous le terme d'effet photovoltaïque, ne survient que si la puissance des photons dépasse ou dépasse celle de la bande interdite du matériau E_g . L'effet photovoltaïque est caractérisé par la variation de potentiel aux limites de la structure, qui varie en fonction des matériaux utilisés et de la configuration de la jonction. [11]

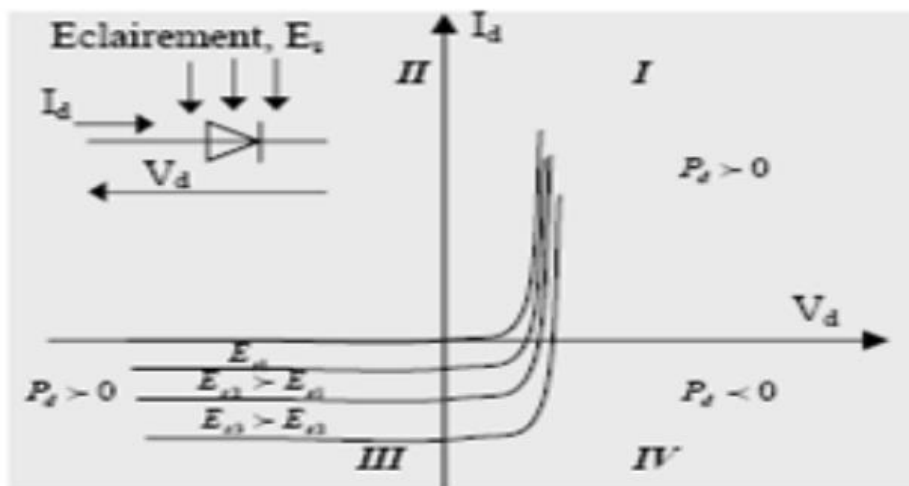


Figure.II.6: Caractéristiques d'une jonction PN polarisée sous différents éclairagements [11]

b. Comportement :

Une cellule photovoltaïque exposée à la lumière se comporte en générateur de courant DC, comme indiqué dans le quadrant Q4 de la **figure II.7**.

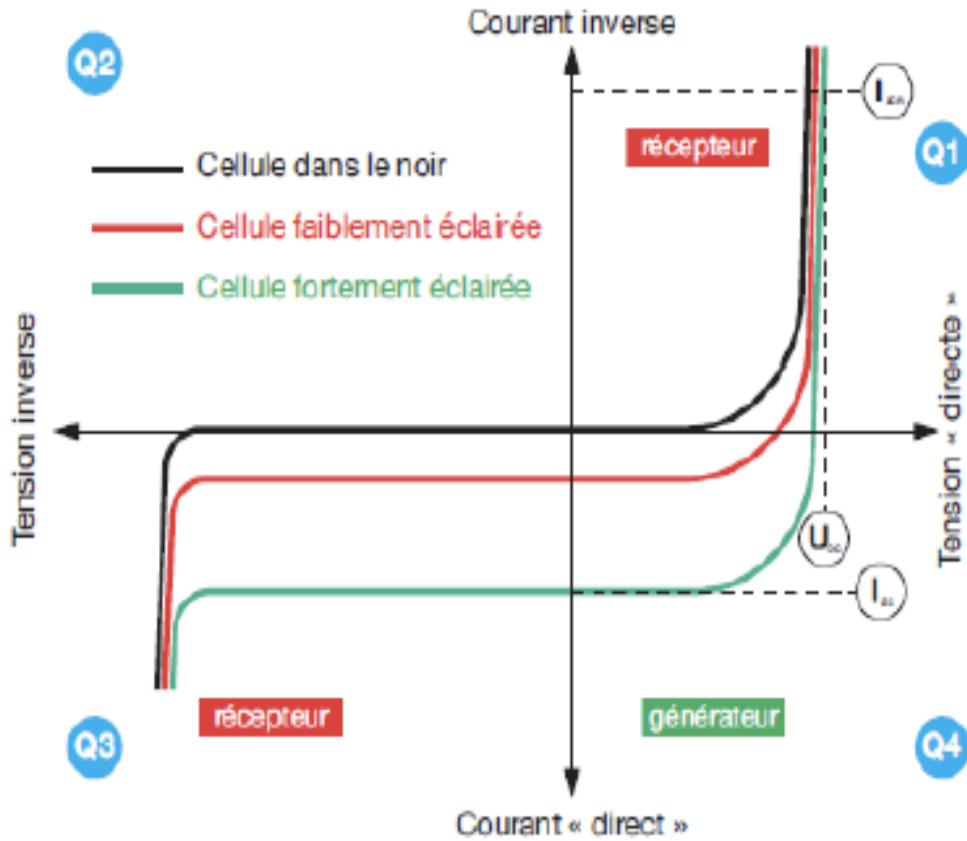


Figure.II.7: comportement d'une cellule photovoltaïque. [12]

Dans le noir, cette cellule se comporte pratiquement comme une diode classique. En cas de défauts dans l'installation ou dans la cellule, cette dernière peut se comporter en récepteur selon les quadrants Q1 ou Q3. Q1 $\Rightarrow V > V_{co}$: cette situation se présente lorsque la tension directe (V) appliquée à la cellule PV est plus grande que sa tension en circuit ouvert (V_{co}), comme dans une diode polarisée « en tension directe ». Q3 $\Rightarrow I > I_{sc}$: dans ce cas, le courant direct (I) imposé au module est plus élevé que celui I_{sc} qu'il est capable de générer, en court-circuit et en fonction de son ensoleillement, comme dans une diode polarisée "en tension inverse".

De façon générale, le quadrant Q4 est utilisé de façon inversée pour y faciliter la lecture du comportement des générateurs photovoltaïques en fonctionnement « normal ». Dans notre étude nous intéresserons au quadrant Q4. [12]

IV. Modules photovoltaïques et Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque :

a. Modules photovoltaïques :

La cellule individuelle, composante fondamentale d'un dispositif photovoltaïque, génère généralement une puissance électrique limitée de 1 à 3 W et une tension inférieure à un volt (0,6 V). Afin de générer davantage de puissance, on assemble les cellules pour créer un module ou un panneau.

La mise en parallèle des cellules permet d'augmenter la tension pour un courant identique. En conservant la tension, on peut augmenter le courant. Des rubans métalliques fins relient les cellules entre elles, créant des liaisons en face avant (-) et en face arrière (+).

Habituellement : un module comporte entre 36 et 72 cellules en série, bien que ce nombre diffère d'un constructeur à l'autre. Le fait de connecter des cellules en série permet leur utilisation à des tensions suffisamment élevées compatibles avec les charges électriques usuelles. [13]

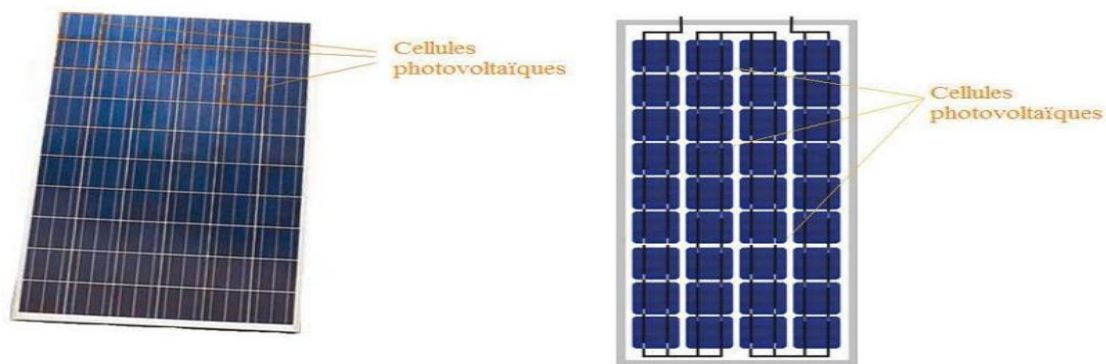


Figure.II.8 : Modules Photovoltaïque [13]

b. Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque :

Ce circuit modélise le comportement d'une cellule photovoltaïque, en tenant compte des courants et des tensions générés, ainsi que des résistances qui influencent l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

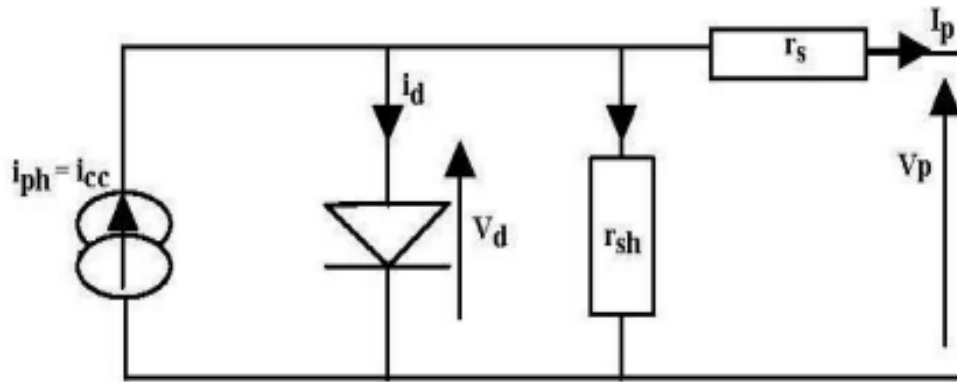


Figure.II.9 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque. [14]

- **I_{ph} (ou I_{cc})** : le courant de photo courant généré par la cellule photovoltaïque lorsqu'elle est exposée à la lumière. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse.
- **I_d** : le courant qui traverse la diode. La diode est utilisée pour empêcher le courant de circuler dans le sens inverse, protégeant ainsi la cellule.
- **V_d** : la tension aux bornes de la diode. Elle est généralement faible et dépend des caractéristiques de la diode.
- **R_{sh} (résistance de shunt)** : résistance en parallèle avec la diode et permet de minimiser les pertes de courant. Elle représente les chemins de fuite dans le circuit.
- **R_s (résistance série)** : Résistance en série avec le circuit et représente les pertes de résistance dans les connexions et les matériaux de la cellule.
- **I_p** : le courant de sortie du circuit, qui est le courant utile pour alimenter une charge.
- **V_p** : la tension de sortie du circuit, qui est la tension utile pour alimenter une charge.

V. Les avantages et les inconvénients de l'Energie photovoltaïque :

En tant que source d'énergie électrique, un système photovoltaïque offre des avantages mais aussi des inconvénients.

a. Avantages du photovoltaïque :

- une fiabilité élevée. L'installation n'est pas dotée de composants mobiles, ce qui la rend particulièrement adaptée aux zones éloignées. C'est pourquoi il est utilisé dans les engins spatiaux.
- Installation sans frais dès la mise en place du système.
- La structure modulaire des panneaux solaires facilite leur installation et les rend adaptables à différentes exigences énergétiques. Il est possible de dimensionner les systèmes pour des applications de puissance variant du Milliwatt au Mégawatt.
- Le coût d'exploitation est extrêmement bas en raison des entretiens minimes et il ne requiert ni carburant, ni son transport, ni personnel hautement qualifié.
- La technologie photovoltaïque offre des bénéfices pour l'environnement, car le produit final est non polluant, silencieux et ne provoque aucune perturbation de l'environnement.
- L'énergie renouvelable produite est propre et non nocive.
- Les dispositifs photovoltaïques présentent une grande fiabilité.
- La petite dimension et le fonctionnement silencieux de l'énergie photovoltaïque attirent particulièrement les sites urbains.
- Étant donné que la lumière solaire est omniprésente, on peut utiliser l'énergie photovoltaïque aussi bien dans un village isolé qu'en milieu urbain.
- L'énergie solaire est générée à proximité immédiate de l'utilisateur, de façon décentralisée et directement auprès de celui-ci. [15].

b. Inconvénients du photovoltaïque :

- La génération d'énergie qui repose sur la lumière solaire peut constamment varier.
- Pollution industrielle • « Si vous devez conserver de l'énergie grâce aux batteries, il sera nécessaire d'installer Augmenter. »
- La conversion d'unités réelles est peu efficace. L'efficacité de l'électricité baisse au fil du temps, atteignant une baisse de 20% après 20 ans.
- Le stockage de l'énergie électrique persiste à engendrer plusieurs difficultés.
- L'élaboration du module photovoltaïque avec une technologie avancée demande des dépenses d'investissement importantes. [15].

VIII. Simulation des panneaux photovoltaïques sous Matlab :

MATLAB est un environnement d'analyse numérique et un langage de programmation de quatrième génération. Il offre la possibilité de réaliser des calculs en matrice, d'élaborer et de mettre en œuvre des algorithmes, de concevoir des interfaces pour les usagers et de présenter des informations. Ce contexte multiparadigme de l'informatique numérique permet aux programmeurs d'interagir avec des logiciels rédigés dans différentes langues, en exploitant les bénéfices spécifiques de chaque langage pour diverses applications. [16].

Le schéma de simulation sous Matlab est réalisé comme suit :

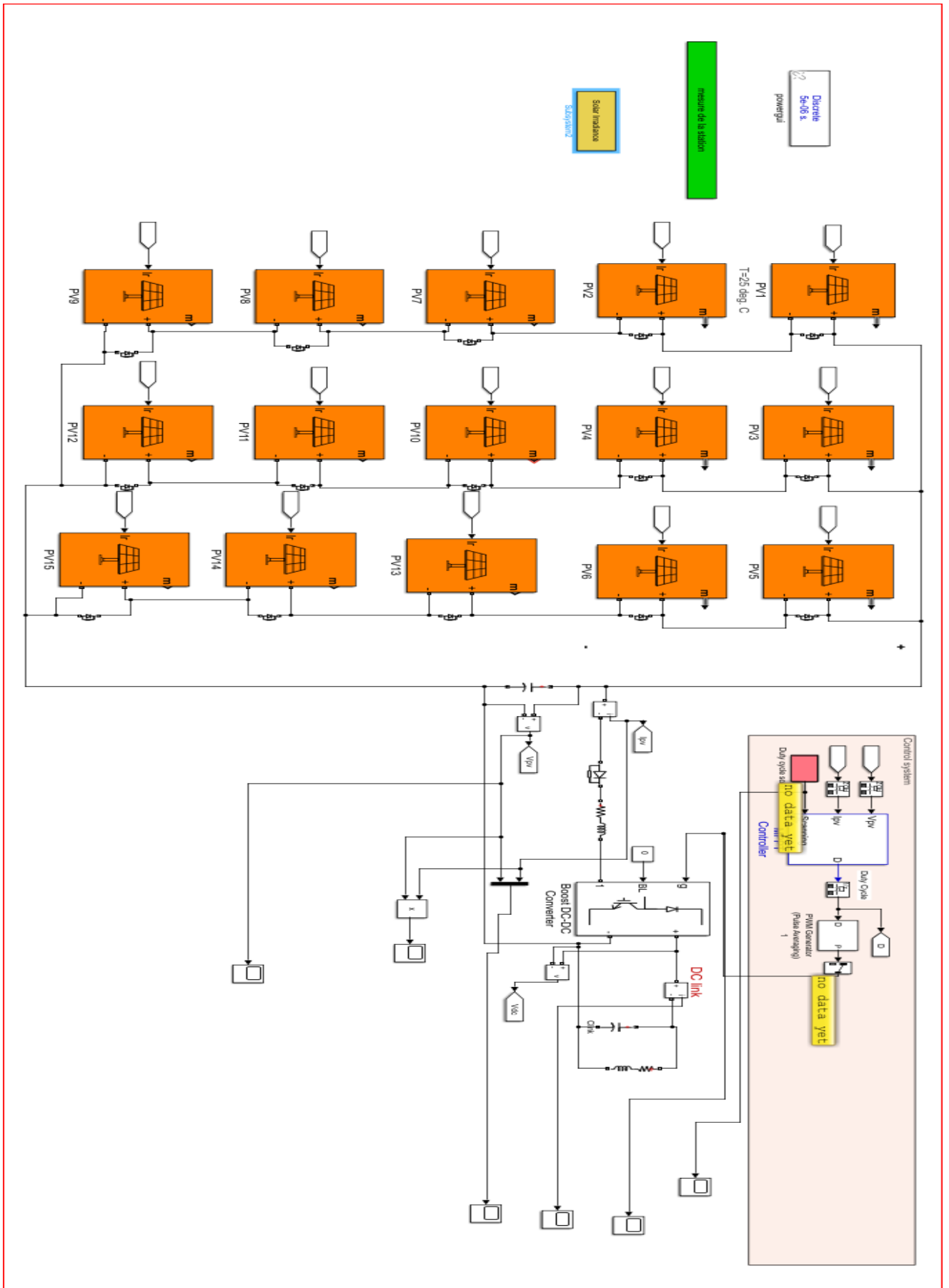


Figure II.10 : Schéma de simulation des panneaux photovoltaïques sous Matlab.

La simulation est réalisée avec des paramètres bien définies qui peuvent être consultés dans le tableau suivant :

Parameters		Advanced	
Array data			
Parallel strings	2	Display I-V and P-V characteristics of ...	
Series-connected modules per string	1	array @ 1000 W/m2 & specified temperatures	
		T_cell (deg. C) [45 25]	
		Plot	
Module data			
Module:	User-defined	Model parameters	
Maximum Power (W)	400.316	Light-generated current IL (A)	10.5166
Cells per module (Ncell)	72	Diode saturation current I0 (A)	5.8445e-12
Open circuit voltage Voc (V)	49.3	Diode ideality factor	0.94527
Short-circuit current Isc (A)	10.47	Shunt resistance Rsh (ohms)	194.9682
Voltage at maximum power point Vmp (V)	40.6	Series resistance Rs (ohms)	0.32878
Current at maximum power point Imp (A)	9.86		
Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)	-0.2600		
Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)	0.03		

Figure II.11 : Paramètres de simulation panneaux photovoltaïques sous Matlab.

Après avoir réalisé la simulation nous avons fixée divers profils de radiation, Les résultats sont présentés sur les graphes ci-dessous :

- **Profil 1 :**

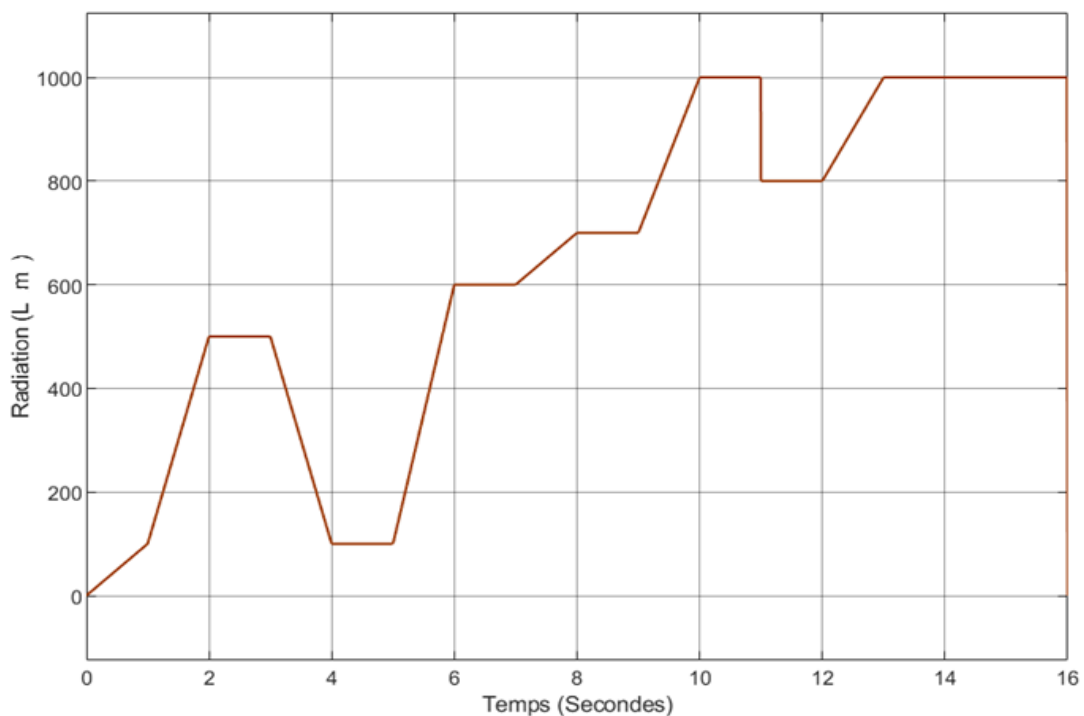


Figure.II.12 : Radiation par rapport au temps

Interprétation des résultats de la Figure II.12 :

La radiation présente des augmentations et des diminutions significatives au cours des 15 secondes observées, avec une tendance globale à l'augmentation, atteignant un plateau de 1000 Lm vers la fin.

- **Profil 2 :**

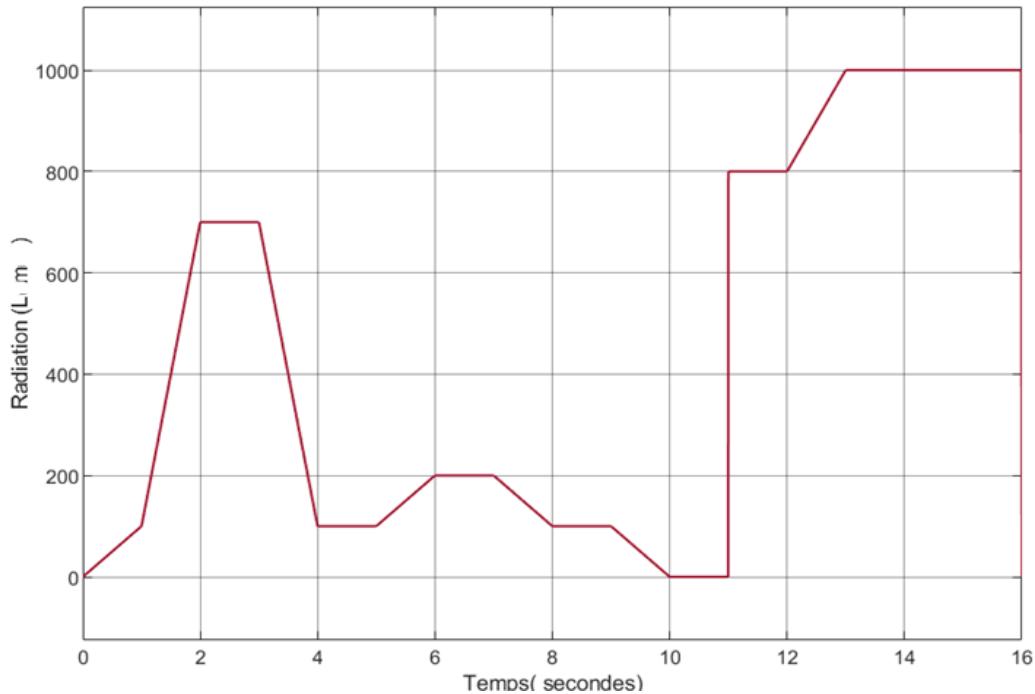


Figure.II.13 : Radiation par rapport au temps

Interprétation des résultats de la Figure II.13 :

La radiation montre des variations importantes au cours des 15 secondes, avec plusieurs augmentations et diminutions. Globalement, il y a une tendance à la hausse, culminant à 1000 Lm vers la fin de la période observée.

La courbe est caractérisée par des segments où la radiation est stable, des augmentations rapides, et quelques diminutions brusques.

Remarque :

Les perturbations sont dû aux divers profils de radiations qui se résume à :

- La durée de l'ensoleillement et la température ;
- L'inclinaison et l'orientation du panneau ;
- Les conditions météorologiques ;
- L'effet de l'ombre.

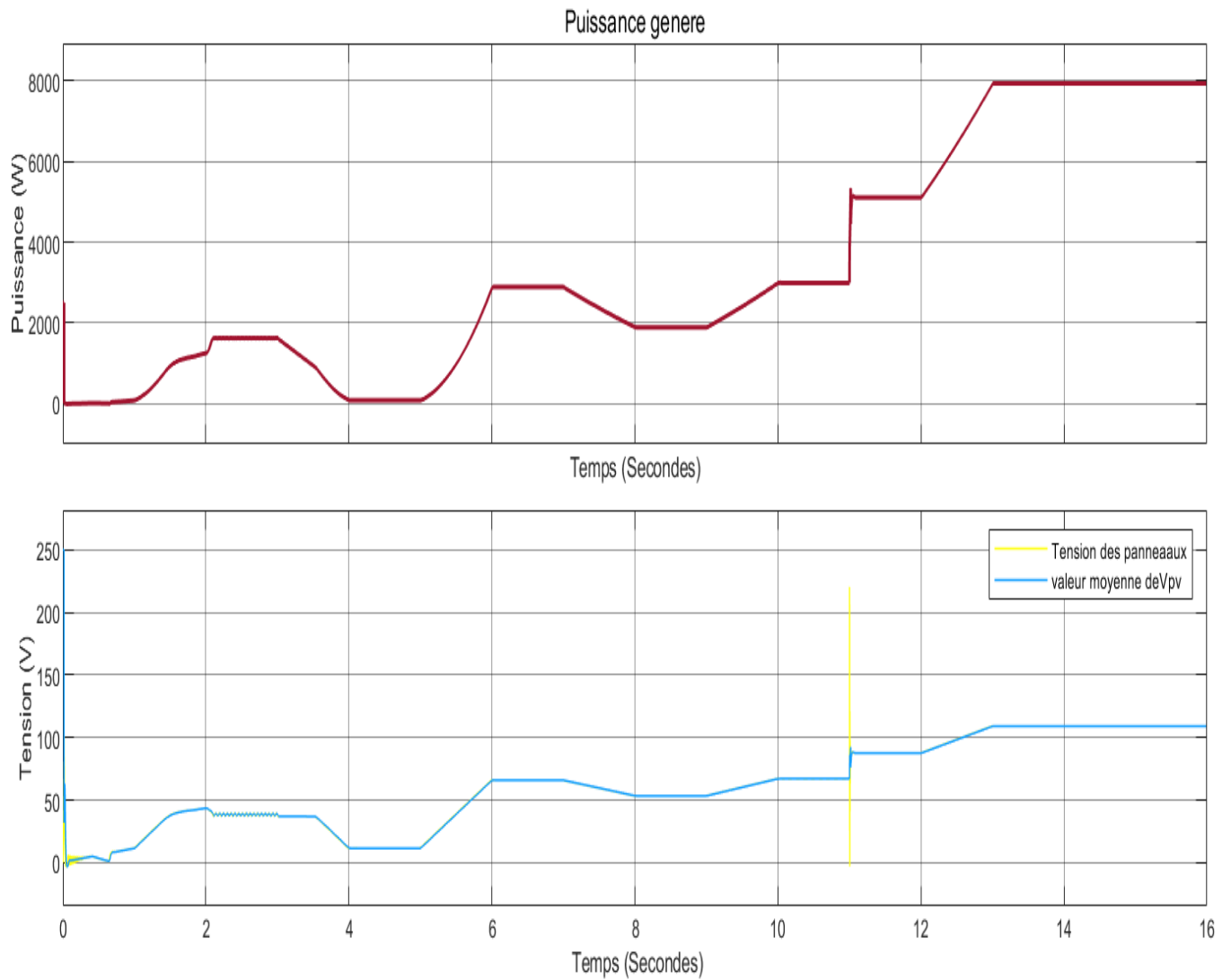


Figure.II.14 : Puissance généré et la tension des panneaux photovoltaïques.

Interprétation des résultats de la Figure II.14 :

La puissance générée par les panneaux augmente globalement au fil du temps, avec des variations et des stabilisations à différents paliers de puissance.

La tension des panneaux montre des fluctuations initiales avant de se stabiliser, tandis que la valeur moyenne de la tension suit une tendance plus stable avec une légère augmentation au fil du temps.

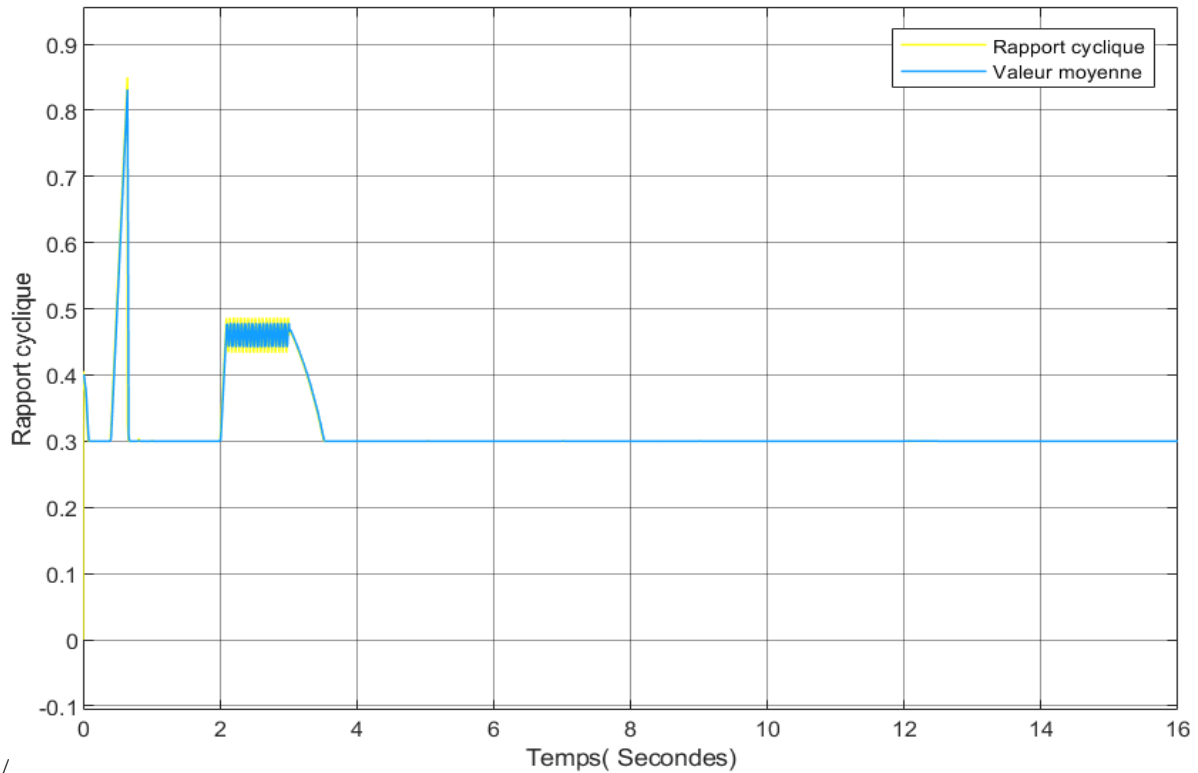


Figure.II.15 : Le rapport cyclique et la valeur moyenne par rapport au temps.

Interprétation des résultats de la Figure II.15 :

Le rapport cyclique commence à augmenter, diminue rapidement, se stabilise, subit des oscillations, chute à nouveau et reste ensuite stable à une valeur plus basse.

La valeur moyenne suit la tendance du rapport cyclique mais elle est moins affectée par les oscillations et maintient une valeur plus constante, se stabilisant vers la fin.

Conclusion :

En conclusion, les cellules photovoltaïques sont essentielles à la production d'énergie solaire, disponibles en plusieurs types et fonctionnant selon différents principes. Comprendre leurs effets, modules et circuits équivalents est crucial pour optimiser l'efficacité des systèmes photovoltaïques. Bien que l'énergie photovoltaïque présente des avantages comme une source propre et renouvelable, elle comporte des inconvénients tels que des coûts initiaux élevés.

Les simulations montrent que divers facteurs influencent la performance des panneaux, avec des augmentations de puissance et de tension au fil du temps. Le rapport cyclique présente une variabilité significative, mais la valeur moyenne reste plus stable et moins affectée par les fluctuations à long terme.

Chapitre III
Etude, modélisation et simulation
d'un convertisseurs multi-niveau

Introduction :

Les convertisseurs multi-niveaux représentent une avancée majeure dans le domaine de l'électronique de puissance, offrant des solutions efficaces pour la conversion d'énergie électrique entre différentes tensions et fréquences. Contrairement aux convertisseurs traditionnels à deux niveaux, les convertisseurs multi-niveaux exploitent plusieurs niveaux de tension pour obtenir des formes d'onde plus proches des signaux désirés. Cette approche permet de réduire les pertes de commutation, d'améliorer la qualité de l'onde de tension de sortie et de minimiser les harmoniques, ce qui les rend particulièrement adaptés aux applications exigeantes en termes de qualité d'énergie.

[2]

I. Analyse du principe de fonctionnement et des limites de convertisseur nibb à trois niveaux :

La topologie de TL-CNIBB est représentée sur la figure 1, où la partie gauche et la partie droite sont composées respectivement d'un convertisseur abaisseur à trois niveaux et d'un convertisseur élévateur à trois niveaux. Ils sont intégrés par deux inducteurs.

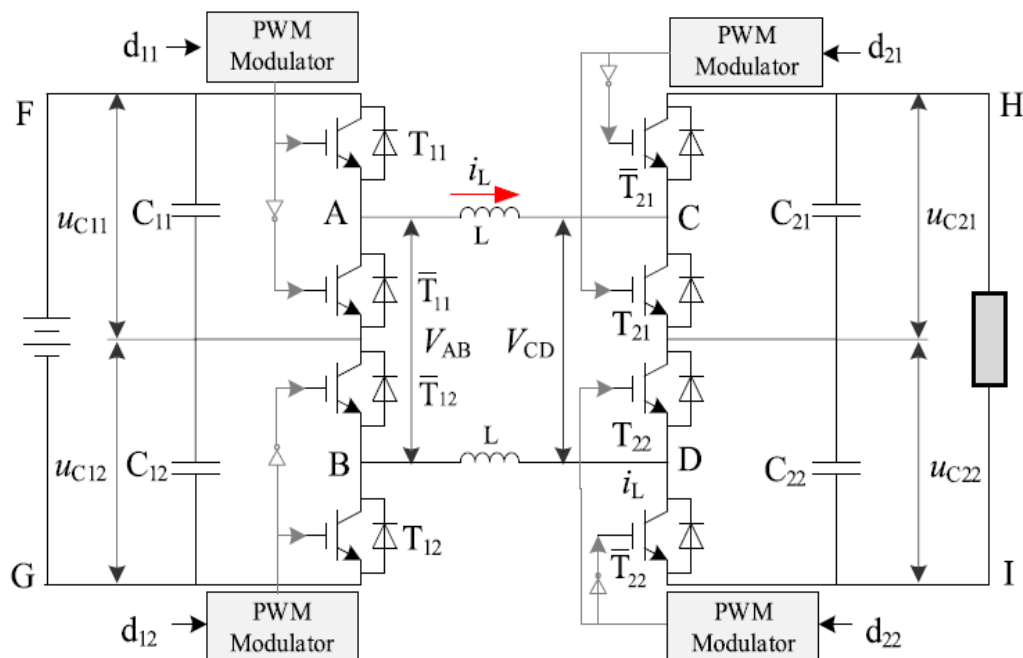


Figure.III.1 : Topologie du TL-CNIBB proposé. [17]

Sur la figure 1 :

- T_{11} , T_{12} , T_{21} , et T_{22} sont les interrupteurs et \bar{T}_{11} , \bar{T}_{12} , \bar{T}_{21} , \bar{T}_{22} sont les correspondants interrupteurs complémentaires.
- L est l'inductance, et C_{11} , C_{12} , C_{21} , C_{22} sont les condensateurs.

- $U_{c11}, U_{c12}, U_{c21}, U_{c22}$ sont les tensions des condensateurs.
- I_L est le courant de l'inductance et $d_{11}, d_{12}, d_{21}, d_{22}$ sont les rapports cyclique des commutateurs. [17]

Selon les états des convertisseurs, 16 états opérationnels sont présentés sur la figure III.2. Grâce aux états opérationnels de la première rangée, la topologie peut réaliser l'augmentation de tension.

Grâce aux états opérationnels de la première colonne, la topologie peut réaliser l'abaissement de tension.

Plus de détails sont décrits ci-dessous :

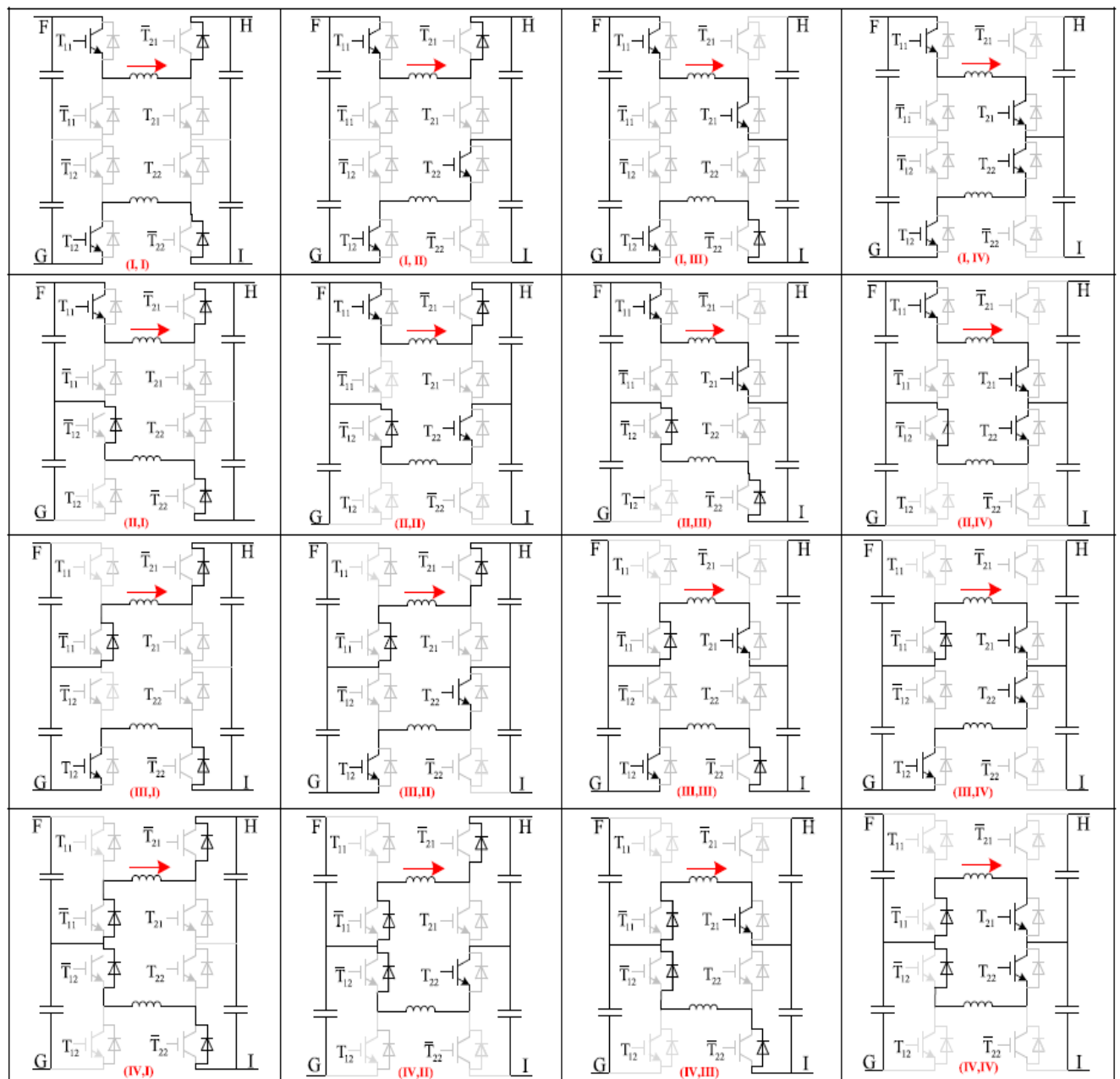


Figure.III.2 : Tous les états de TL-CNIBB. [17]

En mode Buck, les switches de la partie gauche sont modulés et les switches de la partie droite

sont toujours conservés en ON ou OFF. Le mode Buck de TL-CNIBB a quatre états de fonctionnement, à savoir :

(I,I), (II,I), (III,I), (IV,I) c'est-à-dire la première colonne de la **figure III.2**.

Lorsque la tension de sortie est inférieure à la moitié de la tension d'entrée ($M=V_{dehors}/V_{dans}<0,5$ où M est le gain de tension), la séquence de commutation est (II,I)→(IV,I)→(III,I)→(IV,I) dans une période.

En attendant, lorsque la tension de sortie est supérieure à la moitié de la tension d'entrée ($M=V_{dehors}/V_{dans}>0,5$), la séquence de commutation est (II,I)→(I,I)→(III,I)→(I,I) dans une période. [17]

La modulation du mode abaisseur peut être réalisée par une onde de modulation et deux ondes porteuses déphasées, comme le montre la **figure III.3**.

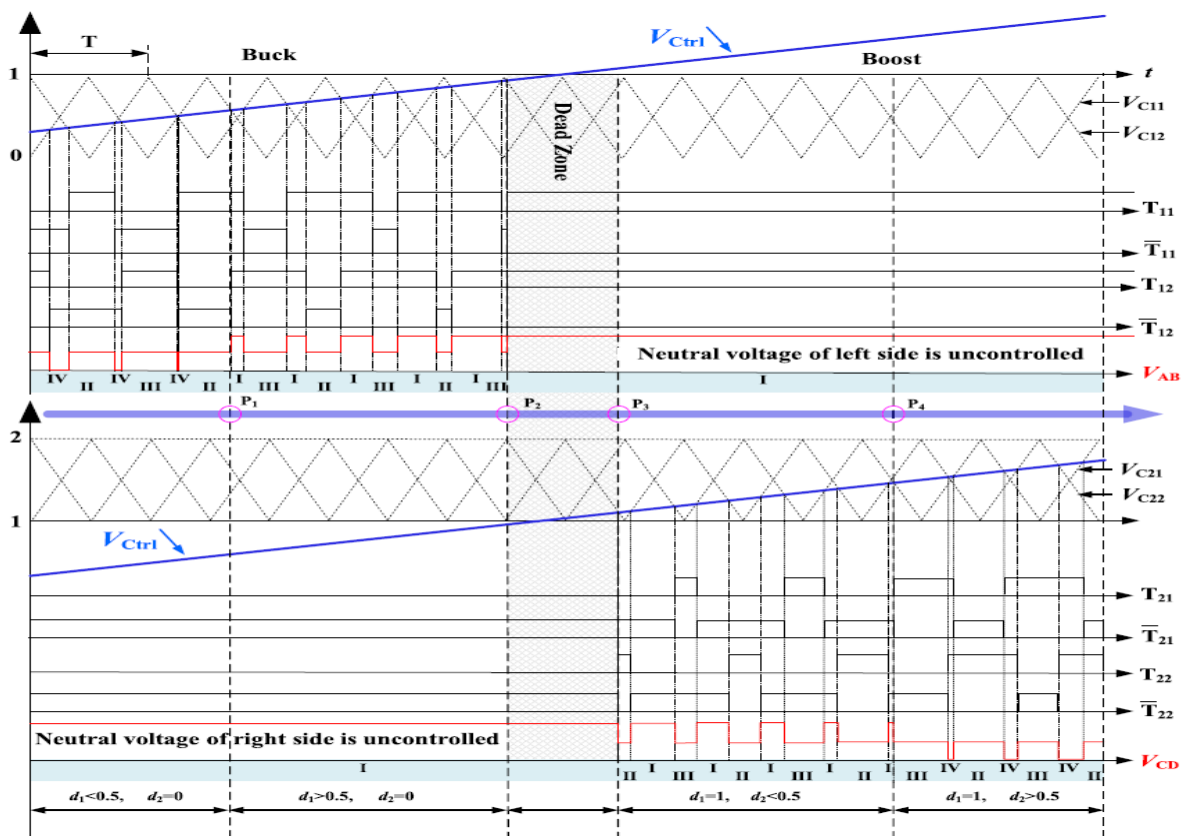


Figure.III.3 : Mode Buck traditionnel ou mode Boost. [17]

• **Principe de fonctionnement du mode Buck et du mode Boost :**

En mode boost, les switches de la partie gauche sont toujours conservés en ON ou OFF, et ceux de la jambe boost sont modulés. Le mode boost du TLCNIBB comporte également quatre états de fonctionnement :

(I, I), (I, II), (I, III) et (I,IV), qui constituent la première rangée de la figure III.2. Lorsque la tension de sortie est inférieure à deux fois la tension d'entrée ($M=V_{dehors}/V_{dans}<2$), la séquence de

commutation est (I,II)→ (I,I)→ (I,III)→ I,I dans une période.

Pendant ce temps, lorsque la tension de sortie est supérieure à deux fois la tension d'entrée ($M=V_{\text{dehors}}/V_{\text{dans}}>2$), la séquence de commutation est (I,II)→ (I,IV)→ (I,III)→ (I,IV) dans une période.

La modulation du mode boost peut également être réalisée par la même onde de modulation et deux ondes porteuses déphasées, comme le montre la **figure III.3**. Les ondes porteuses pour la jambe abaisseur et la jambe boost se présentent sous la forme d'une disposition de phase.

La stratégie de modulation peut être réalisée par la disposition de phase de la porteuse hybride et la modulation déphasée de la porteuse.

Les commutateurs du même côté sont modulés par une modulation déphasée de la porteuse, tandis que les ondes porteuses pour la jambe abaisseur et la jambe boost se présentent sous la forme d'une disposition de phase. [17]

II. Le dimensionnement d'un système photovoltaïque de 10 kW :

Le dimensionnement d'un système photovoltaïque de 10 kW nécessite de prendre en compte plusieurs facteurs pour s'assurer que le système fonctionne efficacement et de manière optimale. Voici les étapes principales pour dimensionner un tel système :

1. Estimation de la production d'énergie :

La production d'énergie d'un système photovoltaïque dépend de plusieurs facteurs :

- L'ensoleillement : La quantité de soleil que reçoit l'emplacement.
- L'orientation et l'inclinaison des panneaux : Idéalement, les panneaux doivent être orientés plein sud (dans l'hémisphère nord) avec une inclinaison optimale qui dépend de la latitude.
- Les pertes et l'efficacité du système : Les pertes peuvent être dues à l'ombre, à la température, à la saleté, et à l'efficacité de l'onduleur.

2. Surface occupée :

Les panneaux photovoltaïques standard mesurent environ 1,6m² chacun. Donc pour 30 panneaux :

$$Surface\ totale = 30\ panneaux \times 1,6\ m^2 = 48\ m^2 \quad (II.1)$$

Choix de l'onduleur :

L'onduleur doit être capable de gérer la puissance totale générée par les panneaux. Pour un système de 10 kW, il est recommandé de choisir un onduleur avec une puissance nominale égale ou légèrement supérieure à 10 kW.

3. Considérations de câblage et de protection :

- Câblage : Utilisez des câbles de section appropriée pour minimiser les pertes. La section des câbles dépend de la distance entre les panneaux et l'onduleur.
- Protection : Installez des disjoncteurs et des parafoudres pour protéger le système contre les surtensions et les courts-circuits.

4. Calcul de la production annuelle :

La production annuelle peut être estimée en utilisant la formule suivante :

$$\text{Production annuelle (kWh)} = \text{Puissance du système (kWc)} \times \text{Heures d'ensoleillement annuelles (h)} \times \text{Facteur de performance} \quad (\text{II.2})$$

Le facteur de performance (ou facteur de capacité) est généralement compris entre 0.75 et 0.85 pour prendre en compte les pertes.

Exemple concret :

Supposons que vous ayez une localisation avec un ensoleillement moyen de 1500 heures par an et un facteur de performance de 0.8 :

$$\text{Production annuelle} = 10 \text{ kWc} \times 1500 \text{ h} \times 0.8 = 12000 \text{ kWh/an} \quad (\text{II.3})$$

III. Prix des panneaux photovoltaïques en Algérie :

Le prix d'un système photovoltaïque de 10 kW en Algérie peut varier en fonction de plusieurs facteurs tels que la qualité des panneaux, le type d'onduleur, les coûts d'installation, et les spécificités du site. Voici une estimation générale des coûts basés sur les informations disponibles jusqu'en 2023 :

1. Coût des panneaux photovoltaïques :

Les panneaux photovoltaïques de bonne qualité coûtent généralement entre 13500 et 40500 Dz par panneau pour des puissances de 330 W à 400 W. Pour un système de 10 kW, vous aurez besoin de 25 à 30 panneaux. En prenant un coût moyen de 27000 Dz par panneau pour une puissance de 330W :

$$\text{Coût des panneaux} = 30 \times 27000 \text{ Dz} = 810000 \text{ Dz} \quad (\text{II.4})$$

2. Coût de l'onduleur :

Un onduleur de 10 kW de bonne qualité peut coûter entre 135000 et 405000 Dz. Le prix varie en fonction de la marque et des fonctionnalités (hybride, connectivité, etc.). Prenons une estimation moyenne de 270000 Dz :

$$\text{Coût de l'onduleur} = 270000 \text{ Dz} \tag{II.5}$$

3. Coût de l'installation et autres équipements :

Les coûts d'installation comprennent la main-d'œuvre, les structures de montage, le câblage, les protections (disjoncteurs, parafoudres), et les frais d'inspection.

Ces coûts peuvent représenter environ 20% à 30% du coût total des équipements.

$$\text{Coût de l'installation et autres équipements} = 0.25 \times (\text{Coût des panneaux} + \text{Coût de l'onduleur}) \tag{II.6}$$

$$\text{Coût de l'installation et autres équipements} = 0.25 \times (810000 \text{ Dz} + 270000 \text{ Dz}) = 270000 \text{ Dz} \tag{II.7}$$

4. Coût total estimé :

En additionnant tous les coûts, on obtient :

$$\text{Coût total} = \text{Coût des panneaux} + \text{Coût de l'onduleur} + \text{Coût de l'installation et autres équipements} \tag{II.8}$$

IV. Une transition en douceur entre les différents modes :

Dans le but de réaliser une transition en douceur entre les différents modes et de résoudre le problème de broutage, une technique de transition en douceur a été proposée : [16]

a. CAS : $\Delta d_1 \leq \delta_1, \Delta d_2 \leq \delta_2$

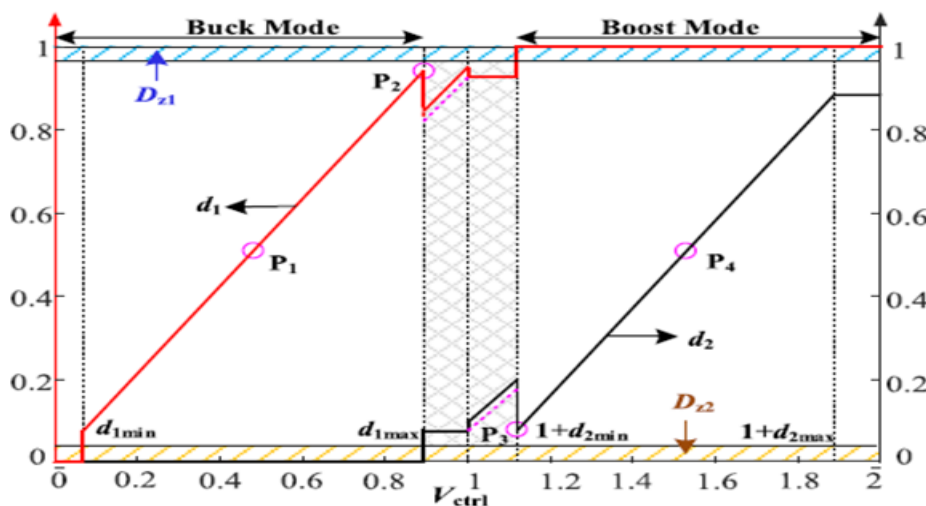


Figure.III.4 : Stratégie de transition en douceur [16]

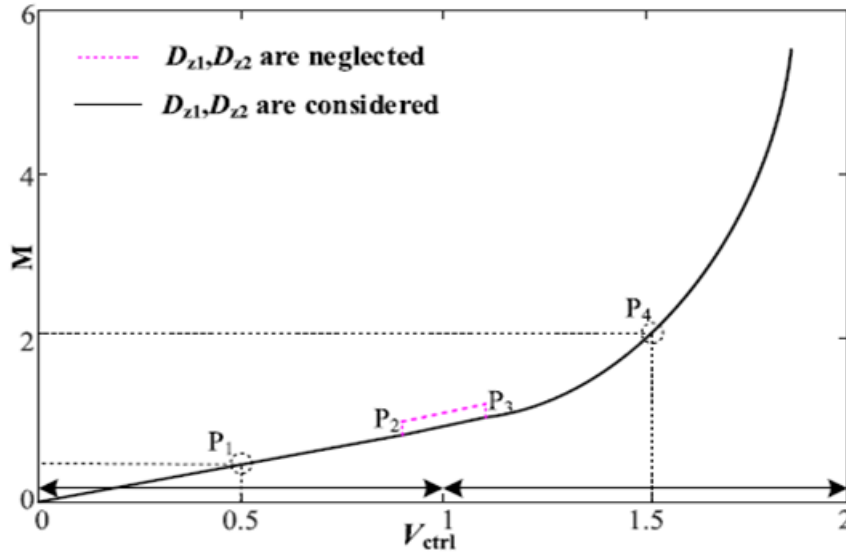


Figure.III.5 : Relation entre le gain de tension et le signal de commande VCtrl. [17]

Dans ce cas, les différences de tensions des condensateurs des deux côtés sont faibles, et $\Delta d1$ et $\Delta d2$ sont petits ($\Delta d1 \approx 0$, $\Delta d2 \approx 0$, $\delta1$, $\delta2$ sont définis comme deux petites constantes). Ainsi, les tensions des condensateurs peuvent être auto-équilibrées et le contrôle d'équilibrage de tension n'est pas nécessaire. La méthode de transition en douceur peut être proposée sur la **figure III.4**

Lorsque le signal de commande $Vctrl$ est dans la plage $[d1max, 1]$, le gain de tension est donné par : [17]

$$M = d1 - Dz11 - (d2min - Dz2) = Vctrl - Dz1. \tag{III.1}$$

Il donne le rapport de service compensé de la jambe de support comme :

$$d1 = (Vctrl - Dz1)(1 - d2min + Dz2) + Dz1 \tag{III.2}$$

Lorsque le signal de commande $Vctrl$ est dans la plage $[1, 1+d2min]$, le gain de tension est :

$$M = \frac{d1max - Dz1}{1 - (d2 - Dz2)} = \frac{1}{1 - (Vctrl - 1 - Dz2)} \tag{III.3}$$

Il donne le rapport de service compensé de la jambe de suralimentation comme :

$$d2 = 1 - (d1max - Dz1)(2 - Vctrl + Dz2) + Dz2 \tag{III.4}$$

Dans d'autres régions, le rapport de service est égal à V_{ctrl} ou 0, ou satisfaisant la relation linéaire simple. Enfin, les rapports de service $d1$ et $d2$ peut être obtenu comme : [16]

$$d1 = \begin{cases} 0, 0 < V_{ctrl} < d1min \\ V_{ctrl}, d1min < V_{ctrl} < d1max \\ (V_{ctrl} - Dz1)(1 - d2min + Dz2) + Dz1 \\ d1max < V_{ctrl} < 1 \\ d1max, 1 < V_{ctrl} < 1 + d2min \\ 1, 1 + d2min < V_{ctrl} < 2 \end{cases} \quad (III.5)$$

$$d1 = \begin{cases} 0, 0 < V_{ctrl} < d1max \\ d2min, u1max < V_{ctrl} < 1 \\ 1 - (d1max - Dz1)(2 - V_{ctrl} + Dz2) + Dz2 \\ 1 < V_{ctrl} < 1 + d2min \\ V_{ctrl} - 1 + d2min < V_{ctrl} < 1 + d2max \\ d2max, 1 + d2max < V_{ctrl} < 2. \end{cases} \quad (III.6)$$

V. Application d'une commande sous Matlab/Simulink :

Le schéma de simulation sous Matlab du convertisseurs Buck/Boost est réalisé comme suit :

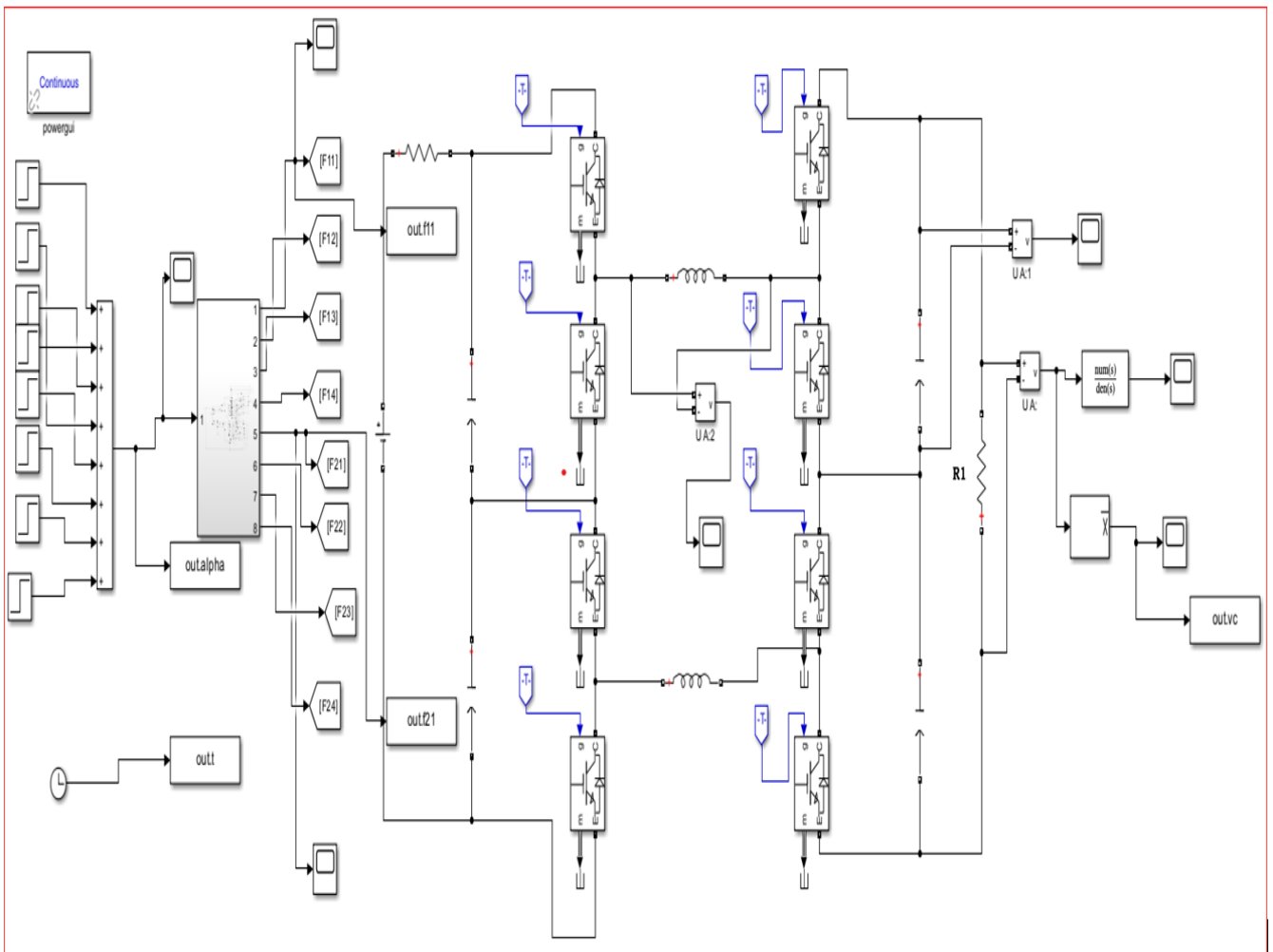


Figure.III.6 : Schéma de simulation du convertisseurs Buck/Boost

L'application de la commande a pour but de visualisé la tension de sortie du convertisseur lors de la variation du rapport cyclique α .

Les résultats sont interprétés dans le tableau suivant :

Tableau.III.1 : Tension de sortie par rapport à α

$1 + \alpha$	V_c (V)
0,1	666
0,2	750
0,3	857
0,4	1000
0,5	1200
0,6	1500
0,7	2000

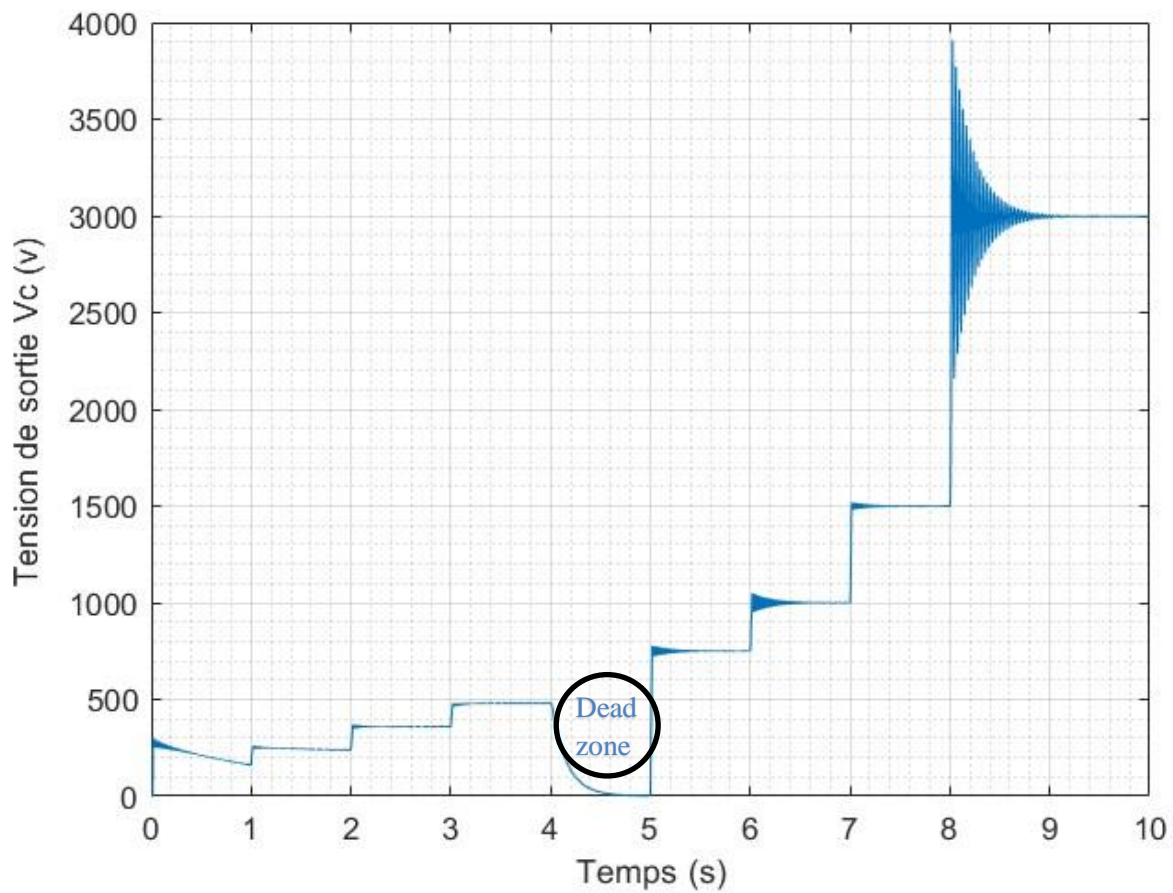


Figure.III.7 : Schéma de la tension de sortie V_c par rapport aux temps.

Interprétation des résultats de la Figure III.7 :

La courbe montre des variations significatives de la tension de sortie V_c au fil du temps, avec des augmentations par paliers.

Elle présente aussi des sauts soudains, des chutes, et des oscillations notables.

La baisse de tension au niveau de l'intervalle [4s ; 5s] elle est dû à la Dead Zone au point 1 comme le montre la **Figure III.3**.

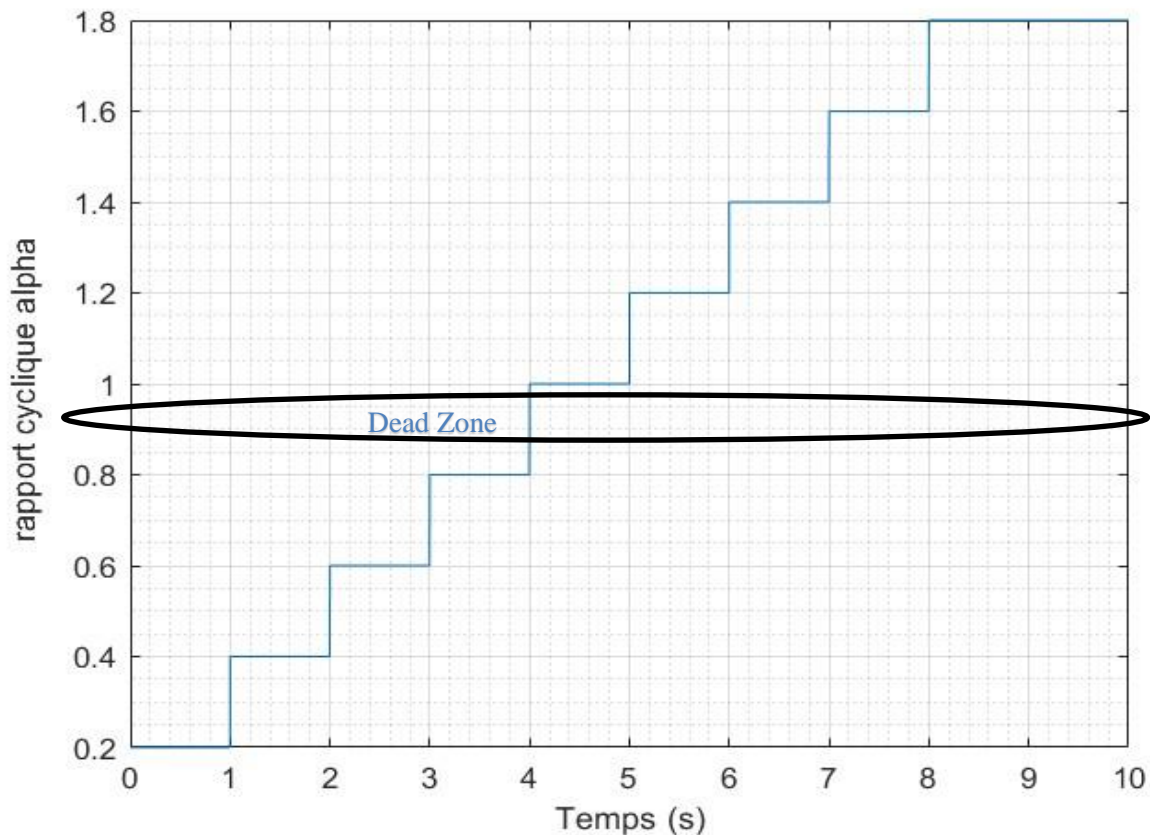


Figure.III.8 : Schéma du rapport cyclique Alpha α par rapport aux temps

Interprétation des résultats Figure III.8 :

La courbe montre une série d'augmentations par paliers. Cela signifie que la valeur du rapport cyclique alpha augmente par des incréments discrets à des intervalles de temps réguliers.

À temps 0, la valeur d'Alpha est à 0,2, à chaque unité de temps (1s, 2s, 3s, etc.), la valeur du rapport cyclique alpha augmente d'environ 0,2. Cette augmentation se produit jusqu'à temps 8s, où cette dernière atteint environ 1,8.

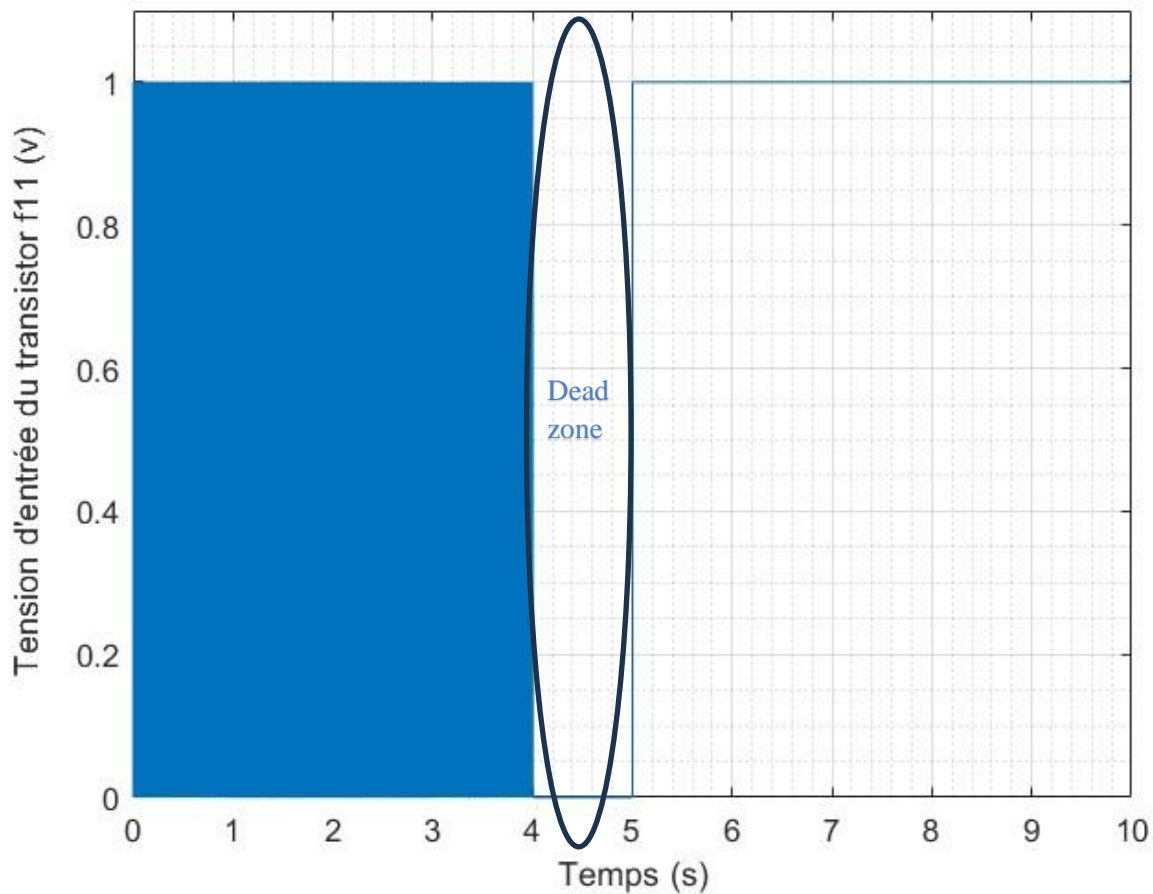


Figure.III.9 : Schéma de la Tension d'entrée du transistor f11 par rapport au temps.

Interprétation des résultats de la Figure III.10 :

Durant l'intervalle allant de 0 à 4 secondes, la tension d'entrée du transistor f11 est en variation significatives entre l'état haut et bas qui est le rapport cyclique de la tension.

L'intervalle allant de 4 à 5 secondes nous montre la Dead zone.

Au moment d'atteindre les 5 secondes, la tension d'entrée augmente d'un pique jusqu'à atteindre 1v pour le reste de la période allant de 5 à 10 secondes.

Ce graphique indique un changement soudain de la tension d'entrée du transistor f11 à la marque de 5 secondes, passant d'un état de variation à un état élevé (1v). Ce comportement pourrait représenter un événement déclencheur ou un changement dans l'état du transistor à ce moment précis.

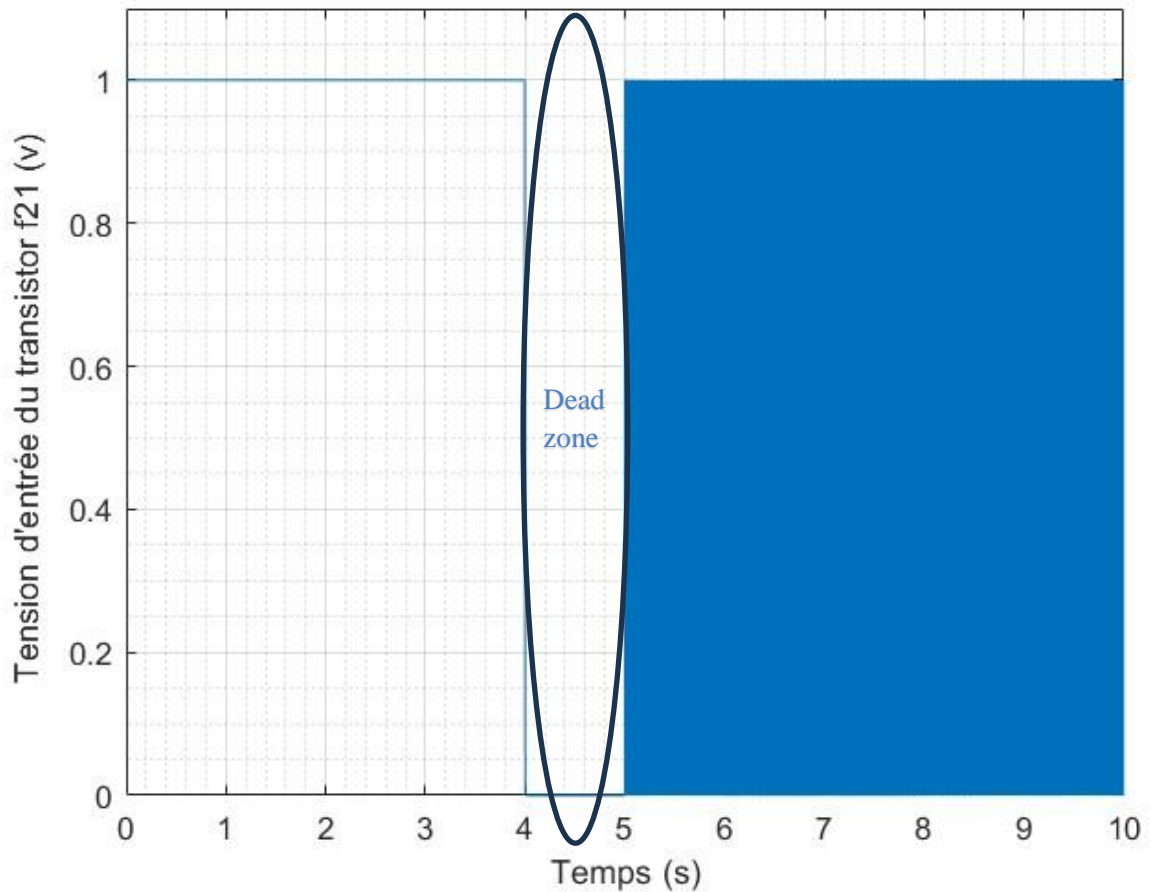


Figure.III.10 : Schéma de la Tension d'entrée du transistor f21 par rapport au temps.

Interprétation des résultats de la Figure III.11 :

Durant l'intervalle allant de 0 à 4 secondes, la tension d'entrée du transistor f21 est à un niveau élevé de 1 v.

Au moment d'atteindre les 4 secondes, la tension d'entrée chute jusqu'à atteindre 0 v qui est dû à la Dead zone.

Durant l'intervalle allant de 5 à 10 secondes, la tension d'entrée du transistor f11 est en variation significatives entre l'état haut et bas qui est le rapport cyclique de la tension.

Ce graphique indique un changement soudain de la tension d'entrée du transistor f21 à la marque de 4 secondes, passant d'un état élevé (1v) à un état de variation de tension. Ce comportement pourrait représenter un événement déclencheur ou un changement dans l'état du transistor à ce moment précis.

CONCLUSION :

En conclusion, cette analyse démontre que le convertisseur TL-CNIBB à trois niveaux est une solution robuste et adaptable pour des applications nécessitant une gestion fine de la tension, avec des transitions entre les différents modes opérationnels. Les résultats obtenus soulignent la pertinence des stratégies de modulation et de transition, tout en ouvrant la voie à des améliorations futures pour des performances optimisées.

L'application de la commande sous Matlab/Simulink pour le convertisseur Buck/Boost permet de visualiser et d'analyser les variations de la tension de sortie en fonction du rapport cyclique α . Les résultats montrent des variations significatives de la tension de sortie, des oscillations notables et des phénomènes tels que la "Dead Zone".

L'étude des courbes de la tension de sortie, du rapport cyclique, de la température, et des tensions d'entrée des transistors f11 et f21 met en évidence des comportements dynamiques et des changements d'état importants pour l'optimisation des performances.

Chapitre IV
Simulation de l'émulateur

Introduction :

Ce chapitre vise à simuler l'émulateur photovoltaïque en associant les modèles de cellules solaires présentés dans le deuxième chapitre avec celui du hacheur développé dans le troisième chapitre. La mise en place d'une régulation permettra au hacheur de fonctionner de manière à ce que son impédance varie et suive la caractéristique réelle en fonction des différents paramètres (température, irradiation) des cellules solaires de notre installation photovoltaïque.

L'objectif est de reproduire les performances d'un système PV de manière contrôlée pour tester efficacement les équipements tels que les onduleurs.

I. Principe de fonctionnement de l'émulateur PV :

La Figure (IV-2) illustre la caractéristique courant-tension (V-I) d'un module photovoltaïque à émuler, ainsi que la ligne de charge correspondant à une charge purement résistive fixe R_{load} superposée à cette caractéristique (I-V). Pour cette charge spécifique, si le convertisseur fonctionne au point d'intersection entre la caractéristique (I-V) du module et la ligne de charge R_{load} , il peut se comporter comme un émulateur. Cela indique que la ligne de charge R_{load} croise la caractéristique (I-V) du module au point « c ».

Le convertisseur peut alors agir en tant qu'émulateur si, en régime permanent, sa tension et son courant de sortie sont respectivement V_{pv3} et I_{pv3} , où $V_{pv3}/I_{pv3} = R_{pv3} = R_{load}$. [18]

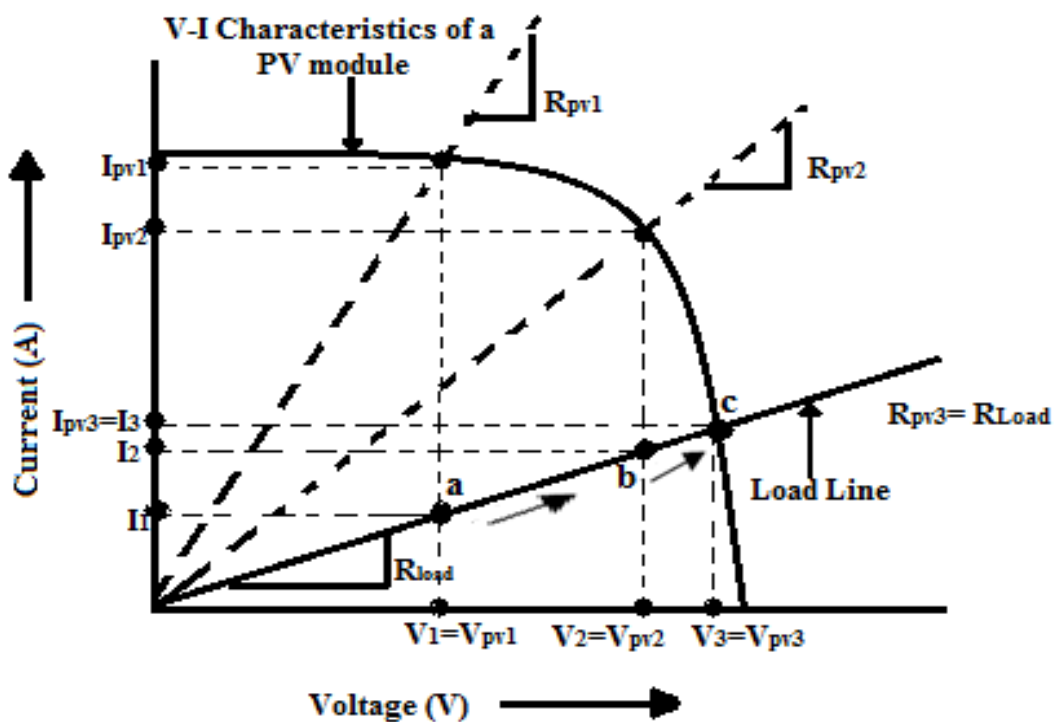


Figure.IV.1 : Principe de fonctionnement de l'émulateur PV [18]

Le point « a » est le point de fonctionnement auquel la tension et le courant sont respectivement V_1 et I_1 . Le modèle PV génère la tension $V_1 = V_{pv1}$ et le courant I_{pv1} en ce point la résistance de charge est R_{pv1} qui est inférieure à R_{load} . De sorte que le convertisseur soit assez puissant pour agir comme émulateur ; ce point « a » déplacé au point « b ».

Au point « b », la tension augmente de V_{pv1} à V_{pv2} le courant diminue de I_{pv1} à I_{pv2} . La résistance au point « b » est R_{pv2} qui est également inférieure à R_{load}

Donc une fois de plus le convertisseur n'est pas assez puissant pour agir comme émulateur. La tension $V_3 = V_{pv3}$ et le courant $I_3 = I_{pv3}$ au point « c ». La résistance de charge est R_{pv3} au point « c » égal à R_{load} .

II. Principe de fonctionnement du contrôleur choisi :

1. Mode Buck :

Afin de suivre la courbe, il faut que la résistance équivalente soit des valeurs tel que :

$$R_{eq} = \frac{R}{\alpha^2} \quad (IV.1)$$

Pour commencer :

$$P_e = E \cdot i_{smoy} = V_c \cdot i_{cmoy} \quad (IV.2)$$

$$P_e = E \cdot \left(\frac{E}{R_{eq}} \right) = V_c \cdot \left(\frac{V_c}{R} \right) \quad (IV.3)$$

On a :

$$V_c = \alpha \cdot E \quad (IV.4)$$

$$\frac{E^2}{R_{eq}} = \frac{V_c^2}{R} = \frac{(\alpha E)^2}{R} \quad (IV.5)$$

Ce qui nous ramène à la relation entre R et R_{eq} :

$$R_{eq} = \frac{R}{\alpha^2} \quad (IV.6)$$

2. Mode boost :

Afin de suivre la courbe, il faut que la résistance équivalente soit des valeurs tel que :

$$R_{eq} = (1 - \alpha)^2 \cdot R \quad (IV.7)$$

Pour commencer :

$$\frac{E^2}{R_{eq}} = \frac{V_c^2}{R} \quad (IV.8)$$

Avec :

$$VD_c = E \quad (IV.9)$$

$$V_c = \frac{E}{(1 - \alpha)} \quad (IV.10)$$

Donc on obtient :

$$\frac{E^2}{R_{eq}} = \frac{E}{(1 - \alpha)^2 \cdot R} \quad (IV.11)$$

Ce qui nous ramène à la relation entre R et R_{eq} :

$$R_{eq} = (1 - \alpha)^2 \cdot R \quad (IV.12)$$

III. Simulation de l'émulateur sous Matlab :

Le schéma de simulation réalisé sous Matlab de l'émulateur est représenté par la figure IV.3.

On observe deux blocs principaux :

- À l'intérieur du bloc de gauche, il y'a la station réalisée au chapitre II
- Dans le deuxième bloc on trouve le convertisseur étudié au chapitre III

Dans cet émulateur la grandeur a régulé est la puissance, son profil est récupéré il sert de référence pour le régulateur afin de contrôler le hacheur multiniveaux qui joue le rôle de l'émulateur.

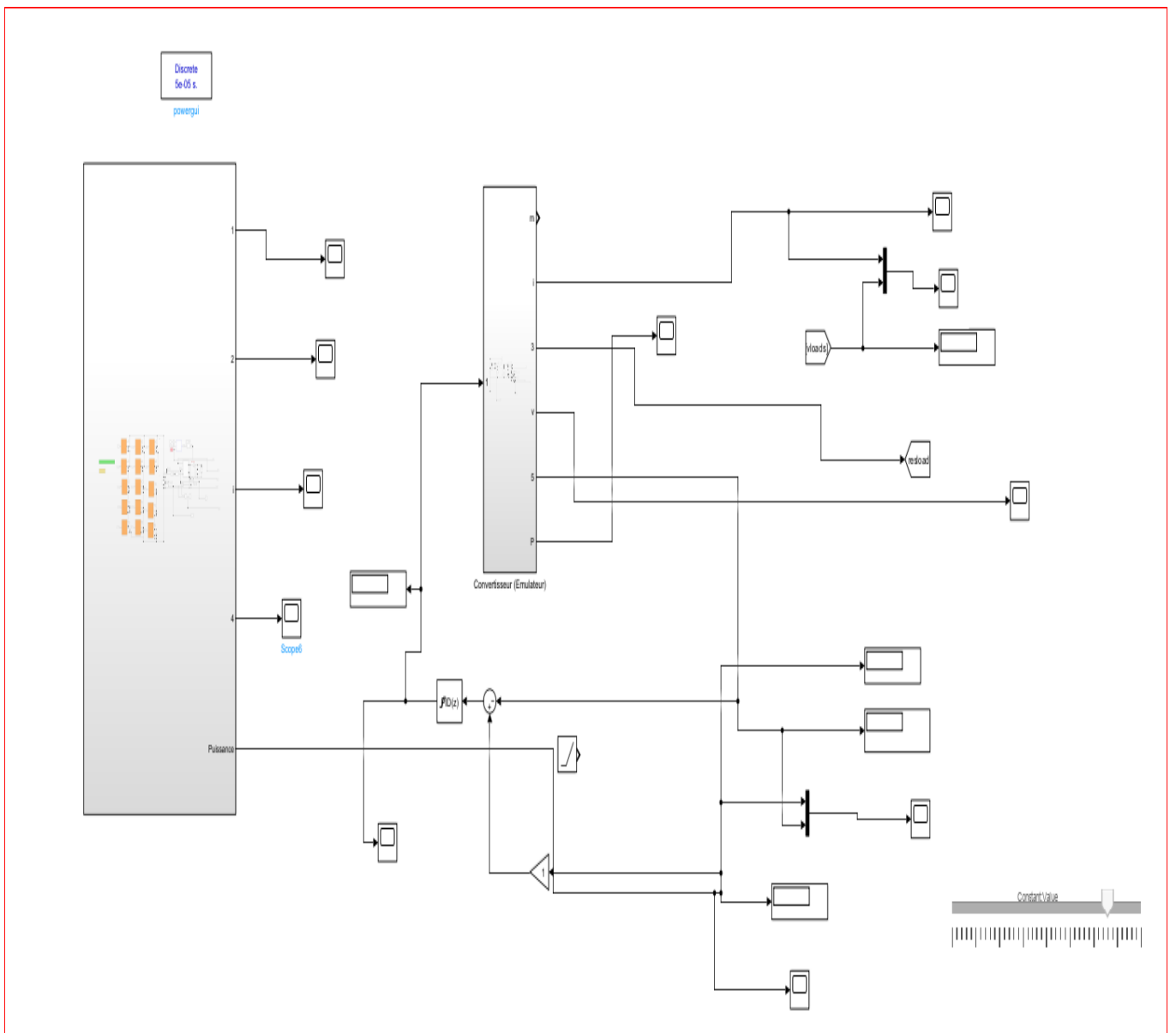


Figure.IV.2 : Le schéma de simulation de l'émulateur sous Matlab

Après avoir réalisé la simulation nous avons fixée divers profils de radiation, Les résultats sont

présentés sur les graphes ci-dessous :

- **Profil 1 :**

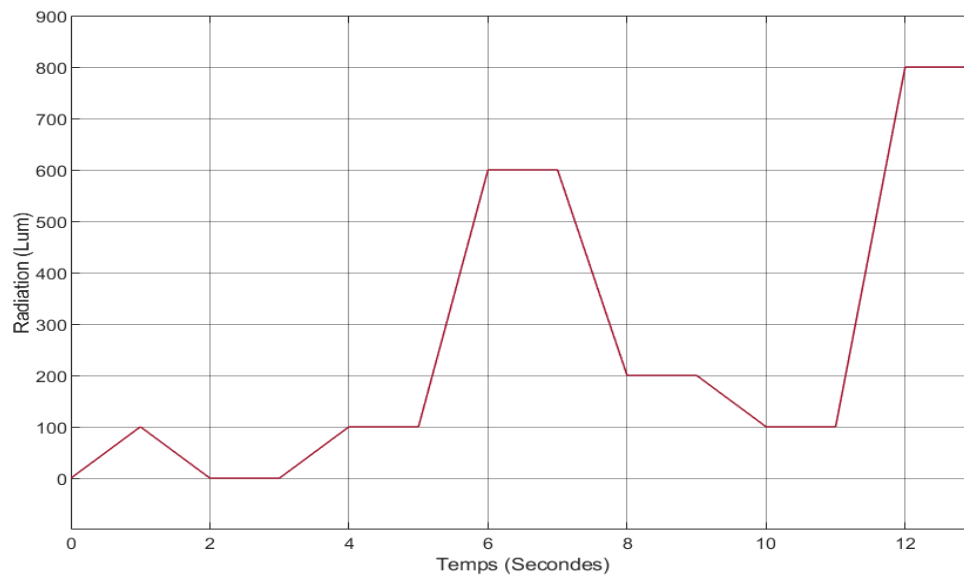


Figure.IV.3 : Radiation par rapport au temps

Interprétation des résultats de la Figure IV.4 :

La radiation montre des variations significatives au cours du temps, avec des périodes de stabilité suivies de hausses et de chutes abruptes. Les fluctuations pourraient être dues à des variations dans la source de radiation ou à des modifications des conditions environnementales.

- **Profil 2 :**

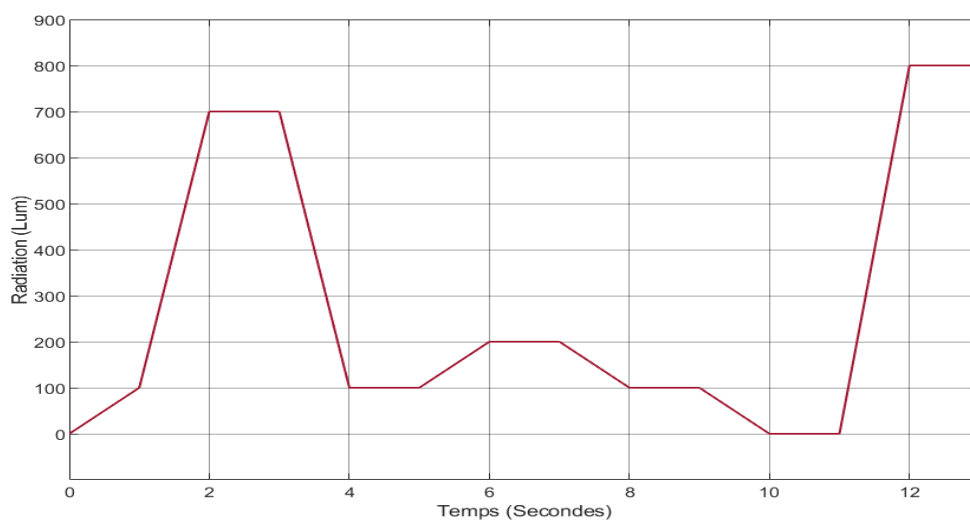


Figure.IV.4 : Radiation par rapport au temps

Interprétation des résultats de la Figure IV.5 :

Le graphique montre des variations importantes de la radiation, avec des phases de montée rapide, de stabilisation, de chute brusque et de reprise soudaine

Remarque :

Comme dans le deuxième chapitre les perturbations sont dû aux divers profils de radiations qui se résume à :

- La durée de l'ensoleillement et la température ;
- L'inclinaison et l'orientation du panneau ;
- Les conditions météorologiques ;
- L'effet de l'ombre.

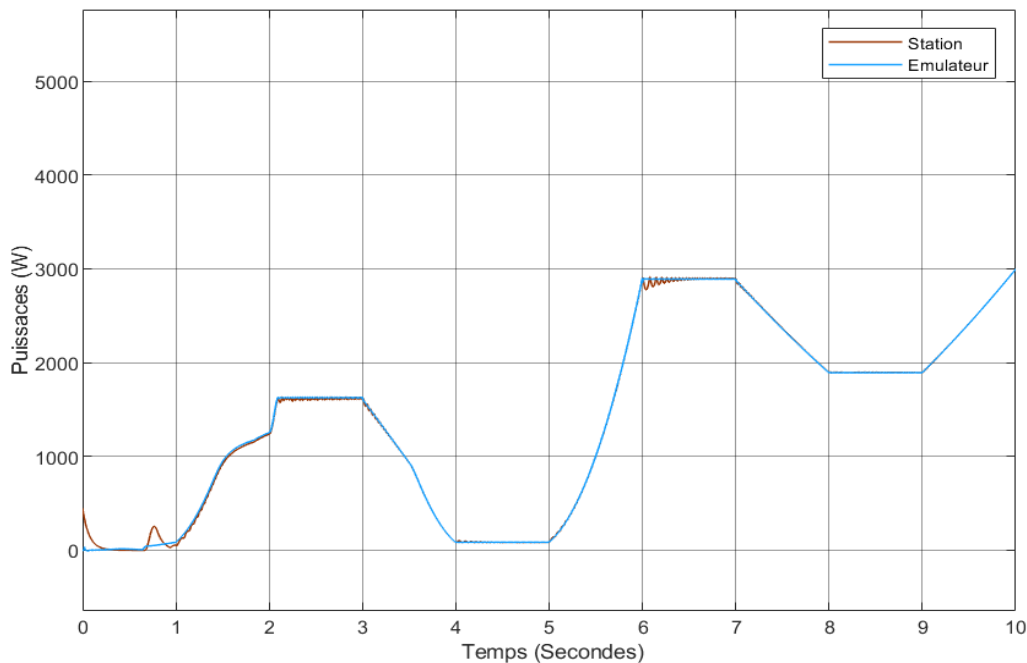


Figure.IV.5 : La puissance débitée par rapport au temps.

Interprétation des résultats de la Figure IV.5 :

L'émulateur semble bien reproduire le comportement de la station. Les petites différences observées sont mineures et pourraient être dues à des fluctuations. La correspondance entre les deux courbes est très précise, ce qui indique que l'émulateur est capable de simuler les variations de puissance de la station de manière précise.

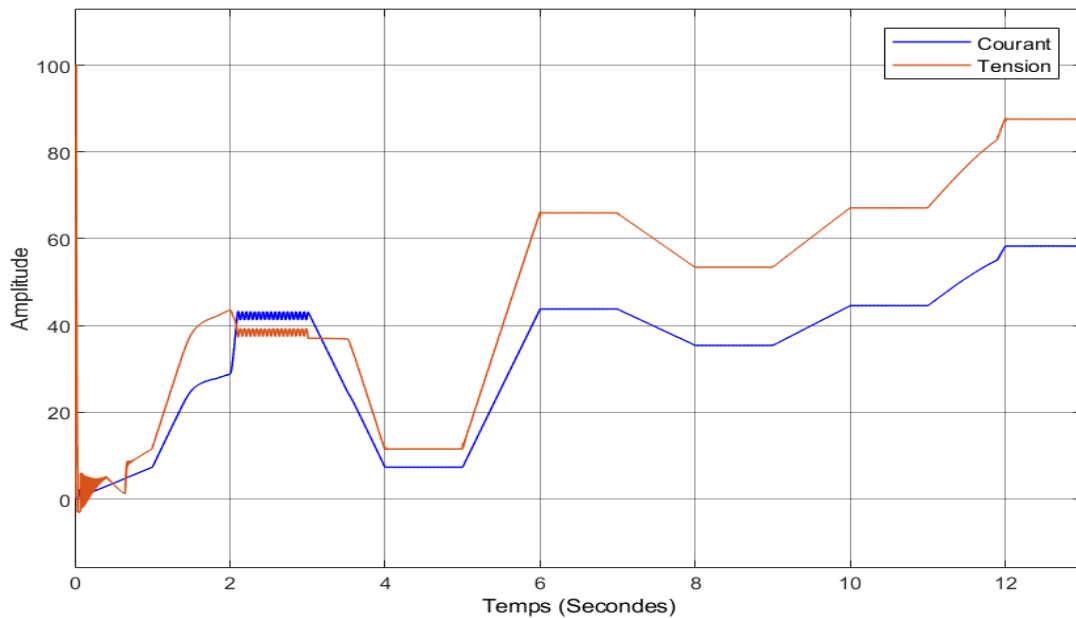


Figure.IV.6 : Le courant débité et la tension par rapport au temps.

Interprétation des résultats de la Figure IV.6 :

La courbe de la tension (orange) montre une montée plus rapide et des niveaux d'amplitude plus élevés par rapport à la courbe du courant (bleu), qui présente des variations plus douces et inférieures en amplitude tout au long de la période observée.

Conclusion :

Ce chapitre démontre l'efficacité d'un émulateur photovoltaïque basé sur un convertisseur DC/DC pour reproduire les caractéristiques d'un panneau solaire réel. L'émulateur simule le comportement des cellules solaires en temps réel, en tenant compte des variations de l'irradiance et de la température. Cela est crucial pour tester et optimiser les équipements tels que les onduleurs dans des conditions contrôlées. Le fonctionnement de l'émulateur est assuré par une régulation précise du hacheur, qui ajuste son impédance pour suivre fidèlement la courbe caractéristique des cellules solaires. Cette approche garantit une simulation réaliste et fiable des performances d'un système PV, facilitant ainsi le développement et l'évaluation des technologies photovoltaïques.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Après une exploration approfondie des émulateurs photovoltaïques, il est évident que ces outils sont indispensables pour la simulation et l'optimisation des systèmes photovoltaïques. En définissant ce qu'est un émulateur et en examinant différentes méthodes et classifications, nous avons compris leur importance dans la conception et la mise en œuvre des systèmes PV. Ils offrent une flexibilité et une précision précieuses, permettant aux chercheurs, ingénieurs et concepteurs de tester et d'améliorer diverses configurations de manière efficace et économique. En fin de compte, les émulateurs photovoltaïques apportent de nombreux avantages : une meilleure compréhension du comportement des systèmes, une optimisation des performances et une réduction des coûts de développement. En exploitant pleinement ces outils, nous pouvons favoriser une adoption plus large et efficace de l'énergie solaire.

Les cellules photovoltaïques sont essentielles pour produire de l'énergie solaire, disponibles en plusieurs types et fonctionnant selon différents principes. Comprendre leurs effets, modules et circuits équivalents est crucial pour optimiser l'efficacité des systèmes. Bien que l'énergie photovoltaïque soit une source propre et renouvelable, elle présente des inconvénients, comme des coûts initiaux élevés. Le dimensionnement d'un système de 10 kW doit considérer les besoins énergétiques et l'ensoleillement disponible. En Algérie, le prix des panneaux varie selon la qualité et l'installation. Les simulations montrent que divers facteurs influencent la performance des panneaux, avec des augmentations de puissance et de tension au fil du temps. Le rapport cyclique présente une variabilité significative, mais sa valeur moyenne reste plus stable et moins affectée par les fluctuations à long terme.

L'analyse du convertisseur TL-CNIBB à trois niveaux est une solution robuste et adaptable pour des applications nécessitant une gestion précise de la tension, avec des transitions fluides entre les différents modes opérationnels. Les résultats de la simulation soulignent la pertinence des stratégies de modulation et de transition, tout en ouvrant la voie à des améliorations futures pour optimiser les performances. L'application de la commande sous Matlab/Simulink pour le convertisseur Buck/Boost permet de visualiser et d'analyser les variations de la tension de sortie en fonction du rapport cyclique α . Les résultats révèlent des variations significatives de la tension de sortie, des oscillations notables et des phénomènes tels que la "Dead Zone". L'étude des courbes de la tension de sortie, du rapport cyclique, de la température, et des tensions d'entrée des transistors f11 et f21 met en évidence des comportements dynamiques et des changements d'état importants pour l'optimisation des performances.

En simulant le comportement des cellules solaires en temps réel, l'émulateur prend en compte les

Conclusion générale

variations d'irradiance et de température, essentielles pour tester et optimiser les équipements comme les onduleurs dans un environnement contrôlé. La précision de la régulation du hacheur, qui ajuste son impédance, permet de suivre avec exactitude la courbe caractéristique des cellules solaires. Cette méthode assure une simulation réaliste et fiable des performances des systèmes photovoltaïques, facilitant ainsi leur développement et leur évaluation.

La simulation sous Matlab a permis de démontrer que l'émulateur est capable de reproduire de manière fidèle les variations de radiation et de puissance d'une station réelle. Les résultats obtenus sont cohérents avec les attentes et valident l'efficacité de l'émulateur dans la modélisation des conditions réelles.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] Bhargav D.Patel and Ankur Rana « A Pole-placement Approach for Buck Converter based PV Array Emulator» Uka Tarsadia University, Bartoli, Surat, India (ICPEICES-2016).
- [2] Maria Carmela Di Piazza • Gianpaolo Vitale «Photovoltaic Sources Modeling and Emulation» 2013.
- [3] J. Prasanth Rama, Himanshu Manghania, Dhanup S. Pillaia, T. Sudhakar Babua, Masafumi Miyatakeb, N. Rajasekar « Analysis on solar PV emulators: A review » journal, Renewable and Sustainable Energy (2018).
- [4] Benoussad Melhir « Etude et simulation d'un émulateur photovoltaïque » Mémoire de Master, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU 2017.
- [5] Hayrettine Can, « Model of a photovoltaic panel emulator in Matlab-SIMULINK » université Firat, Turquie. 2006
- [6] San Luis Obispo, « Photovoltaic emulator adaptable to irradiance, temperature and panel-specific I-V curve», the Faculty of California Polytechnic State University. 2011
- [7] Hayrettine Can, « Model of a photovoltaic panel emulator in Matlab-SIMULINK » université Firat, Turquie.
- [8] <https://www.climamaison.com/lexique/cellule-photovoltaique.htm>
- [9] <https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaiques>.
- [10] www.planete-energies.com/fr/media/article/cellule-photovoltaique-comment-ca-marche.
- [11] Alonso Corinne « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie ». Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2003.
- [12] Mayouf Somia, "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec une commande vectorielle", Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf –Msila, Juin 2016.
- [13] Abdelkarim GHEZAL "ASPECTS TECHNIQUES DES PROJETS SOLAIRES PV RACCORDÉS AU RÉSEAU "
- [14] Djamila Rekioua "Etude d'une centrale hybride photovoltaïque " Journal of Renewable Energie, universite Bejaia, December 2008
- [15] M. Angel Cid Pastor, conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques», thèse de doctorat, université de Toulouse, 29 septembre 2006

Références Bibliographiques

[16] <https://www.lemagit.fr/definition/MATLAB>,

[17] IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 36, NO. 12, DECEMBER 2021

[18] Bhargav D.Patel and Ankur Rana « A Pole-placement Approach for Buck Converter based PV Array Emulator» Uka Tarsadia University, Bartoli, Surat, India (ICPEICES-2016).

Résumé :

La consommation mondiale d'électricité a fortement augmenté avec le développement industriel, des transports et des communications, reposant surtout sur des sources non renouvelables (charbon, pétrole, gaz naturel, uranium). Cette dépendance comporte des risques d'épuisement et de fluctuations de prix, notamment pour le pétrole. La production d'électricité a aussi un impact environnemental majeur, contribuant aux émissions de gaz à effet de serre et au changement climatique, ce qui incite à explorer les énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire. Bien qu'abondante, l'énergie solaire est limitée par le coût élevé et les défis techniques des panneaux photovoltaïques.

Dans cette étude, l'état des émulateurs photovoltaïques et leurs circuits ont été évoqués. Ainsi que la modélisation des cellules photovoltaïques et l'analyse d'un convertisseur TL-CNIBB à trois niveaux et les modes Buck/Boost pour comprendre leurs stratégies de modulation. Enfin, la simulation des composants de l'émulateur, en se focalisant sur le modèle des cellules photovoltaïques.

Mot clés : Consommation mondiale d'électricité, Développement industriel, transports, communications, Sources non renouvelables, Impact environnemental, Énergies renouvelables.

Abstract :

Global electricity consumption has increased significantly with industrial development, transport and communications, relying mainly on non-renewable sources (coal, oil, natural gas, uranium). This dependence carries risks of exhaustion and price fluctuations, particularly for oil. Electricity production also has a major environmental impact, contributing to greenhouse gas emissions and climate change, which encourages the exploration of renewable energies, particularly solar energy. Although abundant, solar energy is limited by the high cost and technical challenges of photovoltaic panels.

In this study, the state of photovoltaic emulators and their circuits were discussed. As well as modeling photovoltaic cells and analyzing a three-level TL-CNIBB converter and Buck/Boost modes to understand their modulation strategies. Finally, the simulation of the emulator components, focusing on the photovoltaic cell model.

Keywords: Global electricity consumption, Industrial development, transport, communications, Non-renewable sources, Environmental impact, Renewable energies.